

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**SU ÜSTÜ SAVAŞ GEMİSİNDE
NATO F-76 DİZEL YAKITLI
KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMİ
TASARIMI VE ANALİZİ**

Cüneyt EZGİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.05.00.

Sunuş Tarihi : 07.09.2009

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

Bornova- İZMİR

DOKTORA TEZ SAVUNMA SINAVI JÜRİ TUTANAĞI

Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN danışmanlığında Cüneyt EZGİ tarafından hazırlanan **“Su Üstü Savaş Gemisinde NATO F-76 Dizel Yakıtlı Katı Oksitli Yakıt Pili Sistemi Tasarımı ve Analizi”** adlı doktora tezini değerlendirmek ve adayı tez savunmasına tabi tutmak üzere, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nca oluşturulan jüri 07/09/2009 tarihinde saat 10.00'da Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN Başkanlığında toplanmıştır.

Jüri üyeleri tarafından hazırlanan ve ekte sunulan raporlar ayrıntılı şekilde tartışılmış ve aday tez savunma sınavına alınmıştır. Sonuçta tez oybirliği/oyçokluğu ile **başarılı bulunarak kabul edilmiştir/ başarısız bulunarak red edilmiştir/ düzeltme yapılmasına karar verilmiştir.**

Jüri Başkanı

Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN

Üye

Prof.Dr. Necdet ÖZBALTA

Üye

Doç.Dr. Hayati OLGUN

Üye

Doç.Dr. Dilek KUMLUTAŞ

Üye

Yrd.Doç.Dr. Uğur ŞİMŞİR

ÖZET

SU ÜSTÜ SAVAŞ GEMİSİNDE NATO F-76 DİZEL YAKITLI KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMİ TASARIMI VE ANALİZİ

EZGİ, Cüneyt

Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

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

Eylül 2009, 383 sayfa

Katı oksitli yakıt pilleri, yüksek sıcaklıklarda çalışan seramik tipte yakıt pilleridir. Yakıt pilleri, su üstü gemilerde elektrik gücü üretimi için büyük bir potansiyel sağlar. Günümüzde savaş gemileri, F-76 deniz dizel yakıtını kullanmaktadır. Bu çalışmada, bir su üstü savaş gemisinde 120 kW güçte bir yardımcı makina olarak F-76 dizel yakıtlı katı oksitli yakıt pili sistemi tasarlanmış ve termodinamik analizi yapılmıştır. Analizde gerçek gazlara ait termodinamik özellikler, Java programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yakıt pili sistemi, dizel-elektrik jeneratör grubu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sistemin diğer bileşenleri ile ısı değiştiricilerin tasarımları yapılmıştır.

Bu çalışmada, NATO F-76 dizel yakıtlı katı oksitli yakıt pili sisteminde kullanılan ototermal reaktörün kimyasal kinetik modellemeye dayalı optimizasyonu yapılmıştır. Termodinamik hesaplamalar, model yakıt olarak n-tetradecane ($C_{14}H_{30}$) kullanılarak, ticari hesaplama aracı

VI

Comsol Reaction Engineering Lab. programı ile yapılmıştır. Çalışmada iki tip reaktör modeli seçilmiştir. Sabit hacimli sürekli karıştırmalı tank reaktörü (CSTR) ve boru tipi reaktör (PFR). Gaz fazındaki reaktant akışkanlar, ideal gaz kabul edilmiştir.

NATO F-76 dizel yakıtının dönüştürülmesi ile elde edilen hidrojen zengin gaz ile çalışan üç boyutlu izotermal bir SOFC modeli geliştirilmiştir. Modelde, elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlara bağlı momentum, kütle ve yük taşınımı kabul edilmiştir. Model, sonlu elemanlar metoduna dayalı kısmi diferansiyel denklem çözücüsü COMSOL 3.5'da uygulanmıştır. Model sonuçları, literatürden alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yakıt pilleri, Katı oksitli yakıt pili sistemi, Dizel yakıtlar, Termodinamik analiz, Yakıt dönüştürücü, Modelleme

ABSTRACT**DESIGN AND ANALYSIS OF
SOLID OXIDE FUEL CELL SYSTEM
ONBOARD SURFACE WARSHIP**

EZGİ, Cüneyt

Doctoral Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN

September 2009, 383 pages

Solid oxide fuel cells (SOFCs) are a ceramic type of fuel cell operating at elevated temperatures. Fuel cells provide great potential for electric power generation on-board surface ships. Today naval ships use NATO F-76 marine diesel fuel. In this study, A 120 kW F-76 diesel-fueled solid oxide fuel cell system (SOFC) as an auxiliary engine on-board a naval surface ship was designed and thermodynamically analyzed. In analysis, thermodynamic properties of real gases were calculated with using Java program. Fuel cell system was compared to diesel- electric generator set in a case surface warship. In addition, other components of system and heat exchangers were designed.

In this study, Autothermal reformer (ATR) in NATO F-76 diesel fuelled solid oxide fuel cell system was optimized based on chemical kinetic modeling. ATR is the core of the fuel processing system. Our analysis determined reactor or catalyst volume based on chemical kinetic modeling of NATO F-76 for naval fuel cells. The thermodynamic calculations were made with a commercial calculation tool (Comsol

VIII

Reaction Engineering Lab.) using n-tetradecane ($C_{14}H_{30}$) as model fuel and an enhanced set of considered species and thermodynamic data. In this study, reactor type are the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) with constant volume and Plug-flow reactor (PFR). Reacting fluids in the gas phase are assumed to behave as ideal gases.

A three-dimensional isothermal model of an SOFC operating with reformed NATO F-76 diesel fuel was developed. Momentum, mass and charge transport coupled with electrochemical and chemical reactions were considered. The model was implemented in COMSOL 3.5, a partial differential equation solver based on a finite element method. Results of model compared to experimental results obtained from literature.

Keywords: Fuel cells, Solid oxide fuel cell system, Diesel fuels, Reformer, Thermodynamic analysis, Modelling

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince; mensubu olmaktan gurur ve onur duyduğum Deniz Kuvvetleri Komutanlığına, yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN'a, tez değerlendirme jürisine katılarak katkıda bulunan, Sayın Prof.Dr. Necdet ÖZBALTA, Sayın Doç.Dr. Dilek KUMLUTAŞ, Doç.Dr. Hayati OLGUN, Yrd.Doç.Dr. Uğur ŞİMŞİR'e, çalışmalarım süresince yardımlarını hiç eksik etmeyen arkadaşım Mak.Y.Müh. Özer ÖĞÜÇLÜ'ye, her zaman bana destek veren eşim Mak.Müh. Azize EZGİ'ye, sonsuz sabır gösteren çocuklarım Cüneyt Mert ve Zeynep Beste'ye teşekkür ederim. Emeklerini ve desteklerini tüm yaşamımda hissettiğim ve hissedeceğim; anneme, babama ve kardeşlerime de derin sevgi ve şükranlarımla...

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XXI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XXIX
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XXXVII
KISALTMALAR.....	XLII
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1 Ege Üniversitesinde Yakıt Pili Projeleri	5
2.2 Savaş Gemisinde Yakıt Pili Uygulamaları.....	6
2.2.1 Isıl verim	11

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.2.2 Emisyon	12
2.2.3 Gürültü	16
2.3 Gemilerde Yakıt Pili Sistemlerinin Kullanımı ile İlgili Esaslar	17
3. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ.....	19
3.1 Yakıt Pili	19
3.2 Katı Oksitli Yakıt Pili	23
3.2.1 Malzemeler	28
3.3 Katı Oksitli Yakıt Pillerinin Termodinamiği	28
3.3.1 Kimyasal reaksiyon.....	30
3.3.2 Nernst denklemi	31
3.3.3 Elektrokimyasal reaksiyon ısısı	32
3.4 Polarizasyonlar.....	32
3.4.1 Konsantrasyon aşırı potansiyeli	34
3.4.2 Aktivasyon aşırı potansiyeli.....	35
3.4.3 Omik aşırı potansiyeli.....	36

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

3.5 Gerçek Hücre Voltajı	36
4. YAKIT VE YAKIT DÖNÜŞÜMÜ	37
4.1 Hidrojen	37
4.2 Petrol	40
4.3 F-76 Deniz Dizel Yakıtı	40
4.4 Hidrojen Yerine F-76 Dizel Yakıtı Depolama	43
4.5 Yakıt Pili ve Yakıt Dönüştürücü Katalizör Toleransları	43
4.5.1 Kükürt etkileri	44
4.5.2 Karbonmonoksit etkileri	44
4.5.3 Karbon oluşum etkileri	45
4.6 Yakıt Dönüşümü	45
4.6.1 Buharlı dönüşüm (SR)	45
4.6.2 Kısmi oksidasyon (POX)	46
4.6.3 Ototermal dönüşüm (ATR)	46

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. TERMODİNAMİK DENKLEMLER.....	48
5.1 Saf Maddelerin Hal Denklemi	48
5.2 İki Parametre Korelasyonu	48
5.3 Üç Parametre Korelasyonu	49
5.4 Kübik Hal Denklemleri.....	49
5.5 Genelleştirilmiş Benedict-Webb-Rubin Denklemleri.....	50
5.6 Entalpi	52
5.7 Entropi	53
5.8 Viskozite	54
5.8.1 Düşük basınçlı gaz viskozitesi	54
5.8.2 Düşük basınçta gaz karışımlarının viskozitesi.....	55
5.8.3 Sıvı viskozitesi	56
5.9 Isıl İletkenlik	56
5.9.1 Gazların ısıl iletkenliği.....	56

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.9.2 Düşük basınçlı gaz karışımlarının ısı iletkenliği.....	57
5.9.3 Sıvıların ısı iletkenliği.....	58
5.10 Yüzey Gerilimi.....	59
5.10.1 Gazların yüzey gerilimi.....	59
5.10.2 Karışımların yüzey gerilimi	60
5.11 Programlama Dili.....	60
6. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ.....	62
6.1 Fiziksel Özellikler	62
6.2 Sistem Dengesinin Kurulması.....	63
6.3 Yakıt Pili ve Sistem Verimi	84
6.4 Hücre Alanı ve Dizin Sayısının Belirlenmesi	89
6.5 Sistemin Diğer Bileşenleri	93
6.5.1 Kükürt arıtıcı	93
6.5.2 Yakıt pompası, hava fanı ve su pompası.....	96
6.5.3 Güç koşullandırma ve enerji depolama.....	99

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.6 Dizel Motorlu Yardımcı Makina ile Karşılaştırma.....	100
7. ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI	103
7.1 F-76 Dizel Ön Isıtıcısı (ID-1)	107
7.2 Termal NATO F-76 Dizel Evaporatörü (ID-2).....	115
7.3 Elektrikli F-76 Dizel Evaporator (ID-2)	137
7.4 Isı Değiştirici-3(ID-3)	142
7.5 Isı Değiştirici-4 (ID-4).....	151
7.6 Isı Değiştirici-5 (ID-5).....	160
7.7 Isı Değiştirici-6 (ID-6).....	166
7.8 Isı Değiştirici-7 (ID-7).....	173
8. KİNETİK MODELLEMeye DAYALI REAKTÖR TASARIMI	182
8.1 Kuramsal Temeller	184
8.2 Kinetik Parametreler	185

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.3 Ototermal Yakıt Dönüşüm Reaksiyonları	186
8.4 Reaktör Koşulları	189
8.4.1 Sürekli karıştırmalı tank reaktörü (CSTR).....	193
8.4.2 Boru tipi reaktör (Piston akışlı reaktör)	201
9. KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ MULTİFİZİK MODELLEMESİ	205
9.1 Yük Dengesi.....	207
9.1.1 Elektronik yük dengesi.....	211
9.1.2 İyonik yük dengesi	213
9.1.3 Butler-Volmer yük transfer kinetiği.....	214
9.2 Çok Bileşenli Taşınım.....	216
9.2.1 Gaz kanallarında ve elektrotlarda taşınım.....	216
9.3 Gaz Akış Denklemleri.....	220
9.3.1 Açık kanallarda gaz akışı	220
9.3.2 Gözenekli elektrotlarda gaz akışı	221

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
9.3.3 Gaz ve gaz karışımlarının viskozitesi	225
9.4 Model Parametreleri ve Kabuller.....	227
9.5 Çözüm Algoritması.....	234
9.5.1 Altbölge ayarları- conductive media dc (elektronik)	248
9.5.2 Sınır koşulları-conductive media dc (elektronik)	250
9.5.3 Altbölge ayarları- conductive media dc (iyonik)	250
9.5.4 Sınır koşulları- conductive media dc (iyonik)	251
9.5.5 Altbölge ayarları- weakly compressible navier-stokes	251
9.5.6 Sınır koşulları- weakly compressible navier-stokes	252
9.5.7 Altbölge ayarları- maxwell-stefan diffusion and convection (katot).....	252
9.5.8 Sınır koşulları- maxwell-stefan diffusion and convection (katot).....	254
9.5.9 Altbölge ayarları- maxwell-stefan diffusion and convection (anot).....	254
9.5.10 Sınır koşulları- maxwell-stefan diffusion and convection (anot).....	255
9.5.11 Çözüm, son işlem ve görselleştirme	256
9.6 Deneysel Çalışma İle Model Karşılaştırması.....	267

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
10. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	271
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	275
EKLER	283
EK 1 LKmixTable.java	283
EK 2 reactionTable.java.....	291
EK 3 Gmix.java.....	298
EK 4 GmixTable.java.....	326
EK 5 steamTable.java	333
ÖZGEÇMİŞ.....	339

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Yakıt pili temel yapısı.....	2
Şekil 2.1 Farklı tahrik mekanizması için verimler	12
Şekil 2.2 Farklı teknolojilerde NOx emisyonu	13
Şekil 2.3 Tipik SOx emisyonları.....	15
Şekil 2.4 Farklı tahrik mekanizması için CO ₂ emisyonu	15
Şekil 2.5 Farklı mahaller için gürültü seviyeleri.....	16
Şekil 3.1 Yakıt pili	20
Şekil 3.2 Yakıt pilleri çalışma prensipleri.....	22
Şekil 3.3 Katı oksitli yakıt pilinin elektrokimyasal prensibi.....	23
Şekil 3.4 Katı oksitli yakıt pilinin temel prensibi	24
Şekil 3.5 Borulu katı oksitli yakıt pili	25
Şekil 3.6 Düzlemsel katı oksitli yakıt pili	25

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.7 Anot, katot veya elektrolit destekli tasarımlar.....	27
Şekil 3.8 Tersinir yakıt pili, enerji dengesi ve sistem sınırı.....	29
Şekil 3.9 Katı oksitli yakıt pili çalışma prensibi.....	31
Şekil 3.10 Polarizasyon tipleri.....	33
Şekil 3.11 Polarizasyonun hücre voltajına etkisi.....	34
Şekil 4.1 Tipik bir F-76 distilasyon eğrisi.....	41
Şekil 5.1 Java arayüzü.....	61
Şekil 6.1 F-76 Dizel yakıtlı yakıt pili sistemi akış şeması.....	64
Şekil 6.2 HSC CHEMISTRY arayüzü.....	69
Şekil 6.3 Buhar/Karbon oranının kok oluşumuna etkisi.....	72
Şekil 6.4 Polarizasyon eğrisi.....	86
Şekil 6.5 Bir hücre ve levha.....	90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.6 Bir dizin	92
Şekil 6.7 Farklı bağıntılar için sürtünme katsayısı.....	95
Şekil 6.8 Döner ekipmanların verim performansı.....	97
Şekil 6.9 Güç koşullandırma.....	99
Şekil 6.10 Dizel-elektrik jeneratör grubu.....	100
Şekil 7.1 Dizel ön ısıtıcısı (ID-1)	107
Şekil 7.2 Dizel evaporator (ID-2).....	115
Şekil 7.3 Isı değişim prosesi	115
Şekil 7.4 Dizel yakıt buharlaşma süresi-yüzey sıcaklığı.....	138
Şekil 7.5 Isı değiştirici (ID-3)	142
Şekil 7.6 Kompakt ısı değiştirici (ID-3).....	142
Şekil 7.7 Isı değiştirici (ID-4)	151

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.8 Kompakt ısı değiştirici (ID-4)	153
Şekil 7.9 Isı değiştirici (ID-5)	160
Şekil 7.10 Isı değiştirici (ID-6)	166
Şekil 7.11 Isı değiştirici (ID-7)	173
Şekil 7.12 Kompakt ısı değiştirici (ID-7)	173
Şekil 8.1 Ototermal yakıt dđnüşüm prosesinde ana reaksiyon yolları...	183
Şekil 8.2 Ototermal dđnüşüm sistem şeması	194
Şekil 8.3 CSTR reaktör	195
Şekil 8.4 Maksimum H ₂ konsantrasyonu- GHSV	197
Şekil 8.5 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 10 litre) ..	198
Şekil 8.6 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 11 litre) ..	198
Şekil 8.7 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 12 litre) ..	199

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 8.8 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 13 litre) .	199
Şekil 8.9 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 14 litre) .	200
Şekil 8.10 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 15 litre)	200
Şekil 8.11 Tüm ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 14 litre)	201
Şekil 8.12 Boru tipi reaktör	201
Şekil 8.13 Reaktant akış debisi-reaktör hacmi (log-log).....	203
Şekil 8.14 Ana ürün akış debisi-reaktör hacmi	204
Şekil 8.15 Tüm maddelerin akış debisi-reaktör hacmi (log-log)	204
Şekil 9.1 Katı oksitli yakıt pili hücresi.....	205
Şekil 9.2 Katı oksitli yakıt pili prensipleri, fonksiyonları	207
Şekil 9.3 Voltaj potansiyeli için şelale benzeşimi.....	208
Şekil 9.4 Hücre ve elektrot voltajı ölçümü.....	209

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 9.5 Gözenekli anot yapısı	210
Şekil 9.6 Düzlemsel yakıt pili akım yolu.....	212
Şekil 9.7 Anot ve reaksiyon bölgesi	214
Şekil 9.8 (a) Düşük (b) yüksek akış yataklı gözenekli ortam	223
Şekil 9.9 Katı oksitli hücre modeli	228
Şekil 9.10 Yakıt hücresi önden görünüş	229
Şekil 9.11 Yakıt hücresi yandan görünüş	230
Şekil 9.12 Yakıt hücresi akış yönleri	230
Şekil 9.13 Ni/YSZ sıcaklığa bağlı iletkenliği	232
Şekil 9.14 8YSZ sıcaklığa bağlı iyonik iletkenliği	232
Şekil 9.15 Yakıt pili hücresi modelleme.....	236
Şekil 9.16 Yakıt pili hücresi meshi.....	237

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 9.17 Yakıt pili hücresi 3 boyutlu	238
Şekil 9.18 Yakıt hücresi sınırları.....	249
Şekil 9.19 Yakıt pili modeli	257
Şekil 9.20 Katottaki oksijen dağılımı.....	258
Şekil 9.21 Katottaki azot dağılımı.....	258
Şekil 9.22 Anottaki hidrojen dağılımı.....	259
Şekil 9.23 Anottaki su dağılımı.....	259
Şekil 9.24 Anottaki karbonmonoksit dağılımı	260
Şekil 9.25 Anottaki karbondioksit dağılımı	260
Şekil 9.26 Anottaki azot dağılımı.....	261
Şekil 9.27 Anot ve katottaki hız dağılımı	261
Şekil 9.28 Polarizasyon eğrisi	262

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 9.29 Sıcaklığın hücre performansına etkisi	263
Şekil 9.30 Gözenekliliğin hücre performansına etkisi.....	264
Şekil 9.31 Akım yoğunluğu	265
Şekil 9.32 Güç çıkışı- akım yoğunluğu	266
Şekil 9.33 Güç çıkışı-hücre voltajı	267
Şekil 9.34 Deneysel hücre performansları (a) 800 °C (b) 900 °C.....	269
Şekil 9.35 Modellenen hücre performansı (Yakıt no:F4)	270
Şekil 9.36 Modellenen hücre performansı (Yakıt no:F5)	270

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Savaş gemisi tipleri	6
Çizelge 2.2 Savaş gemileri için performans aralıkları	6
Çizelge 2.3 MARPOL Ek VI NO _x emisyon limitleri	14
Çizelge 3.1 Yakıt pilinin farklı tipleri ve karakteristikleri	21
Çizelge 3.2 Borulu ve düzlemsel SOFC avantaj ve dezavantajları	26
Çizelge 3.3 Düzlemsel yakıt pili konfigrasyon özellikleri	27
Çizelge 3.4 Katı oksitli yakıt pilinde kullanılan malzemeler	28
Çizelge 4.1 Hidrojenin özellikleri	37
Çizelge 4.2 Hidrojen depolama karşılaştırması	39
Çizelge 4.3 F-76 dizel yakıtı özellikleri	41
Çizelge 4.4 F-76 dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	42
Çizelge 5.1 Kübik hal denklemleri için Peng-Robinson sabitleri	49

XXX

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.2 Lee-Kesler sabitleri.....	51
Çizelge 6.1 Dizel yakıt karışımı	62
Çizelge 6.2 Ototermal yakıt dönüştürücüden çıkan gaz	73
Çizelge 6.3 Yakıt pili anot çıkışı	75
Çizelge 6.4 Akışkan özellikleri.....	81
Çizelge 6.5 İşletme parametreleri	86
Çizelge 6.6 Alt ısı değerler	87
Çizelge 6.7 Yakıt pili sisteminden çevreye atılan gazlar.....	89
Çizelge 6.8 Bağlantı özellikleri	92
Çizelge 6.9 Sistem performansı özeti	92
Çizelge 6.10 Sistem bileşenleri basınç düşümleri	96
Çizelge 6.11 Dizel motor spesifikasyonu	100

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6.12 Jeneratör spesifikasyonu	101
Çizelge 6.13 Emisyon faktörleri	101
Çizelge 7.1 Östenitik paslanmaz çelik borunun özellikleri.....	104
Çizelge 7.2 Nikel tabanlı alaşımlı borunun nominal kompozisyonu (% ağırlıkça)	104
Çizelge 7.3 Nikel tabanlı alaşımlı borunun özellikleri.....	104
Çizelge 7.4 Amerikan kaynak derneği (AWS) spesifikasyonları	105
Çizelge 7.5 ASTM spesifikasyonları	105
Çizelge 7.6 Isı değiştirici malzemeleri.....	105
Çizelge 7.7 Gövde borulu ısı değiştiricilerde önerilen hızlar	106
Çizelge 7.8 Akışkan özellikleri	108
Çizelge 7.9 Gaz debileri.....	116
Çizelge 7.10 Akışkan özellikleri	118

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.11 Akışkan özellikleri.....	124
Çizelge 7.12 Akışkan özellikleri.....	126
Çizelge 7.13 Akışkan özellikleri.....	133
Çizelge 7.14 Rezistans güç ve uzunluğu	141
Çizelge 7.15 Isıtıcı özellikleri	141
Çizelge 7.16 Akışkan özellikleri.....	143
Çizelge 7.17 Akışkan özellikleri.....	144
Çizelge 7.18 Yüzey karakteristikleri	145
Çizelge 7.19 Akışkan özellikleri.....	152
Çizelge 7.20 Yüzey karakteristikleri (ID-4)	153
Çizelge 7.21 Gaz debileri.....	161
Çizelge 7.22 Akışkan özellikleri.....	162

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.23 Akışkan özellikleri	167
Çizelge 7.24 Geometrik ölçüler	169
Çizelge 7.25 Yüzey karakteristikleri.....	174
Çizelge 7.26 Akışkan özellikleri.....	178
Çizelge 8.1 Lojistik yakıt özellikleri.....	182
Çizelge 8.2 Tetradecane ototermal yakıt dönüşümü reaksiyon mekanizması.....	187
Çizelge 8.3 Giriş gaz akış oranları	191
Çizelge 8.4 ATR çıkış gaz akış oranları.....	191
Çizelge 8.5 CSTR avantaj ve dezavantajları.....	194
Çizelge 8.6 ATR optimizasyonu	197
Çizelge 8.7 PFR avantaj ve dezavantajları.....	202
Çizelge 9.1 Difüzyon hacimleri	218

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 9.2 Bağımlı değişkenler	219
Çizelge 9.3 Bağımlı değişkenler	225
Çizelge 9.4 Yakıt pili anot giriş oranları.....	227
Çizelge 9.5 Yakıt pili katot giriş oranları	228
Çizelge 9.6 Hücre bileşen malzemeleri ve iletkenlikleri	231
Çizelge 9.7 Hücre bileşenlerinin elektrokimyasal özellikleri.....	233
Çizelge 9.8 Sabitler	239
Çizelge 9.9 Skaler ifadeler	247
Çizelge 9.10 Altbölge ifadeleri	247
Çizelge 9.11 Sınır değişkeni	248
Çizelge 9.12 Altbölge değişkeni	248
Çizelge 9.13 Altbölge ayarları (elektronik)	249

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 9.14 Altbölge ayarları (iyonik)	250
Çizelge 9.15 Altbölge ayarları (weakly compressible navier-stokes)...	251
Çizelge 9.16 Altbölge ayarları (gözenekli ortam).....	252
Çizelge 9.17 Altbölge ayarları (4 ve 8 için).....	253
Çizelge 9.18 Altbölge ayarları (2 ve 7 için).....	255
Çizelge 9.19 Gaz kompozisyonu.....	268
Çizelge 9.20 Deneysel koşullar.....	268

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>	:
C	Konsantrasyon (mol/m^3)	
T	Sıcaklık (K)	
J	Akım yoğunluğu (A/m^2)	
j_0	Değişim akım yoğunluğu (A/m^2)	
R	Gaz sabiti (J/mol.K)	
C_p	Özgül ısı (J/kg K)	
$i_{o,a}$	Anot değişim akım yoğunluğu (A/m^2)	
$i_{o,c}$	Katot değişim akım yoğunluğu (A/m^2)	
x_{h2}	Hidrojenin mol oranı	
x_{o2}	Oksijenin mol oranı	
c_t	Maddelerin toplam konsantrasyonu (mol/m^3)	

XXXVIII

$c_{h2,ref}$	Referans konsantrasyon (mol/m^3)
F	Faraday sabiti (C/mol)
R	Gaz sabiti (J/(mol.K))
η	Aşırı potansiyel (V)
η_m	Karışımın viskozitesi (Pa.s)
n_1, n_2	Saf bileşen viskoziteleri (Pa.s)
y_1, y_2	Mol oranları
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
ω_i	i maddesinin kütleli oranı
x_j	j maddesinin molar oranı
u	Hız vektörü (m/s)
p	Basınç (Pa)
\tilde{D}_{ij}	Çok bileşenli Fick difüzyon katsayısının ij bileşeni

D_i^T	Genelleştirilmiş ısı difüzyon katsayısı (kg/m.s)
M_j	j maddesinin mol kütlesi (kg/mol)
M	Karışımın mol kütlesi (kg/mol)
R_i	Reaksiyon hızı (kg/m ³ .s)
V_{pol}	Polarizasyon (V)
Q_j	Akım kaynağı (A/m ³)
κ	İyonik iletkenlik (S/m)
$\Phi_{elektronik}$	Elektronik potansiyeli (V)
Φ_{iyonik}	İyonik potansiyel
S_a	Spesifik yüzey alanı (1/m)
i_{ict}	Yük transfer akımı reaksiyon yoğunluğu (A/m ²)
η	Dinamik viskozite (Pa.s)

XL

κ_{dv} Genleşmeli viskozite (Pa.s)

F Hacimsel kuvvet vektörü (N/m³)

ε Gözeneklilik

κ Gözenekli ortamın geçirgenliği (m²)

Q Kütle kaynağı (kg/(m³·s))

v Molar difüzyon hacmi (m³/mol)

\dot{V} Akışkanın hacimsel debisi (m³/s)

ΔP Basınç artışı (Pa)

η_s İzentropik verim (%)

V Molar hacim (m³/mol)

η Viskozite (μP)

T Sıcaklık (K)

V_c Kritik hacim (cm³ / mol)

Ω_v	Viskozite çarpışması
T_c	Kritik sıcaklık (K)
P_c	Kritik basınç (bar)
V_c	Kritik hacim (cm ³ /mol)
M	Moleküler ağırlık (g/mol)
T_f	Donma noktası (K)
W	Kayma faktörü
V_m	Sıvı molar hacim (cm ³ /mol)
σ_m	Karışımın yüzey gerilimi (dyn/cm)
x_i, y_i	i'nin mol oranı
ρ_{Lm}	Sıvı karışım yoğunluğu (mol/cm ³)
ρ_{vm}	Buhar karışım yoğunluğu (mol/cm ³)

XLII

Kısaltmalar

AES	All electric ships (Tümü elektrikli gemiler)
AIP	Air independent propulsion (Havadan bağımsız tahrik sistemleri)
ATR	Autothermal reformer (Ototermal yakıt dönüştürücü)
CSTR	Continous stirred tank reactor (Devamlı karıştırılmalı tank reaktör)
DOD	Department of Defense (Savunma Bakanlığı)
DOE	Department of Energy (Enerji Bakanlığı)
FC	Fuel cell (Yakıt pili)
GHSV	Gas hourly space velocity (Gaz- saatte- boşluk hızı)
IMO	International Maritime Organization (Uluslararası denizcilik örgütü)
LHV	Low heating value (Yakıt alt ısı değeri)
PFR	Plug-flow reactor (Borusal reaktör)
SOFC	Solid oxide fuel cell (Katı oksitli yakıt pili)
SV	Space velocity (Boşluk hızı)
TL	Türk Loydu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

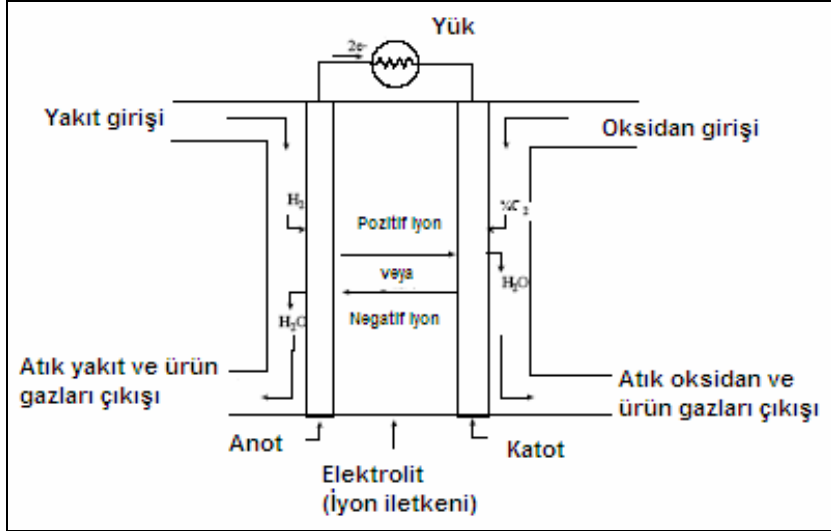
1. GİRİŞ

Dünya enerji tüketimi, nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak hızla artmaktadır. Artan enerji talebin yanı sıra fosil enerji kaynaklarının rezervleri de hızla azalmaktadır. Fosil yakıtların yanması neticesinde açığa çıkan karbondioksit, karbonmonoksit, azot oksitler, kükürdioksit gibi gazlardan dolayı meydana gelen küresel ısınma, iklim değişikliği ve sera etkisi gibi çevre sorunları oluşmaktadır. Günümüzde rezervleri azalan, çevreyi kirleten fosil enerji kaynaklarının yerine doğa ile dost, yenilenebilir kaynakların kullanımı gündeme gelmiştir. Kısa vade önlemleri içinde, yanma veriminin artırılması üzerinde çalışmalar son hızla devam etmektedir. Orta ve uzun vadede etkili olacak çözüm olarak ise, yakıt pili gibi sistemlerin devreye sokulması öngörülmektedir.

Günümüzde yakıt pilleri hemen hemen bütün güç üretimi alanlarında, dünya çapında konuşulmaya başlanmıştır. Bu güç tesislerinin kurulabilmesi için yaklaşık 150 yıldır varolan bu teknoloji, şimdilerde oldukça fazla tanınır hale gelmiş ve ciddi olarak geleceğin güç kaynakları olarak düşünölmeye başlanmıştır. Yakıt pili, ilk olarak 1839 yılında suyun elektrolizi konusunda çalışmalar yapan Sir William Grove tarafından elektrokimyasal bir tepkime olarak ortaya konmuş ve gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, yakıt pilleri “Yeşil Enerji” denilen üretimin başlıca adayıdır. Temiz, sessiz ve verimlidir. Bağlı olarak yeni popüler olmasına rağmen, deneme amaçlı olarak evlerde, ticari olarak, endüstride ve mobil uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine etkin bir şekilde çeviren elektrokimyasal cihazlardır.

İçerdikleri hareketsiz parçalarla, kuru pillere benzer olarak çalışırlar. Yakıt kaynağı olarak taze hidrojen beslemesi yapıldıkça elektrik üretmeye devam ederler. Yakıt pillerinde, yanma olmadan kimyasal olarak yakıt ve oksidan biraraya geldiği için, geleneksel yakıtlardaki kirlilik oluşmamaktadır.

Yakıt pilleri geleneksel yakıt-elektrik üretim işlemlerinden daha moderndir. Geleneksel işlemde yakıttan ısı ekstraksiyonu, elde edilen ısının mekanik enerjiye dönüşümü ve son olarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine transformasyonu sağlanır. Yakıt pili temel yapısı, Şekil 1.1’de gösterilmiştir (U.S. Department of Energy, 2004).



Şekil 1.1 Yakıt pili temel yapısı

Bir yakıt pili, anot (negatif, hidrojen elektrodu), katot (pozitif, oksijen elektrodu) ve elektrolit çözeltisinden oluşur. Hava katot yüzeyi üzerinden geçerken, hidrojen veya hidrojen zengin gaz da anot yüzeyinden geçer. Elektronlar katoda doğru bir dış devre yoluyla taşınırlarken, hidrojen iyonları da elektrolit yoluyla oksijen elektroda göç ederler. Katotta oksijen ve hidrojen iyonları ile elektronların reaksiyona girmesiyle su elde edilir. Elektronların dış devre yoluyla akışı elektrik üretir. Yakıt kullanımındaki yüksek verim nedeniyle, bu elektrokimyasal işleminden çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır. Yakıt pili sistemi bir yanma reaksiyonu vermediği için çok daha fazla elektrik üretmektedir. Bu sistemi, pilden ayıran en önemli özellik güç üretimi için şarja gereksinim olmaması ve yakıt sağlandıkça güç üretiminin devam edecek olmasıdır.

Tezin amacı, su üstü savaş gemisinde kullanılacak yakıt pili sistemi için NATO F-76 dizel yakıtından hidrojen elde edecek yakıt dönüşüm alt sistemlerini geliştirmek ve katı oksitli yakıt piline uygulamaktır. Bu maksatla, NATO F-76 dizel yakıtı kullanılarak seçilecek uygun bir yakıt dönüşüm prosesi ile 120 kW gücünde yardımcı makina olarak elektrik üretecek katı oksitli bir yakıt pili sistemi tasarımı ve termodinamik analizi yapılacaktır.

Yakıt pilleri için hidrojen ideal bir yakıttır, fakat gelecekte lojistik yakıtı olarak görülmemektedir. NATO F-76 dizel yakıtı, NATO ülkelerinin savaş gemilerinde kullanılan tek yakıttır. Su üstü gemilerde hidrojen kullanımının daha yüksek depolama hacimleri gerektirmesi nedeniyle yakıt pilinin avantajlarından istifade etmek isteyen askeri platformların F-76 dizel yakıtını kullanan yakıt dönüştürücülere ihtiyacı vardır.

Savaş gemilerinde temel yakıt olarak kullanılan NATO F-76 dizel yakıtı ile yakıt pilleri için ihtiyaç duyulacak hidrojen elde edilerek fosil yakıtların çevreyi kirletmeden daha verimli olarak kullanılmasını ve üretilen elektriğin daha ekonomik olmasını sağlayacaktır. Bu bakımdan bu tezde yapılacak iyileştirme çalışmaları önemlidir.

Tezin ülkemize ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığımıza katkıları:

- NATO F-76 dizel yakıtını kullanarak, yakıt pilleri için ihtiyaç duyulan hidrojenin elde edilmesi,
- Düşük gürültü ve titreşim seviyesi,
- Düşük infrared iz bilgisi,
- Düşük egzoz emisyonu ,
- Yüksek verimlilik,
- Güvenilirlik,
- Modüler yapım ve kolay kurulma imkanı,
- Düşük bakım ve işletme kolaylığı,
- Yakıt pili sistemleri, gelecekte askeri uygulamalarda kullanılacak elektrikli araç ve elektrik üretim sistemlerine iyi bir uyum sağlayacak alternatif bir teknoloji olacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Ege Üniversitesinde Yakıt Pili Projeleri

Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği anabilim dalı doktora programında 2005 yılından itibaren tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN tarafından yakıt pili sistemleri dersi verilmektedir. Ayrıca, yakıt pili sistemleri ile ilgili olarak yöneticiliğini Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN'ın yaptığı 06-DPT-005 Nolu “Doğalgaz Yakıtlı Küçük ve Orta Ölçekli Katı Oksitli (Seramik) Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin Geliştirilmesi” isimli DPT projesi; Abdullah S. TAZEBAY tarafından hazırlanan “Doğalgaz Yakıtlı Katı Oksitli Yakıt Pili Sisteminin Bilgisayar Benzeşimi” isimli yüksek lisans tezi çalışması ile Süleyman KAVAS tarafından hazırlanan “Doğalgaz Yakıtlı Katı Oksitli Yakıt Pili Sistemi İçin Sabit Sıcaklık Buharlı Yakıt Dönüştürücü Tasarımı” isimli yüksek lisans tezi çalışması Haziran 2008’de tamamlanmıştır. Semih YILMAZ tarafından hazırlanan “Yakıt Dönüştürücüde Dönüştürülmüş Hidrojen Yakıtlı Katı Oksitli Yakıt Pili Dizini Modellemesinin Birim Hücresinin Analizi” isimli yüksek lisans tezi çalışması ile Özer ÖĞÜÇLÜ tarafından hazırlanan “Doğal Gaz ile Çalışan Katı Oksitli Yakıt Pilleri İçin İzotermal Buharlı Yakıt Dönüştürücü Optimizasyonu ve Dizaynı” isimli doktora tezi çalışması devam etmektedir.

2.2 Savaş Gemisinde Yakıt Pili Uygulamaları

Savaş gemilerinde temel olarak dizel gurupları ve gaz türbini sistemleri enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bugünün konvansiyonel teknolojisi, gemilerde mevcut ana ve yardımcı makinalarda minimum emisyonlara ulaşmıştır. Gemilerden kaynaklanan toplam hava emisyonlarını düşürmek için yeni ve enerji verimi yüksek olan çözümlere ihtiyaç vardır. Savaş gemisi tipleri, Çizelge 2.1’de, çeşitli gemi tipleri için performans aralıkları, Çizelge 2.2’de verilmiştir (Gunter, 2000).

Çizelge 2.1 Savaş gemisi tipleri

Su üstü savaş gemileri	Fırkateynler, Hücumbotlar, Mayın Avlama Gemileri, Korvetler
Su altı savaş gemileri	Denizaltılar

Çizelge 2.2 Savaş gemileri için performans aralıkları

Su üstü gemileri	Sevk	5-50 MW
	Elektrik sağlama	< 10 MW
	Acil güç sağlama	0,1-1 MW
Denizaltılar	Tek kaynaklı itme	2-5 MW
	Hibrit itme	200-400 kW

Amerika, İngiltere ve Rusya gibi ülkeler nükleer denizaltılara yönelmişlerse de bir çok ülke halen daha uzun süre su altı dayanıklılığına sahip modern dizel motorlu denizaltılara ilgi duymaktadır. Şu an için nükleer güç sistemleri haricinde kullanılan teknolojiler:

Kapalı çevrim dizel motorları (sıvılaştırılmış oksijen kullanılıyor, LOX)

Kapalı çevrim buhar türbinleri,

Dıştan yanmalı Stirling çevrimli ısı makinaları,

Yakıt pilleri

Su üstü savaş gemilerinde yakıt pili üzerine çalışmalar Avrupa (Hollanda, İngiltere, Almanya), A.B.D ve Kanada'da devam etmektedir. A.B.D Deniz araştırma bürosu, 1997 yılında gemi servis yakıt pili jeneratör modülünü göstermek için üç fazdan oluşan ileri bir gelişim programı başlatmıştır. İngiltere'de, Defence Evaluation and Research Agency, savaş gemileri için PEM tipi yakıt pillerini değerlendirmektedir. Savaş gemilerinin limanda veya alargada demirli iken 1-2 MW elektrik gücü yakıt pillerinden sağlamaya yönelik planlar yapılmaktadır.

Yakıt pili teknolojisi, emisyonları düşürmek için birkaç umut veren teknolojiden birisidir. Yakıt pilleri, gemilerde kullanım için büyük potansiyel sağlar. Yakıt pillerinin su üstü savaş gemilerinde uygulama alanları şu şekilde özetlenebilir:

- Acil güç sağlama
- Elektrik enerjisi üretimi
- Sevk için güç çıkışı
- Tümü elektrikli gemiler (AES) için elektrik güç üretimi

Bir çok kaynak yakıt pillerini havadan bağımsız tahrik sistemleri için (AIP) çok önemli bir sistem olacağını öngörmektedir. Yakıt pillerinin çok farklı çeşidi olmasına rağmen PEM yakıt pili, düşük çalışma sıcaklığı ve göreceli olarak daha az atık ısıları nedeniyle AIP sistemlerinde tercih edilmektedir. Yakıt pilli AIP sistemlerinde en büyük çalışma katot ve anot gazlarının depolanması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Katoda gönderilen oksijeni sıvı halde emniyetli bir şekilde depolamak mümkün iken anoda gönderilen hidrojeni sıvı halde veya yüksek basınçta depolamak son derece riskli ve tehlikeli olmaktadır. Düşük basınç ve çevre sıcaklığında metal hidrid tanklarında hidrojeni depolamak da bir çözüm olmaktadır. Göreceli olarak daha az verimli bir çözüm ise; dizel, benzin veya metil alkol gibi sıvı yakıtlardan gaz yakıt yani hidrojen üretmektir. Bu da ilave bir yakıt dönüştürme ünitesi gerektirir.

Yakıt pilli havadan bağımsız tahrik (AIP) sistemlerinde en büyük çalışma katot ve anot gazlarının depolanması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Katoda gönderilen oksijeni sıvı halde emniyetli bir şekilde depolamak mümkün iken anoda gönderilen hidrojeni sıvı halde veya yüksek basınçta depolamak son derece riskli ve tehlikeli olmaktadır. Düşük basınç ve çevre sıcaklığında metal hidrid tanklarında hidrojeni depolamak da bir çözüm olmaktadır. Göreceli olarak daha az verimli bir çözüm ise; dizel, benzin veya metil alkol gibi sıvı yakıtlardan gaz yakıt yani hidrojen üretmektir. Bu da ilave bir yakıt dönüştürme ünitesi gerektirmektedir.

Bir çok gemi üreten firma yakıt pillerini AIP sistemleri için önermektedir. Alman Siemens firması HDW ve İtalyan Fincantieri ile birlikte 1840 ton ağırlığındaki U 212 sınıf deniz altısına yakıt pilini uygulamışlardır. Bu deniz altısında PEM yakıt pili modülleri kullanılmıştır. Her bir modül 34 kW'dan ibaret olup toplam 300 kW güç üretilmektedir. Metal hibrit hidrojen depolama ile bir deniz altı 14 gün

boyunca 8 knots (deniz mili/saat) hız su altında sadece yakıt pili güç sistemi kullanarak kalabilecek duruma gelebilmiştir.

Klasik denizaltıların sahip olduğu tahrik sistemi (dizel-batarya)'ne ilaveten bir AIP çeşidi olan yakıt pili tahrik sistemi ile de teçhiz edilmiş dünyanın ilk denizaltısı 7 Nisan 2003' te deniz tecrübelerine başlamıştır. HDW tarafından inşa edilen FGS U 31, Alman Bahriyesinin ilk tip 212 A sınıfı botudur. U 31, 1975'ten bu yana Alman Bahriyesi için inşa edilen ilk denizaltıdır. Temmuz 1994'te imzalanan kontrat hükümlerine göre; lider tersane olarak Kiel'deki HDW ve Emden'deki Thyssen Nordseewerke (NSW) ARGE U 212 konsorsiyumu olarak Alman Bahriyesi için her biri ikişer olmak üzere toplam 4 adet U 212 A sınıfı denizaltı inşa edilecektir.

Her denizaltı HDW ve Siemens tarafından geliştirilen 9 adet PEM yakıt piline sahiptir. Yakıtlardan biri olan hidrojen, gaz formunda katı metal hidrit (demir, titanyum ve manganezin bileşimi olan katı metal hidrit) silindirlerinin içine katılmış olarak muhafaza edilmektedir. Silindirler, mukavim tekne ile dış teknenin arasına yerleştirilerek balast görevi de görmektedir. Mukavim tekne çapı yelkenin hemen arkasından itibaren azalmaktadır. Böylece dış tekne ile mukavim tekne arasında kazanılan hacimlere; iki adet sıvı oksijen (LOX) tankı yerleştirilmiştir. Hidrojen, metal hidritin 40 °C'a kadar ısıtılmasıyla serbest kalır.

Deniz Kuvvetlerimizin envanterinde halihazırda dizel-elektrik denizaltılar bulunmaktadır. Denizaltılar sahip oldukları gizlilik vasfı ve bunun sonucunda ortaya çıkan sürpriz silah olma ve muhasımın hava kuvvetlerinin tehdidinde maruz kalmaksızın uzun süreli hareket yapabilme özelliğine sahiptirler. Bu özellikten azami derecede faydalanabilmek amacıyla şnorkele bağımlı kalmadan daha uzun süre su altında kalarak

bekalarını idame edecek havadan bağımsız tahrik sistemine sahip denizaltı projesi başlatılmıştır. Projenin tedarik faaliyetleri Savunma Sanayi Müsteşarlığı (SSM) tarafından yürütülmektedir.

Projenin amacı, havadan bağımsız tahrik sistemine (AIP) sahip yeni tip denizaltıların mümkün olan en çok yerli katkı ile Gölçük Tersanesi Konutanlığında inşa edilmesidir. Bahse konu projeye 3 firma teklif vermiştir. Bunlar; DCNS (Armaris) (Fransa), HDW/MFI (Almanya), Navantia S.A. (İspanya)'dır. Teklif değerlendirme çalışmaları sonucunda sözleşme görüşmelerine öncelikle HDW/MFI ortak girişimi ile başlanmasına karar verilmiştir. 26 Ağustos 2008 tarihinde başlayan sözleşme görüşmelerine devam edilmektedir.

Denizaltılar için kullanılan AIP sistemi ile su üstü savaş gemileri için kullanılan yakıt pili arasındaki ana fark, reaktantların seçimidir. Denizaltıda saf oksijen, sıvı oksijen tanklarında depolanırken su üstü savaş gemisinde havadaki oksijen kullanılabilir. Denizaltıda hidrojen, metal hidrit depolama silindirlerinde depolanırken, su üstü savaş gemilerinde istenilen güç büyük olduğundan daha büyük depolama hacimleri gerektirmesi nedeniyle dizel yakıttan hidrojen zengin yakıt üretecek dönüştürücülere ihtiyaç vardır. Günümüzde savaş gemilerinde NATO F-76 dizel yakıt kullanılmaktadır (Krummrich et al).

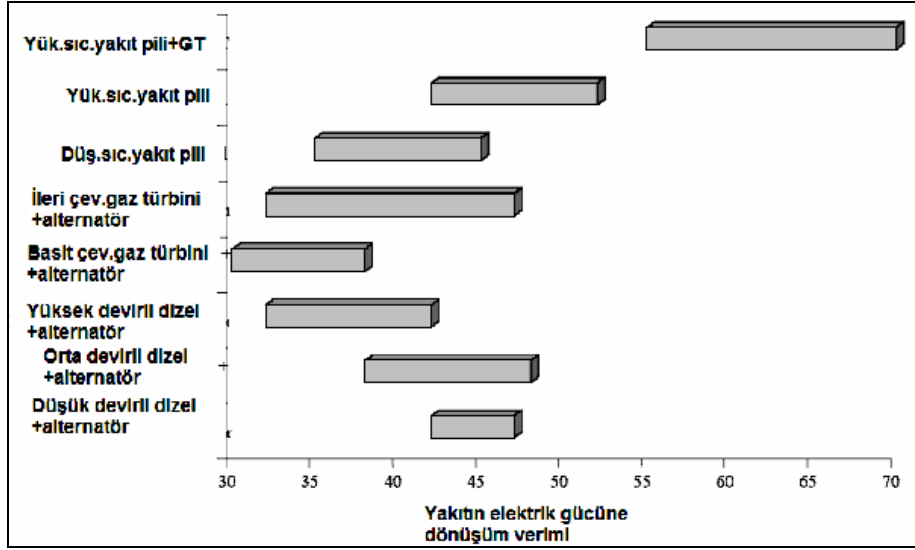
2001-2004 yılları arasında, Hollanda, Almanya, Türkiye (TÜBİTAK) ve İngiltere'nin ortak çalışması ile Yakıt Pilleri İçin Dizel Yakıt Dönüştürücü (DESIRE) projesinin tasarlanmıştır. Bu projede, F-76 dizel yakıtlı PEM (Proton Değişim Membranlı) tipi yakıt pili ve yakıt dönüştürücü olarak da buharlı dönüştürücü kullanılarak sistem tasarımı yapılmış olup, sistemin elektriksel verimi, % 35-40 hesaplanmıştır. Çalışmalar, temel olarak NATO F-76 dizel yakıtının hidrojen zengin

yakıtta çevrilerek yakıt pillerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Kritik bileşenler, kükürt arıtıcı ve yakıt dönüştürücüdür. Her iki ünite de iyileştirmeler gereklidir. Kükürt arıtıcı, yakıt dönüştürücüde istenilen kükürt oranını sağlamalıdır (Krummrich et. al.).

Dizel yakıt dönüşüm prosesindeki en önemli kademelerden birisi de dizel yakıtın buharlaştırılmasıdır. Dizel yakıtın yüksek sıcaklıkta ısınması neticesinde karbonlaşma meydana gelir. Karbonlaşmış malzeme oluşumu, evaporatorü tıkayabilir ve katalizör yüzeylerde tortularak kükürt arıtıcı ve yakıt dönüşüm ünitelerinde ciddi problemlere neden olabilir. Karbon oluşumunu minimize etmek için anahtar parametrelerden birisi, dizel evaporator tasarımıdır. İşletme koşulları da optimize edilmelidir. TÜBİTAK'ta yapılan çalışmada, dizel yakıtın buharlaşma ısısı, iki farklı yolla sağlanmıştır: Elektrik fırını ve sıcak azot gazı. Sonuçlar; borulu ısı değiştirici kullanarak sıcak azot gazı ile dolaylı olarak sağlanan ısının elektrik enerjisi ile kıyaslandığında daha düşük ısıl bozunma ile sonuçlandığını göstermiştir. İstenmeyen ısıl bozunma ürünleri nedeniyle dolaylı olarak ısıtılmış evaporator, elektrik ile ısıtılmış evaporatörden daha üstün niteliklidir (Sarioglan et. al.).

2.2.1 Isıl verim

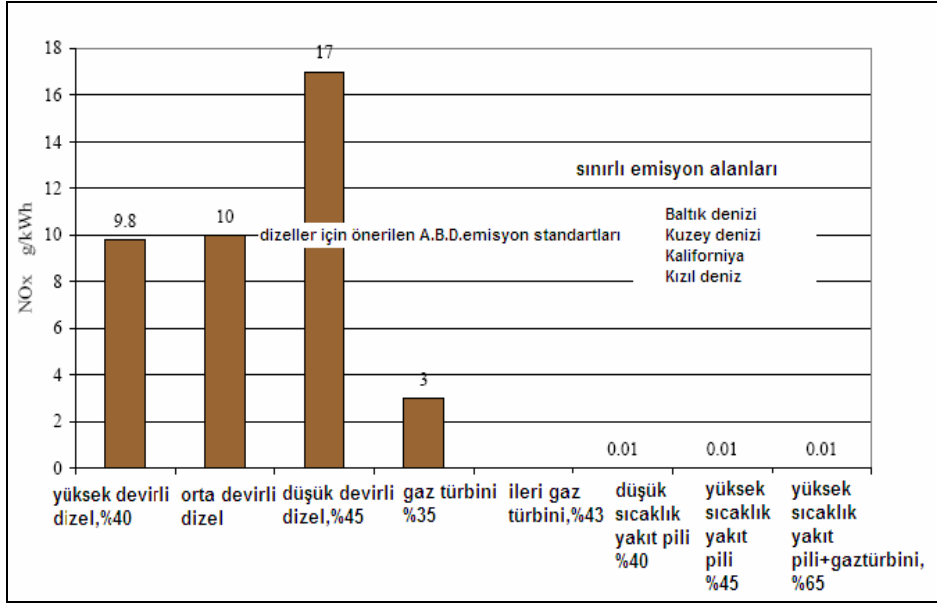
Yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri, orta ve düşük devirli dizel motorlar ile rekabet edebilmekte ve basit çevrimli gaz türbinlerinden daha verimli olmaktadır. Düşük sıcaklıklı yakıt pilleri, konvansiyonel teknolojiler ile yarışacaktır. Gaz türbini ile kombine yüksek sıcaklıklı yakıt pili en yüksek verime sahiptir. Tipik ısıl verimler, Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Bourne et al., 2001).



Şekil 2.1 Farklı tahrik mekanizması için verimler

2.2.2 Emisyon

Dünyadaki toplam CO₂ emisyonunun %2 si, NO_x emisyonunun %10-15 i ve SO_x emisyonunun % 4-6 sı gemilerden kaynaklanmaktadır (Endresen et al., 2003). Yakıt pili sistemlerinde bilhassa NO_x ve SO_x emisyonları yok denecek kadar azdır. CO₂ emisyonu da yüksek verimlerden dolayı bu sistemlere göre düşmektedir. Azot oksit (NO_x) emisyonu Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Bourne et al., 2001).



Şekil 2.2 Farklı teknolojilerde NOx emisyonu

1997 MARPOL EK VI Protokolü (resmi yürürlüğe giriş tarihi 19.05.2005), NOx emisyonu: Omurgası bu tarihte veya daha sonra konulan gemilere monte edilen makinalar geriye dönük olarak uygulanacak bu kural gereklerine uygun olmalıdır.

Aynı kural bu tarihte veya daha sonra yapılan makina değişikliklerinde ve makina üzerinde önemli değişikliklerde de uygulanacaktır. IMO'nun gemi motorları için NOx emisyon limitleri, Çizelge 2.4'te verilmiştir (IMO, 1998).

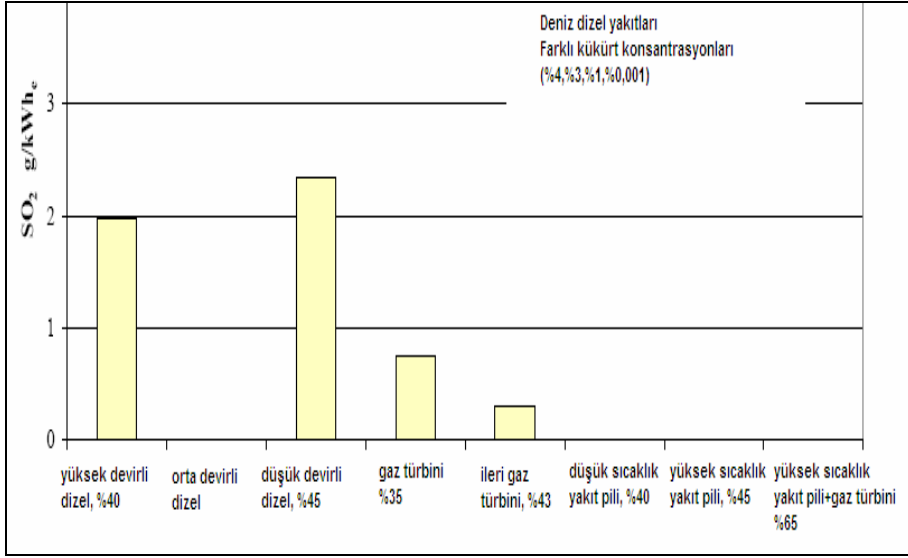
Çizelge 2.3 MARPOL Ek VI NOx emisyon limitleri

Motor devri (n, rpm)	NOx (g/kWh)
$n < 130$ rpm	17,0
$130 \text{ rpm} \leq n < 2000$ rpm	$45 \cdot n^{-0.2}$
$n \geq 2000$ rpm	9,8

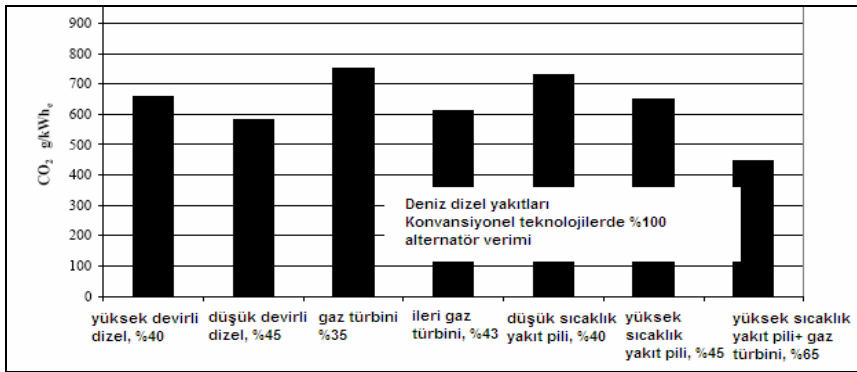
Uluslararası Denizcilik Örgütü, IMO, gemilerin SOx yayılması kontrol sahaları içinde çalıştığında aşağıdakileri sağlama zorunluluğu getirmiştir.

- Kükürt oranının % 1,5 (kütlece) aşmadığı yakıt teslim tutanağı ile belgelenen akaryakıt veya
- SOx yayılmalarını 6,0 g SOx/kWh'in altına düşürdüğü onaylanmış bir egzoz gazı temizleme sistemi veya
- SOx yayılmalarını 6,0 g SOx/kWh'in altına düşüren diğer bir onaylı teknoloji

Farklı teknolojilerdeki SOx emisyonları Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Bourne et al., 2001).

Şekil 2.3 Tipik SO_x emisyonları

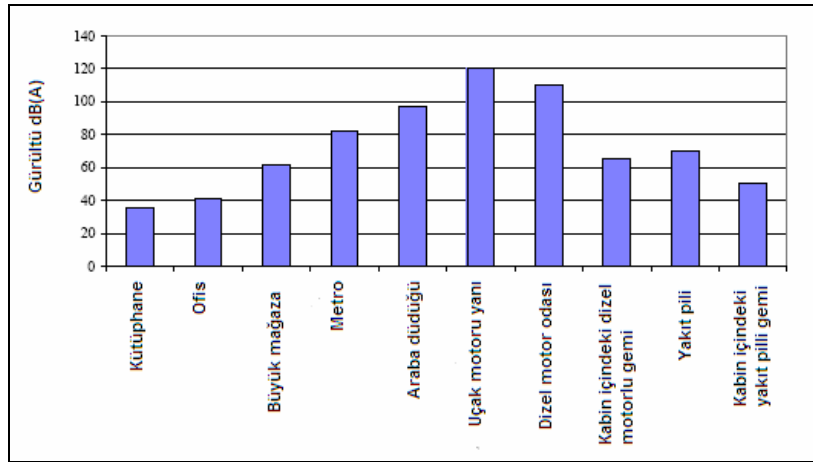
CO₂ emisyonları, sadece yakıt tipine ve ana tahrik gücünün verimine bağlıdır. Tipik CO₂ emisyonları, Şekil 2.4'de gösterilmiştir (Bourne et al., 2001).

Şekil 2.4 Farklı tahrik mekanizması için CO₂ emisyonu

2.2.3 Gürültü

Farklı kaynaklardan üretilen tipik gürültü seviyeleri Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Dizel motor odasındaki gürültü seviyesi, hemen hemen uçak motorunun yanındaki kadar yüksektir. Dizel motor, kabin içine alındığında gürültü seviyesi büyük bir mağazadaki seviyeye düşmektedir.

Gemideki yakıt pili, kabin içine alındığında gürültü seviyesi ofisteki seviyeye yaklaşmaktadır. Gürültü skalası, logaritmiktir. Ses düzeyindeki 10 dB(A)’lik bir değişim, insan kulağında iki kat farklı algılanmaktadır. Değişik kaynaklar tarafından üretilen tipik gürültü seviyeleri Şekil 2.5’de verilmiştir (Bourne et al., 2001).



Şekil 2.5 Farklı mahaller için gürültü seviyeleri

2.3 Gemilerde Yakıt Pili Sistemlerinin Kullanımı ile İlgili Esaslar

Gemilerde yakıt pili sistemlerinin kullanımı ile ilgili esasları Türk Loydu düzenlemektedir. Bu esaslar; gemilere sabit olarak monte edilmiş bulunan yakıt pili sistemlerinin (FC sistemleri) kullanımına uygulanır. Bu esaslarda, FC sistemlerinin güvenli kullanımı ile ilgili istekler verilmektedir (Türk Loydu, 2005) .

Malzemeler öngörülen uygulamaya uygun olacak ve tanınmış standartlara uyacaktır. Malzemelerin uygunluğu Türk Loyduna kanıtlanacaktır. FC grubunun dışında yanıcı malzemelerin kullanımına izin verilmez. Türk Loydu tarafından yayınlanan Malzeme Kuralları dikkate alınacaktır.

Yakıt transfer sistemleri; sabit olarak monte edilmiş, diğer boru devrelerinden bütünüyle ayrılmış ve açıkça işaretlenmiş olacaktır. Yakıt pillerinin ve normal çalışma sırasında yakıt içeren doğrudan ilgili bileşenlerin tüm parçaları, kapalı bir mahalde veya uygun bir muhafaza içinde düzenlenecektir.

Tutuşabilir gaz karışımının oluşması riski bulunan mahallerde, emici tip mekanik havalandırma sistemleri bulunmalıdır. Öngörülen yakıt boşalmasına bağlı olarak, ya tüm mahalle veya tehlikeli alanlara emici fanlar konulmalıdır. Yakıt transfer manifoldu civarındaki alan ve bu esaslarda belirtilen yakıt sistemlerinin kullanıldığı yerleşim mahallerinde, uygun tipte yangın söndürme sistemleri bulunacaktır.

Normal çalışma durumlarından, kabul edilemez sapmalar oluştuğunda görsel ve sesli ikazlar veren alarm sistemleri sağlanacaktır. Bir sızıntı durumunda; yakıt beslemesi, yalnızca sızıntının nedeni algılandıktan ve giderildikten sonra tekrar sağlanacaktır. Bu konu ile ilgili talimatlar, yerleştirme mahallinde görünür bir yere asılacaktır.

Koruyucu cihazlar, mümkün olduğunca basit, güvenilir ve doğrudan çalışır olmalıdır. Koruyucu cihazların işlevi için dış enerji gereksinimi varsa, enerji beslemesi olası arızalar yönünden izlenmelidir.

Yakıt sisteminin aşağıda belirtilen noktalarında, emniyet kapatma valfleri bulunacaktır:

- Yakıt depolama tanklarından çıkışlarda,
- Yakıt koşullandırma ünitesinden çıkışta,
- İzlenen mahallerdeki yakıt borularının girişinde,

Tecrübeler başlamadan önce, ayrıntılı bir tecrübe programı hazırlanacaktır. Tecrübe programı, TL onayına tabidir. FC sistemi, gemiye konulduktan sonra aşağıda belirtilen tecrübeler tabi tutulacaktır.

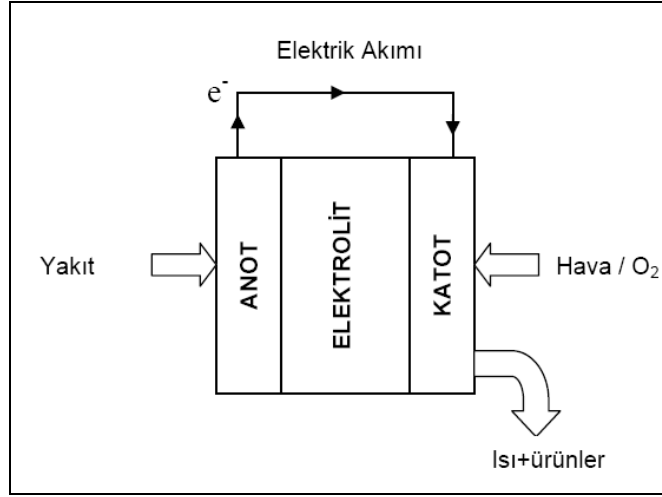
- Bileşenlerin işlevsel tecrübeleri
- Koruyucu cihazlar ve koruma sistemlerinin tecrübesi
- Yangın söndürme sisteminin tecrübeleri
- FC sisteminin işlevsel tecrübeleri
- Geminin işlevsel tecrübeleri

3. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ

3.1 Yakıt Pili

Yakıt pili, enerji üretiminde kullanılan verimli, sessiz, çevre ile uyumlu ve elektrokimyasal prensipte yakıt enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güç üretim elemanıdır. Yani yakıt pili, yakıt ve havanın elektrokimyasal tepkimesi ile yakıt kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren üretilir. Elektrolizin ters reaksiyonu olarak da tanımlanabilecek olan yakıt pili reaksiyonu sonrası, doğru akım (DC) elektrik üretilir.

Yakıt pilleri, elektrokimyasal bir proses ile elektrik üretiyor olmaları bakımından piller ve aküler ile benzerlik gösterirler. Piller ve aküler, içerisinde depo edilmiş olan enerjiyi elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik enerjisine dönüştürürler. Sağladıkları enerji, içerisinde depo edilmiş olan enerji ile sınırlıdır. Yakıt pilleri ise yakıt ve hava sağlandığı sürece bu dönüşümü gerçekleştirebilen enerji üreteçleridir. Şekil 3.1'de yakıt pili ve işleyişi şematik olarak görülmektedir (Acharya, 2004).



Şekil 3.1 Yakıt pili

Yakıt pilleri, bünyesinde kullanılan elektrolitin cinsine göre çeşitli isimler alır.

1. Proton değişim membranlı (PEM) veya katı polimer elektrolitli yakıt pili (SPEFC) veya polimer elektrolitli yakıt pili (PEFC)
2. Alkali yakıt pili (AFC)
3. Fosforik asit yakıt pili (PAFC)
4. Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)
5. Katı oksitli yakıt pili (SOFC)

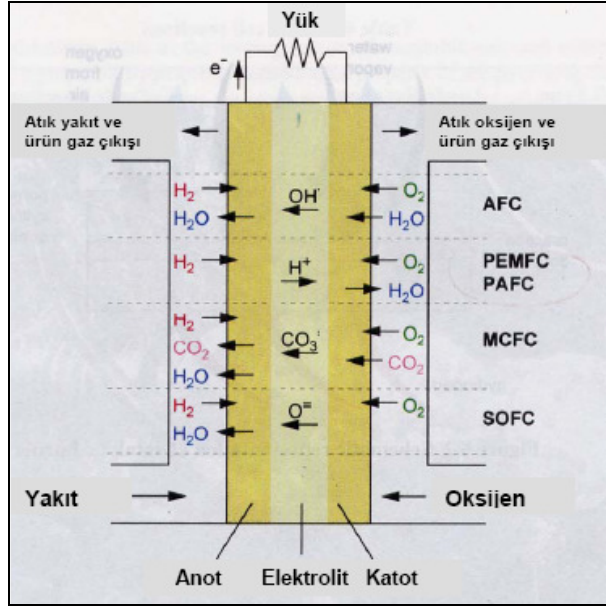
Yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre 3 kısma ayrılır. Yüksek ve orta sıcaklıktaki yakıt pilleri arasındaki ana fark, elektrolitin kalınlığı ve ara bağlantı malzemesidir.

1. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100 °C)
2. Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500 °C)

3. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000 °C)

Çizelge 3.1 Yakıt pilinin farklı tipleri ve karakteristikleri

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	Proton geçiren zar	Potasyum hidroksit çözeltisi	Fosforik asit	Lityum ve potasyum karbonat	Katı seramik gövde
Elektrodlar	Karbon	Geçiş metalleri	Karbon	Nikel ve nikel oksit	Metal sermet
Katalizör	Platin	Platin	Platin	Elektrod malzemesi	Elektrod malzemesi
Ara bağlantı	Karbon veya metal	Metal	Grafit	Paslanmaz çelik veya nikel	Nikel, seramik veya çelik
İşletme sıcaklığı	40-80 °C	65 °C-220 °C	205 °C	650 °C	600-1000 °C
Yük taşıyan iyon	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁼	O ⁼



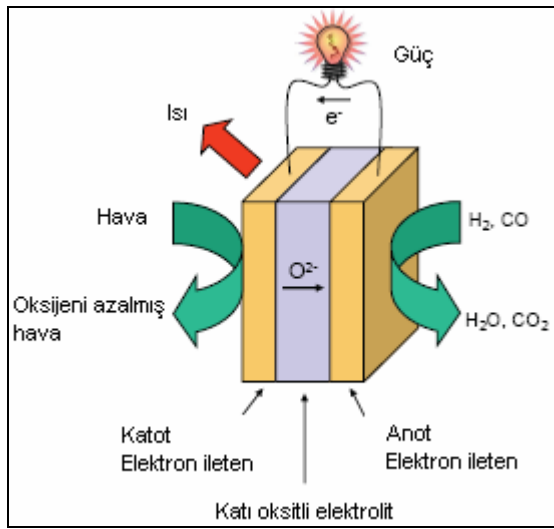
Şekil 3.2 Yakıt pilleri çalışma prensipleri

Yakıt pillerinin performansı test sistemi ile elde edilen kayıp eğrisi ile ölçülür. Bu eğri pilin akım üretirken ne kadar voltaj kaybettiğini gösterir. Her ne kadar teorik pil voltajı 1,23 V olsa da, pil açık devre konumunda çalıştırılırsa bile bir miktar voltaj kaybı oluşur.

Yakıt pilinde çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesine ilave olarak, yakıt işleme ünitesi, güç dönüştürücü, kontrol ünitesi gibi kısımları ile beraber birkaç watt'tan megawatt seviyelerine kadar güç çıktısı sağlanabilmektedir. Ayrıca ihtiyaç halinde yakıt pilinden elde edilen gerilimin düzenlenmesi için regülatör, doğru akımın alternatif akıma (AC) dönüşümü için ise dönüştürücü (inverter) kullanılabilir.

3.2 Katı Oksitli Yakıt Pili

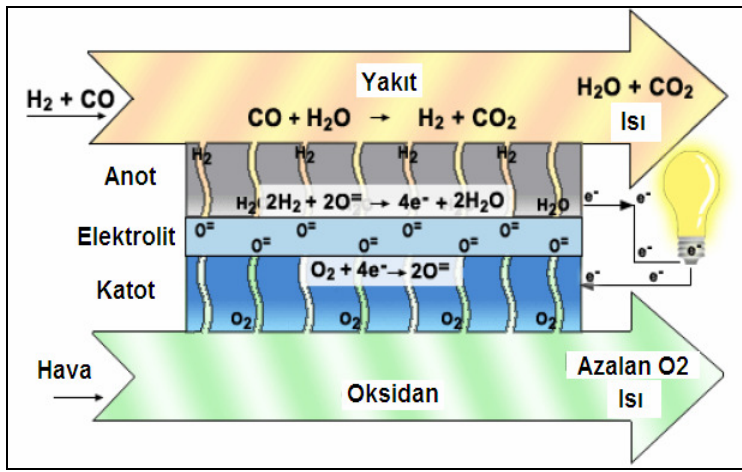
Katı oksitli yakıt pilleri göreceli olarak yüksek sıcaklıklarda çalışır. Çalışma sıcaklıkları, 600-1000 °C arasındadır. Bunun temel nedeni, göreceli olarak daha büyük olan oksijen iyonunun katı seramikten yapılmış bir elektrolitten geçirme zorunluluğudur. Şekil 2.3, katı oksitli yakıt pilinin elektrokimyasal prensibini göstermektedir. Burada, voltajı arttırmak için seri devredeki hücreleri elektriksel olarak bağlayan ara bağlantı gösterilmemiştir (Stiller, 2006).



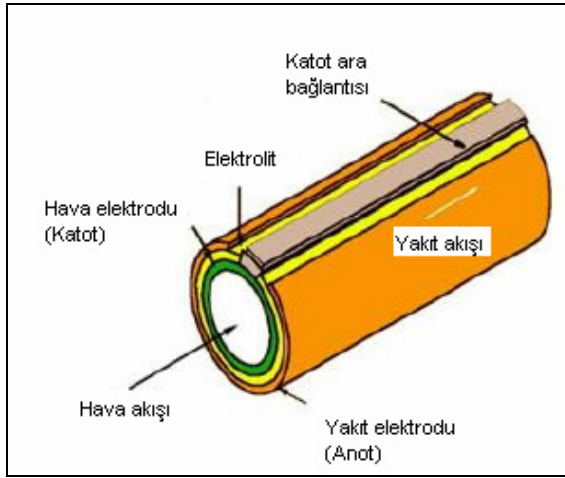
Şekil 3.3 Katı oksitli yakıt pilinin elektrokimyasal prensibi

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

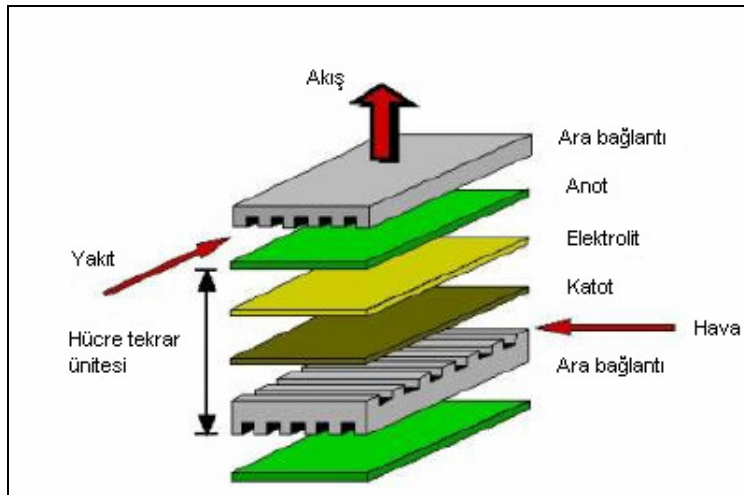
iletilir. Anotta yakıt, oksijen iyonuyla birleşir, yanma gazları ve elektron açığa çıkar. Elektron dış devreden katot tarafına aktarılır. Katı oksitli yakıt pilinin temel prensibi, Şekil 3.4’de, borulu katı oksitli yakıt pili tipi, Şekil 3.5’de, düzlemsel katı oksitli yakıt pili ise Şekil 3.6’da gösterilmiştir (Thorud, 2005).



Şekil 3.4 Katı oksitli yakıt pilinin temel prensibi



Şekil 3.5 Borulu katı oksitli yakıt pili



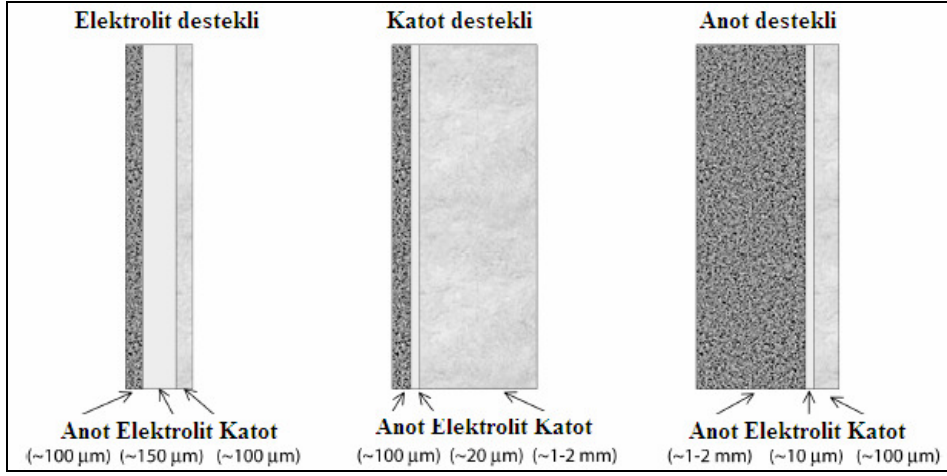
Şekil 3.6 Düzlemsel katı oksitli yakıt pili

Borulu ve düzlemsel katı oksitli yakıt pillerinin karşılaştırması Çizelge 3.2’de verilmiştir. Orta sıcaklık yakıt pilleri için düzlemsel tip tercih edilmektedir.

Çizelge 3.2 Borulu ve düzlemsel SOFC avantaj ve dezavantajları

Özellik	Borulu	Düzlemsel
Güç yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Hacimsel güç yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Yüksek sıcaklık sızdırmazlığı	Gerekli değil	Gerekli
Devreye alma ve çıkarma	Hızlı	Düşük
Ara bağlantı imalatı	Zor	Yüksek maliyet
Üretim maliyeti	Yüksek	Düşük

Borulu ve düzlemsel katı oksitli yakıt pilleri, elektrolit destekli, anot destekli veya katot destekli yapılarda üretilirler (Şekil 3.7). Her konfigrasyon için özellikler Çizelge 3.4’de özetlenmiştir.



Şekil 3.7 Anot, katot veya elektrolit destekli tasarımlar

Çizelge 3.3 Düzlemsel yakıt pili konfigrasyon özellikleri

Hücre konfigrasyonu	Avantaj	Dezavantaj
Elektrolit destekli	Göreceli olarak güçlü destek	Düşük elektrolit iletkenliği nedeniyle yüksek direnç
	Anot oksidasyonu nedeni ile arızaya daha az duyarlı	Elektrolit omik kayıplarını minimize etmek için yüksek işletme sıcaklığı
Katot destekli	Oksidasyon yok	Düşük iletkenlik
	İnce elektrolit nedeniyle düşük işletme sıcaklığı	Kalın katot nedeni ile sınırlı kütle taşınımı
Anot destekli	Yüksek iletkenlik	Potansiyel oksidasyon
	İnce elektrolit nedeniyle düşük işletme sıcaklığı	Kalın anot nedeni ile sınırlı kütle taşınımı

3.2.1 Malzemeler

Bu yakıt pillerinin en önemli özelliği, korozyona sebep olan ve elektrolitte su yönetimini gerektiren sıvı elektrolit kullanılmamasıdır. Bu sistem, elektrolit olarak katı seramiklerin kullanılmasına ve oldukça yüksek sıcaklıklarda işlem yapmasına dayanır. Elektrolit tipik olarak O^{2-} iyonlarının iletimini sağlayabilecek itriyum oksitle kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit esaslı seramik malzeme Zirkonyumoksit (ZrO_2) gibi katı bir metal oksittir. Tipik olarak; anot olarak $Ni-ZrO_2$ veya $Co-ZrO_2$, katot olarak ise Stronsiyum ile katkılandırılmış $LaMnO_3$ kullanılır. Katı oksitli yakıt pili bileşen malzemeleri ve kalınlıkları Çizelge 3.4’de verilmiştir (Robert J. Braun, 2002).

Çizelge 3.4 Katı oksitli yakıt pilinde kullanılan malzemeler

Bileşen	Kalınlık	Malzeme
Anot	$50\mu m - 1.5mm$	Nikel doplanmış Zirkonyum (Ni/ZrO_2)
Elektrolit	$5\mu m - 150\mu m$	İtriyum doplanmış Zirkonyum ($Y_2O_3-ZrO_2$)
Katot	$50\mu m - 150\mu m$	Stronsiyum doplanmış Lanthanum Manganite ($Sr-LaMn$)

3.3 Katı Oksitli Yakıt Pillerinin Termodinamiği

Voltaj miktarı, toplam kimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişimden belirlenmektedir. Gibbs serbest enerjisindeki değişim, reaktantların ve ürünlerin kısmi basınçlarına bağlıdır. Hidrojen oksijen yakıt pili için, Gibbs serbest enerjisindeki değişim (Chaisantikulwat et al,2008);

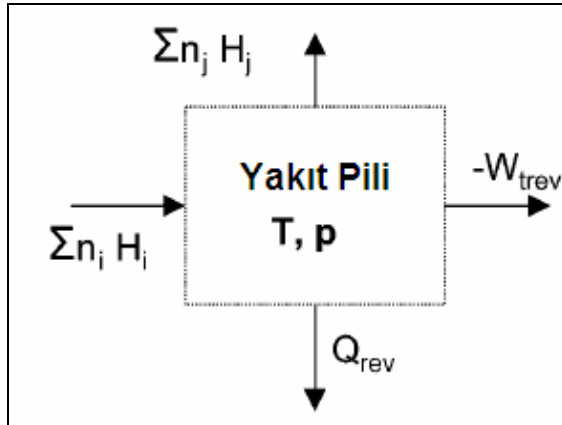
$$\Delta G(T) = \Delta G^o(T) + RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (3.1)$$

Burada; $\Delta G^o(T)$, standart haldeki Gibbs serbest enerjisi değişimidir. Denge durumunda Gibbs serbest enerjisi (Chaisantikulwat et al, 2008);

$$\Delta G(T) = -n_e FE(T) \quad (3.2)$$

$$E(T) = E^o(T) - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (3.3)$$

Reaktantlar, toplam entalpiyi ($\sum n_i H_i$)'yi yakıt piline taşır ve toplam entalpi ($\sum n_j H_j$), yakıt pilini terk eder. Tersinir yakıt pilinin enerji dengesi, Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Tersinir yakıt pili, enerji dengesi ve sistem sınırı

3.3.1 Kimyasal reaksiyon

Katı oksitli yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar:

Anot reaksiyonları:



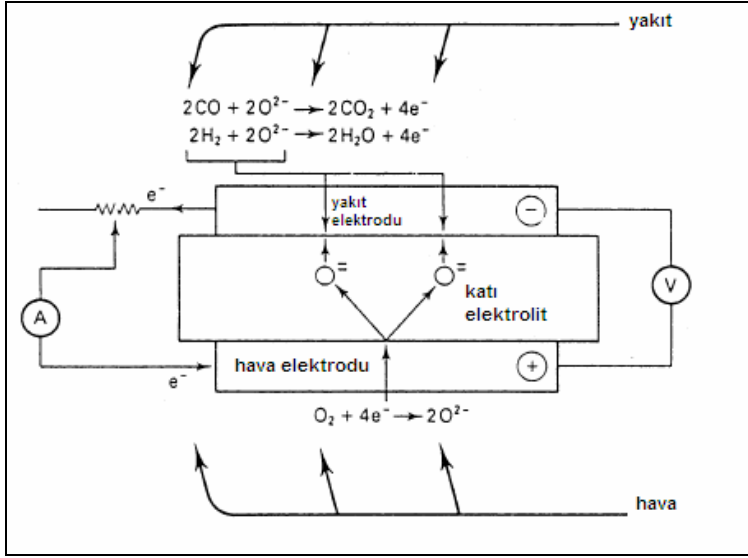
Katot reaksiyonu:



Toplam hücre reaksiyonları:



Katı oksitli yakıt pilinin işletme prensibi şematik olarak Şekil 3.9'da gösterilmiştir (Osamu, 2000).



Şekil 3.9 Katı oksitli yakıt pili çalışma prensibi

3.3.2 Nernst denklemi

Elektrokimyasal teoriden, Gibbs serbest enerjisi değişimi ΔG , elektriksel işe eşittir (Song et al. 1993).

$$\Delta G = -n.F.\Delta E_r \quad (3.9)$$

n, elektron sayısı, F Faraday sabiti, ΔE_r tersinir elektrik potansiyeli veya açık hücre voltajıdır.

$$\Delta G^o = -n.F.\Delta E_r^o \quad (3.10)$$

$$\Delta G = \Delta G^o + \bar{R}.T \ln \prod_B \left(\frac{P_B}{P_0} \right)^{v_B} \quad (3.11)$$

Temel bir hücre için Nernst denklemi:

$$\Delta E_r = \Delta E_r - \frac{\bar{R}.T}{n.F} \ln \Pi \left(\frac{P_B}{P_0} \right)^{v_B} \quad (3.12)$$

3.3.3 Elektrokimyasal reaksiyon ısısı

Pilin tersinir deşarjı esnasındaki kimyasal reaksiyon ısısı, tersinir ısıdır.

$$Q_r = T.\Delta S \quad (3.13)$$

Burada; ΔS , entropidir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.14)$$

$$\Delta S = - \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p = n.F \left(\frac{\partial \Delta E_r}{\partial T} \right)_p = \left(S^0_{H_2O} - S^o_{H_2} - \frac{1}{2} S^0_{O_2} \right) + \bar{R} \ln \left(\frac{P_{H_2} P^{1/2}_{O_2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.15)$$

Hücreden yayılan reaksiyon ısısı (Chan et al. 2002):

$$Q_r = T \left(\left(S^o_{H_2O} - S^o_{H_2} - \frac{1}{2} S^o_{O_2} \right) + \bar{R} \ln \left(\frac{P_{H_2} P^{1/2}_{O_2}}{P_{H_2O}} \right) \right) \quad (3.16)$$

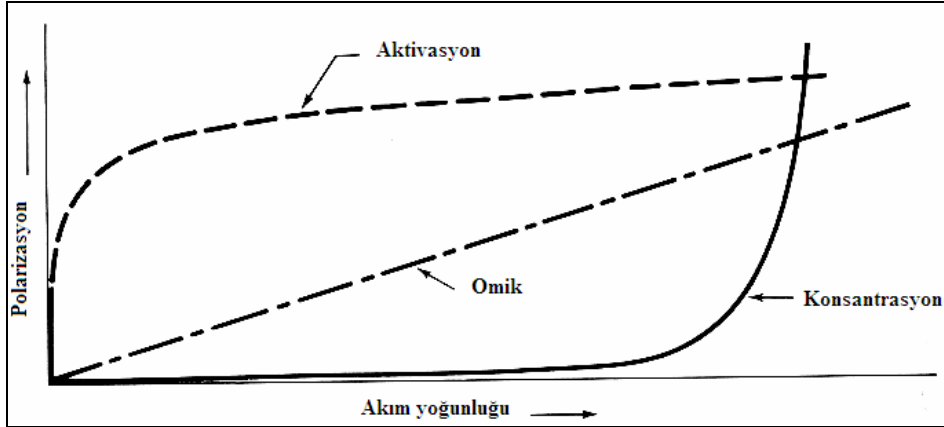
3.4 Polarizasyonlar

Polarizasyonlar veya aşırı potansiyeller, yakıt pilinin malzemesi, mikroyapısı ve tasarımındaki kusurlardan dolayı voltajdaki kayıplardır. Şekil 3.10'dan görüleceği üzere 3 tip polarizasyon vardır: omik polarizasyon, aktivasyon polarizasyonu ve kütle/ konsantrasyon polarizasyonu.

Birinci bölge: Gerilimin çok hızlı değiştiği durumdur. Bölgede kutuplanmanın ve dolayısıyla gerilimin nedeni elektro kimyasal sürecin en düşük hızda olmasıdır. Bu halde akımla gerilim değişmesi arasındaki fonksiyon üstel olarak değişir.

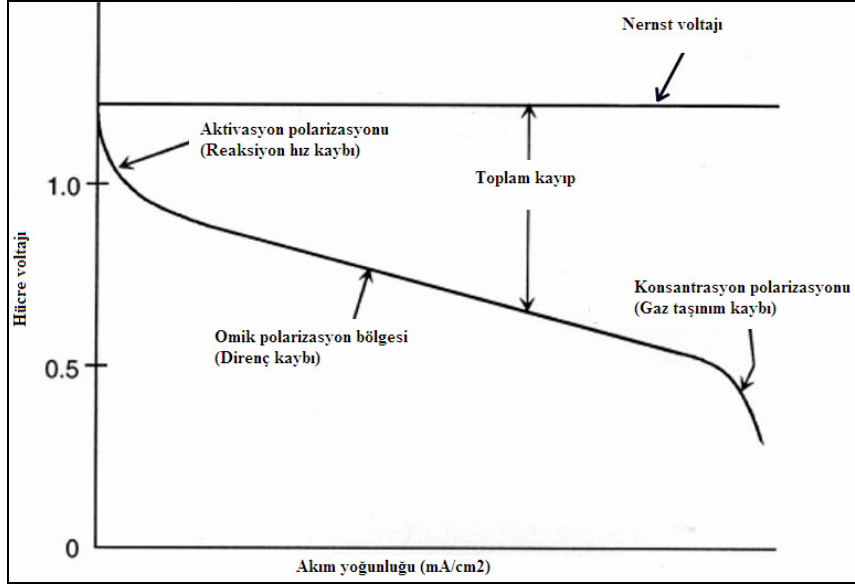
İkinci bölge : Aktif dirençten dolayı gerilimin azalmasını gösterir. Azalma eğrisi doğrusal olarak azalan fonksiyon ile tanımlanabilir.

Üçüncü bölge : Gerilim hızlı akımın ise çok düşük hızla değiştiği bölgedir. Bunun nedeni ise her iki elektrotun difüzyon ve elektrokimyasal kutuplanması ile izah edilmektedir. Bu bölümde akım yüksek olduğu için zar içerisinde geçiş çok hızlanmakta ve neredeyse zar yokmuş gibi atomlar anotdan katoda geçmekte yani düfize olmaktadır.



Şekil 3.10 Polarizasyon tipleri

Şekil 3.11’de polarizasyonların hücre voltajına etkisi görülmektedir.



Şekil 3.11 Polarizasyonun hücre voltajına etkisi

3.4.1 Konsantrasyon aşırı potansiyeli

Konsantrasyon polarizasyonu/ aşırı potansiyeli, gözenekli elektrotların içerisinde geçen gazların taşınımı ve elektrotların mikroyapısı ile ilgilidir (Virkar et al. 2000).

Gözenekli ortamda i bileşeni için efekti gaz difüzyon katsayısı, Knudsen difüzyonu ve adi difüzyonun kombinasyonu ile ifade edilebilir (Bird et al. 2002):

$$D_{ieff} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{i,m}} + \frac{1}{D_{ik}} \right)^{-1} \quad (3.17)$$

3.4.2 Aktivasyon aşırı potansiyeli

Elektrot yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların hızlarına bağlı kayıplar aktivasyon kayıpları olarak adlandırılır. Elektrotlarda reaksiyonun oluşabilmesi için belirli bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu enerji seviyesine ulaşılması halinde reaksiyon gerçekleşebilir. Katalizör yüzeyinin yakıt ve havayı absorpsiyonu, anot reaksiyonunda ortaya çıkan elektronların anottan ayrılmaları, ürün maddelerin desorbe olması gibi durumlar aktivasyon kayıplarının nedenleridir. Aktivasyon polarizasyonu, Butler–Volmer denklemi ile ifade edilmektedir (Bard and Faulkner 2001).

$$i_a = i_{oa} \left[\exp\left(\frac{\beta n_e F \eta_{act,a}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)n_e F \eta_{act,a}}{RT}\right) \right] \quad (3.18)$$

$$i_c = i_{oc} \left[\exp\left(\frac{\beta n_e F \eta_{act,c}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)n_e F \eta_{act,c}}{RT}\right) \right] \quad (3.19)$$

Genellikle; transfer katsayısı, $\beta = 0,5$ alınmaktadır.

Anot için;

$$i_{a,ct} = i_{o,a} \cdot x_{h_2} \frac{c_t}{c_{h_2,ref}} \left[\exp\left(\frac{0.5F}{RT} \eta\right) - \exp\left(\frac{-0.5F}{RT} \eta\right) \right] \quad (3.20)$$

Katot için;

$$i_{c,ct} = i_{o,c} \cdot \left[\exp\left(\frac{0.5F}{RT} \eta\right) - x_{o_2} \frac{c_t}{c_{o_2,ref}} \exp\left(\frac{-0.5F}{RT} \eta\right) \right] \quad (3.21)$$

3.4.3 Omik aşırı potansiyeli

Sistem çalışırken iyonların göçüne karşı koyan bir oluşumdur. Elektrolitteki iyonik direnç ve elektrotlardaki elektronik/ iyonik dirençten dolayı aşırı potansiyel;

$$\eta_{ohm} = i.R_e \quad (3.22)$$

Burada; R_e elektrolit ve elektrotlardaki toplam iyonik ve elektronik dirençtir. Kural olarak; elektrolit direnci elektrotlar arasındaki dirençten yüksektir. Elektrolit azaltılması anot ve katot arasındaki omik potansiyeli düşürebilir. Bununla beraber anodik ve katodik reaktantların karışması hücre potansiyelini düşürücü etki yapar.

3.5 Gerçek Hücre Voltajı

Yakıt pili sistemi için devre voltajı;

$$E_i = E_{nemst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con} \quad (3.23)$$

Burada; E_{nemst} , Nernst potansiyeli, η_{act} , elektrotlardaki aktivasyon potansiyeli, η_{ohm} , sistem direnci ile oluşan omik kayıp ve η_{con} , gözenekli elektrotlardaki gazların difüzyonu ile oluşan konsantrasyon potansiyelidir. Kayıplar, akım yoğunluğu seviyesine bağlıdır (Herschenhofer et al. 1998).

$$E_{nemst} = \frac{-\Delta G_{H_2O}(T)}{2F} - \frac{\bar{R}T}{4F} \ln \left[\frac{(p_{H_2O})^2 p_{O_2}}{(p_{H_2})^2 p_{O_2}} \right] \quad (3.24)$$

4. YAKIT VE YAKIT DÖNÜŞÜMÜ

4.1 Hidrojen

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen, doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Sıvı hidrojenin birim kütle için ısı değeri 141,9 MJ/kg olup, petrolden 3,2 kat daha fazladır. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısı değeri ise 10,2 MJ/m³ tür ve petrolün % 28'i kadardır. Gaz hidrojenin birim kütle için ısı değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2,8 katı kadarken, birim hacminin ısı değeri 0,013 MJ/m³ ile doğal gazın % 32,5'i olmaktadır. Metal hidridlerin kütle başına enerji içeriği 2-10 MJ/kg ile sıvı hidrojene göre çok küçükken, hidridlerin hacimsel enerji içeriği 12,6-14,3 MJ/m³ ile gaz ve sıvı hidrojenden büyüktür.

Çizelge 4.1 Hidrojenin özellikleri

Özellik	Değer
Moleküler ağırlık	2,01594
Gazın yoğunluğu (0°C ve 1 atm.)	0,08987 kg/m ³
Katının yoğunluğu (-259 °C)	858 kg/m ³
Sıvının yoğunluğu (-253 °C)	708 kg/m ³
Erime sıcaklığı	-259°C
Kaynama sıcaklığı (1 atm)	-253°C
Kritik sıcaklık	-240°C
Kritik basınç	12.8 atm.
Kritik yoğunluk	31,2 kg/m ³

Hidrojen ekonomisindeki en kritik faktörlerden birisi nakliye ve taşıt üzerinde hidrojen depolamasıdır. Ana problem, hidrojen gazının yoğunluğunun düşük olmasıdır. Örneğin, benzin tankına eşdeğer enerji depolamak için çevre basıncında ihtiyaç duyulan hidrojen gaz tankı, benzin tankı hacminin yaklaşık 3000 katı kadardır.

Hidrojen depolanması temelde, gazın çok büyük hacminin azaltılmasına dayanmaktadır. Normal koşullar altında (sıcaklık ve basınç), 1 kg hidrojen 11 m³ hacim kaplamaktadır. Depolama sistemindeki hidrojen yoğunluğunu artırmak ve gazı sıkıştırmak amacıyla ortam sıcaklığı kritik sıcaklık değerinin altına düşürülmeli veya hidrojeni başka bir madde ile etkileştirerek tepkimesi azaltılmalıdır. Hidrojen depolama sisteminin bir diğer önemli kriteri de hidrojen kullanımı için gazın geri alımı ve kullanımıdır.

Hidrojen; fiziksel veya kimyasal olarak gaz halinde, sıvı halinde veya bir kimyasal bileşik içinde depolanabilir.

1. Gaz halinde depolama
Değişik malzemelerde yüksek basınçlı gaz tanklarında
2. Sıvı halde depolama
Sıvılaştırılmış hidrojen
Sıvı bileşikler
3. Katı halde depolama (absorblanmış veya adsorblanmış formda)
Metal hidridler
Karbon yapılar
Nanotüpler
Fullerene (C60) orijinli sistemler
Cam mikroküreler

Çizelge 4.2 Hidrojen depolama karşılaştırması

Yakıt	Toplam Enerji (MJ)	Yakıt Ağırlığı (kg)	Tank Ağırlığı (kg)	Toplam Yakıt Sistemi Ağırlığı (kg)	Hacim (litre)
19 litre benzin	662	14	6.4	20,4	19
Sıvı hidrojen (20 K)	662	4,7	18.6	23,3	178
FeTi metal hidrit olarak depolanmış H ₂ (%1,2ağırlıkça)	662	4,7	549.3	554	189
Basıncılı hidrojen (207-690 bar)	662	4,7	63.6-86.3	68,3-91	408-227

Hidrojenin etkin depolanması 150 atmosfer veya daha yüksek basınç değerlerini gerektirmekte, bir taraftan yüksek basınç diğer taraftan tankın hafif olma gerekliliği tank tasarımı açısından zorlayıcı olmaktadır. Bunun için basınçlı tanklarda ve tüplerde sıkıştırılmış olarak saklanır.

Sıvı hidrojen daha az yer kaplar. Fakat hidrojenin sıvılaştırılması için çok yüksek enerji (sıvılaştırılan hidrojenin enerji değerinin 1/3'ü kadar) gerekir.

Katı şekilde hidrojen depolaması için metal hidritler kullanılmaktadır. Hidrojen gazı metal hidrit tarafından sünger gibi çekilerek gözenekleri içinde depolanır. Ancak, metal hidritler de çok ağırdır. Tek cidarlı nanotüpler % 14, çok cidarlılar % 7,7, içlerine alkali elementler yerleştirilenler ise % 20 ağırlık oranına kadar hidrojen depolayabilirler. Nanotüplerin en büyük dezavantajı maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Cam kürelerin depolama kapasitesi 200-490 bar basınç altında % 5-6 civarındadır.

4.2 Petrol

Dünyanın her yanında, kara ve deniz altının çeşitli derinliklerinde, çok uzun yıllar önce hayvansal ve bitkisel artıkların ayrışması sonucu oluşan, hidrokarbon birikimleri mevcuttur. Hidrokarbonlar hidrojen ve karbon bileşikleri olup normal sıcaklık ve basınç şartlarında gaz, sıvı ve katı hallerde bulunurlar.

Petrol en geniş tanımı ile, yeryüzünde doğal olarak mevcut bulunan tüm hidrokarbonları kapsar. Ham petrol, birbirinden güçlükle ayrılabilen maddeler karışımıdır.

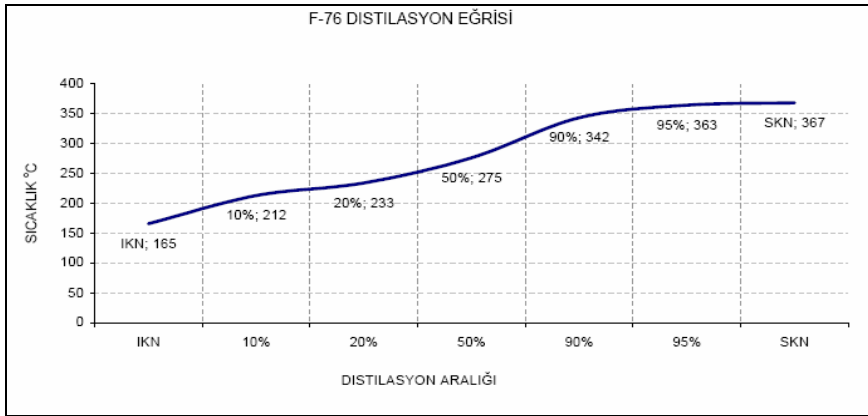
4.3 F-76 Deniz Dizel Yakıtı

F-76 Deniz dizel yakıtı, deniz araçlarının dizel motorlarında kullanılan ve setan indeksi, alevlenme noktası, akma noktası, viskozitesi, külü, karbonu ve kükürdü ayarlanmış damıtılmış bir petrol ürünüdür. F-76 dizel yakıtı, halen NATO üyesi ülkeler tarafından lojistik yakıt olarak kullanılmaktadır.

F-76 deniz dizel yakıtının teknik özellikleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir (Steinfeld, 2000, Katikaneni et al., 2002). Simülasyon için benzer oluşum ısısı, Gibbs serbest enerjisi ve distilasyon eğrisine sahip normal parafin, benzen ve naftalen karışımı kullanılmıştır. F-76 dizel yakıtı bir petrol ürünü olduğundan sabit bir karışım formülü mevcut değildir, orijinal petrolün yapısına göre değişim gösterir. Tipik bir F-76 distilasyon eğrisi Şekil 4.1’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 4.4’de gösterilmiştir (TSE, 2007).

Çizelge 4.3 F-76 dizel yakıtı özellikleri

Molekül Formülü (ortalama)	$C_{14,8}H_{26,9}$
Moleküler Ağırlık	205 kg/kmol
H/C Oranı (Molar)	1,82
Hidrojen içeriği	% 12,5 (min)
Alt ısıl değer	42.700 kJ/kg



Şekil 4.1 Tipik bir F-76 distilasyon eğrisi

Çizelge 4.4 F-76 dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Görünüş	Temiz ve berrak, serbest parçacık ihtiva etmeyen ve (10-25) °C sıcaklık aralığında sudan ayrılmış olmalıdır.
Yoğunluk (15°C'da) kg/m ³	En fazla 860
Renk, ASTM sayısı	En fazla 3
Kül (%m/m)	En fazla 0,005
Karbon kalıntısı: Ramsbottom yöntemi ile %m/m veya Conradson yöntemi ile %m/m	En fazla 0,2 En fazla 0,14
Bakır korozyonu (100°C'da 3 saat)	En fazla No:1
Bulutlanma noktası, °C	En fazla -1
Akma noktası, °C	En fazla -6
Parlama noktası, °C	En az 60
Setan sayısı	En az 40
Setan indeksi	En az 46
Toplam kükürt % m/m	En fazla 0,7
Damıtma sıcaklığı %50 geri kazanım	Kayıt edilir.
%90 geri kazanım	357 °C
Son kaynama noktası	385 °C
Bakiye % m/m	En fazla 3
Kinematik viskozite (40°C'da)	En az 1,7 En fazla 4,3
Nötralizasyon Toplam asit sayısı	0,3
Kuvvetli asit/baz sayısı	Hiç

4.4 Hidrojen Yerine F-76 Dizel Yakıtı Depolama

Hidrojen, yakıt pilleri için ideal bir yakıttır. Ancak, su üstü savaş gemilerinde hidrojen depolamanın,

- Daha yüksek depolama hacimleri gerektirmesi
- Depolama yöntemlerinin enerji gereksinimi ve maliyetinin yüksek olması
- Güvenlik sorunlarının olması

nedeniyle yakıt pilinin avantajlarından istifade etmek isteyen savaş gemilerinin dizel yakıtını kullanan yakıt dönüştürücülere ihtiyacı vardır.

Dizel, hacimsel ve ağırlıksal yoğunluğunun çok yüksek olması nedeni ile en iyi hidrojen depolama sistemlerinden birisidir. F-76 dizel yakıtı, ağırlıkça en az % 12,5 hidrojen içerir ve NATO üyesi ülkelerin savaş gemilerinde kullanılan tek yakıttır. F-76 dizel yakıtından hidrojen zengin gaz elde edebilecek yakıt dönüştürümüne ihtiyaç vardır. Yakıt dönüştürücüden elde edilecek hidrojen zengin gaz, katı oksitli yakıt pilinde kullanılacaktır.

4.5 Yakıt Pili ve Yakıt Dönüştürücü Katalizör Toleransları

Benzer tip yakıt pillerinde bile, yakıt pili üreticileri tarafından tanımlanan zararlı maddeler için toleranslarda farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar, elektrot tasarımından ve mikroyapı farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

4.5.1 Kükürt etkileri

Yakıt dönüştürücüdeki metal katalizörler, kükürt zehirlenmesine hassastır. Kükürt, yakıt pillerinde de katalitik bölgeleri zehirler. Muhtelif yakıt pillerinde kükürt toleransları aşağıdadır. Testler; katı oksitli yakıt pillerinin, 1000 °C işletme sıcaklığında 3.000 ppm'e kadar kükürtü tolere ettiğini göstermiştir (U.S. DOE, 2004).

PEFC < 50 ppm H₂S

PAFC < 50 ppm H₂S

MCFC < 0,5 ppm H₂S

SOFC < 1 ppm H₂S

Ancak, daha az maliyetli metal bileşenlerini kullanmak ve verimi arttırmak için hücre sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kükürt miktarının düşürülmesi gerekir. Bu nedenle; katı oksitli yakıt pillerinde kükürt aralığı, 10-35 ppm verilmektedir.

4.5.2 Karbonmonoksit etkileri

Karbonmonoksit, yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde (MCFC ve SOFC) bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Muhtelif türdeki yakıt pillerinin karbonmonoksit toleransları aşağıdadır (U.S. DOE, 2004).

PEFC < 50 ppm

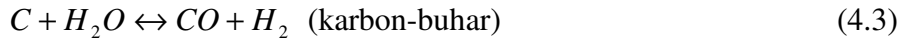
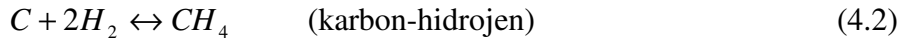
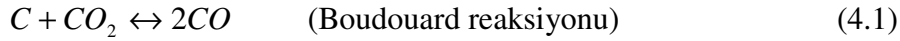
PAFC < %1

MCFC: CO ve H₂O, H₂ ve CO'ya çevrilmektedir.

SOFC: CO, bir yakıt olabilir. Ancak, yakıt gazı, H₂O içerirse dönüşüm reaksiyonu gerçekleşir.

4.5.3 Karbon oluşum etkileri

Hidrokarbon dönüşümlerinde her zaman kok oluşumu potansiyeli vardır. Yakıt dönüştürücü, uygun olarak dizayn edilmemişse veya işletilmiyorsa koklaşma meydana gelebilir. Karbon tortulaşması, reaksiyonda karbon kaybı meydana getirmekle birlikte, aktif bölgelerde ki tortulaşma nedeniyle yakıt dönüştürücü ve yakıt pilindeki katalizörlerin aktivitesini yitirmesine neden olur (U.S. DOE, 2004).



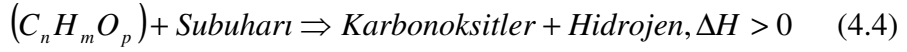
4.6 Yakıt Dönüşümü

Hidrokarbonları dönüştürmek için 3 mekanizma kullanılabilir: Buharlı dönüşüm (SR), kısmi oksidasyon (POX) ve ototermal dönüşüm (ATR).

4.6.1 Buharlı dönüşüm (SR)

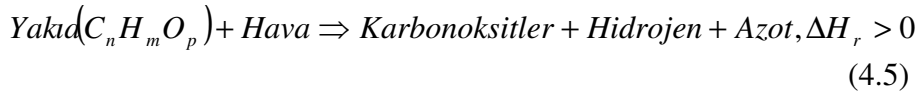
Yakıt ve su ile hidrojen üretmek için buharlı dönüşüm kullanılması çok uygun bir teknolojidir. Buharlı dönüşümün yüksek hidrojen konsantrasyonu ve kararlı halde uzun dönem dengesi gibi birçok avantajları vardır. Ancak, buharlı dönüşüm, karakteristik olarak güçlü endotermik reaksiyonundan dolayı yüksek hacimli bir reaktöre ihtiyaç duyar. Ana zorluklardan birisi de ısı transferidir. Bir buharlı dönüşüm

reaktörünün istenen ısı transferi ile dizayn edilmesi gerekir. Buharlı dönüşüm reaktörünü hızlı bir şekilde çalıştırmak zordur. Sistemin tepkisi yavaştır. Sonuç olarak, büyük ölçekli tesisler için uygundur.



4.6.2 Kısmi oksidasyon (POX)

Kısmi oksidasyon mekanizması tipik yanmadan farklı olarak, hidrojen üretmek için düşük stoykiyometrik oksijenden yararlanarak yakıt ve oksijen kullanır. Bir kısmi oksidasyon reaktörünü yüksek ekzotermisitesinden dolayı hızlı bir şekilde çalıştırmak kolaydır. Bu nedenle küçük sistemler için uygundur. Ancak, kısmi oksidasyon kullanılarak üretilen hidrojen konsantrasyonu buharlı dönüşümdekinden daha düşüktür. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar malzeme seçiminde zorluklar yaratır. Yüksek kok oluşum ihtimali, kısmi oksidasyonun diğer bir dezavantajıdır.



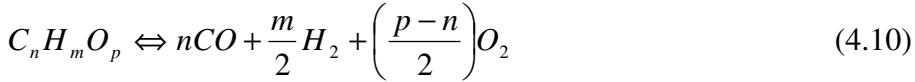
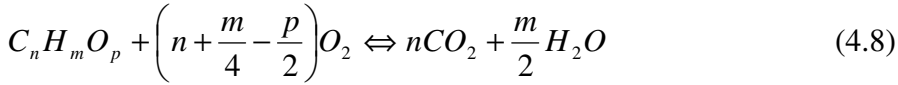
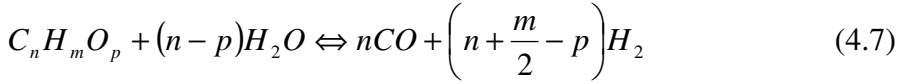
4.6.3 Ototermal dönüşüm (ATR)

Ototermal dönüşüm, kısmi oksidasyon ve buharlı dönüştürücünün bir kombinasyonudur. Hidrojen üretimi için yakıtın, oksijen ve su buharı ile reaksiyonudur.

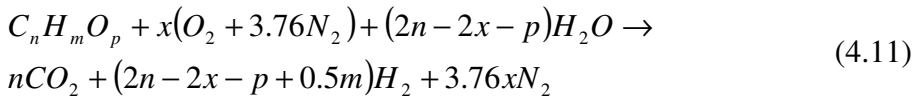


Bir ototermal dönüştürücü içindeki toplam ısı dengesi, ekzotermik ve endotermik reaksiyonların derecesini değiştirerek kontrol edilebilir. Böylece, ototermal dönüştürücü, buharlı dönüştürücünden farklı olarak dış ısı kaynağına ihtiyaç duymaz. Ototermal dönüşümün avantajları, göreceli olarak yüksek verimli basit ve küçük reaktörler olmasıdır.

Ayrıca, dizeli dönüştürmek için su ile oksijenin bulunması düşük kok oluşumu ihtimalini yaratır. Oksijen, hızlı bir ototermal reaksiyonunu kolaylaştırır. Ototermal reaksiyon ile üretilen hidrojen konsantrasyonu, kısmi oksidasyondan daha yüksektir. Ototermal dönüşüm, hidrokarbonlar için aşağıdaki denklemler ile tanımlanabilir.



Ototermal dönüşüm için toplam reaksiyon:



$$x = \frac{O_2}{C_n H_m O_p} \quad (4.12)$$

5. TERMODİNAMİK DENKLEMLER

5.1 Saf Maddelerin Hal Denklemi

Mükemmel gaz hal denklemi basit olmakla birlikte kullanım alanı sınırlıdır. Maddelerin P-v-T ilişkilerini daha geniş sınırlar içinde herhangi bir kısıtlama olmadan ifade eden hal denklemlerine gerek duyulmaktadır. Bu amaçla önerilen çok sayıda denklem vardır. Lee ve Kesler tarafından geliştirilen modifiye edilmiş The Benedict-Webb-Rubin (BWR) denklemi hem en yenilerinden biri hem de çok hassas olduğundan termodinamik analiz bu denklem kullanılarak yapılmıştır.

Gerçek gazların mükemmel gaz davranışından sapması, sıkıştırılabilirlik faktörü Z tanımlanarak hesaplanabilir (Reid, 1987).

$$Z = \frac{P.V}{R.T} \quad (5.1)$$

5.2 İki Parametre Korelasyonu

İdeal gazlar için $Z=1$ 'dir. Gerçek gazlar için Z, 1'den büyük veya küçük olabilir. Z faktörü, indirgenmiş basınç ve sıcaklıklarda tüm gazlar için yaklaşık olarak aynıdır. İndirgenmiş sıcaklık ve basınç şu şekilde tanımlanabilir(Reid, 1987) :

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (5.2)$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

Burada, T_c ve P_c sırasıyla kritik sıcaklık ve basıncı göstermektedir. Sıkıştırılabilirlik faktörü, indirgenmiş sıcaklık ve indirgenmiş basınç ile ifade edilir.

$$Z = f(T_r, P_r) \quad (5.3)$$

5.3 Üç Parametre Korelasyonu

Sıkıştırılabilirlik faktörü

$$Z = Z^{(0)}(T_r, P_r) + wZ^{(1)}(T_r, P_r) \quad (5.4)$$

5.4 Kübik Hal Denklemleri

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + ubV + wb^2} \quad (5.5)$$

Çizelge 5.1 Kübik hal denklemleri için Peng-Robinson sabitleri

u	w	b	a
2	-1	$\frac{0.07780RT_c}{P_c}$	$\frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c} \left[1 + f_w (1 - T_r^{1/2})\right]^2$

Burada,

$$f_w = 0,37464 + 1,54226w - 0,26992w^2 \quad (5.6)$$

5.5 Genelleştirilmiş Benedict-Webb-Rubin Denklemleri

Benedict-Webb-Rubin (BWR) hal denklemi, kübik denklemlerden daha karışıktır. Geniş sıcaklık ve basınç aralıklarında kullanılmaktadır. Sıkıştırılabilirlik faktörü, basit akışkanın özellikleri ($w=0$) ve referans akışkan n-oktan ile ilişkilidir.

Basit bir akışkanın indirgenmiş hacmi şu şekilde hesaplanır (Reid, 1987).

$$\frac{P_r V_r^{(0)}}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r^{(0)}} + \frac{C}{(V_r^{(0)})^2} + \frac{D}{(V_r^{(0)})^5} + \frac{c_4}{T_r^3 (V_r^{(0)})^2} \left[\beta + \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] \exp \left[-\frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] \quad (5.7)$$

Burada;

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3} \quad (5.8)$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} - \frac{c_3}{T_r^3} \quad (5.9)$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r} \quad (5.10)$$

$$V_r^{(0)} = \frac{P_c V^{(0)}}{R T_c} \quad (5.11)$$

Basit bir akışkanın sıkıştırılabilirlik faktörü :

$$Z^{(0)} = \frac{P_r V_r^{(0)}}{T_r} \quad (5.12)$$

Referans akışkanın sıkıştırılabilme faktörü :

$$Z^{(R)} = \frac{P_r V_r^{(R)}}{T_r} \quad (5.13)$$

Çizelge 5.2 Lee-Kesler sabitleri

Sabit	Basit akışkan	Referans akışkan
b_1	0,1181193	0,2026579
b_2	0,265728	0,331511
b_3	0,154790	0,027655
b_4	0,030323	0,203488
c_1	0,0236744	0,0313385
c_2	0,0186984	0,0503618
c_3	0	0,016901
c_4	0,042724	0,041577
$d_1 \times 10^4$	0,155488	0,48736
$d_2 \times 10^4$	0,623689	0,0740336
β	0,65392	1,226
γ	0,060167	0,03754

Akışkanın sıkıştırılabilme faktörü (Reid, 1987) :

$$Z = Z^{(0)} + \left(\frac{w}{w^{(R)}} \right) (Z^{(R)} - Z^{(0)}) \quad (5.14)$$

Burada;

$$w^{(R)} = 0.3978 \quad (5.15)$$

Kayma faktörü;

$$w = \frac{\alpha}{\beta} \quad (5.16)$$

$$\alpha = -\ln P_c - 5.92714 + 6.09648\theta^{-1} + 1.28862 \ln \theta - 0.169347\theta^6 \quad (5.17)$$

$$\beta = 15.2518 - 15.6875\theta^{-1} - 13.4721 \ln \theta + 0.43577\theta^6 \quad (5.18)$$

$$\theta = \frac{T_b}{T_c} \quad (5.19)$$

5.6 Entalpi

$$H = f(P, T) \quad (5.20)$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT \quad (5.21)$$

Gerçek akışkan için;

$$\frac{H^0 - H}{RT_c} = \left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} + w \left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(1)} \quad (5.22)$$

Basit akışkanın entalpi departure fonksiyonu T_r , $V_r^{(0)}$ ve $Z^{(0)}$ dan hesaplanabilmektedir (Reid, 1987).

$$\left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} = -T_r \left[\begin{array}{l} Z^{(0)} - 1 - \frac{b_2 + 2b_3/T_r + 3b_4/T_r^2}{T_r(V_r^{(0)})} \\ - \frac{c_2 - 3c_3/T_r^2}{2T_r(V_r^{(0)})^2} + \frac{d_2}{5T_r(V_r^{(0)})^5} + 3E \end{array} \right] \quad (5.23)$$

Burada E;

$$E = \frac{c_4}{2T_r^3 \gamma} \left\{ \beta + 1 - \left[\beta + 1 + \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] \exp \left[-\frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] \right\} \quad (5.24)$$

Sapma fonksiyonu;

$$\left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(1)} = \frac{1}{w^R} \left[\left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(R)} - \left(\frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} \right] \quad (5.25)$$

$$w^R = 0,3978 \quad (5.26)$$

5.7 Entropi

$$\begin{aligned} \left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(0)} &= -\ln \frac{P^0}{P} - \ln Z^{(0)} + \frac{b_1 + b_3 / T_r^2 + 2b_4 / T_r^3}{V_r^{(0)}} \\ &+ \frac{c_1 - 2c_3 / T_r^3}{2(V_r^{(0)})^2} + \frac{d_1}{5(V_r^{(0)})^5} - 2E \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\frac{S^0 - S}{R} = \left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(0)} + \frac{w}{w^R} \left[\left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(R)} - \left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(0)} \right] \quad (5.28)$$

Denklemler yeniden düzenlenirse;

$$\frac{S^0 - S}{R} = -\ln \frac{P^0}{P} + \left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(0)} + w \left(\frac{S^0 - S}{R} \right)^{(1)} \quad (5.29)$$

Basit akışkan entropisinin $()^{(0)}$ ve $()^{(1)}$ fonksiyonu ilgili kaynaklardan (Reid, 1987) alınmıştır.

5.8 Viskozite

5.8.1 Düşük basınçlı gaz viskozitesi

Düşük basınçlı gaz viskozitesini belirlemek için Chung Metodu kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\frac{\varepsilon}{k} = \frac{T_c}{1.2593} \quad (5.30)$$

$$\sigma = 0.809V_c^{1/3} \quad (5.31)$$

Burada;

ε/k ve T_c 'nin birimi Kelvin, σ 'nın birimi Angstroms ve V_c 'nin birimi cm^3/mol 'dür.

$$T^* = 1.2593T_r \quad (5.32)$$

$$\eta = 40,785 \frac{F_c (M.T)^{1/2}}{V_c^{2/3} \Omega_v} \quad (5.33)$$

$$F_c = 1 - 0.2756w + 0.059035\mu_r^4 + \kappa \quad (5.34)$$

$$\mu_r = 131,3 \frac{\mu}{(V_c T_c)^{1/2}} \quad (5.35)$$

$$\Omega_v = \left[A(T^*)^{-B} \right] + C[\exp(-DT^*)] + E[\exp(-FT^*)] \quad (5.36)$$

Burada,

$$T^* = \frac{k.T}{\varepsilon} \quad (5.37)$$

A=1,16145, B=0,14874, C=0,52487, D=0,77320, E=2,16178,
F=2,43787

$$\kappa = 0,0682 + 0.2767[(17)(OH \text{ _ sayı}) / \text{mol kütlesi}] \quad (5.38)$$

5.8.2 Düşük basınçta gaz karışımlarının viskozitesi

Düşük basınçlarda gaz karışımlarının viskozitesini hesaplamak için Wilke metodu kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (5.39)$$

Burada;

η_m , karışımın viskozitesi

n_1, n_2 , saf bileşen viskoziteleri

y_1, y_2 ; mol oranları

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i / \eta_j)^{1/2} (M_j / M_i)^{1/4}]^2}{[8(1 + M_i / M_j)]^{1/2}} \quad (5.40)$$

ϕ_{ij} için Hering and Zipperer yaklaşımı;

$$\phi_{ji} = \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/2} = \phi_{ji}^{-1} \quad (5.41)$$

ile verilmektedir.

5.8.3 Sıvı viskozitesi

Sıvıların viskoziteleri, aynı sıcaklıkta gazlarından daha yüksektir. Sıvı viskozitesini belirlemek için Przedziecki ve Sridhar metodu kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\eta_L = \frac{V_o}{E(V - V_o)} \quad (5.42)$$

Burada;

η_L , sıvının viskozitesi, cP

V , sıvının mol hacmi, cm^3/mol

$$E = -1.12 + \frac{V_c}{12.94 + 0.10M - 0.23P_c + 0.0424T_f - 11.58(T_f/T_c)} \quad (5.43)$$

$$V_o = 0.0085wT_c - 2.02 + \frac{V_m}{0.342(T_f/T_c) + 0.894} \quad (5.44)$$

5.9 Isıl İletkenlik

5.9.1 Gazların ısı iletkenliği

Düşük basınçlı gazların ısı iletkenliğini belirlemek için Chung metodu kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\frac{\lambda M'}{\eta C_v} = \frac{3.75\Psi}{C_v / R} \quad (5.45)$$

Burada;

λ , ısı iletkenlik, W/mK

M' , mol kütlesi, kg/mol

η , düşük basınçlı gaz viskozitesi, N.s/m²

c_v ,sabit hacimde ısı kapasitesi, J/mol.K

R ,gaz sabiti, 8,314 J/molK

$$\Psi = 1 + \alpha \{ [0.215 + 0.28288\alpha - 1.061\beta + 0.26665Z] / [0.6366 + \beta Z + 1.061\alpha\beta] \} \quad (5.46)$$

$$\alpha = (C_v / R) - \frac{3}{2} \quad (5.47)$$

$$\beta = 0.7862 - 0.7109w + 1.3168w^2 \quad (5.48)$$

$$Z = 2 + 10.5T_r^{-2} \quad (5.49)$$

5.9.2 Düşük basınçlı gaz karışımlarının ısı iletkenliği

Gaz karışımının ısı iletkenliği, mol oranının doğrusal fonksiyonu değildir. Wassiljewa denklemi kullanılır (Reid, 1987).

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}} \quad (5.50)$$

Mason ve Saxena, A_{ij} 'yi aşağıdaki şekilde önermiştir (Reid, 1987).

$$A_{ij} = \frac{\varepsilon \left[1 + (\lambda_{iri} / \lambda_{rj})^{1/2} (M_i / M_j)^{1/4} \right]^2}{\left[8(1 + M_i / M_j) \right]^{1/2}} \quad (5.51)$$

Burada; $\varepsilon = 1$ 'dir.

5.9.3 Sıvıların ısı iletkenliği

Normal kaynama noktasında aşağıdaki Sato denklemini kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\lambda_L(T_b) = \frac{1.11}{M^{1/2}} \quad (5.52)$$

Burada;

λ_L , sıvının ısı iletkenliği, W/mK

M , mol kütlesi, g/mol

Diğer sıcaklıklarda λ_L 'yi tahmin etmek için aşağıdaki Riedel denklemini kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\lambda_L = \frac{(1.11/M^{1/2}) \left[3 + 20(1 - T_r)^{2/3} \right]}{3 + 20(1 - T_b)^{2/3}} \quad (5.53)$$

Burada;

T_b , normal kaynama sıcaklığı, K

T_c , kritik sıcaklık, K

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (5.54)$$

5.10 Yüzey Gerilimi

Birim uzunluktaki yüzey düzlemine uygulanan kuvvet olarak tanımlanır. Yüzey gerilimi, genellikle dyn/cm olarak ifade edilir. SI birimleri ile,

$1 \text{ erg} / \text{cm}^2 = 1 \text{ mJ} / \text{m}^2 = 1 \text{ mN} / \text{m}$ olarak gösterilir.

5.10.1 Gazların yüzey gerilimi

Brock ve Bird'in önerdiği korelasyon kullanılmıştır (Reid, 1987).

$$\frac{\sigma}{P_c^{2/3} \cdot T_c^{1/3}} = (0.132\alpha_c - 0.279)(1 - T_r)^{11/9} \quad (5.55)$$

Burada;

α_c , Kritik noktadaki Riedel parametresidir (Reid, 1987).

$$\alpha_c = 0.9076 \left[1 + \frac{T_b \ln(P_c / 1.01325)}{1 - T_b} \right] \quad (5.56)$$

$$\sigma = P_c^{2/3} \cdot T_c^{1/3} \cdot Q(1 - T_r)^{11/9} \quad (5.57)$$

$$Q = 0.1196 \left[1 + \frac{T_{br} \ln(P_c / 1.01325)}{1 - T_{br}} \right] - 0.279 \quad (5.58)$$

5.10.2 Karışımların yüzey gerilimi

Macleod-Sugden bağıntısı kullanılmıştır. Karışımın yüzey gerilimi (Reid, 1987).;

$$\sigma_m^{1/4} = \sum_{i=1}^n [P_i] (\rho_{Lm} x_i - \rho_{vm} y_i) \quad (5.59)$$

Burada;

σ_m , karışımın yüzey gerilimi, dyn/cm

$[P_i]$, i bileşenin parakoru

x_i, y_i , sıvı ve buhar fazlarında i'nin mol oranı

ρ_{Lm} , sıvı karışımın yoğunluğu, mol/cm³

ρ_{vm} , buhar karışımın yoğunluğu, mol/cm³

5.11 Programlama Dili

Akışkanların termodinamik ve fiziksel özelliklerinin hesaplanmasında Java programlama dili kullanılmıştır. Termodinamik hesaplamalarda kullanılan programlar, Ek'te verilmiştir. Java programlama dili ile yazılan program ile $x=0$ 'da dizelin termodinamik özellikleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

known properties

mass/mole

gas Name

pressure

quality

p x

mole

dize1

1.1

0.0

dize1

bar

Gas Formula :

C3H20 0.01715

C10H22 0.03079

C11H24 0.06964

C11H16 0.00328

C12H26 0.00855

C10H8 0.04268

C12H16 0.004556

Property	Value	Units
P, pressure	1.1	bars
T, temperature	427.57797325807484	deg K
v, specific volume	0.29081378483066166	m ³ /kmole
h, enthalpy	51358.20244674691	KJ/kmole
u, internal energy	51328.51293387986	KJ/kmole
s, entropy	1812.7348641618841	KJ/kmole K
z,	0.8	
z0ne name	RealGases.mixture	
Compressibility factor	0.8089688671182844	
g, Gibbs free energy	-585459.8475955804	KJ/kmole
h, surface tension	0.01741281880037748	N/m
cp, specific heat constant v	486.0814703240273	KJ/kmole K
cv, specific heat constant v	455.081427822815	KJ/kmole K
M, molecular weight	188.0606185304628	kg/kmole
kh, mixture conductivity	0.1014173368068043	W/m.K
mu, mixture viscosity	3.8241012022838183E-4	Pa.s

Şekil 5.1 Java arayüzü

6. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

6.1 Fiziksel Özellikler

Dizel yakıt, çok farklı hidrokarbonlardan oluşmuş kompleks bir karışımdır. Genellikle ASTM standartları ile karakterize edilmektedir. Termodinamik analiz için benzer oluşum ısısına ve Gibbs serbest enerjisine sahip parafinler, benzenler ve naftalenler içeren dizel yakıt karışımı kullanılmış olup kompozisyonu Çizelge 6.1’de verilmiştir (Amphlett et al., 1998; Baratto et al.,2005). Sistemin termodinamik analizinde yakıt, su ve havayı basınçlandırmak için atmosfer basıncına ilave olarak 10 kPa basınç öngörülmüş olup, sistem bileşenlerindeki basınç düşümü dikkate alınmamıştır.

Çizelge 6.1 Dizel yakıt karışımı

Bileşen	Kimyasal Formülü	Mol Oranı kmol/kmoldizel	Kütle Oranı kg/kg dizel
n-Nonane	c9h20	0,01715	0,0122
n-Decane	c10h22	0,03079	0,0243
n-C11 (n-Undecane)	c11h24	0,05964	0,0517
n-C12 (n-Dodecane)	c12h26	0,09655	0,0912
n-C13 (n-Tridecane)	c13h28	0,1960	0,2007
n-C14 (n-Tetradecane)	c14h30	0,1780	0,1959
n-C15 (n-Pentadecane)	c15h32	0,08319	0,0980
n-C16 (n-Hexadecane)	c16h34	0,03902	0,0490
n-C17 (n-Heptadecane)	c17h36	0,01837	0,0245
n-C18 (n-Octadecane)	c18h38	0,00865	0,0122
n-C19 (n-Nonadecane)	c19h40	0,00409	0,0061
n-C20 (n-Eicosane)	c20h42	0,001978	0,0031
n-Pentilbenzen	c11h16	0,00328	0,0027
n-Hexilbenzen	c12h18	0,004556	0,0041

n-Heptilbenzen	c13h20	0,005626	0,0055
n-Oktilbenzen	c14h22	0,005495	0,0058
n-Nonilbenzen	c15h24	0,005206	0,0059
n-Decilbenzen	c16h26	0,005367	0,0065
n-C11benzen	c17h28	0,002328	0,0030
n-C12benzen	c18h30	0,001463	0,0020
Naftalen	c10h8	0,04248	0,0302
I-Metilnaftalen	c11h10	0,08293	0,0654
I-Etilnaftalen	c12h12	0,05228	0,0453
I-Propilnaftalen	c13h14	0,03410	0,0322
I-Bütilnaftalen	c14h16	0,02103	0,0215

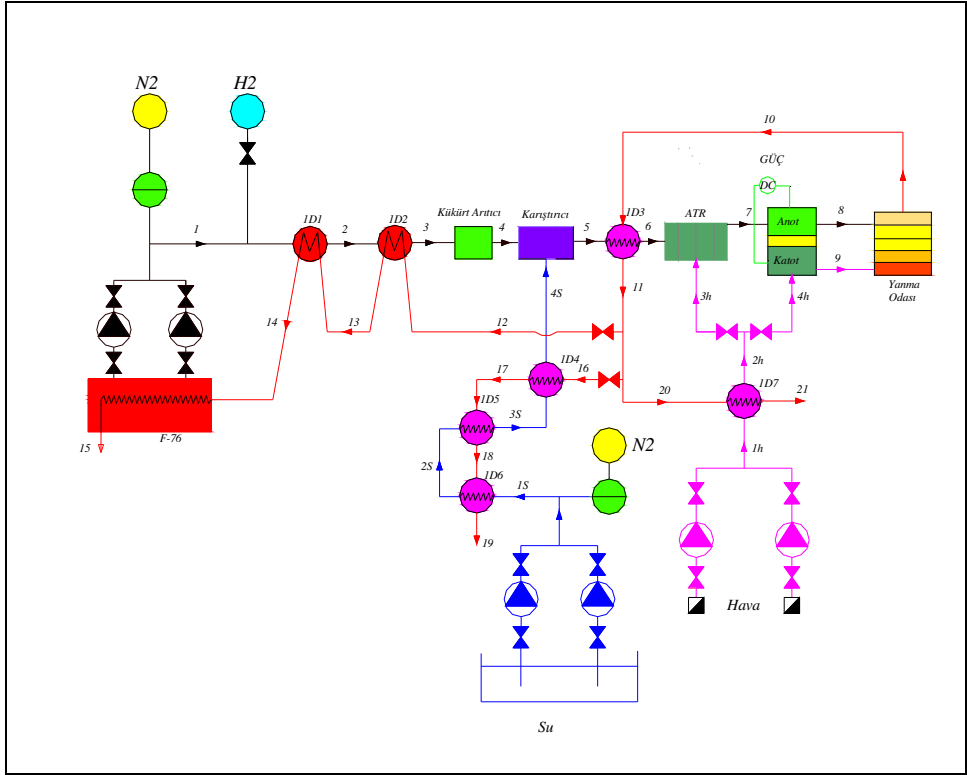
6.2 Sistem Dengesinin Kurulması

F-76 dizel yakıt sarnıcından beslenen yakıt pompası ile F-76 dizel yakıtı önce bir ön ısıtıcıdan geçirilir. Daha sonra yakıt, evaporatörde katalitik yanma odasından gelen egzoz gazı ile buharlaştırılır. Buharlaştıran F-76 dizel, bir kükürt arıtıcıdan geçirilerek kükürtü alınır.

F-76 dizel yakıt sarnıcından beslenen yakıt pompası ile F-76 dizel yakıtı önce bir ön ısıtıcıdan geçirilir. Daha sonra yakıt, evaporatörde katalitik yanma odasından gelen egzoz gazı ile buharlaştırılır. Buharlaştıran F-76 dizel, bir kükürt arıtıcıdan geçirilerek kükürtü alınır.

Kükürtü alınmış F-76 dizel yakıt buharı karıştırıcıda su buharı ile karıştırılır. Karıştırıcıdan çıkan yakıt-su buharı karışımı egzoz gazı yardımı ile ısıtılır. Ototermlal yakıt dönüştürücüde yakıt-su buharı ve hava ile F-76 dizel yakıtından hidrojen zengin gaz elde edilerek katı oksitli yakıt piline gönderilir.

Katı oksitli yakıt pilinde dış devreden akan elektron yardımı ile güç alınırken anot ve katot tarafından çıkan gazlar, katalitik yanma odasında yakılarak bir enerji elde edilir. Buradan elde edilen egzoz gazı, 7 adet ısı değiştiricide dizel yakıt, su ve havanın ısıtılmasında kullanılmaktadır. Sistemin akış şeması şekil 6.1'de verilmiştir.



şekil 6.1 F-76 Dizel yakıtlı yakıt pili sistemi akış şeması

1 NOKTASI:

$$n_1 = 1 \text{ kmol}$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 1,1 \text{ bar}$$

$$h_1 = 0 \text{ kJ / kmol}$$

2 NOKTASI:

$$n_2 = 1 \text{ kmol}$$

$$T_2 = 125 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_2 = 1,1 \text{ bar}$$

$$h_2 = 39117 \text{ kJ / kmol}$$

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = 39117 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q_{1-2} = 1 \cdot (39117) = 39117 \text{ kJ}$$

3 NOKTASI:

$$n_3 = 1 \text{ kmol}$$

$$T_3 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 1,1 \text{ bar}$$

$$h_3 = 153721 \text{ kJ / kmol}$$

$$\Delta h_{2-3} = h_3 - h_2 = 114604 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q_{2-3} = 1 \cdot (114604) = 114604 \text{ kJ}$$

İlk Kaynama Noktası : 154 $^\circ\text{C}$, $h = 51358 \text{ kJ/kmol}$

Son Kaynama Noktası : 348 $^\circ\text{C}$, $h = 127332 \text{ kJ/kmol}$

Kabul:

Ototermal Dönüştürücü :

$$\text{Buhar- karbon oranı} = \frac{(\text{Buhar})_{mol}}{(\text{Karbon})_{mol}} = 3,5$$

$$C=9(0.01715)+10(0.03079)+11(0.05964)+12(0.09655)+13(0.1960)+14(0.1780)+15(0.08319)+16(0.03902)+17(0.01837)+18(0.00865)+19(0.00409)+20(0.001978)+11(0.00328)+12(0.004556)+13(0.005626)+14(0.005495)+15(0.005206)+16(0.005367)+17(0.002328)+18(0.001463)+10(0.004248)+11(0.08293)+12(0.05228)+13(0.03410)+14(0.02103)$$

$$C=12,9471 \text{ kmol}$$

$$\text{Buhar}=3,5(12,9471)=45,3148 \text{ kmol}$$

Adyabatik karıştırıcıya giren buhar miktarı:

$$n_{3s} = 45,3148 \text{ kmol}$$

4 NOKTASI:

$$n_4 = 1 \text{ kmol}$$

$$T_4 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_4 = 1,1 \text{ bar}$$

$$h_4 = 153,721 \text{ kJ / kmol}$$

5 NOKTASI:

Adyabatik karıştırıcıdan çıkan miktar:

$$n_5 = n_4 + n_{3s}$$

$$n_5 = 1 + 45,3148 = 46,3148 \text{ kmol}$$

$$T_5 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_5 = 1,1 \text{ bar}$$

5 noktasının entalpisini bulabilmek için:

RealGasMix.txt :

diesel_5nok
26
c9h20 0.01715
c10h22 0.03079
c11h24 0.05964
c12h26 0.09655
c13h28 0.1960
c14h30 0.1780
c15h32 0.08319
c16h34 0.03902
c17h36 0.01837
c18h38 0.00865
c19h40 0.00409
c20h42 0.001978
c11h16 0.00328
c12h18 0.004556
c13h20 0.005626
c14h22 0.005495
c15h24 0.005206
c16h26 0.005367
c17h28 0.002328
c18h30 0.001463
c10h8 0.04248
c11h10 0.08293
c12h12 0.05228
c13h14 0.03410
c14h16 0.02103
h2o 45.3148

LKmixTable:

$$h_s = 16241 \text{ kJ / kmol}$$

6 NOKTASI:

68

$$n_6 = 46,3148 \text{ kmol}$$

$$T_6 = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_6 = 1,1 \text{ bar}$$

6 noktasının entalpisini bulabilmek için:

LKmixTable:

$$h_6 = 31507 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_6 - h_5 = 31507 - 16241 = 15266 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q_{5-6} = 46,3148(15266) = 707041 \text{ kJ}$$

Ototermal reformer için ihtiyaç duyulan O₂:

$$\begin{aligned} C = & 9(0.01715) + 10(0.03079) + 11(0.05964) + 12(0.09655) + 13(0.1960) + \\ & 14(0.1780) + 15(0.08319) + 16(0.03902) + 17(0.01837) + 18(0.00865) + 19(0.0 \\ & 0409) + 20(0.001978) + 11(0.00328) + 12(0.004556) + 13(0.005626) + 14(0.00 \\ & 5495) + 15(0.005206) + 16(0.005367) + 17(0.002328) + 18(0.001463) + 10(0.0 \\ & 04248) + 11(0.08293) + 12(0.05228) + 13(0.03410) + 14(0.02103) \end{aligned}$$

$$C = 12,9471 \text{ kmol}$$

İndirgenmiş H:

$$\begin{aligned} H = & 10(0.01715) + 11(0.03079) + 12(0.05964) + 13(0.09655) + 14(0.1960) + \\ & 15(0.1780) + 16(0.08319) + 17(0.03902) + 18(0.01837) + 19(0.00865) + 20(0.0 \\ & 0409) + 21(0.001978) + 8(0.00328) + 9(0.004556) + 10(0.005626) + 11(0.0054 \\ & 95) + 12(0.005206) + 13(0.005367) + 14(0.002328) + 15(0.001463) + 4(0.0042 \\ & 48) + 5(0.08293) + 6(0.05228) + 7(0.03410) + 8(0.02103) \end{aligned}$$

$$H = 12,1836 \text{ kmol}$$

$$\text{Stoikiyometrik O}_2 = 19 \text{ kmol}$$

Bu yanmayı %20'lik hava ile yaparsak:

$$19(0,20) = 3,8 \text{ kmolO}_2$$

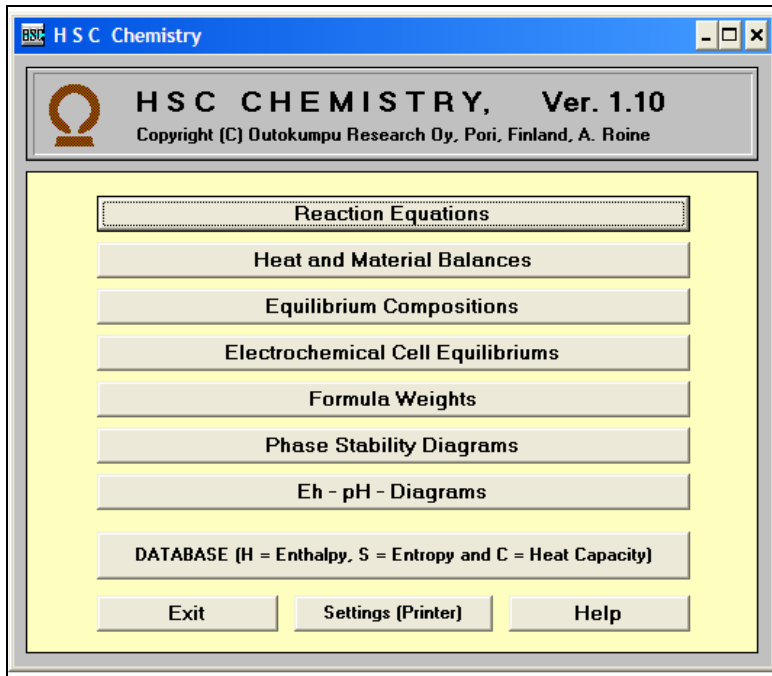
$$3,8(79 / 21) = 14,29 \text{ kmolN}_2$$

$$n_{3h} = 18,09 \text{ kmol}$$

7 NOKTASI:

Ototermal Yakıt Dönüştürücü Çıkışındaki Yakıt (Yakıt Piline Giren Gaz)

F-76 dizel yakıtın ototermal yakıt dönüştürücüdeki termodinamiği HSC Chemistry Programı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2 HSC CHEMISTRY arayüzü

INPUT AMOUNT EQUIL AMOUNT MOLE FRACT ACTIVITY
ACTIVITY

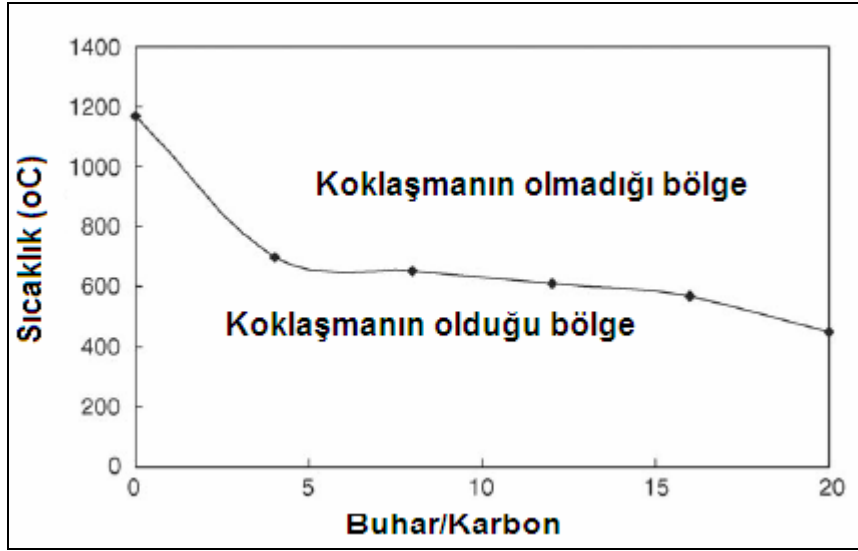
PHASE 1:	mol	mol	COEFFICI	
H2O(g)	4.5315E+01	3.1413E+001	3.707E-01	1.00E+00
		3.707E-01		
H2(g)	0.0000E+00	2.6086E+001	3.078E-01	1.00E+00
		3.078E-01		
N2(g)	1.4290E+01	1.4290E+001	1.686E-01	1.00E+00
		1.686E-01		
CO2(g)	0.0000E+00	8.5549E+000	1.010E-01	1.00E+00
		1.010E-01		
CO(g)	0.0000E+00	4.3922E+000	5.183E-02	1.00E+00
		5.183E-02		
O2(g)	3.8000E+00	1.8043E-020	2.129E-22	1.00E+00
		2.129E-22		
C10H8(g)	4.2480E-02	1.0459E-025	1.234E-27	1.00E+00
		1.234E-27		
C11H10(g)	8.2930E-02	4.3889E-029	5.179E-31	1.00E+00
		5.179E-31		
C9H20(g)	1.7150E-02	3.5693E-035	4.212E-37	1.00E+00
		4.212E-37		
C10H22(g)	3.0790E-02	1.6372E-039	1.932E-41	1.00E+00
		1.932E-41		
C12H12(g)	5.2280E-02	6.2824E-040	7.414E-42	1.00E+00
		7.414E-42		
C11H16(g)	3.2800E-03	1.2228E-042	1.401E-44	1.00E+00
		1.401E-44		
C11H24(g)	5.9640E-02	7.5767E-044	1.401E-45	1.00E+00
		1.401E-45		
C13H14(g)	3.4100E-02	6.2990E-045	0.000E+00	1.00E+00
		0.000E+00		
C12H18(g)	4.5560E-03	9.4738E-048	0.000E+00	1.00E+00
		0.000E+00		
C14H16(g)	2.1030E-02	5.6993E-050	0.000E+00	1.00E+00
		0.000E+00		
C13H20(g)	5.6260E-03	7.1748E-053	0.000E+00	1.00E+00
		0.000E+00		

C14H30(g)	1.7800E-01	7.6352E-057	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C12H26(g)	9.6550E-02	4.4632E-057	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C14H22(g)	5.4950E-03	5.5902E-058	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C15H32(g)	8.3190E-02	3.5144E-061	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C13H28(g)	1.9600E-01	7.0779E-063	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C15H24(g)	5.2060E-03	4.6664E-063	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C16H34(g)	3.9020E-02	1.6655E-065	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C16H26(g)	5.3670E-03	3.1310E-068	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C17H36(g)	1.8370E-02	7.7999E-070	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C17H28(g)	2.3280E-03	2.4093E-073	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C18H38(g)	8.6500E-03	3.6360E-074	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C19H40(g)	4.0900E-03	1.7059E-078	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C18H30(g)	1.4630E-03	1.6948E-078	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
C20H42(g)	1.9780E-03	8.0631E-083	0.000E+00	1.00E+00	0.000E+00
Toplam :	6.4405E+01	8.4736E+001	1.000E+00		

Reaksiyon entalpisinin ($Q=0$) sıfır olduğu sıcaklık;

$$T = 973 \text{ K} = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Buhar/Karbon oranının kok oluşumuna etkisi Şekil 6.3’de gösterilmiştir. Buhar/karbon oranı arttıkça kok oluşumunu önleyecek minimum sıcaklık azalır.



Şekil 6.3 Buhar/Karbon oranının kok oluşumuna etkisi

Ototermal yakıt dönüştürücü giriş molü= 64,405 kmol
 Ototermal yakıt dönüştürücü çıkış molü= 84,736 kmol

Yakıt Pili Dengesi:

	mol	mol	COEFFICI		
H ₂ O(g)	4.5315E+01	3.1413E+001	3.707E-01	1.00E+00	3.707E-01
H ₂ (g)	0.0000E+00	2.6086E+001	3.078E-01	1.00E+00	3.078E-01
N ₂ (g)	1.4290E+01	1.4290E+001	1.686E-01	1.00E+00	1.686E-01
CO ₂ (g)	0.0000E+00	8.5549E+000	1.010E-01	1.00E+00	1.010E-01
CO(g)	0.0000E+00	4.3922E+000	5.183E-02	1.00E+00	5.183E-02

(31.413 H₂O +26.086 H₂ + 14.290 N₂ + 8.5549 CO₂ + 4.3922 CO)+ O₂

Çizelge 6.2 Ototermal yakıt dönüştürücüden çıkan gaz

Dönüşen gaz	kmol/kmoldizel
Hidrojen	26,086
Karbonmonoksit	4,3922
Azot	14,290
Su	31,413
Karbondioksit	8,5549

$$n_7 = 84,736 \text{ kmol}$$

$$T_7 = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_7 = 1,1 \text{ bar}$$

RealGasmix.txt :

dizel_7nok

5

h2o 31.413

h2 26.086

n2 14.290

co2 8.5549

co 4.3922

java LKmixTable:

h7=23139 kJ/kmol

8 NOKTASI (YAKIT PİLİ ÇIKIŞI):

Kabuller:

Yakıt Pili Çıkış Sıcaklığı =850 °C

Yakıt Pili Yakıt Dönüşüm Oranı =% 90

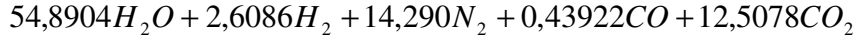
H₂ ve CO'nun %10'u alınır:

31,413H₂O + 2,6086H₂ + 23,4774H₂O + 14,290N₂

+ 8,5549CO₂ + 0,43922CO + 3,95298CO₂

74

veya,



Hidrojen (H) balansı:

$$\text{Giriş: } 2(31.413) + 2(26.086) = 114.998$$

$$\text{Çıkış: } 2(31.413) + 2(2.6086) + 2(23.4774) = 114.998$$

Oksijen (O) balansı:

$$31,413 + 2(8,549 + 4,3922 + 2X) =$$

$$31,413 + 23,4774 + 2(8,5549 + 0,43922) + 2(3,95298)$$

$$31,413 + 2(8,5549) + 4,3922 + 2X = 31,413 + 23,4774 + 2(8,5549) + 0,43922 + 2(3,95298)$$

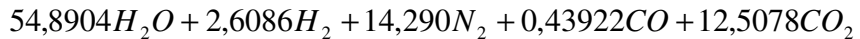
$$X = 13,715 \text{ (O}_2 \text{ molekülü)}$$

$$n_8 = 84,736 \text{ kmol}$$

$$T_8 = 850^\circ C$$

$$P_8 = 1,1 \text{ bar}$$

1 kmol dizel yakıt için yakıt pili çıkışı = 84,736 kmol



RealGasmix.txt :

dizel_8nok

5

h2o 54.8904

h2 2.6086

n2 14.290

co 0.43922

co2 12.5078

java LKmixTable:

$$h_g = 31328 \text{ kJ / kmol}$$

Yakıt pili anot çıkışındaki gaz oranları, Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Yakıt pili anot çıkışı

Gaz	kmol/kmoldizel
Hidrojen	2,6086
Karbonmonoksit	0,43922
Azot	14,290
Su	54,8904
Karbondioksit	12,5078

4h Noktası (Yakıt Piline Hava Girişi)

$$n_{4h} = 40 \left(O_2 + \frac{79}{21} N_2 \right) = 190,476 \text{ kmol}$$

9 Noktası

$$n_{O_2} = 40 - 13,715 = 26,285$$

$$n = 26,285 O_2 + 150 N_2$$

$$n = 176,285 \text{ kmol}$$

$$T_9 = 850 \text{ } ^\circ C$$

KATALİTİK YANMA

$$(54,8904 H_2 O + 2,6086 H_2 + 14,290 N_2 + 0,43922 CO + 12,5078 CO_2) \\ + (26,285 O_2 + 150,476 N_2)$$

$$= 57,499 H_2 O + 12,94702 CO_2 + 24,760 O_2 + 164,766 N_2$$

76

reaction.txt:

katalitikyanma

6

h2o 54.8904 57.499

h2 2.6086 0

n2 164.766 164.766

co 0.43922 0

co2 12.5078 12.947

o2 26.285 24.760

$$n_{10} = 259,972 \text{ kmol}$$

10 NOKTASI

$$n_8 T_8 + n_9 T_9 = n_{10} T$$

$$(84,736)(850) + (176,761)(850) = (259,972)T$$

$$T = 855 \text{ } ^\circ C$$

İş etkileşimleri, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri olmadığı zaman, yanma işlemi sırasında açığa çıkan kimyasal enerji iyi bir yalıtımla sistemin içinde kalıp yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının yükselmesini sağlar. Çevreye ısı geçişi olmazsa ($Q=0$), yanma sonu ürünlerinin sıcaklığı en yüksek değere ulaşır.

Java reactionTable

Adyabatik yanma sıcaklığı:

$$T_{10} = 935 \text{ } ^\circ C$$

Gmix.txt :

dizel_10nok

4

h2o 57.499

n2 164.766
 co2 12.947
 o2 24.760

Java GmixTable

$$h_{10} = 39871 \text{ kJ / kmol}$$

11 NOKTASI

$$Q_{5-6} = (46,3148)(15266) = 707041 \text{ kJ}$$

$$707041 = 259,972(39781 - h_{11})$$

$$h_{11} = 37061 \text{ kJ / kmol}$$

java GmixTable:

Enterpolasyon ile $T_{11} = 861 \text{ } ^\circ\text{C}$

12 NOKTASI

$$n_{12} = 6 \text{ kmol}$$

$$h_{12} = 37061 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{12} = 861 \text{ } ^\circ\text{C}$$

13 NOKTASI

$$n_{13} = 6 \text{ kmol}$$

$$Q_{2-3} = 1(114604) = 114604 \text{ kJ}$$

$$114604 = 6(37061 - h_{13})$$

$$h_{13} = 18050 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{13} = 310 \text{ } ^\circ\text{C}$$

78

14 NOKTASI

$$n_{14} = 6 \text{ kmol}$$

$$Q_{1-2} = 1(39117) = 39117 \text{ kJ}$$

$$39117 = 6(18050 - h_{14})$$

$$h_{14} = 11530 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{14} = 108 \text{ }^\circ\text{C}$$

16 NOKTASI

$$n_{16} = 95 \text{ kmol}$$

$$h_{16} = 37061 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{16} = 861 \text{ }^\circ\text{C}$$

17 NOKTASI

Java steamTable:

$$M_{H_2O} = 18 \text{ kg / kmol}$$

$$Q = n_{3s}(h_{4s} - h_{3s}) = 45,3148(3277 - 2679)18 = 487768 \text{ kJ}$$

$$487768 = 95(37061 - h_{17})$$

$$h_{17} = 31926 \text{ kJ / kmol}$$

java LKmixTable:

Enterpolasyon ile $T_{17} = 720 \text{ }^\circ\text{C}$

18 NOKTASI

$$n_{1s} = 45,3148 \text{ kmol}$$

$$T_{1s} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_{1s} = 1,1 \text{ bar}$$

Java steamTable:

$$h_{2s} = 419 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{3s} = 2679 \text{ kJ / kg}$$

$$M_{H_2O} = 18 \text{ kg / kmol}$$

$$\Delta h = (2679 - 419)18 = 40680 \text{ kJ / kmol}$$

$$n_{H_2O} = 45,3148 \text{ kmol}$$

$$Q = (45,3148)(40680) = 1843406 \text{ kJ}$$

$$Q = n_{18}(h_{17} - h_{18})$$

$$1843406 = 95(31926 - h_{18})$$

$$h_{18} = 12521 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{18} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

19 NOKTASI

$$h_{1s} = 105 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{2s} = 419 \text{ kJ / kg}$$

$$M_{H_2O} = 18 \text{ kg / kmol}$$

$$\Delta h = (419 - 105)18 = 5652 \text{ kJ / kmol}$$

$$n_{H_2O} = 45,3148 \text{ kmol}$$

$$Q = (45,3148)(5652) = 256119 \text{ kJ}$$

$$Q = n_{14}(h_{18} - h_{19})$$

$$256119 = 95(12521 - h_{19})$$

$$h_{19} = 9825 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{19} = 52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

80

HAVA TARAFI:

O balansı:

$$31,413 + 2(8,5549) + 4,3922 + 2X \\ = 31,413 + 23,4774 + 2(8,5549) + 0,43922 + 2(3,95298)$$

$$X=13,715 \text{ (O}_2 \text{ molekülü)}$$

Hava tarafı giriş:

$$40 \left(O_2 + \frac{79}{21} N_2 \right) = 40O_2 + 150,476N_2 \\ n_{4h} = 190,476 \text{ kmol}$$

Hava tarafı çıkış:

$$40 - 13,715 = 26,285 \\ 26,285O_2 + 150,476N_2 \\ n_9 = 176,761 \text{ kmol}$$

20 NOKTASI

java GmixTable

$$h_{1h} = 8671 \text{ kJ / kmol} \\ h_{2h} = 29503 \text{ kJ / kmol} \\ n_{20} = n_{21} = 259,972 - 101 = 158,972 \text{ kmol} \\ h_{20} = 37061 \text{ kJ / kmol} \\ T_{20} = 861 \text{ } ^\circ C$$

21 NOKTASI

$$Q = 208,566(29503 - 8671) = 4344846 \text{ kJ}$$

$$4344846 = 158,972(37061 - h_{21})$$

$$h_{21} = 9730 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{21} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Reaction.txt

yakıt pili 120kw

6

h2o 31.413 54.8904

h2 26.086 2.6086

n2 14.290 14.290

co2 8.5549 12.5078

co 4.3922 0.43922

o2 13.715 0

java ReactionTable:

Reaksiyon entalpisi = -6.932.028 kJ/kmol

Reaksiyon gibbs enerjisi = -5.340.348 kJ/kmol

Akışkan özellikleri Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4 Akışkan özellikleri

Akış No	Sıcaklık (°C)	Toplam mol (kmol/kmolyakıt)	Gaz kompozisyonu (kmol/kmolyakıt)
1	25	1	F-76 Dizel 1.0
2	125	1	F-76 Dizel 1.0
3	400	1	F-76 Dizel 1.0
4	400	1	F-76 Dizel 1.0
5	400	46,3148	F-76 Dizel 1.0 H ₂ O 45.3148

6	700	46,3148	F-76 Dizel 1.0 H ₂ O 45.3148
7	700	84,736	H ₂ O 31.413 H ₂ 26.086 N ₂ 14.290 CO ₂ 8.5549 CO 4.3922
8	850	84,736	H ₂ O 54.8904 H ₂ 2.6086 N ₂ 14.290 CO 0.43922 CO ₂ 12.5078
9	850	176,285	O ₂ 26.285 N ₂ 150
10	935	259,972	H ₂ O 57.499 N ₂ 164.766 CO ₂ 12.947 O ₂ 24.760
11	861	259,972	H ₂ O 57.499 N ₂ 164.766 CO ₂ 12.947 O ₂ 24.760
12	861	6	H ₂ O 1.327 N ₂ 3.802 CO ₂ 0.298 O ₂ 0.571
13	310	6	H ₂ O 1.327 N ₂ 3.802 CO ₂ 0.298 O ₂ 0.571
14	108	6	H ₂ O 1.327 N ₂ 3.802 CO ₂ 0.298 O ₂ 0.571
15	20	6	H ₂ O 1.327 N ₂ 3.802 CO ₂ 0.298 O ₂ 0.571

16	861	95	H ₂ O 21.011 N ₂ 60.209 CO ₂ 4.731 O ₂ 9.047
17	720	95	H ₂ O 21.011 N ₂ 60.209 CO ₂ 4.731 O ₂ 9.047
18	140	95	H ₂ O 21.011 N ₂ 60.209 CO ₂ 4.731 O ₂ 9.047
19	52	95	H ₂ O 21.011 N ₂ 60.209 CO ₂ 4.731 O ₂ 9.047
20	861	158,972	H ₂ O 35.160 N ₂ 100.753 CO ₂ 7.917 O ₂ 15.140
21	50	158,972	H ₂ O 35.160 N ₂ 100.753 CO ₂ 7.917 O ₂ 15.140
1s	25	45,3148	H ₂ O 45,3148
2s	104	45,3148	H ₂ O 45,3148
3s	104	45,3148	H ₂ O 45,3148
4s	400	45,3148	H ₂ O 45,3148
1h	25	208,566	O ₂ 43,8 N ₂ 164,766
2h	700	208,566	O ₂ 43,8 N ₂ 164,766
3h	700	18,09	O ₂ 3,8 N ₂ 14,29
4h	700	190,476	O ₂ 40 N ₂ 150,476

6.3 Yakıt Pili ve Sistem Verimi

Yakıt dönüşüm cihazının ısı verimi, ürün ve besleme akışkanları arasındaki fark olan entalpi değişiminde üretilen faydalı enerji miktarı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{\text{Faydalı enerji}}{\Delta H} \quad (6.1)$$

Konvansiyonel olarak, kimyasal enerji (yakıt) önce ısıya çevrilir. Daha sonra mekanik enerjiye ve elektrik enerjisine çevrilir. Bunun için bir ısı motoru kullanılır. Carnot, böyle bir ısı motoru için maksimum verimin çevreye atılan ve çevreden çekilen ısıdaki mutlak sıcaklıkların oranı ile sınırlı olduğunu göstermiştir.

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine çevirir. Böyle bir yakıt pilinin ideal durumunda, reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim, dönüşüm sıcaklığında faydalı elektrik enerjisi olarak bulunur.

Yakıt pilinin ideal verimi:

$$\begin{aligned} \text{Reaksiyon gibbs enerjisi} &= -5.340.348 \text{ kJ/kmol} \\ \text{Reaksiyon entalpisi} &= -6.932.028 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\eta_i = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (6.2)$$

$$\eta_i = \frac{-5.340.348}{-6.932.028} = 0,7703 = \%77,03$$

Yakıt pilindeki elde edilebilir maksimum iş, elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs enerjisindeki değişimdir.

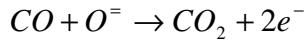
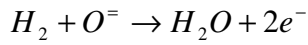
$$W_{el} = \Delta G = -n.F.V_i \quad (6.3)$$

Faraday sabiti,

$$F = 96,487 \text{ coulombs / g - molelektron}$$

$$F = 96487 \text{ kJ / V.kmol}$$

Elektrokimyasal reaksiyonlar:



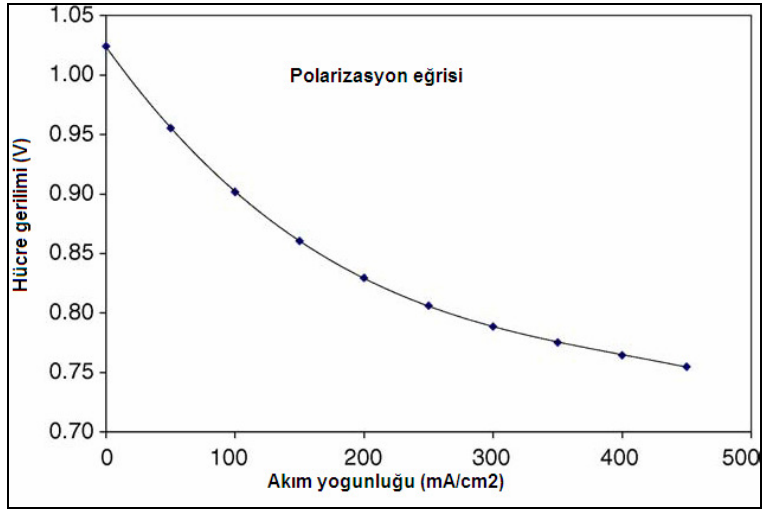
Reaksiyondaki elektron sayısı

$$n = 26,086(2) + 4,3922(2) = 60,95 \text{ kmol / kmoldizel}$$

$$V_i = -\frac{\Delta G}{n.F} \quad (6.4)$$

$$V_i = -\frac{(-5.340.348)}{(60,95)(96.487)} = 0,90 \text{ V}$$

Şekil 6.4, gerçek bir yakıt pilinden alınan veriye dayalı polarizasyon eğrisini göstermektedir (Ersöz vd., 2006).



Şekil 6.4 Polarizasyon eğrisi

Çizelge 6.5 İşletme parametreleri

PARAMETRE	DEĞER
Gerilim	0,80 V
İdeal Gerilim	0,90 V
Akım Yoğunluğu	0,4 A/cm ²
Güç Yoğunluğu	40 mW/cm ²
Elektrolit (10 µm)	8YSZ
Anot (1000 µm)	Ni-YSZ
Katot (90 µm)	La _{0,7} Sr _{0,2} MnO ₃ (LSM)
Ara bağlantı	Paslanmaz çelik (X10CrAlSi18)

Gerçek bir hücre voltajı, hücre polarizasyonu ve omik kayıplardan dolayı ideal hücre voltajından daha düşüktür. Gerçek bir yakıt pilinin ısı verimi:

$$\eta_{yakitpi\pi\pi\pi\pi\pi\pi\pi} = \eta_{ideal} \frac{V_{ger\pi\pi\pi}}{V_{ideal}}$$

$$\eta_{yakitpi\pi\pi\pi\pi\pi\pi\pi} = (0,7703) \frac{0,80}{0,90} = 0,6847 = \% 68,47$$

Ototermal yakıt dönüştürücü verimi:

$$\eta_{YD} = \frac{LHV(m_{H_2} + m_{CO})_{\zeta}}{LHV(m_{F76})_g} \quad (6.5)$$

Alt ısı değerler, Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 Alt ısı değerler

Bileşen	Alt ısı değer (LHV) (kJ/kg)
Hidrojen	120.005
Karbon monoksit	10.108,8
F-76 Dizel	42.700

$$LHV(H_2)_{\zeta} = (120.005 \text{ kJ / kg})(2 \text{ kg / kmol})(26,086 \text{ kmol}) = 6.260.900 \text{ kJ}$$

$$LHV(CO)_{\zeta} = (10.108,8 \text{ kJ / kg})(28 \text{ kg / kmol})(4,3922 \text{ kmol}) = 1.243.196 \text{ kJ}$$

$$LHV(F - 76)_g = (42.700 \text{ kJ / kg})(205 \text{ kg / kmol})(1 \text{ kmol}) = 8.753.500 \text{ kJ}$$

Yakıt dönüştürücü verimi:

$$\eta_{YD} = \frac{6.260.900 + 1.243.196}{8.753.500} = 0,85 = \% 85$$

Yakıt pili sisteminin brüt verimi:

$$\eta_{brüt} = \eta_{yakitpi\pi\pi\pi\pi\pi\pi\pi} \cdot \eta_{YDü} \quad (6.6)$$

88

$$\eta_{brüt} = (0,6847)(0,85) = 0,5819 = \% 58,19$$

Yakıt pili sisteminin net verimi:

$$\eta_{sistem} = \eta_{brüt} \left(\frac{P_{net} - P_i}{P_{net}} \right)$$

$$\dot{I}_{yük} = 120(\%5) = 6kW$$

$$\eta_{sistem} = (0,5819) \left(\frac{120 - 6}{120} \right) = 0,5528 = \% 55,28$$

Reaksiyon gibbs enerjisi= 5.340.348 kJ/kmol

$$\Delta G = (5.340.348)(0,5528) = 2.952.171 \text{ kJ / kmoldizel}$$

$$\Delta G = \frac{2.952.171 \text{ kJ / kmoldizel}}{205 \text{ kg / kmoldizel}} = 14.400 \text{ kJ / kgdizel}$$

120 kW güçteki yakıt pili sistemi için yakıt debisi:

$$\dot{m} = \frac{120 \text{ kW}}{14.400 \text{ kJ / kgdizel}} = 30 \text{ kg / saat}$$

$$\dot{V} = \frac{30 \text{ kg / saat}}{860 \text{ kg / m}^3} = 0,03488 \text{ m}^3 / \text{h} = 34,88 \text{ lt / saat}$$

24 saat (1 gün) kapasiteli yakıt tankı için:

$$V = (34,88 \text{ lt / saat})(24 \text{ saat / gün}) = 837 \text{ lt}$$

Yakıt tankındaki 837 litre yakıtın sıcaklığını 15 °C arttırmak için gerekli enerji:

$$\Delta T = 25 - 10 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta H = 5189 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q = \frac{5189 \text{ kJ / kmol}}{205 \text{ kg / kmol}} (837 \text{ lt})(0,860 \text{ kg / lt}) = 18.220 \text{ kJ}$$

$$18.220 \text{ kJ} = (6 \text{ kmol})(11.530 - h_{15})(\text{kJ / kmol})$$

$$h_{15} = 8493 \text{ kJ / kmol}$$

$$T_{15} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yakıt tankına 108 °C sıcaklıkta giren gaz 20 °C’de atmosfere atılacaktır.

Yakıt pili sisteminden 1 kWh fonksiyonel birim başına çevreye atılan gaz miktarları % 55,28 sistem verimi için Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7 Yakıt pili sisteminden çevreye atılan gazlar

GAZ	kmol/kmol dizel	g/kWh
CO ₂	12,947	423
H ₂ O	57,499	769
N ₂	164,766	3432
O ₂	24,760	589

6.4 Hücre Alanı ve Dizin Sayısının Belirlenmesi

Yakıt pili için toplam akım:

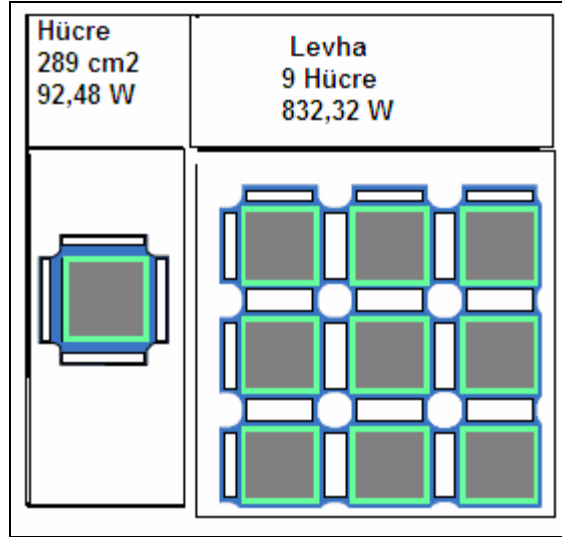
$$I = \frac{P}{V} = \left(\frac{120 \text{ kW}}{0,80 \text{ V}} \right) \left(\frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \right) \left(\frac{1 \text{ VA}}{1 \text{ W}} \right) \left(\frac{1 \text{ kA}}{1000 \text{ A}} \right) = 150 \text{ kA}$$

Toplam alan:

$$Alan = \frac{I}{Akik\ yoğğunlu} = \frac{150\ kA}{0,4\ A/cm^2} \left(\frac{1000\ A}{1\ kA} \right) = 375.000\ cm^2$$

Hücre sayısı:

$$= \frac{375.000\ cm^2}{289\ cm^2 / hücre} = 1298\ hücre$$



Şekil 6.5 Bir hücre ve levha

Hücre:

Levhadaki hücreler birbirlerine paralel bağlanacaktır.

$$V = 0,8\ V$$

$$I = (0,4\ A/cm^2)(289\ cm^2) = 115,6\ A$$

$$P = (0,8\ V)(115,60) = 92,48\ W$$

Levha:

Levhalar, birbirine seri bağlanacaktır. Bir levhada 9 hücre yer alacaktır.

$$Geri\ lim = 0,8\ V$$

$$Akım = (9\ hücre)(115,6\ A/hücre) = 1040,4\ A$$

$$Güç = (0,8\ V)(1040,4\ A) = 832,32\ W$$

Dizin:

Dizinler, birbirine seri bağlanacaktır. Bir dizinde 75 levha yer alacaktır.

Çıkış gerilimi: 60 V

$$Levha = \frac{60\ V}{0,8\ V} = 75$$

$$Akım = 1040,4\ A$$

$$Güç = (60\ V)(1040,4\ A) = 62,4\ kW$$

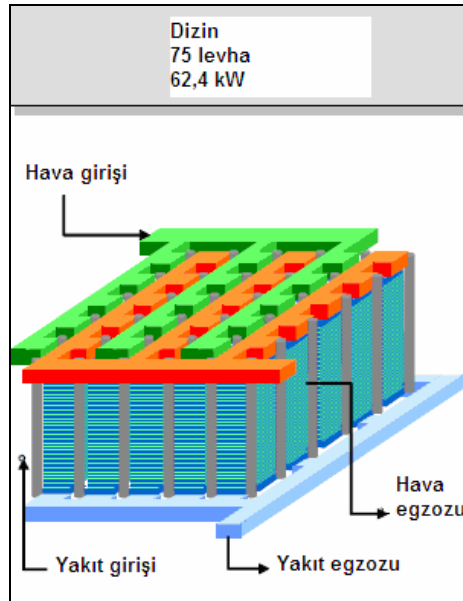
120 kW gücündeki yakıt pili sistemi için dizin sayısı:

$$Dizin = \frac{120\ kW}{62,4\ kW} = 1,93 \approx 2$$

Yakıt pilinin bağlantı özellikleri, Çizelge 6.8'de; bir dizinin şematik resmi, Şekil 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.8 Bağlantı özellikleri

Parametre	Hücre	Levha	Dizin	Yakıt Pili
GERİLİM	0,8 V	0,8 V	60 V	120 VDC
AKIM	115,60 A	1040,4 A	1040,4 A	1040,4 A
GÜÇ	92,48 W	832,32 W	62,4 kW	124,8 kW
MİKTAR	1350	75	2	1
BAĞLANTI	Paralel	Seri	Seri	



Şekil 6.6 Bir dizin

Çizelge 6.9 Sistem performansı özeti

SIRA NO	PARAMETRE	DEĞER
1	Toplam Elektrik Gücü	120 kWe

2	Yakıt Dönüştürücü	Ototermal
3	Yakıt Dönüştürücü Buhar/Karbon	3,5
4	Yakıt Pili Giriş Gazları, %mol	
	Hidrojen (H ₂)	30,78
	Karbonmonoksit (CO)	5,18
	Azot (N ₂)	16,86
	Su (H ₂ O)	37,07
	Karbondioksit (CO ₂)	10,10
5	Yakıt dönüştürücü verimi, %	85
6	Katı oksitli yakıt pili verimi, %	68,47
7	Toplam sistem verimi, %	55,28
8	F-76 Dizel yakıt sarfiyatı, kg/h	30

6.5 Sistemin Diğer Bileşenleri

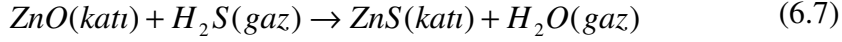
Yakıt pili dizinleri, gerekli gücü ve ısıyı üretmeye yarayan katı oksitli yakıt pili sisteminin bir parçasıdır. Yakıt pili sistemi içerisinde ayrıca ısı değiştiriciler, pompalar, fanlar ve kükürt arıtıcı gibi diğer sistem bileşenleri de yer almaktadır. Isı değiştirici tasarımlarına 7. Bölümde yer verilmiştir.

6.5.1 Kükürt arıtıcı

Kükürt arıtıcıya giren NATO F-76 dizel yakıtın içindeki kükürt oranı en fazla % 0,7 (7.000 ppm) kükürt bulunmaktadır (TSE, 2007). Kükürt arıtıcı, kükürt miktarını % 0,5 düşürecek olup çıkışta yakıt içerisindeki kükürt miktarı en fazla 35 ppm olacaktır.

NATO F-76 gibi yüksek kükürtlü yakıtlar, yüksek hacimli kükürt arıtıcı üniteye ihtiyaç duyarlar. En yaygın metod, sabit yataklı yüksek yüzey alanlı ZnO kullanmaktır. Çinko oksit reaktör, geniş bir sıcaklık

aralığında çalışabilmesine rağmen, minimum yatak hacmine 350-400 °C sıcaklık aralığında ulaşılmaktadır. Yakıt pili sistemimizde reaktörün çalışma sıcaklığı 400 °C'dir. Oksit, aşağıdaki reaksiyon ile çinko sülfüre dönüştürülecektir (Lars, 2001).



Oluşan çinko sülfür, yeniden geri kazanılabileceği için doğaya zararı olmayacaktır. Örneğin; çinko sülfürler en iyi bilinen fosforlu maddelerdir. Saatlerdeki rakamların, akrep ve yelkovanın, bazı oyuncakların karanlıkta görünmelerini sağlayan fosforlu boyaların yapımlarında genellikle çinko sülfür kullanılır.

Kükürt tutmak için toplam işletme zamanı, yakıtın içerisindeki kükürt miktarına bağlıdır. King'e (Lars, 2001) göre, 1 yıllık işletme için 2-3 kg ZnO yeterlidir. Kükürt arıtıcıdaki basınç düşümü (Robert, 2002);

$$\Delta p = f \cdot \frac{L_t}{d_p} \cdot \rho \cdot u_s^2 \quad (6.8)$$

ile verilmektedir. Burada;

L_t , reaktör borusu uzunluğu

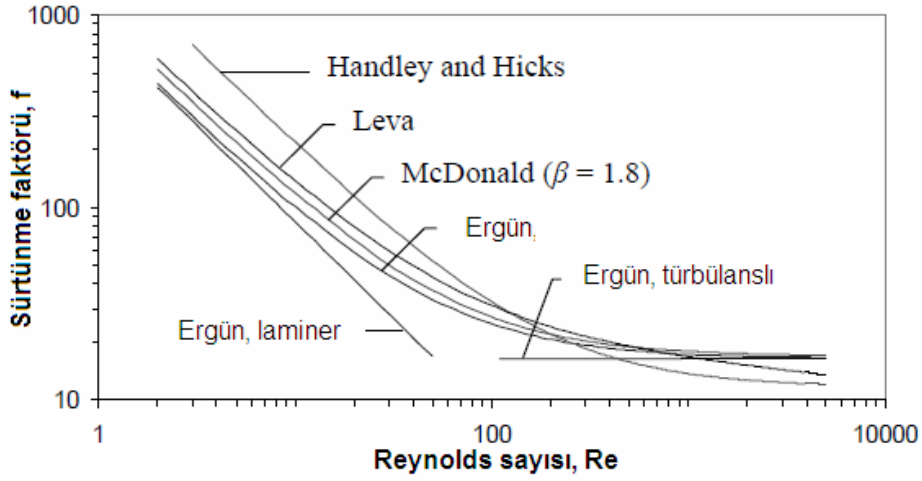
d_p , katalizör partikül çapı

ρ , yakıt yoğunluğu

u_s , yüzeysel kütle hızı

f , sürtünme katsayısı

Ortalama $\varepsilon = 0,4$ yatak gözenekliliğinde, farklı bağıntılar için sürtünme katsayısı, Şekil 6.7'de verilmiştir (Iordanidis, 2002).



Şekil 6.7 Farklı bağıntılar için sürtünme katsayısı

$$Q = \frac{(30 \text{ kg/h})(1 \text{ h}/3600 \text{ s})}{(3,6 \text{ kg/m}^3)} = 23,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_s = \frac{Q}{A} = \frac{23,14 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi}{4} (50 \cdot 10^{-3})^2} = 1,17 \text{ m/s}$$

Reynolds sayısı;

$$\text{Re} = \frac{d_p \cdot u_s \cdot \rho}{(1 - \varepsilon)\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{(5 \cdot 10^{-3} \text{ m})(1,17 \text{ m/s})(3,6 \text{ kg/m}^3)}{(1 - 0,4)(1,05 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s})} = 3342$$

Ergun denklemine göre sürtünme faktörü (Şekil 6.7),

$$f = 20$$

Reaktör borusu uzunluğu:

$$L_t = \frac{\Delta p \cdot d_p}{f \cdot \rho \cdot u_s^2} = \frac{(100 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5 \text{ N/m}^2) \cdot (5 \cdot 10^{-3} \text{ m})}{(20) \cdot (3,6 \text{ kg/m}^3) \cdot (1,17 \text{ m/s})^2} = 0,507 \text{ m}$$

6.5.2 Yakıt pompası, hava fanı ve su pompası

Sisteme yakıt, hava ve su sağlamak için gerekli güç aşağıdaki denklem ile verilir. Basınç artışı, her bir bileşenin basınç düşümü toplanarak hesaplanır. Basınç düşümleri, Çizelge 6.10'da, nominal akışın yüzdesi olarak bileşen verimi Şekil 6.8'de verilmiştir. (Robert, 2002).

Çizelge 6.10 Sistem bileşenleri basınç düşümleri

Bileşen	Basınç Düşümü (mbar)
Isı değiştirici-1(yakıt)	27,18
Isı değiştirici-2(yakıt)	50
Isı değiştirici-3(yakıt)	50
Isı değiştirici-4 (su)	15
Isı değiştirici-5(su)	15
Isı değiştirici-6(su)	15
Isı değiştirici-7(hava)	190
Hava filtresi	10
Dizin (yakıt tarafı)	20
Dizin (hava tarafı)	30
Kükürt arıtıcı	100
Boru, dirsekler	5

Yakıt pompası gücü:

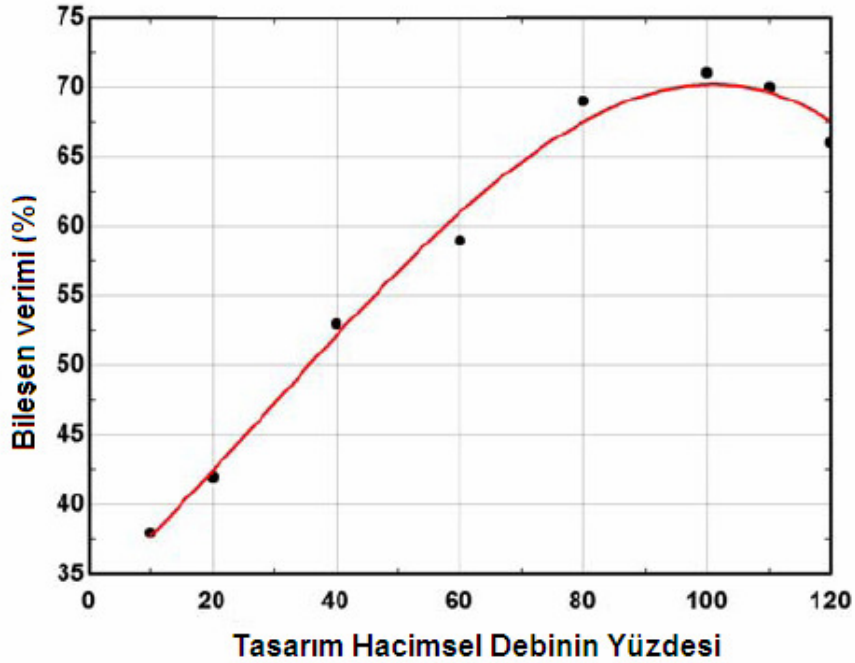
$$\dot{W}_{giriş} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta P}{\eta_s} \quad (6.9)$$

$$\dot{V}_{yp} = \frac{(30 \text{ kg/h})(1 \text{ h}/3600 \text{ s})}{(860 \text{ kg/m}^3)} = 9,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P_{yp} = 1 \text{ bar}$$

$$\eta_s = \% 70$$

$$\dot{W}_{yp} = \frac{9,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} (1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2)}{0,70} = 1,38 \text{ W}$$



Şekil 6.8 Döner ekipmanların verim performansı

98

Hava fanı gücü:

$$\dot{V}_{hf} = \frac{(880,5 \text{ kg/h})(1 \text{ h}/3600\text{s})}{(1,15 \text{ kg/m}^3)} = 0,212 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P_{hf} = 190 \text{ mbar}$$

$$\eta_s = \%70$$

$$\dot{W}_{hf} = \frac{0,212 \text{ m}^3/\text{s}}{0,70} (0,190 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2) = 5772 \text{ W} = 5,772 \text{ kW}$$

Su pompası gücü:

$$\dot{V}_{sp} = \frac{(120 \text{ kg/h})(1 \text{ h}/3600\text{s})}{(1000 \text{ kg/m}^3)} = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P_{sp} = 1 \text{ bar}$$

$$\eta_s = \%70$$

$$\dot{W}_{sp} = \frac{3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{0,70} (1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2) = 4,75 \text{ W}$$

İç yükler;

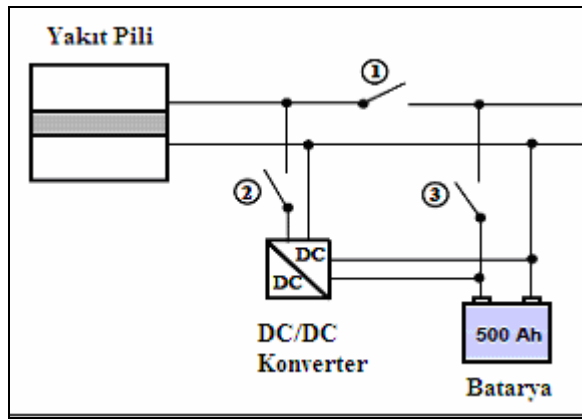
$$P_i = \dot{W}_{yp} + \dot{W}_{hf} + \dot{W}_{sp}$$

$$P_i = 1,38 + 5772 + 4,75 = 5778,13 \text{ W}$$

$$P_i \approx 6 \text{ kW}$$

6.5.3 Güç koşullandırma ve enerji depolama

İnverterin amacı, DC gücü AC güce çevirmektir. Gemi servis gerilimi, 120 V DC olduğundan yakıt pili sistemimizde invertere ihtiyaç yoktur. Gemideki dinamik ve pik yükleri karşılamak için, yakıt pili çıkışına Şekil 6.9'da şematik resmi görülen DC/DC konverter ve batarya ilave edilmiştir.



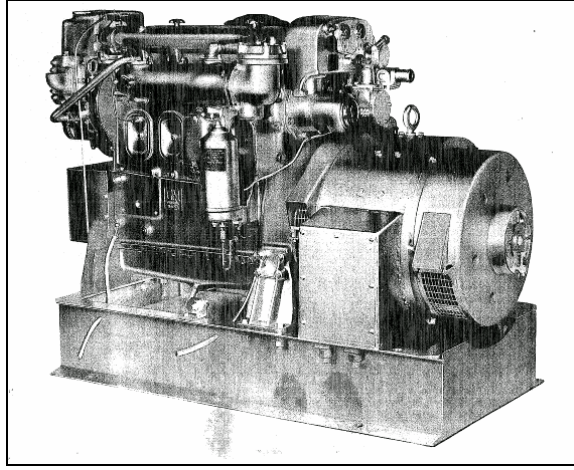
Şekil 6.9 Güç koşullandırma

Sistemin alternatif işletmesi aşağıda sunulmuştur:

- Sadece yakıt pili gücü ile gemiyi besleme
(1 kapalı, 2 ve 3 açık)
- Sadece batarya gücü ile gemiyi besleme, yakıt pili beklemede
(3 kapalı, 1 ve 2 açık)
- Yakıt pili gücü ile gemiyi ve bataryayı besleme
(1 ve 2 kapalı, 3 açık)
- Bataryayı şarj eden yakıt pili, gemi beslenmiyor
(2 kapalı, 1 ve 3 açık)

6.6 Dizel Motorlu Yardımcı Makina ile Karşılaştırma

Su üstü savaş gemisinde elektrik üretimi için beheri 60 kW elektrik gücü üreten 2 adet 72 kW gücünde dizel motorlu yardımcı makina bulunmaktadır (Şekil 6.10). Dizel motor spesifikasyonu Çizelge 6.11’de, jeneratör spesifikasyonu ise Çizelge 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.10 Dizel-elektrik jeneratör grubu

Çizelge 6.11 Dizel motor spesifikasyonu

Motor gücü	72 kW
Motor tipi	2 zamanlı, 6 silindirli
Motor devri	1200 rpm
Yakıt tipi	NATO F-76 Dizel
Kütle	783 kg
Yakıt sarfiyatı (% 100 yükte)	20 kg/saat

Çizelge 6.12 Jeneratör spesifikasyonu

Elektrik gücü	60 kW
Nominal gerilim	120 VDC
Nominal akım	500 A
Nominal devir	1200 rpm
Kütle	460 kg

Dizel motorlu yardımcı makina için hava emisyon faktörleri, Çizelge 6.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.13 Emisyon faktörleri

BİLEŞEN	g/kWh
CO ₂	890
SO _x	0,75
NO _x	11,5
CO	0,5

Katı oksitli yakıt pili sistemi emisyonu:

F-76 Dizel yakıt net ısı değeri: 42700 kJ/kg

Dönüşüm kJ-kWh: 1 kWh=3600 kJ

Sistem emisyon faktörü: 2,778 kg CO₂/kgdizel

Sistem verimi: % 55,28

$$\frac{2,778 \text{ kgCO}_2/\text{kgdizel}}{42700 \text{ kJ}/\text{kgdizel}} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}} \cdot \frac{1}{0,5528} = 423 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Dizel motorlu yardımcı makina emisyonu:

F-76 Dizel yakıt net ısıl değeri: 42700 kJ/kg

Dönüşüm kJ-kWh: 1 kWh=3600 kJ

Dizel emisyon faktörü: 3,17 kg CO₂/kgdizel

Dizel motor verimi: % 30

$$\frac{3,17 \text{ kgCO}_2 / \text{kgdizel}}{42700 \text{ kJ} / \text{kgdizel}} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}} \cdot \frac{1}{0,30} = 890 \text{ gCO}_2 / \text{kWh}$$

7. ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI

Isı değiştiricilerde boru seçiminde temel etmenler, özellikler, bulunabilirlik, sağlanabilirlik, maliyet ve ekonomidir. Yakıt pili ısı değiştiricileri için malzeme seğimi, en yüksek giriş sıcaklığına, işletme sıcaklığına, akışkanlara, ısıl gerilimlere ve optimum maliyete bağlıdır.

Giriş sıcaklığı 650 °C'ye kadar olan ısı değiştiriciler için günümüzde yeterli deneyim ve teknoloji bulunmaktadır. Burada paslanmaz çelik alaşımlar kullanılabilir.

Orta dereceli sıcaklıklarda (750 °C'ye kadar) düşük alaşımlı çelikler yerine östenitik paslanmaz çelikler tercih edilir. Ayrıca, kaynaklanabilirliği göreceli olarak en yüksek olan tür östenitik paslanmaz çeliklerdir. Fakat, bunlarda da krom karbür çökeltmeleri sonucu korozyon direnci düştüğünden duyarlılaşma adı verilen bir olgu doğar. Bunu önlemek için ise bu çeliklerin düşük karbonlu ($C < \% 0,03$) türleri kullanılır.

Giriş sıcaklığı 750-1100 °C arasında olan yüksek sıcaklık, ısı değiştirici malzemeleri ileri malzemelerin kullanımını gerektirir. Bunlar; yüksek sıcaklık nikel tabanlı alaşımlar, yüksek sıcaklık ferritik çelikler ve ileri karbon ve silisyum karbür kompozitleridir.

Yakıt pili sisteminde toplam 7 adet ısı değiştirici bulunmaktadır. Yüksek sıcaklığa (750-1100 °C) maruz kalan 4 adet ısı değiştirici ve göreceli olarak orta derecede sıcaklığa (750 °C'ye kadar) maruz kalan 3 adet ısı değiştirici tipi, gövde borulu ısı değiştiricidir.

Orta dereceli sıcaklığa maruz kalan 3 adet gövde borulu ısı değiştirici için boru malzemesi östenitik paslanmaz çelik (UNS S30403) seçilmiş olup borunun ısı özellikleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Östenitik paslanmaz çelik borunun özellikleri

Çelik	Isıl iletkenlik, (20 °C)	Isıl iletkenlik, (400 °C)	Maksimum izin verilen sıcaklık	Isıl genleşme katsayısı (20-400 °C)
AISI 304L (Östenitik paslanmaz çelik)	15 W/mK	20 W/mK	750 °C	$18,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Bu hususlar göz önüne alınarak yüksek sıcaklığa maruz kalan 5 adet ısı değiştirici için seçilen boru malzemesi nikel tabanlı alaşım (UNS N06625) olup borunun özellikleri Çizelge 7.2 ve 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Nikel tabanlı alaşımlı borunun nominal kompozisyonu (% ağırlıkça)

Alaşım	UNS Numarası	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb+Ta
625	NO6625	61,0	21,5	9,0	2,5	3,8

Çizelge 7.3 Nikel tabanlı alaşımlı borunun özellikleri

Alaşım	Isıl iletkenlik (21 °C)	Isıl iletkenlik (427 °C)	Maksimum izin verilen sıcaklık	Isıl genleşme katsayısı (21-427 °C)
625	9,9 W/mK	15,7 W/mK	1093 °C	$13,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Nikel tabanlı alaşımın (UNS N06625) kaynak elektrodu ve dolgu metali Çizelge 7.4’de, dikişsiz ve kaynaklı boru ASTM spesifikasyonları ise Çizelge 7.5’de verilmiştir. Yakıt pili sisteminde kullanılan ısı değiştiricilerin malzemeleri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.4 Amerikan kaynak derneği (AWS) spesifikasyonları

Alaşım	Kaynak Elektrodu (A5.11)	Dolgu metali (A5.14)
625	ENiCrMo-3	ERNiCrMo-3

Çizelge 7.5 ASTM spesifikasyonları

Alaşım	Plaka	Dikişsiz boru	Kaynaklı boru
625	B443	B444	B704

Çizelge 7.6 Isı değiştirici malzemeleri

ISI DEĞİŞTİRİCİ NUMARASI	ISI DEĞİŞTİRİCİ GÖREVİ	AKIŞKAN	MALZEME
ID-1	F-76 Dizel Ön Isıtıcı	(Egzoz gazı- F-76)	AISI 304L (Paslanmaz çelik)
ID-2	F-76 Dizel Evaporatörü	(Egzoz gazı- F-76)	NO6625 (Nikel tabanlı alaşım)
ID-3	Yakıt Dönüştürücüye Giriş Sıcaklığını Yüksetmek	(Egzoz gazı- F-76+Su buharı)	NO6625 (Nikel tabanlı alaşım)

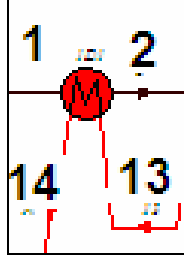
ID-4	Kızgın Su Buharı (Karıştırıcıya Giriş)	(Egzoz gazı- Su buharı)	NO6625 (Nikel tabanlı alaşım)
ID-5	Su Evaporatörü	(Egzoz gazı- Su buharı)	NO6625 (Nikel tabanlı alaşım)
ID-6	Su Ön Isıtıcı	(Egzoz gazı- su)	AISI 304L (Paslanmaz çelik)
ID-7	Hava Isıtıcı	(Egzoz gazı hava)	NO6625 (Nikel tabanlı alaşım)

Gerek gövdenin gerekse de boruların çap ve sayılarının tespitinde, bunlar içinde akan akışkan hızları önemli olmaktadır. Hızın büyük olması ısı geçiş katsayısını artırarak, daha kompakt ısı değiştiricisi konstrüksiyonuna imkan sağlarken, basınç kayıplarının ve bunun sonucu pompa veya fan gücünün büyümesine sebep olur. Diğer taraftan; büyük hızlar cidarlarda kirlenmeyi de önler. Tipik olarak, gövde borulu ısı değiştiricilerde önerilen hız değerleri aralığı Çizelge 7.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.7 Gövde borulu ısı değiştiricilerde önerilen hızlar

Boru içinde sıvı akışkanların hızları	1,5-2,5 m/s Bakır borularda max.2 m/s Çelik borularda max.3-4 m/s Paslanmaz çelik borularda max. 4-5 m/s
Gövde içinde sıvı akışkan hızları	0,3-1 m/s
Boru veya gövdede gaz hızları	10-30 m/s (Atmosferik basınç)

7.1 F-76 Dizel Ön Isıtıcısı (ID-1)



Şekil 7.1 Dizel ön ısıtıcısı (ID-1)

Tasarım verisi aşağıdadır:

Tip: Çift Borulu Isı Değiştirici (Genişletilmiş Yüzeyle)

Kanatçıklı çift borulu ısı değiştirici

Uzunluğu=50 cm

Dıştaki boru (80) = 3/4" (Dış çap=26,67 mm, İç çap=18,84 mm)

İçteki boru (BWG 22)= 1/4" (Dış çap=6,35 mm, İç çap=4,92 mm)

Kanatçık yüksekliği= 6 mm

Kanatçık kalınlığı=1,27 mm

Kanatçık sayısı= 5 adet

Malzeme=Paslanmaz çelik, AISI 304L (k=20 W/mK)

Halkasal aralıktaki boru sayısı=1

Akışkan özellikleri, Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.8 Akışkan özellikleri

Akışkan	Boru tarafı (F-76)	Halkasal aralık (Egzoz)
Ortalama sıcaklık (°C)	75	209
Yogunluk, kg/m ³	753	0,740
Özgül ısı, kJ/kgK	2,174	1,176
Viskozite, kg/ms	7,017.10 ⁻⁴	2,37.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,116	0,038
Prandtl sayısı, Pr	13,15	0,733

Boru tarafı:

F-76 dizel yakıtın özellikleri:

$$T_b = \frac{25 + 125}{2} = 75 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Hız ve Reynolds sayısı:

$$u_m = \frac{\dot{m}_c}{\rho \pi \frac{di^2}{4}} \quad (7.1)$$

$$u_m = \frac{30/3600}{(753)\pi \frac{(4,92 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,58 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho U_m di}{\mu} \quad (7.2)$$

$$\text{Re} = \frac{(753)(0,58)(4,92 \cdot 10^{-3})}{7,017 \cdot 10^{-4}} = 3062$$

$Re > 2300$ olduğundan akış türbülanslıdır. Gnielinski korelasyonu kullanılırsa:

$$Nub = \frac{(f/2)(Re_b - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (7.3)$$

$$f = (1,58 \ln Re - 3,28)^{-2} \quad (7.4)$$

$$f = (1,58 \ln 3062 - 3,28)^{-2} = 0,011$$

$$Nub = \frac{(0,011/2)(3062 - 1000)(13,15)}{1 + 12,7(0,011/2)^{1/2}(13,15^{2/3} - 1)} = 28,11$$

Isı transfer katsayısı:

$$h_i = \frac{Nu_b \cdot k}{d_i} \quad (7.5)$$

$$h_i = \frac{(28,11)(0,116)}{4,92 \cdot 10^{-3}} = 662 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Halkasal aralık ısı transfer katsayısı:

Boru tarafı egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{310 + 108}{2} = 209 \text{ } ^\circ\text{C 'de alınabilir.}$$

Uzunlamasına kanatçıklı borular ile kaplı halkasal aralıktaki net kesit alan:

$$A_c = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_o^2 N_t) - (\delta H_f N_f N_t) \quad (7.6)$$

$$A_c = \left[(18,84 \cdot 10^{-3})^2 - (6,35 \cdot 10^{-3})^2 \right] - [(1,27 \cdot 10^{-3})(6 \cdot 10^{-3})(5)(1)]$$

110

$$A_c = 2.10^{-4} \text{ m}^2$$

Hidrolik Çap:

$$D_h = \frac{4A_c}{P_w} \quad (7.7)$$

$$P_w = \pi(D_i + d_o N_t) + 2H_f N_f N_t \quad (7.8)$$

$$P_w = \pi(18,84.10^{-3} + 6,35.10^{-3}) + 2(6.10^{-3})(5)(1) = 0,085 \text{ m}$$

$$D_h = \frac{4(2.10^{-4})}{0,085} = 9,41.10^{-3} \text{ m}$$

Isı transferi için ıslak çevre:

$$P_h = \pi d_o N_t + 2N_f H_f N_t \quad (7.9)$$

$$P_h = \pi(6,35.10^{-3})(1) + 2(5)(6.10^{-3})(1) = 0,079 \text{ m}$$

Isı transferi için eşdeğer çap:

$$D_e = \frac{4A_c}{P_h} \quad (7.10)$$

$$D_e = \frac{4(2.10^{-4})}{0,079} = 0,010 \text{ m}$$

Hız:

$$u_m = \frac{\dot{m}_c}{\rho A_c} \quad (7.11)$$

$$u_m = \frac{23,4/3600}{(0,740)(2 \cdot 10^{-4})} = 43,9 \text{ m/s}$$

Reynolds sayısı:

$$\text{Re} = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (7.12)$$

$$\text{Re} = \frac{(0,740)(43,9)(9,41 \cdot 10^{-3})}{2,37 \cdot 10^{-5}} = 12898$$

Nusselt sayısı:

$\text{Re} > 2300$ olduğundan akış türbülanslıdır.

Gazlar için: $0,6 < \text{Pr}_b < 0,9$

$$\text{Nu}_b = 5 + 0,012 \text{Re}^{0,87} (\text{Pr}_b + 0,29) \quad (7.13)$$

$$\text{Nu}_b = 5 + 0,012(12898)^{0,87} (0,733 + 0,29) = 51,26$$

Isı transfer katsayısı:

$$h_o = \frac{\text{Nu}_b \cdot k}{D_e} \quad (7.14)$$

$$h_o = \frac{(51,26)(0,038)}{0,010} = 194 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

Kanatçıklı ve kanatçıksız ısı transfer alanları:

$$A_f = 2N_f N_f L (2H_f + \delta) \quad (7.15)$$

$$A_f = 2(1)(5)(1,2)(12 \cdot 10^{-3} + 1,27 \cdot 10^{-3}) = 0,159 \text{ m}^2$$

$$A_u = 2N_i (\pi d_o L - N_f L \delta) \quad (7.16)$$

$$A_u = 2(1) [\pi (6,35 \cdot 10^{-3}) (1,2) - 5(1,2) (1,27 \cdot 10^{-3})] = 0,032 \text{ m}^2$$

$$A_i = 2(\pi d_i L N_i) \quad (7.17)$$

$$A_i = 2\pi (4,92 \cdot 10^{-3}) (1,2) (1) = 0,037 \text{ m}^2$$

$$A_t = A_u + A_f \quad (7.18)$$

$$A_t = 0,032 + 0,159 = 0,191 \text{ m}^2$$

Kanatçık verimi;

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f} \quad (7.19)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_o}{\delta x_f}} \quad (7.20)$$

$$m = \sqrt{\frac{2(194)}{(1,27 \cdot 10^{-3})(20)}} = 123,59$$

$$\eta_f = \frac{\tanh[(123,59)(6 \cdot 10^{-3})]}{(123,59)(6 \cdot 10^{-3})} = 0,84$$

Toplam yüzey verimi;

$$\eta_o = \left[1 - (1 - \eta_f) \frac{A_f}{A_t} \right] \quad (7.21)$$

$$\eta_o = \left[1 - (1 - 0,84) \frac{0,159}{0,191} \right] = 0,86$$

Birikintili yüzey toplam ısı transfer katsayısı:

$$U_{of} = \frac{1}{\frac{A_i}{A_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{d_o}{d_i} R_{fi} + \frac{A_i \ln(d_o/d_i)}{2\pi k \cdot 2L} + \frac{R_{fo}}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_o h_o}} \quad (7.22)$$

Birikinti dirençleri;

$$R_{fi} = 0,000352 \text{ m}^2 \text{ K / W}$$

$$R_{fo} = 0,001761 \text{ m}^2 \text{ K / W}$$

$$U_{of} = \frac{1}{\frac{0,191}{0,037} \cdot \frac{1}{662} + \frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{4,92 \cdot 10^{-3}} (0,000352) + \frac{0,191 \ln(6,35 \cdot 10^{-3} / 4,92 \cdot 10^{-3})}{2\pi(20)(2)(1,2)} + \frac{0,001761}{0,86} + \frac{1}{(0,86)(194)}}$$

$$U_{of} = 61 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (7.23)$$

$$\Delta T_m = \frac{185 - 83}{\ln(185/83)} = 127,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Toplam ısı transfer yüzey alanı:

$$A_{of} = \frac{Q}{U_{of} \Delta T_m} \quad (7.24)$$

$$A_{of} = \frac{1600}{(61)(127,25)} = 0,20 \text{ m}^2$$

Çift borulu ısı değiştirici yüzey alanı:

$$A_{hp} = A_t = 0,191 \text{ m}^2$$

Çift borulu ısı değiştirici sayısı:

$$N_{hp} = \frac{A_{of}}{A_{hp}} = \frac{0,20}{0,191} \approx 1$$

Basınç düşümleri:

İçteki boru için:

$$\Delta P_t = 4f \frac{2L}{d_i} \rho \frac{U_m^2}{2} N_{hp} N_t \quad (7.25)$$

$$\Delta P_t = 4(11 \cdot 10^{-3}) \frac{2(1,2)}{4,92 \cdot 10^{-3}} (753) \frac{(0,58)^2}{2} (1)(1) = 2718 \text{ Pa}$$

Halkasal aralık için:

$$f = (1,58 \ln \text{Re} - 3,28)^{-2} \quad (7.26)$$

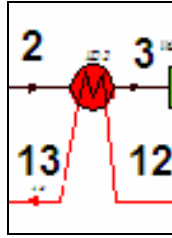
$$f = (1,58 \ln 12898 - 3,28)^{-2} = 7,33 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta P_a = 4f \frac{2L}{D_h} \rho \frac{U_m^2}{2} N_{hp} \quad (7.27)$$

$$\Delta P_a = 4(7,33 \cdot 10^{-3}) \frac{2(1,2)}{9,41 \cdot 10^{-3}} (0,740) \frac{(43,9)^2}{2} (1) = 5332 \text{ Pa}$$

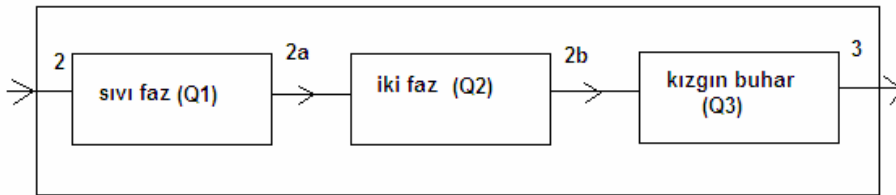
7.2 Termal NATO F-76 Dizel Evaporatörü (ID-2)

Dizel dönüştürme proseslerinde dizel yakıtın buharlaştırılması önemli bir kademedir. Dizel evaporatör tasarımı, karbon oluşumunu minimize etmek için önemlidir. Ayrıca, işletme şartları da optimize edilmelidir.



Şekil 7.2 Dizel evaporator (ID-2)

F-76 dizel yakıtı, 125 °C'den 400 °C sıcaklığa kadar yanma odasından gelen egzoz gazı ile kaynatılacaktır. Gövde borulu evaporatörde boru içerisinden F-76 dizel yakıtı, boru dışından ise egzoz gazı geçirilecektir. Isı değişim prosesi, Şekil 7.3'de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Isı değişim prosesi

F-76 Dizel yakıtı:

Kütleli debi: 30 kg/saat

Giriş sıcaklığı= 125 °C

Çıkış sıcaklığı=400 °C

Egzoz gazı:

Giriş sıcaklığı= 861 °C

Çıkış sıcaklığı=310 °C

Gaz debileri, Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9 Gaz debileri

GAZ	kmol/kmol dizel	kg/kmol dizel
H ₂ O	57,499	1034,98
N ₂	164,766	4613,44
O ₂	24,760	792,32
CO ₂	12,947	569,66

Kütlesel debi:

$$\dot{m} = (6 \text{ kmol} / \text{kmoldizel})(26,97 \text{ kg} / \text{kmol}) = 161,82 \text{ kg} / \text{kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{161,82 \text{ kg} / \text{kmoldizel}}{205 \text{ kgdizel} / \text{kmoldizel}} = 0,78 \text{ kg} / \text{kgdizel}$$

$$\dot{m} = (0,78 \text{ kg} / \text{kgdizel})(30 \text{ kgdizel} / \text{saat}) = 23,4 \text{ kg} / \text{saat}$$

Toplam ısı yükü:

$$\Delta h_{2-3} = 114604 \text{ kJ} / \text{kmol}$$

$$Q = \frac{(114604 \text{ kJ / kmol})(30 \text{ kg / saat})}{(205 \text{ kgdizel / kmoldizel})(3600 \text{ s / saat})} = 4,65 \text{ kW}$$

Tasarım verisi aşağıdadır:

Seçilen gövde borulu ısı değiştirici:

Boru sayısı=Nt=4

İçteki boru (BWG 22)= ¼” (Dış çap=6,35 mm, İç çap=4,92 mm)

Şaşırtma levhası aralığı=B=0,050 m

Pitch ebatı=Pt=7,93.10⁻³ m

Boru geçiş sayısı=Np=2

$$D_s = \sqrt{\frac{(PR)^2 do^2 N_t CL}{0,785 CTP}} \quad (7.28)$$

$$D_s = \sqrt{\frac{(1,25)^2 (6,35 \cdot 10^{-3})^2 (4)(1)}{0,785(0,9)}} = 0,0188 \text{ m}$$

Dıştaki boru (80) = ¾” (Dış çap=26,67 mm, İç çap=18,84 mm)

A. 1. BÖLGE

Egzoz gazı (Gövde)

Çıkış şartları:

$$T_{\zeta} = 310 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{\zeta} = 8940 \text{ kJ / kmol}$$

$$0,52kW = 23,4 \left(\frac{1}{3600} \right) (h_g - 331)$$

$$h_g = 411 \text{ kJ / kg} = 11084 \text{ kJ / kmol}$$

İnterpolasyon ile giriş sıcaklığı:

$$T_g = 375,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1. Bölge özellikleri

Gövde tarafı egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{375,5 + 310}{2} = 342,75 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Çizelge 7.10 Akışkan özellikleri

Akışkan	Boru tarafı (F-76 Dizel)	Halkasal aralık (Egzoz)
Ortalama sıcaklık (°C)	139,5	342,75
Yogunluk, kg/m ³	703	0,579
Özgül ısı, kJ/kgK	2,461	1,213
Viskozite, kg/ms	$3,438 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$
Isıl iletkenlik, W/mK	0,104	0,048
Prandtl sayısı, Pr	8,135	0,720

Kare pitch boru dizilişi için:

$$D_e = \frac{4(P_T^2 - \pi d_o^2 / 4)}{\pi d_o} \quad (7.29)$$

$$D_e = \frac{4(0,00793^2 - \pi \cdot 0,00635^2 / 4)}{\pi(0,00635)} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$C = P_T - d_o \quad (7.30)$$

$$C = 0,00793 - 0,00635 = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A_s = \frac{D_s \cdot C \cdot B}{P_T} \quad (7.31)$$

$$A_s = \frac{(18,84 \cdot 10^{-3})(1,58 \cdot 10^{-3})(0,050)}{7,93 \cdot 10^{-3}} = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (7.32)$$

$$G_s = \frac{22,4 / 3600}{1,87 \cdot 10^{-4}} = 34,75 \text{ kg / s.m}^2$$

$$\text{Re}_s = \frac{G_s D_e}{\mu} \quad (7.33)$$

$$\text{Re}_s = \frac{(34,75)(6,25 \cdot 10^{-3})}{2,85 \cdot 10^{-5}} = 7622$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (7.34)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{125 + 154}{2} + \frac{310 + 375,5}{2} \right) = 241 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_w = 2,49 \cdot 10^{-5}$$

120

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left(\frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)^{0,55} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (7.35)$$

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left(\frac{(6,25 \cdot 10^{-3})(34,75)}{2,85 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,55} \left(\frac{(1213)(2,85 \cdot 10^{-5})}{0,048} \right)^{1/3} \left(\frac{2,85 \cdot 10^{-5}}{2,49 \cdot 10^{-5}} \right)$$

$$\frac{h_o D_e}{k} = 44,4$$

$$h_o = \frac{(44,4)(0,048)}{6,25 \cdot 10^{-3}} = 340 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Boru tarafı(F-76 Dizel yakıtı)

Kütlelel debi:30 kg/saat

Giriş sıcaklığı= 125 °C

Çıkış sıcaklığı=154 °C

$h_g = 39117 \text{ kJ/kmol}$

$h_{ç} = 51964 \text{ kJ/kmol}$

$h_{çg} = 12847 \text{ kJ/kmol}$

$$Q = \frac{(12847 \text{ kJ / kmol})(30 \text{ kg / saat})}{(205 \text{ kg / kmol})(3600 \text{ s / saat})} = 0,52 \text{ kW}$$

Boru tarafı F-76 dizel yakıtın özellikleri: akışkanın özellikleri:

$$T_b = \frac{125 + 154}{2} = 139,5 \text{ } ^\circ\text{C alınabilir.}$$

$$A_p = \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{N_T}{2} \quad (7.36)$$

$$A_p = \frac{\pi(4,92 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \frac{4}{2} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$u_m = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t A_p} \quad (7.37)$$

$$u_m = \frac{30/3600}{(703)(3,8 \cdot 10^{-5})} = 0,31 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u_m d_i}{\mu} \quad (7.38)$$

$$\text{Re} = \frac{(703)(0,31)(4,92 \cdot 10^{-3})}{3,438 \cdot 10^{-4}} = 3136$$

Re>2300 olduğundan akış türbülanslıdır. Gnielinski korelasyonu kullanılırsa:

$$Nu_b = \frac{(f/2)(\text{Re}_b - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7(f/2)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (7.39)$$

$$f = (1,58 \ln \text{Re} - 3,28)^{-2} \quad (7.40)$$

$$f = [1,58 \ln 3136 - 3,28]^{-2} = 0,011$$

$$Nu_b = \frac{(11 \cdot 10^{-3}/2)(3136 - 1000)(8,135)}{1 + 12,7(11 \cdot 10^{-3}/2)^{1/2}(8,135^{2/3} - 1)} = 24,7$$

$$h_i = \frac{Nu_b \cdot k}{d_i} \quad (7.41)$$

$$h_i = \frac{(24,7)(0,104)}{4,92 \cdot 10^{-3}} = 522 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Toplam ısı transfer katsayısı:

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + \frac{d_o \ln(d_o / d_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} \quad (7.42)$$

$$= \frac{1}{\frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{4,92 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{522} + \frac{6,35 \cdot 10^{-3} \ln(6,35 \cdot 10^{-3} / 4,92 \cdot 10^{-3})}{2(15,7)} + \frac{1}{340}}$$

$$= 183 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + \frac{d_o}{d_i} R_{fi} + \frac{d_o \ln(d_o / d_i)}{2k} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}} \quad (7.43)$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{4,92 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{522} + \frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{4,92 \cdot 10^{-3}} (0,000352) + \frac{6,35 \cdot 10^{-3} \ln(6,35 \cdot 10^{-3} / 4,92 \cdot 10^{-3})}{2(15,7)} + 0,001761 + \frac{1}{340}}$$

$$= 130 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Boru uzunluğu:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (7.44)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{185 - 221,5}{\ln(185/221,5)} = 202,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$F = 0,90$$

$$\Delta T_m = 0,90\Delta T_{lm} \quad (7.45)$$

$$\Delta T_m = 0,90(202,70) = 182,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_{of} = \frac{Q}{U_f \Delta T_m} \quad (7.46)$$

$$A_{of} = \frac{520}{130(182,43)} = 0,021 \text{ } m^2$$

$$A_o = \pi d_o L N_t \quad (7.47)$$

$$L = \frac{A_o}{\pi d_o N_t} = \frac{0,021}{\pi(0,00635)(4)} = 0,263 \text{ } m$$

B. İKİNCİ BÖLGE

Giriş sıcaklığı=154 °C

Çıkış sıcaklığı=348 °C

$h_g = 51964 \text{ kJ/kmol}$

$h_{ç} = 127126 \text{ kJ/kmol}$

$h_{çg} = 75162 \text{ kJ/kmol}$

$$Q_1 = \frac{(75162 \text{ kJ / kmol})(30 \text{ kg / saat})}{(205 \text{ kg / kmol})(3600 \text{ s / saat})} = 3,05 \text{ kW}$$

Gövde tarafı (Egzoz gazı-tek faz)

124

Çıkış sıcaklığı ve entalpisi:

$$T_g = 375,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_g = 11085 \text{ kJ/kmol}$$

$$3,05 \text{ kW} = 23,4 \left(\frac{1}{3600} \right) (h_g - 411)$$

$$h_g = 880 \text{ kJ/kg} = 23739 \text{ kJ/kmol}$$

İnterpolasyon ile giriş sıcaklığı:

$$T_g = 341 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Gövde tarafı egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{741,5 + 375,5}{2} = 558,5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Çizelge 7.11 Akışkan özellikleri

Akışkan	Halkasal aralık (Egzoz)
Ortalama sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	558,5
Yogunluk, kg/m^3	0,428
Özgül ısı, kJ/kgK	1,281
Viskozite, kg/ms	$3,54 \cdot 10^{-5}$
Isıl iletkenlik, W/mK	0,064
Prandtl sayısı, Pr	0,708

Kare pitch boru dizilişi için:

$$D_e = \frac{4(P_T^2 - \pi d_o^2 / 4)}{\pi d_o} \quad (7.48)$$

$$D_e = \frac{4(0,00793^2 - \pi 0,00635^2 / 4)}{\pi(0,00635)} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$C = P_T - d_o \quad (7.49)$$

$$C = 0,00793 - 0,00635 = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A_s = \frac{D_s \cdot C \cdot B}{P_T} \quad (7.50)$$

$$A_s = \frac{(18,84 \cdot 10^{-3})(1,58 \cdot 10^{-3})(0,050)}{7,93 \cdot 10^{-3}} = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (7.51)$$

$$G_s = \frac{23,4 / 3600}{1,87 \cdot 10^{-4}} = 34,75 \text{ kg / s.m}^2$$

$$\text{Re}_s = \frac{G_s \cdot D_e}{\mu} \quad (7.52)$$

$$\text{Re}_s = \frac{(34,75)(6,25 \cdot 10^{-3})}{3,54 \cdot 10^{-5}} = 6135$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (7.53)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{154 + 348}{2} + \frac{375,5 + 741,5}{2} \right) = 404,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left(\frac{D_e G_s}{\mu} \right)^{0,55} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (7.54)$$

$$= 0,36 \left(\frac{(6,25 \cdot 10^{-3})(34,75)}{3,54 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,55} \left(\frac{(1281)(3,54 \cdot 10^{-5})}{0,064} \right)^{1/3} \left(\frac{3,54 \cdot 10^{-5}}{3,066 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,14}$$

$$h_o = 405 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Boru tarafı (F-76 Dizel yakıtı-iki faz)

Kütleli debi: 30 kg/saat

Seçilen gövde borulu ısı değiştirici:

Boru sayısı=Nt=4

İçteki boru (BWG 22)= 1/4" (Dış çap=6,35 mm, İç çap=4,92 mm)

Şaşırtma levhası aralığı=B=0,050 m

Pitch ebatı=Pt=7,93.10⁻³ m

Boru geçiş sayısı=Np=2

Çizelge 7.12 Akışkan özellikleri

Özellikler	Boru tarafı (F-76 Dizel)
Sıvı yoğunluk, kg/m ³	692
Buhar yoğunluk, kg/m ³	3,98
Sıvı özgül ısı, kJ/kgK	2,522
Isıl iletkenlik, sıvı, W/mK	0,101
Yüzey gerilimi, N/m (251 °C)	0,010
Viskozite, sıvı, kg/ms	3,034.10 ⁻⁴
Viskozite, buhar, kg/ms	0,099.10 ⁻⁴

Prandtl sayısı:

$$\text{Pr} = \frac{\mu_l \cdot c_{p_l}}{k_l} \quad (7.55)$$

$$\text{Pr} = \frac{(3,034 \cdot 10^{-4})(2522)}{0,101} = 7,57$$

Sıvı faz için Reynolds sayısı:

$$\text{Re}_{LO} = \frac{G \cdot d_i}{\mu_l} \quad (7.56)$$

$$A_p = \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot \frac{N_T}{2} \quad (7.57)$$

$$A_p = \frac{\pi(4,92 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \frac{4}{2} = 3,80 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A_p} \quad (7.58)$$

$$G = \frac{30/3600}{3,80 \cdot 10^{-5}} = 219,29 \text{ kg / s.m}^2$$

$$\text{Re}_{LO} = \frac{(219,29)(4,92 \cdot 10^{-3})}{3,034 \cdot 10^{-4}} = 3556$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (7.59)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{154 + 348}{2} + \frac{741,5 + 375,5}{2} \right) = 404,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

128

$$\mu_w = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$x=0'$ da Nusselt sayısı, Gnielinski korelasyonu ile hesaplanabilir.

$$Nu_{LO} = \frac{(f/2)(Re_{LO} - 1000)Pr_i}{1 + 12,7(f/2)^{1/2}(Pr_i^{2/3} - 1)} \quad (7.60)$$

$$f = (1,58 \ln Re_i - 3,28)^{-2} \quad (7.61)$$

$$f = (1,58 \ln 3556 - 3,28)^{-2} = 0,010$$

$$Nu_{LO} = \frac{(0,010/2)(3556 - 1000)7,57}{1 + 12,7(0,010/2)^{1/2}(7,57^{2/3} - 1)} = 27,17$$

Isı transfer katsayısı:

$$h_{LO} = \frac{Nu_{LO} \cdot k_i}{d_i} \quad (7.62)$$

$$h_{LO} = \frac{(27,17)(0,101)}{4,92 \cdot 10^{-3}} = 557,94 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Froude sayısı:

$$Fr_{LO} = \frac{G^2}{\rho_i^2 g \cdot d_i} \quad (7.63)$$

$$Fr_{LO} = \frac{(219,29)^2}{(692)^2 (9,81)(4,92 \cdot 10^{-3})} = 2 > 0,04$$

$X=0,05'$ te Chen metodu için, Martinelli sayısı:

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (7.64)$$

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{0,05}{1-0,95} \right)^{0,9} \left(\frac{692}{3,98} \right)^{0,5} \left(\frac{0,099 \cdot 10^{-4}}{3,034 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,1} = 0,655$$

$$F_o = F(1-x_v)^{0,8} \quad (7.65)$$

$$F = 2,35 \left(0,213 + \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0,736} \quad (7.66)$$

$$F = 2,35 \left(0,213 + \frac{1}{0,655} \right)^{0,736} = 2,11$$

$$F_o = 2,11(1-0,05)^{0,8} = 2,02$$

Taşınım kaynama katsayısı:

$$h_{cb} = F_o(h_{LO}) \quad (7.67)$$

$$h_{cb} = 2,02(557,94) = 1129 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_{cb}} + \frac{d_o}{d_i} R_{fi} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}} \quad (7.68)$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{6,35}{4,92} \frac{1}{1129} + \frac{6,35}{4,92} (0,000352) + \frac{6,35 \ln(6,35/4,92)}{2(15,7)} + 0,001761 + \frac{1}{405}}$$

$$U_f = 17,59 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$q'' = U(\Delta T_m) \quad (7.69)$$

$$q'' = 17,59(299,3) = 5267 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Kaynama sayısı:

$$B_o = \frac{q''}{G \cdot h_{lg}} \quad (7.70)$$

$$B_o = \frac{5267}{(219,29)(366643)} = 6,5 \cdot 10^{-5} > 1,9 \cdot 10^{-5}$$

Çekirdek kaynama da göz önüne alınmalıdır. Çekirdek kaynama faktörü:

$$F_{nb} = 230 B_o^{1/2} \quad (7.71)$$

$$F_{nb} = 230(6,5 \cdot 10^{-5})^{1/2} = 1,86$$

İki fazlı akış için Reynolds sayısı:

$$\text{Re}_{TP} = \frac{G \cdot d_i}{\mu_l} (1-x) F^{1,25} \quad (7.72)$$

$$\text{Re}_{TP} = \frac{(219,29)(4,92 \cdot 10^{-3})}{3,034 \cdot 10^{-4}} (0,95)(2,11)^{1,25} = 8591$$

$$S = [1 + 2,53 \cdot 10^{-6} (\text{Re}_{TP})^{1,17}]^{-1} \quad (7.73)$$

$$S = [1 + 2,53 \cdot 10^{-6} (8591)^{1,17}]^{-1} = 0,90$$

Doyma sıcaklığı:

$$T_s = \frac{154 + 348}{2} = 251 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Duvar sıcaklığı:

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (7.74)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{154 + 348}{2} + \frac{741,5 + 375,5}{2} \right) = 404,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_B = \Delta T_{sat} = T_w - T_s \quad (7.75)$$

$$\theta_B = 404,75 - 251 = 153,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta P_v = \frac{\Delta T_{sat} \Delta h_v \rho_v}{T_s} \quad (7.76)$$

$$\Delta P_v = \frac{(153,75)(366643)(3,98)}{524} = 428164 \text{ Pa}$$

Çekirdek taşınım katsayısı:

$$h_{nb} = 0,00122 \frac{k_l^{0,79} c_{p_l}^{0,45} \rho_l^{0,49} \cdot S \cdot \theta_B^{0,24} \Delta P_v^{0,75}}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} (\Delta h_v \rho_v)^{0,24}} \quad (7.77)$$

$$h_{nb} = 0,00122 \frac{(0,101)^{0,79} (2522)^{0,45} (692)^{0,49} \cdot (0,90) \cdot (153,75)^{0,24} (428164)^{0,75}}{(0,010)^{0,5} (3,034 \cdot 10^{-4})^{0,29} ((366643)(3,98))^{0,24}}$$

$$h_{nb} = 30836 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Kombine ısı transfer katsayısı:

$$h_{cnb} = h_{cb} + h_{nb} \quad (7.78)$$

$$h_{cnb} = 1129 + 30836 = 31965 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

C. KIZGIN BUHAR

Boru tarafı (F-76 Dizel yakıtı)

Kütlelel debi:30 kg/saat

Giriş sıcaklığı=348 °C

Çıkış sıcaklığı=400 °C

$h_g = 127126 \text{ kJ/kmol}$

$h_{\dot{\zeta}} = 153721 \text{ kJ/kmol}$

$h_{\dot{\zeta}g} = 26595 \text{ kJ/kmol}$

$$Q = \frac{(26595 \text{ kJ / kmol})(30 \text{ kg / h})}{(205 \text{ kg / kmol})(3600 \text{ s / h})} = 1,08 \text{ kW}$$

Boru tarafı F-76 dizel yakıtın özellikleri,

$$T_b = \frac{348 + 400}{2} = 374^\circ \text{ C 'de alınabilir.}$$

Akışkan özellikleri, Çizelge 7.13'de verilmiştir.

Çizelge 7.13 Akışkan özellikleri

Akışkan	Boru tarafı (F-76 Dizel)	Halkasal aralık (Egzoz)
Ortalama sıcaklık (°C)	374	801,25
Yogunluk, kg/m ³	3,79	0,332
Özgül ısı, kJ/kgK	2,847	1,346
Viskozite, kg/ms	1,017.10 ⁻⁵	4,232.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,033	0,082
Prandtl sayısı, Pr	0,877	0,694

$$A_p = \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot \frac{N_T}{2} \quad (7.79)$$

$$A_p = \frac{\pi (4,92 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \frac{4}{2} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$u_m = \frac{\dot{m}}{\rho_t A_p} \quad (7.80)$$

$$u_m = \frac{30/3600}{(3,79)(3,8 \cdot 10^{-5})} = 57 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_t u_m d_i}{\mu} \quad (7.81)$$

$$\text{Re} = \frac{(3,79)(57)(4,92 \cdot 10^{-3})}{1,017 \cdot 10^{-5}} = 104510$$

Re > 2300 olduğundan akış türbülanslıdır.

Nusselt sayısı:

Gazlar için: $0,6 < \text{Pr}_b < 0,9$

134

$$Nu_b = 5 + 0,012 Re^{0,87} (Pr_b + 0,29) \quad (7.82)$$

$$Nu_b = 5 + 0,012(104510)^{0,87} (0,877 + 0,29) = 330$$

Isı transfer katsayısı:

$$h_i = \frac{Nu_b \cdot k}{d_i} \quad (7.83)$$

$$h_i = \frac{(330)(0,033)}{4,92 \cdot 10^{-3}} = 2213 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Gövde tarafı (Egzoz gazı)

Çıkış sıcaklığı ve entalpi:

$$T_\zeta = 741,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_\zeta = 23739 \text{ kJ / kmol}$$

$$1,08 \text{ kW} = 23,4 \left(\frac{1}{3600} \right) (h_g - 880)$$

$$h_g = 1046 \text{ kJ / kg} = 28214 \text{ kJ / kmol}$$

İnterpolasyon ile:

$$T_g = 861 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Gövde tarafı egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{861 + 741,5}{2} = 801,25 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Kare pitch boru dizilişi için:

$$D_e = \frac{4(P_T^2 - \pi d_o^2 / 4)}{\pi d_o} \quad (7.84)$$

$$D_e = \frac{4(0,00793^2 - \pi 0,00635^2 / 4)}{\pi(0,00635)} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$C = P_T - d_o \quad (7.85)$$

$$C = 0,00793 - 0,00635 = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A_s = \frac{D_s \cdot C \cdot B}{P_T} \quad (7.86)$$

$$A_s = \frac{(18,84 \cdot 10^{-3})(1,58 \cdot 10^{-3})(0,050)}{7,93 \cdot 10^{-3}} = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$G_s = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (7.87)$$

$$G_s = \frac{23,4 / 3600}{1,87 \cdot 10^{-4}} = 34,75 \text{ kg / s.m}^2$$

$$\text{Re}_s = \frac{G_s D_e}{\mu} \quad (7.88)$$

$$\text{Re}_s = \frac{(34,75)(6,25 \cdot 10^{-3})}{4,232 \cdot 10^{-5}} = 5132$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{c1} + T_{c2}}{2} + \frac{T_{h1} + T_{h2}}{2} \right) \quad (7.89)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{348 + 400}{2} + \frac{741,5 + 861}{2} \right) = 587,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left(\frac{D_e G_s}{\mu} \right)^{0,55} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (7.90)$$

$$h_o = 414 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Toplam ısı transfer katsayısı:

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + \frac{d_o \ln(d_o / d_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} \quad (7.91)$$

$$U_c = 327 \text{ W / m}^2\text{K}$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + \frac{d_o}{d_i} R_{fi} + \frac{d_o \ln(d_o / d_i)}{2k} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_f = 190 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Boru uzunluğu:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (7.92)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{461 - 393,5}{\ln(461 / 393,5)} = 426,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$F = 0,90$$

$$\Delta T_m = 0,90 \Delta T_{lm} = 383,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_{of} = \frac{Q}{U_f \Delta T_m} \quad (7.93)$$

$$A_{of} = \frac{1080}{(190)(383,72)} = 0,014 \text{ m}^2$$

$$A_o = \pi d_o . L . N_t \quad (7.93)$$

$$L = \frac{0,014}{\pi(0,00635)(4)} = 0,185 \text{ m}$$

7.3 Elektrikli F-76 Dizel Evaporator (ID-2)

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere elektrikli evaporatorün ısı gücü hesabı yapılmıştır. Pürüzsüz bir alüminyum yüzey kullanılmıştır. Dizel yakıtın, yüzey sıcaklığına bağlı olarak buharlaşma zamanı Şekil 7.2'de gösterilmiştir (Fardad, 1999).

Pürüzsüz bir alüminyum yüzey için ;

Kritik yüzey sıcaklığı = 370 °C

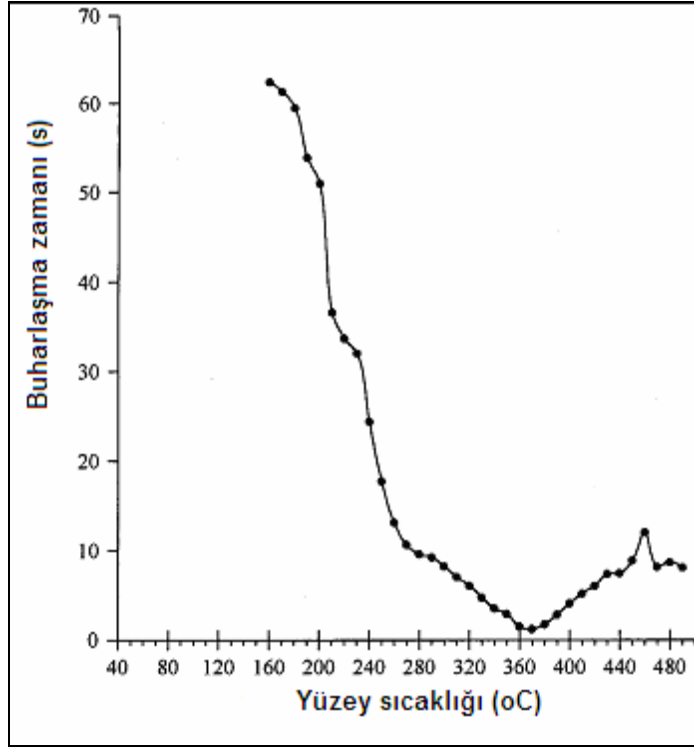
Leidenfrost yüzey sıcaklığı = 460 °C

$$\Delta T_{ec} = T_s - T_{sat}$$

$$\Delta T_{ec} = 370 - 367 = 3 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta T_{e,D} = T_s - T_{sat}$$

$$\Delta T_{e,D} = 460 - 367 = 93 \text{ } ^\circ C$$



Şekil 7.4 Dizel yakıt buharlaşma süresi-yüzey sıcaklığı

Kızma farkı:

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat}$$

$$\Delta T_e = 500 - 367 = 133 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta T_e > \Delta T_{e_D}$$

Film kaynaması koşulları oluşmuştur.

$$Nu_D = \frac{h_{conv} \cdot D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (7.94)$$

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.80c_{pv} (T_s - T_{sat}) \quad (7.95)$$

$$\bar{h}_{conv} = C \left[\frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.8c_{pv} \Delta T_e)}{\mu_v D \Delta T_e} \right]^{1/4} \quad (7.96)$$

Bağıntı sabiti C, yatay silindirler için 0,62 dir.

$$k_v = 0,032 \text{ W / mK}$$

$$\rho_v = 3,53 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho_l = 692 \text{ kg / m}^3$$

$$h_{fg} = 422 \text{ kJ / kg}$$

$$c_{pv} = 2,77 \text{ kJ / kgK}$$

$$\mu_v = 9,78 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$\bar{h}_{conv} = 0.62 \left[\frac{(0.032)^3 (3.53)(692 - 3.53)(9.8)(422 \cdot 10^3 + 0.8(2.77 \cdot 10^3)(133))}{(9.78 \cdot 10^{-6})(10 \cdot 10^{-3})(133)} \right]^{1/4}$$

$$\bar{h}_{conv} = 404 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Yüksek yüzey sıcaklıklarında ($T_s \geq 300^\circ \text{C}$), buhar filminde ışınımla ısı transferi gerçekleşir. Işınımla ısı transfer katsayısı

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (7.97)$$

$$\bar{h}_{rad} = \frac{(0.06)(5.67 \cdot 10^{-8})(773^4 - 640^4)}{(773 - 640)} = 4,85 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

140

$$h_{\text{rad}} < h_{\text{conv}}$$

$$h = h_{\text{conv}} + \frac{3}{4} h_{\text{rad}}$$

$$h = 404 + \frac{3}{4}(4,85) = 407,64 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$q's = qs \cdot \pi D = h \pi D \Delta T_e$$

$$q's = (407,64) \pi (10 \cdot 10^{-3}) (133) = 1703 \text{ W / m}$$

$$qs = \dot{m}_b \cdot h_{fg} \quad (7.98)$$

Burada, \dot{m}_b , serbest yüzeyden ototermal yakıt dönüştürücüye giden dizel yakıtın buharlaşma debisidir. 10 kW katı oksitli yakıt pili sistemi için:

$$\dot{m}_b = 2,5 \text{ kg / h}$$

$$qs = \frac{(2,5)}{3600} (422000) = 293,05 \text{ W}$$

$$q's (\text{W / m}) \cdot L (\text{m}) = qs (\text{W}) \quad (7.99)$$

$$L = \frac{293,05}{1703} = 0,1720 \text{ m} = 17,20 \text{ cm}$$

Çizelge 7.14 Rezistans güç ve uzunluğu

SOFC sistem gücü (kW)	Yakıt Debisi(kg/h)	Güç(W)	Uzunluk(m)
5	1,25	146,5278	0,086041
10	2,5	293,0556	0,172082
20	5	586,1111	0,344164
30	7,5	879,1667	0,516246
40	10	1172,222	0,688328
50	12,5	1465,278	0,86041
60	15	1758,333	1,032492

Seçilen elektrikli ısıtıcı özellikleri:

Çizelge 7.15 Isıtıcı özellikleri

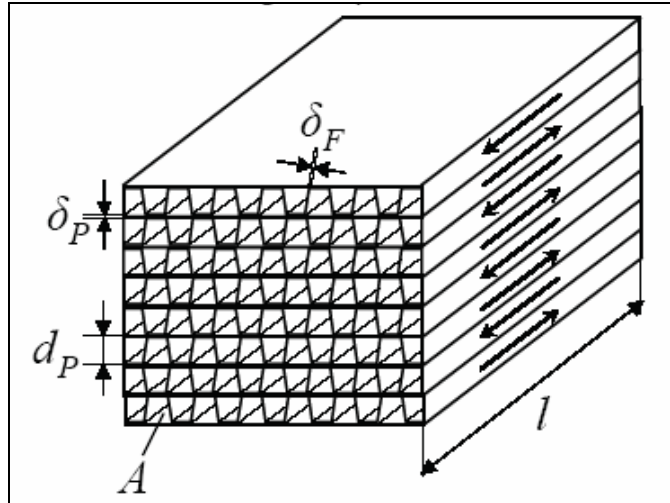
Isıtıcı malzemesi	Alüminyum
Yüzey sıcaklığı	500 °C
Çapı	10 mm
Uzunluğu	17,50 cm
Güç	300 W
Gerilim	220 V
Frekans	50 Hz

7.4 Isı Değiştirici-3(ID-3)



şekil 7.5 Isı değiştirici (ID-3)

Yakıt dđnüşürücü girişindeki ısı değiştirici (şekil 7.3), 400 °C sıcaklıktaki yakıt ve su buharı karışımı, katalitik yanma odasından gelen egzoz gazı ile 700 °C'ye ısıtacaktır.



şekil 7.6 Kompakt ısı değiştirici (ID-3)

Çizelge 7.16 Akışkan özellikleri

Akış No	Sıcaklık(°C)	Toplam mol (kmol/kmolyakıt)	Gaz kompozisyonu (kmol/kmolyakıt)
5	400	46,3148	F-76 Dizel 1.0 H ₂ O 45.3148
6	700	46,3148	F-76 Dizel 1.0 H ₂ O 45.3148
10	935	259,972	H ₂ O 57.499 N ₂ 164.766 CO ₂ 12.947 O ₂ 24.760
11	861	259,972	H ₂ O 57.499 N ₂ 164.766 CO ₂ 12.947 O ₂ 24.760

Yakıt+Su buharı (5-6):

Giriş sıcaklığı= 400 °C

Çıkış sıcaklığı=700 °C

Kütlesel debi:

$$\dot{m} = (46,3148 \text{ kmol} / \text{kmoldizel})(21,51 \text{ kg} / \text{kmol} = 996,23 \text{ kg} / \text{kmoldizel})$$

$$\dot{m} = \frac{996,23}{205} = 4,85 \text{ kg} / \text{kgdizel}$$

$$\dot{m} = (4,85 \text{ kg} / \text{kgdizel})(30 \text{ kgdizel} / \text{saat})$$

$$\dot{m} = 145,5 \text{ kg} / \text{saat}$$

F-76 dizel + su buharının özellikleri:

$$T_b = \frac{400 + 700}{2} = 550 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ' de alınabilir.}$$

Egzoz gazı (10-11):

Giriş sıcaklığı= 935 °C

Çıkış sıcaklığı=861 °C

Kütleli debi:

$$\dot{m} = (259,972 \text{ kmol / kmoldizel})(26,97 \text{ kg / kmol}) = 7011,44 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{7011,44}{205} = 34,2 \text{ kg / kgdizel}$$

$$\dot{m} = (34,2 \text{ kg / kgdizel})(30 \text{ kgdizel / saat})$$

$$\dot{m} = 1026 \text{ kg / saat}$$

Egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{935 + 861}{2} = 898 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Akışkan özellikleri, Çizelge 7.17'de verilmiştir.

Çizelge 7.17 Akışkan özellikleri

Akışkan	(F-76+su buharı)	Egzoz
Ortalama sıcaklık (°C)	550	898
Yogunluk, kg/m ³	0,314	0,304
Özgül ısı, kJ/kgK	2,366	1,363
Viskozite, kg/ms	2,65.10 ⁻⁵	4,48.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,081	0,088
Prandtl sayısı, Pr	0,774	0,693

Yüzey geometrisi 11.1 (Kays 1984) uygulanmıştır. Yüzey tanımının anlamı, 1 inç (25,4 mm) uzunluğunda 11,1 kanat bulunmasıdır. Isı değiştirici adyabatiktir. Isı transferi, taşınım ve iletimle gerçekleşmektedir. Işınım, ihmal edilmiştir.

Çizelge 7.18 Yüzey karakteristikleri

	(F-76+su buharı)/Egzoz
Yüzey tanımı	11.1
Levha aralığı, b	0,00635 m
Hidrolik yarıçap, r _h	0,000771 m
Kanat kalınlığı	0.000152 m
Transfer alanı/levhalar arası hacim	1204 m ⁻¹
Kanat alanı/Toplam alan	0,756

Ön tahmin:

$$h_{10} = 39781 \text{ kJ / kmol}$$

$$h_{11} = 37061 \text{ kJ / kmol}$$

$$\Delta h = 2720 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q = \frac{(2720 \text{ kJ / kmol})(1026 \text{ kg / h})}{(26,97 \text{ kg / kmol})(3600 \text{ s / h})} = 28,74 \text{ kW}$$

$$\Delta T_m = \frac{(935 - 700) - (861 - 400)}{\ln \frac{(935 - 700)}{(861 - 400)}} = 335 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Toplam ısı transfer katsayısı $U=70 \text{ W/m}^2\text{K}$

Isı değiştiricinin yaklaşık alanı

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} \tag{7.100}$$

$$A = \frac{28,74 \cdot 10^3 \text{ W}}{(70 \text{ W / m}^2 \text{ K})(335)} = 1,22 \text{ m}^2$$

Isı değiştiricinin yaklaşık hacmi

$$V = \frac{A}{\beta} = \frac{122 \text{ m}^2}{1204 \text{ m}^{-1}} = 1.10^{-3} \text{ m}^3$$

Isı değiştiricisine gazın girdiği ön yüzündeki hızın yaklaşık

$V=10 \text{ m/s}$ seçilmesi halinde

$$A_{\text{ön}} = a.b = \frac{\dot{m}_{eg}}{\rho_{eg}.V_{eg}} = \frac{1026/3600}{(0,304)(10)} = 0,09 \text{ m}^2$$

$$A_{kar} = a.b = \frac{\dot{m}_{kararı}}{\rho_{kar}.V_{kar}} = \frac{145.5/3600}{(0,314)(10)} = 0,012 \text{ m}^2$$

Isı Transferi ve Serbest Akış Alanları

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{V_{top}} = \frac{b_1\beta_1}{b_1 + b_2 + 2a} \quad (7.101)$$

(F-76+su buharı)

$$\alpha_{kar} = \frac{(0.00635 \text{ m})(1204 \text{ m}^{-1})}{(0.00635 \text{ m}) + (0.00635 \text{ m}) + 2(0.0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Egzoz

$$\alpha_{egzoz} = \frac{(0.00635 \text{ m})(1204 \text{ m}^{-1})}{(0.00635 \text{ m}) + (0.00635 \text{ m}) + 2(0.0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Her taraftaki toplam ısı transfer alanı

$$A = \alpha.V \quad (7.102)$$

$$A_{kar} = (574,84 \text{ m}^{-1})(1.10^{-3} \text{ m}^3) = 0,574 \text{ m}^2$$

$$A_{egzoz} = (574,84 \text{ m}^{-1})(1.10^{-3} \text{ m}^3) = 0,574 \text{ m}^2$$

Serbest akış alanının ön alana oranı:

$$\sigma = \frac{A_c}{A_{fr}} = \alpha \cdot r_h \quad (7.103)$$

$$\sigma_{kar} = (574,84)(0.000771) = 0.443$$

$$\sigma_{egzoz} = (574,84)(0.000771) = 0.443$$

Serbest akış alanları:

$$Ac = \sigma \cdot A_{fr}$$

$$Ac_{kararı} = (0.443)(0.012) = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Ac_{egzoz} = (0.443)(0.09) = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Reynolds sayıları:

Karışım tarafı:

$$G_{kararı} = \frac{W_{kar}}{Ac_{kar}} = \frac{145.5/3600}{5,3 \cdot 10^{-3}} = 7.625 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$$

$$Re_{kar} = \frac{4r_{kar} G_{kar}}{\mu_{kar}} = \frac{4(0.000771)(7.625)}{2.65 \cdot 10^{-5}} = 887$$

Egzoz tarafı:

$$G_{egz} = \frac{W_{egz}}{Ac_{egz}} = \frac{1026/3600}{40 \cdot 10^{-3}} = 7.125 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$$

$$Re_{egz} = \frac{4r_{egz} G_{egz}}{\mu_{egz}} = \frac{4(0.000771)(7.125)}{4.48 \cdot 10^{-5}} = 490$$

148

$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} \cdot vef$ nin belirlenmesi

Karışım tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0.006$$

$$f = 0.025$$

$$N_{st} = \frac{0.006}{(0.774)^{2/3}} = 7.11 \cdot 10^{-3}$$

Egzoz tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0.009$$

$$f = 0.035$$

$$N_{st} = \frac{0.009}{(0.693)^{2/3}} = 11.4 \cdot 10^{-3}$$

Film Isı transfer katsayıları

Karışım tarafı

$$h_{kar} = N_{st} \cdot G \cdot cp = (7.11 \cdot 10^{-3})(7.625)(2366) = 128 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Egzoz tarafı

$$h_{egzr} = N_{st} \cdot G \cdot cp = (11.4 \cdot 10^{-3})(7.125)(1363) = 110 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Kanat etkenliği

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}} \quad (7.104)$$

Karışım tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2(128)}{(15.1)(0.000152)}} = 333 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0.00635}{2} = 0.003175$$

$$m.l = 1.05$$

$$\eta = 0.76$$

Egzoz tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2(110)}{(15.1)(0.000152)}} = 309 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0.00635}{2} = 0.003175$$

$$m.l = 0.98$$

$$\eta = 0.75$$

Yüzey Etkenliği

$$\eta_o = 1 - \frac{Af}{A}(1 - \eta_f) \quad (7.105)$$

Karışım tarafı:

$$\eta_o = 1 - (0.756)(1 - 0.76) = 0.81$$

Egzoz tarafı:

150

$$\eta_0 = 1 - (0.756)(1 - 0.75) = 0.811$$

Toplam ısı transfer katsayısı

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\eta_{0kar} \cdot h_{kar}} + \frac{1}{(A_{egz} / A_{kar}) \eta_{0egz} h_{egz}} \quad (7.106)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{(0.81)(128)} + \frac{1}{(1)(0.811)(110)}$$

$$\frac{1}{U} = 9.64 \cdot 10^{-3} + 11.2 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3}$$

$$U = 48 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Basınç kayıpları

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{G^2}{2g_c P_1} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A}{A_c} \frac{v_m}{v_1} - (1 - \sigma^2 - K_e) \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (7.107)$$

Giriş ve çıkış kayıp katsayıları yaklaşık olarak;

$$\text{Karışım için } \sigma_{kar.} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

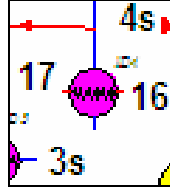
$$\text{Egzoz gazı için } \sigma_{gaz} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{kar.} = 1,648$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{egzoz} = 1,190$$

$$\text{Su buharı tarafı : } \frac{\Delta P}{P_1} = 4,9 \cdot 10^{-4}$$

7.5 Isı Değiştirici-4 (ID-4)



Şekil 7.7 Isı değiştirici (ID-4)

Buhar-Egzoz Isı Değiştirici

Buhar:

$$\dot{m} = (45,3148 \text{ kmol} / \text{kmoldizel})(18 \text{ kg} / \text{kmol}) = 815 \text{ kg} / \text{kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{815 \text{ kgsu} / \text{kmoldizel}}{205 \text{ kgdizel} / \text{kmoldizel}} = 4 \text{ kg} / \text{kgdizel}$$

$$\dot{m} = (4 \text{ kg} / \text{kgdizel})(30 \text{ kg} / \text{saat}) = 120 \text{ kg} / \text{saat}$$

$$Q = (120 / 3600 \text{ kg} / \text{s})(598 \text{ kJ} / \text{kg}) = 19,93 \text{ kW}$$

$$h_{4s} = 3277 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$h_{3s} = 2679 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$T_g = 104 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_ç = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kızgın su buharının özellikleri:

$$T_b = \frac{104 + 400}{2} = 252 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ' de alınabilir.}$$

Egzoz gazı:

Giriş sıcaklığı= 861 °C

Çıkış sıcaklığı=310 °C

Egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{861 + 310}{2} = 585,5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Kütleli debi:

$$\dot{m} = (95 \text{ kmol / kmoldizel})(26,97 \text{ kg / kmol}) = 2562,15 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{2562,15 \text{ kg}}{205 \text{ kgdizel}} = 12,49 \text{ kg / kgdizel}$$

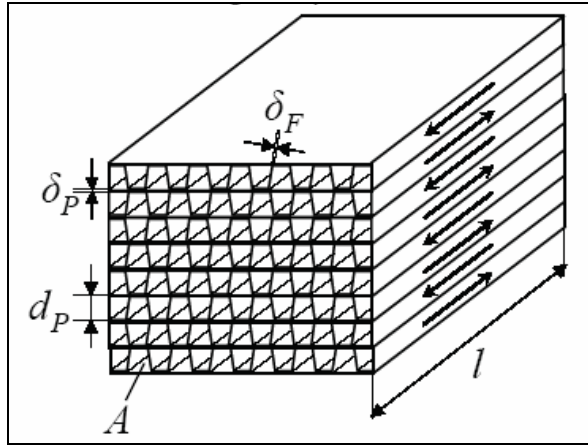
$$\dot{m} = (12,49 \text{ kg / kgdizel})(30 \text{ kgdizel / h}) = 374,9 \text{ kg / h}$$

Akışkan özellikleri, Çizelge 7.19' da, ısı değiştirici Şekil 7.3' de verilmiştir.

Çizelge 7.19 Akışkan özellikleri

Akışkan	Buhar	Egzoz
Ortalama sıcaklık (°C)	252	585,5
Yogunluk, kg/m ³	0,455	0,415
Özgül ısı, kJ/kgK	1,994	1,289
Viskozite, kg/ms	1,791.10 ⁻⁵	3,62.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,046	0,066
Prandtl sayısı, Pr	0,776	0,706

Yüzey geometrisi 11.1 (Kays 1984) uygulanmıştır. Yüzey tanımının anlamı, 1 inç (25,4 mm) uzunluğunda 11,1 kanat bulunmasıdır. Isı değiştirici adyabatiktir. Isı transferi, taşınım ve iletimle gerçekleşmektedir. Işınım, ihmal edilmiştir.



Şekil 7.8 Kompakt ısı değiştirici (ID-4)

Çizelge 7.20 Yüzey karakteristikleri (ID-4)

	Su buharı/Egzoz
Yüzey tanımı	11.1
Levha aralığı, b	0,00635 m
Hidrolik yarıçap, r_h	0,000771 m
Kanat kalınlığı	0,000152 m
Transfer alanı/levhalar arası hacim	1204 m ⁻¹
Kanat alanı/Toplam alan	0,756

154

Başlangıç tahmini:

$$\Delta T_m = \frac{(861 - 400) - (310 - 104)}{\ln \frac{(861 - 400)}{(310 - 104)}} = \frac{461 - 206}{\ln \frac{461}{206}} = \frac{255}{\ln 2,23} = 317,95 \text{ } ^\circ C$$

Toplam ısı transfer katsayısı $U=50 \text{ W/m}^2\text{K}$

Isı değiştiricinin yaklaşık alanı

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m}$$

$$A = \frac{19,93 \cdot 10^3 \text{ W}}{(50 \text{ W/m}^2\text{K})(317,95 \text{ } ^\circ C)} = 1,25 \text{ m}^2$$

Isı değiştiricinin yaklaşık hacmi

$$V = \frac{A}{\beta} = \frac{1,25 \text{ m}^2}{1204 \text{ m}^{-1}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Isı değiştiricisine gazın girdiği ön yüzündeki hızın yaklaşık

$V=10 \text{ m/s}$ seçilmesi halinde

$$A_{\text{ön}} = a \cdot b = \frac{\dot{m}_{eg}}{\rho_{eg} \cdot V_{eg}} = \frac{374,9/3600}{(0,415)(10)} = 0,025 \text{ m}^2 \approx (0,16)(0,16) = 0,0256 \text{ m}^2$$

Bu durumda ısı değiştiricinin boyutları

$$V_{\text{id}} = a \cdot b \cdot c = (0,16)(0,16)(0,1) = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Isı Transferi ve Serbest Akış Alanları

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{V_{toplam}} = \frac{b_1 \beta_1}{b_1 + b_2 + 2a} \quad (7.108)$$

Buhar tarafı

$$\alpha_1 = \frac{(0,00635)(1204)}{(0,00635) + (0,00635) + 2(0,0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Egzoz tarafı:

$$\alpha_1 = \frac{(0,00635)(1204)}{(0,00635) + (0,00635) + 2(0,0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Her taraftaki toplam ısı transfer alanı

$$A = \alpha.V \quad (7.109)$$

$$A_{buhar} = (574,84 \text{ m}^{-1})(2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) = 1,43 \text{ m}^2$$

$$A_{egzoz} = (574,84 \text{ m}^{-1})(2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) = 1,43 \text{ m}^2$$

Serbest akış alanının ön alana oranı:

$$\sigma = \frac{A_c}{A_{fr}} = \alpha.r_h \quad (7.110)$$

$$\sigma_{buhar} = (574,84)(0,000771) = 0,443$$

$$\sigma_{egzoz} = (574,84)(0,000771) = 0,443$$

Serbest akış alanları:

$$A_c = \sigma.A_{fr} \quad (7.111)$$

$$A_{c\ buhar} = (0,443)(0,0256) = 0,011 \text{ m}^2$$

156

$$A_{c_{egzoz}} = (0,443).(0,0256) = 0,011 \text{ m}^2$$

Reynolds sayıları:

Buhar tarafı:

$$G_{buhar} = \frac{W_{buhar}}{A_{cbuhar}} \quad (7.112)$$

$$G_{buhar} = \frac{120/3600}{0,011} = 3 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$$

$$Re_{buhar} = \frac{4r_{hbuhar} \cdot G_{buhar}}{\mu_{buhar}} \quad (7.113)$$

$$Re_{buhar} = \frac{4(0,000771).(3)}{1,791.10^{-5}} = 516$$

Egzoz tarafı:

$$G_{egzoz} = \frac{W_{egzoz}}{A_{cegzoz}} \quad (7.114)$$

$$G_{egzoz} = \frac{374,9/3600}{0,011} = 9,46 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$$

$$Re_{egzoz} = \frac{4r_{hegzoz} \cdot G_{egzoz}}{\mu_{egzoz}} \quad (7.115)$$

$$Re_{egzoz} = \frac{4(0,000771).(9,46)}{3,62.10^{-5}} = 805$$

$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3}$ ve f 'nin belirlenmesi

Buhar tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0,008$$

$$f = 0,035$$

$$N_{st} = \frac{0,008}{0,776^{2/3}} = 9,47 \cdot 10^{-3}$$

Egzoz tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0,006$$

$$f = 0,023$$

$$N_{st} = \frac{0,006}{0,805^{2/3}} = 6,93 \cdot 10^{-3}$$

Film Isı transfer katsayıları

Buhar tarafı

$$h_{buhar} = N_{st} \cdot G \cdot c_p \quad (7.116)$$

$$h_{buhar} = (9,47 \cdot 10^{-3}) \cdot (3) \cdot (1994) = 56,64 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Egzoz tarafı

$$h_{egzoz} = N_{st} \cdot G \cdot c_p \quad (7.117)$$

$$h_{egzoz} = (6,93 \cdot 10^{-3}) \cdot (9,46) \cdot (1289) = 84,5 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Kanat etkenliği

158

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{k \cdot \delta}} \quad (7.118)$$

Buhar tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot (56,64)}{(15,7) \cdot (0,000152)}} = 217,87 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0,00635}{2} = 0,003175$$

$$m \cdot l = 0,691$$

$$\eta_{fbuhar} = 0,85$$

Egzoz tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot (84,5)}{(15,7) \cdot (0,000152)}} = 266,11 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0,00635}{2} = 0,003175$$

$$m \cdot l = 0,844$$

$$\eta_{fgaz} = 0,82$$

Yüzey Etkenliği

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \quad (7.119)$$

Buhar tarafı:

$$\eta_{obuhar} = 1 - (0,756)(1 - 0,85) = 0,886$$

Egzoz tarafı:

$$\eta_{gaz} = 1 - (0,756)(1 - 0,82) = 0,863$$

Toplam ısı transfer katsayısı

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\eta_{0buhar} \cdot h_{buhar}} + \frac{1}{(A_{egzoz} / A_{buhar}) \eta_{0egzoz} \cdot h_{egzoz}} \quad (7.120)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{(0,886) \cdot (56,64)} + \frac{1}{(0,011/0,011)(0,863) \cdot (84,5)}$$

$$U = 30,56 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Basınç kayıpları

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{G^2}{2g_c} \frac{v_1}{P_1} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A}{A_c} \frac{v_m}{v_1} - (1 - \sigma^2 - K_e) \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (7.121)$$

Giriş ve çıkış kayıp katsayıları yaklaşık olarak;

Su buharı için $\sigma_{buhar} = 0,443$, $K_c = 1,1$, $K_e = 0$

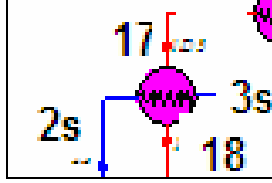
Egzoz gazı için $\sigma_{gaz} = 0,443$, $K_c = 1,1$, $K_e = 0$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{hava} = 1,648$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{egzoz} = 1,190$$

$$\text{Su buharı tarafı : } \frac{\Delta P}{P_1} = 1,6 \cdot 10^{-4}$$

7.6 Isı Değiştirici-5 (ID-5)



Şekil 7.9 Isı değiştirici (ID-5)

Su buharı:

$$m = (45,3148 \text{ kmol} / \text{kmoldizel})(18 \text{ kg} / \text{kmol}) = 815 \text{ kg} / \text{kmoldizel}$$

$$m = \frac{815 \text{ kgsu} / \text{kmoldizel}}{205 \text{ kgdizel} / \text{kmoldizel}} = 4 \text{ kg} / \text{kgdizel}$$

$$m = (4 \text{ kg} / \text{kgdizel})(30 \text{ kg} / \text{saat}) = 120 \text{ kg} / \text{saat}$$

$$T_g = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ç}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{2s} = 419 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{3s} = 2679 \text{ kJ/kg}$$

$$q_s = \dot{m}_b \cdot h_{fg} \quad (7.122)$$

$$q_s = \frac{(120)}{3600} (2260) = 75.333 \text{ kW}$$

$$T_s = \frac{1}{2} \left(\frac{310 + 140}{2} + 100 \right) = 162,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kızma farkı:

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat}$$

$$\Delta T_e = 162,5 - 100 = 62,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$hd = 3.14q^{0.7} \cdot p^{0.15} \quad (7.123)$$

$$hd = 3.14(51500)^{0.7} \cdot (1)^{0.15} = 6240 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Buhar özellikleri, $T_f = \frac{(T_s + T_{sat})}{2} = \frac{162.5 + 100}{2} = 131.25 \text{ } ^\circ\text{C}$ film sıcaklığında alınır.

$$k_v = 0.027 \text{ W / mK}$$

$$\rho_v = 1.54 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho_l = 958 \text{ kg / m}^3$$

$$h_{fg} = 2260 \text{ kJ / kg}$$

$$cp_v = 1,94 \text{ kJ / kgK}$$

$$\mu_v = 1,375 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$D = 88,9 \text{ mm}$$

Egzoz gazı:

Giriş sıcaklığı= 310 °C

Çıkış sıcaklığı= 140 °C

Gaz debileri, Çizelge 7.21'de verilmiştir.

Çizelge 7.21 Gaz debileri

GAZ	kmol/kmol dizel	kg/kmol dizel
H ₂ O	57,499	1034,98
N ₂	164,766	4613,44
O ₂	24,760	792,32
CO ₂	12,947	569,66

Kütlesel debi:

$$\dot{m} = (95 \text{ kmol} / \text{kmoldizel})(26,97 \text{ kg} / \text{kmol}) = 2562,15 \text{ kg} / \text{kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{2562,15 \text{ kg}}{205 \text{ kgdizel}} = 12,49 \text{ kg} / \text{kgdizel}$$

$$m = (12.49 \text{ kg} / \text{kgdizel})(30 \text{ kgdizel} / \text{saat})$$

$$m = 374,9 \text{ kg} / \text{saat}$$

Akışkan özellikleri, Çizelge 7.22'de verilmiştir.

Çizelge 7.22 Akışkan özellikleri

Akışkan	Boru tarafı (Egzoz)	Su
Ortalama sıcaklık (°C)	225	585,5
Yogunluk, kg/m ³	0,455	0,415
Özgül ısı, kJ/kgK	1,994	1,289
Viskozite, kg/ms	2.43.10 ⁻⁵	3,62.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,046	0,066
Prandtl sayısı, Pr	0,776	0,706

$$u_m = \frac{\dot{m}_{egz}}{\rho_{egz} A_{egz}} = \frac{374.9 / 3600}{(0.681) \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.0779)^2} = 32 \text{ m} / \text{s}$$

$$Re = \frac{u_m d_i \rho}{\mu} = \frac{4m_i}{\mu \pi d_i}$$

$$Re = \frac{4(374.9 / 3600)}{(2.426.10^{-5}) \pi (0.0779)} = 70160$$

$$Nub = \frac{(f/2)Re b Pr b}{1 + 8.7(f/2)^{1/2}(Pr b - 1)} \quad (7.124)$$

$$f = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$$

$$f = (1.58 \ln 70160 - 3.28)^{-2}$$

$$f = 4.85 \cdot 10^{-3}$$

$$Nub = \frac{(4.85 \cdot 10^{-3} / 2)(70160)(10.58)}{1 + 8.7(4.85 \cdot 10^{-3} / 2)^{1/2}(10.58 - 1)}$$

$$Nub = \frac{1802.23}{5.10} = 353.37$$

$$hi = \frac{Nub \cdot k}{di} = \frac{(353.37)(0.038)}{0.0779} = 172,37 \text{ W / m}^2\text{K}$$

$$Ao = \frac{Q}{Uo \Delta T_m} \quad (7.125)$$

$$Ao = \frac{75333}{(500)(103)} = 1,46 \text{ m}^2$$

$$Ds = 0.637 \sqrt{\frac{CL}{CTP} \left[\frac{Ao(PR)^2 do}{L} \right]^{1/2}} \quad (7.126)$$

$$Ds = 0.637 \sqrt{\frac{1}{0.9} \left[\frac{(1.46)(1.25)^2 (0.026)}{0.5} \right]^{1/2}} = 0.230 \text{ m}$$

Boru tarafi

$$Atp = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{Nt}{2} = \frac{\pi}{4} (18.8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \frac{52}{2} = 7.21 \cdot 10^{-3}$$

$$u_m = \frac{\dot{m}_{egz}}{\rho_{egz} A_{egz}} = \frac{374.9/3600}{(0.681)(7.21 \cdot 10^{-3})} = 21 \text{ m/s} \quad (7.127)$$

$$Re = \frac{\rho U m d i}{\mu} = \frac{(0.681)(21)(18.8 \cdot 10^{-3})}{2.43 \cdot 10^{-5}} = 11064$$

$Re > 10^4$, Akış türbülanslıdır.

$$Nub = \frac{(f/2)(Re b - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (7.128)$$

$$f = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$$

$$f = (1.58 \ln 20020 - 3.28)^{-2}$$

$$f = 6.5 \cdot 10^{-3}$$

$$Nub = \frac{(6.5 \cdot 10^{-3} / 2)(11064 - 1000)(0.717)}{1 + 12.7(6.5 \cdot 10^{-3} / 2)^{1/2}(0.717^{2/3} - 1)}$$

$$Nub = 51,38 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$hi = \frac{Nub \cdot k}{di}$$

$$hi = \frac{(44,57)(0,04)}{18,8 \cdot 10^{-3}}$$

$$hi = 95 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$\frac{1}{Uf} = \frac{do}{dih_i} + \frac{doRf_i}{di} + \frac{do \ln(do/di)}{2k} + Rfo + \frac{1}{ho} \quad (7.129)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Uf} &= \frac{26.10^{-3}}{(18.8.10^{-3})(95)} + \frac{(26.10^{-3})(88.10^{-6})}{(18.8.10^{-3})} \\ &+ \frac{(26.10^{-3}) \ln(26.10^{-3}/18.8.10^{-3})}{2(15)} + 352.10^{-6} + \frac{1}{6240} \\ \frac{1}{Uf} &= 14.10^{-3} + 0.121.10^{-3} + 0.28.10^{-3} + 0.352.10^{-3} + 0.16.10^{-3} \\ \frac{1}{Uf} &= 0.015 \\ Uf &= 65 \text{ W / m}^2 \text{ K} \end{aligned}$$

Isı transferi yüzey alanı

$$Ao = \frac{Q}{Uo\Delta T_m} \quad (7.130)$$

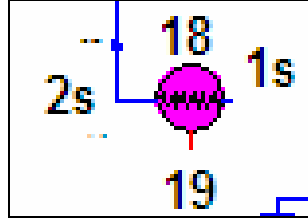
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (7.131)$$

$$\Delta T_m = \frac{210 - 40}{\ln\left(\frac{210}{40}\right)} = 103 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Ao = \frac{75333}{65.103}$$

$$L = \frac{A}{\pi do Nt} = \frac{11.25}{\pi(26.10^{-3})52} = 2,6 \text{ m}$$

7.7 Isı Değiştirici-6 (ID-6)



Şekil 7.10 Isı değiştirici (ID-6)

Egzoz:

Kütleli debi:

$$\dot{m} = (95 \text{ kmol / kmoldizel})(26,97 \text{ kg / kmol}) = 2562,15 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{2562,15 \text{ kg}}{205 \text{ kgdizel}} = 12,49 \text{ kg / kgdizel}$$

$$m = (12,49 \text{ kg / kgdizel})(30 \text{ kgdizel / saat})$$

$$m = 374,9 \text{ kg / saat}$$

$$T_g = 140 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\check{c}} = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

Su :

$$h_{1s} = 105 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2s} = 419 \text{ kJ/kg}$$

$$m = (45,3148 \text{ kmol / kmoldizel})(18 \text{ kg / kmol}) = 815 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$m = \frac{815 \text{ kgsu / kmoldizel}}{205 \text{ kgdizel / kmoldizel}} = 4 \text{ kg / kgdizel}$$

$$m = (4 \text{ kg / kgdizel})(30 \text{ kgdizel / saat}) = 120 \text{ kg / saat}$$

$$Q = (120 / 3600 \text{ kg / s})(314 \text{ kJ / kg}) = 10,466 \text{ kW}$$

$$T_g = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_ç = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Çizelge 7.23 Akışkan özellikleri

Akışkan	Egzoz	Su
Debi	375 kg/h	120 kg/h
Ortalama sıcaklık (°C)	100.5	62.5
Yogunluk, kg/m ³	0.870	0,415
Özgül ısı, kJ/kgK	1,994	1,289
Viskozite, kg/ms	$1.94 \cdot 10^{-5}$	$1.04 \cdot 10^{-5}$
Isıl iletkenlik, W/mK	0,030	0.651
Prandtl sayısı, Pr	0,747	3

İlk yaklaşıklık olarak, ısı değıştiricinin toplam ısı geçiş katsayısı

$$U = 150 \text{ W / m}^2\text{K}$$

$$P = \frac{t_{2ç} - t_{2g}}{t_{1g} - t_{2g}} = \frac{100 - 25}{140 - 25} = 0.652$$

$$R = \frac{t_{1g} - t_{1ç}}{t_{2ç} - t_{2g}} = \frac{140 - 61}{100 - 25} = 1.05$$

F=0,88 bulunur.

168

$$\Delta T_m = \frac{(140 - 100) - (61 - 25)}{\ln\left(\frac{40}{36}\right)} = \frac{4}{0.1} = 40^\circ C$$

$$A = \frac{Q}{U_o F \Delta T_m}$$

$$A = \frac{10466}{(150)(0.88)(40)} = 2 \text{ m}^2$$

Isı değiştirici yaklaşık hacmi

$$V_{II} = \frac{A}{\beta} = \frac{2}{895,7} = 2.23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Isı değiştiricisine egzozun girdiği ön yüzündeki hızın yaklaşık

$$V_{\text{ön}} = 10 \text{ m/s}$$

$$A_{\text{ön}} = a.b = \frac{\dot{m}_{\text{egz}}}{\rho_{\text{egz}} \cdot V_{\text{ön}}}$$

$$A_{\text{ön}} = \frac{374.9/3600}{(0,870)(10)} = 0.01 \text{ m}^2 = (0.1 \text{ m})(0.1 \text{ m})$$

$$V_{II} = a.b.c = (0.1 \text{ m})(0.1 \text{ m})(0.2 \text{ m})$$

Seçilen 11.32-737-SR tipi ısı değiştiricinin geometrik ölçüleri, Çizelge 7.24'de verilmiştir.

Çizelge 7.24 Geometrik ölçüler

Egzoz tarafı		Su tarafı	
Kanat hatvesi	11.32 adet/ 0.0254 m	Serbest akış alanı/Ön alan	0.780
Hidrolik çap	$4r_h = 0.003511296$ m		
Kanat kalınlığı	0.0012192 m		
Kanat alanı/ Toplam alan	0.845		

Reynolds sayıları

Egzoz tarafı:

$$A_{fr} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$\sigma a = 0.780$$

$$G = \frac{W}{A_c} = \frac{W(\text{kg} / \text{s})}{A_{fr}(\text{m}^2) \cdot \sigma_a}$$

$$G = \frac{W}{A_c} = \frac{0,104 \text{ kg} / \text{s}}{(0,01 \text{ m}^2)(0.780)} = 13,33 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ s}$$

$$\text{Re} = \frac{4r_h a \cdot G}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{4(0.003511)(13.33)}{1.94 \cdot 10^{-5}} = 9649$$

Su tarafı:

$$A_{fr} = 0.02 \text{ m}^2$$

$$\sigma a = 0.129$$

170

$$G = \frac{W}{A_c} = \frac{W(kg/s)}{A_{fr}(m^2)\sigma_a}$$

$$G = \frac{W}{A_c} = \frac{0.033kg/s}{(0.02m^2)(0.129)} = 12,79 kg/m^2s$$

$$Re = \frac{4r_{ha} \cdot G}{\mu}$$

$$Re = \frac{4(0.00093)(12.79)}{1.04 \cdot 10^{-5}} = 4575$$

Nst ve f nin belirlenmesi

Egzoz tarafı

$$Re = \frac{4(0.003511)(13.33)}{1.94 \cdot 10^{-5}} = 9649 \text{ ve } 11.32-737-SR$$

$$f = 0.020$$

$$Nst \cdot Npr^{2/3} = 0.005$$

$$Nst = \frac{0.005}{0.747^{2/3}} = 0.006$$

Su tarafı

$$Re = \frac{4(0.00093)(12.79)}{1.04 \cdot 10^{-5}} = 4575 \text{ ve } 11.32-737-SR$$

$$Nu=60$$

Film katsayıları

Egzoz tarafı

$$h = Nst.G.cp$$

$$h = (0.006)(13.33)(1994)$$

$$h = 160 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Su tarafı

$$h = \frac{Nu.k}{4r_h}$$

$$h = \frac{(60)(0.651)}{4(0.00093)} = 10500 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Kanatçık etkenliği (Sadece egzoz tarafı)

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}}$$

$$m = \sqrt{\frac{2(160)}{(173)(1.10^{-4})}} = \sqrt{18497} = 136 \text{ m}^{-1}$$

$$m.l = 136(5.7.10^{-3}) = 0.775$$

$$\eta_f = 0.85$$

Toplam Yüzey Etkenliği (Sadece egzoz tarafı)

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A}(1 - \eta_f)$$

$$\eta_o = 1 - (0.845)(1 - 0.85) = 0.873$$

Toplam Isı Transfer Katsayısı

$$\frac{1}{U_{egz}} = \frac{1}{\eta_o h_{egz}} + \frac{1}{(\alpha_{su} / \alpha_{egz}) h_{su}}$$

$$\frac{1}{U_{egz}} = \frac{1}{(0.873)(160)} + \frac{1}{(139.6/895.7)(10500)}$$

$$\frac{1}{U_{egz}} = 7,15 \cdot 10^{-3} + 6,11 \cdot 10^{-4} = 7,76 \cdot 10^{-3}$$

$$U_{egz} = 128,84 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Basınç kayıpları

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{G^2}{2g_c} \frac{v_1}{P_1} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A}{A_c} \frac{v_m}{v_1} - (1 - \sigma^2 - K_e) \frac{v_2}{v_1} \right]$$

Giriş ve çıkış kayıp katsayıları yaklaşık olarak;

$$\text{Hava için } \sigma_{hava} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

$$\text{Gaz için } \sigma_{gaz} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

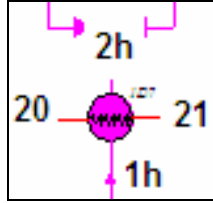
$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{hava} = 1,648$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{gaz} = 1,190$$

Hava tarafı

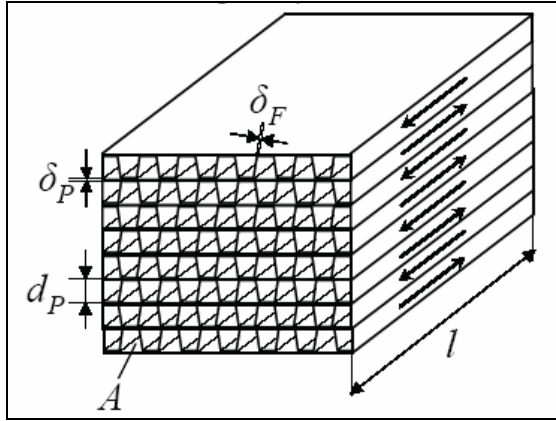
$$\frac{\Delta P}{P_1} = 1,4 \cdot 10^{-4}$$

7.8 Isı Değiştirici-7 (ID-7)



Şekil 7.11 Isı değiştirici (ID-7)

Ototerml reformer ve yakıt piline sevk edilen hava, egzoz gazı ile ısıtılacaktır.



Şekil 7.12 Kompakt ısı değiştirici (ID-7)

Yüzey geometrisi 11.1 (Kays 1984) uygulanmıştır. Isı değiştirici adyabatiktir. Isı transferi, taşınım ve iletimle gerçekleşmektedir. Işınım, ihmal edilmiştir. Yüzey karakteristikleri, Çizelge 7.25’te verilmiştir.

Çizelge 7.25 Yüzey karakteristikleri

	Hava ve Gaz tarafı
Yüzey tanımı	11.1
Levha aralığı	0,00635 m
Hidrolik yarıçap	0,000771 m
Kanat kalınlığı	0.000152 m
Transfer alanı/levhalar arası hacim	1204 m ⁻¹
Kanat alanı/Toplam alan	0,756

Hava tarafı

Giriş sıcaklığı= 25 °C

Çıkış sıcaklığı=700 °C

Kütleli debi:

$$\dot{m} = \frac{208,566 \text{ kmol}}{\text{kmoldizel}} \cdot \frac{28,85 \text{ kg}}{\text{kmol}} = 6017,12 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{6017,12 \text{ kg / kmoldizel}}{205 \text{ kgdizel / kmoldizel}} = 29,35 \text{ kg / kgdizel}$$

$$\dot{m} = \frac{29,35 \text{ kg}}{\text{kgdizel}} \cdot \frac{30 \text{ kgdizel}}{\text{saat}} = 880,5 \text{ kg / saat}$$

Havanın özellikleri:

$$T_b = \frac{25 + 700}{2} = 362,5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

Egzoz gazı:

Giriş sıcaklığı= 861 °C

Çıkış sıcaklığı= 50 °C

Kütleli debi:

$$\dot{m} = \frac{158,972 \text{ kmol}}{\text{kmoldizel}} \cdot \frac{26,97 \text{ kg}}{\text{kmol}} = 4287,47 \text{ kg / kmoldizel}$$

$$\dot{m} = \frac{4287,47 \text{ kg}}{205 \text{ kgdizel / kmoldizel}} = 20,91 \text{ kg / kgdizel}$$

$$\dot{m} = \frac{20,91 \text{ kg}}{\text{kgdizel}} \cdot \frac{30 \text{ kgdizel}}{\text{saat}} = 627,4 \text{ kg / saat}$$

Egzoz gazının özellikleri:

$$T_b = \frac{861 + 50}{2} = 455,5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 'de alınabilir.}$$

$$h_{1h} = 8671 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{2h} = 29503 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta h = 20832 \text{ kJ / kmol}$$

$$Q = \frac{(20832 \text{ kJ / kmol})(880,5 \text{ kg / saat})}{(28,85 \text{ kg / kmol})(3600 \text{ s / saat})} = 176,6 \text{ kW}$$

$$\Delta T_m = \frac{(861 - 700) - (50 - 25)}{\ln \frac{(861 - 700)}{(50 - 25)}} = 73,11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ön tahmin:

Toplam ısı transfer katsayısı $U = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$

Isı değiştiricinin yaklaşık alanı

176

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m}$$

$$A = \frac{176,6 \cdot 10^3 \text{ W}}{(100 \text{ W / m}^2 \text{ K})(73,11 \text{ }^\circ\text{C})} = 24,15 \text{ m}^2$$

Isı değiştiricinin yaklaşık hacmi

$$V = \frac{A}{\beta} = \frac{24,15 \text{ m}^2}{1204 \text{ m}^{-1}} = 0,02 \text{ m}^3$$

Isı değiştiricisine havanın girdiği ön yüzündeki hızın yaklaşık

V=10 m/s seçilmesi halinde

$$A_{\text{ön}} = a \cdot b = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot V}$$

$$A_{\text{ön}} = \frac{880,5 / 3600}{(0,59)(10)} = 0,04 \text{ m}^2$$

Bu durumda ısı değiştiricinin boyutları

$$V = a \cdot b \cdot c = (0,2)(0,2)(0,5) = 0,02 \text{ m}^3$$

Isı Transferi ve Serbest Akış Alanları

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{V_{\text{toplama}}} = \frac{b_1 \beta_1}{b_1 + b_2 + 2a}$$

Hava Tarafı:

$$\alpha_1 = \frac{(0,00635)(1204)}{(0,00635) + (0,00635) + 2(0,0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Gaz Tarafı:

$$\alpha_1 = \frac{(0,00635)(1204)}{(0,00635) + (0,00635) + 2(0,0003)} = 574,84 \text{ m}^{-1}$$

Her taraftaki toplam ısı transfer alanı

$$A = \alpha.V$$

$$A_{hava} = (574,84 \text{ m}^{-1})(0,02 \text{ m}^3) = 11,5 \text{ m}^2$$

$$A_{gaz} = (574,84 \text{ m}^{-1})(0,02 \text{ m}^3) = 11,5 \text{ m}^2$$

Serbest akış alanının ön alana oranı:

$$\sigma = \frac{A_c}{A_{fr}} = \alpha.r_h$$

$$\sigma_{hava} = (574,84)(0,000771) = 0,443$$

$$\sigma_{gaz} = (574,84)(0,000771) = 0,443$$

Serbest akış alanları:

$$A_c = \sigma.A_{fr}$$

$$A_{c\ hava} = (0,443)(0,04) = 0,0177 \text{ m}^2$$

$$A_{c\ gaz} = (0,443)(0,04) = 0,0177 \text{ m}^2$$

Çizelge 7.26 Akışkan özellikleri

Akışkan	Hava tarafı	Egzoz tarafı
Ortalama sıcaklık (°C)	362,5	455,5
Yogunluk, kg/m ³	0,59	0,465
Özgül ısı, kJ/kgK	1,067	1,320
Viskozite, kg/ms	3,136.10 ⁻⁵	3,234.10 ⁻⁵
Isıl iletkenlik, W/mK	0,047	0,053
Prandtl sayısı, Pr	0,711	0,805

Reynolds sayıları:

Hava tarafı:

$$G_{hava} = \frac{W_{hava}}{A_{chava}}$$

$$G_{hava} = \frac{880,5/3600}{0,0177} = 13,81 \text{ kg / m}^2\text{s}$$

$$Re_{hava} = \frac{4r_{hhava} \cdot G_{hava}}{\mu_{hava}}$$

$$Re_{hava} = \frac{4(0,000771)(13,81)}{3,136.10^{-5}} = 1358$$

Gaz tarafı:

$$G_{gaz} = \frac{W_{gaz}}{A_{cgaz}}$$

$$G_{gaz} = \frac{627,4/3600}{0,0177} = 9,84 \text{ kg / m}^2\text{s}$$

$$\text{Re}_{gaz} = \frac{4r_{hgaz} \cdot G_{gaz}}{\mu_{gaz}}$$

$$\text{Re}_{gaz} = \frac{4(0,000771)(9,84)}{3,234 \cdot 10^{-5}} = 938$$

$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3}$ ve f 'nin belirlenmesi

Hava tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0,0045$$

$$f = 0,0155$$

$$N_{st} = \frac{0,0045}{0,711^{2/3}} = 0,00564$$

Gaz Tarafı

$$N_{st} \cdot N_{pr}^{2/3} = 0,0055$$

$$f = 0,020$$

$$N_{st} = \frac{0,0055}{0,805^{2/3}} = 0,00635$$

Film Isı transfer katsayıları

Hava tarafı

$$h_{hava} = N_{st} \cdot G \cdot c_p$$

$$h_{hava} = (0,00564)(13,81)(1067) = 83,1 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

180

Gaz tarafı

$$h_{gaz} = N_{st} \cdot G \cdot c_p$$

$$h_{gaz} = (0,00635)(9,84)(1320) = 82,4 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Kanat etkenliği

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{k \cdot \delta}}$$

Hava tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot (83,1)}{(15,7) \cdot (0,000152)}} = 263,9 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0,00635}{2} = 0,003175$$

$$m \cdot l = 0,837$$

$$\eta_{fhava} = 0,83$$

Gaz tarafı:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot (82,4)}{(15,7) \cdot (0,000152)}} = 262,7 \text{ m}^{-1}$$

$$l \approx \frac{b}{2} = \frac{0,00635}{2} = 0,003175$$

$$m \cdot l = 0,834$$

$$\eta_{fgaz} = 0,83$$

Yüzey Etkenliği

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f)$$

Hava tarafı:

$$\eta_{ohava} = 1 - (0,756)(1 - 0,83) = 0,871$$

Gaz tarafı:

$$\eta_{ogaz} = 1 - (0,756)(1 - 0,83) = 0,871$$

Toplam ısı transfer katsayısı

$$U = 36,1 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Basınç kayıpları

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{G^2}{2g_c} \frac{v_1}{P_1} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A}{A_c} \frac{v_m}{v_1} - (1 - \sigma^2 - K_e) \frac{v_2}{v_1} \right]$$

Giriş ve çıkış kayıp katsayıları yaklaşık olarak;

$$\text{Hava için } \sigma_{hava} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

$$\text{Gaz için } \sigma_{gaz} = 0,443, K_c = 1,1, K_e = 0$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{hava} = 1,648$$

$$\left(\frac{A}{A_c} \right) = \left(\frac{L}{r_h} \right)_{gaz} = 1,190$$

Hava tarafı

$$\frac{\Delta P}{P_1} = 1.10^{-3} = \% 0,1$$

8. KİNETİK MODELLEMeye DAYALI REAKTÖR TASARIMI

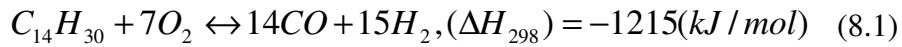
Ototermal yakıt dönüştürücüde dizel yakıtın kinetik modellemesi için referans yakıt olarak n-tetradecane ($C_{14}H_{30}$) kullanılmıştır. Tetradecane, ağır hidrokarbona sahip oluşu ve mol ağırlığının NATO F-76 dizel yakıtta çok yakın olması nedeni ile dizel yakıtta referans olarak kullanılmak üzere iyi bir seçimdir.

Çizelge 8.1 Lojistik yakıt özellikleri

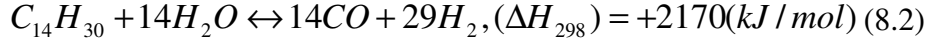
Yakıt	Molekül Formülü	Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	Alt ısııl değer, (kJ/kg)	Kaynama noktası ($^{\circ}C$)
NATO F-76 Dizel	$C_{14.8}H_{26.9}$ (ortalama)	205	42700	İKN=165 SKN=367
n-Tetradecane (n- C_{14})	$C_{14}H_{30}$	198,394	44024	253,55

Ototermal dönüşüm, kısmi oksidasyon ve buharlı dönüştürücünün bir kombinasyonudur. Hidrojen üretimi için yakıtın, oksijen ve su buharı ile reaksiyonudur. Genel reaksiyonlar, aşağıda gösterilmiştir (Dorazio and Castaldi, 2008).

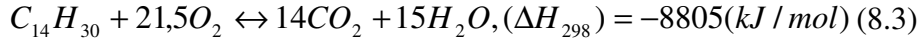
Kısmi Oksidasyon reaksiyonu:



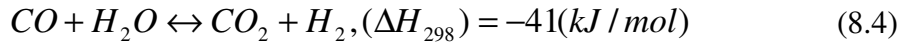
Buharlı yakıt dönüşüm reaksiyonu:



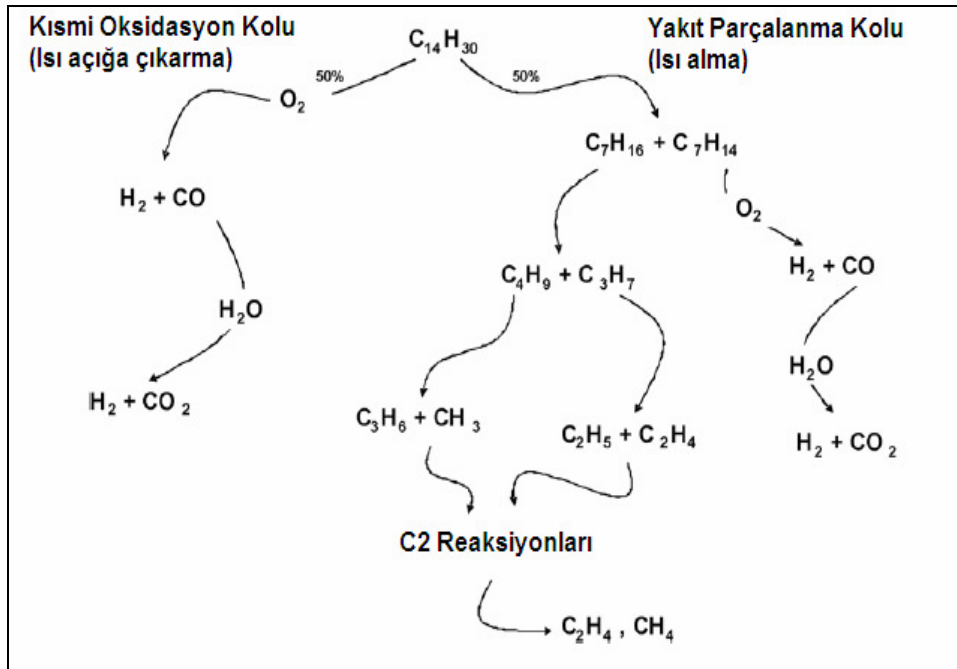
Yakıt oksidasyonu reaksiyonu



Su-gaz dönüşüm reaksiyonu



Ototerml yakıt dönüşüm prosesinde reaksiyonların sırası Şekil 8.1'de gösterilmiştir (Dorazio and Castaldi, 2008).



Şekil 8.1 Ototerml yakıt dönüşüm prosesinde ana reaksiyon yolları

8.1 Kuramsal Temeller

Bir kimyasal tepkimeye eşlik eden enerji değişimi ve tepkimenin denge konumu termodinamiğin konuları arasında incelenir. Ancak termodinamik, tepkime hızları hakkında bir şey söylemez. Başlangıçtan denge konumuna ulaşılanaya dek geçen süre içinde bir kimyasal tepkimenin; hızını, bu hızın hangi niceliklerle nasıl değiştiğini ve mekanizmasının yolu kimyasal kinetik inceler. Bu incelemeler, fiziksel ve kimyasal yöntemlerin birlikte uygulanmasıyla yapıldığından kimyasal kinetik, fizikokimyanın bir dalı kabul edilir. Bir tepkimenin nereye gittiği kimyasal termodinamik, hangi hızla oraya gittiği ise kimyasal kinetik içinde incelenir.

Yapılan araştırmalar, bazı tepkimelerin bir basamak, bazılarının ise iki ya da daha çok basamak üzerinden yürüdüğünü ortaya çıkarmıştır. Bir basamaklı olanlara basit tepkime veya elementary tepkime, çok basamaklı olanlara ise basamaklı tepkime, kompleks tepkime veya nonelementary tepkime adı verilir.

Basit tepkimeler bir yönlü ya da iki yönlü olabildiği gibi karmaşık tepkimelerin basamakları da tek veya iki yönlü olabilmektedir. Bir yönlü olan tepkimeye tersinmez, iki yönlü olanlara ise tersinir tepkime denir. Tersinmez tepkimeler tümüyle tamamlandığı halde tersinir tepkimeler ancak bir denge konumuna ulaşılanaya kadar yürümektedirler.

Gaz ya da sıvı karışımlar gibi tek bir faz içinde yürüyen kimyasal olaylara homojen tepkime, iki ya da daha fazla faz içeren karışımlarda yürüyene ise heterojen tepkime denir. Basit tepkimeler gibi karmaşık tepkimeler de homojen ya da heterojen nitelikte olabilmektedirler.

Bir tepkimenin başlayabilmesi için tepkimeye giren bileşenlerin sahip olmaları gereken en düşük enerjiye aktivasyon (etkinleşme) enerjisi denir. Aktivasyon enerjisi tepkimeye giren maddelerin iç enerjisini yükselterek onları daha aktif hale getirmektedir. Aktivasyon enerjisi verilmedikçe bir tepkime yürümez. Aktivasyon enerjisi ancak bir katalizör kullanılarak düşürülebilir.

Bir tepkimenin sabit sıcaklıkta hızını arttırmak için uygulanan işleme kataliz, bu işlem için kullanılan maddelere katalizör de adı verilir. Katalizörün tepkime karışımı ile aynı fazda olduğu işleme homojen kataliz, ayrı fazda olduğu işleme ise heterojen kataliz denir. Basamak tepkimelerinde yer alabilen bir katalizör toplam tepkimede yer almadığından tepkime sonunda kimyasal bir değişikliğe uğramadan yeniden ortaya çıkmaktadır. Tepkime mekanizmasını değiştirerek hızını yükseltilmesine yol açan katalizörler toplam stokiyometrik tepkimenin termodinamik niceliklerini değiştirmezler. Tersine tepkime hızını düşürme işlemine inhibasyon, bu işlem için kullanılan maddelere ise inhibitör denir. Kimya endüstrisinde, tepkimelerin yaklaşık % 90'ı katalizör varlığında gerçekleştirilir. Tepkimenin gerçekleştiği tanka reaktör adı verilir. Kimyasal reaktör tasarımında büyük ölçüde kimyasal termodinamik ve kimyasal kinetikten yararlanır.

8.2 Kinetik Parametreler

j adet reaksiyon ve i adet madde içeren genel reaksiyon denklemi ve reaksiyon hızı;



$$r_j = -k_j^f \prod_{i \in \text{reaktant}} c_i^{v_{ij}^f} + k_j^r \prod_{i \in \text{ürün}} c_i^{v_{ij}^p} \quad (8.6)$$

Burada;

k_j^f , ileri, k_j^r ise geri hız sabitlerini,

c_i , i maddesinin konsantrasyonunu,

v_{ij}^r , reaktant, v_{ij}^p ürün konsantrasyonlarını ifade eder.

k, reaksiyon hız sabiti olup modifiye edilmiş Arrhenius bağıntısı ile verilmektedir.

$$k = A.T^n \exp\left(-\frac{E}{R_g.T}\right) \quad (8.7)$$

Burada;

k, reaksiyon hız sabiti (s^{-1})

A, frekans faktörü (s^{-1})

E, molar aktivasyon enerjisi (J/mol)

R, gaz sabiti, 8,314 J/molK

T, sıcaklık (K)

T^n , sıcaklık faktörü

n, sıcaklık üssü

8.3 Ototermal Yakıt Dönüşüm Reaksiyonları

Tüm mekanizma, toplam 58 adet reaksiyon ve 30 adet madde içermektedir. Reaktör, parçacıklı alüminyum oksit üzerine desteklenmiş platin katalizör içermektedir. Ototermal yakıt dönüşüm reaksiyonları ve kinetik parametreleri, Çizelge 8.2'de verilmiştir (Dorazio and Castaldi, 2008).

Çizelge 8.2 Tetradecane ototermal yakıt dönüşümü reaksiyon mekanizması

Reaction	A (s ⁻¹)	n	E (J/mol)
$C_{14}H_{30} + 7O_2 \rightleftharpoons 15H_2 + 14CO$	5.0E+46	0.0	0
$C_{14}H_{30} + 21.5O_2 \rightleftharpoons 15H_2O + 14CO_2$	4.9E+15	0.0	0
$C_{14}H_{30} \rightleftharpoons C_7H_{16} + C_7H_{14}$	8.5E+05	0.0	82149.2
$C_{14}H_{30} + 14H_2O \rightleftharpoons 29H_2 + 14CO$	9.6E+56	0.0	2171706
$C_7H_{16} + 7H_2O \rightleftharpoons 15H_2 + 7CO$	3.5E+31	0.0	1107664
$C_7H_{14} + 7H_2O \rightleftharpoons 14H_2 + 7CO$	3.8E+36	0.0	919722.7
$C_2H_4 + 2H_2O \rightleftharpoons 4H_2 + 2CO$	5.0E+09	0.0	210462.1
$C_3H_6 + 3H_2O \rightleftharpoons 6H_2 + 3CO$	3.3E+13	0.0	373738.9
$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons 3H_2 + CO$	7.6E+07	0.0	206266.9
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	1.0E+11	0.0	0
$C_7H_{14} + 3.5O_2 \rightleftharpoons 7H_2 + 7CO$	1.3E+30	0.0	0
$C_7H_{14} + 10.5O_2 \rightleftharpoons 7H_2O + 7CO_2$	9.2E+14	0.0	0
$C_7H_{16} + 3.5O_2 \rightleftharpoons 8H_2 + 7CO$	1.8E+25	0.0	0
$C_7H_{16} + 11O_2 \rightleftharpoons 8H_2O + 7CO_2$	2.4E+09	0.0	0
$C_7H_{16} \Rightarrow C_4H_9 + C_3H_7$	1.0E+40	-4.2	132855.5
$C_7H_{14} + H \Rightarrow C_7H_{13} + H_2$	2.5E+05	0.7	26293.1
$C_7H_{13} \Rightarrow C_4H_7 + C_3H_6$	7.2E+06	0.0	188406
$C_4H_7 \Rightarrow C_2H_4 + C_2H_3$	4.3E+05	0.0	154911.6
$C_4H_9 \rightleftharpoons C_3H_6 + CH_3$	1.4E+09	-0.3	30249.63
$C_4H_9 \rightleftharpoons C_2H_5 + C_2H_4$	1.4E+09	-0.3	29600.68
$C_4H_9 \rightleftharpoons C_4H_8 + H$	5.4E+08	-0.3	159768.3
$C_4H_8 \rightleftharpoons C_2H_3 + C_2H_5$	5.3E+09	-0.2	405156.6
$C_3H_7 \rightleftharpoons CH_3 + C_2H_4$	2.2E+07	-0.1	118905.1
$C_3H_7 \rightleftharpoons H + C_3H_6$	7.9E+07	-0.2	154158
$C_3H_7 + O_2 \rightleftharpoons C_3H_6 + HO_2$	7.5E+05	0.0	12560.4
$CH_3 + H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H$	2.8E+01	0.7	7749.767

$C_2H_5 + H \rightleftharpoons 2CH_3$	8.7E+06	0.0	0
$CH_3 + H_2O \rightleftharpoons CH_4 + OH$	3.1E+05	0.7	0
$CH_3 + C_2H_5 \rightleftharpoons CH_4 + C_2H_4$	4.0E+13	-0.1	0
$CH_3 + H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H$	5.9E+05	0.7	0
$CH_3 + HCO \rightleftharpoons C_2H_4 + O$	2.9E+03	0.3	133014.6
$O + H_2 \rightleftharpoons H + OH$	2.6E+02	0.6	26343.35
$CH_3 + OH \rightleftharpoons CH_4 + O$	2.1E+02	0.5	16412.26
$CH_3 + O \rightleftharpoons CH_2O + H$	1.3E+07	0.0	0
$CH_2O + H_2 \rightleftharpoons CH_3 + OH$	3.9E+07	0.0	318322.4
$CH_2O + OH \rightleftharpoons HCO + H_2O$	7.6E+04	0.3	0
$HCO + OH \rightleftharpoons CO + H_2O$	1.5E+07	0.0	0
$HCO + H \rightleftharpoons CO + H_2$	1.2E+07	0.0	0
$HCO + CH_3 \rightleftharpoons CH_4 + CO$	1.6E+07	0.0	0
$HCO + O \rightleftharpoons CO_2 + H$	7.9E+06	0.0	0
$C_2H_3 + H_2O \rightleftharpoons C_2H_4 + OH$	2.1E+05	0.0	84657.1
$HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$	1.2E+07	0.0	1235.106
$HO_2 + O \rightleftharpoons OH + O_2$	8.2E+06	0.0	0
$CH_3 + HO_2 \rightleftharpoons CH_4 + O_2$	4.4E+09	0.0	0
$H_2 \rightleftharpoons H + H$	1.2E+10	-0.3	418680
$C_2H_4 + H \rightleftharpoons CH + CH_4$	8.3E+11	-0.1	185826.9
$C_2H_4 + OH \rightleftharpoons C_2H_3 + H_2O$	7.9E+10	0.0	19945.92
$C_2H_4 + CH_3 \rightleftharpoons C_3H_6 + H$	2.1E+27	-1.4	105909.3
$C_2H_4 + O_2 \rightleftharpoons C_2H_3 + HO_2$	1.4E+11	0.0	194937.4
$C_2H_4 + H \rightleftharpoons C_2H_3 + H_2$	2.0E-02	1.1	8649.929
$C_2H_4 \rightleftharpoons C_2H_2 + H_2$	7.2E+10	0.0	254557.4
$C_2H_4 + HO_2 \rightleftharpoons C_2H_5 + O_2$	4.5E+24	-1.3	74726.01
$C_2H_4 \rightleftharpoons C_2H_3 + H$	3.0E+12	0.0	358725
$C_2H_4 + OH \rightleftharpoons C_2H_4OH$	6.7E+09	0.0	0
$C_2H_4 + C_2H_3 \rightleftharpoons C_4H_7$	5.8E+08	0.0	23446.08

$C_2H_4 + H_2 \Leftrightarrow 2CH_3$	2.0E+10	0.2	283731.1
$C_2H_4 + H \Leftrightarrow CH_2(S) + CH_3$	4.3E+12	0.0	230575.4
$C_2H_4 + CO \Leftrightarrow CH_2(S) + CH_2CO$	6.7E+12	0.0	353700.9

8.4 Reaktör Koşulları

Reaksiyon entalpisinin ($Q=0$) sıfır olduğu sıcaklık :

$$T = 973,15 \text{ K} = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Basınç} = 101325 \text{ Pa}$$

$$\text{Gaz sabiti} = R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Katı oksitli yakıt pili sisteminde 120 kW elektrik güç çıkışı için giriş ve çıkış maddeleri akış oranları;

$$\Delta G = (5.340.348)(0,5528) = 2.952.171 \text{ kJ / kmoldizel}$$

Ototermal yakıt dönüştürücüye giren gazların molar debileri:

$$\dot{m}_{dizel} = \frac{120 \text{ kW}}{2.952.171 \text{ kJ / kmoldizel}} = 0,146 \text{ kmol / saat} = 146 \text{ mol / saat}$$

$$\dot{m}_{O_2} = (146 \text{ moldizel / saat})(3,80 \text{ mol } O_2 / \text{ moldizel}) = 554 \text{ mol / saat}$$

$$\dot{m}_{N_2} = (146 \text{ moldizel / saat})(14,29 \text{ mol } N_2 / \text{ moldizel}) = 2086 \text{ mol / saat}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = (146 \text{ moldizel / saat})(45,3148 \text{ mol } H_2O / \text{ moldizel}) = 6615 \text{ mol / saat}$$

Kütlesel ve hacimsel debiler:

$$\dot{m}_{dizel} = \frac{(120)(3600 \text{ s/h})}{14400 \text{ kJ/kgdizel}} = 30 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_{dizel} = \frac{30 \text{ kg/h}}{2,46 \text{ kg/m}^3}$$

$$\dot{V}_{dizel} = \frac{30 \text{ kg/saat}}{2,46 \text{ kg/m}^3} = 12,19 \text{ m}^3/\text{saat}$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{0,554 \text{ kmolO}_2}{h} \cdot \frac{32 \text{ kgO}_2}{\text{kmolO}_2} = 17,79 \text{ kgO}_2/h$$

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{17,79 \text{ kg/h}}{0,395 \text{ kg/m}^3} = 45 \text{ m}^3/h$$

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{2,086 \text{ kmolN}_2}{h} \cdot \frac{28 \text{ kgN}_2}{\text{kmolN}_2} = 58,55 \text{ kgN}_2/h$$

$$\dot{V}_{N_2} = \frac{58,55 \text{ kg/h}}{0,345 \text{ kg/m}^3} = 169,71 \text{ m}^3/h$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{6,615 \text{ kmolH}_2O}{h} \cdot \frac{18 \text{ kgH}_2O}{\text{kmolH}_2O} = 119,36 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_{H_2O} = \frac{119,36 \text{ kg/h}}{0,22 \text{ kg/m}^3} = 542,54 \text{ m}^3/h$$

Reaktöre giriş gaz akış oranları Çizelge 8.3'de, çıkış gaz oranları ise Çizelge 8.4'de verilmiştir.

Çizelge 8.3 Giriş gaz akış oranları

BİLEŞEN	kg/h	m ³ /h	m ³ /s	mol/h	mol/s
DİZEL	30	12,29	3,4.10 ⁻³	146	0,040
O ₂	17,79	45	12,5.10 ⁻³	554	0,153
N ₂	58,55	169,71	47,1.10 ⁻³	2086	0,579
H ₂ O	119,36	542,54	150,7.10 ⁻³	6615	1,8375

Çizelge 8.4 ATR çıkış gaz akış oranları

Dönüşen gaz	kmol/kmoldizel	mol/m ³
Hidrojen	26,086	3,85
Karbonmonoksit	4,3922	0,65
Azot	14,290	2,11
Su	31,413	4,64
Karbondioksit	8,5549	1,26

$$\dot{n}_{gaz} = \frac{120 \text{ kW} / 0,6847}{23139 \text{ kJ} / \text{kmol}} = 27,26 \text{ kmol gaz} / \text{h}$$

Hidrojen gazı için:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{\text{h}} \cdot \frac{26,086 \text{ kmol} H_2}{84,736 \text{ kmol gaz}} = 8394 \text{ mol} H_2 / \text{h}$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{8394 \text{ mol} H_2 / \text{h}}{\frac{80,916 \text{ m}^3 \text{ gaz}}{\text{kmol}} \cdot \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{\text{h}}} = 3,80 \text{ mol} H_2 / \text{m}^3 \text{ gaz}$$

CO gazı için:

$$\dot{n}_{CO} = \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h} \cdot \frac{4,3922 \text{ kmol } H_2}{84,736 \text{ kmol gaz}} = 1412 \text{ mol } CO / h$$

$$\dot{m}_{CO} = \frac{1412 \text{ mol } H_2 / h}{\frac{80,916 \text{ m}^3 \text{ gaz}}{\text{kmol}} \cdot \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h}} = 0,64 \text{ mol } CO / \text{m}^3 \text{ gaz}$$

CO₂ için

$$\dot{n}_{CO_2} = \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h} \cdot \frac{8,5549 \text{ kmol } H_2}{84,736 \text{ kmol gaz}} = 2752 \text{ mol } CO_2 / h$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{2752 \text{ mol } CO_2 / h}{\frac{80,916 \text{ m}^3 \text{ gaz}}{\text{kmol}} \cdot \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h}} = 1,24 \text{ mol } CO_2 / \text{m}^3 \text{ gaz}$$

H₂O için

$$\dot{n}_{H_2O} = \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h} \cdot \frac{31,413 \text{ kmol } H_2}{84,736 \text{ kmol gaz}} = 10105 \text{ mol } H_2O / h$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{10105 \text{ mol } H_2O / h}{\frac{80,916 \text{ m}^3 \text{ gaz}}{\text{kmol}} \cdot \frac{27,26 \text{ kmol gaz}}{h}} = 4,58 \text{ mol } H_2O / \text{m}^3 \text{ gaz}$$

Yakıt dönüştürme işleminde bir diğer önemli parametre alan hızıdır (SV). Endüstride yaygın olarak kullanılan iki alan hızı kavramı vardır. Bunlar, saatlik sıvı alan hızı (LHSV) ve saatlik gaz alan hızlarıdır (GHSV).

$$SV = \frac{v_o}{V} \quad (8.8)$$

Burada;

SV, boşluk hızı (h^{-1})

v_o , hacimsel akış debisi (m^3/h)

V, reaktör hacmi (m^3)

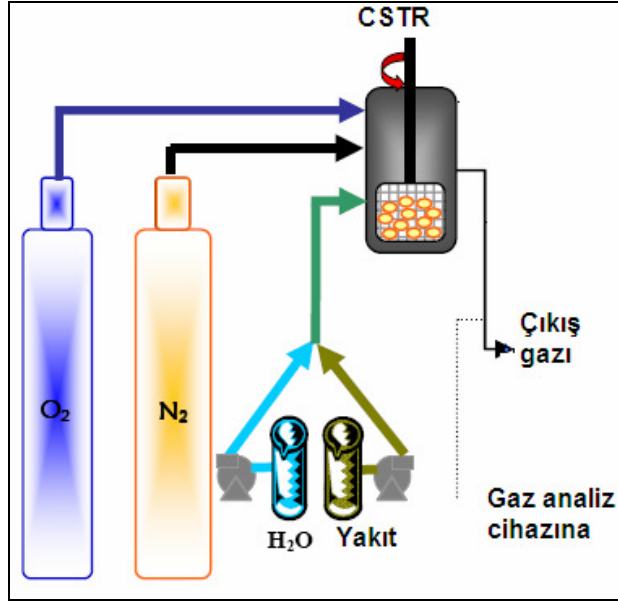
Reaktöre giren toplam hacimsel akış debimiz:

$$v_o = 767,72 \text{ m}^3 / h$$

2 farklı tip reaktör ile karşılaştırma yapılmıştır. Reaktör tipleri; sürekli karıştırmalı tank reaktörü ve boru tipi reaktördür.

8.4.1 Sürekli karıştırmalı tank reaktörü (CSTR)

CSTR, beslenen reaktanların reaktörün her noktasında aynı özelliklere sahip olduğu ve homojen bir dağıldığı ve tepkime verdiği reaktör tipidir.



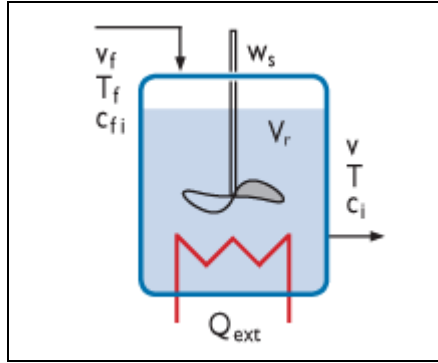
Şekil 8.2 Ototermal dönüşüm sistem şeması

CSTR avantaj ve dezavantajları, Çizelge 8.5'te verilmiştir.

Çizelge 8.5 CSTR avantaj ve dezavantajları

Avantaj	Dezavantaj
Kararlı halde işler ve genellikle oldukça iyi bir karıştırma sağlanır.	Karıştırmanın çok ideal yani tam olmayan sistemlere tam karıştırmalı model uygun değildir
Genel olarak kabın her yerindeki derişim sıcaklık ve tepkime hızında herhangi bir konumsal değişme olmayan reaktörlerdir	Büyük hacimlere sahiptir.

Sürekli karıştırılan tank reaktör yoğun çalkalama gerektiği zaman kullanılır.	Birim hacim başına girdi dönüşümü bakımından akış reaktörleri arasında en düşük olma sakıncasına sahiptir
Ya tek başına ya da bir CSTR bataryasının veya serisinin bir parçası olarak kullanılır.	
İyi bir sıcaklık kontrolü yapmak diğerine göre kolaydır.	
En homojen sıvı fazlı akış reaktörleridir.	



Şekil 8.3 CSTR reaktör

Maddelerin kütleli dengesi :

$$\frac{d(c_i V_r)}{dt} = v_{f,i} c_{f,i} - v c_i + R_i V_r \quad (8.9)$$

Reaktör hacmi sabit olduğundan:

$$\frac{dV_r}{dt} = 0 \quad (8.10)$$

Hacimsel akış debisi:

$$v = \sum v_{f,i} + v_p \quad (8.11)$$

v_p (m^3/s), reaksiyondan dolayı oluşan hacimsel üretim hızını göstermektedir.

$$v_p = \frac{R_g T}{p} \sum_j \sum_i v_{i,j} r_j V_r \quad (8.12)$$

Örneğin; 1 ve 2 numaralı reaksiyonlar için hız ve stoykiyometrik katsayılar sırasıyla,

$$r_1 = \text{kf}_1 (\text{c}_{\text{C}_{14}\text{H}_{30}}) (\text{c}_{\text{O}_2})^7 \quad (8.13)$$

$$r_2 = \text{kf}_2 (\text{c}_{\text{C}_{14}\text{H}_{30}}) (\text{c}_{\text{O}_2})^{21.5} \quad (8.14)$$

$$v_{i1} = (-1) + (-7) + (15) + (14) = 21 \quad (8.15)$$

$$v_{i2} = (-1) + (-21.5) + (15) + (14) = 6.5 \quad (8.16)$$

olmaktadır. İdeal bir gaz için, maddelerin molar hacmi (m^3/mol) bütün maddeler için aynıdır.

$$\frac{M_i}{\rho_i} = \frac{R_g T}{p} \quad (8.17)$$

Denklem, aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$V_r \frac{dc_i}{dt} = v_{f,i} c_{f,i} - \left(\sum v_{f,i} + v_p \right) c_i + R_i V_r \quad (8.18)$$

Örneğin; $C_{14}H_{30}$ ve O_2 için hız ifadeleri sırasıyla,

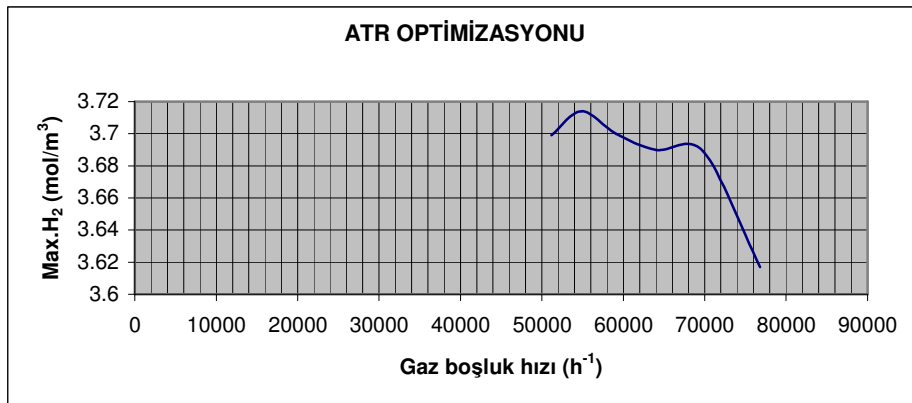
$$R_{C_{14}H_{30}} = -r_1 - r_2 - r_3 - r_4 \quad (8.19)$$

$$\begin{aligned} R_{O_2} = & -7(r_1) - 21.5(r_2) - 3.5(r_{11}) \\ & -10.5(r_{12}) - 3.5(r_{13}) - 11(r_{14}) - r_{25} \\ & + r_{43} + r_{44} - r_{49} + r_{52} \end{aligned} \quad (8.20)$$

olmaktadır.

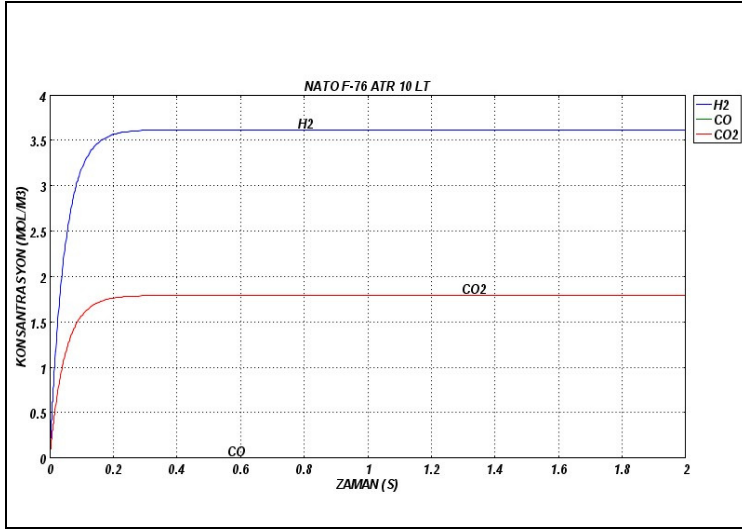
Çizelge 8.6 ATR optimizasyonu

S. No	Reaktör hacmi (litre)	Gaz boşluk hızı, GHSV (h^{-1})	Konsantrasyon, H_2 (mol/m^3)	Reaktörde kalma süresi, t (s)
1	15	51,200	3.699	1.00
2	14	54,857	3.714	0.50
3	13	59,076	3.700	0.45
4	12	64,000	3.690	0.40
5	11	69,818	3.689	0.35
6	10	76,800	3.617	0.30

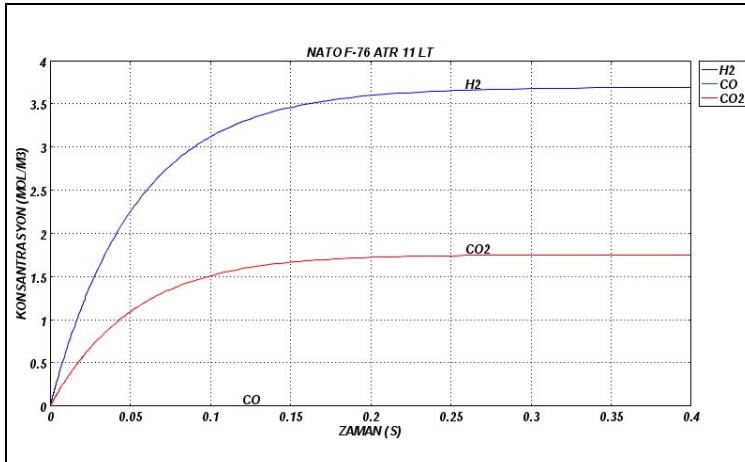


Şekil 8.4 Maksimum H_2 konsantrasyonu- GHSV

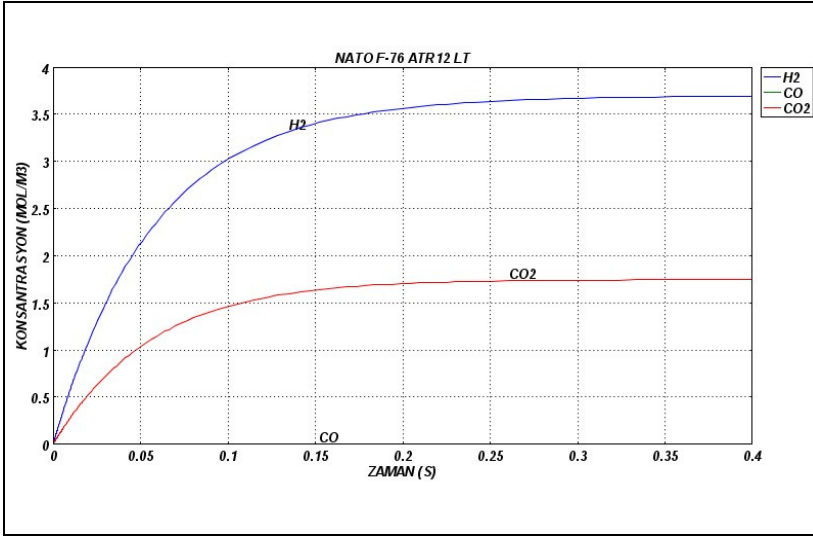
Madde konsantrasyonları için model tarafından üretilen konsantrasyon profili, farklı reaktör hacimleri için şekillerde gösterilmiştir.



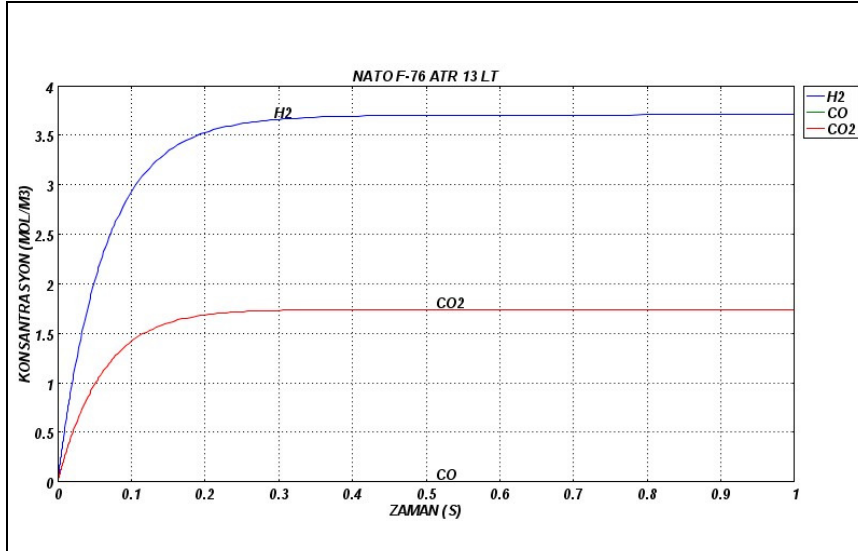
Şekil 8.5 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 10 litre)



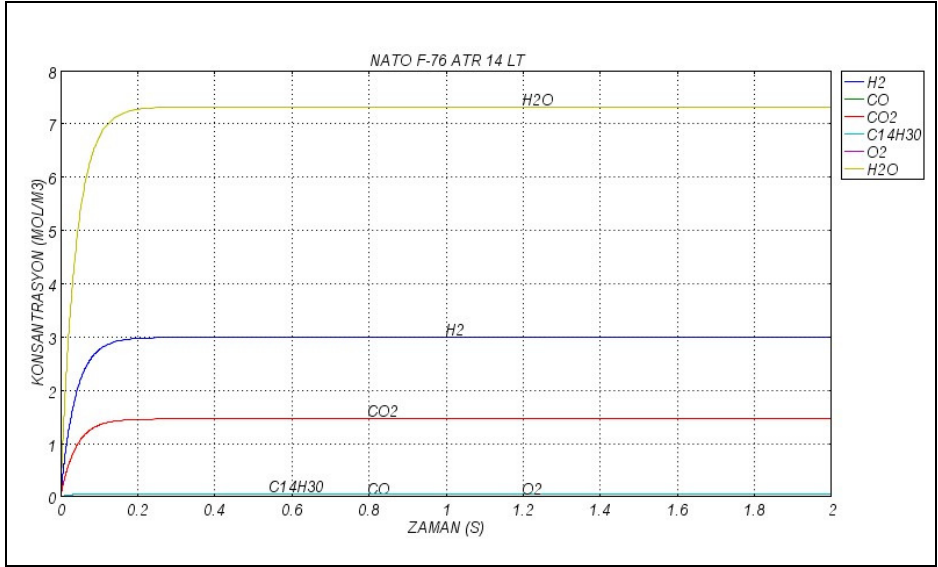
Şekil 8.6 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 11 litre)



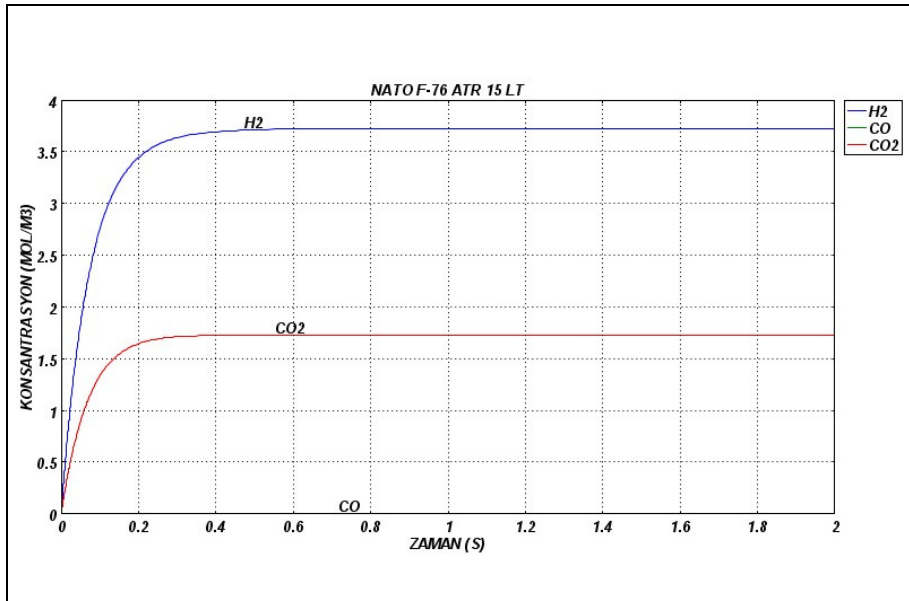
Şekil 8.7 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 12 litre)



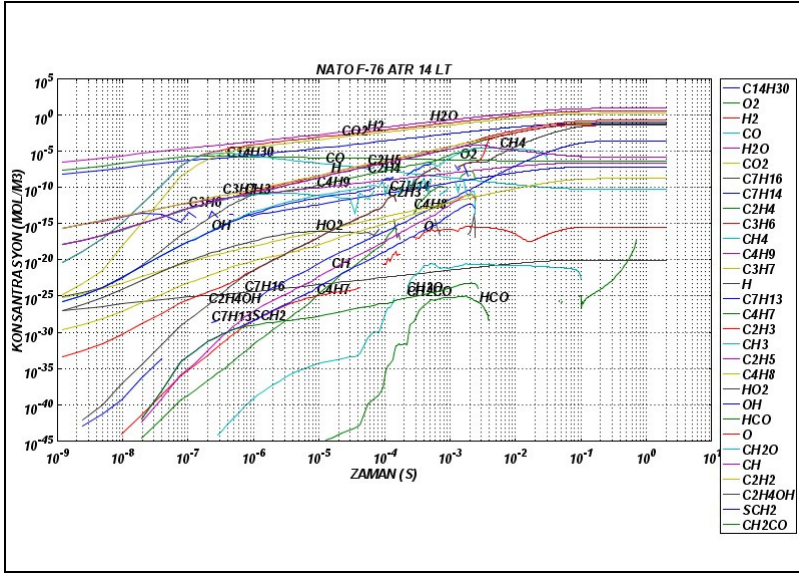
Şekil 8.8 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 13 litre)



Şekil 8.9 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 14 litre)



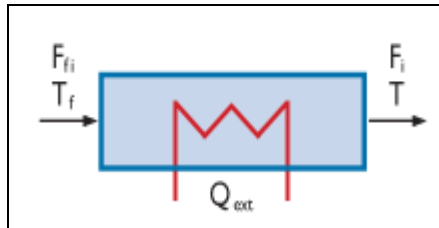
Şekil 8.10 Ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 15 litre)



Şekil 8.11 Tüm ürün konsantrasyonu-zaman eğrisi (reaktör hacmi 14 litre)

8.4.2 Boru tipi reaktör (Piston akışlı reaktör)

Endüstride en çok kullanılan reaktör tipidir. Silindirik şeklinde bir borudan ibarettir (Şekil 8.12). Boru tipi reaktörde; maddelerin konsantrasyonları ve sıcaklığı, konumla değişmektedir.



Şekil 8.12 Boru tipi reaktör

Çizelge 8.7 PFR avantaj ve dezavantajları

Avantaj	Dezavantaj
CSTR gibi kararlı bir halde çalışır.	Reaktör içinde sıcaklık kontrolünün zor olmasıdır.
Bakımı hiçbir parçası hareket etmediği için nispeten kolaydır.	Tepkime ısı veren tepkime olduğu zaman sıcak noktalar olabilir.
Akış reaktörlerinin herhangi birisinin birim reaktör hacmi başına en yüksek dönüşüm oranını sağlar.	

Maddelerin kütle dengesi:

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i \quad (8.21)$$

Burada;

F_i , maddenin mol debisi (mol/s)

V , reaktör hacmi (m^3)

R_i , maddenin hız ifadesi ($mol/m^3.s$)

$$c_i = \frac{F_i}{v} \quad (8.22)$$

v , hacimsel debi (m^3/s)

İdeal gazlar için hacimsel debi:

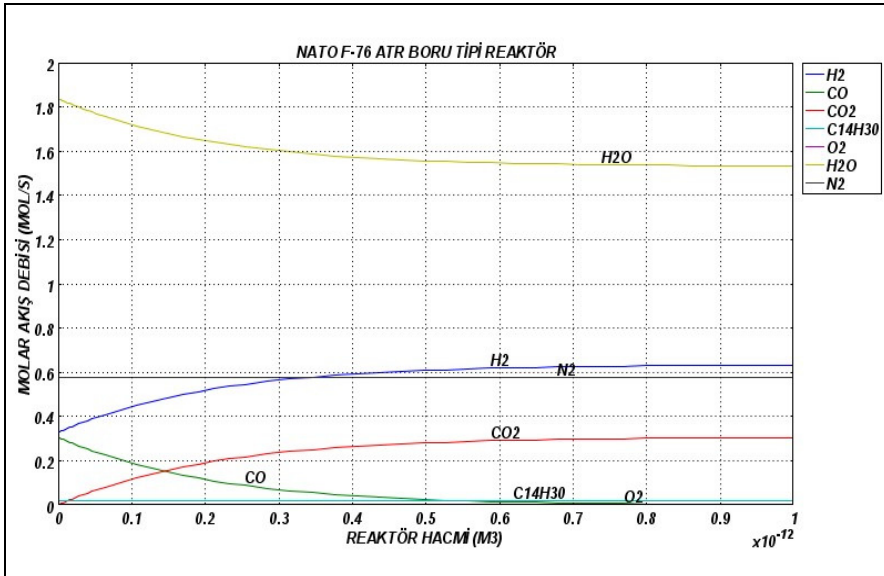
$$v = \frac{R_g T}{p} \sum_i F_i \quad (8.23)$$

$$c_i = \frac{p}{R_g T} \frac{F_i}{\sum_i F_i} \quad (8.24)$$

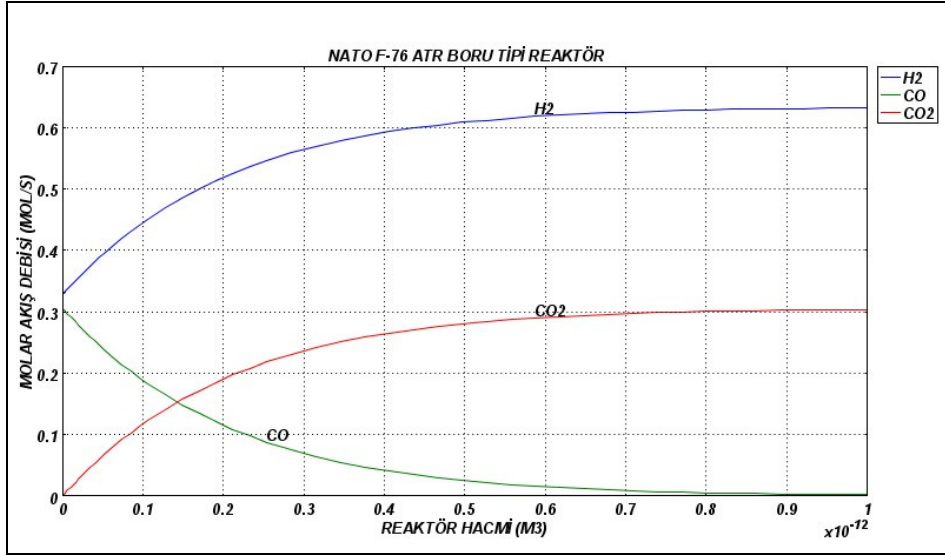
Q_{ext} , reaktöre eklenen veya reaktörden uzaklaştırılan harici ısıyı göstermektedir. Reaktörümüz adyabatik reaktör olduğundan;

$$Q_{ext} = 0$$

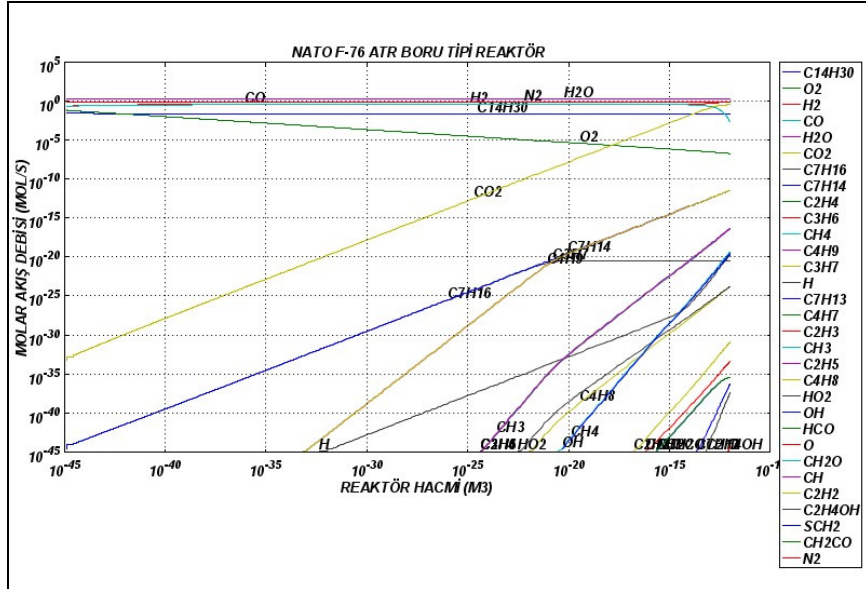
Reaktant gazlar ile ana ürünlerin reaktör hacmine göre molar debileri, Şekil 8.15’de, ana ürünlerin reaktör hacmine göre molar debileri, Şekil 8.16’da, tüm maddelerin reaktör hacmine göre molar debileri, Şekil 8.17’de verilmiştir.



Şekil 8.13 Reaktant akış debisi-reaktör hacmi (log-log)



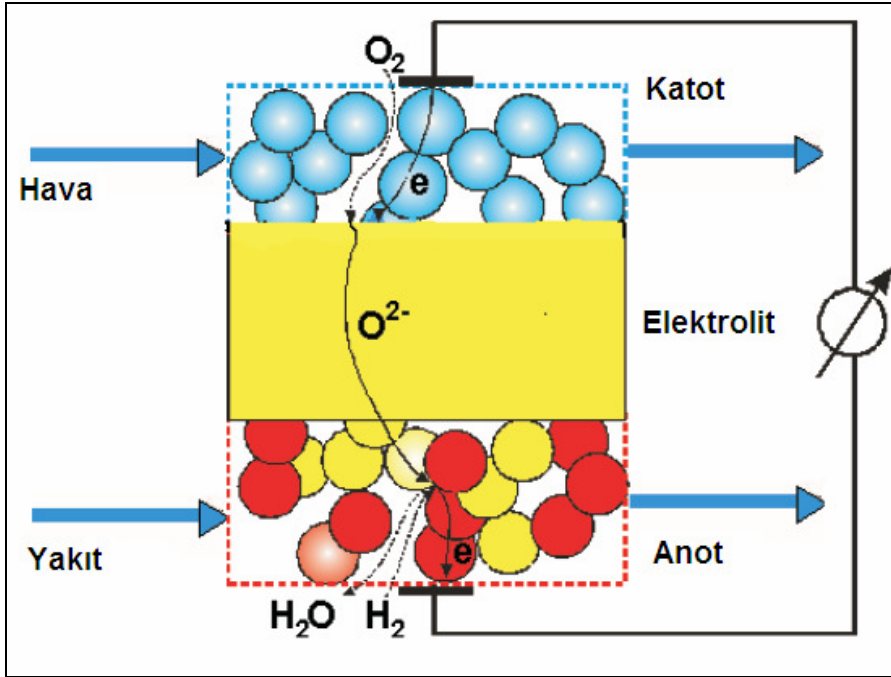
Şekil 8.14 Ana ürün akış debisi-reaktör hacmi



Şekil 8.15 Tüm maddelerin akış debisi-reaktör hacmi (log-log)

9. KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ MULTİFİZİK MODELLEMESİ

Katı oksitli yakıt pili sistemi, gazların momentum ve kütle taşınımı ile elektrotlar, elektrolit ve akım kollektörlerinin elektronik/iyonik yük dengesini kapsayan multifizik olayları içermektedir. Katı oksitli yakıt pilinin temel bileşenleri Şekil 9.1’de gösterilmiştir.



Şekil 9.1 Katı oksitli yakıt pili hücresi

Katı oksitli yakıt pilinde medyana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar:

Anot reaksiyonları:



Katot reaksiyonu:



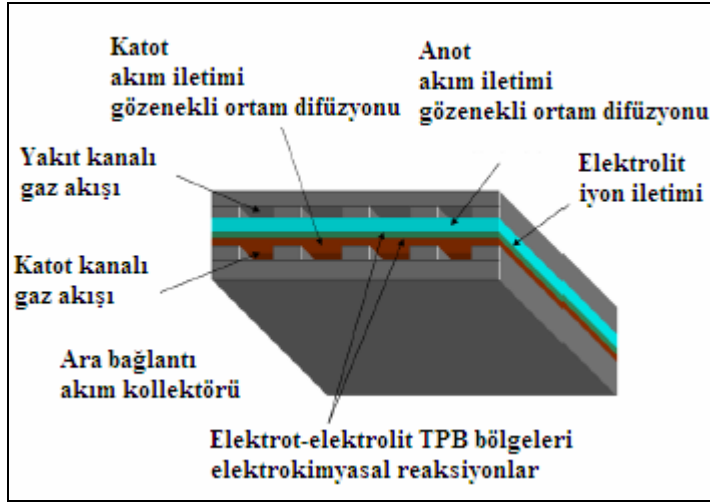
Toplam hücre reaksiyonları:



Ancak, karbonmonoksitin katı oksitli yakıt pili anodu üzerinde doğrudan oksidasyonu, hidrojen oksidasyonundan oldukça yavaştır (2- 5 kat). Bu nedenle, karbonmonoksitin üçlü faz bölgesinde doğrudan oksidasyona girmediği fakat toplam reaksiyona katkıda bulunduğu kabul edilmiştir (P. Holtappels,1999). Modelimiz aşağıdaki prosesleri kapsayacaktır.

- Elektronik yük dengesi (Ohm kanunu)
- İyonik yük dengesi (Ohm kanunu)
- Butler-Volmer yük transfer kinetiği
- Gaz kanallarında akış dağılımı (Navier-Stokes)

- Gözenekli elektrotlarda akış (Brinkman denklemleri)
- Gaz kanallarında ve gözenekli elektrotlarda gaz fazında kütle dengesi (Maxwell-Stefan Difüzyon ve Taşınım)



Şekil 9.2 Katı oksitli yakıt pili prensipleri, fonksiyonları

9.1 Yük Dengesi

Artı ve eksi yük taşıyan elektronların veya iyonların yönlendirilmiş hareketleri bir elektrik akımı doğurur. Yük taşıyan parçacıklar iyonlar ise iyon iletkenliği, elektronlar ise elektron iletkenliği söz konusudur. Akım kolektörlerinde yük dengesi, akım yoğunluğu korunumu ile belirtilir.

$$i = -F \sum z_i N_i \quad (9.6)$$

Burada;

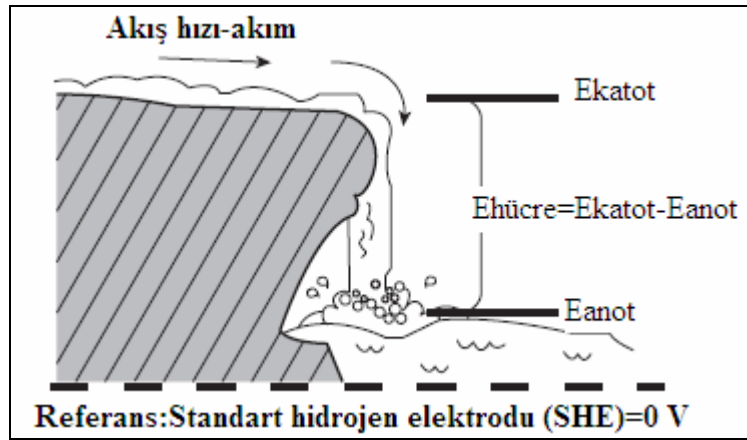
i , akım yoğunluğu vektörü (A/m^2)

F , Faraday sabiti

z_i , iyonun yük sayısı (H^+ için $z=1$, O^{2-} için $z=-2$)

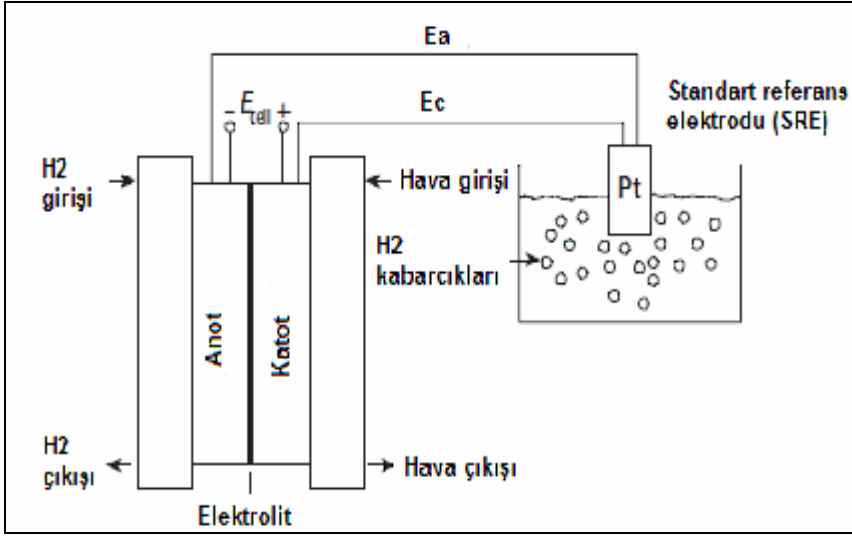
N_i , elektrolitteki iyonun molar transfer hızı

Akım yoğunluğu korunumu; $\nabla \cdot i = 0$ ile ifade edilir. İdeal voltaj potansiyeli için şelale benzeşimi, Şekil 9.3'de gösterilmiştir.



Şekil 9.3 Voltaj potansiyeli için şelale benzeşimi

Beklenen hücre voltajlarının nasıl hesaplanacağı bilinmiyorsa reaksiyon için akım ve potansiyel konseptlerini göstermek için şelale analogisi kullanılır. Fakat, maksimum beklenen denge hücre voltajının nasıl hesaplanacağı biliniyorsa çalışma noktası olarak Nernst voltajını kullanabiliriz. Akım çekildikçe omik, aktivasyon ve kütle transfer kayıpları olacaktır. Şekil 9.4, şelale ve yakıt pili arasındaki bağlantıyı göstermek için kullanılmıştır.



Şekil 9.4 Hücre ve elektrot voltajı ölçümü

Gözenekli anot yapısı, Şekil 9.5’de gösterilmiştir.

Heterojen reaksiyonlar için yeterli miktarda katalitik aktif yüzey alanına ihtiyaç duyulur. Spesifik yüzey alanı (alan/hacim), Costamagna et al. tarafından verilmektedir.

$$S_a = \pi \cdot \sin^2 \theta \cdot r_{el}^2 \cdot n_t \cdot n_{el} \cdot n_{io} \cdot \frac{Z_{el} Z_{io}}{Z} \cdot p_{el} p_{io} \quad (9.7)$$

Burada;

θ , elektron ve iyon ileten parçacık arasındaki temas açısı

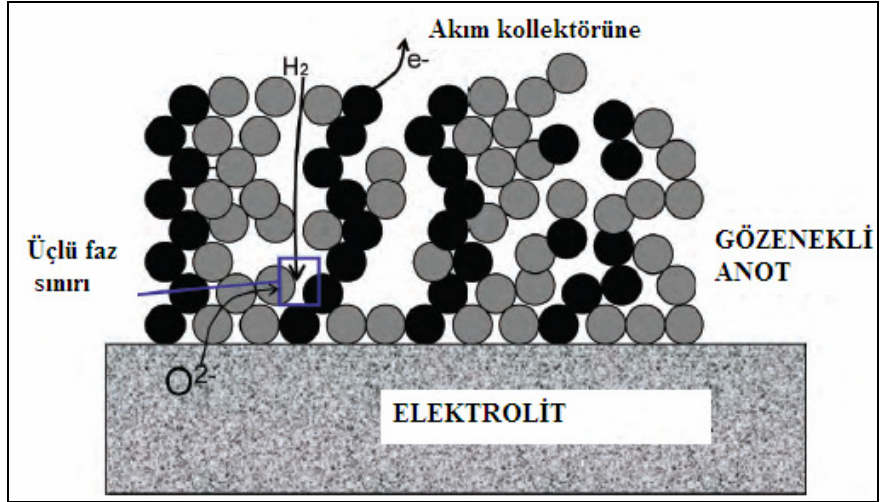
r_{el} , elektron ileten parçacığın yarıçapı

n_t , birim hacimdeki toplam parçacık sayısı

Z_{el} ve Z_{io} , elektron ve iyon ileten parçacıkların koordinasyon sayıları

Z , her parçacığın ortalama temas sayısı

p_{el} ve p_o , elektron ve iyon ileten parçacıkların olasılığı



Şekil 9.5 Gözenekli anot yapısı

Reaksiyon bölgesindeki birim hacimdeki partiküllerin toplam sayısı;

$$n_t = \frac{1 - \varepsilon}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_{el}^3 \left[n_{el} + (1 - n_{el}) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^3 \right]} \quad (9.8)$$

Reaksiyon bölgesindeki elektron ileten partiküllerin sayısının oranı;

$$n_{el} = \frac{\Phi}{\Phi + \frac{(1 - \Phi)}{\left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^3}} \quad (9.9)$$

Reaksiyon bölgesindeki elektron ve iyon ileten parçacıkların koordinasyon sayıları;

$$Z_{el} = 3 + \frac{(Z-3)}{\left[n_{el} + (1-n_{el}) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2 \right]} \quad (9.10)$$

$$Z_{io} = 3 + \frac{(Z-3) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2}{\left[n_{el} + (1-n_{el}) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2 \right]} \quad (9.11)$$

Reaksiyon bölgesindeki elektron ve iyon ileten parçacıkların olasılıkları;

$$p_{el} = \left[1 - (2 - Z_{el-el} / 2)^{2,5} \right]^{0,4} \quad (9.12)$$

$$p_{io} = \left[1 - (2 - Z_{io-io} / 2)^{2,5} \right]^{0,4} \quad (9.13)$$

Burada;

$$Z_{el-el} = \frac{n_{el} Z_{el}^2}{Z} \quad (9.14)$$

$$Z_{io-io} = \frac{n_{io} Z_{io}^2}{Z} \quad (9.15)$$

9.1.1 Elektronik yük dengesi

Elektrik akımının negatif yüklü elektronlar aracılığı ile yapıldığı iletkenlik elektron iletkenliği ve elektrik akımını bu yolla sağlayan malzemeler de elektron iletkenidirler. Elektronik yük dengesi;

akım kolektörlerinde

$$\nabla \cdot (-\sigma_1 \nabla \Phi_{elektronik}) = 0 \quad (9.16)$$

anot ve katotta ise;

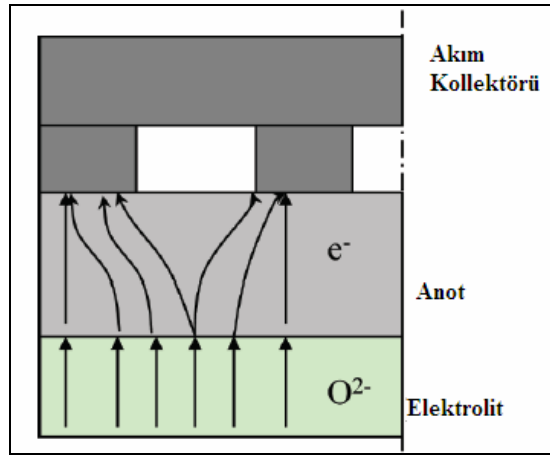
$$\nabla \cdot (-\sigma_1 \nabla \Phi_{elektronik}) = Q_j \quad (9.17)$$

$$Q_j = S_a i_{ict} \quad (9.18)$$

ile verilir.

Katot akım kolektörü ve katot elektrot için elektronik potansiyelin başlangıç değeri:

$$\Phi_{elektronik}(t_0) = \Delta\Phi_{eq,c} - \Delta\Phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (9.19)$$



Şekil 9.6 Düzlemsel yakıt pili akım yolu

9.1.2 İyonik yük dengesi

Elektrik iletkenliğini sağlayan yüklü parçacıklar iyonlar ise bu iletkenliğe iyon iletkenliği denir. İyon sayısına, iyon hareketliliğine yani difüzyon kabiliyetine ve iyonların yük sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak iletkenlik de değişir. Yakıt pilinde akımın sağlanması için elektrolitte iyon taşınımı gereklidir. Çünkü, iyonlar yük taşır.

İyonik yük dengesi;

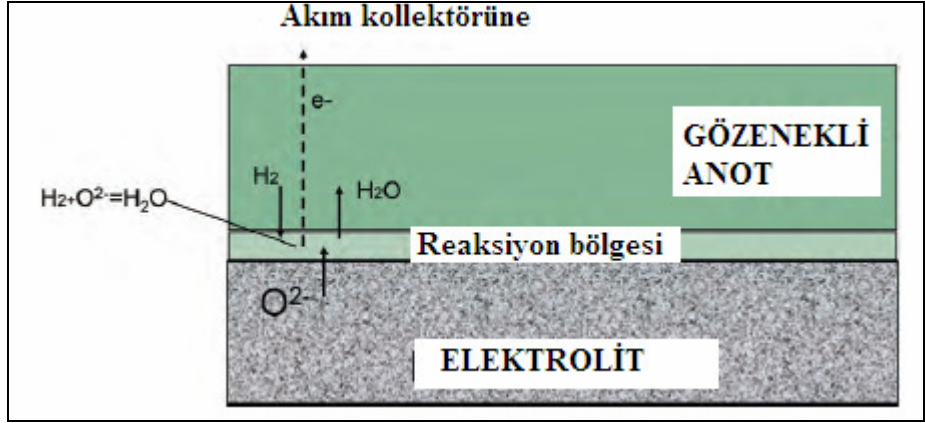
elektrolitte

$$\nabla \cdot (-\sigma_2 \nabla \Phi_{iyonik}) = 0 \quad (9.20)$$

anot ve katodun üçlü faz sınırında ise,

$$\nabla \cdot (-\sigma_2 \nabla \Phi_{iyonik}) = Q_j \quad (9.21)$$

$$Q_j = S_a i_{ict} \quad (9.22)$$



Şekil 9.7 Anot ve reaksiyon bölgesi

9.1.3 Butler-Volmer yük transfer kinetiği

Aktivasyon aşırı potansiyeli ile katalizör tabakalarının birim hacimdeki transfer akımı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için, Butler-Volmer denklemi (Thinh et.all, 2009) kullanılmıştır.

$$i_{ict} = S_a \cdot i_o \left\{ \exp\left(\frac{n \cdot F \cdot \eta}{RT}\right) - \exp\left[-(1 - \beta) \frac{nF\eta}{RT}\right] \right\} \quad (9.23)$$

Genellikle; simetri katsayısı $\beta = 0,5$ alınmaktadır.

Anot için;

$$i_{a,ct} = i_{o,a} \cdot x_{h2} \frac{c_t}{c_{h2,ref}} \left[\exp\left(\frac{0,5F}{RT} \eta\right) - \exp\left(\frac{-0,5F}{RT} \eta\right) \right] \quad (9.24)$$

Katot için;

$$i_{c,ct} = i_{o,c} \left[\exp\left(\frac{0,5F}{RT} \eta\right) - x_{o2} \frac{c_t}{c_{o2,ref}} \exp\left(\frac{-0,5F}{RT} \eta\right) \right] \quad (9.25)$$

Değişen akım yoğunluğu, elektrokimyasal prosesin mekanizmasına, malzeme özelliklerine, hücre bileşenlerinin mikroyapısına ve işletme koşullarına (gaz kompozisyonu ve sıcaklık) bağlıdır. Elektrotlar için değişen akım yoğunluğu,

$$i_{o,elektrot} = \frac{R.T}{n.F} . k_{elektrot} \exp\left(-\frac{E_{elektrot}}{R.T}\right) \quad (9.26)$$

elektrot \in { anot, katot }

Aşırı potansiyel, şu şekilde tanımlanır:

$$\eta = \Phi_{elektronik} - \Phi_{iyonik} - \Delta\Phi_{eq} \quad (9.27)$$

Anot için aşırı potansiyel;

$$\eta_a = \Phi_{elektronik} - \Phi_{iyonik} - \Delta\Phi_{eq-a} \quad (9.28)$$

Katod için aşırı potansiyel;

$$\eta_c = \Phi_{elektronik} - \Phi_{iyonik} - \Delta\Phi_{eq-c} \quad (9.29)$$

Anodun giriş sınırında ki potansiyel, referans potansiyel olan sıfıra eşitlenir. Katodun giriş sınırında ise hücre voltajı V_{cell} aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$V_{cell} = \Delta\Phi_{eq,c} - \Delta\Phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (9.30)$$

9.2 Çok Bileşenli Taşınım

9.2.1 Gaz kanallarında ve elektrotlarda taşınım

Modelimizde malzeme taşınımı, Maxwell-Stefan difüzyon ve taşınım denklemleri ile tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_i) + \nabla \cdot (j_i + \rho\omega_i u) = R_i \quad (9.31)$$

Yukarıda belirtilen j_i , difüzyon tahrikli taşınımı ifade etmekte olup, sıcaklığın fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir (Curtiss and Bird, 1999). Bu taşınım, sıcaklık ve difüzyon tahrikli kuvvetin (d_j) bir fonksiyonudur.

$$j_i = \left(-D_i^T \nabla \ln T \right) - \rho_i \sum_{j=1}^n \tilde{D}_{ij} d_j \quad (9.32)$$

(9.32)'yi (9.31)'e uyguladığımızda kütle taşınım denklemi;

$$\frac{\partial \rho\omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho\omega_i u - \rho\omega_i \sum_{j=1}^n \tilde{D}_{ij} \left(\nabla x_j + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right) - D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right) = R_i \quad (9.33)$$

olur. Burada;

x_j ve ∇x_j , kütle oranına (ω_j) bağlı olarak sırasıyla molar oranı ve gradyanını ifade etmektedir.

$$x_j = \frac{\omega_j}{M_j} M \quad (9.34)$$

$$\nabla x_j = \frac{M^2}{M_j} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n \left[\frac{1}{M} + \omega_k \left(\frac{1}{M_k} - \frac{1}{M_j} \right) \right] \nabla \omega_k \quad (9.35)$$

Maxwell-Stefan Diffusion and Convection uygulama modu, n madde için denklemini $(n-1)$ 'e kadar çözmektedir. Sonucu $(n.)$ maddenin kütleli oranı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (9.36)$$

$$\omega_n = 1.0 - \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i \quad (9.37)$$

Kararlı halde kütleli denge,

$$\nabla \cdot \left(w_i \rho u - \rho w_i \sum_{j=1}^k \tilde{D}_{ij} \left(\frac{M}{M_j} \left(\nabla w_j + w_j \frac{\nabla M}{M} \right) + (x_j - w_j) \frac{\nabla p}{p} \right) \right) = R_i \quad (9.38)$$

Fick difüzyon hızı, \tilde{D}_{ij} , Maxwell-Stefan difüzyon hızı D_{ij} (m^2/s) kullanılarak hesaplanır. Örneğin; \tilde{D}_{12} ,

$$\tilde{D}_{12} = \frac{\frac{\omega_1(\omega_2 + \omega_3)}{x_1 D_{23}} + \frac{\omega_2(\omega_1 + \omega_3)}{x_2 D_{13}} - \frac{\omega_3^2}{x_3 D_{12}}}{\frac{x_1}{D_{12} D_{13}} + \frac{x_2}{D_{12} D_{23}} + \frac{x_3}{D_{23} D_{13}}} \quad (9.39)$$

ile ifade edilir.

Maxwell-Stefan difüzyon hızları (m^2/s), kinetik gaz teorisi esas alınarak ampirik denklem ile tanımlanabilir (Wesselingh and Krishna, 2000)

$$D_{ij} = k \frac{T^{1.75}}{p(v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2} \left[\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right]^{1/2} \quad (9.40)$$

Burada;

$$k = 3,16 \cdot 10^{-8} m^2 / s$$

Molar difüzyon hacimleri (Perry and Green ,1997), Çizelge 9.1' de verilmiştir.

Çizelge 9.1 Difüzyon hacimleri

Madde	Difüzyon Hacmi (m^3/mol)
H ₂	$6.12 \cdot 10^{-6}$
N ₂	$18.5 \cdot 10^{-6}$
O ₂	$16.3 \cdot 10^{-6}$
CO	$18.0 \cdot 10^{-6}$
CO ₂	$26.9 \cdot 10^{-6}$
H ₂ O	$13.1 \cdot 10^{-6}$

Katı oksitli yakıt pili işletme sıcaklığının yüksek olmasından dolayı, anodik ve katodik gazlar her zaman kritik koşullardan uzaktır. Bu nedenle ideal gaz kanunu uygulanabilir.

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (9.41)$$

Açık kanallarda reaksiyon kaynak terimi sıfırdır. Ancak, gözenekli elektrotlarda kaynak terimi, elektrokimyasal reaksiyon hızı ile verilir. Kaynak terimi, Faraday kanuna göre yük transfer akım yoğunluğundan hesaplanır.

$$R_i = v_i \frac{i_{ct,i} M_i}{n_i F} \quad (9.42)$$

Burada;

v_i , stoykiyometrik katsayı

n_i , reaksiyondaki elektron sayısı

Gözenekli elektrotlarda efektif difüzyon hızı;

$$D_{i,eff} = D_i \epsilon^a \quad (9.43)$$

Akış yatağı yapısı, tahmin edilmesi zor bir parametre olduğundan yakıt pili çalışmalarında genellikle Bruggeman bağıntısı kullanılır.

$$D_{i,eff} = D_i \epsilon^{1.5} \quad (9.44)$$

Çizelge 9.2 Bağımlı değişkenler

İsim	Tanım
w_1, w_2, \dots, w_n	Kütlesel oranlar

9.3 Gaz Akış Denklemleri

9.3.1 Açık kanallarda gaz akışı

Katı oksitli yakıt pili gaz kanallarında akış, genellikle yavaştır ve değişen karışım yoğunluğu ile karakterize edilir. Yoğunluk değişimleri, genleşme veya sıkışma ile değil kütle değişiminden meydana gelmektedir. Mach sayısı, Ma , büyüklüğüne bağlı olarak farklı etkileri ile, sıkıştırılabilir akış analizinde hakim parametredir.

$$Ma = \frac{|u|}{a} \quad (9.45)$$

Burada; a , akışkana ait (akışkan içindeki) ses hızıdır. $Ma = 0$ ise akış sıkıştırılmaz kabul edilir. Zayıf sıkıştırılabilir Navier-Stokes uygulaması $Ma < 1$ için uygulanmakta olup, $Ma \geq 1$ olan akışlar için kullanılamaz.

Gaz kanallarındaki akış, düşük Mach sayısına sahiptir. Bu nedenle; açık kanallarda zayıf sıkıştırılabilir Navier-Stokes uygulaması, akış yoğunluğunun değiştiği yerde akışı simüle etmek için kullanılmıştır. Açık kanallar için zayıf sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklemi:

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (9.46)$$

Kararlı hal için süreklilik denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (9.47)$$

Momentum denklemi;

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\eta (\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2}{3} \eta - \kappa_{dv} \right) (\nabla \cdot u) I \right) + F \quad (9.48)$$

κ_{dv} , Stokes kabulünden sapmayı ifade etmektedir. Akışkanın, Stokes kabulünden önemli bir sapma göstermediği kabul edilmiştir. Bu nedenle; $\kappa_{dv} = 0$ dır . Ayrıca; hacimsel kuvvet vektörü (F) ihmal edilmiştir.

Kararlı hal için momentum denklemi;

$$\rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot \left[-pI + \eta \left((\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) \right] \quad (9.49)$$

9.3.2 Gözenekli elektrotlarda gaz akışı

Gözenekli ortam, difüzyon hızını engeller. Gözeneklilik, gözenekli bir malzemenin en önemli özelliğidir. Çünkü malzemenin tüm fiziksel özellikleri gözeneklilikten etkilenir. En önemli gözenek yapısı değişkenleri; gözeneklilik, geçirgenlik ve akış yatağı olarak bilinir. Gözeneklilik ve akış yatağı yapısı gözenekli ortama has özelliklerdir. Fakat geçirgenlik, gözenekli ortamın kütle geçiş özelliğini temsil eder.

Gözeneklilik, ε , malzeme içindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı şeklinde tanımlanır ve gözeneklilik sıfıra yakın veya hemen hemen bire yakın bir değer alabilir. Gözenekliliğin tanımı aşağıdaki denklemle açıklanabilir:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_a + V_k} \quad (9.50)$$

Burada; V_a , katı içindeki akışkan veya boşluk hacmi ve V_k , ise yalnızca katı matris hacmini göstermektedir.

Geçirgenlik, gözenekli ortamın akış iletkenliğinin bir ölçüsüdür veya malzeme içinden akışkanın geçme kolaylığının bir ölçüsüdür. Geçirgenlik akışkanın değil gözenekli malzemenin bir özelliğidir. Geçirgenliğin birimi m^2 dir. Jeon (2009), geçirgenliği, K , aşağıdaki şekilde hesaplamıştır.

$$K = \frac{\varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \cdot d_p^2 \quad (9.51)$$

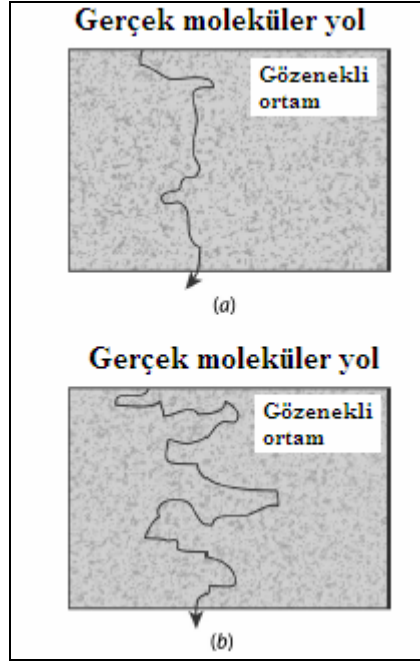
Burada;

ε , gözeneklilik,
 τ , akış yatağı yapısı
 d_p , küresel partikül çapıdır.

Akış yatağı yapısı, fiziksel olarak bir sabite eşit değildir ve gözenekliliğe, boşluklar arasındaki küçük akış kanallarının şekline, tanecik çapına bağlı olarak değişir. Akış yatağı yapısı, τ , tahmin edilmesi zor bir parametredir. Yakıt pili çalışmaları için genellikle Bruggeman bağıntısı kullanılmaktadır. Düşük ve yüksek akış yataklı gözenekli ortam, Şekil 9.7'de verilmiştir (Matthew, 2008).

$$\tau = \varepsilon^{-0.5} \quad (9.52)$$

$$D_{i,eff} = D_i \varepsilon^{1.5} \quad (9.53)$$



Şekil 9.8 (a) Düşük (b) yüksek akış yataklı gözenekli ortam

Gözenekli ortamda akışı modelleyen en eski yasa Henry Darcy tarafından 1856 yılında yapılan deneysel çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Darcy yasasına göre yazılan bağıntının bazı kısıtlamaları vardır. Darcy yasası sıkıştırılmaz ve Newtonian bir akışkan içindir. Ayrıca hız çok yavaştır, Reynold sayısının büyüklük derecesi birden küçüktür ve akış tek yönlüdür. Bağıntı, ampirik bir bağıntıdır ve yüksek akış hızlarında yani Reynold sayısının büyüklük derecesinin biri geçtiği durumlarda artık akışı modelleyemez. Çünkü bağıntı, doğrusal bir denklemdir. Yani akışın doğrusal olmayan etkisini modelleyemez, denklemde viskoz etkiler de yer almaz ve en önemlisi katı sınırlar göz önüne alındığında sınırın sürtünme etkisini görmez. Darcy yasasına göre yazılan denklemde

viskoz difüzyon etkisi görülmemektedir. Bunu gidermek için Brinkman (1947), Darcy bağıntısını aşağıdaki gibi düzenlemiştir:

Gözenekli elektrotlarda akış hızını tanımlayan Brinkman denklemi, süreklilik ve momentum denkleminin bir kombinasyonudur.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \nabla \cdot (\rho u) = Q \quad (9.54)$$

Kararlı halde süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q \quad (9.55)$$

Momentum denklemi:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\eta}{\kappa} + Q \right) u \\ & = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2}{3} \eta - \kappa_{dv} \right) (\nabla \cdot u) I \right\} \right] + F \end{aligned} \quad (9.56)$$

$$\kappa_{dv} = 0$$

$$F = 0$$

ve kararlı halde momentum denklemi:

$$\left(\frac{\eta}{\kappa} + Q \right) u = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{\eta}{\varepsilon} \left(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) \right] \quad (9.57)$$

Kütle kaynak terimi, yük transfer akım yoğunluğuna göre hesaplanmaktadır.

$$Q = \sum_i S_a \frac{i_{ct,i} M_i}{n_i F} \quad (9.58)$$

Anotta hidrojen tüketimi veya su üretiminden dolayı kütle kaynağı;

$$Q_{H_2} = -(S_a - a)(i_{ct}) \frac{M_{H_2}}{2F} \quad (9.59)$$

$$Q_{H_2O} = (S_a - a)(i_{ct}) \frac{M_{H_2O}}{2F} \quad (9.60)$$

Katotta oksijenden dolayı kütle kaynağı;

$$Q_{O_2} = (S_a - c)(i_{ct}) \frac{M_{O_2}}{4F} \quad (9.61)$$

Denklemlerdeki işaret, ürünler için pozitif, reaktantlar için negatiftir.

Çizelge 9.3 Bağımlı değişkenler

İsim	Tanım
u, v, w	x_1, x_2 ve x_3 yönlerindeki hızlar
P	Basınç

9.3.3 Gaz ve gaz karışımlarının viskozitesi

Düşük basınçta gaz viskozitesini hesaplamak için Stiel and Thodos metodu kullanılmıştır (Perry and Green, 1997).

$$\mu_v = 4,60 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot M^{1/2} \cdot P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}} \quad (9.62)$$

Burada;

μ_v , gaz viskozitesi (cP veya mPa.s)

M, mol kütlesi (kg/kmol)

T_c , kritik sıcaklık (K)

P_c , kritik basınç (Pa)

$$N = 0.0003400.T_r^{0.94} \quad (T_r \leq 1.5) \quad (9.63)$$

$$N = 0.0001778(4.58T_r - 1.67)^{0.625} \quad (T_r > 1.5) \quad (9.64)$$

Saf bileşen viskoziteleri [Perry R.H. and Green D.W., 1997]

$$\eta_{O_2} = 1,668.10^{-5} + 3,108.10^{-8}.T[Pa.s] \quad (9.65)$$

$$\eta_{N_2} = 1,435.10^{-5} + 2,642.10^{-8}.T[Pa.s] \quad (9.66)$$

$$\eta_{H_2} = 6,162.10^{-6} + 1,145.10^{-8}.T[Pa.s] \quad (9.67)$$

$$\eta_{H_2O} = 4,567.10^{-6} + 2,209.10^{-8}.T[Pa.s] \quad (9.68)$$

Düşük basınçlarda gaz karışımlarının viskozitesini hesaplamak için Wilke metodu kullanılmıştır.

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (9.69)$$

Burada;

η_m , karışımın viskozitesi

n_1, n_2 , saf bileşen viskoziteleri

y_1, y_2 ; mol oranları

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i / \eta_j)^{1/2} (M_j / M_i)^{1/4}]^2}{[8(1 + M_i / M_j)]^{1/2}} \quad (9.70)$$

ϕ_{ij} için Hering and Zipperer yaklaşımı;

$$\phi_{ji} = \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/2} = \phi_{ji}^{-1} \quad (9.71)$$

ile verilmektedir.

9.4 Model Parametreleri ve Kabuller

Düzlemsel ve karşıt akışlı bir katı oksitli yakıt pili hücresi modellenmiştir. Katı oksitli yakıt pilinin anot tarafında hidrojen, karbonmonoksit, su buharı, karbondioksit ve azot olmak üzere toplam 5 bileşen, katot tarafında ise oksijen ve azot olmak üzere toplam 2 bileşen bulunmaktadır. Hidrojence zengin gaz, soldan girmektedir. Hava ise karşı taraftan, sağdan girmektedir. Yakıt pili anot ve katot giriş mol oranları Çizelge 9.4 ve Çizelge 9.5’de verilmiştir.

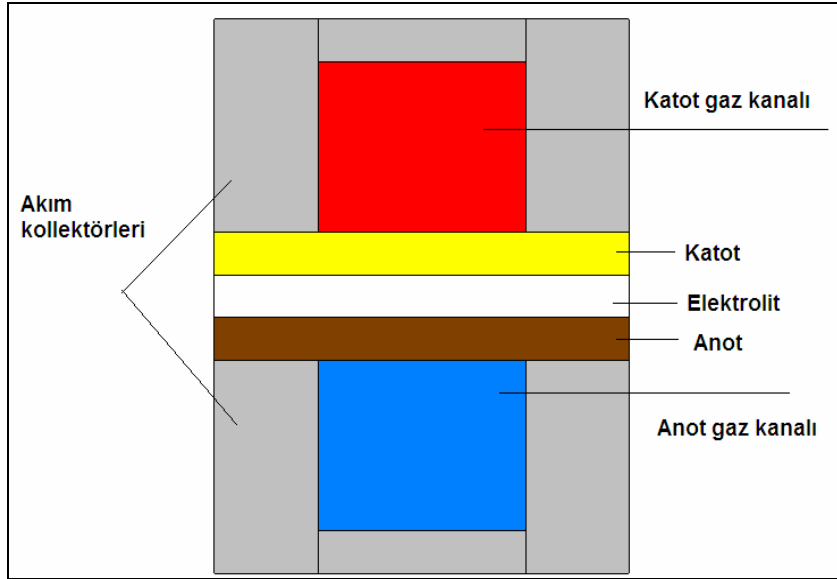
Çizelge 9.4 Yakıt pili anot giriş oranları

Gaz	kmol/kmoldizel	Mol oranı
Hidrojen	26,086	0,30
Karbonmonoksit	4,3922	0,05
Azot	14,290	0,18
Su	31,413	0,37
Karbondioksit	8,5549	0,10

Çizelge 9.5 Yakıt pili katot giriş oranları

Gaz	kmol/kmoldizel	Mol oranı
Oksijen	40	0,21
Azot	150,476	0,79

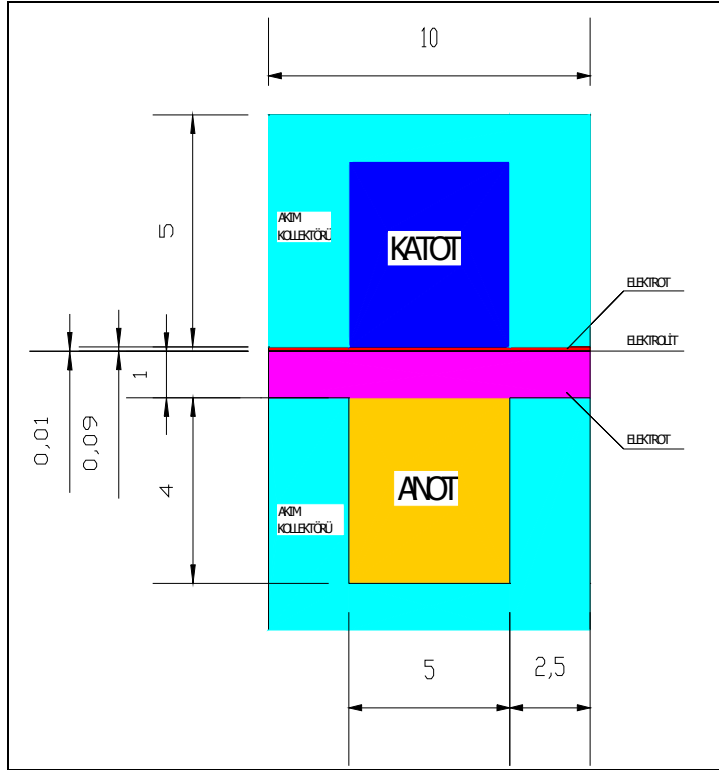
Katı oksitli yakıt pili modeli ve boyutları, Şekil 9.8, 9.9 ve 9.10'da gösterilmiştir.



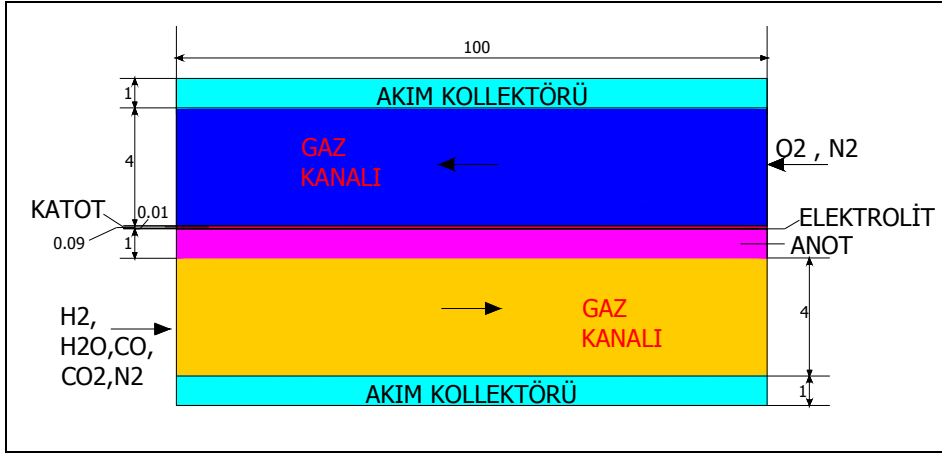
Şekil 9.9 Katı oksitli hücre modeli

- Gaz kanalları boyunca basınç düşümü 10 mbar'dır.
- Hücre yapısı ince ve sıcaklığı homojendir.
- Gaz kanalları ile elektrotlar arasında ısı yayılımı yoktur.
- Hücre bileşenleri arasında temas direnci yoktur.

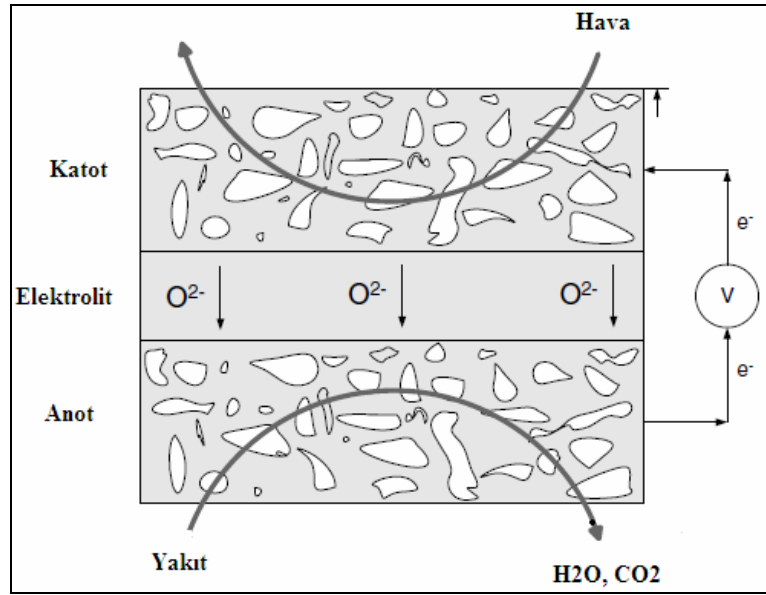
- $0,05V \leq V_{pol} \leq 0,8V$
- $0,85V \geq V_{cell} \geq 0,1V$



Şekil 9.10 Yakıt hücresi önden görünüş



Şekil 9.11 Yakıt hücresi yandan görünüş



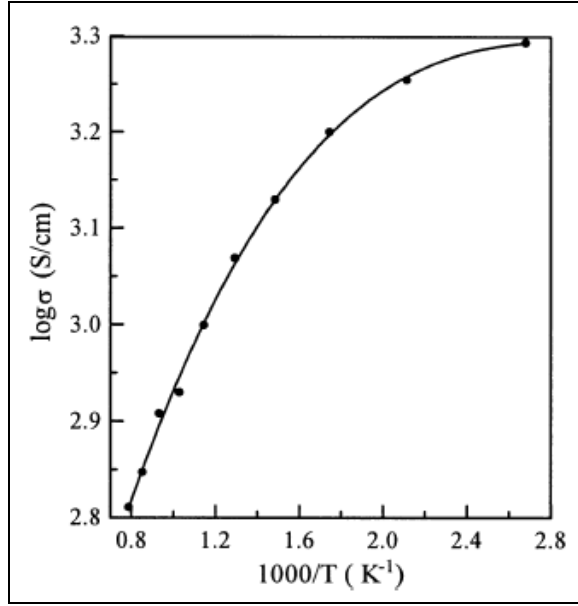
Şekil 9.12 Yakıt hücresi akış yönleri

Hücre bileşenlerinin malzeme ve iletkenlik değerleri Çizelge 9.6’da verilmiştir. (Bossel, 1992; Yakabe H, 2004; Shi, 2007; Hocine, 2009)

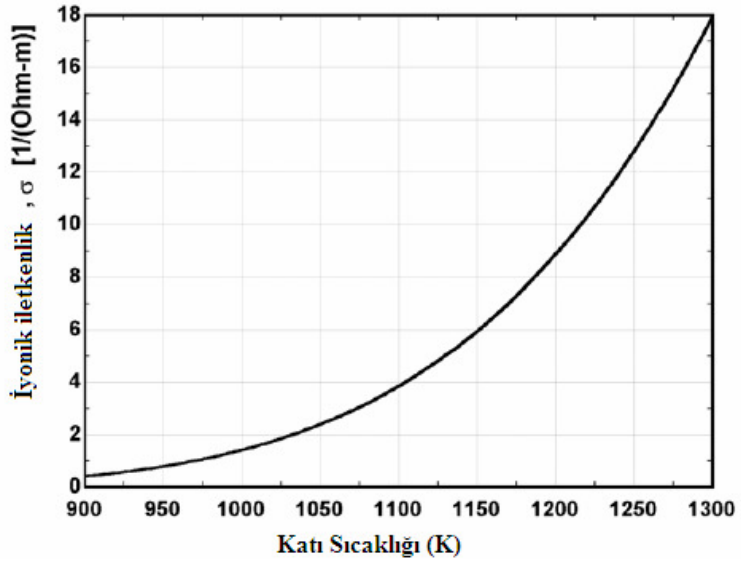
Çizelge 9.6 Hücre bileşen malzemeleri ve iletkenlikleri

Hücre Bileşeni	Malzeme	Elektriksel İletkenlik
Anot	Ni-YSZ	$\sigma_a = \frac{95 \cdot 10^6}{T} \exp\left(\frac{-1150}{T}\right)$
Katot	LSM (LaSrMnO ₃)	$\sigma_c = \frac{42 \cdot 10^6}{T} \exp\left(\frac{-1200}{T}\right)$
Elektrolit	8YSZ	$\sigma_e = 3,34 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{-10300}{T}\right)$
Ara bağlantı	Paslanmaz çelik (X10CrAlSi18)	$\sigma_i = \frac{9,3 \cdot 10^6}{T} \exp\left(\frac{-1100}{T}\right)$

Şekil 9.13, Ni/YSZ malzemesinin iletkenlik ve sıcaklık arasındaki ilişkisini, Şekil 9.14 ise 8YSZ malzemesinin iletkenlik ve sıcaklık arasındaki ilişkisini göstermektedir (Wang, 2004). Gözenekli Ni/YSZ malzemesi, düşük maliyet, yüksek elektriksel iletkenlik, kimyasal denge ve YSZ- elektrolite yakın ısıl genleşme katsayısı yüzünden katı oksitli yakıt pili anodu olarak seçilmiştir. İki bileşenli cermet (seramik-metal karışımı) tabakası, YSZ ve H₂ oksidasyonu için iyi bir elektrokatalitik aktiviteye sahip olan metalik Ni içermektedir (Jong H. Jang et.al, 2000). Ara bağlantı malzemesi olarak ısıya dayanıklı (1000 °C’ye kadar) ferritik paslanmaz çelik (XCrAlSi18) seçilmiştir. Hücre bileşenlerinin elektrokimyasal özellikleri Çizelge 9.7’de verilmiştir.



Şekil 9.13 Ni/YSZ sıcaklığa bağlı iletkenliği



Şekil 9.14 8YSZ sıcaklığa bağlı iyonik iletkenliği

Hücre bileşenlerinin elektrokimyasal özellikleri, Çizelge 9.7’de verilmiştir.

Çizelge 9.7 Hücre bileşenlerinin elektrokimyasal özellikleri

Bileşen	Değer
k_{katot} (S/m ²)	2,35.10 ¹¹ (1)
k_{anot} (S/m ²)	6,54. 10 ¹¹ (1)
E_{katot} (kJ/mol)	137 (1)
E_{anot} (kJ/mol)	140 (1)
Anot ve katot gözenekliliği, ϵ	0,30 (2)
Anot denge potansiyel farkı $\Delta\Phi_{eq;a}$, (V)	0
Katod denge potansiyel farkı $\Delta\Phi_{eq;c}$, (V)	0,9
Başlangıç hücre polarizasyonu, V_{pol} , (V)	0,05
Anot spesifik yüzey alanı, Sa_a , (1/m)	5e5[1/m]
Katod spesifik yüzey alanı, Sa_c , (1/m)	1e5[1/m]
Anot küresel partikül çapı, d_p (m)	2,5.10 ⁻⁶
Katod küresel partikül çapı, d_p (m)	2,5.10 ⁻⁶
Anot geçirgenliği (m ²)	$(e_{\text{por}}^3) \cdot (10e-6)^2 / (180 \cdot (e_{\text{por}})^{1.5} \cdot (1 - e_{\text{por}})^2)$
Katod geçirgenliği (m ²)	$(e_{\text{por}}^3) \cdot (10e-6)^2 / (180 \cdot (e_{\text{por}})^{1.5} \cdot (1 - e_{\text{por}})^2)$

(1) Yaneeporn, 2007

(2) Chaisantikulwat, 2008

9.5 Çözüm Algoritması

Katı oksitli yakıt pilini modelleyen denklemler lineer olmadığından tam çözümleri analitik olarak elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle; lineer olmayan denklem sistemlerini çözmek için, sonlu elemanlar paket programı COMSOL MULTIPHYSICS kullanılmıştır.

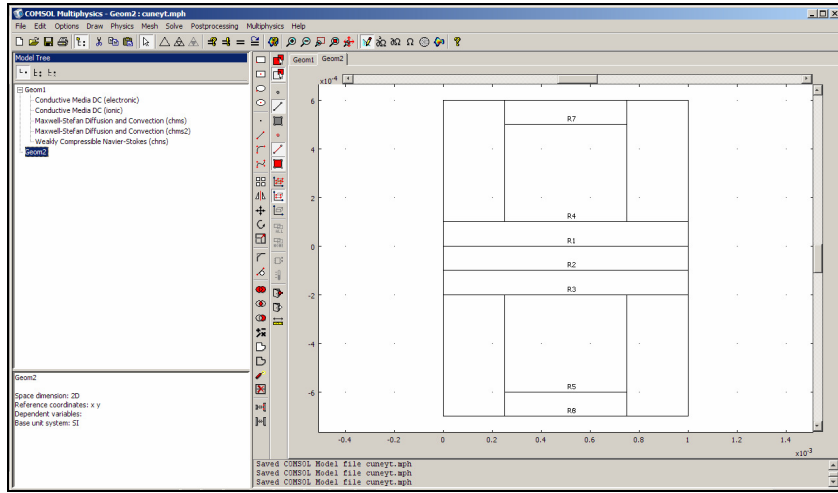
- COMSOL Multiphysics başlatılır.
- Model Navigator bölümünde, Space dimension listesinde 3D seçilir.
- COMSOL Multiphysics>Electromagnetics>Conductive Media DC seçilir.
- Dependent variables alanında phi_electronic yazılır.
- Application mode name alanında electronic yazılır.
- Multiphysics düğmesine sonrada Add düğmesine basılır.
- COMSOL Multiphysics>Electromagnetics>Conductive Media DC uygulama modu seçilir.
- Dependent variables alanında phi_ionic yazılır.
- Application mode name alanında ionic yazılır.
- Add düğmesine basılır.
- Chemical Engineering Module>Mass Transport>Maxwell-Stefan Diffusion and Convection uygulama modu seçilir.
- Dependent variables alanında w1 w2 w3 yazılır.
- Add düğmesine basılır.
- Chemical Engineering Module>Mass Transport>Maxwell-Stefan Diffusion and Convection uygulama modu seçilir.
- Add düğmesine basılır.
- Chemical Engineering Module>Flow with Variable Density>Weakly Compressible Momentum Transport>Weakly Compressible Navier-Stokes uygulama modu seçilir.

- Add düğmesine basılır.
- Add Geometry düğmesine basılır.
- 2D seçilir. OK düğmesine basılır.
- Model Navigator'ü kapamak için OK düğmesine basılır ve kullanıcı arayüzü başlatılır.

2 boyutlu kesit oluşturmak için adımlar:

- Draw>Specify Objects>Rectangle/Square isimli menü seçilir.
- Width kısmına $10e-3$, Height kısmına $90e-6$ yazılır. OK düğmesine basılır.
- Main toolbar üzerinde Zoom Extents düğmesine basılır.
- Rectangle (R1) seçili iken objeyi kopyalamak için Ctrl+C, yapıştırmak için Ctrl+V tuşuna basılır.
- Displacement alanında y sahasına $-10e-6$ yazılır. İkinci dikdörtgeni, R2, oluşturmak için OK düğmesine basılır.
- R3 oluşturmak için Ctrl+V tuşuna basılarak birkez daha yapıştırılır. Y uzunluğu için $-1,01e-3$ girilir. OK düğmesine basılır.
- Rectangle (R4) oluşturmak için Width: $5e-3$, Height: $4e-3$, Base: Corner, x: $2,5e-3$, y: $90e-6$. OK düğmesine basılır.
- R4 seçili iken kopyalamak ve yapıştırmak için Ctrl+C ve Ctrl+V tuşuna basılır.
- Rectangle (R5) oluşturmak için y sahasına $-5,1e-3$ yazılır. OK düğmesine basılır.
- Rectangle (R6) oluşturmak için Width: $10e-3$, Height: $11,1e-3$, Base: Corner, x: 0, y: $-6,01e-3$. OK düğmesine basılır.

- Rectangle (R7) oluşturmak için Width: $5e-3$, Height: $1e-3$, Base: Corner, x: $2,5e-3$, y: $4,09e-3$.
- R7 seçili iken kopyalamak ve yapıştırmak için Ctrl+C ve Ctrl+V tuşuna basılır.
- y sahasına $-10,1e-3$ yazılır. OK düğmesine basılır.
- Main toolbar üzerinde Zoom Extents düğmesine basılır.

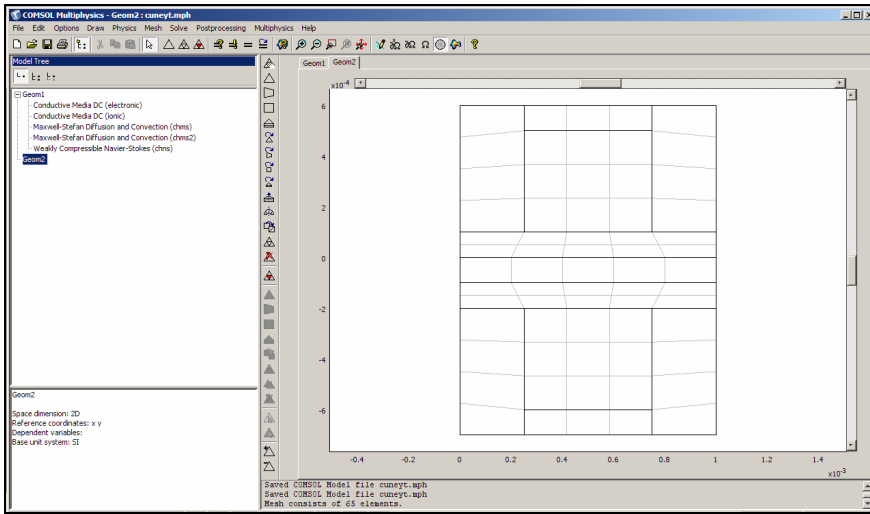


Şekil 9.15 Yakıt pili hücresi modelleme

Mesh için izlenecek adımlar:

- “Mesh>Mapped Mesh Parameters” menüsü seçilir.
- “Boundary” tuşuna basılır ve “Boundary 5” seçilir.
- “Constrained edge element distribution” kutusu seçilir ve “Number of edge elements” alanına “1” yazılır.
- “Boundaries” “14”, “15”, “17” ve “20” seçilir.

- “Constrained edge element distribution” kutusu seçilir ve “Number of edge elements” alanına “3” yazılır.
- “Boundaries” “12” ve “19” seçilir ve “1” yazılır.
- “Boundaries” “4”, “10”, “25” ve “27” seçilir ve “1” yazılır.
- “Mesh” üretmek için “Remesh” ve “OK” tuşuna basılır.

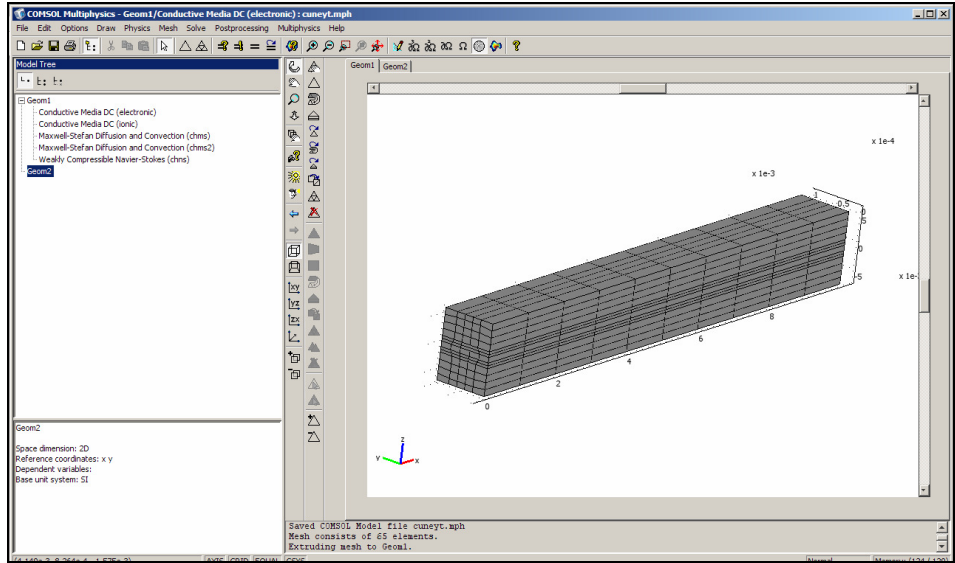


Şekil 9.16 Yakıt pili hücresi meshi

2 boyutlu iş düzlemini tanımlamak için:

- “Draw>Work-Plane Settings” menüsü seçilir. “Quick” sayfasında “y-z” düzlemi seçilir ve “x” sahasına “0” yazılır. “OK.” tuşuna basılır.
- “Mesh>Extrude Mesh” menüsü seçilir.
- “Distance” sahasında “10e-3” yazılır.

- “Mesh” sayfasında “Number of element layers” hanesine 10 yazılır. OK. tuşuna basılır.



Şekil 9.17 Yakıt pili hücresi 3 boyutlu

TERCİH VE AYARLAR

- “Options” menüsünden “Constants” kutusu açılır.
- Sabitler yazılır ve OK tuşuna basılır.
- “Options>Expressions>Scalar Expressions” seçilir.
- Sabitler yazılır ve OK tuşuna basılır.
- “Options menüsünden Expressions>Subdomain Expressions” seçilir.
- Çizelge 9.8’de belirtilen ifadeler girilir.

Çizelge 9.8 Sabitler

İsim	İfade	Tanım
F	96500[C/mol]	Faraday sabiti
p_atm	1[atm]	Atmosfer basıncı
T	700[degC]	Sıcaklık
Rg	8.314[J/(mol*K)]	Gaz sabiti
dp_a	1[Pa]	Anot giriş basıncı
dp_c	2[Pa]	Katot giriş basıncı
io_a	$Rg[(mol*K)/J]*T[1/K]/(2*F[mol/C])*6.54e11*exp(-140000/(Rg[(mol*K)/J]*T[1/K]))[A/m^2]$	Anodik değişen akım
io_c	$Rg[(mol*K)/J]*T[1/K]/(2*F[mol/C])*2.35e11*exp(-137000/(Rg[(mol*K)/J]*T[1/K]))[A/m^2]$	Katodik değişen akım
Sa_a	5e5[1/m]	Anot spesifik yüzey alanı
Sa_c	1e5[1/m]	Katot spesifik yüzey alanı
V_pol	0.05[V]	Başlangıç hücre polarizasyonu
e_por	0.3	Anot ve katot gözenekliliği
perm_a	$(e_por^3)*(10e-6)^2/(180*(e_por)^{1.5}*(1-e_por)^2)$	Anot geçirgenliği
perm_c	$(e_por^3)*(10e-6)^2/(180*(e_por)^{1.5}*(1-e_por)^2)$	Katot geçirgenliği
dphieq_a	0[V]	Anot denge voltajı
dphieq_c	0.9[V]	Katot denge voltajı

kleff_a	$3.34e4 \cdot \exp(-10300/T[1/K])[S/m]$	Anot elektrolit efektif iletkenliği
kleff_c	$3.34e4 \cdot \exp(-10300/T[1/K])[S/m]$	Katot elektrolit efektif iletkenliği
kseff_a	$(95e6/T[1/K]) \cdot \exp(-1150/T[1/K])[S/m]$	Anot katı efektif iletkenliği
kseff_c	$42e6/T[1/K] \cdot \exp(-1200/T[1/K])[S/m]$	Katot katı efektif iletkenliği
kl	$3.34e4 \cdot \exp(-10300/T[1/K])[S/m]$	Elektrolit iletkenliği
ks	$9.3e6/T[1/K] \cdot \exp(-1100/T[1/K])[S/m]$	Akım kollektörü iletkenliği
nh2	$6.162e-6 + 1.145e-8 \cdot T[1/K][Pa \cdot s]$	H ₂ viskozitesi
no2	$1.668e-5 + 3.108e-8 \cdot T[1/K][Pa \cdot s]$	O ₂ viskozitesi
nh2o	$4.567e-6 + 2.209e-8 \cdot T[1/K][Pa \cdot s]$	H ₂ O viskozitesi
nn2	$1.435e-5 + 2.642e-8 \cdot T[1/K][Pa \cdot s]$	N ₂ viskozitesi
nco	$(4.60e-7 \cdot N_{co} \cdot (28^{0.5}) \cdot (35e5^{(2/3)}) / 132.9^{(1/6)})[Pa \cdot s]$	CO viskozitesi
nco2	$(4.60e-7 \cdot N_{co2} \cdot (44^{0.5}) \cdot (73.8e5^{(2/3)}) / 132.9^{(1/6)})[Pa \cdot s]$	CO ₂ viskozitesi
Nco	$0.0001778 \cdot (4.58 \cdot T[1/K] / 32.9 - 1.67)^{0.625}$	CO viskozitesi alt değeri
Nco2	$0.0001778 \cdot (4.58 \cdot T[1/K] / 304.1 - 1.67)^{0.625}$	CO ₂ viskozitesi alt değeri
mu_annot	$x_{h2} \cdot nh2 / (x_{h2} + x_{h2o} \cdot Q_{12} + x_{co} \cdot Q_{13} + x_{co2} \cdot Q_{14} + x_{n2} \cdot Q_{15}) + x_{h2o} \cdot nh2o /$	Anot gaz viskozitesi

	$\frac{(x_{h2} \cdot Q21 + x_{h2o} + x_{co} \cdot Q23 + x_{co2} \cdot Q24 + x_{n2} \cdot Q25) + x_{co} \cdot nco / (x_{h2} \cdot Q31 + x_{h2o} \cdot Q32 + x_{co} + x_{co2} \cdot Q34 + x_{n2} \cdot Q35) + x_{co2} \cdot nco2 / (x_{h2} \cdot Q41 + x_{h2o} \cdot Q42 + x_{co} \cdot Q43 + x_{co2} + x_{n2} \cdot Q45) + x_{n2} \cdot nn2 / (x_{h2} \cdot Q51 + x_{h2o} \cdot Q52 + x_{co} \cdot Q53 + x_{co2} \cdot Q54 + x_{n2})}{1}$	
mu_katot	$\frac{x_{o2} \cdot no2 / (x_{o2} + (1 - x_{o2}) \cdot Q67) + (1 - x_{o2}) \cdot nn2 / ((1 - x_{o2}) + x_{o2} \cdot Q76)}{1}$	Katot gaz viskozitesi
vh2	6.12e-6	H ₂ kinetik hacmi
vo2	16.3e-6	O ₂ kinetik hacmi
vn2	18.5e-6	N ₂ kinetik hacmi
vh2o	13.1e-6	H ₂ O kinetik hacmi
vco	18e-6	CO kinetik hacmi
vco2	26.9e-6	CO ₂ kinetik hacmi
Mh2	2[g/mol]	H ₂ molar kütle
Mo2	32[g/mol]	O ₂ molar kütle
Mn2	28[g/mol]	N ₂ molar kütle
Mh2o	18[g/mol]	H ₂ O molar kütle
Mco	28[g/mol]	CO mol kütlesi
Mco2	44[g/mol]	CO ₂ mol kütlesi
kd	3.16e-8[m ² /s]	Referans difüzite
e_por	0.375	Gözeneklilik
Dh2h2o	$kd \cdot (T[1/K])^{1.75} / (p_{atm}[1/Pa]) \cdot (vh2^{(1/3)} + vh2o^{(1/3)})$	Difüzivite

	$3))^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2+1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o})^{0.5}$	
Do2h2o	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}0^{2(1/3)}+\text{v}h2\text{o}^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{M}02+1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o})^{0.5}$	Difüvizite
Do2n2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}0^{2(1/3)}+\text{v}n^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{M}02+1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dn2h2o	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2\text{o}^{2(1/3)}+\text{v}n^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o}+1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dh2co	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2^{2(1/3)}+\text{v}c\text{o}^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2+1[\text{kg/mol}]/\text{Mco})^{0.5}$	Difüvizite
Dh2co2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2^{2(1/3)}+\text{v}c\text{o}2^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2+1[\text{kg/mol}]/\text{Mco}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dh2n2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2^{2(1/3)}+\text{v}n^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2+1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dh2oco	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2\text{o}^{2(1/3)}+\text{v}c\text{o}^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o}+1[\text{kg/mol}]/\text{Mco})^{0.5}$	Difüvizite
Dh2oco2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2\text{o}^{2(1/3)}+\text{v}c\text{o}2^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o}+1[\text{kg/mol}]/\text{Mco}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dh2on2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[1/\text{Pa}]*(\text{v}h2\text{o}^{2(1/3)}+\text{v}n^{2(1/3)})^{2}*(1[\text{kg/mol}]/\text{Mh}2\text{o}+1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüvizite
Dcoco2	$\text{kd}*(\text{T}[1/\text{K}])^{1.75}/(\text{p_atm}[$	Difüvizite

	$1/\text{Pa}] * (\text{vco}^{(1/3)} + \text{vco}2^{(1/3)})^2 * (1[\text{kg/mol}]/\text{Mco} + 1[\text{kg/mol}]/\text{Mco}2)^{0.5}$	
Dcon2	$\text{kd} * (\text{T}[1/\text{K}])^{1.75} / (\text{p_atm}[1/\text{Pa}] * (\text{vco}^{(1/3)} + \text{vn}2^{(1/3)})^2 * (1[\text{kg/mol}]/\text{Mco} + 1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüzivite
Dco2n2	$\text{kd} * (\text{T}[1/\text{K}])^{1.75} / (\text{p_atm}[1/\text{Pa}] * (\text{vco}2^{(1/3)} + \text{vn}2^{(1/3)})^2 * (1[\text{kg/mol}]/\text{Mco}2 + 1[\text{kg/mol}]/\text{Mn}2)^{0.5}$	Difüzivite
Dh2h2oeff	$\text{Dh}2\text{h}2\text{o} * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite, H2-H2O
Do2h2oeff	$\text{D}o2\text{h}2\text{o} * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite, O2-H2O
Do2n2eff	$\text{D}o2\text{n}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite, O2-N2
Dn2h2oeff	$\text{Dn}2\text{h}2\text{o} * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite, N2-H2O
Dh2coeff	$\text{Dh}2\text{co} * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dh2co2eff	$\text{Dh}2\text{co}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dh2n2eff	$\text{Dh}2\text{n}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dh2ocoeff	$\text{Dh}2\text{oco} * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dh2oco2eff	$\text{Dh}2\text{oco}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dh2on2eff	$\text{Dh}2\text{on}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dcoco2eff	$\text{Dcoco}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif difüsivite
Dcon2eff	$\text{Dcon}2 * \text{e_por}^{1.5}$	Efektif

		difüsvite
Dco2n2eff	Dco2n2*e_por^1.5	Efektif difüsvite
Q12	$(1+(nh_2/nh_2o)^{0.5}*(Mh_2o[mol/kg]/Mh_2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2[mol/kg]/Mh_2o[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q13	$(1+(nh_2/nco)^{0.5}*(Mco[mol/kg]/Mh_2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2[mol/kg]/Mco[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q14	$(1+(nh_2/nco_2)^{0.5}*(Mco_2[mol/kg]/Mh_2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2[mol/kg]/Mco_2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q15	$(1+(nh_2/nn_2)^{0.5}*(Mn_2[mol/kg]/Mh_2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2[mol/kg]/Mn_2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q21	Q12^-1	Karışım viskozitesi alt değeri
Q23	$(1+(nh_2o/nco)^{0.5}*(Mco[mol/kg]/Mh_2o[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2o[mol/kg]/Mco[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q24	$(1+(nh_2o/nco_2)^{0.5}*(Mco_2[mol/kg]/Mh_2o[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2o[mol/kg]/Mco_2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q25	$(1+(nh_2o/nn_2)^{0.5}*(Mn_2[mol/kg]/Mh_2o[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mh_2o[mol/kg]/Mn_2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q31	Q13^-1	Karışım viskozitesi alt değeri
Q32	Q23^-1	Karışım

		viskozitesi alt değeri
Q34	$(1+(nco/nco2)^{0.5}*(Mco2[mol/kg]/Mco[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mco[mol/kg]/Mco2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q35	$(1+(nco/nn2)^{0.5}*(Mn2[mol/kg]/Mco[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mco[mol/kg]/Mn2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q41	$Q14^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q42	$Q24^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q43	$Q34^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q45	$(1+(nco2/nn2)^{0.5}*(Mn2[mol/kg]/Mco2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mco2[mol/kg]/Mn2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q51	$Q15^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q52	$Q25^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q53	$Q35^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q54	$Q45^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
Q67	$(1+(no/nn2)^{0.5}*(Mn2[mol/kg]/Mo2[mol/kg])^{0.25})^2/(8*(1+Mo2[mol/kg]/Mn2[mol/kg]))^{0.5}$	Karışım viskozitesi alt değeri

	$2[\text{mol/kg}])^{0.5}$	
Q76	$Q67^{-1}$	Karışım viskozitesi alt değeri
w_h2ref	$x_{h2} * M_{h2} / M_{\text{anot}}$	H ₂ giriş ağırlık oranı
w_h2oref	$x_{h2o} * M_{h2o} / M_{\text{anot}}$	H ₂ O giriş ağırlık oranı
w_coref	$x_{co} * M_{co} / M_{\text{anot}}$	CO giriş ağırlık oranı
w_co2ref	$x_{co2} * M_{co2} / M_{\text{anot}}$	CO ₂ giriş ağırlık oranı
w_o2ref	$x_{o2} * M_{o2} / M_{\text{katot}}$	O ₂ giriş ağırlık oranı
M_anot	$x_{h2} * M_{h2} + x_{co} * M_{co} + x_{co2} * M_{co2} + x_{h2o} * M_{h2o} + (1 - x_{h2} - x_{co} - x_{co2} - x_{h2o}) * M_{n2}$	Anot gazı mol kütlesi
M_katot	$x_{o2} * M_{o2} + (1 - x_{o2}) * M_{n2}$	Katot gazı mol kütlesi
c_tot	$p_{\text{atm}} / (R_g * T)$	Toplam molar konsantrasyon
c_o2ref	$c_{\text{tot}} * (w_{o2ref} / M_{o2} / (w_{o2ref} / M_{o2} + w_{h2oref} / M_{h2o} + (1 - w_{o2ref} - w_{h2oref}) / M_{n2}))$	O ₂ referans konsantrasyonu
c_h2ref	$c_{\text{tot}} * (w_{h2ref} / M_{h2} / (w_{h2ref} / M_{h2} + (1 - w_{h2ref}) / M_{h2o}))$	H ₂ referans konsantrasyonu

Çizelge 9.9 Skaler ifadeler

İsim	İfade	Tanım
ict_c	$io_c * (\exp(0.5 * F * \eta / (Rg * T)) - x_w6_chms2 * (c_tot / c_o2ref) * \exp(-0.5 * F * \eta / (Rg * T)))$	Katot yük transfer akımı
ict_a	$io_a * x_w1_chms * (c_tot / c_h2ref) * (\exp(0.5 * F * \eta / (Rg * T)) - \exp(-0.5 * F * \eta / (Rg * T)))$	Anot yük transfer akımı
rho_c	$p / (Rg * T) * (x_w6_chms2 * Mo2 + x_w7_chms2 * Mn2)$	Katot gaz yoğunluğu
rho_a	$p / (Rg * T) * (x_w1_chms * Mh2 + x_w2_chms * Mh2o + x_w3_chms * Mco + x_w4_chms * Mco2 + x_w5_chms * Mn2)$	Anot gaz yoğunluğu
V_cell	$dphieq_c - dphieq_a - V_pol$	Hücre voltajı
P_out	$j_ec * V_cell$	Toplam çıkış gücü

Çizelge 9.10 Altbölge ifadeleri

ALT BÖLGE	İSİM	İFADE
2	eta	$\phi_electronic - \phi_ionic - dphieq_a$
	rho	rho_a
	ict	ict_a
4	eta	$\phi_electronic - \phi_ionic - dphieq_c$
	rho	rho_c
	ict	ict_c
7	rho	rho_a
8	rho	rho_c

- “Options>Integration Coupling Variables>Boundary Variables” seçilir.
- “Boundary 9” seçilir ve Çizelge 9.11 doldurulur. OK tuşuna basılır.

Çizelge 9.11 Sınır değişkeni

İsim	İfade	İntegrasyon Derecesi	Global Yer
A	1	4	EVET

- “Options>Integration Coupling Variables>Subdomain Variables” seçilir.
- “Subdomain 2 (anot)” seçilir ve Çizelge 9.12 doldurulur. OK tuşuna basılır.

Çizelge 9.12 Altbölge değişkeni

İsim	İfade	İntegrasyon Derecesi	Global Yer
j_ec	ict*Sa_a/A	4	EVET

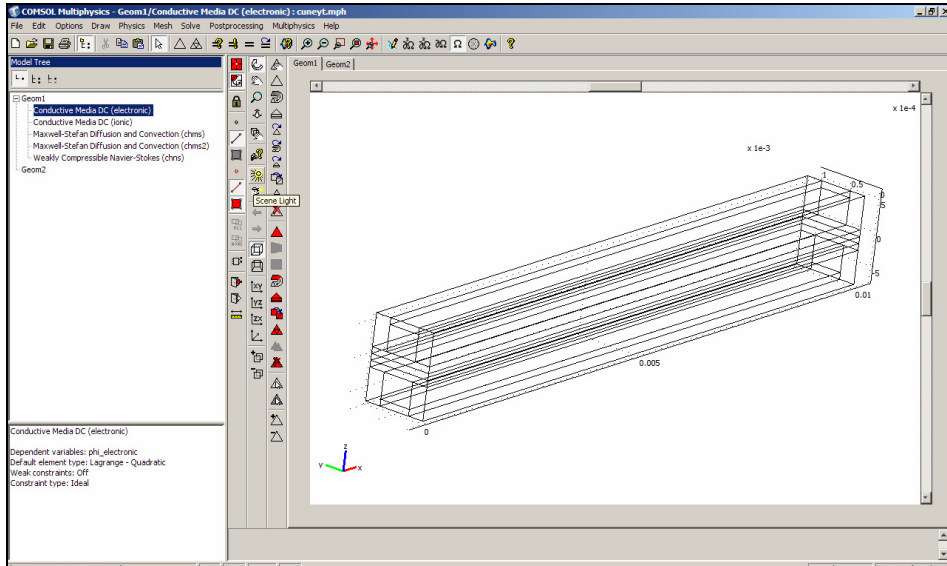
9.5.1 Altbölge ayarları- conductive media dc (elektronik)

- “Multiphysics>Conductive Media DC (electronic)” seçilir.
- “Physics>Subdomain Settings” seçilir.
- Çizelge 9.13 doldurulur.

- “Subdomains 4, 5, 9, and 11” seçilir. “Init” sayfasına gidilir ve “phi_electronic(t0)” sayfasında “dphieq_c-dphieq_a-V_pol” yazılır. Bu değer, elektronik potansiyel için başlangıç değeridir.
- “Element” sayfasında bütün subdomainler seçilir ve “Predefined elements” listesinden “Lagrange – Linear” seçilir.
- OK tuşuna basılır.

Çizelge 9.13 Altbölge ayarları (elektronik)

AYARLAR	ALT BÖLGE				
	3,7,8	1,6,10	5,9,11	2	4
AKTİFLİĞİ	HAYIR	EVET	EVET	EVET	EVET
σ		ks	ks	kseff_a	kseff_c
Q_j		0	0	-Sa_a*ict	-Sa_c*ict



Şekil 9.18 Yakıt hücresi sınırları

9.5.2 Sınır koşulları-conductive media dc (elektronik)

- “Physics>Boundary Settings” seçilir.
- Bütün sınırlar seçilir ve “Boundary condition” listesinden “Electric insulation” uygulanır.
- “Boundaries 1, 17, and 31” (anot girişindeki bağlantı) seçilir. “Boundary condition” listesinden “Ground” koşulu seçilir. Bu, potansiyelin sıfır olduğu anlamına gelir.
- “Boundaries 50, 54, and 56” (katot girişindeki bağlantı) seçilir ve “Electric potential” koşulu uygulanır.
- “V₀” alanına “V_cell” yazılır. Bu, sınırdaki hücre voltajı uygulanacağı anlamına gelir.

9.5.3 Altbölge ayarları- conductive media dc (iyonik)

- “Multiphysics>Conductive Media DC (ionic)” seçilir.
- “Physics>Subdomain Settings” seçilir.
- Çizelge 9.14’de verilen ayarlar yapılır ve OK tuşuna basılır.

Çizelge 9.14 Altbölge ayarları (iyonik)

AYARLAR	ALT BÖLGE			
	1,5,11	2	3	4
AKTİFLİĞİ	HAYIR	EVET	EVET	EVET
σ		kleff_a	kl	kleff_c
Qj		Sa_a*ict	0	-Sa_a*ict

9.5.4 Sınır koşulları- conductive media dc (iyonik)

- “Physics>Boundary Settings” seçilir.
- Bütün sınırlar seçilir.
- “Boundary condition” listesinden “Electric insulation” seçilir ve OK tuşuna basılır.

9.5.5 Altbölge ayarları- weakly compressible navier-stokes

- “Multiphysics>Weakly Compressible Navier-Stokes (chns)” seçilir.
- “Physics>Subdomain Settings” seçilir.
- Çizelge 9.15’de verilen ayarlar yapılır.

Çizelge 9.15 Altbölge ayarları (weakly compressible navier-stokes)

AYARLAR	ALTBÖLGE		
	1,3,5,9,10,11	2,7	4,8
AKTİFLİĞİ	HAYIR	EVET	EVET
ρ		rho_a	rho_c
η		mu	mu

- “Subdomains 2, 4, 7, and 8” seçilir ve “Stabilization” tuşuna basılır.
- “Streamline diffusion (GLS) and Crosswind diffusion” temizlenir.
- “Init” tuşuna basılır ve “p(t0)” alanında “p_atm” yazılır.
- “Physics” sayfasına dönülür ve “Subdomains 2 and 4” seçilir.
- “Flow in porous media (Brinkman equations)” seçilir ve “Porosity” alanına “e_por” yazılır.

- Çizelge 9.16’da verilen ayarlar yapılır ve OK tuşuna basılır.

Çizelge 9.16 Altbölge ayarları (gözenekli ortam)

Ayarlar	Altbölge	
	2	4
κ	perm_a	perm_c
Q	$Sa_a \cdot \rho \cdot (Mh2o - Mh2)$	$Sa_c \cdot \rho \cdot Mo2 / (4 \cdot F)$

9.5.6 Sınır koşulları- weakly compressible navier-stokes

- “Physics>Boundary Settings” seçilir.
- “Boundary 53” (katot girişi) seçilir. “Boundary type” alanına “Stres” seçilir ve “Boundary” alanında “Normal stress, normal flow” seçilir. “f0” alanına “p_atm+dp_c” yazılır. Bu, giriş basıncını uygular.
- “Boundary 20” (anot girişi) seçilir. “Boundary type” alanına “Stres” seçilir ve “Boundary” alanında “Normal stres” seçilir. “f0” alanına “p_atm+dp_c” yazılır. “f0” alanına “p_atm” yazılır.
- OK tuşuna basılır.

9.5.7 Altbölge ayarları- maxwell-stefan diffusion and convection (katot)

- “Multiphysics> Maxwell-Stefan Diffusion and Convection (katot)” seçilir.
- “Physics>Properties” seçilir ve “Equation form”, “Conservative” ayarlanır.

- OK tuşuna basılır.
- “Physics>Subdomain Settings”
- Tüm subdomainler seçilir ve “Active in this domain” temizlenir.
- “Subdomains 4 and 8” seçilir ve “Active in this domain” işaretlenir.
- 2 aktif subdomain için Çizelge 9.17’deki değerler girilir.

Çizelge 9.17 Altbölge ayarları (4 ve 8 için)

ÖZELLİK	İFADE
ρ	rho_c
p	p
T	T
u,v,w	u,v,w

- “Subdomain 4” seçilir ve “Edit” düğmesine basılır. “Matris” pozisyonunda sabitler “(Do2n2eff)” yazılır. OK tuşuna basılır.
- “Subdomain 8” seçilir ve “Edit” düğmesine basılır. “Matris” pozisyonunda sabitler “(Do2n2)” yazılır. OK tuşuna basılır.
- “Subdomains 4 and 8” seçilir.
- “w6” sayfasında “Molecular weight” alanında “Mo2” yazılır.
- “w7” sayfasında “Molecular weight” alanında “Mn2” yazılır.
- “Init” sayfasında “w6(t0)” alanına “w_o2ref” yazılır.
- “Subdomain 4” seçilir ve “R” alanına “Sa_c*ict_c*Mo2/(4*F)” yazılır.
- OK tuşuna basılır.

9.5.8 Sınır koşulları- maxwell-stefan diffusion and convection (katot)

- “Physics>Boundary Settings” seçilir
- Katot girişinde (Boundary 53) “w6” için “Boundary condition” olarak “Mass fraction” seçilir. “w6o” için “Mass fraction” değerine “w_o2ref “ yazılır
- Katot çıkışında (Boundary 24) “w6” için “Convective flux” şartı seçilir.
- OK tuşuna basılır.

9.5.9 Alt bölge ayarları- maxwell-stefan diffusion and convection (anot)

- “Multiphysics>Maxwell-Stefan Diffusion and Convection (anot)” seçilir.
- “Physics>Properties” seçilir. “Application Mode Properties” alanında “Equation form”, “Conservative” yapılır.OK tuşuna basılır.
- “Physics>Subdomain Settings” seçilir.
- Tüm subdomainler seçilir ve “Active in this domain” temizlenir.
- “Subdomains 2 and 7” seçilir ve “Active in this domain” seçilir.
- “Subdomain 2” seçilir. “General” sayfasında “Edit” düğmesine basılır ve “Dh2h2oeff” “Dh2coeff”, “Dh2co2eff”, “Dh2n2eff”, “Dh2ocoeff”, “Dh2oco2eff”, “Dh2on2eff”, “Dcoco2eff”, “Dcon2eff”, “Dco2n2eff” yazılır ve OK tuşuna basılır.
- “Subdomain 7” seçilir ve “General” sayfasında “Edit” düğmesine basılır ve “Dh2h2o” “Dh2co”, “Dh2co2”, “Dh2n2”, “Dh2oco”,

Dh2oco2”, “Dh2on2”, “Dcoco2”, “Dcon2”, “Dco2n2” yazılır ve OK tuşuna basılır.

- “Subdomains 2 and 7” seçilir ve Çizelge 9.18’deki özellikler girilir.

Çizelge 9.18 Alt bölge ayarları (2 ve 7 için)

ÖZELLİK	İFADE
ρ	rho_a
p	p
T	T
u,v,w	u,v,w

- “w1” sayfasında “M” alanına “Mh2” yazılır.
- “w2” sayfasında “M” alanına “Mh2o” yazılır.
- “w3” sayfasında “M” alanına “Mco” yazılır.
- “w4” sayfasında “M” alanına “Mco2” yazılır.
- “w5” sayfasında “M” alanına “Mn2” yazılır.
- “Init” sayfasında “w1(t0)” alanında “w_h2ref” yazılır.
- “Init” sayfasında “w2(t0)” alanında “w_h2oref” yazılır.
- “Init” sayfasında “w3(t0)” alanında “w_coref” yazılır.
- “Init” sayfasında “w4(t0)” alanında “w_co2ref” yazılır.
- “Subdomain 2” seçilir ve “R” alanına “-Sa_a*ict_a*Mh2/(2*F)” yazılır.
- OK tuşuna basılır.

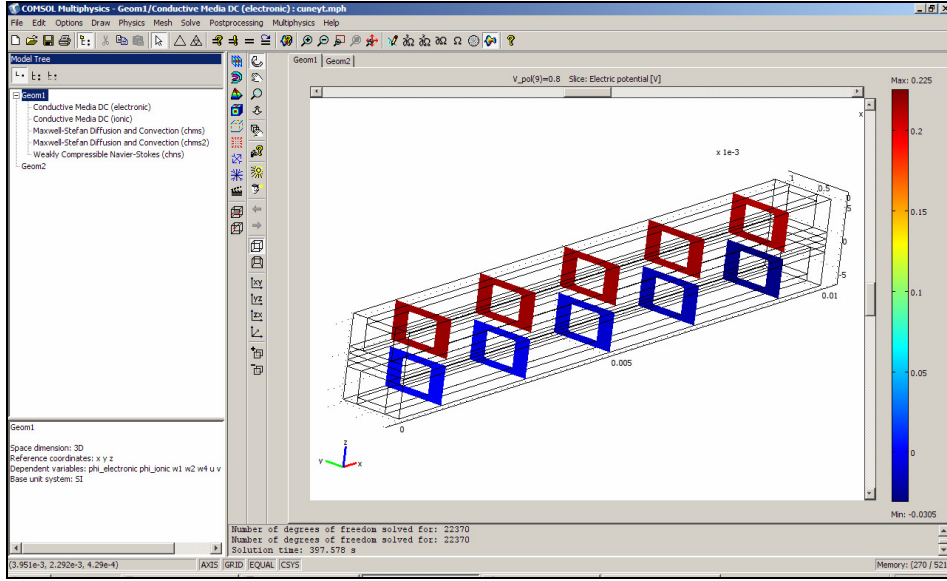
9.5.10 Sınır koşulları- maxwell-stefan diffusion and convection (anot)

- “Physics>Boundary Settings” seçilir.

- Anot girişi sınırında (Boundary 20) “Mass fraction” koşulu seçilir.
- “w1₀” alanına “w_h2ref” yazılır.
- “w2₀” alanına “w_h2oref” yazılır.
- “w3₀” alanına “w_coref” yazılır.
- “w4₀” alanına “w_co2ref” yazılır.
- Anot çıkışı sınırında (Boundary 52) “Convective flux” şartı seçilir.
- OK tuşuna basılır.

9.5.11 Çözüm, son işlem ve görselleştirme

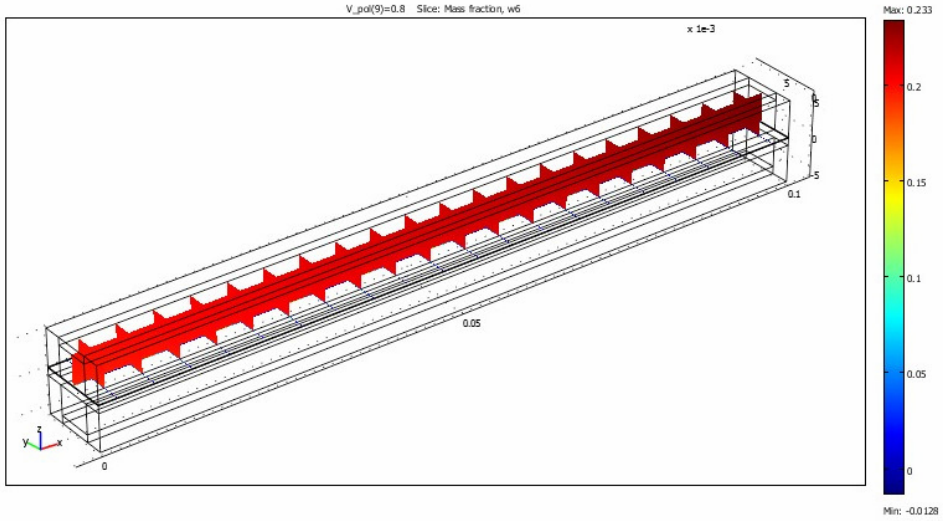
- “Solve” menüsünden “Solver Parameters” seçilir.
- “Solver” listesinden “Parametric” seçilir.
- “Parameters” alanında “Parameter names” sahasına “V_pol” yazılır ve “Parameter values” hanesine “0.05 0.1:0.1:0.8” girilir.
- “Linear system solver” listesinden “Direct (PARDISO)” seçilir.
- OK tuşuna basılır.
- “Solve” düğmesine basılır.



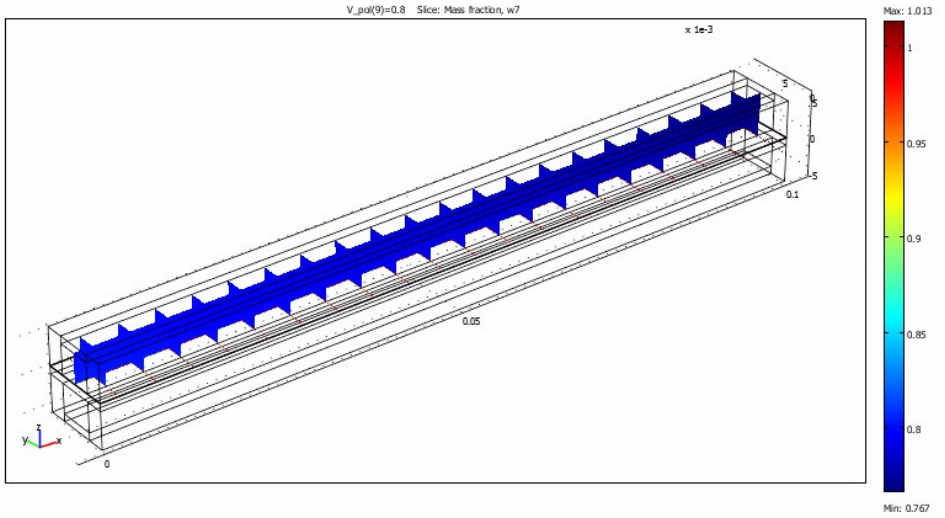
Şekil 9.19 Yakıt pili modeli

Katottaki oksijen dağılımı (0.5 V hücre voltajında)

- “Postprocessing>Plot parameters” menüsü seçilir.
- “General” sayfasında “Parameter value” listesinde 0.5 yazılır.
- “Slice” sayfasında “x levels” alanına 5, “y levels” alanına 1 yazılır.
- “Predefined quantities” listesinden “Mass fraction”, “w1” seçilir.
- “Apply” tuşuna basılır.

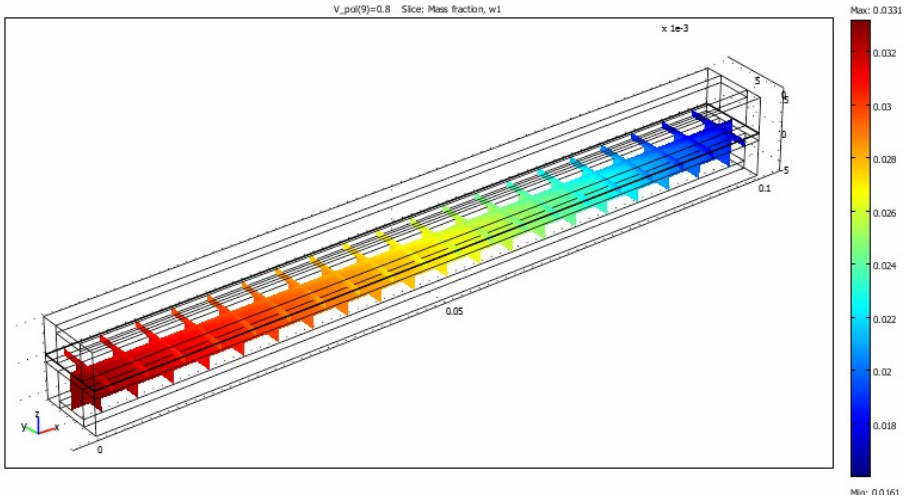


Şekil 9.20 Katottaki oksijen dağılımı

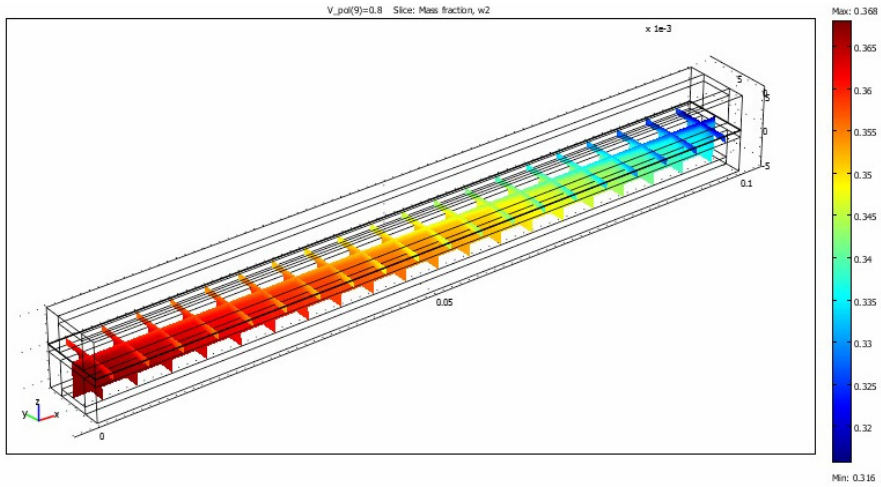


Şekil 9.21 Katottaki azot dağılımı

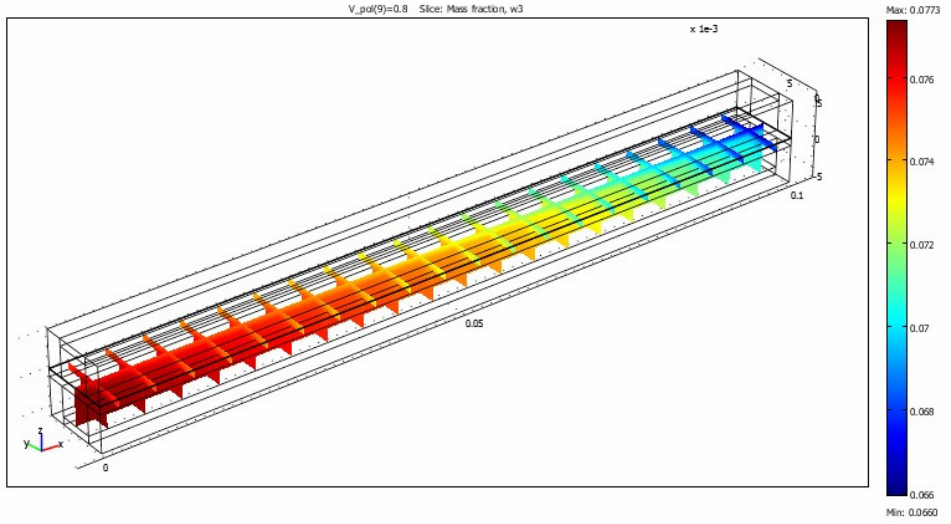
Anottaki hidrojen dağılımını görmek için “Slice” sayfasında “Mass fraction” seçilir. “Predefined quantities” listesinden “w4” seçilir ve “OK” tuşuna basılır.



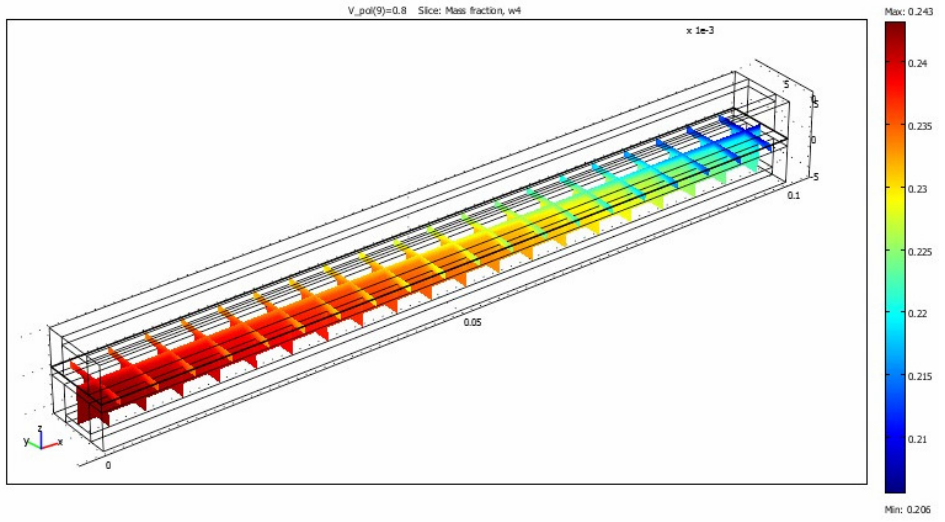
Şekil 9.22 Anottaki hidrojen dağılımı



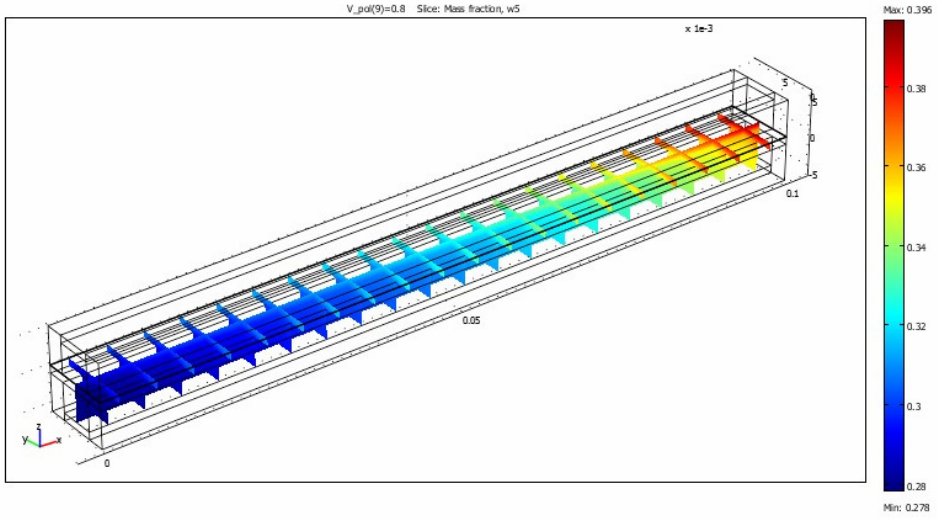
Şekil 9.23 Anottaki su dağılımı



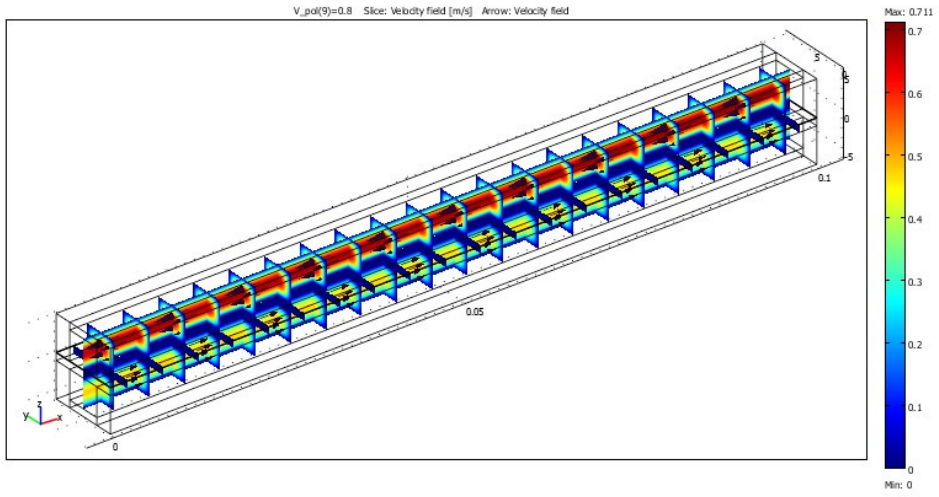
Şekil 9.24 Anottaki karbonmonoksit dağılımı



Şekil 9.25 Anottaki karbondioksit dağılımı



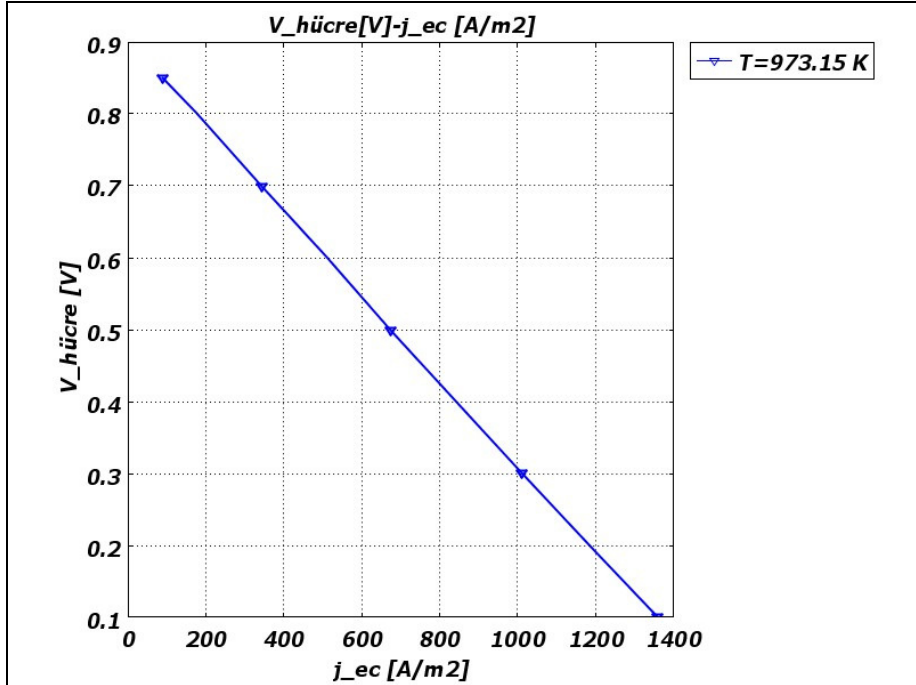
Şekil 9.26 Anottaki azot dağılımı



Şekil 9.27 Anot ve katottaki hız dağılımı

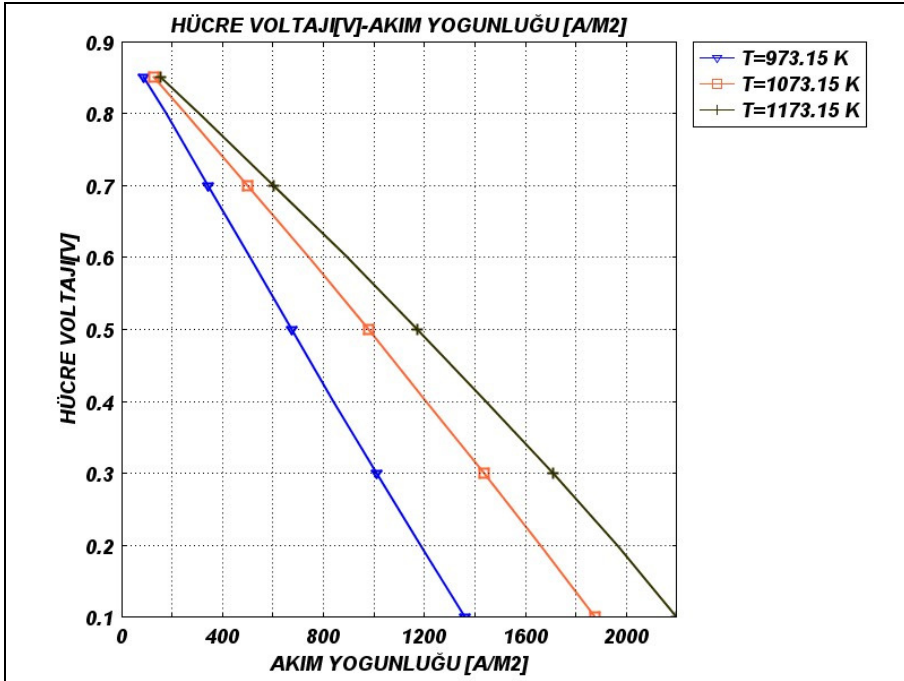
Katı oksitli yakıt pilinin polarizasyon eğrisini oluşturmak için aşağıdaki adımlar izlenir:

- “Postprocessing>Domain Plot Parameters” seçilir.
- “General” sayfasında “Solutions to use” listesinden tüm çözümler seçilir.
- “Point” sayfasında “Expression” alanında “V_cell” yazılır.
- Herhangi bir nokta seçilir.
- “x-axis” data alanında önce alttaki düğmeye sonra “Expression” tuşuna basılır.
- “X-Axis” Data kutusunda “Expression” alanında “j_ec” yazılır.”OK” tuşuna basılır.
- “OK” tuşuna basılır. “Domain Plot Parameters” kutusu kapatılır.

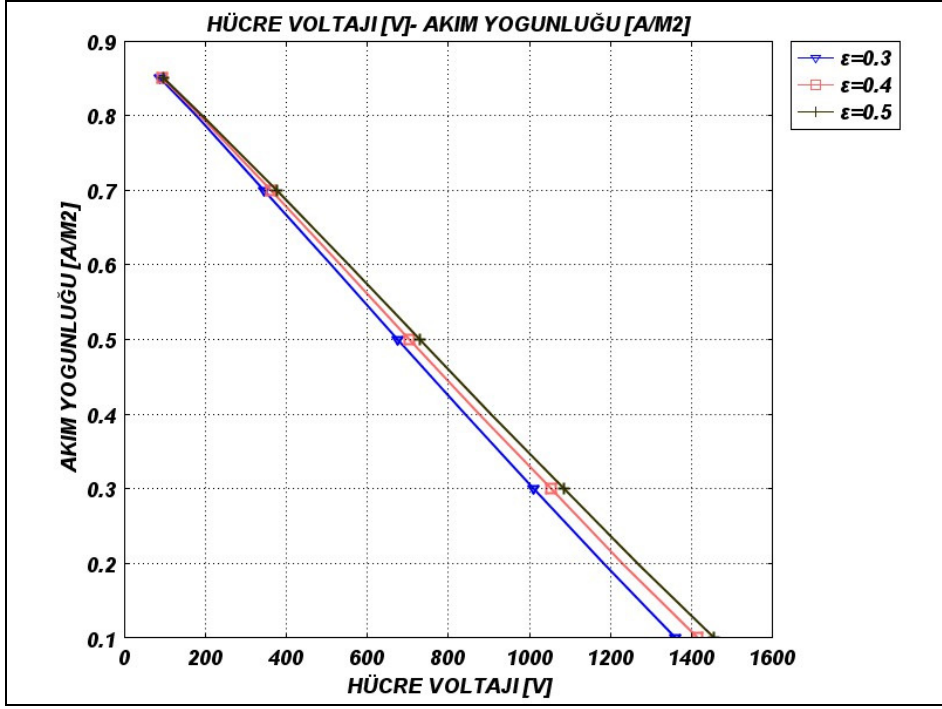


Şekil 9.28 Polarizasyon eğrisi

Katı oksitli yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın ve gözenekliliğin etkisi sırasıyla Şekil 9.29 ve Şekil 9.30'da gösterilmiştir. Üç farklı sıcaklıkta (700 °C, 800 °C, 900 °C) modelden alınan sonuçlar, sıcaklık arttıkça polarizasyon eğrisinin sağa kaydığını ve hücre performansının arttığını göstermektedir. Aynı şekilde, üç farklı gözeneklilikte (% 30, 40, 50) modelden alınan sonuçlar, gözeneklilik arttıkça polarizasyon eğrisinin sağa kaydığını ve hücre performansının arttığını göstermektedir.



Şekil 9.29 Sıcaklığın hücre performansına etkisi



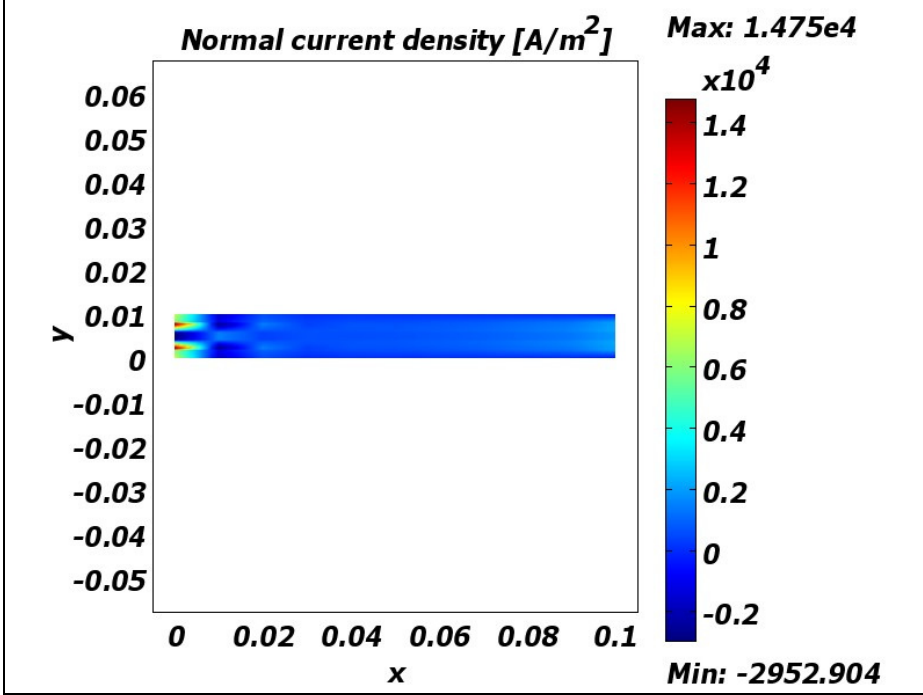
Şekil 9.30 Gözenekliliğin hücre performansına etkisi

0,5 V polarizasyonda Anot ve iyonik iletken arasındaki temas tabakasındaki akım yoğunluğunu oluşturabilmek için aşağıdaki adımlar izlenir:

- “Postprocessing>Domain Plot Parameters” menüsü seçilir.
- “General” sayfada “Solutions to use” listesinden “0.5” seçilir. “Element refinement” için “Auto” temizlenir ve “7” yazılır.
- “Surface” sayfasında “Boundary 9” (anot ve iyonik iletken arasındaki ara yüzey) seçilir. “Predefined quantities” listesinden

“Conductive Media DC (electronic)>Normal current density” seçilir.

- “x- and y-axis” data alanında “xy-plane” seçilir.
- “OK” tuşuna basılır.

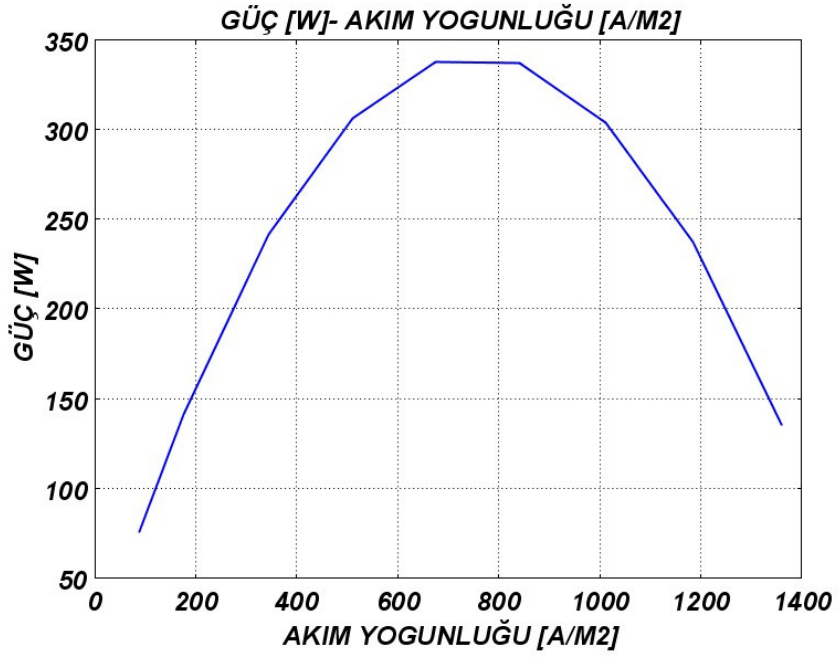


Şekil 9.31 Akım yoğunluğu

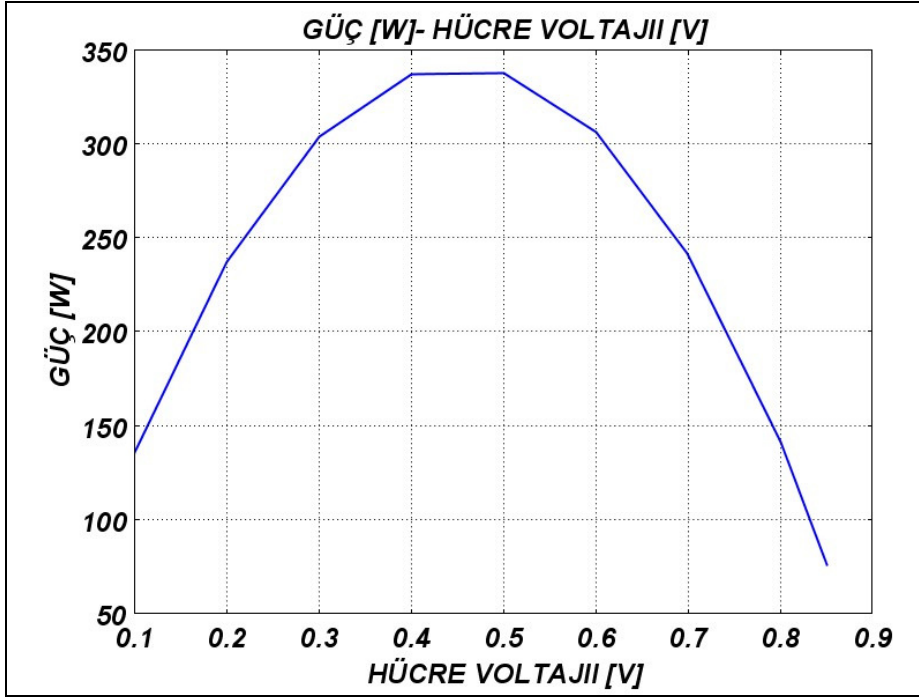
Maksimum gücün üretildiği hücre voltajını oluşturabilmek için aşağıdaki adımlar izlenir:

- Postprocessing>Domain Plot Parameters seçilir.
- General sayfada Solutions to use listesinden tüm çözümler seçilir.
- Point sayfasında Expression alanında P_out yazılır.
- Herhangi bir nokta seçilir.

- x-axis data alanında alttaki düğmeye sonra Expression tuşuna basılır.
- X-Axis Data kutusunda Expression alanında V_cell yazılır.
- OK tuşuna basılır.



Şekil 9.32 Güç çıkışı- akım yoğunluğu



Şekil 9.33 Güç çıkışı-hücre voltajı

9.6 Deneysel Çalışma İle Model Karşılaştırması

Katı oksitli yakıt pili modeli, literatürden alınan deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada (Suwanwarangkul et al., 2006) kullanılan elektrokimyasal hücre, elektrolit destekli hücredir. Elektrolit, % 3 mol itriyum oksit ile katkılandırılmış zirkonyum oksit olup kalınlığı 150 μm 'dir. Anot malzemesi, Ni-CeO₂-YSZ olup kalınlığı 50 μm 'dir. Katot malzemesi, La_{0.7}Sr_{0.2}MnO_{3- δ} olup kalınlığı 50 μm 'dir. Sentez gaz ile çalışan hücrenin gaz kompozisyonları, Çizelge 9.19'da verilmiştir.

Çizelge 9.19 Gaz kompozisyonu

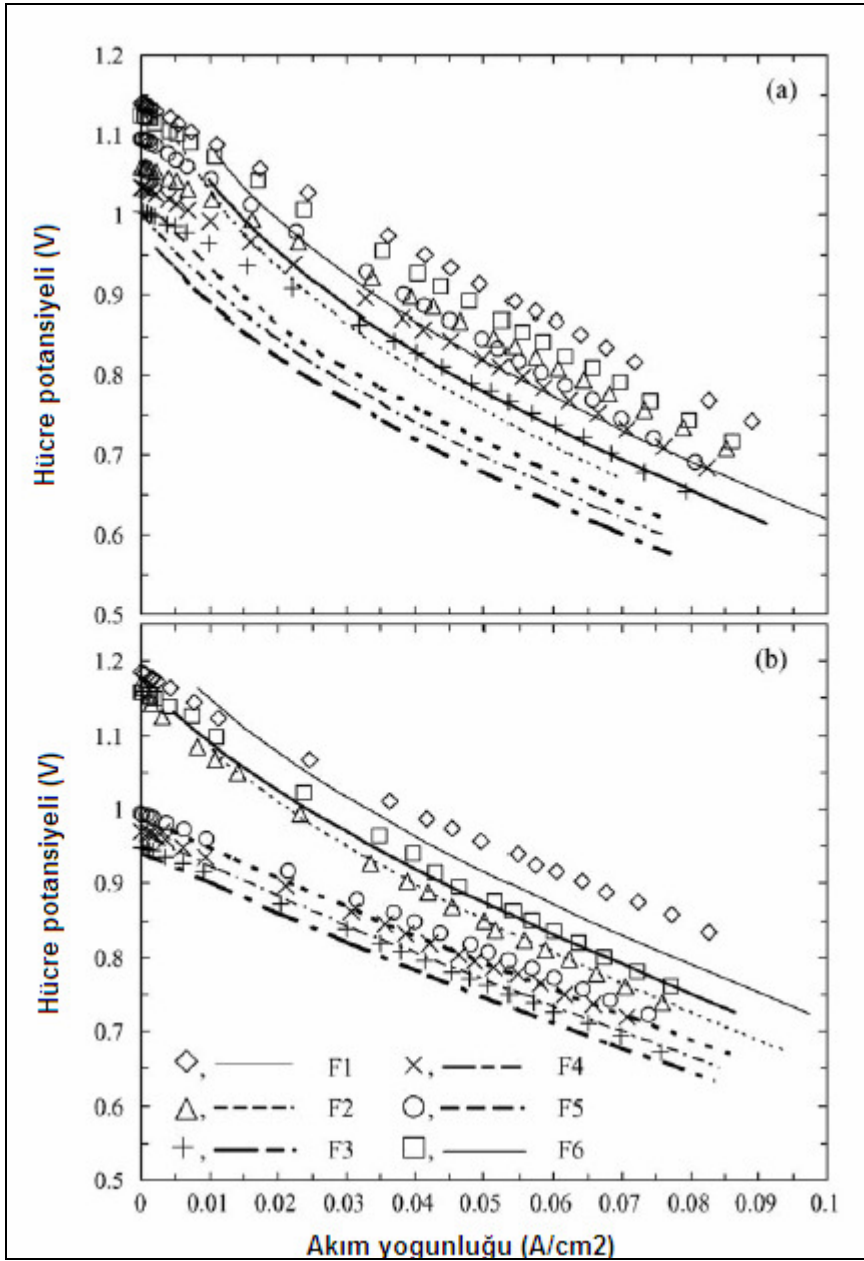
Yakıt no	Gaz kompozisyonu				
	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	N ₂
F1	97	3	-	-	-
F2	20	3	-	-	80
F3	20	3	-	14	66
F4	20	3	20	14	43
F5	32	3	45	15	3
F6	20	3	20	0	57

Deneysel koşullar, Çizelge 9.20’de verilmiştir. Deneysel çalışmada farklı gaz kompozisyonları kullanılmıştır. Sonuçlar, 800 °C ve 900 °C için alınmış olup hücre performansları Şekil 9.32’ de (Suwanwarangkul et al., 2006) sunulmuştur.

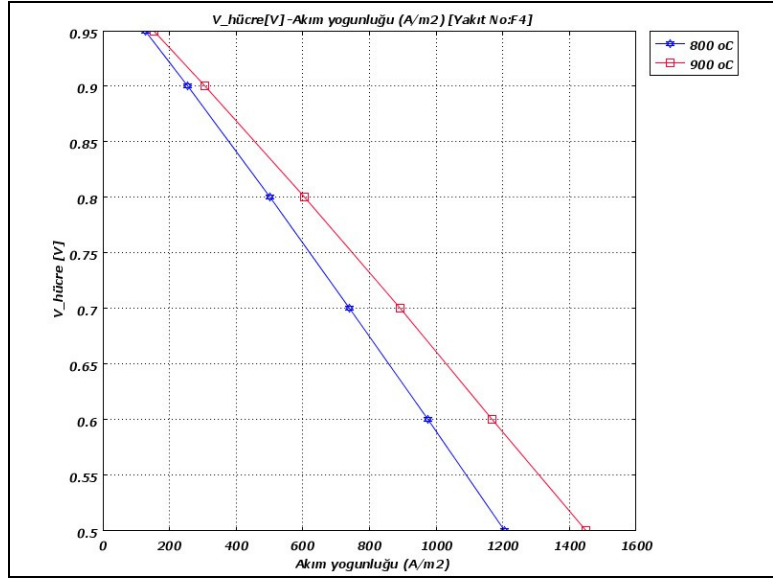
Çizelge 9.20 Deneysel koşullar

Basınç (Pa)	1 atm (101,35 kPa)
Sıcaklık	800 ve 900 °C
Yakıt gaz kompozisyonu	F4 ve F5
Oksidan	Hava
Hücre potansiyeli	0,5-1,0 V

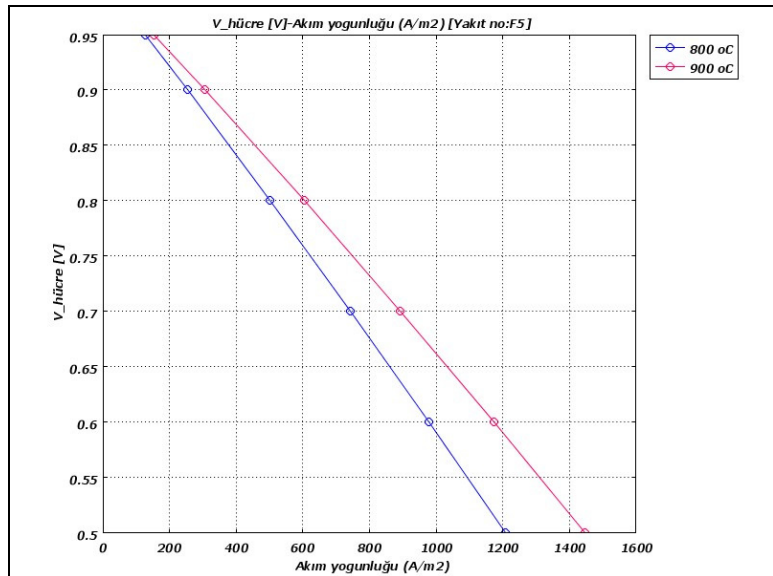
F4 yakıt numarası ile gösterilen gaz kompozisyonunun 800 °C ve 900 °C sıcaklıktaki model hücre performansları Şekil 9.33’de; F5 yakıt numarası ile gösterilen gaz kompozisyonunun 900 °C sıcaklıktaki model hücre performansları Şekil 9.34’de gösterilmiştir.



Şekil 9.34 Deneysel hücre performansları (a) 800 °C (b) 900 °C



Şekil 9.35 Modellenen hücre performansı (Yakıt no:F4)



Şekil 9.36 Modellenen hücre performansı (Yakıt no:F5)

10. SONUÇ VE TARTIŞMA

NATO F-76 dizel yakıtlı katı oksitli yakıt pili sisteminin toplam verimi % 55,28 olup, 120 kW elektrik güç üretimi için toplam yakıt sarfiyatı toplam 30 kg/saat hesaplanmıştır. Su üstü gemide mevcut 2 adet dizel jeneratörün 120 kW elektrik güç üretimi için toplam yakıt sarfiyatı 40 kg/saat F-76 dizel yakıtıdır. Dizel jeneratör grubu yerine katı oksitli yakıt pili sisteminin kullanılması ile tasarruf edilen yakıt miktarı 10 kg/saat F-76 dizel yakıtıdır. Yakıt pili sistemi ile su üstü gemide % 25 yakıt tasarrufu sağlanabilecektir.

120 kW elektrik güç üretimi için gereken 170 mm x170 mm boyutunda toplam 1350 yakıt hücresi, her levhada 9 hücre olmak üzere her dizinde 75 adet levha seri bağlanmış olarak toplam 2 dizin tasarlanmıştır. Dizinler, birbirine seri olarak bağlanmıştır. Toplam sistem kütesinin yaklaşık 520 kg, hacminin ise 2 m³ olacağı bulunmuştur. 2 adet dizel jeneratör grubunun toplam kütesi, 2486 kg; hacmi ise 5 m³ 'tür. Yakıt pili dizinleri, ağırlık ve yer problemi yaratmaksızın su üstü savaş gemisinde istenilen yerlere modüler olarak kurulabilir.

F-76 dizel yakıtlı katı oksitli yakıt pili sisteminden çevreye atılan emisyon sadece 423 g CO₂/kWh olup, dizel motorlu yardımcı makinaya göre % 52,47 daha düşüktür. Yakıt pili sisteminde, IMO/ MARPOL'un gemilerde sınırlandırdığı NO_x ve SO_x emisyonları bulunmamaktadır. Su üstü gemide mevcut dizel motorun yaydığı NO_x emisyonu, MARPOL Ek VI limitlerini (10,898 g/kWh NO_x, n=1200 rpm'de) aşmaktadır. NATO F-76 dizel yakıtlı katı oksitli yakıt pili sistemi, MARPOL 73/78/97- EK VI protokolünü ve hatta daha fazlasını sağlamakta tam güvence sağlar.

Su üstü geminin yardımcı makina dairesinde gürültü seviyesi 100 dB(A) ölçülmüştür. Yakıt pili sisteminde hareketli parça olarak sadece dizel/su pompası ve hava fanı bulunmaktadır. Hava fanı gürültü seviyesi yaklaşık 70 dB(A) civarındadır. Ancak, fan bir kutu ses yalıtım kabineye yerleştirilerek 50 dB(A) civarına düşürülebilir. Gürültü skalasının, logaritmik olduğu ve ses düzeyindeki 10 dB(A)'lik bir değişimin, insan kulağında iki kat farklı algılandığı göz önüne alınacak olursa gürültü seviyesinin bir ofis düzeyindeki kadar çok düşük olduğu anlaşılabilir.

Gemi servis elektriği DC (doğru akım) olduğundan ayrıca yakıt pili çıkışında DC gerilimi, AC (alternatif akım) gerilime çevirecek bir invertere ihtiyaç duyulmamıştır. Bu nedenle; sistemin toplam maliyeti önemli ölçüde azaltılmış ve inverter verimindeki yaklaşık % 5'lik kayıp önlenmiştir.

Yakıt pili sisteminde yer alan diğer bileşenlerden kükürt arıtıcı, fan, su/yakıt pompalarının güçleri hesaplanmış, 7 adet ısı değiştiricinin ısı tasarımı yapılmıştır.

NATO F-76 dizel yakıtının ototermal yakıt dönüşümünü tanımlayan kinetik modele dayalı bilgisayar hesaplamalı bir ATR optimizasyonu geliştirilmiştir. Bu model, belirli bir aralıktaki boşluk hızı ve sıcaklıklarda reaksiyon ürünlerini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Tasarım esnasında seçilen buhar-karbon ile oksijen karbon oranları, reaktör boyutlarını etkilemektedir. Ototermal reaktör olarak 2 farklı tip reaktör modeli üzerinde çalışılmıştır: Sürekli karıştırmalı tank reaktörü ve boru tipi (piston akışlı) reaktör.

Simülasyonumuz, optimum ATR hacmini belirlemiştir. Model hesaplamaları, ticari yazılım COMSOL Reaction Engineering Lab® ile yapılmıştır. 120 kW güç üreten katı oksitli yakıt pili sisteminde maksimum hidrojen konsantrasyonunu sağlayan optimum ototermal reaktör hacmi, CSTR için 14 litre, PFR için ise 1 litre bulunmuştur. Borusal reaktör hacmi, CSTR'ye göre oldukça küçüktür.

Verilen bir hücre geometrisi için katı oksitli yakıt pilinin performansı, işletme koşullarına ve giriş yakıt kompozisyonuna bağlıdır. Anot kanalındaki gazlarımız, hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit, su buharı ve azottur. Katot kanalındaki gazımız ise oksijen ve azottur.

Gözenekli katot ve hava kanalında oksijen dağılımı Şekil 9.20'de azot dağılımı ise Şekil 9.21'de gösterilmiştir. Hava kanalındaki oksijen gradyanı, gözenekli katottan geçen oksijenden daha çıkmıştır. Katot kalınlığı, anoda göre daha küçük olmasına rağmen katottaki oksijen difüzivitesi, anottaki hidrojen difüzivitesinden daha küçük çıkmıştır. Bu yüzden, katot çıkışında oksijen konsantrasyonu gradyanı büyük çıkmıştır. Oksijenin kütle oranı, girişte % 23,3; çıkışta ise yaklaşık % 17 hesaplanmıştır. Azotun kütle oranı, girişte % 76,7; çıkışta ise % 85 bulunmuştur.

Gözenekli anot ve yakıt kanalında hidrojen, su, karbonmonoksit, karbondioksit ve azot dağılımı sırası ile Şekil 9.22-9.26'da gösterilmiştir. Anot kanalına girişte kütle oranlar; hidrojen için % 3,31, su buharı için % 36,8, karbonmonoksit için % 7,73, karbondioksit için % 24,3, azot için %28'dir. Anot kanalı çıkışında kütle oranlar; hidrojen için yaklaşık % 1,8, su buharı için yaklaşık % 33, karbonmonoksit için yaklaşık % 6,8, karbondioksit için yaklaşık % 21, azot için yaklaşık % 36 bulunmuştur.

Akış kanallarında ve gözenekli elektrotlardaki gaz hızları, Şekil 9.27' de gösterilmiştir. Oklar, akışkan hızı ile orantılı olarak akımın yönünü göstermektedir. Yakıtın maksimum hızı, 0,45 m/s; havanın maksimum hızı 0,7 m/s bulunmuştur. Gözenekli elektrotlardaki hız değişimi, gaz kanallarına göre daha az olduğu gözlenmiştir.

Polarizasyon eğrisi incelendiğinde akım yoğunluğu arttıkça hücre voltajının azaldığı görülmektedir. Modelde ele alınan yakıt hücresi için maksimum güç çıkışı, 0,5 V hücre voltajında oluşmaktadır. 0,5 V için maksimum güç, 325 W olup, akım yoğunluğu 700 A/m^2 'dir.

Katı oksitli yakıt pili modeli performansını tahmin etmek ve modelin yeteneğini değerlendirebilmek için, model tahminleri çeşitli gaz kompozisyonları kullanılarak elde edilen literatürden alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. F4 ve F5 numaralı yakıt kompozisyonlarının $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki modelde elde edilen hücre voltajı- akım yoğunluğu eğrileri, deneysel çalışma ile uyum içindedir. Örneğin; F4 yakıtının $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de iken deneysel olarak $0,8 \text{ V-}450 \text{ A/m}^2$ elde edilen değer, modelde $0,8 \text{ V-}500 \text{ A/m}^2$ tahmin edilmiştir. F4 yakıtının $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de iken deneysel olarak 500 A/m^2 elde edilen değer, modelde $0,8 \text{ V-}600 \text{ A/m}^2$ tahmin edilmiştir. Sonuçlardaki farklılıklar, deneysel çalışmada kullanılan malzemenin mikroyapısının modeldekinden farklı oluşundan kaynaklanmaktadır.

Katı oksitli yakıt pilinin performansı, sıcaklık, gözeneklilik ve geçirgenlik arttıkça artmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acharya, Prabha, Ramchandra**, 2004, An Advanced Fuel Cell Simulator, Texas A&M University
- Ahmed, S., Krumpelt, M.**, 2001, Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy* 26, 191–301.
- Amphlett, J.C., R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, A. Rodrigues, J.P. Salvador**, 1998, “Simulation of a 250 kW Diesel Fuel Processor / PEM Fuel Cell System.” *J. Power Sources* 71 (1998) 179–184.
- Anchasa Pramuanjaroenkij, Sadik Kakac, Xiang Yang Zhou**, 2008, Mathematical Analysis Of Planar Solid Oxide Fuel Cells, *International Journal Of Hydrogen Energy* 33, 2547 – 2565
- Bard, A. J., and Faulkner, L. R.** (2001). *Electrochemical Methods Fundamentals and Application*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N.** (2002). *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc.
- Bossel, U.**, 1992, “Facts and Figures, Final Report on SOFC Data”, Swiss Federal Office of Energy, Operating Task II, Berne, Switzerland, April,
- Bourne, C., Nietsch, T., Griffiths, D. , Morley, J.**, 2001, Application of Fuel Cells In Surface Ships, ETSU F/03/00207/REP
- Bove R, Ubertini S.**, 2006, Modeling solid oxide fuel cell operation: approaches, techniques and results. *J Power Sources*, 159:543–59

KAYNAKLAR (devam)

- Chaisantikulwat, A, Diaz-Goano, C, Meadows, E, S,** 2008, Dynamic modelling and control of planar anode-supported solid oxide fuel cell, *Computers and Chemical Engineering* 32 (2008) 2365–2381
- Chan SH, Xia ZT.,** 2002, Polarization effects in electrolyte electrode supported solid oxide fuel cells., *J Appl Electrochem*, 32: 339–47.
- Chan, S. H., Low, C. F., and Ding, O. L.** (2002). "Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems." *Journal of Power Sources*, 103(2), 188-200.
- COMSOL,** 2005, User Guide, COMSOL Inc., Burlington, MA.
- Corbett, James J. and Farrell, Alex,** 2002, Mitigating Air Pollution Impacts of Passenger Ferries, *Transportation Research Part D* 7,197-211
- Çoban, M.,TURHAN,** Java 2 Programlama Kılavuzu, ALFA Yayınevi, Ticarethane Sok no 41/1 34410 Cagaloglu, Istanbul, ISBN 975-316-631-1
- Curtiss, C.F. and Bird R.B.,** 1999, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 38, p.2515
- D. Fardad and N Ladommatos,** Evaporation of hydrocarbon compounds, including gasoline and diesel fuel, on heated metal surfaces, *Proc Instn Mech Engrs Vol 213 Part D*
- Dong Hyup Jeon,** 2009, A comprehensive CFD model of anode-supported solid oxide fuel cells, *Electrochimica Acta* 54, 2727–2736

KAYNAKLAR (devam)

- Endresen.Q.,Sorgard.E.,Sundet.J.K.,Dalsoren S.B.,Berglen T.F.,Gravir G. And Isaksen I.S.A.**, 2003, Enviromental impact of international sea transportation, accepted by the Journal of Geophysical Research
- Fardad, D. And Ladommatos, N.**,1999, Evaporation of hydrocarbon compounds, including gasoline and diesel fuel, on heated metal surfaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers- Part D-
- Francesco Baratto, Urmila M. Diwekar, Davide Manca**, 2005, Impacts assessment and trade-offs of fuel cell-based auxiliary power units Part I: System performance and cost modeling, Journal of Power Sources 139 (2005) 205–213
- G.Steinfeld, R.Sanderson, H.Ghezel-Ayagh,S. Abens**, 2000, Distillate Fuel Processing For Marine Fuel Cell Applications, AICHE Spring 2000 Meeting
- Gunter Sattler**, 2000, Fuel cells going on-board, Journal of Power Sources 86, 61–67
- Herschenhofer, J. H., Stauffer, D. B., Engleman, R. R., and Klett, M. G.** (1998). Fuel Cell Handbook, Parsons Corporation.
- Hocine Ben Moussa, Bariza Zitouni, Kafia Oulmib, Bouziane Mahmahc, Maiouf Belhamelc, Philippe Mandind**, 2009, Hydrogen consumption and power density in a co-flow planar SOFC, International j ournal of hydrogen energy
- International Maritime Organization**, 1998, Annex VI of MARPOL 73/78 “Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships”, International Maritime Organization, London, UK

KAYNAKLAR (devam)

- Inyong Kang, Joongmyeon Bae, 2006**, Autothermal reforming study of diesel for fuel cell application, *Journal of Power Sources* 159,1283–1290
- Iordanidis, A.A., 2002**, Mathematical Modeling of Catalytic Fixed Bed Reactors, Ph.D. thesis University of Twente
- Jong H. Jang, Ji H. Ryu and Seung M. Oh, 2000**, Microstructure of Ni/YSZ Cermets According to Particle Size of Precursor Powders and Their Anodic Performances in SOFC, *Ionics* 6
- Kays, William and London, A.L., 1964**, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, USA
- Kraaij, G.J., Van Selow, E.R., van den Oosterkamp, P.F., 2003**, Conceptual design of a 2.5MW fuel cell system for naval ships, in: AVT Conference, Brussels, 7–9 April 2003.
- Krummricha, S., Tuinstra B., Kraaij, G., Roes J., Olgun, H., 2006**, Diesel fuel processing for fuel cells—DESIRE, *Journal of Power Sources* 160 (2006) 500–504
- Lars J. Pettersson, Roger Westerholm, 2001**, State of the art of multi-fuel reformers for fuel cell vehicles: problem identification and research needs, *International Journal of Hydrogen Energy* 26, 243–264
- Marte Reenaas, 2005**, Solid Oxide Fuel Cell Combined With Gas Turbine Versus Diesel Engine As Auxiliary Power Producing Unit Onboard a Passenger Ferry

KAYNAKLAR (devam)

Matsuzaki, Y., and Yasuda, I., 2000, J. Electrochem. Soc., 147 (5) 1630-1635

Matthew M. Mench, 2008, Fuel Cell Engines, John Wiley & Sons, Inc.

NATO, 2006, Standardization Agreement (STANAG) Stanag No:1385 (Edition 3), Guide Specification For Naval Distillate Fuels

Osamu Yamamoto, 2000, Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects, Electrochimica Acta 45 (2000) 2423–2435

P. Holtappels, L.G.J. DeHaart, U.Stimming, I.C. Vinke, and M. Mogensen, 1999, “Reaction of CO/CO₂ gas mixtures on Ni±YSZ cermet electrodes,” J. Appl. Electrochem., 29, 561-568

Perry RH. et al.,1997, Perry’s chemical engineers’ handbook. seventh ed.,New York: McGraw-Hill

Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E.,1987, “The properties of Gases and Liquids”, McGraw-Hill, New York

Robert J. Braun, 2002, Optimal Design And Operation Of Solid Oxide Fuel Cell Systems For Small-Scale Stationary Applications, Doctor Of Philosophy (Mechanical Engineering), University Of Wisconsin –Madison

Sarioglan, A., Olgun, H. ,Baranak, M., Ersoz, A., Atakul, H., Ozdogan,S., 2007, Diesel evaporation as the first step of hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy 32, 2895 – 2901

KAYNAKLAR (devam)

- S. Katikaneni, C. Yuh, S. Abens, M. Farooque**, 2002, The direct carbonate fuel cell technology: advances in multi-fuel processing and internal reforming, *Catalysis Today* 77, 99–106
- Shi Yixiang, Cai Ningsheng, Li Chen.**, 2007, Numerical modelling of an anode-supported SOFC button cell considering anodic surface diffusion. *J Power Sources* 164:639–48.
- Song, S., Wang, Z., and Li, W.** ,1993, *Physical Chemistry*, High Education Press.
- Sorell, G.**, 1998, Corrosion-and heat-resistant nickel alloys, Guidelines for selection and application, Nickel Development Institute Technical Series No:10086
- Stiller, Christoph**, 2006, Design, Operation and Control Modelling of SOFC/GT Hybrid Systems, Doctoral Theses at NTNU, 2006:28, Norwegian University of Science and Technology
- Subhash,C,Singhal and Kevin Kendall**, 2003, *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*
- Sunden, Bengt**, 2005, *High Temperature Heat Exchangers (HTHE)*, Proceedings of Fifth International Conference, Science, Engineering and Technology
- Suwanwarangkul, R., Croiset ,E, Entchev, E., S. Charojrochkul, M.D. Pritzker, M.W. Fowler, P.L. Douglas, S. Chewathanakup, H. Mahaudom**, 2006, Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel, *Journal of Power Sources* 161 (2006) 308–322

KAYNAKLAR (devam)

- Thin X.Ho, PawelKosinski, AlexC.Hoffmann, ArildVik**, 2009, Modeling of transport, chemical and electrochemical phenomena in a cathode-supported SOFC, Chemical Engineering Science 64 (2009) 3000 – 3009
- Thorud, Bjorn**, 2005, Dynamic Modelling and Characterisation of a Solid Oxide Fuel Cell Integrated in a Gas Turbine Cycle, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology
- Türk Standartları Enstitüsü**, 2007, TS 5996, Askeri Yakıtlar-Dizel Yakıtı-F-76- Askeri Deniz Araçları İçin
- Türk Loydu**, 2005, Cilt C, Kısım 26, Gemilerde Yakıt Pili Sistemlerinin Kullanımı İle İlgili Esaslar
- U.S. Department of Defense**, 2006, MIL-DTL-16884L, Detail Specification Fuel Naval Distilate
- U.S. Department of Energy**, 2004, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)
- Virkar, A. V., Chen, J., Tanner, C. W., and Kim, J.-W.** , 2000, "The role of electrode microstructure on activation and concentration polarizations in solid oxide fuel cells." Solid State Ionics, 131(1-2), 189-198.
- F.H. Wang, R.S. Guo, Q.T. Wei, Y. Zhou, H.L. Li, S.L. Li**, 2004, Preparation and properties of Ni/YSZ anode by coating precipitation method, Materials Letters 58, 3079– 3083
- Wesselingh, J. A. and Krishna, R.** , 2000, *Mass Transfer in Multicomponent Mixtures*, Delft University Pres

KAYNAKLAR (devam)

Yakabe H, Sakurai T.,2004, 3D simulation on the current path in planar SOFCs. Solid State Ionics, 174:295–302.

Yaneeporn Patcharavorachot, Amornchai Arpornwichanop, Anon Chuachuensuk, 2008, Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell:Role of support structures, Journal of Power Sources 177, 254–261

EKLER

EK 1 LKmixTable.java

```
//
=====
// Thermodynamics package in java
// GasPropertySWF class to calculate properties of gases
// user interface (JFrame)
// Dr. Turhan Coban
// TUBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
// email : Turhan.Coban@ume.tubitak.gov.tr
//
=====

import java.io.*;
import java.applet.Applet;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import java.util.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.table.*;

public class LKmixTable extends JApplet implements
ActionListener,ItemListener,Serializable
{
    String s1[]={ "t p", "t v", "t x", "p x" };
    String s2[]={ "mole", "mass" };
    double iv[]=new double[2];
    double[] giv=new double[3];
    String pair;
    String base;
    JScrollPane ScrollPane1;
    JScrollPane ScrollPane2;
    String stn1;
    String stn2;
    JPanel inputPanel;
    JPanel outputPanel;
}
```

```

JPanel totalPanel;
JLabel l1[]=new JLabel[5];      // Label
JLabel l2[]=new JLabel[5];      // Label
JTextField t1[]=new JTextField[3]; // input fields
JComboBox c1[]=new JComboBox[3]; // selection field
JTextArea outputTextArea;
LKmixModel gm;
public LeeKeslerMix g1;
JTable jt;
double T;
double P;
public String gasName;

protected File RealGasMixFile;
protected StringTokenizer token;
String st[];
Color bg;
Color fg;

public void init()
{
    Container c=getContentPane();
    c.setLayout(new FlowLayout());
    bg=c.getBackground();
    fg=c.getForeground();
    //adding max-min prompts and input fields
    gasName=new String("dizel");
    //unit="SI";
    base="mole";
    pair="t p";
    stn2="tp";
    iv[0]=350;
    iv[1]=1.0135;
    T=iv[0];
    P=iv[1];
    inputPanel=new JPanel();
    inputPanel.setLayout(new GridLayout(5,3,80,1));
    outputPanel=new JPanel();
    outputPanel.setLayout(new BorderLayout());

```



```

totalPanel=new JPanel();
totalPanel.setLayout(new BorderLayout());
c1[0]=new JComboBox(s1);
c1[1]=new JComboBox(s2);
try{
    g1=new LeeKeslerMix(gasName);
    token=new StringTokenizer(g1.readGmixNames());
    st=new String[token.countTokens()];
    } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
int i=0;
while(token.hasMoreTokens())
{
    st[i++]=new String((String)token.nextToken());
}
c1[2]=new JComboBox(st);
t1[0] = new JTextField();
t1[1] = new JTextField();
t1[2] = new JTextField();
t1[2].setText(gasName);
gasName=(String)c1[2].getSelectedItem();
try{
    g1=new LeeKeslerMix(gasName);
    } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
l1[0]=new JLabel("known properties ");
fg=l1[0].getForeground();
l1[1]=new JLabel("mass/mole ");
l1[2]=new JLabel("gas Name ");
l1[3]=new JLabel("temperature ");
l1[4]=new JLabel("pressure ");
l2[0]=new JLabel(" ");
l2[1]=new JLabel(" ");
l2[2]=new JLabel(" ");
l2[3]=new JLabel(" degree C ");
l2[4]=new JLabel(" bars ");
outputTextArea=new JTextArea();
Font fn=l1[0].getFont();
for(i=0;i<5;i++)
{ l1[i].setBackground(Color.lightGray);
  l2[i].setBackground(Color.lightGray);
}

```

```
    }
    t1[0]=new JTextField(""+iv[0]);
    t1[1]=new JTextField(""+iv[1]);
    for(i=0;i<3;i++)
    {   t1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
    for(i=0;i<3;i++)
    {   c1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
    outputTextArea.setBackground(bg);
    outputTextArea.setForeground(fg);

    outputTextArea.setFont(fn);

    inputPanel.add(l1[0]);
    inputPanel.add(c1[0]);
    inputPanel.add(l2[0]);

    inputPanel.add(l1[1]);
    inputPanel.add(c1[1]);
    inputPanel.add(l2[1]);

    inputPanel.add(l1[2]);
    inputPanel.add(c1[2]);
    inputPanel.add(t1[2]);

    inputPanel.add(l1[3]);
    inputPanel.add(t1[0]);
    inputPanel.add(l2[3]);

    inputPanel.add(l1[4]);
    inputPanel.add(t1[1]);
    inputPanel.add(l2[4]);

    c1[0].addItemListener(this);
    c1[1].addItemListener(this);
    c1[2].addItemListener(this);

    t1[0].addActionListener(this);
    t1[1].addActionListener(this);
    t1[2].addActionListener(this);
```

```

double TK=T+273.0;
gm=new LKmixModel(g1,T,P);
giv=gm.getInitialValues();
//System.out.println(Matrix.toString(giv));
jt=new JTable(gm);
jt.setBackground(bg);
jt.setFont(fn);
setArea();
ScrollPane1 =new JScrollPane(outputTextArea,
        JScrollPane.VERTICAL_SCROLLBAR_ALWAYS,
        JScrollPane.HORIZONTAL_SCROLLBAR_ALWAYS);

ScrollPane1.setPreferredSize(new Dimension(300, 150));
ScrollPane1.setViewportBorder(
        BorderFactory.createLineBorder(Color.black));

ScrollPane2 =new JScrollPane(jt,
        JScrollPane.VERTICAL_SCROLLBAR_ALWAYS,
        JScrollPane.HORIZONTAL_SCROLLBAR_ALWAYS);
ScrollPane1.setViewportBorder(
        BorderFactory.createLineBorder(Color.blue));

outputPanel.add(ScrollPane1, BorderLayout.NORTH);
outputPanel.add(ScrollPane2, BorderLayout.SOUTH);
totalPanel.add(inputPanel, BorderLayout.NORTH);
totalPanel.add(outputPanel, BorderLayout.SOUTH);
c.add(totalPanel, BorderLayout.NORTH);
}

public void setArea()
{
    t1[0].setText(Double.toString(iv[0]));
    t1[1].setText(Double.toString(iv[1]));
    String s="additional data can be added to RealGasMix.txt file \n";
    s+="Dr. Turhan Çoban, \n";
    s+="Ulusal Metroloji Enstitüsü, (UME) TÜBİTAK\n";
    s+="phone : 90(262)6466355-525 email :
turhan.coban@ume.tubitak.gov.tr\n";
    //note if you would like to list additional information on the screen

```

```

//add to string s
s+="Gas Formula : \n"+g1.toString("formula")+"\n";
//System.out.println(stn2+iv[0]+" "+iv[1]);
gm.setValues(g1,stn2,iv[0],iv[1]);
giv=gm.getInitialValues();
outputTextArea.setText(s);
}

public void itemStateChanged(ItemEvent ev)
{
gasName=(String)c1[2].getSelectedItem();
t1[2].setText(gasName);
pair=(String)c1[0].getSelectedItem();
/*if(unit=="EN") {l2[3].setText(" degree F          ");
                l2[4].setText(" psia (lbf/in^2          ");}
else {l2[3].setText(" degree C          ");
      l2[4].setText(" bars          ");}*/
base=(String)c1[1].getSelectedItem();
try{
g1=new LeeKeslerMix(gasName);
//g1.base(base);
//g1.unit(unit);
t1[0].setText(" ");
t1[1].setText(" ");
} catch(IOException ioe1) {System.out.println("IOException");}
//g1.property(T,P);
StringTokenizer stn=new StringTokenizer(pair);
stn1="";
stn2="";
for(int y=3;y<=4;y++){
stn1=stn.nextToken();
//System.out.println(y+" "+stn1);
if(stn1.equals("t")){
l1[y].setText("temperature");
l2[y].setText("degree C");
iv[y-3]=350;
}
else if(stn1.equals("p")){
l1[y].setText("pressure");
}
}

```

```

l2[y].setText("bar");
iv[y-3]=1;
}
else if(stn1.equals("v")){
    l1[y].setText("specific volume");
    l2[y].setText("m3/kmole");
    iv[y-3]=giv[0];
}
else if(stn1.equals("h")){
    l1[y].setText("specific enthalpy");
    l2[y].setText("kJ/kmole");
    iv[y-3]=giv[1];
}
else if(stn1.equals("s")){
    l1[y].setText("specific entropy");
    l2[y].setText("kJ/kmole.K");
    iv[y-3]=giv[2];
}
else if(stn1.equals("x")){
    l1[y].setText("quality");
    l2[y].setText(" ");
    iv[y-3]=0.5;
}
}
stn2+=stn1;
//System.out.println(stn2);
//System.out.println(l1[y].getText());
}
setArea();
repaint();
}

```

```

public void actionPerformed( ActionEvent e)
{
    if(e.getSource()==t1[2])
    {
        String st1=(String)c1[2].getSelectedItem();
        gasName=st1;
        String st2=t1[2].getText();
    }
}

```

```

for(int j=0;j<st.length;j++)
{
    if(st[j].equals(st2))
    {
        gasName=st2;
        c1[2].setSelectedItem(st2);
        try{
            g1=new LeeKeslerMix(gasName);
            /*g1.base(base);
            g1.unit(unit);*/
        } catch(IOException ioe1)
        {System.out.println("IOException");}
        break;
    }
}
}
Double val0=new Double(t1[0].getText());
iv[0]=val0.doubleValue();
Double val1=new Double(t1[1].getText());
iv[1]=val1.doubleValue();
getContentPane().setLayout(new FlowLayout(FlowLayout.CENTER));
setArea();
repaint();
}

public static void main(String s[]) {
    JFrame f = new JFrame("Properties of Real Gas Mixtures ");
    f.addWindowListener(new WindowAdapter() {
        public void windowClosing(WindowEvent e) {System.exit(0);}
    });
    JApplet applet = new LKmixTable();
    f.getContentPane().add("Center", applet);
    applet.init();
    f.pack();
    f.setSize(new Dimension(550,755));
    f.show();
}
}

```

EK 2 reactionTable.java

```

// Thermodynamics package in java
// ReactionTable class to calculate properties of gas Reactions
// user interface (JFrame)
// Dr. Turhan Coban
// EGE Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina böl.
//
=====
=

import java.io.*;
import java.applet.Applet;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import java.util.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.table.*;

public class ReactionTable extends JApplet implements
ActionListener,ItemListener,Serializable
{
    static final long serialVersionUID = 608749200350614100L;
    String s1[]={ "SI", "EN" };
    String s2[]={ "mole" };
    String unit;
    String base;
    JPanel inputPanel;
    JPanel outputPanel;
    JPanel totalPanel;
    JLabel l1[]=new JLabel[6];      // Label
    JLabel l2[]=new JLabel[6];      // Label
    JTextField t1[]=new JTextField[4]; // input fields
    JComboBox c1[]=new JComboBox[3]; // selection field
    JTextArea outputTextArea;
    public Reaction g1;
    JTable jt;
    double TP,TR;
    double P;

```

```
public String reactionName;
protected File gmixFile;
protected StringTokenizer token;
String st[];
Color bg;
Color fg;

public void init()
{
    Container c=getContentPane();
    c.setLayout(new FlowLayout());
    bg=c.getBackground();
    fg=c.getForeground();
    //adding max-min prompts and input fields
    reactionName=new String("c8h18");
    unit="SI";
    base="mole";
    TR=25.0;
    TP=25.0;
    P=1.01325;
    inputPanel=new JPanel();
    inputPanel.setLayout(new GridLayout(6,3,80,1));
    outputPanel=new JPanel();
    outputPanel.setLayout(new BorderLayout());
    totalPanel=new JPanel();
    totalPanel.setLayout(new BorderLayout());
    c1[0]=new JComboBox(s1);
    c1[1]=new JComboBox(s2);
    try{
        g1=new Reaction(reactionName);
        token=new StringTokenizer(g1.readReactionNames());
        st=new String[token.countTokens()];
    } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}

    int i=0;
    while(token.hasMoreTokens())
    {
        st[i++]=new String((String)token.nextToken());
    }
}
```



```

c1[2]=new JComboBox(st);
t1[0] = new JTextField();
t1[1] = new JTextField();
t1[2] = new JTextField();
t1[3] = new JTextField();
t1[3].setText(reactionName);
reactionName=(String)c1[2].getSelectedItem();
l1[0]=new JLabel("unit system      ");
fg=l1[0].getForeground();
l1[1]=new JLabel("mass/mole      ");
l1[2]=new JLabel("gas Name      ");
l1[3]=new JLabel("Reactant temperature  ");
l1[4]=new JLabel("Product temperature  ");
l1[5]=new JLabel("pressure      ");
l2[0]=new JLabel(" ");
l2[1]=new JLabel(" ");
l2[2]=new JLabel(" ");
l2[3]=new JLabel(" degree C      ");
l2[4]=new JLabel(" degree C      ");
l2[5]=new JLabel(" bars      ");
outputTextArea=new JTextArea();
Font fn=l1[0].getFont();
for(i=0;i<5;i++)
{  l1[i].setBackground(Color.lightGray);
  l2[i].setBackground(Color.lightGray);
}
t1[0]=new JTextField(""+TR);
t1[1]=new JTextField(""+TP);
t1[2]=new JTextField(""+P);
for(i=0;i<3;i++)
{  t1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
for(i=0;i<3;i++)
{  c1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
outputTextArea.setBackground(bg);
outputTextArea.setForeground(fg);
outputTextArea.setFont(fn);
inputPanel.add(l1[0]);
inputPanel.add(c1[0]);
inputPanel.add(l2[0]);

```

```

inputPanel.add(i1[1]);
inputPanel.add(c1[1]);
inputPanel.add(i2[1]);
inputPanel.add(i1[2]);
inputPanel.add(c1[2]);
inputPanel.add(t1[2]);
inputPanel.add(i1[3]);
inputPanel.add(t1[0]);
inputPanel.add(i2[3]);
inputPanel.add(i1[4]);
inputPanel.add(t1[1]);
inputPanel.add(i2[4]);
c1[0].addItemListener(this);
c1[1].addItemListener(this);
c1[2].addItemListener(this);

t1[0].addActionListener(this);
t1[1].addActionListener(this);
t1[2].addActionListener(this);
t1[3].addActionListener(this);
double TPK=TP+273;
double TRK=TR+273;
setArea();
outputPanel.add(outputTextArea,BorderLayout.NORTH);
totalPanel.add(inputPanel,BorderLayout.NORTH);
totalPanel.add(outputPanel,BorderLayout.SOUTH);
c.add(totalPanel,BorderLayout.NORTH);
}

public void setArea()
{
    try{
        g1=new Reaction(reactionName);
        } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
g1.base(base);
g1.unit(unit);
t1[0].setText(" ");
t1[1].setText(" ");
double cc=273,cc1=298.0;

```

```

if(!g1.SI) {cc=459.67;cc1=537;}
double TRK=TR+cc;
double TPK=TP+cc;
double Tadyabatikalev= g1.Taf(TRK,cc1, 3000)-cc;
t1[0].setText(Double.toString(TR));
t1[1].setText(Double.toString(TP));
t1[2].setText(Double.toString(P));
String s="Dr. Turhan Çoban, \n";
s+="Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina müh.\n";
s+="Bornova İzmir Turkey,\n";
s+="phone : 90(232)3434000-5387\n";
s+="email : turhan.coban@mail.ege.edu.tr\n";
//note if you would like to list additional information on the screen
//add to string s
s+="Reaction name : "+g1.toString("name")+"\n";
s+="Reaction formula : "+g1.toString("formula")+"\n";
s+="Reaction composition : "+g1.toString("composition")+"\n";
if(unit.equals("SI"))
{
s+="Reaction enthalpy : "+g1.H(TRK,TPK)+" KJ/kmol fuel\n";
s+="Reaction entropy : "+g1.S(TRK,TPK)+" KJ/kmol fuel K\n";
s+="Reaction gibbs energy : "+g1.G(TRK,TPK)+" KJ/kmol fuel
K\n";
s+="Reaction gibbs energy 0 state : "+g1.G0(TRK,TPK)+" KJ/kmol
fuel K\n";
s+="Adiabatic flame temperature : "+Tadyabatikalev+" C \n";
s+="Vi="+g1.Vi(298,298,2)+" V\n";
s+="Vi0="+g1.Vi0(298,298,2)+" V\n";
s+="fuel cell efficiency : "+g1.G(TRK,TPK)/g1.H(TRK,TPK)+"\n";
s+="fuel cell efficiency o state :
"+g1.G0(TRK,TPK)/g1.H(TRK,TPK)+"\n";
}
else
{
s+="Reaction enthalpy : "+g1.H(TRK,TPK)+" BTU/lbmol
fuel\n";
s+="Reaction entropy : "+g1.S(TRK,TPK)+" BTU/lbmol fuel
F\n";
s+="Adiabatic flame temperature : "+Tadyabatikalev+" R \n";
}
}

```

```

    outputTextArea.setText(s);
}

public void itemStateChanged(ItemEvent ev)
{
    reactionName=(String)c1[2].getSelectedItem();
    t1[3].setText(reactionName);
    unit=(String)c1[0].getSelectedItem();
    if(unit=="EN") {l2[3].setText(" degree F      ");
                    l2[4].setText(" degree F      ");
                    l2[5].setText(" psia (lbf/in^2)  ");}
    else {l2[3].setText(" degree C      ");
          l2[4].setText(" degree C      ");
          l2[5].setText(" bars          ");}
    base=(String)c1[1].getSelectedItem();
    setArea();
    repaint();
}

```

```

public void actionPerformed( ActionEvent e)
{
    if(e.getSource()==t1[3])
    {
        String st1=(String)c1[2].getSelectedItem();
        reactionName=st1;
        String st2=t1[3].getText();
        for(int j=0;j<st.length;j++)
        {
            if(st[j].equals(st2))
            {
                reactionName=st2;
                c1[2].setSelectedItem(st2);
                break;
            }
        }
    }
    Double valTempR=new Double(t1[0].getText());
    TR=valTempR.doubleValue();
}

```

```
Double valTempP=new Double(t1[1].getText());
TP=valTempP.doubleValue();
Double valPressure=new Double(t1[2].getText());
P=valPressure.doubleValue();
getContentPane().setLayout(new FlowLayout(FlowLayout.RIGHT));
setArea();
repaint();
}
    public static void main(String s[]) {
        JFrame f = new JFrame("Thermodynamics of Reaction ");
        f.addWindowListener(new WindowAdapter() {
            public void windowClosing(WindowEvent e) {System.exit(0);}
        });
        JApplet applet = new ReactionTable();
        f.getContentPane().add("Center", applet);
        applet.init();
        f.pack();
        f.setSize(new Dimension(500,650));
        f.setVisible(true);
    }
}
```

EK 3 Gmix.java

```

// File Name   : Gmix.java
// Author      : Dr. Turhan Coban
// TUBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
// email       : Turhan.Coban@ume.tubitak.gov.tr
// Description  : This file contains class gmix which calculates
// thermophysical properties of mixture of perfect gases.
//             following properties can be calculated
//             T()   : Temperature degree K
//             h(T)  : enthalpy KJ/kmol
//             hf    : formation enthalpy KJ/kg
//             ht(T) : total enthalpy KJ/kg (h+hf)
//             M     : molar mass kg/kmol
//             HT(T) : total enthalpy KJ : M*ht(T)
//             P()   : pressure bar
//             s(T,P) : entropy KJ/kmol K
//             Cp(T) : specific heat at constant pressure KJ/kmol K
//             Cv(T) : specific heat at constant volume KJ/kg K
//             gamma(T): adiabatic constant Cp/Cv
//             c(T)  : speed of sound m/s
//             u(T)  : Internal energy KJ/kmol
//             vis(T) : viscosity
//             k(T)  : thermal conductivity KW/kg K
// DATA FILE DEFINATION
// gas mixture definitions are given the data file "Gmix.txt"
// if gas mixture data is not given in the Gmix.txt user can be add
// his own data to the file which has the following format
//-----
// gmixName
// ngas
// gname_0 N_0
// .....
// gname_ngas-1 N_ngas-1
//-----
// and definition : gmix a(gmixName); will defined this gas mixture
// the same mixture can be defined directly in the main program as :
// -----

```

```

// Gas a_0=new Gas("a_0");
//.....
// Gas a_ngas=new Gas("a_ngas");
// Gmix a=new Gmix;
// a=N_0*a_0+...+N_ngas*a_ngas;
// -----
//=====
=====
// VARIABLE IDENTIFICATION
// all the variables that type is not defined is a double variable
// PUBLIC VARIABLES :
// gasName : String class variable of gas mixture name
// ngas   : int variable, number of simple gasses
// N      : total molar mass of the gas mixture
// gasList :gas class vector variables
// All the other variables defined for class gas is also valid for gmix
import java.io.*;
import java.util.*;

//
=====
=====
    class Gmix{
// this class calculates perfect gas thermodynamic
// properties when the perfect gas constitutes of
// several single gases
        boolean mole=false;
        boolean SI=true;
        public int ngas; // number of simple gasses inside of the gas mixture
        String gasName;
        public double M; // molar mass of atom kg/kmol
        public double h0; // enthalpy at T=298 K
        public double hf; // enthalpy of formation
        public double sf; // entropy of formation   kJ/kmol K
        public double N; // moles of gas kmol
        int ierror;
        int natom;      //number of unique atoms in the atom list
        Gas  gasList[]; //list of the component gasses
        Atom atomList[]; //list of component atoms

```

```

    File gmixFile;    // File name and directory
    BufferedReader cfin;
    // construction methods :
//=====definations of class gmix
=====
//constructor functions
    public Gmix(String name) throws IOException
    {
    // class complex gas construction function
    // this function reads the initial gases in
    // the mixture and their molar weight from
    // the file Gmix.txt and construct mixed gas
try{
    cfin=new BufferedReader(new FileReader("Gmix.txt"));
    int ierror=1;
    int i,j;
    N=0;
    M=0;
    hf=0;
    natom=0;
    try{
    while(cfin!=null)
    {
    gasName=Text.readString(cfin);
    if(gasName.equals(name)) { ierror=0; break;}
} //end of while
    } catch(EOFException e_eof)
    {
    System.out.println("error required gas mixture "+name+" is not
found");
    cfin.close();return;
    }
//cfin>>ngas;
ngas=Text.readInt(cfin);
gasList=new Gas[ngas];
    //ierror=0;
    String pgasName;
    double ppercent;
    Gas tempgas;

```



```

    for(i=0;i<ngas;i++)
    {
    pgasName=Text.readString(cfin);
    ppercent=Text.readDouble(cfin);
    //cfin>>pgasName>>ppercent;
    tempgas=new Gas(pgasName,ppercent);
    ierror=tempgas.ierror;
    {
    if(ierror!=1)
    {
        try{
            gasList[i]=new Gas(tempgas);
        } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
        N+=tempgas.N;
        M+=tempgas.N*tempgas.M;
        hf+=tempgas.N*tempgas.hf;
    }
    else
    {
        System.out.println("gas is not found in the list");
        System.out.println("this gas is not added to the list");
        i--;
        ngas--;
    }
    }
    }
    M=M/N;
    hf=hf/N;
    arrange_atoms();
} catch(FileNotFoundException fnfe) {System.out.println("File not
found");}

}
//
=====
=====
public String readGmixNames() throws IOException
{
    String temp=new String("");

```

```

String pgasName;
double ppercent;
try{
    cfin=new BufferedReader(new FileReader("Gmix.txt"));
        try {
            while(cfin!=null)
                {
                    temp=temp+Text.readString(cfin)+ " ";
                    ngas=Text.readInt(cfin);
                    for(int i=0;i<ngas;i++)
                        {
                            pgasName=Text.readString(cfin);
                            ppercent=Text.readDouble(cfin);
                        } //end of while
                }
            } catch(EOFException e_eof) {cfin.close();}
        } catch(FileNotFoundException fnfe) {System.out.println("File
Gmix.txt not found");}
    return temp;
}

//
=====
=====

public void arrange_atoms() throws IOException
{
int i,j;
    for(i=0;i<ngas;i++)
        {
            for(j=0;j<gasList[i].natom;j++)
                {
                    add_atom(i,j);
                }
        }
}

public int add_atom(int i,int j) throws IOException

```

```

{
int k;
//Atom tempAtom=new
Atom(gasList[i].atomList[j].symbol,gasList[i].atomList[j].N*gasList[i].N
/N);
for(k=0;k<natom;k++)
{
//String s0=gasList[i].gasName;
String s1=gasList[i].atomList[j].symbol;
String s2=atomList[k].symbol;
//System.out.println("natom="+natom+"k =
"+k+atomList[k].symbol+"s0="+s0+"s1="+s1+"s2="+s2);
if(s1.equals(s2))
{
atomList[k]=new
Atom(atomList[k].symbol,atomList[k].N+gasList[i].atomList[j].N*gasLi
st[i].N/N);
return 1;
}
}
Atom atomL[];
atomL=new Atom[natom+1];
for(k=0;k<natom;k++)
atomL[k]=new Atom(atomList[k]);
atomL[natom]=new
Atom(gasList[i].atomList[j].symbol,gasList[i].atomList[j].N*gasList[i].N
/N);
atomList=atomL;
natom+=1;
return 2;
}

//=====
=====
public Gmix() throws IOException
{
//empty construction function
N=0;
M=0;

```

304

```
String pgasname="\0";
ngas=0;
}
//
=====
=====
public Gmix(Gmix g1) throws IOException
{
    gasName=g1.gasName;
    gasName=gasName;
    N=g1.N;
    M=g1.M;
    hf=g1.hf;
    ngas=g1.ngas;
    natom=g1.natom;
    gasList=new Gas[ngas];
    for(int i=0;i<ngas;i++) gasList[i]=new Gas(g1.gasList[i]);
    for(int i=0;i<natom;i++) atomList[i]=new Atom(g1.atomList[i]);
}
//
=====
=====
public Gmix(Gas g1) throws IOException
{
    gasName=g1.gasName;
    gasName=gasName;
    N=g1.N;
    M=g1.M;
    hf=g1.hf;
    ngas=1;
    natom=g1.natom;
    gasList=new Gas[ngas];
    for(int i=0;i<ngas;i++) gasList[i]=new Gas(g1);
    for(int i=0;i<natom;i++) atomList[i]=new Atom(g1.atomList[i]);
}
//
=====
=====
```

```

public void changeN(double newN) throws IOException
{
    normalise();
    for(int i=0;i<ngas;i++)
        { gasList[i].N*=newN; }
    N=newN;
}

    public boolean base(String s)
    {
        if(s.equals("mole")) { mole=true;for(int i=0;i<ngas;i++){
gasList[i].mole=true; }}
        else          { mole=false;for(int i=0;i<ngas;i++){
gasList[i].mole=false;}}
        return mole;
    }

    public boolean unit(String s)
    {
        if(s.equals("SI")) {SI=true;for(int i=0;i<ngas;i++){ gasList[i].SI=true;
}}
        else          { SI=false;for(int i=0;i<ngas;i++){ gasList[i].SI=false; }}
        return SI;
    }
//
=====
=====
    public void add(Gas g1) throws IOException
    {
        // this function adds a single gas to the mixture
        int gasflag=1;
        // if the gas exist in the list simply change N and M values
        for(int i=0;i<ngas;i++)
        {
            if(gasList[i].gasName.equals(g1.gasName))
            {
                gasflag=0;
                M=M*N+g1.M*g1.N;
                gasList[i].N+=g1.N;
            }
        }
    }

```

```

        N+=g1.N;
        M=M/N;
    }
}
if(gasflag!=0)
{
    Gas newGas[];
    newGas=new Gas[ngas+1];
    for(int i=0;i<ngas;i++)
    {
        newGas[i]=new Gas(gasList[i]);
    }
    ngas++;
    double MT=M*N+g1.M*g1.N;
    N+=g1.N;
    M=MT/N;
    newGas[ngas-1]=new Gas(g1);
    gasList=newGas;
}
arrange_atoms();
}
//
=====
=====
public void remove(String name) throws IOException
{
    // this function removes a single gas
    // from the list
    int i,k;
    for(i=0;i<ngas;i++)
    {
        if(gasList[i].gasName.equals(name))
        {
            Gas newGas[];
            newGas=new Gas[ngas];
            M=0;
            N=0;
            for(k=0;k<i;k++)
            { newGas[k]=new Gas(gasList[k]);

```

```

        M+=newGas[k].M*newGas[k].N;
        N+=newGas[k].N;
    }
    for( k=i;k<(ngas-1);k++)
    {
        newGas[k]=new Gas(gasList[k+1]);
        M+=newGas[k].M*newGas[k].N;
    }
    N+=newGas[k].N;
    }
    M=M/N;
    ngas--;
    gasList=newGas;
    break;
    }
}
arrange_atoms();
// correct dynamic memory size
}
//
=====
=====
public void add(String name,double Nnew) throws IOException
{
    // this function adds a single gas to the mixture
    Gas g1=new Gas(name,Nnew);
    int gasflag=1;
    // if the gas exist in the list simply change N and M values
    for(int i=0;i<ngas;i++)
    {
        if(gasList[i].gasName.equals(g1.gasName))
        {
            gasflag=0;
            M=M*N+g1.M*g1.N;
            gasList[i].N+=g1.N;
            N+=g1.N;
            M=M/N;
        }
    }
    if(gasflag!=0)

```

```

    {
        Gas newGas[];
        newGas=new Gas[ngas+1];
        for(int i=0;i<ngas;i++)
        {
            newGas[i]=new Gas(gasList[i]);
        }
        ngas++;
        double MT=M*N+g1.M*g1.N;
        N+=g1.N;
        M=MT/N;
        newGas[ngas-1]=new Gas(g1);
        gasList=newGas;
    }
    arrange_atoms();
}
//
=====
=====

    public void simplify() throws IOException
    {
        // this function combines any single gas
        // that repeated in the list
        double ngasold=ngas;
        int i,j,k;
        for(i=0;i<ngas;i++)
        {
            for(j=i+1;j<ngas;j++)
            {
                if(gasList[i].gasName.equals(gasList[j].gasName))
                {
                    gasList[i].N+=gasList[j].N;
                    for(k=j;k<(ngas-1);k++)
                    { gasList[k]=new Gas(gasList[k+1]); }
                    ngas--;
                }
            }
        }
    }
}

```



```

// correct dynamic memory size
if(ngasold!=ngas)
{
  Gas newGas[];
  newGas=new Gas[ngas];
  for(i=0;i<ngas;i++)
  {
    newGas[i]=new Gas(gasList[i]);
  }
  gasList=newGas;
}
}
//
=====
=====
public void normalise() throws IOException
{
  for(int i=0;i<ngas;i++)
  {
    gasList[i].N=gasList[i].N/N;
  }
  N=1.0;
  arrange_atoms();
}
//
=====
=====
public void changeMix(double Nmix[]) throws IOException
{
  // this function changes
  // all the molar weights in the mixture
  N=0;
  M=0;
  for(int i=0;i<ngas;i++)
  {
    gasList[i].N=Nmix[i];
    N+=Nmix[i];
    M+=Nmix[i]*gasList[i].M;
  }
}

```

```

M=M/N;
  arrange_atoms();
  }
//
=====
=====
public double vis(double T)
{
  // dynamic viscosity of the mixture
  // note that viscosity of the mixture IS NOT the simple addition
  // of viscosity of component gasses
  double vmix=0;
  for(int i=0;i<ngas;i++)
  {
    T=T;
    double fij;
    double xj=0;
    double p1;
    double c1,c2,c3;
    for(int j=0;j<ngas;j++)
    {
      double vratio;
      double xi=gasList[i].M/gasList[j].M;
      if(gasList[j].vis(T)!=0)
      {
        c1=gasList[i].vis(T)/gasList[j].vis(T);
        vratio=Math.sqrt(c1);
      }
      else
        vratio=0;
      c2=Math.pow(xi,0.25);
      p1=(1+vratio/c2);
      c3=8.0+8.0*xi;
      fij=p1*p1 / Math.sqrt(c3);
      xj+=fij*gasList[j].N/N;
    }
    vmix+=gasList[i].N/N*gasList[i].vis(T)/xj;
  }
  return vmix;
}

```

```

    }
//
=====
=====
public double k(double T)
{
// thermal conductivity of the mixture
// note that thermal conductivity of the mixture IS NOT the
// simple addition of the thermal conductivity of component gasses
double vmix=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
{
    T=T;
    double fij;
    double xj=0;
    double p1;
    double c1,c2,c3;
    for(int j=0;j<ngas;j++)
    {
        double vratio;
        double xi=gasList[i].M/gasList[j].M;
        if(gasList[j].k(T)!=0)
        {
            c1=gasList[i].k(T)/gasList[j].k(T);
//            if(c1<0) System.out.println("negative c1 value ");
            vratio=Math.sqrt(c1);
        }
        else
            vratio=0;
        c2=Math.pow(xi,0.25);
        p1=(1+vratio/c2);
        c3= 8.0+8.0*xi;
//        if(c2<0) System.out.println(" negative c2 value ");
        fij=p1*p1/Math.sqrt(c3);
        xj+=fij*gasList[j].N/N;
    }
    vmix+=gasList[i].N/N*gasList[i].k(T)/xj;
}
return vmix;

```

```

    }
//
=====
=====
    public double Prandtl(double t)
    {
// Prandtl number
    return Cp(t)*vis(t)/k(t)/M*1e3;
    }
//
=====
=====
    public double h(double T)
    {
//specific enthalpy of the mixture KJ/kmol
    double HH=0;
    for(int i=0;i<ngas;i++)
        { HH+=gasList[i].h(T)*gasList[i].N; }
    return HH/N;
    }
//
=====
=====
    public double ht(double T)
    {
//specific enthalpy of the mixture ht=h+hf
// hf : formation enthalpy
    double HH=0;
    for(int i=0;i<ngas;i++)
        { HH+=gasList[i].ht(T)*gasList[i].N; }
    return HH/N;
    }
//
=====
=====
    public double H(double t)
    {
//total enthalpy of the mixture KJ
    return h(t)*N;

```

```

    }
//
=====
=====
public double HT(double t)
//total enthalpy of the mixture HT=N*(h+hf) KJ
{
return ht(t)*N;
}
//
=====
=====
public double u(double T)
{
// specific internal energy of the mixture KJ/kmol
double UU=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
    { UU+=gasList[i].u(T)*gasList[i].N; }
return UU/N;
}
//=====
=====
public double g(double T,double P)
{
return h(T)-T*s(T,P);
}

public double gt(double T,double P)
{
return h(T)+hf-T*s(T,P);
}

public double gt(double T)
{
double Pref;
if(!SI) {Pref=14.503684;}
else {Pref=1.0;}
return h(T)+hf-T*s(T,Pref);
}

```

```

public double g(double T)
{
    double Pref;
    if(!SI) {Pref=14.503684;}
    else {Pref=1.0;}
    return h(T)-T*s(T,Pref);
}

```

```

public double G(double T,double P)
{
    return g(T,P)*N;
}

```

```

public double G(double T)
{
    return g(T)*N;
}

```

```

public double GT(double T)
{
    return gt(T)*N;
}

```

```

public double GT(double T,double P)
{
    return gt(T,P)*N;
}

```

```
//
```

```
=====
```

```

=====
public double Cp(double T)
{
    // Specific energy at constant pressure KJ/kmol K
    double C=0;
    for(int i=0;i<ngas;i++)
        { C+=gasList[i].Cp(T)*gasList[i].N; }
    return C/N;
}

```

```

    }
//
=====
=====
public double Cv(double T)
//Specific energy at constant volume KJ/kmol K
{
double C=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
    { C+=gasList[i].Cv(T)*gasList[i].N; }
return C/N;
}
//
=====
=====
public double gamma(double T)
{
//adiabatic constant
return Cp(T)/Cv(T);
}
//
=====
=====
public double c(double T)
//speed of sound m/s
{
return Math.sqrt(8314.5/M*T*gamma(T));
}
//
=====
=====
public double s(double T, double P)
{
//specific entropy KJ/kmol K
double SS=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
    {
    SS+=gasList[i].s(T,P)*gasList[i].N;
    }
}

```

316

```
return SS/N;
    }

public double s(double T)
{
//specific entropy KJ/kmol K
double P=1.0;
double SS=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
    {
        SS+=gasList[i].s(T,P)*gasList[i].N;
    }
return SS/N;
}

public double pr(double T)
{
double Tref, Rref;
if(!SI) {Tref=491.67;Rref=1.986;}
else {Tref=273.15;Rref=8.3145;}
if(!mole) Rref/=M;
return Math.exp((s(T)-s(Tref))/Rref);
}

public double vr(double T)
{
double Rref;
if(!SI) {Rref=1.986;}
else {Rref=8.3145;}
return (Rref/M)*T/pr(T)*10;
}

//
=====
=====

public double v(double T, double P)
{
double VV=0;
for(int i=0;i<ngas;i++)
    { VV+=gasList[i].v(T,P)*gasList[i].N; }
}
```



```

    return VV/N;
    }
//
=====
=====
public double T( char name,double y0,double p)
{
double t=300;
if(name=='v') {t= p*1e5*y0/8.314e3;}
else
{
double dt;
int nmax=400;
double tolerance=1.0e-8;
for(int i=0;i<nmax;i++)
{
if (name=='h') dt=- ( h(t) - y0 ) /Cp(t);
else if(name=='u') dt=- ( u(t) - y0 ) /Cv(t);
else if(name=='s') dt=- ( s(t,p) - y0 ) / (Cp(t)/t);
else { System.out.println("wrong name defined please try h,u,s or
v"); break;}
t+=dt;
if(Math.abs(dt)<tolerance) break;
}
}
return t;
}
//
=====
=====
public double P( char name,double y0,double t1)
{
if(name=='v') return 8.314e3*t1/y0*1e-5;
else if (name=='s') return Math.exp((s(t1,1.0)-y0)/8.314);
else { System.out.println("wrong name defined please try s or v"); return
1.0;}
}

```

```

//
=====
=====
public void multiplyassign(double Nx)
{
    for(int i=0;i<ngas;i++)
        { gasList[i].N*=Nx; }
    N*=Nx;
}
//
=====
=====
public void addassign(Gas g1) throws IOException
{
    // this function adds a single gas to the mixture
    int gasflag=1;
    // if the gas exist in the list simply change N and M values
    for(int i=0;i<ngas;i++)
    {
        if(gasList[i].gasName==g1.gasName)
        {
            gasflag=0;
            M=M*N+g1.M*g1.N;
            gasList[i].N+=g1.N;
            N+=g1.N;
            M=M/N;
        }
    }
    if(gasflag!=0)
    {
        Gas newGas[];
        newGas=new Gas[ngas+1];
        for(int i=0;i<ngas;i++)
        {
            newGas[i]=new Gas(gasList[i]);
        }
        ngas++;
        double MT=M*N+g1.M*g1.N;
        N+=g1.N;
    }
}

```

```

        M=MT/N;
        newGas[ngas-1]=new Gas(g1);
        gasList=newGas;
    }
}
//
=====
=====
public void addassign(Gmix right) throws IOException
{
    // this function adds a gas mixture to the mixture
    for(int i=0;i<right.ngas;i++)
    {
        add(right.gasList[i]);
    }
}
//
=====
=====
public Gmix multiply( double Nx,Gmix right) throws IOException
{
    Gmix g1=new Gmix(right);
    g1.N*=Nx;
    for(int i=0;i<g1.ngas;i++)
    {
        g1.gasList[i].N*=Nx;
    }
    return g1;
}
//
=====
=====
public Gmix add(Gas l,Gas r) throws IOException
{
    Gmix g1=new Gmix(r);
    Gas g2=new Gas(l);
    g1.add(g2);
    return g1;
}

```

```

//
=====
=====
public Gmix add(Gmix l, Gas r) throws IOException
{
    Gmix g1=new Gmix(l);
    Gas g2=new Gas(r);
    g1.add(g2);
    return g1;
}
//
=====
=====
public Gmix add(Gas l, Gmix r) throws IOException
{
    Gmix g1=new Gmix(r);
    Gas g2=new Gas(l);
    g1.add(g2);
    return g1;
}
//
=====
=====
public Gmix add(Gmix l, Gmix r) throws IOException
{
    Gmix g1=new Gmix(l);
    for(int i=0; i<r.ngas; i++)
    {
        g1.add(r.gasList[i]);
    }
    return g1;
}
//
=====
=====
public void assign(Gmix g1) throws IOException
{
    gasName=g1.gasName;
    N=g1.N;
}

```

```

        M=g1.M;
        ngas=g1.ngas;
        Gas newGas[];
        newGas=new Gas[ngas];
        for(int i=0;i<ngas;i++) newGas[i]=g1.gasList[i];
        gasList = newGas;
    }
    //
    =====
    =====
    public void assign(Gas g1) throws IOException
    {
    // a single gas is assigned to the mixture
        gasName=g1.gasName;
        N=g1.N;
        M=g1.M;
        ngas=1;
        gasList=new Gas[ngas];
        gasList[0]=new Gas(g1);
    }

    public String toString(String ch)
    {
    //return the c
        String s="";
        int i,j;
        if(ch.equals("name"))
            s=s+gasName+"\n";
        else if(ch.equals("formula"))
        {
            for(i=0;i<ngas;i++)
                { s=s+" "+gasList[i].toString()+" "+gasList[i].N+"\n"; }
        }
        else if(ch.equals("composition"))
        {
            for(i=0;i<natom;i++)
                s=s+atomList[i].toString()+"\n";
        }
        return s;
    }

```

```

}

public String[][] toString1(double v1, double v2)
{
    String s1[][]=new String[20][3];
    s1[0][0]="P, pressure          ";
    s1[1][0]="T, temperature        ";
    s1[2][0]="v, specific volume     ";
    s1[3][0]=" density                ";
    s1[4][0]="h, enthalpy             ";
    s1[5][0]="u, internal energy      ";
    s1[6][0]="s, entropy              ";
    s1[7][0]="g, qibbs free energy     ";
    s1[8][0]="ht,chemical entropy     ";
    s1[9][0]="gt,chemical gibbs f.e.  ";
    s1[10][0]="Cp, specific heat at const P ";
    s1[11][0]="Cv, specific heat at const v";
    s1[12][0]="Cp/Cv, adiabatic constant ";
    s1[13][0]="c, speed of sound        ";
    s1[14][0]="viscosity                ";
    s1[15][0]="thermal conductivity     ";
    s1[16][0]="M, molecular weight       ";
    s1[17][0]="Prandtl number            ";
    s1[18][0]="Pr, reduced pressure      ";
    s1[19][0]="vr, reduced volume          ";

    if(SI && !mole)
    {
        s1[0][2]=" bars                ";
        s1[1][2]=" deg K                ";
        s1[2][2]=" m^3/kg                ";
        s1[3][2]=" kg/m^3                ";
        s1[4][2]=" KJ/kg                ";
        s1[5][2]=" KJ/kg                ";
        s1[6][2]=" KJ/kg K              ";
        s1[7][2]=" KJ/kg                ";
        s1[8][2]=" KJ/kg                ";
        s1[9][2]=" KJ/kg                ";
        s1[10][2]=" KJ/kg K              ";
    }
}

```

```

s1[11][2]=" KJ/kg K    ";
s1[12][2]="           ";
s1[13][2]=" m/s      ";
s1[14][2]=" Ns/m^2    ";
s1[15][2]=" W/m K     ";
s1[16][2]=" kg/kmol   ";
s1[17][2]="           ";
s1[18][2]="           ";
s1[19][2]="           ";
}
else if(SI && mole)
{
s1[0][2]=" bars      ";
s1[1][2]=" deg K     ";
s1[2][2]=" m^3/kmole  ";
s1[3][2]=" kmole/m^3  ";
s1[4][2]=" KJ/kmole   ";
s1[5][2]=" KJ/kmole   ";
s1[6][2]=" KJ/kmole K ";
s1[7][2]=" KJ/kmole   ";
s1[8][2]=" KJ/kmole   ";
s1[9][2]=" KJ/kmole   ";
s1[10][2]=" KJ/kmole K ";
s1[11][2]=" KJ/kmole K ";
s1[12][2]="           ";
s1[13][2]=" m/s      ";
s1[14][2]=" Ns/m^2    ";
s1[15][2]=" W/m K     ";
s1[16][2]=" kg/kmol   ";
s1[17][2]="           ";
s1[18][2]="           ";
s1[19][2]="           ";
}
else if(!SI && mole)
{
s1[0][2]=" lbf/in^2, psia ";
s1[1][2]=" deg R       ";
s1[2][2]=" ft^3/lbmole  ";
s1[3][2]=" lbmole/ft^3  ";

```

```

s1[4][2]=" BTU/lbmole  ";
s1[5][2]=" BTU/lbmole  ";
s1[6][2]=" BTU/lbmole K ";
s1[7][2]=" BTU/lbmole  ";
s1[8][2]=" BTU/lbmole  ";
s1[9][2]=" BTU/lbmole  ";
s1[10][2]=" BTU/lbmole K ";
s1[11][2]=" BTU/lbmole K ";
s1[12][2]="          ";
s1[13][2]=" ft/s      ";
s1[14][2]=" lbm/(ft.s) ";
s1[15][2]=" BTU/(hr ft R) ";
s1[16][2]=" lbm/lbmole  ";
s1[17][2]="          ";
s1[18][2]="          ";
s1[19][2]="          ";
}
else if(!SI && !mole)
{
s1[0][2]=" lbf/in^2, psia ";
s1[1][2]=" deg R      ";
s1[2][2]=" ft^3/lbm   ";
s1[3][2]=" ft^3/lbm   ";
s1[4][2]=" BTU/lbm    ";
s1[5][2]=" BTU/lbm    ";
s1[6][2]=" BTU/lbm K   ";
s1[7][2]=" BTU/lbm    ";
s1[8][2]=" BTU/lbm    ";
s1[9][2]=" BTU/lbm    ";
s1[10][2]=" BTU/lbm K  ";
s1[11][2]=" BTU/lbm K  ";
s1[12][2]="          ";
s1[13][2]=" ft/s      ";
s1[14][2]=" lbm/(ft.s) ";
s1[15][2]=" BTU/(hr ft R) ";
s1[16][2]=" lbm/lbmole  ";
s1[17][2]="          ";
s1[18][2]="          ";
s1[19][2]="          ";
}

```



```

    }
    double pp[]=property(v1,v2);
    for(int i=0;i<20;i++)
        {s1[i][1]="" +pp[i];}
return s1;
}

public double[] property(double t, double p)
{
double pp[]=new double[20];
pp[0]=p;
pp[1]=t;
pp[2]=v(t,p);
pp[3]=1.0/pp[2];
pp[4]=h(t);
pp[5]=u(t);
pp[6]=s(t,p);
pp[7]=g(t,p);
pp[8]=ht(t);
pp[9]=gt(t,p);
pp[10]=Cp(t);
pp[11]=Cv(t);
pp[12]=gamma(t);
pp[13]=c(t);
pp[14]=vis(t);
pp[15]=k(t);
pp[16]=M;
pp[17]=Prandtl(t);
pp[18]=pr(t);
pp[19]=vr(t);
return pp;
}

} //end of class

```

EK 4 GmixTable.java

```

//
=====
==
// Thermodynamics package in java
// GasPropertySWF class to calculate properties of gases
// user interface (JFrame)
// Dr. Turhan Coban
// TUBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
// email : Turhan.Coban@ume.tubitak.gov.tr
//
=====
=

import java.io.*;
import java.applet.Applet;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import java.util.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.table.*;

public class GmixTable extends JApplet implements
ActionListener,ItemListener,Serializable
{
    String s1[]{"SI","EN"};
    String s2[]{"mass","mole"};
    String unit;
    String base;
    JPanel inputPanel;
    JPanel outputPanel;
    JPanel totalPanel;
    JLabel l1[]=new JLabel[5];    // Label
    JLabel l2[]=new JLabel[5];    // Label
    JTextField t1[]=new JTextField[3]; // input fields
    JComboBox c1[]=new JComboBox[3]; // selection field
    JTextArea outputTextArea;

```

```
GmixModel gm;
public Gmix g1;
JTable jt;
double T;
double P;
public String gasName;

protected File gmixFile;
protected StringTokenizer token;
String st[];
Color bg;
Color fg;

public void init()
{
    Container c=getContentPane();
    c.setLayout(new FlowLayout());
    bg=c.getBackground();
    fg=c.getForeground();
    //adding max-min prompts and input fields
    gasName=new String("air");
    unit="SI";
    base="mole";
    T=27.0;
    P=1.0;
    inputPanel=new JPanel();
    inputPanel.setLayout(new GridLayout(5,3,80,1));
    outputPanel=new JPanel();
    outputPanel.setLayout(new BorderLayout());
    totalPanel=new JPanel();
    totalPanel.setLayout(new BorderLayout());
    c1[0]=new JComboBox(s1);
    c1[1]=new JComboBox(s2);
    try{
        g1=new Gmix(gasName);
        token=new StringTokenizer(g1.readGmixNames());
        st=new String[token.countTokens()];
    } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
    int i=0;
```

```

while(token.hasMoreTokens())
{
st[i++]=new String((String)token.nextToken());
}
c1[2]=new JComboBox(st);
t1[0] = new JTextField();
t1[1] = new JTextField();
t1[2] = new JTextField();
t1[2].setText(gasName);
gasName=(String)c1[2].getSelectedItem();
try{
    g1=new Gmix(gasName);
    } catch(IOException ioe) {System.out.println("IOException");}
l1[0]=new JLabel("unit system      ");
fg=l1[0].getForeground();
l1[1]=new JLabel("mass/mole      ");
l1[2]=new JLabel("gas Name      ");
l1[3]=new JLabel("temperature  ");
l1[4]=new JLabel("pressure     ");
l2[0]=new JLabel(" ");
l2[1]=new JLabel(" ");
l2[2]=new JLabel(" ");
l2[3]=new JLabel(" degree C    ");
l2[4]=new JLabel(" bars       ");
outputTextArea=new JTextArea();
Font fn=l1[0].getFont();
for(i=0;i<5;i++)
{   l1[i].setBackground(Color.lightGray);
    l2[i].setBackground(Color.lightGray);
}
t1[0]=new JTextField(""+T);
t1[1]=new JTextField(""+P);
for(i=0;i<3;i++)
{   t1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
for(i=0;i<3;i++)
{   c1[i].setBackground(bg);t1[i].setFont(fn); }
outputTextArea.setBackground(bg);
outputTextArea.setForeground(fg);

```

```
outputTextArea.setFont(fn);

inputPanel.add(i1[0]);
inputPanel.add(c1[0]);
inputPanel.add(l2[0]);

inputPanel.add(i1[1]);
inputPanel.add(c1[1]);
inputPanel.add(l2[1]);

inputPanel.add(i1[2]);
inputPanel.add(c1[2]);
inputPanel.add(t1[2]);

inputPanel.add(i1[3]);
inputPanel.add(t1[0]);
inputPanel.add(l2[3]);

inputPanel.add(i1[4]);
inputPanel.add(t1[1]);
inputPanel.add(l2[4]);

c1[0].addItemListener(this);
c1[1].addItemListener(this);
c1[2].addItemListener(this);

t1[0].addActionListener(this);
t1[1].addActionListener(this);
t1[2].addActionListener(this);
double TK=T+273.0;
gm=new GmixModel(g1,TK,P);
jt=new JTable(gm);
jt.setBackground(bg);
jt.setFont(fn);
setArea();
outputPanel.add(outputTextArea,BorderLayout.NORTH);
outputPanel.add(jt,BorderLayout.SOUTH);
totalPanel.add(inputPanel,BorderLayout.NORTH);
totalPanel.add(outputPanel,BorderLayout.SOUTH);
```

```

    c.add(totalPanel, BorderLayout.NORTH);
}

public void setArea()
{
    t1[0].setText(Double.toString(T));
    t1[1].setText(Double.toString(P));
    String s="additional data can be added to Gas.txt file \n";
    s+="Dr. Turhan Çoban, \n";
    s+="Ulusal Metroloji Enstitüsü, (UME) TÜBİTAK\n";
    s+="phone : 90(262)6466355-525 email :
turhan.coban@ume.tubitak.gov.tr\n";
    //note if you would like to list additional information on the screen
    //add to string s
    //s+="Gas Formula : \n"+g1.toString("formula")+"\n";
    gm.setValues(g1,unit,base,T,P);
    outputTextArea.setText(s);
}

public void itemStateChanged(ItemEvent ev)
{
    gasName=(String)c1[2].getSelectedItem();
    t1[2].setText(gasName);
    unit=(String)c1[0].getSelectedItem();
    if(unit=="EN") {l2[3].setText(" degree F          ");
                    l2[4].setText(" psia (lbf/in^2)          ");}
    else {l2[3].setText(" degree C          ");
          l2[4].setText(" bars          ");}
    base=(String)c1[1].getSelectedItem();
    try{
        g1=new Gmix(gasName);
        g1.base(base);
        g1.unit(unit);
        t1[0].setText(" ");
        t1[1].setText(" ");
    } catch(IOException ioe1) {System.out.println("IOException");}
    //g1.property(T,P);
    setArea();
    repaint();
}

```

```

}

public void actionPerformed( ActionEvent e)
{
    if(e.getSource()==t1[2])
    {
        String st1=(String)c1[2].getSelectedItem();
        gasName=st1;
        String st2=t1[2].getText();
        for(int j=0;j<st.length;j++)
        {
            if(st[j].equals(st2))
            {
                gasName=st2;
                c1[2].setSelectedItem(st2);
                try{
                    g1=new Gmix(gasName);
                    g1.base(base);
                    g1.unit(unit);
                } catch(IOException ioe1)
                {System.out.println("IOException");}
                break;
            }
        }
    }
    Double valTemp=new Double(t1[0].getText());
    T=valTemp.doubleValue();
    Double valPressure=new Double(t1[1].getText());
    P=valPressure.doubleValue();
    getContentPane().setLayout(new FlowLayout(FlowLayout.RIGHT));
    setArea();
    repaint();
}

public static void main(String s[]) {
    JFrame f = new JFrame("Properties of Perfect Gas Mixtures ");
    f.addWindowListener(new WindowAdapter() {
        public void windowClosing(WindowEvent e) {System.exit(0);}
    });
}

```

332

```
JApplet applet = new GmixTable();
f.getContentPane().add("Center", applet);
applet.init();
f.pack();
f.setSize(new Dimension(500,600));
f.show();
}
}
```


EK 5 steamTable.java

```

// Thermodynamics package in java
// steamTable class to calculate properties of steam
// user interface (JApplet)
// Dr. Turhan Coban
// Dr. Turhan Coban
// TUBITAK Ulusal Metroloji Enstitüsü
// email : Turhan.Coban@ume.tubitak.gov.tr
// File Name : steamTable.java
// requires : steam.java, steamModel.java
//
=====
=

import java.io.*;
import java.applet.Applet;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import java.util.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.table.*;

public class steamTable extends JApplet implements
ActionListener,ItemListener,Serializable
{
    static final long serialVersionUID = 8597941330711875390L;
    JPanel inputPanel;
    JPanel outputPanel;
    JPanel totalPanel;
    JLabel l1[]=new JLabel[4]; // Label prompt unit
    JLabel l2[]=new JLabel[4]; // Label prompt unit
    JTextField t1[]=new JTextField[3];
    JComboBox c1[]=new JComboBox[2];
    JTextArea output;
    JTable jt;
    steamModel sm;
    steam st;

```

```

public String unit;
public String pair;
public double v1;
public double v2;
protected StringTokenizer token;
String s1[]{"SI","EN"};
String
s2[]{"tx","tp","tv","th","tu","ts","pv","pt","ph","pu","ps","px","vp","vt"
};
Container c;
Color bg;
public void init()
{
    c=getContentPane();
    c.setLayout(new FlowLayout());
    bg=c.getBackground();
    //adding max-min prompts and input fields
    st=new steam();
    unit="SI";
    pair="tx";
    v1=100.0;
    v2=1.0;
    st.setUnit(unit);
    sm=new steamModel(unit,pair,v1,v2);
    inputPanel=new JPanel();
    inputPanel.setLayout(new GridLayout(4,3));
    outputPanel=new JPanel();
    outputPanel.setLayout(new BorderLayout());
    totalPanel=new JPanel();
    totalPanel.setLayout(new BorderLayout());
    l1[0]=new JLabel("unit");
    l1[1]=new JLabel("select known property pair : ");
    l1[2]=new JLabel(" Temperature");
    l1[3]=new JLabel(" Quality  ");
    l2[0]=new JLabel("");
    l2[1]=new JLabel("");
    l2[2]=new JLabel(" degree C");
    l2[3]=new JLabel(" kg vapor/kg mix.");
    c1[0]=new JComboBox(s1);

```

```
c1[1]=new JComboBox(s2);
t1[0]=new JTextField(""+v1);
t1[1]=new JTextField(""+v2);
t1[2] = new JTextField();
t1[2].setText(pair);
inputPanel.add(l1[0]);
inputPanel.add(c1[0]);
inputPanel.add(l2[0]);

inputPanel.add(l1[1]);
inputPanel.add(c1[1]);
inputPanel.add(t1[2]);

inputPanel.add(l1[2]);
inputPanel.add(t1[0]);
inputPanel.add(l2[2]);

inputPanel.add(l1[3]);
inputPanel.add(t1[1]);
inputPanel.add(l2[3]);
t1[0].setBackground(bg);
t1[1].setBackground(bg);
t1[2].setBackground(bg);
t1[0].setFont(l1[0].getFont());
t1[1].setFont(l1[0].getFont());
t1[2].setFont(l1[0].getFont());
c1[0].setBackground(bg);
c1[1].setBackground(bg);
c1[0].addItemListener(this);
c1[1].addItemListener(this);
t1[0].addActionListener(this);
t1[1].addActionListener(this);
t1[2].addActionListener(this);
output=new JTextArea();
setArea();
jt=new JTable(sm);
jt.setBackground(bg);
jt.setFont(l1[0].getFont());
output.setFont(l1[0].getFont());
```

```

output.setForeground(l1[0].getForeground());
outputPanel.add(output, BorderLayout.NORTH);
outputPanel.add(jt, BorderLayout.SOUTH);
totalPanel.add(inputPanel, BorderLayout.NORTH);
totalPanel.add(outputPanel, BorderLayout.SOUTH);
c.add(totalPanel, BorderLayout.NORTH);
}

public void setArea()
{
    String s="";
    s+="Dr. Turhan Çoban, \n";
    s+="Ege Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Fak., Makina Bölümü\n";
    s+="phone : 90(232)3434000-5387\n";
    s+="email : turhan.coban@mail.ege.edu.tr\n";
    s+="web : www.axtelsoft.com/turhan.coban\n";
    output.setText(s);
    sm.setValues(unit,pair,v1,v2);
    output.setBackground(c.getBackground());
}

public void itemStateChanged(ItemEvent ev)
{
    unit=(String)c1[0].getSelectedItem();
    pair=(String)c1[1].getSelectedItem();
    t1[2].setText(pair);
    if(pair.charAt(0)=='t') l1[2].setText(" Temperature ");
    if(pair.charAt(0)=='p') l1[2].setText(" Pressure ");
    if(pair.charAt(0)=='v') l1[2].setText(" sp. volume ");
    if(pair.charAt(1)=='t') l1[3].setText(" Temperature ");
    if(pair.charAt(1)=='p') l1[3].setText(" Pressure ");
    if(pair.charAt(1)=='v') l1[3].setText(" sp. volume ");
    if(pair.charAt(1)=='h') l1[3].setText(" Enthpalpy ");
    if(pair.charAt(1)=='u') l1[3].setText(" Internal Energy ");
    if(pair.charAt(1)=='s') l1[3].setText(" Entropy ");
    if(pair.charAt(1)=='x') l1[3].setText(" Quality ");
    if(unit.equals("SI"))
    {
        if(pair.charAt(0)=='t') l2[2].setText(" degree C");
    }
}

```

```

if(pair.charAt(0)=='p') l2[2].setText(" bars");
if(pair.charAt(0)=='v') l2[2].setText(" m^3/kg");
if(pair.charAt(1)=='t') l2[3].setText(" degree C");
if(pair.charAt(1)=='p') l2[3].setText(" bars");
if(pair.charAt(1)=='v') l2[3].setText(" m^3/kg");
if(pair.charAt(1)=='h') l2[3].setText(" KJ/kg");
if(pair.charAt(1)=='u') l2[3].setText(" KJ/kg");
if(pair.charAt(1)=='s') l2[3].setText(" KJ/kg K");
if(pair.charAt(1)=='x') l2[3].setText(" kg vapor/kg mix");
}
else
{
if(pair.charAt(0)=='t') l2[2].setText(" degree F");
if(pair.charAt(0)=='p') l2[2].setText(" lbf/in^2");
if(pair.charAt(0)=='v') l2[2].setText(" ft^3/lbm");
if(pair.charAt(1)=='t') l2[3].setText(" degree F");
if(pair.charAt(1)=='p') l2[3].setText(" lbf/in^2");
if(pair.charAt(1)=='v') l2[3].setText(" ft^3/lbm");
if(pair.charAt(1)=='h') l2[3].setText(" BTU/lbm");
if(pair.charAt(1)=='u') l2[3].setText(" BTU/lbm");
if(pair.charAt(1)=='s') l2[3].setText(" BTU/lbm R");
if(pair.charAt(1)=='x') l2[3].setText(" lbm vapor/lbm mix");
}
t1[1].setText("");
t1[0].setText("");
repaint();
}

```

```

public void actionPerformed( ActionEvent e)
{
if(e.getSource()==t1[2])
{
String st1=(String)c1[1].getSelectedItem();
pair=st1;
String st2=t1[2].getText();
for(int j=0;j<s2.length;j++)
{
if(s2[j].equals(st2))

```

```
        { pair=st2;
          c1[1].setSelectedItem(st2);
          break;
        }
      }
    }
  else
  {
    Double V1=new Double(t1[0].getText());
    v1=V1.doubleValue();
    Double V2=new Double(t1[1].getText());
    v2=V2.doubleValue();
    sm.setValues(unit,pair,v1,v2);
    setArea();
    repaint();
  }
}

public static void main(String s[])
{
  JFrame f = new JFrame("Properties of water and steam");
  f.addWindowListener(new WindowAdapter() {
    public void windowClosing(WindowEvent e) {System.exit(0);}
  });
  JApplet applet = new steamTable();
  f.getContentPane().add("Center", applet);
  applet.init();
  f.pack();
  f.setSize(new Dimension(800,400));
  f.setVisible(true);
}
}
```

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt EZGİ, 18 Ekim 1970'de Tarsus/Mersin/Türkiye'de doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Tarsus'ta yapmış ve 1987'de Tarsus Lisesinden mezun olmuştur. 1987 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği bölümüne girmiş ve 1991'de Makina Mühendisi ünvanı ile mezun olmuştur. 1993 yılında Deniz Kuvvetleri Komutanlığında Mühendis Subay nasbedilmiştir. 1994 yılında European Welding Federation'dan Avrupa Kaynak Mühendisi ünvanını almıştır. 2001 yılında Arnavutluk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Tersanesinde Dizayn Başmühendisi Danışmanı olarak görev yapmıştır. 2002-2004 yılları arasında Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim dalı Enerji bilim dalında yüksek lisans eğitimi gören EZGİ, aşağıda belirtilen muhtelif kadrolarda görev yapmış olup, halen Deniz Kuvvetleri Komutanlığında Yüksek Mühendis Kıdemli Binbaşı ve Makina Dizayn Şube Müdürü olarak görev yapmaktadır.

1993-1994 Gölcük Tersanesi Komutanlığı

- Makina Dizayn Şef Yardımcısı

1994-2001 Aksaz Deniz Üs Komutanlığı

- Mekanik Sistemler İşletme Grup Amiri

2001-2002 Arnavutluk Ekip Başkanlığı

- Dizayn Başmühendisi Danışmanı

2002-2009 İzmir Tersanesi Komutanlığı

- Tekne ve Makina Sistemleri Tecrübe Şube Müdürü
- Makina Dizayn Şube Müdürü