

Y. ÇINAR, 2011



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN KONUTLARDA  
UYGULANMASI

YUSUF ÇINAR

Haziran 2011

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN KONUTLARDA  
UYGULANMASI

YUSUF ÇINAR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman  
Doç. Dr. Yüksel KAPLAN

Haziran, 2011

**Yusuf ÇINAR** tarafından Doç. Dr. Yüksel KAPLAN danışmanlığında hazırlanan “KATI OKSİT YAKIT PİLİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN KONUTLARDA UYGULANMASI” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mahmut D. MAT, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Kemal ALDAŞ, Aksaray Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20....

**Doç. Dr. Nurettin ACIR**

**MÜDÜR**

## ÖZET

### KATI OKSİT YAKIT PİLİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN KONUTLARDA UYGULANMASI

ÇINAR, Yusuf  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yüksel KAPLAN

Haziran 2011, 78 Sayfa

Katı oksit yakıt pilli (KOYP) yakıtın kimyasal enerjisini direk olarak elektrik ve ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. KOYP'nin en önemli avantajlarından biri saf hidrojene ihtiyaç duymamasıdır. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle doğal gaz, benzin, dizel, metanol, ve etanol gibi birçok hidrokarbon yakıt çok az bir reformlamayla veya doğrudan yakıt olarak kullanabilmektedir. Ayrıca KOYP yüksek verimlilik, düşük NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonu gibi birçok avantaja sahiptir.

Bu tezde 30 daireden oluşan ve her dairede 4 kişilik ailenin oturduğu bir binanın elektrik ve sıcak su kullanımı amaçlı ısı enerjisi ihtiyacını karşılayan KOYP kojenerasyon sistemi tasarlanmıştır. Bu binadaki dairelerde buzdolabı, fırın, televizyon, ütü, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi gibi ev aletleri ve aydınlatma ihtiyacının yanında binanın ortak aydınlatması, asansör, hidrofor vb. ihtiyaçları belirlenmiş ve tüm bina fertlerinin toplam sıcak su ihtiyacı hesaplanmıştır.

Anahtar sözcükler: Katı Oksit Yakıt Pili Ko-jenerasyon Sistemi, KOYP Kojenerasyon

## SUMMARY

### SOLID OXIDE FUEL CELLS CO-GENERATION SYSTEMS DOMESTIC APPLICATION

ÇINAR, Yusuf

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Graduate School of Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Yüksel KAPLAN

June 2011, 78 Pages

Solid oxide fuel cells (SOFCs) are electrochemical devices which convert chemical energy of a fuel directly into electricity and heat. One of the most significant advantages of the SOFCs is that they don't need pure hydrogen. High operation temperature of SOFCs allows using hydrocarbon fuels such as natural gas, gasoline, methanol, diesel and ethanol after little or no reforming. In addition, SOFCs have high efficiency and low emission of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>.

In this study, a cogeneration system based on SOFC is designed and calculated to meet the electrical and hot water energy requirement for an apartment consisting of 30 flats each having a family of four people. Beside the electrical energy required for home appliances such as refrigerator, oven, television, iron, washing machine, dishwasher and lighting, the energy for commons such as lighting, elevator and water pump as well as hot water quantity of all people are taken into consideration in the design.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cells Co-generation system, SOFC Co-generation

## ÖNSÖZ

Bu çalışma değerli danışmanım Doç. Dr. Yüksel KAPLAN'ın katkılarıyla gerçekleşmiştir. 21. yüzyılda dünyanın en önemli sorunu enerji sorunudur. Yakıt pilleri çağımızın enerji ihtiyacını karşılayacak nitelikte olan enerji dönüşüm sistemleridir. Yakıt pili teknolojisinin araştırma ve geliştirmesi devam etmektedir. Yakıt pili teknolojisi henüz istenilen maliyet ve verimlere ulaşmamıştır. Mevcut teknoloji ile KOYP'lerin Ko-jenerasyon sisteminde kullanılması düşünülerek elde edilecek elektrik ve sıcak su ile konutlarda enerji ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenmektedir. KOYP'de yakıt olarak doğalgazın işlenerek kullanılabilir hale gelmesi bir avantaj gibi görünmektedir. KOYP'nin bir çok avantajının yanında ülkemizde neredeyse tüm şehirlerde doğalgaz dağıtım hattının olması da bir avantajdır. KOYP ko-jenerasyon sistemlerinin ülkemizde uygulanması ve yaygınlaşması uzun vadede yenilebilir enerji kaynaklarından beslenen yakıt pillerine geçiş için bir basamak oluşturacaktır.

## TEŞEKKÜR

Hocam Doç. Dr. Yüksel KAPLAN'ın değerli tavsiye ve önerileri ile çalışmalarım tamamlanmıştır. Değerli hocam Doç. Dr. Yüksel KAPLAN'a teşekkür ederim. Çalışmalarımnda desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mahmut D. MAT'a teşekkür ederim. Çalışmalarıma katkıda bulunan, Doktora öğrencisi Bora TİMURKUTLUK'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmam boyunca bana gösterdiği sabır ve destekten dolayı eşim Ebru ÇINAR'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
ÖNSÖZ .....	vii
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
KISALTMA VE SİMGELER .....	xiii
<b>BÖLÜM I GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Yakıt Pilleri.....	1
1.2 Yakıt Pillerinin Klasik Sistemlerle Karşılaştırılması .....	2
1.3 Yakıt Pili Avantaj ve Dezavantajları .....	2
1.4 Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları .....	3
1.5 Yakıt Pili Çeşitleri .....	3
1.6 Ko-jenerasyon .....	5
1.7 Konutlarda Ko-jenerasyona En Uygun Yakıt Pili Seçimi .....	9
1.8 KOYP'un Ko-jenerasyon Verimin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması.....	9
1.9 Katı Oksit Yakıt Pili .....	10
1.9.1 Membran türlerine göre KOYP .....	12
1.9.2 Yakıt pillerinde kullanılan yakıtlar .....	16
1.10 KOYP'de Yakıt Olarak Kullanılacak Doğalgazın Özellikleri.....	17
1.11 Doğalgazdan (Metan) Hidrojen Üretimi.....	19
1.12 Tezin Amacı .....	20
1.13 Tezde Yapılan Çalışmalar.....	20
<b>BÖLÜM II LİTERATÜR .....</b>	<b>22</b>
2.1 Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Pilleri İçin Yapılan Araştırmalar.....	22
<b>BÖLÜM III KOYP KOJENERASYON SİSTEMİNİN BİNALARDA</b>	
<b>UYGULANMASI.....</b>	<b>26</b>
3.1 KOYP Ko-jenerasyon Sistemi .....	26
3.2 KOYP Genel Sistem Dizaynı .....	27
3.2.1 Sistem elemanları .....	29
3.2.2 Stak .....	30

3.2.3 Sülfür giderme .....	30
3.2.4 Reformer .....	32
3.3 KOYP Ko-jenerasyon Kontrol Sistemleri .....	35
3.3.1 Isıl yönetim sistemi.....	35
3.3.2 Su işleme sistemi .....	35
3.3.3 Hava sistemi .....	35
3.3.4 Güç düzenleme sistemi.....	35
3.4 Bina İçin Gerekli Elektrik Enerjisi .....	38
3.5 KOYP Membran Alanı ve Sayısının Belirlenmesi.....	40
3.6 Stak Sayısının Belirlenmesi ve Dizaynını Yapılması .....	42
3.7 Yakıt Pili İçin Gerekli Yakıt, Oksitleyici ve Çıkan Atık Su Miktarının Bulunması .....	45
3.8 KOYP Ko-jenerasyon Atık Isının Kullanılması .....	47
3.9 KOYP Ko-jenerasyon Sisteminin Isı Kazanımının Hesaplanması .....	47
3.10 Isı Eşanjörü ve Boyler Boyutlandırılması .....	51
3.10.1 Bina sıcak su ihtiyacının belirlenmesi .....	51
3.10.2 Isı değiştirici (eşanjör) boyutlandırılması.....	52
3.10.3 Sıcak su deposunun (boyler) boyutlandırılması .....	55
<b>BÖLÜM IV MALİYET ANALİZİ.....</b>	<b>56</b>
4.1 Sistem İlk Yatırım Maliyeti.....	56
4.3 İşletme Maliyetleri.....	58
4.2 KOYP Ko-jenerasyon Sisteminin Konvansiyonel Sistemler ile Karşılaştırılması.....	58
<b>BÖLÜM V SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>60</b>
5.1 Sonuç .....	60
5.2 Öneriler.....	61
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Yakıt pili türlerinin anot ve katot reaksiyonları.....	4
Çizelge 1.2 Tüp ve düzlemsel tasarımların avantaj ve dezavantajları.....	16
Çizelge 1.3 Doğalgazın bileşenleri .....	18
Çizelge 1.4 Metan Gazının Özellikleri .....	18
Çizelge 3.1 Reformerde meydana gelen tepkimeler.....	34
Çizelge 3.2 Bir evde kullanılan elektrik tüketen cihazlar.....	39
Çizelge 3.3 Binada ortak kullanılan elektrikli aletler ve aydınlatmalar .....	39
Çizelge 3.4 SOFC hücresi kullanılan malzemeler ve özellikleri .....	41
Çizelge 3.5 KOYP' reaksiyon ürünleri miktarı (bir hücre için) .....	46
Çizelge 3.6 Sıcaklığa bağlı $\Delta G$ (Gibbs) değerleri.....	49
Çizelge 3.7 Düşük, orta ve yüksek ihtiyaca göre, çok aileli binalarda sıcak su ihtiyacı .....	51
Çizelge 4.1 Sistem Elemanlarının Yaklaşık Maliyetleri (1 adet Üretim İçin).....	57
Çizelge 4.2 40 kW'lık KOYP ve ko-jenerasyon sisteminin maliyet analizi .....	58
Çizelge 4.3 Bina enerji ihtiyacı ve enerji birim maliyetleri.....	58
Çizelge 4.4 KOYP ko-jenerasyon sisteminin konvansiyonel sistemlerle karşılaştırılması .....	59
Çizelge 4.5 Bina 1 Yıllık Enerji maliyetleri karşılaştırması.....	59
Çizelge 5.1 Üretim sayısına göre KOYP ko-jenerasyon sisteminin amorti süreleri.....	61

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yakıt pili genel çalışma prensibi .....	1
Şekil 1.2 Klasik çevrim ve yakıt pili çevrimi karşılaştırılması.....	2
Şekil 1.3 Yakıt pilleri çeşitleri kimyasal reaksiyonları ve çalışma sıcaklıkları .....	5
Şekil 1.4 Ko-jenerasyon ve Geleneksel Sistemler ile Enerji Üretimlerinin Sankey Diyagramı ile Karşılaştırılması.....	7
Şekil 1.5 Türkiye’de Birincil Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretiminde Kullanımının Yüzdesel Dağılımı .....	8
Şekil 1.6 Güç üretim sistemleri verimleri .....	10
Şekil 1.7 Katı oksit yakıt pilinin genel yapısı.....	10
Şekil 1.8 Başlıca membran tiplerinin şematik gösterimi .....	12
Şekil 1.9 Katı oksit yakıt pilinde kullanılan destek türleri .....	13
Şekil 1.10 Düzlemsel katı oksit yakıt pili (a), tüp katı oksit yakıt pili (b).....	15
Şekil 3.1 Yakıt Pili Uygulaması.....	26
Şekil 3.2 Doğalgaz yakıtlı KOYP temel prosesi.....	27
Şekil 3.3 Doğalgaz yakıtlı SOFC sistemi anot ve katot gazı çevrimi.....	28
Şekil 3.4 Elektrik ve ısı ihtiyacını karşılayan KOYP sistemi .....	29
Şekil 3.5 Doğalgazdan sülfür ayrıştırma sistemi .....	32
Şekil 3.6 Reformer çalışma sistemi .....	33
Şekil 3.7 Reformer KOYP bütünleşik içsel tasarımı.....	34
Şekil 3.8 Güç düzenleme sistemi .....	37
Şekil 3.9 Örnek bina kat planı (a), Örnek bina üç boyut görünüm (b) .....	38
Şekil 3.10 Mebranın şekli .....	40
Şekil 3.11 KOYP stak dizaynı .....	44
Şekil 3.12 KOYP sistemi için hücre ve stak tasarımı .....	45
Şekil 3.13 KOYP ko-jenerasyon atık ısı kullanımı.....	47
Şekil 3.14 Isı değiştirici (eşanjör) sıcaklık dağılımı .....	53
Şekil 3.15 Isı değiştirici modeli .....	54
Şekil 3.16 Boyler sistemi ve modellenmesi.....	55
Şekil 4.1 KOYP Maliyetinin Birimlere Dağılımı.....	57
Şekil 5.1 Gaz yakıtlı ko-jenerasyon sistemleri.....	60

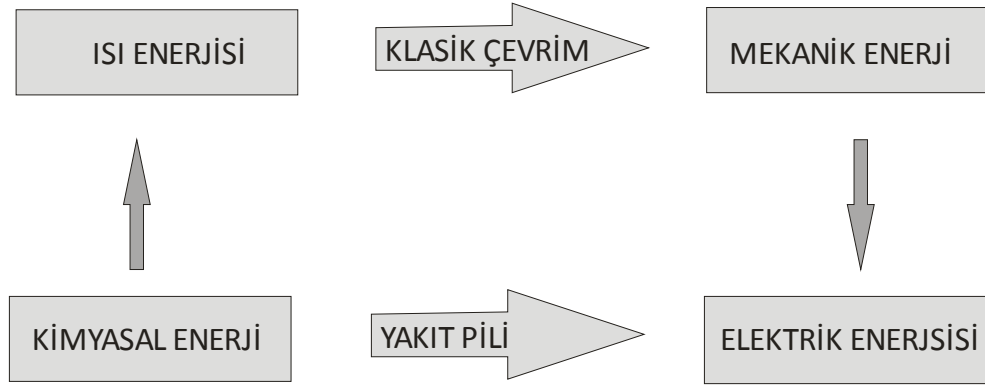
## KISALTMA VE SİMGELER

$\Delta G$	Reaksiyon için Gibbs serbest enerjisi
$\Delta S$	Entropi
$\Delta H$	Entalpi
$n$	Elektron mol sayısı
$F$	Faraday sabiti (96,487 Coulombs ve Joules/Volt)
$\dot{m}$	Kütlesel debi
$\dot{n}$	Maddenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucu üretim veya tüketim hızı
$i$	Akım yoğunluğu
$A$	Aktif elektrot alanı
$MA$	Mol ağırlığı
$CH_4$	Metan
$DC$	Doğru akım
$AC$	Alternatif akım
$KOYP$	Katı oksit yakıt pili
$Ni$	Nikel
$LSM$	Strontium doped $LaMnO_3$
$YSZ$	Yttria stabilized zirconia
$MEG$	membran elektrot gurubu
$KO$	Kısmi oksidasyon
$ASM$	Atık su miktarı



## 1.2 Yakıt Pillerinin Klasik Sistemlerle Karşılaştırılması

Şekil 1.2’de klasik sistemler ile yakıt pillerinin çalışma sistemleri karşılaştırılmaktadır. Yakıt pillerinde klasik sistemlerde olduğu gibi enerji dönüşüm prosesleri, mekanik enerji kayıpları, ek proses ve proses verim kayıpları, enerji iletim kayıpları yoktur [2]. Bu yüzden yakıt pilleri yüksek verimlidir.



Şekil 1.2 Klasik çevrim ve yakıt pili çevrimi karşılaştırılması

## 1.3 Yakıt Pili Avantaj ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin konvansiyonel sistemlere göre avantajları olduğu gibi yeni bir teknoloji olduğu için bir takım dezavantajları da vardır.

Yakıt pillerinin önemli avantajları aşağıda verilmiştir.

- Yüksek verim (verim %40-%55 arası)
- Şebekeden bağımsız elektrik üretimi (Enerjinin tüketilmesi istenen yerde üretimi)
- Hareketli proses ve parça olmaması (mekanik kayıplar yoktur ve sessiz çalışır)
- Kompakt modüler yapılı olması (ek üniteye gerek olmadan tek bir cihaz şeklinde elektrik üretimi)
- Ko-jenerasyona uygun olması (yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili çeşitlerinde atık ısıdan faydalanılabilmektedir.)
- Hızlı devreye girmesi (düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pili çeşitleri hızlı devreye girmektedir.)

Yakıt pillerinin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Yüksek maliyet
- Boyut ve ağırlık problemleri
- Yüksek sıcaklıklarda malzeme seçim problemleri (yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili çeşitleri için malzeme seçimi problemi vardır.)
- Enerji üretim endüstrisi için yeni bir teknoloji olması
- Yakıt üretim, depolama ve dağıtım problemlerinin aşılammaması

#### **1.4 Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları**

Yakıt pilleri teknolojik, ekonomik ve sosyolojik olarak gelişimini tamamlamasa bile örnek uygulamaları mevcuttur. Yakıt pilleri için teknolojik, ekonomik ve sosyolojik çalışmalar hızla sürmekte her geçen gün yeni gelişmeler kaydedilmektedir. Yakıt pillerinin kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

- Konutlarda ve sanayide
- Taşınabilir güç kaynaklarında
- Ulaşımında
- Uzay sanayisinde
- Askeri uygulamalarda

#### **1.5 Yakıt Pili Çeşitleri**

Yakıt pilleri, kullanılan elektrolite ve çalışma sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır. Yakıt pilinin çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması aşağıda verilmiştir.

Düşük sıcaklık	25-100 °C
Orta sıcaklık	100-500 °C
Yüksek sıcaklık	500-1000 °C

Kullanılan elektrolite göre yakıt pilleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır.

Alkali yakıt pili (AYP)

Fosforik asit yakıt pili (FAYP)

Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)

Katı oksitli yakıt pili (KOYP)

Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

Doğrudan Metanol yakıt pili (DMYP)

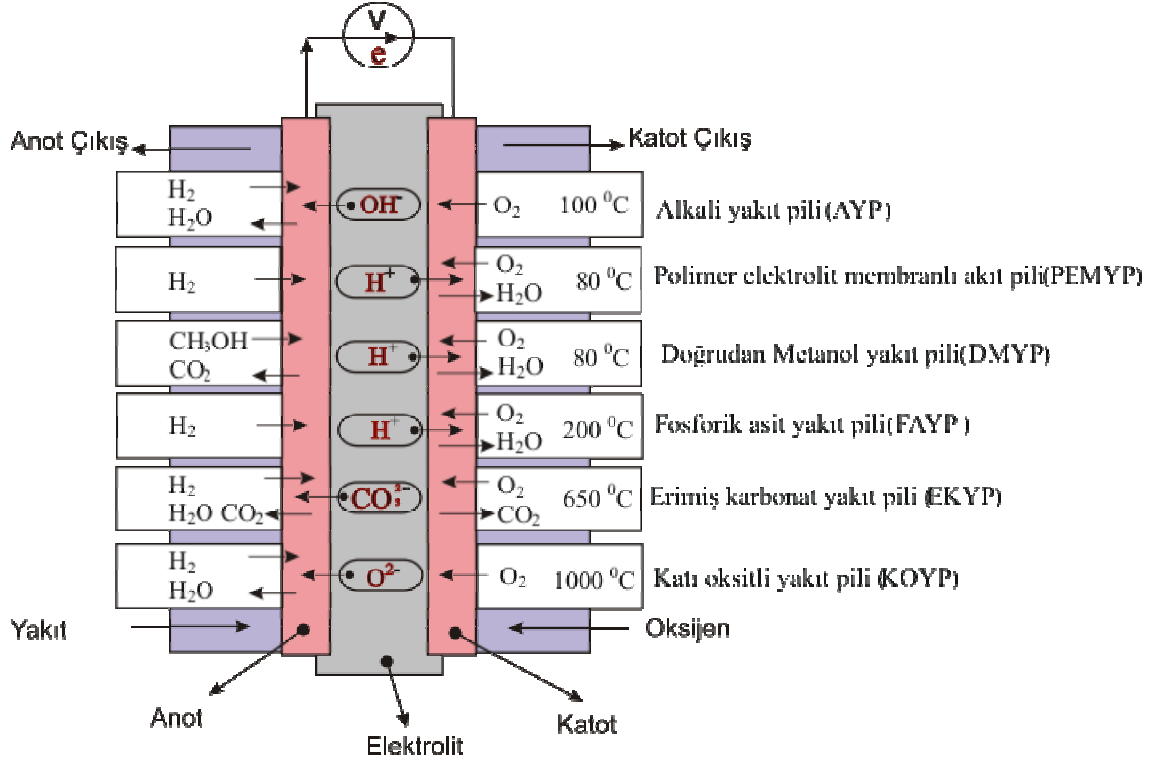
Sodyum bor hidrüllü yakıt pili (SBHYP)

Yakıt pilinin çeşitlerine göre anot ve katot reaksiyonları Çizelge 1.1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1.1 Yakıt pili türlerinin anot ve katot reaksiyonları

YAKIT PİLİ	ANOT REAKSİYONU	KATOT REAKSİYONU
AYP	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O$	$1/2O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2(OH)^-$
PEMYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
DMYP	$CH_3OH + H_2O \rightarrow$ $CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$6H^+ + 6e^- + O_2 \rightarrow 3H_2O$
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
EKYP	$H_2 + CO_3^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e \rightarrow CO_3^{-2}$
KOYP	$H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2e$	$1/2O_2 + 2e \rightarrow O^{-2}$

Yakıt pillerinin türüne göre kimyasal reaksiyonları, iyon geçirgenliği ve çalışma sıcaklıkları Şekil 1.3'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Yakıt pilleri çeşitleri kimyasal reaksiyonları ve çalışma sıcaklıkları

## 1.6 Ko-jenerasyon

Ko-jenerasyon, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden beraberce üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik neticeler oluşturmaktadır. Bu tekniğe “birleşik ısı-güç sistemleri” ya da kısaca “ko-jenerasyon” olarak adlandırılmaktadır. Atık ısıdan, buhar ve sıcak su elde edilmesi ile %80-90'a varan toplam sistem verimine ulaşmak mümkün olmaktadır [3].

Ko-jenerasyon uygulamalarının avantajları aşağıda verilmiştir.

- Elektrik üretiminin yanı sıra, ihtiyaca bağlı olarak sıcak su, buhar, sıcak gaz, kızgın yağ veya soğuk su üretme imkanı sağlamaktadır.
- Geniş ürün yelpazesıyla konutsal, ticari ve endüstriyel alandaki enerji tüketicilerinin ihtiyaçlarına cevap verebilmektedir.
- Doğalgaz başta olmak üzere propan, mazot, çöp gazı, biyogaz vb. yakıtlarla çalışarak kesintisiz, kaliteli ve yüksek verimde enerji üretimi sunmaktadır.
- Kompresör yatırımı yapmaksızın düşük basınçlı gaz yakıtlarla çalışabilmektedir.

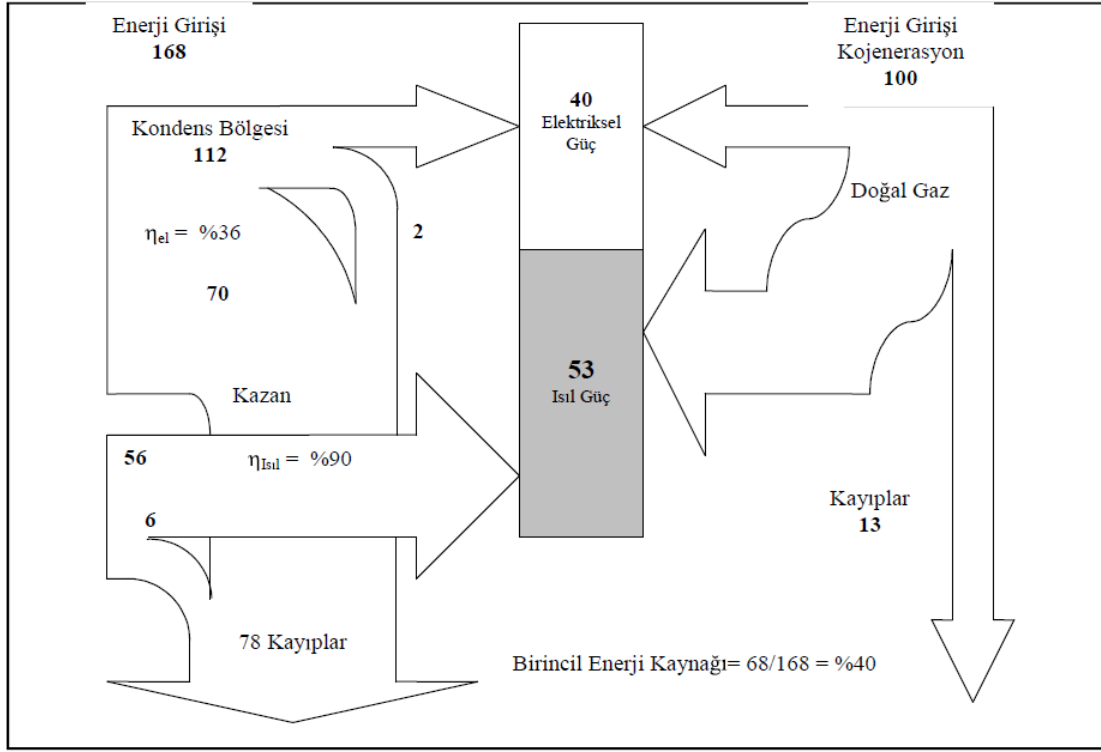
- Benzersiz tasarım ve düşük gürültü seviyesi ile konutsal ve ticari alanlarda kolaylıkla uygulanabilmektedir.
- Elektrik şebekesine paralel, şebekeden bağımsız ya da yedek güç bağlantıları ile çalışabilmektedir.
- Düşük egzoz gazı emisyonları ve yüksek yanma verimiyle çevreci bir sistemdir.
- Düşük işletme maliyeti ve sürekli çalışma özelliği ile yatırımınızı kısa sürede amorti eder.

Ko-jenerasyon sistemlerde elde edilen buhar enerjisi birçok alanda kullanılabilir. Bunlardan başlıcaları aşağıda verilmiştir.

- Tekstil fabrikalarında, jetlerde, bina ısıtılmasında,
- Atık ısıdan faydalanılarak elde edilen kızgın yağ, tekstil sektöründe ramöz cihazlarında,
- Seramik fabrikalarında egzoz ve baca gazları direkt seramik pişirme,
- Otomotivde ve boyahanelerde
- Soğuk hava tesislerinde absorpsiyonlu soğutmada
- Bina sıcak su kullanımı, ısıtma ve soğutmada.

Şekil 1.4'de geleneksel ısıtma sistemi ve ko-jenerasyon sistemlerindeki enerji üretiminin karşılaştırılması bir Sankey diyagramında gösterilmiştir. 40 birim elektriksel, 53 birim ısı güce ihtiyacı olan bir tesisin bu ihtiyaçları karşılamak için; geleneksel sistemde 168 birim enerji gerekirken, ko-jenerasyon sistemleri ile 100 birim enerji yeterli olduğu görülmektedir. Klasik güç santrallerinde fosil esaslı yakıt enerjisinin yaklaşık üçte biri elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte, üçte ikisi ise çevreye atılmaktadır. Buna karşılık bir ko-jenerasyon sisteminde elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan atık ısı, eşanjörler yardımı ile çeşitli ısı ihtiyaçları için (sıcak su, buhar, ısıtma, absorpsiyonlu soğutma vb.) değerlendirilebilmektedir. Gazla çalışan ko-jenerasyon sistemlerinde elektrik ve ısının eş zamanlı olarak üretilmesi ile %80-90 oranında verim elde edilebilmektedir. Böylece primer enerjinin atık kısmı minimum düzeyde tutulmaktadır. Bu yüksek sistem verimi sayesinde ko-jenerasyon sistemi, ilk yatırım tesis giderini 1.5-6 sene gibi kısa bir sürede geri ödemektedir [4]. Bir ısı makinasında üretilen işin (W), sisteme verilen enerjiye (Q<sub>H</sub>) oranı olan ısı verim (μ) Denklem 1.1'de verilmiştir.

$$\mu = W / Q_H \quad (1.1)$$



Şekil 1.4 Ko-jenerasyon ve geleneksel sistemler ile enerji üretimlerinin sankey diyagramı ile karşılaştırılması [5].

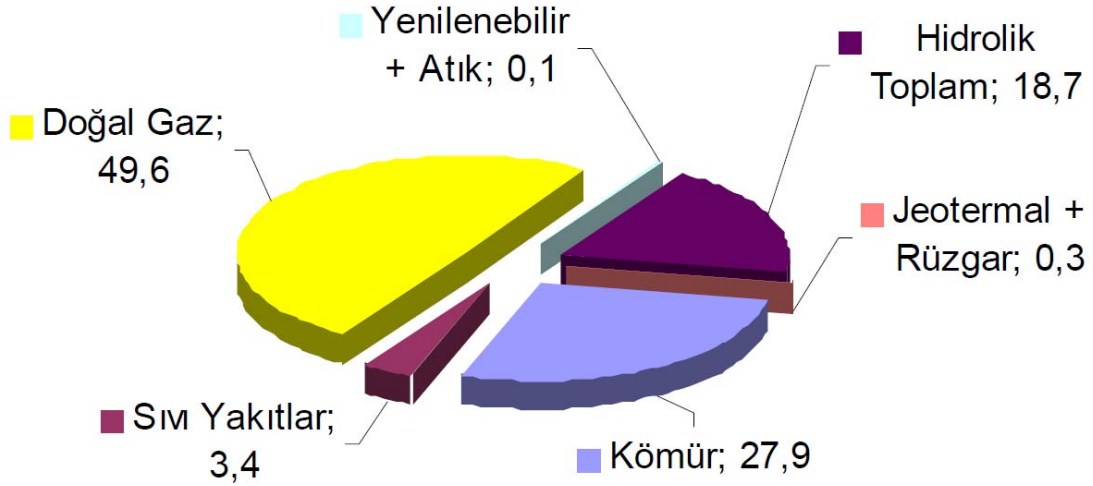
Ko-jenerasyon sistemlerinde Çevreye aktarılan ısı enerjisi,  $Q_L$ , ko-jenerasyon sisteminde kullanılan ısıdır. Böylece enerjiden toplam verim Denklem 1.1 ile hesaplanır.

$$\mu_{top} = \frac{W + Q_L}{Q_H} \quad (1.1)$$

Konvansiyonel çevrimde çalışan, yani sadece elektrik üreten bir gaz türbini ya da motoru, kullandığı enerjinin %30-40 kadarını elektriğe çevirebilir. Bu sistemin ko-jenerasyon şeklinde kullanılması halinde sistemden dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir bölümü de kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek toplam enerji girişinin % 80-90 arasında değerlendirilmesi sağlanabilir.

TEİAŞ 2007 yılı verilerine göre elektrik üretiminde birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı Şekil 1.5’de verilmiştir. 2007 yılı verileri dikkate alındığında dışa bağımlı olduğumuz doğal gazın elektrik üretimindeki payı ve yenilenebilir enerji

kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanılma oranının düşüklüğü dikkat çekicidir.



Şekil 1.5 Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımının yüzdesel dağılımı [6].

Ülkemizde doğalgaz çevrim santrallerinde atık ısıdan da buhar türbinleri ile yararlanılması durumunda %50 gibi bir verimle elektrik üretilebilmekte, dolayısıyla ciddi bir ekonomik kayıp olmaktadır. TEİAŞ verileri bu perspektif ile incelendiğinde satın alınan doğal gazın büyük oranda kullanılmadan atık ısı olarak atmosfere salındığı görülmektedir. Doğal gaz dışındaki fosil yakıtlar ile çalıştırılan klasik bileşik ısı güç üretim uygulamaları ise birincil enerjiden yararlanma oranını arttırmakla birlikte emisyon oranları yakıt pillerine kıyasla daha yüksek, verimleri ise Carnot verimi ile sınırlı olduğundan daha düşüktür. Yakıt pilleri ise kısmi yüklerde bile yaklaşık olarak tam yük veriminde çalışırlar. Sonuç olarak bakıldığında yakıt pillerinin geleneksel enerji üretim yöntemlerine kıyasla küresel sürdürülebilirlik ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Yakıt pillerinin verimlerinin geleneksel sistemlere kıyasla daha avantajlı olmasının en önemli nedeni kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Sistemde herhangi bir hareketli aksam olmadığı için sürtünmeden kaynaklı tersinmezlikler yakıt pilinde söz konusu olmamaktadır. Ayrıca hareketli parça bulunmayışı yakıt pillerini geleneksel uygulamalara kıyasla daha güvenilir yapmaktadır. Geleneksel ko-jenerasyon uygulamaları oturma alanları ve gürültü seviyeleri açısından da yakıt pillerine kıyasla

dezavantajlı olmaktadır. Yakıt pilleri sessiz çalıştıklarından enerji merkezinin konumlandırılmasında ciddi bir esneklik sağlamaktadır.

### **1.7 Konutlarda Ko-jenerasyona En Uygun Yakıt Pili Seçimi**

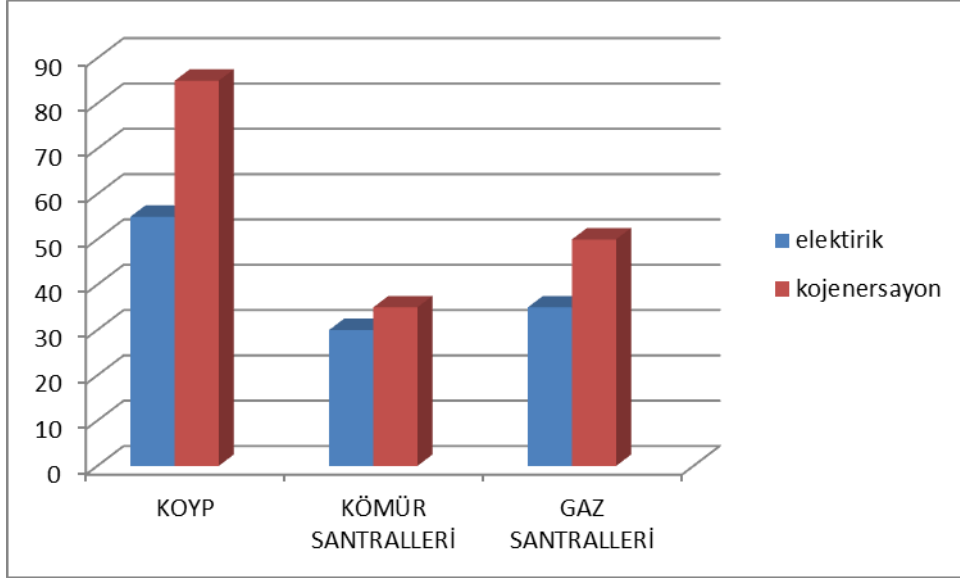
Yakıt pillerinden ko-jenerasyon uygulaması için seçim yapmak gerekirse KOYP aşağıdaki üstünlükleri ile ön plana çıkmaktadır.

- KOYP Yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır (600-1000 °C).
- Yüksek sıcaklık nedeniyle daha iyi bir reaksiyon kinetiği ve yüksek performans sağlamaktadır.
- Yakıtın PEM Yakıt Pilinde olduğu gibi çok saf olması gerekmemektedir.
- PEM Yakıt Pilinde zehirleyici etki gösteren CO'nun KOYP'de yakıt olarak kullanılması hem sistem verimini artırmakta hem de doğayı kirletmemektedir.
- Basit bir ayırıştırma prosesi ile Doğalgaz, Biyogaz, Metanol, Kömür gibi birçok yakıtı kullanabilmektedir.
- PEM Yakıt Pilinde Kullanılan pahalı platin katalizöre gerek yoktur.
- Sistem maliyeti düşüktür.
- Egzoz gazı yüksek sıcaklıkta olduğu için Ko-jenerasyon (Elektrik, ısıtma, sıcak su vb.) imkanı sağlamaktadır.

Yukarıdaki üstünlüklerden dolayı bu çalışmada ko-jenerasyon sisteminin konutlarda uygulanması için KOYP üzerinde yoğunlaşmıştır.

### **1.8 KOYP'un Ko-jenerasyon Verimin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması**

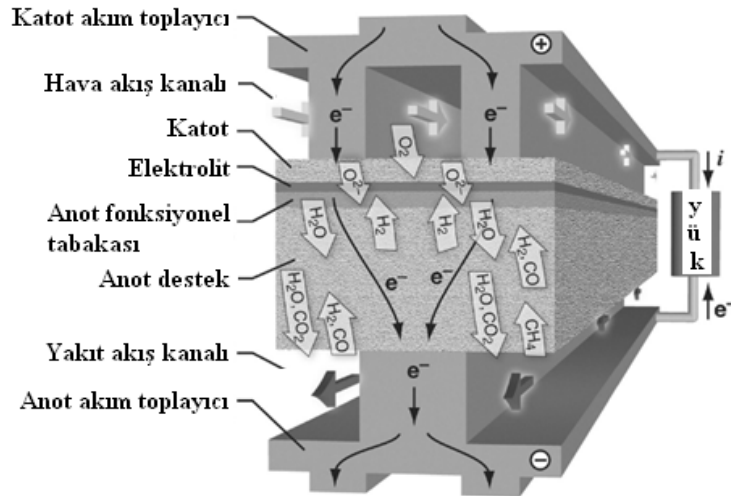
Enerji üretiminde konvansiyonel sistem olan kömür santralleri ve gaz santralleri ile ko-jenerasyon sistemi olan Katı Oksit Yakıt Pili ile elde edilen verimler Şekil 1.6'da karşılaştırılmıştır. Yakıt pillerinin verimi, elektrik üretiminde diğer sistemlere göre daha yüksek olmakla beraber, toplam verimde daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 1.6 Güç üretim sistemleri verimleri

### 1.9 Katı Oksit Yakıt Pili

Katı oksit yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan DC elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yüksek verimlilik, kullanılabilir yakıt çeşitliliği ve düşük NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonu gibi birçok avantajlara sahiptir. Katı oksit yakıt pillerinde yaklaşık 600 C - 1000 C arasındaki sıcaklıklarda çalışmakta ve sıvı bir elektrolit yerine yoğun seramik bir elektrolit kullanılmaktadır. Katı elektrolitin her iki tarafı anot ve katot elektrotları kaplanmaktadır. Tipik bir katı oksit yakıt pili Şekil 1.7'de görülmektedir.



Şekil 1.7 Katı oksit yakıt pilinin genel yapısı

Katı oksit yakıt pilli katodunda meydana gelen reaksiyon Denklem 1.1’de verilmiştir. Oksijen katotta indirgenerek oksijen iyonlarına dönüşmektedir.



Elektrolit yüksek iyon iletkenliği ve yüksek elektriksel dirence sahip olan malzemedendir yapılmaktadır. Bundan dolayı sadece  $\text{O}^{2-}$  iyonları katottan anoda geçerken elektronların elektrolitten geçmesine izin verilmez.

Anotta ise, oksijen iyonları hidrojen ile tepkimeye girerek su ve elektronları oluşturmaktadır.

Katı oksit yakıt pili anodunda meydana gelen reaksiyon Denklem 1.2’de verilmiştir.



Anot ve katottaki reaksiyonlar gerçekleşirken serbest kalan elektronlar anottan katoda dış devre aracılığıyla geçerek elektrik akımı üretimini sağlamaktadır.

Her bir hücre tek tek imal edilmekte sonra birleştirilerek stak (yığın) oluşturulmaktadır. Kullanım alanlarına göre hücreler farklı boyutlandırılmaktadır. Bir tek yakıt pili hücresinin ana parçaları membran, katalizör, gaz akış kanalı plakalar, anot ve katot elektrotlar, akım toplayıcı plakalardan oluşmaktadır.

Katı oksit yakıt pilinin membran elektrot grupları (MEG)’nin ardışık olarak bağlanmasını sağlayan interkonektörlerdir. İnterkonektörler, sistemde üretilen akımın toplanmasına, yakıt ve oksijenin elektro yüzeylerine etkin olarak dağıtımına imkan vermektedir.

Hücrede gerçekleşen toplam reaksiyon Denklem 1.3’de verilmiştir.



## 1.9.1 Membran türlerine göre KOYP

Membran sistemleri destilasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, ekstraksiyon gibi geleneksel ayırma tekniklerine alternatif teşkil edebilen bir ayırma teknolojisidir. Bütün membran proseslerinde anahtar faktör ayırma aracı olarak kullanılan membrandır. Membranlar polimerik, cam, metal ve sıvı materyallerden hazırlanabilirler ve gözenekli veya gözeneksiz, simetrik veya asimetrik, ya da kompozit olabilirler [7].

Membranlar çok farklı kimyasal doğaya sahip olabilmesine rağmen dört ana guruba ayrılmaktadır. Bunlar;

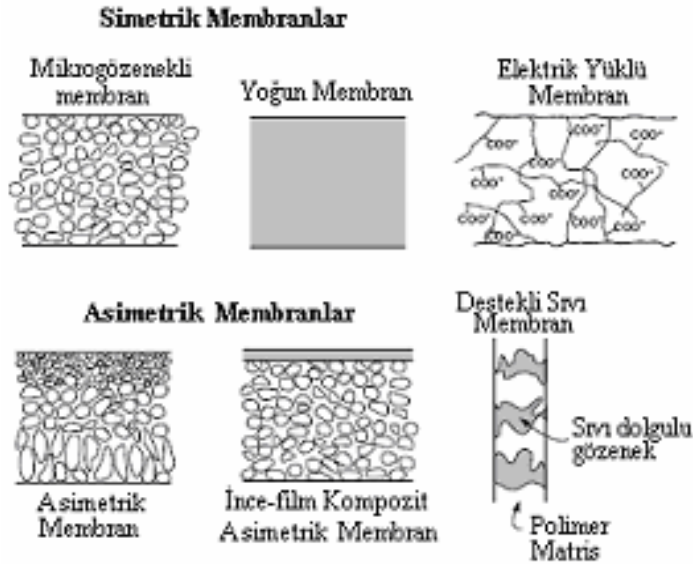
Mikro gözenekli membranlar

Homojen membranlar

İyon değiştirici membranlar

Asimetrik membranlar

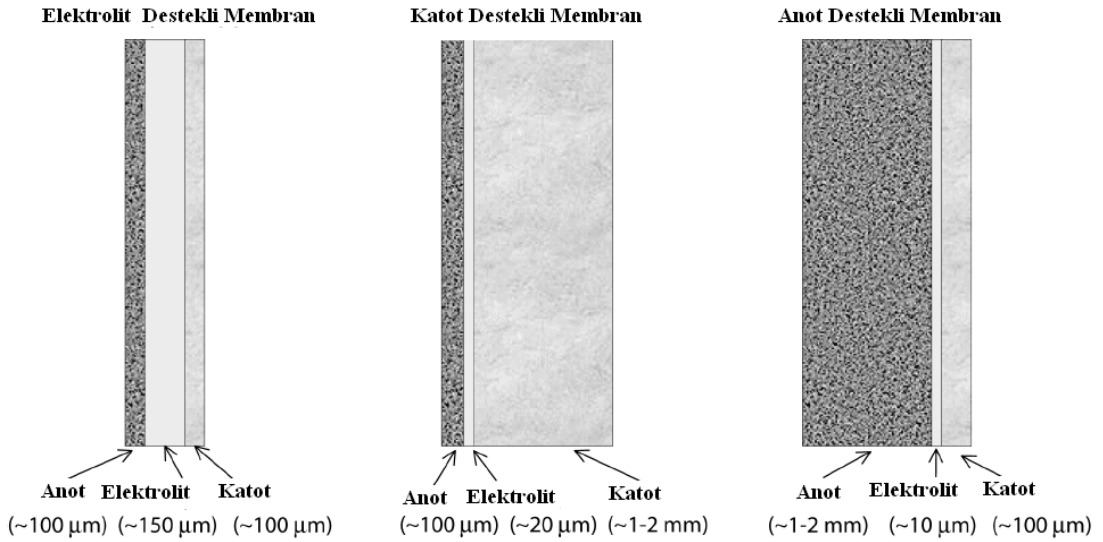
Başlıca membran tipleri Şekil 1.8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Başlıca membran tiplerinin şematik gösterimi

### 1.9.1.1 Destek tasarımına Göre KOYP

Yakıt pili temel elemanlarının (katot, anot, elektrolit ve interkonnektör) iletkenlikleri hücre performansını etkilemekte, istenilen güç yoğunluğuna ulaşılacak için membranlar olabildiğince ince olmalıdır. Fakat çok ince olması durumunda da mukavemeti düşük olacağından çalışma sırasında deformasyona uğrayabileceğinden hücre çalışamaz hale getirebilmektedir. Bu yüzden elektrot (anot veya katot) ve elektrolit destekli KOYP dizaynları kullanılmaktadır. Katot destekli dizaynda, temel sınırlama kalın katodun oksijen difüzyonuna olanak sağlamamasıdır. Anot destekli dizaynda ise, gerilme anotta sıcaklık artışı ile diğer malzemelerden fazla genişleyen nikel tarafından oluşmaktadır ve elektrot yapısında çatlaklar yaratmaktadır. Elektrolit destekli dizaynlarda yüksek ohmik direnç meydana geldiği için ve hidrojen difüzyonunun oksijen difüzyonunda çok daha hızlı gerçekleşmesinden dolayı bu türler arasında anot destekli dizaynlar tercih edilmektedir [8]. Destek tasarımına göre KOYP çeşitleri Şekil 1.9 'de gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Katı oksit yakıt pilinde kullanılan destek türleri

### 1.9.1.2 MEG tasarımlarına göre KOYP

Yakıt pilleri tasarımında genel olarak istenen elektriksel ve elektro-kimyasal performansa, mekanik/yapısal bütünlüğe ve termal yönetim dikkate alınmalıdır.

Katı oksit yakıt pili tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli özellikler aşağıdaki gibi açıklanabilir.

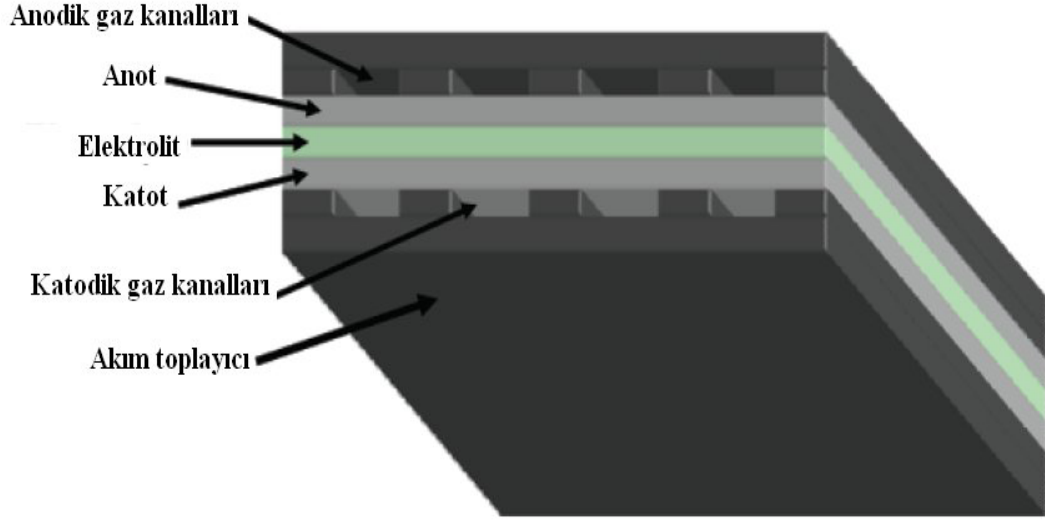
*Elektriksel performans:* Tasarımda en az ohmik kayıplara sahip olması anlamında elektriksel performansı önemlidir. Bundan dolayı akım yolu olabildiğince kısa olmalıdır. Hücre elemanlarının arasında elektrik iletkenliği iyi ve temas yüzeyi yeterli olmalıdır. Akım toplayıcılar, akımın ve akışın dağılmasını sağlayabilmelidir.

*Elektro-kimyasal performans:* Tasarımlarda yüksek hücre voltajı ve düşük polarizasyon kayıplarının sağlanması gerekmektedir. Bunun sağlanması için gaz kaçağına ve kısa devreye yol açacak tasarımlardan kaçınılmalıdır. Yakıt ve oksitleyici homojen olarak dağıtılmalıdır. Gazlar, reaksiyon bölgelerine kütle transfer problemini azaltmak için olabildiğince çabuk ulaşmalıdır.

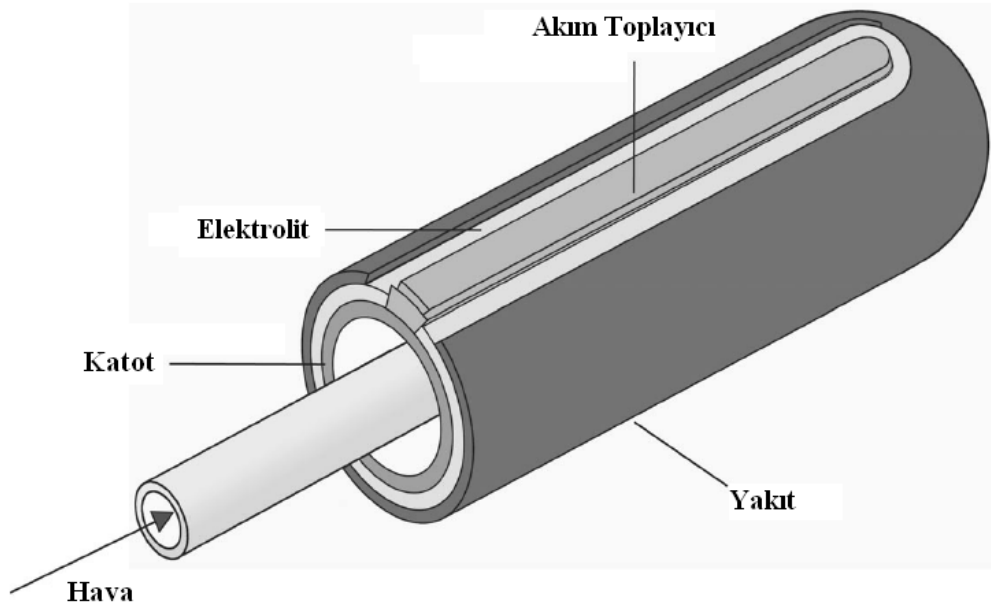
*Isıl yönetim:* KOYP dizaynı çalışma sırasında homojen ısınmayı ve homojen soğumayı sağlayabilecek şekilde dizayn edilmelidir. Aksi halde hücre elemanlarının farklı ısıl genişleme katsayılarından kaynaklanan bozulmalar ve/veya kırılmalar meydana gelmektedir.

*Mekanik/Yapısal bütünlük:* KOYP tasarımında hücre ve yığın yapımında ve montajında hücrelerin zarar görmemesi için belirli mukavemete sahip olmaları gerekir. Bundan dolayı mekanik ve termal stres çatlamlarını önlemek için doğru malzeme seçimi yapılması gerekir [9].

Katı oksit yakıt pilleri tasarımlarına göre genel olarak düzlemsel ve tüp olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Şekil 1.10).



(a)



(b)

Şekil 1.10 Düzlemsel katı oksit yakıt pili (a), tüp katı oksit yakıt pili (b)

Tüp ve düzlemsel katı oksit yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Tüp ve düzlemsel tasarımların avantaj ve dezavantajları

<b>Tasarım</b>	<b>Avantaj</b>	<b>Dezavantaj</b>
Tüp KOYP	Üretim kolaylığı	Düşük güç yoğunluğu
	Sızdırmazlık özelliği	Yüksek malzeme maliyeti
	Isıl genleşme dayanımı	
Düzlemsel KOYP	Düşük malzeme maliyeti	Yüksek sıcaklıkta sızdırmazlık
	Kolay akış	Yüksek montaj maliyeti
	Yüksek güç yoğunluğu	Termal genleşme

### 1.9.1.3 KOYP hücresi malzeme özellikleri

KOYP yüksek çalışma sıcaklığı (600-1000°C) nedeniyle malzemede meydana gelebilecek çatlamların önüne geçilmesi için katı oksit yakıt pillerinde kullanılan malzemelerin termal genişleme katsayılarının olabildiğince birbirine yakın olması istenmektedir. Bunun yanında KOYP malzemelerinin aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenmektedir.

- Çalışma şartlarında kimyasal kararlılık
- Elektrot ve akım toplayıcılar için yüksek elektriksel iletkenlik
- Özellikle elektrolit için yüksek iyon iletkenliği

Tipik bir KOYP’de elektrolit, anot ve katot olarak YSZ, NiO-YSZ ve LSM-YSZ kullanılmaktadır. Elektrolit olarak yttrium stabilize zirkonyum oksit (YSZ), anot olarak Ni- metal cermet, katot olarak stronsiyum- lantan manganit (LSM) ve hücre ayırıcı olarak ta lantan- kromit veya yüksek sıcaklığa dirençli metaller kullanılmaktadır.

### 1.9.2 Yakıt pillerinde kullanılan yakıtlar

Yakıt pilleri bir proses yardımıyla elde edilen hidrojeni veya doğrudan saf hidrojeni yakıt olarak kullanılmaktadır. Hidrojen elde edilen yakıtlar aşağıda verilmiştir.

- Fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.)
- Kimyasal ürünler (amonyak, metanol vb.)
- Alternatif kaynaklar (biyogaz, atık malzemeler vb.)

Hidrojen, sentetik bir enerji taşıyıcısı olup üretim kaynakları son derece bol ve çeşitlidir. Hidrojen, bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim ağırlık başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (120,000 kJ/kg). Sıvı haline dönüştürüldüğünde gaz halindeki hacminin sadece 1/700' ünü kaplamaktadır. Saf oksijenle yandığında sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Hava ile yandığında ise azot oksitler açığa çıksa da diğer yakıtlara göre kirliliği son derece az olmaktadır. Dünyada üretilen hidrojenin çok büyük bir bölümü, metanın su buharı ile katalitik olarak oksidasyonu yöntemi ile doğal gazdan elde edilmektedir. Doğal gazın yanı sıra diğer hidrokarbon yakıtlardan da (Metanol, LPG, Benzin) su buharı ile katalitik olarak hidrojen üretilmektedir.

### **1.10 KOYP'de Yakıt Olarak Kullanılacak Doğalgazın Özellikleri**

Doğal gaz yer kabuğunun içindeki fosil kaynaklı bir çeşit yanıcı gaz karışımıdır. Bir petrol türevidir. Doğalgaz organik teoriye göre milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvan atıklarından yeryüzü kabuklarına gömülen ve zamanla basınç ve ısı etkisiyle kimyasal değişikliklere uğrayarak doğalgazı meydana getirmiştir. Doğalgaza genellikle sıradağı yamaçlarında, petrol yataklarında, petrol ile birlikte veya serbest olarak rastlanmaktadır. Dünyada üretilen doğalgazın yaklaşık % 40' civarı petrol ile aynı yataklardan, kalanı ise petrolden bağımsız petrolün bulunmadığı yataklardan çıkartılmaktadır. Doğalgaz yakıt olarak önem sıralamasında ham petrolden sonra ikinci sırayı alır. Doğalgazı oluşturan gazların genel formülü  $C_nH_{2n+2}$  dir. Doğal gazın büyük bölümü (%70-90'ı), Metan gazı ( $CH_4$ ) adı verilen hidrokarbon bileşiğinden oluşur. Diğer bileşenleri; etan ( $C_2H_6$ ), propan( $C_3H_8$ ), bütan ( $C_4H_{10}$ ) gazlarıdır. İçeriğinde eser miktarda karbondioksit ( $CO_2$ ), azot ( $N_2$ ), helyum(He) ve hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) de bulunur [10].

Doğalgaz bileşenleri Çizelge 1.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 Doğalgazın bileşenleri

Bileşen	%
Metan (CH <sub>4</sub> )	70-90
Etan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	5-15
Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) ve Bütan (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	< 5
CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, vb.	Geriye kalanı

Doğalgaz zehirsiz, kokusuz kuru bir gazdır ve havadan hafiftir. Isıl değeri katı yakıtlara göre yüksektir. Doğalgazın tüm yataklardan aynı oranda gaz bileşimi olmadığından gaz karışım oranları değişmektedir gazların ısıl değerleri farklı olduğundan doğalgazı oluşturan gazların oranına göre ısıl değeri de farklılık göstermektedir. Türkiye’de kullanılan doğalgazın üst ısıl değeri 8.750 ile 9.300 Kcal/m<sup>3</sup> arasında olup bu değer 9.155 Kcal/m<sup>3</sup> olarak alınır. Alt ısıl Değer ise 8.250 Kcal/m<sup>3</sup> alınmaktadır. Doğalgaz 1 atm basınç altında ve -162 °C de sıvı halde tutulabilir. Doğalgaz 46,4 bar ve -82 °C de sıvı hale geçer. 1 m<sup>3</sup> sıvı metan 424 kg dir. Atmosfer basıncında gaz halinde 625 m<sup>3</sup> yer kaplamaktadır. Doğalgazın bileşiminde en yüksek orana sahip olan gaz metan gazıdır. Metan gazının özellikleri Çizelge 1.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.4 Metan Gazının Özellikleri

Kimyasal Adı	Metan
Diğer Adları	Bataklık gazı, Gruzi
Kimyasal formül	CH <sub>4</sub>
Molekül Ağırlığı	16.042 g/mol
Yoğunluk	Gaz: 0.717 kg/m <sup>3</sup> Sıvı: 415 kg/m <sup>3</sup>
Çözünürlük	3.5 mg/100 mL(17 C)
Ergime Noktası	91 K
Kaynama noktası	112 K
Tutuşma ısısı	810 K

### 1.11 Doğalgazdan (Metan) Hidrojen Üretimi

Metandan Hidrojen üretimi aşağıdaki reformlama yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılan termokimyasal yöntemler aşağıda verilmiştir.

- Ototermal dönüşüm sistemleri (autothermal reforming)
- Kısmi oksidasyon (partial oxidation) sistemleri ve
- Su buharı ile katalitik dönüşüm sistemleri (steam reforming)

*Ototermal dönüşüm yöntemi;* su buharı dönüşümü ve kısmi oksidasyon yönteminin birleşimi olarak tarif edilmektedir. Bu yöntemde her iki reaksiyon da bir arada ilerlemektedir. Bu reaktörlere doğalgaz, su ve hava (veya oksijen) birlikte belirli oranlarda beslenmekte ve sonuçta hidrojen zengin bir gaz karışımı elde edilmektedir. Ototermal dönüşüm yönteminde endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar birlikte gerçekleştiklerinden, sisteme ısı beslenmesi veya ısı uzaklaştırılmasına gerek olmamaktadır.

*Kısmi oksidasyon yönteminde;* yakıt, stokiometrik orandan daha az miktarda oksijen ile reaksiyona sokulmaktadır. Metanın kısmi oksidasyonu 1200-1300°C'lerde gerçekleşmektedir. Katalizör kullanılması ile reaksiyonun daha düşük sıcaklıklarda da gerçekleşebilmektedir. Reaksiyon ekzotermik olarak gerçekleşmekte ve üretilen ısının uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu metot genellikle ağır hidrokarbonlar ve yağ halindeki yakıtlar için geliştirilmiştir. Reaksiyon için gereken ısı yakıtın bir kısmının oksitlenmesi ile elde edilmektedir. Kısmi oksidasyon yönteminde denklem 1.4 ve 1.5'de gösterilen reaksiyonlar meydana gelmektedir.



Kısmi oksidasyon metodu ilk çalışma ve yük değişimlerinde yüksek çevrim hızıyla dikkat çekmektedir. Fakat düşük ayrıştırma verimi kısmi oksidasyon metodunun en zayıf yanısıdır [11].

Su buharı ile dönüşüm sistemleri devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

### **1.12 Tezin Amacı**

Katı Oksit Yakıt Pilleri yüksek verimleri, ko-jenerasyona olanak tanınması ve yakıt olarak çeşitli hidrokarbonları kullanabilmeleri dolayısıyla bina uygulamaları için uygun yakıt pili olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma çerçevesinde katı oksit yakıt pili (KOYP) incelenecek ve elde edilen bilgilerle 30 dairelik bir binanın elektrik ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılayabilecek elektrik çıkış gücü 40 kW olan doğal gazlı bir KOYP ko-jenerasyon sistemi hesaplamaları yapılacaktır. Sistemde metanın hidrojen ve karbon monoksit ayrışmasında elektro-kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan su buharının kullanımı söz konusu olacaktır. Ayrıca sistemde üretilen su buharının ısı enerjisi binanın sıcak su ihtiyacını karşılayacak ve böylece sistem verimi artırılacaktır. Konvansiyonel sistemlerde elektrik üretiminde ve iletiminde büyük kayıplar olmaktadır. Bu yüzden sadece % 31 verimle son kullanıcıya elektrik ulaşmaktadır. KOYP ko-jenerasyon sistemlerinde hem elektrik üretilmekte hem de egzoz gazlarının ısı kullanılmaktadır. Böylece sistemin toplam verimi yaklaşık olarak % 80-90 civarına çıkmaktadır. KOYP sistemi alternatif sistemlerle karşılaştırılacak ve uygulanabilirliği tartışılacaktır.

### **1.13 Tezde Yapılan Çalışmalar**

Bu çalışmada, Doğalgaz yakıtlı KOYP ko-jenerasyon sistemlerinin binalardaki uygulamaları incelenmiştir. KOYP ko-jenerasyon sistemleri yakıt işleme, güç düzenleme ünitesi, hava sağlama, ısı ve su işletme, ısı değiştirici ve sıcak su deposu ünitelerini ihtiva eder. Çalışmada, KOYP ko-jenerasyon sisteminin ana ve alt elemanları tanımlanmış, bu elemanlar için malzeme seçimi yapılarak boyutlandırılmıştır. KOYP ko-jenerasyon sistemi ile diğer güç üretim sistemleri karşılaştırılmıştır. Sistemin yatırım maliyeti ve işletme maliyetleri hesaplanarak kendini amorti süresi bulunmuştur.

KOYP ko-jenerasyon sisteminin mevcut teknoloji ile uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bu sistemin çevresel faktörleri, enerji verimliliği, diğer avantajları ve yakıt pillerinin teknolojik gelişimine sağlayacağı faydalar yorumlanmıştır.

## BÖLÜM II

### LİTERATÜR

#### 2.1 Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Pilleri İçin Yapılan Araştırmalar

Yakıt pili teknolojisinin temel prensipleri William Grove tarafından 1839 yılında ortaya konulmuştur. 1937 - Emil Baur, 1900 yılında, ünlü bilim adamı Nerst'in başlattığı katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi projesinin başarıya ulaşmasını sağlamıştır. Ancak yakıt pillerine olan ilgi, uzay araştırmalarının yarattığı ivme sonrası son 30–40 yılda artmıştır. Özellikle geçtiğimiz 10 -15 yılda sera gazı emisyonlarındaki hızlı artış fosil yakıtlara alternatif enerji teknolojilerinin kullanımını zorunlu kılmıştır.

Literatürde hidrojen enerjisi yakıt pillerinin ko-jenerasyon ile elektrik ve faydalı ısı enerjisi üretimi için yapılan çalışmalarda ağırlıklı olarak KOYP ko-jenerasyon sistemleri dikkat çekmektedir. Katı oksit yakıt pilleri yüksek kapasiteli ko-jenerasyon potansiyelleri nedeniyle gelecek sabit yakıt pili uygulamalarının en önemli adaylarındadır [12].

Hakan ve Aydın [13], araştırmasında gerek evsel uygulamalarda ve gerekse ticari binalarda birleşik ısı ve güç üretimi (ko-jenerasyon) bir arada yapan sistemleri araştırmıştır. Çalışmada, yakıt pili destekli ko-jenerasyon sistemlerinin evsel ve ticari binalardaki uygulamaları incelenmiştir. Tasarlanan yakıt pilli ko-jenerasyon sistemleri, yakıt işleme, güç düzenleme ünitesi, hava sağlama, ısı ve su işleme ünitelerini ihtiva etmektedir. Çalışmada, ilk olarak yakıt pilli ko-jenerasyon çevrimi ve alt elemanları tanımlanmış, yakıt pilleri ile diğer güç üretim sistemleri karşılaştırılmıştır. Bu sistemlerin çevresel etkilerinin minimum düzeyde olması, enerji kaynaklarının daha iyi kullanılması ve diğer güç üretim sistemlerine göre verimlerinin yüksek oluşunun, sistemi cazip kıldığı ifade edilmiştir. Yakıt pilli ko-jenerasyon sistemlerinin elektriksel dönüşüm verimlerinin %45'i aştığını vurgulamıştır.

Krist ve Wright [14], evsel uygulamalar için katı oksit yakıt pili'nin kullanılabilirliğini tartışarak, bu tip yakıt pillerinin, proton değişim membranlı yakıt pillerine göre avantaj

ve dezavantajlarını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, katı oksit yakıt pillerinin, proton değişim membranlı yakıt pillerine göre elektriksel dönüşüm verimliliğinin daha yüksek, nemlendirme ve CO problemi olmayışından dolayı evsel uygulamalar için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Yakıt pillerinin diğer bilinen enerji üretim sistemlerine göre en önemli avantajı verimliliklerinin yüksek olmasıdır. Bununla ilgili olarak yakıt pilleri ve ısı motorlarının potansiyel performanslarının karşılaştırılması Wright [15] tarafından yapılmıştır.

Entchev [16]'in yaptığı çalışmada, yakıt pili enerji sistemlerinin optimum performansını sağlamak amacıyla, bir kontrol programlama geliştirilmiştir. Çalışmada, bulanık mantık kontrol sistemi kullanılarak, güç sağlama ve ısı yüklerin uygun optimum bir yolla sağlanacağı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, yakıt pili ile çalışan ko-jenerasyon sistemleri ve alt bileşenleri incelenmiş, bu sistemlerin mevcut enerji dönüşüm sistemleri ile bir karşılaştırması yapılmış ve bazı uygulama alanları ile ilgili sonuçları sunulmuştur.

Olçay ve ark. [11], doğalgazdan hidrojen üretiminde ısı yöntemleri üzerinde çalışmışlardır. Buharla dönüşüm (BD), kısmi oksidasyon (KO), sıcaklık öz denetimli dönüşüm (SD), ısı ayrışma (IA) gibi ısı yöntemleri hidrojenin üretimi için üzerinde en çok çalışılan yöntemlerdir. BD yöntemi ile metan gazından hidrojen eldesi 727- 827°C aralığında, KO yönteminde ise 1227-327°C aralığında gerçekleşmektedir. KO yöntemindeki bu geniş sıcaklık aralığı tasarım koşullarının esnekliğini de sağlamaktadır. BD yöntemi ile metan gazından hidrojen eldesinde ürün içerisinde % 11,2 hacim oranıyla CO emisyonu, KO yönteminde ise %20,0 hacim oranında CO emisyonu oluşmaktadır. KO yöntemi CO emisyonu bakımından oldukça yüksektir. Önerilen hedef çalışmalar bu oranın düşürülmesi yönündedir. Metan gazından hidrojen edesinde oluşan gaz karışımının içindeki hidrojen bileşeni BD yönteminde %64,1 hacim oranında, KO yönteminde ise %43,8 hacim oranında oluşmaktadır. Geniş çalışma sıcaklık aralığına sahip KO yöntemi hidrojen üretiminde düşük verimle çalışmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonu BD yöntemi ile eşdeğer sayılabilmektedir. Katalizör ve tasarım ölçütlerindeki gelişmelere bağlı olarak KO yönteminin verimi artırılabilir. Sonuç olarak ısı yöntemlerine ait termodinamik ve mekanik koşullar uygulamada zorluklar içermektedir. Bu koşullar emniyet ve maliyet açısından yüksek risk taşımaktadır. Isıl

yöntemlerin bu kapsamda geliştirilmesi yakıt pillerinin gelecekteki kullanımını olumlu etkileyecektir.

Singhal [17], Doğalgaz ile çalışan KOYP sisteminin temel elemanları üzerinde çalışmıştır. Sistemin temel elemanları yakıt hücresi, yanma odası, ısıtıcılar, sülfür giderici, ısı değiştiricisi ve ayrıştırıcıdan oluşmaktadır. Ayrıştırıcıda metanın bir miktarı H<sub>2</sub> ye ayrışmakta ayrıca yüksek hidrokarbonlarda indirgenmektedir. Ayrıştırmada gereken su buharı için ayrı bir sistem yerine anotta elektro-kimyasal reaksiyon sonucu üretilen su buharı kullanılmaktadır. Bu sistemin avantajları; Harici buhar üretimine gerek kalmayacaktır. Daha az yakıt kullanıldığı için hücre sayısı dolayısıyla maliyet azalacaktır. Egzoz gazından daha az buhar açığa çıkacak, genel performansı artacaktır. Ayrıca anot egzoz gazı ile yakıtın direk olarak karışması yakıtı ısıtmak için gereken ısı transferi yüzeyini ve zamanını azaltacaktır. Katot gazı geri kazanım sistemiyle de katoda gelen hava zaten atılması gereken ısı ile ısıtılmış olacaktır. Bu sayede kullanılacak hava ısıtıcının boyutları ve güç tüketimi önemli ölçüde küçülecektir.

Morrison ve ark. [18], EsP – r / HOT 3000 Simülasyon programı yardımıyla bir evin yüklerini ve katı oksitli yakıt hücreli (SOFC) bir birleşik ısı güç sistemini (CHP) 3 kontrol hacmine ayırarak enerji, kütle dengeleri açısından ele alıp yukarıdaki programla sistemin her elemanının kullandığı enerji ve kütleleri incelemiş ve oluşan denklemlerden kurduğu bir matrisi es zamanlı çözmüştür. Her zaman dilimindeki değişkenleri iterasyon'la belirleyerek binanın termal modelini kurmuştur. Sistemden odalara giren enerjilerden HVAC sistem elemanlarının ve kontrol elemanlarının kayıpları bulunduğu SOFC'li CHP'nin termal çıktılarının mayıstan eylüle kadar sıcak su yüklerini yeterince karşıladığına, kış ve bahar aylarında (geçiş dönemlerinde) ev ısıtmasına önemli katkıları olduğuna karar vermiştir.

Alanne ve ark. [19] çalışmalarında, SOFC li bir mikro ko-jenerasyon sistemi tek ailelik bir ev için çalıştırılmaktadır. Model kapasiteleri 1, 2, 3, 4 ve 5 kW olan 5 adet SOFC'e uygulanmış. Domestik su ısıtma verimi % 82 alınmış olup, SOFC kullanımında ısı depolama tankı ve domestik su sistemi arasında önemli bir fark olmamasından ve bu nedenle tankın ısı kaybının elektrikli domestik su ısıtıcılarınıninki ile rekabet edebilir seviyede olmasından uygun olduğu belirtilmiştir. Çalışmada 3000 Lt'ye kadar ısı depoları araştırılmış, ama depoyu 1000 lt'den 3000 lt'ye çıkarmanın önemli olmadığı ispatlanmış, böylece küçük hacim ve yatırımı nedeniyle 1000 lt'lik bir tank seçilmiş.

Silviera ve ark. [20] tarafından erimiş karbonat yakıt pili kullanan bir birleşik ısı ve güç santralinin enerji, ekserji ve ekonomik analizi yapılmıştır. Sistem elektrik ve soğuk su üretimi için kurulmuş olup verimi % 86'dır. Soğutma sistemi için, absorpsiyonlu soğutma sistemi kullanılmaktadır. Yapılan analizler sistemin kilowatt başına ABD doları olarak 3 ile 5 yıl arasında geri ödemesini tamamladığı göstermektedir.

Ferguson ve Uğursal [21] proton değişim membranlı yakıt pili sistemlerinin bina ko-jenerasyon sistemlerinde kullanımı için bir model geliştirdiler. Bu model, yakıt pili sistemlerinde kullanılan yakıt miktarını, bina yüklerini karşılayacak elektriksel ve ısı enerjisi üretimini tahmin etmektedir.

Kivisaari ve ark. [22], yaptıkları çalışma ile ısı ve güç dağıtımı için kömür gazlaştırılmadan gelen gazla beslenen 50 MW'lık katı oksit yakıt pili sisteminin uygulanabilirliğini öğrenmeyi amaçlamışlardır. % 47 civarında elektriksel verim ve %85'e yakın sistem verimine ulaşmışlardır.

Lisbona ve ark. [23], elektrik üretimi amaçlı KOYP sistemi için bir model geliştirmiş ve üzerine çalışma yapmışlardır. Sistemin elektriksel ve ısı verimi değerlendirilmiştir. Yakıt kullanım oranı, yığın sıcaklığı, anot çıkış gazının geri beslenme oranı, hava giriş sıcaklığı ve dış ön reformasyon oranının etkileri analiz edilmiştir.

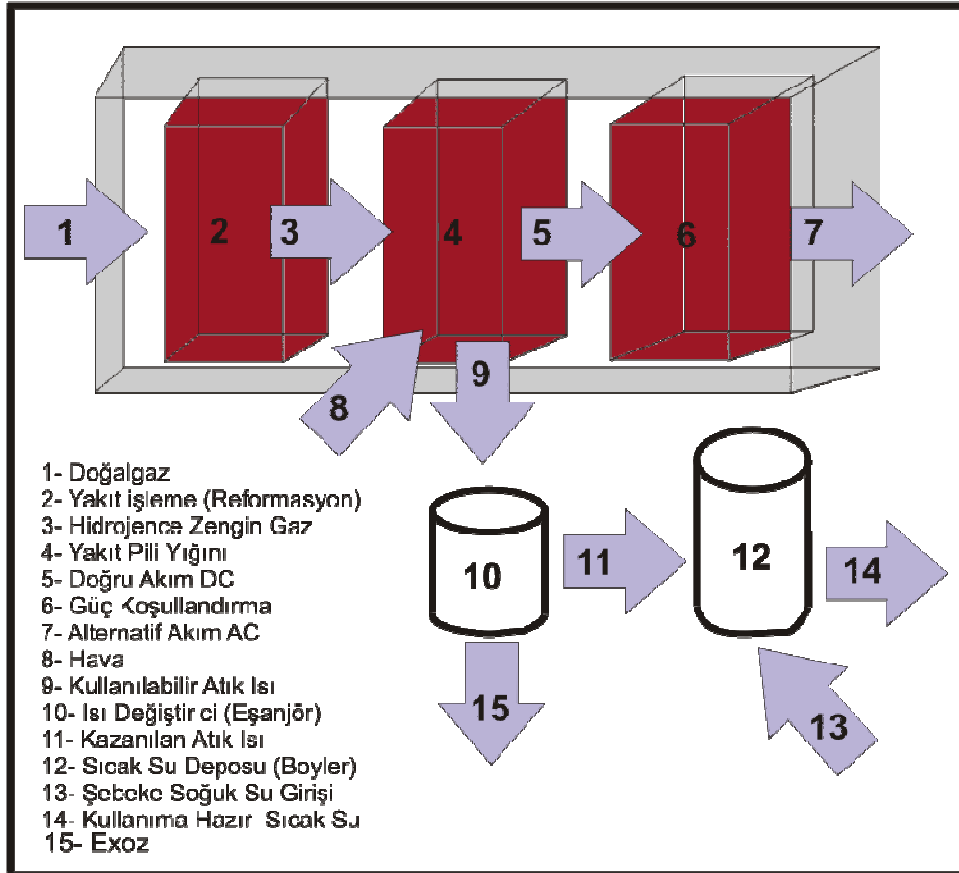
Franzoni ve ark. [24], 1.5 MWe'lık dağıtılmış güç üretim tesislerinin termodinamik ve ekonomik analizlerini yapmış ve karşılaştırmışlardır.

## BÖLÜM III

### KOYP KOJENERASYON SİSTEMİNİN BİNALARDA UYGULANMASI

#### 3.1 KOYP Ko-jenerasyon Sistemi

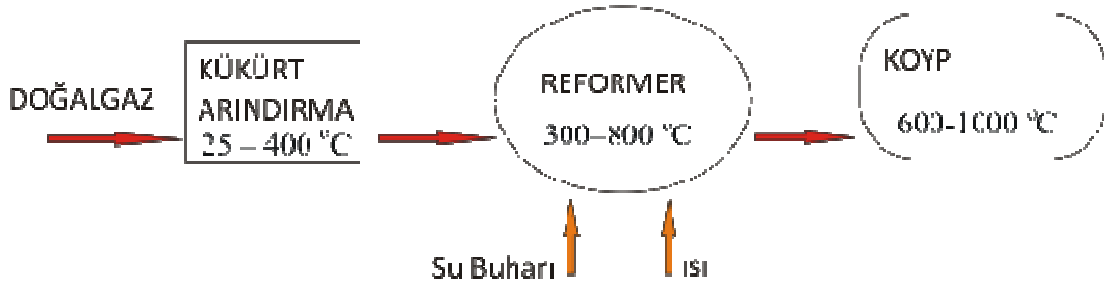
KOYP'nin ko-jenerasyon sistemi uygulamasında, 30 dairelik bir binanın elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması hedeflenmektedir. Hidrojen yakıt, doğalgazdan uygun bir proses yardımı ile elde edilecektir. Yakıt pilinde açığa çıkan ısıyı faydalı enerjiye çevirmek için ısı dönüştürücü (eşanjör) dizayn edilecektir. Binanın sıcak su ihtiyacı olmadığı zamanlarda sıcak suyun depolanması için sıcak su deposu (boyler) dizayn edilecektir. KOYP ko-jenerasyon sisteminin ana prosesleri dizayn edilerek sistemden geri kazanılan ısı tespit edilip sistemin genel verimi hesaplanacaktır. Yakıt hazırlayıcısı (reformer), ısı kontrolü ve yardımcı ünitelerle beraber ko-jenerasyon sistem şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Yakıt Pili Uygulaması

Sistemde, yakıt hazırlayıcı ve katot için gerekli hava bir kompresörde sıkıştırılıp dağıtıcıya gönderilmektedir. Hava yerine oksijeni tüp kullanılıyor ise sistemin çalışma basıncı sağlanacağı için kompresöre ihtiyaç duyulmamaktadır. KOYP’de su oluştuğu için sistem ihtiyacına bağlı olarak fazladan bir su deposu gerekmektedir. Reaksiyona girmemiş olan anot gazları ısı yöneticisinde taze yakıtla zenginleştirilerek yakılarak sistem için gerekli olan ısı karşılanmaktadır. KOYP’de bu gazlardan entalpi geri kazanımı ile yaklaşık olarak 400<sup>0</sup> ile 600<sup>0</sup> C’lik ek bir enerji elde edilmiş olur ve bu durum KOYP’nin diğer enerji üretim sistemlerine göre daha verimli olmasını sağlamaktadır. KOYP reaksiyon ürünleri ısını sistemde kazandırmak için ısı değiştirici kullanılmaktadır. Isı değiştiricide kazanılan ısı enerjisi, boilerde sıcak su olarak depolanmaktadır.

Doğalgazın KOYP sisteminde yakıt olarak kullanılabilmesi için yakıt işlenmektedir. Doğalgazın KOYP’de yakıt olarak hazırlanıp yakılması aşamasında, temel prosesler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Doğalgaz yakıtlı KOYP temel prosesi

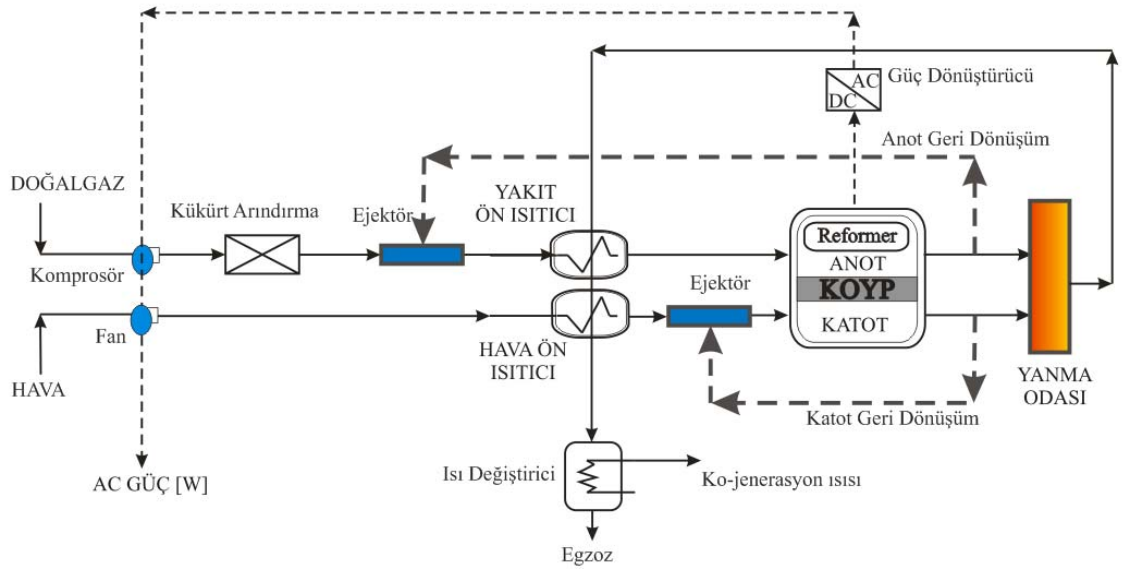
### 3.2 KOYP Genel Sistem Dizaynı

Dizayn edilecek KOYP sisteminin şeması Şekil 3.3’de görülmektedir. Sistem yakıt hücresi, yanma odası, ısıtıcılar, sülfür giderici, ısı değiştirgeci, ejektör, ön ayrıştırıcı fan ve kompresörden oluşmaktadır. Sistemde ayrıca anot gazı geri kazanım ve katot gazı geri kazanım üniteleri bulunmaktadır. Ön ayrıştırıcıda metanın bir miktarı H<sub>2</sub> den ayrılmakta ayrıca yüksek hidrokarbonlarda indirgenmektedir. Ayrıştırma için gereken su buharı için ayrı bir sistem yerine anotta elektro-kimyasal reaksiyon sonucu üretilen su buharı kullanılacaktır. Bu sistemin avantajları; harici buhar üretimine gerek kalmayacak, daha az yakıt kullanıldığı için hücre sayısı dolayısıyla maliyet azalacak,

egzoz gazından daha az buhar açığa çıkacak ve genel performansı artacaktır. Ayrıca anot egzoz gazı ile yakıtın direk olarak karışması yakıtı ısıtmak için gereken ısı transferi yüzeyini ve zamanını azaltacaktır. Katot gazı geri kazanım sistemiyle de katoda gelen hava zaten atılması gereken ısı ile ısıtılmış olacaktır. Bu sayede kullanılacak hava ısıtıcısının boyutları ve güç tüketimi önemli ölçüde küçülecektir.

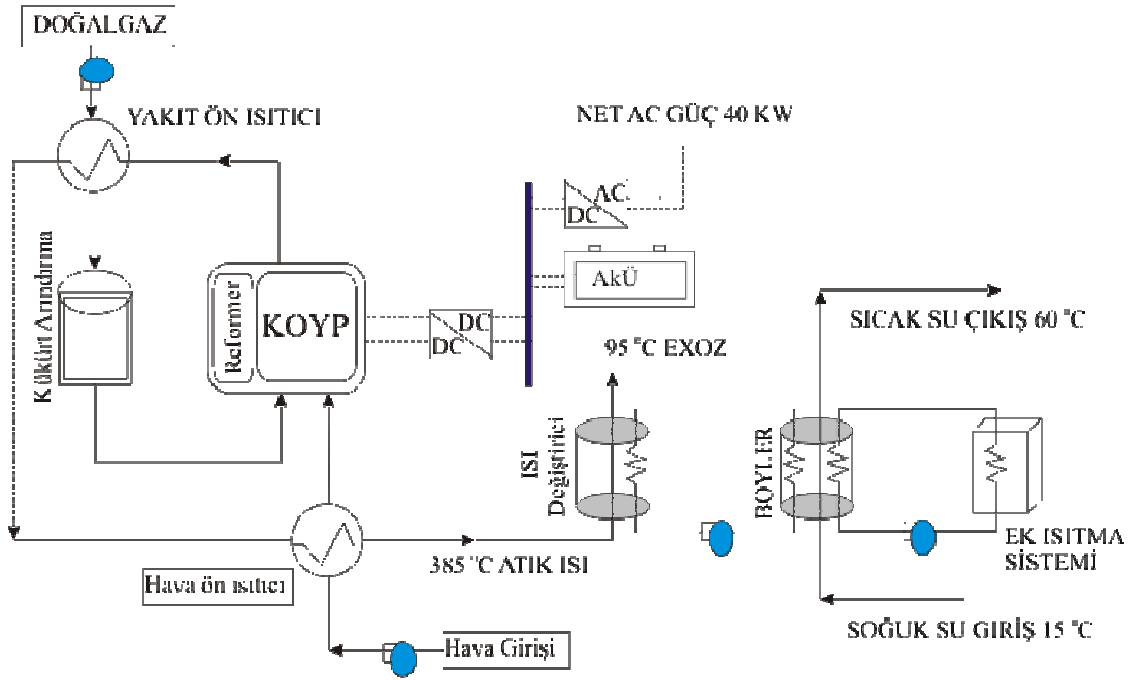
KOYP sisteminde elektro-kimyasal reaksiyon sonucu doğru akım üretilmektedir. Elde edilen akımın şebekede kullanılması için bir inverter yardımıyla 220 Volt AC dönüştürülmesi gerekmektedir.

Yakıt pilinde verilen yakıtın bir kısmı kullanılmadan egzozla karışmaktadır. Buradaki yakıtın bir kısmı egzoz gazlarının anoda giren yakıtla karıştırılması ile geri kazanılabilmektedir. Fakat yakıtın tamamen kullanıldığına emin olmak için egzoz çıkışına birde yanma odası eklenecektir. Bu işlem sonucu elde edilecek ısı yakıtın ve havanın ön ısıtmasında ekstra ısıda ev için sıcak su üretiminde kullanılabilir.



Şekil 3.3 Doğalgaz yakıtlı SOFC sistemi anot ve katot gazı çevrimi

KOYP Sisteminin 30 dairelik konutun su ısıtma sistemi ile entegrasyonu Şekil 3.4'de verilmiştir. Doğalgaz yakıtlı katı oksit yakıt pilinin çalışmasında atık ısı 385 °C de egzozla gönderilir [25]. Atık ısının kullanılması durumunda egzoz ısısı ısı değişirici ile baca çekiş problemi olmaması için 95 °C civarına düşürüldükten sonra bacadan atmosfere atılabilmektedir.



Şekil 3.4 Elektrik ve ısı ihtiyacını karşılayan KOYP sistemi

### 3.2.1 Sistem elemanları

Şekil 3.4'de dizayn edilen KOYP yakıt hücresi şeması görülmektedir. KOYP sistemi elektrolit ve interkonektor destek prensibine göre dizayn edilecektir. Bu dizaynın en önemli avantajı katot ve anot manifoldu interkonnektöre monte edilmesidir. Anot tabakası ile interkonektor arasına gözenekli nikel tabakası yerleştirilmiştir. Gözenekli nikel tabakası hem yakıt gaz manifoldu hem de akım toplayıcı olarak çalışmaktadır. Gözenekli nikelin esnek olması KOYP elemanlarının ısıl genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanan ısıl gerilmeleri absorbe edebilmektedir.

#### 3.2.1.1 Elektrolit malzemesi

Elektrolit  $O^{2-}$  iyonlarını katottan anoda geçirirken, elektronların anota geçmesine izin vermez. Elektrolit yüksek iyon iletkenliği ve yüksek elektriksel dirence sahip olan malzemeden yapılmaktadır. Elektrolit malzemesi olarak, zirkonyum oksit ( $ZrO_2$ ) ile kararlı kılınmış yttrium oksit ( $Y_2O_3$ ) yttrium stabilized zirkonyum oksit (YSZ) kullanılmaktadır. Bu tip katı metal oksitler seramik olarak da ifade edilebilir.

### **3.2.1.2 Anot malzemeleri**

Anotta oksijen iyonları hidrojen ile tepkimeye girerek su oluşumuna imkan vermektedir. Anot malzemesi olarak, Nikel karıştırılmış zirkonyum seramiği Ni- metal cermet kullanılmaktadır.

### **3.2.1.3 Katot malzemesi**

KOYP katodu oksijenin indirgenmesi için elektrokimyasal reaksiyon alanı oluşturmaktadır. Oksijen iyonlarının elektrolitte geçişine izin verilirken elektronların interkonnektörlere ulaştırma görevini yine katot gerçekleştirmektedir. Katot malzemesi olarak stronsiyum- lantan manganit (LSM) kullanılmaktadır.

### **3.2.1.4 Interkonektör**

Katı oksit yakıt pilinin membran elektrot grupları (MEG)'nin ardışık olarak bağlanmasını sağlayan interkonnektörlerdir. Interkonnektörler, sistemde üretilen akımın toplanmasına , yakıt ve oksijenin elektro yüzeylerine etkin olarak dağıtımına imkan vermektedir. Interkonnektörler üzerinde gaz akış kanalları olan plakalardan oluşmaktadır. Interkonnektör malzemesi olarak lantan- kromit veya yüksek sıcaklığa dirençli metaller kullanılmaktadır.

### **3.2.2 Stak**

KOYP hücresi MEG, interkonnektör, son plakalar ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Kullanılabilir değerde voltaj ve güç değerleri elde etmek için hücreler seri ve paralel olarak bağlanmasıyla stak oluşturulmaktadır. İlerleyen bölümlerde ayrıntılı anlatılmıştır.

### **3.2.3 Sülfür giderme**

Doğalgazda doğal olarak bulunan ( $H_2S$ ) sülfürün yanında, kokulandırmak amacıyla da bir miktar sülfür katılmaktadır. Doğalgazın kokulandırılması için 5-15ppm Tetra Hidro Tiyofen ( $C_4H_8S$ ) ve 5-15ppm Tersiyer Bütil Merkaptan ( $C_4H_{10}S$ ) kullanılmaktadır.

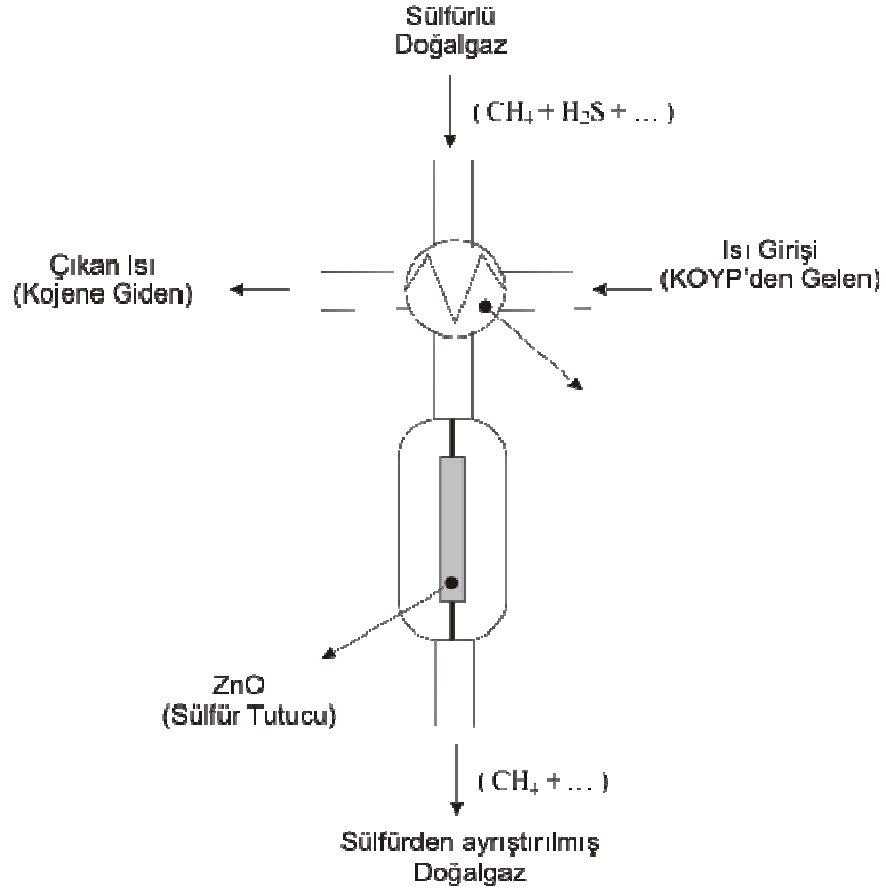
Doğalgazın içeriğinde 4-5 ppm arasında H<sub>2</sub>S bulunmaktadır. Doğalgaz Dağıtım hattından alınan gazda toplamda 14-35 ppm arasında kükürt bileşiği bulunmaktadır. Sülfür tüm yakıt pillerine olduğu gibi, katı oksit yakıt piline de zarar vermektedir. Dolayısıyla yakıt KOYP ye verilmeden önce sülfürün arındırılması gerekmektedir. Sülfür aynı zamanda reformerların nikel katalizörü ile de reaksiyona girmekte ve performansı olumsuz yönde etkilemektedir. KOYP için Sülfür seviyesinin doğal gaz içinde 1 ppm den az olması gerekmektedir.

Aktif karbon, çinko oksit, hidro-desulfimation gibi birçok sülfür giderme metotları mevcuttur. Her bir metodun diğerlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Aktif karbon metodunda da sülfür alım işlemi oda sıcaklığı civarında gerçekleşmektedir. Fakat bu metot diğerlerine göre pahalıdır. Çinko oksit metodunda doğal gaz çinko oksit parçacıkları dolu bir ortamdaki geçmekte ve doğal gazın içindeki sülfür çinko ile ZnS bileşiği oluşturmaktadır. Bu metotta belli bir süre sonra tamamen ZnS ye dönüşmüş çinko oksit yatağın değiştirilmesi gerekmektedir. Hidrosülfür metodunda ise reformerden elde edilen H<sub>2</sub> nin bir kısmı ile doğal gaz birleştirilerek H<sub>2</sub>S elde edilir. H<sub>2</sub>S sonra çinko oksit parçacıklar tarafından tutulmaktadır. Her iki proseste yaklaşık 400 °C civarında gerçekleşmektedir

Sülfür giderme reaksiyonu Denklem 3.1 de gösterilmiştir.



Doğalgazın sülfürden ayrıştırılması sistemi Şekil 3.5 gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Doğalgazdan sülfür ayrıştırma sistemi

### 3.2.4 Reformer

Doğal gaz büyük oranda metan ve bir miktarda etan, propan ve bütan gibi daha yüksek hidrokarbonlardan oluşan bir yakıttır. Zirkonyum tabanlı anoda sahip olan KOYP'de doğal gaz direk olarak H<sub>2</sub> ve CO'ya dönüşmemektedir. Bu dönüşüm için genellikle bir ayrıştırma işlemine ihtiyaç vardır. En çok bilinen ve kullanılan ayrıştırma yöntemi buharla ayrıştırma (steam reforming) yöntemidir. Buharla ayrıştırma yönteminde su buharı ile metan birleşerek Denklem 3.2 deki reaksiyon meydana gelmektedir



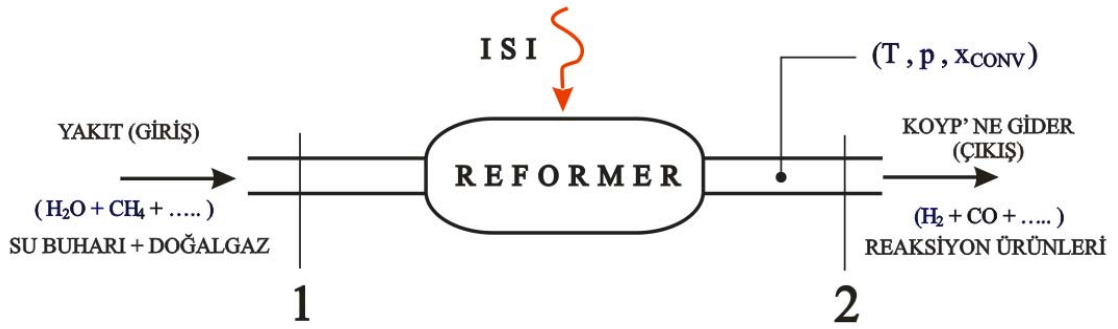
Üretilen karbon monoksitin bir kısmı su buharı ile birleşerek Denklem 3.3'deki reaksiyon meydana gelmektedir. Bu reaksiyonda ilave H<sub>2</sub> üretilmektedir.



Denklem 3.2'deki reaksiyon endotermik olup devam edebilmesi için yüksek sıcaklıkta buhar veya ısı gerekmektedir. Denklem 3.3'deki reaksiyon ekzotermiktir.

KOYP'nin yüksek çalışma sıcaklığı metanın endotermik ayrışmasını sağlayacak kadar yüksektir. Ayrıca anot bölgesinde kimyasal reaksiyon sonucunda 2 molekül su açığa çıkmaktadır. Sisteme metanı ayrıştırmak için ısı ve su buharı sağlamak yerine anotta oluşan su buharı ve ısı kullanılarak metanın ayrışması sağlanabilir.

Reformerın çalışma şekli Şekil 3.6'da gösterilmiştir. 1. Aşamada yakıt buhar ön ısıtma, 2. Aşamada Metanın kısmi dönüşümü, 3.Aşamada ise su-gaz değişim reaksiyonu gerçekleşmektedir. Reformerın çalışma şeması Şekil 3.6 da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Reformer çalışma sistemi

Su-gaz yer değiştirme reaksiyonunda reaksiyon ürünlerinin kütleli olarak aşağıdaki gibi ilişkileri vardır. Reformör öncesi ve sonrası termodinamik denge Denklem 3.4-3.6'da gösterilmiştir.

$$\text{Karbon} \quad : \quad \dot{n}_{CO,i} + \dot{n}_{CO_2,i} = \dot{n}_{CO,2} + \dot{n}_{CO_2,2} \quad (3.4)$$

$$\text{Hidrojen} \quad : \quad \dot{n}_{H_2,i} + \dot{n}_{H_2O,i} = \dot{n}_{H_2,2} + \dot{n}_{H_2O,2} \quad (3.5)$$

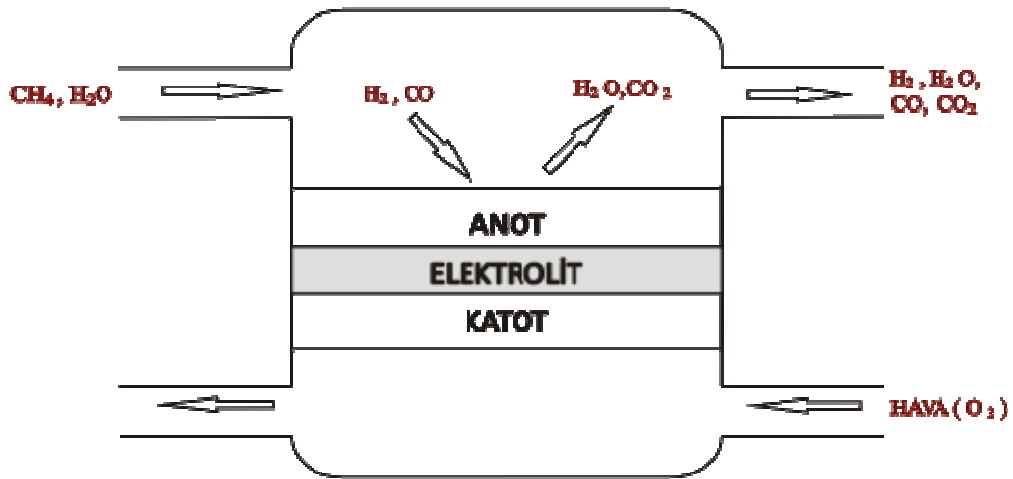
$$\text{Oksijen} \quad : \quad \dot{n}_{CO,i} + 2\dot{n}_{CO_2,i} + \dot{n}_{H_2O,i} = \dot{n}_{CO,2} + 2\dot{n}_{CO_2,2} + \dot{n}_{H_2O,2} \quad (3.6)$$

Reformerda meydana gelen tepkimeler sonucu sistemden aldığı ve sisteme verdiği enerji Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Reformerde meydana gelen tepkimeler

Reaksiyon	$\Delta H_{298}$ (kJ/mol)
$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	165
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	206,1
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41,15
$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	247,3

İşsel buharlı ayrıştırma işlemi KOYP hücresine ekstra bir soğutma sağlamaktadır. Böylece katot tarafına gelen hava miktarı azaltılmaktadır. KOYP hücresi içinde akım yoğunluğu, gaz dağılımı ve ısı transfer sonucu meydana gelen sıcaklık dağılımının hücre boyunca hem yatay hem de dikey doğrultuda mümkün olduğu kadar homojen olması gerekmektedir. Yüksek sıcaklık gradyanı sistem içinde seramik membran ve elektrot malzemesinin kırılmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla işsel ayrıştırma işlemi iyi optimize edilirse aynı zamanda sistem içinde sıcaklığı homojenizasyonuna yardımcı olabilmektedir. Reformerin KOYP ile bütünleşik işsel tasarımı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Reformeri KOYP ile bütünleşik işsel tasarımı [25]

Sistemimizde bu yöntemi kullanmamızın amacı reaksiyon esnasında su buharı içindeki hidrojeninde serbest kalarak sisteme kazandırmasıdır. KOYP sisteminin çalışma sıcaklığı yüksek olduğundan ve atık ısıyı yine sisteme kazandırdığımızdan bu yöntemin bizim sistemimize en uygun yöntem olduğu görülmektedir.

### **3.3 KOYP Ko-jenerasyon Kontrol Sistemleri**

KOYP ko-jenerasyon sisteminde reaksiyona giren ve çıkan ürünlerin kontrolü sağlanmalıdır ayrıca üretilen elektrik ve ısı enerjisini de kontrollü bir şekilde üreterek depolanması gerekmektedir.

#### **3.3.1 Isıl yönetim sistemi**

Yüksek sıcaklık nedeniyle KOYP sisteminin önemli dizayn parametrelerinden biride izolasyondur. Evsel kullanımda cihazın dış yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığında olması gerekmektedir. Dolayısıyla ayrıştırıcı, yakıt hücresi ve yanma odası özel olarak izole edilmesi gerekmektedir. KOYP reaksiyonunda açığa çıkan ısı enerjisinin bir kısmı sistemin içinde yakıt işleme ünitesinde kullanılır, geri kalan ısı enerjisi ko-jenerasyon sisteminin ısı ihtiyaçlarını karşılamada kullanılır.

#### **3.3.2 Su işleme sistemi**

Sistem için gerekli olan su, KOYP reaksiyon ürünlerinden olan yüksek sıcaklıktaki su buharı ile karşılanmaktadır. Reaksiyon ürünü olan su yüksek sıcaklıkta olduğundan reformerda ihtiyaç olunan su ve ısı ihtiyacını karşılamaktadır.

#### **3.3.3 Hava sistemi**

Sistemde oksitleyici olarak hem yakıt hücresinde hem de yanma odasında kullanılan hava bir fan vasıtasıyla 2-10 atmosfer basıncında sisteme alınacaktır. Aynı havanın bir kısmı sistemin soğutulmasında kullanılacaktır. KOYP için ihtiyaç olan hava ön ısıtıcıda ısıtılarak yüksek sıcaklıkta KOYP'ne girecektir.

#### **3.3.4 Güç düzenleme sistemi**

Güç düzenleme sistemi şebekeden bağımsız tek 30 dairelik binanın tüm elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacaktır. Güç düzenleme sisteminin görevleri aşağıda sıralanmıştır.

- KOYP tarafından sağlanan voltajı düzenlemek.
- Yakıt pilindeki doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek
- Yakıt pili yardımcı cihazları için güç sağlamak.
- Bina elektrik ihtiyacı ile KOYP elektrik üretimi arasında dengeyi sağlamak.

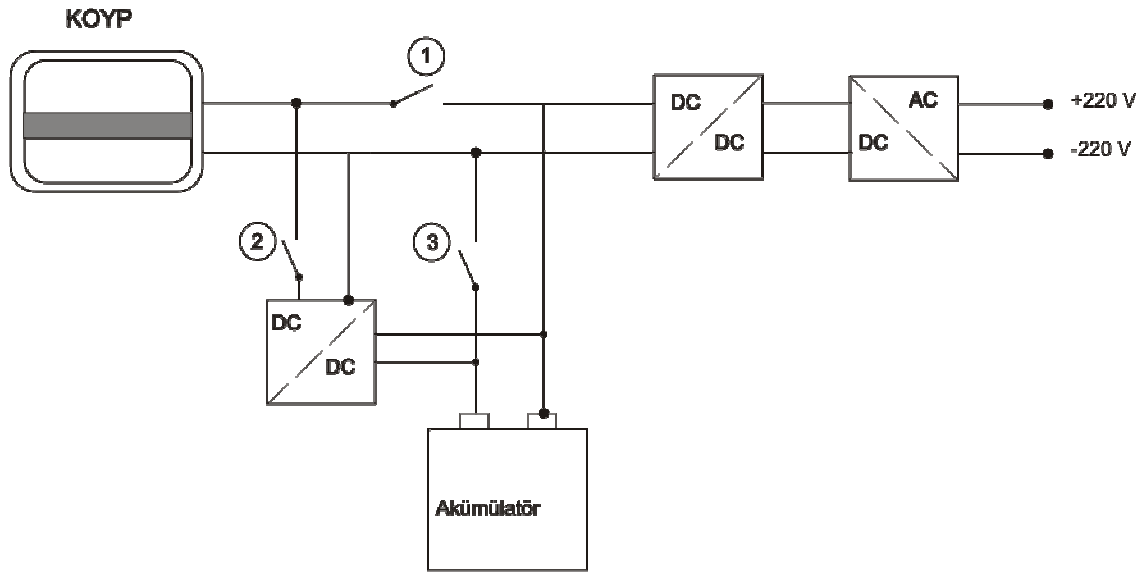
Güç düzenleme sisteminde kullanılacak malzemeler aşağıda belirtilmiştir.

*DC/DC Dönüştürücü:* KOYP elektrik üretiminde çıkış geriliminde dalgalanmalar olmaktadır bu dalgalanmaları engellemek amacıyla DC/DC dönüştürücü kullanılmaktadır.

*DC/AC Dönüştürücü:* Bu tip Dönüştürücüler DC akımını AC akımına çeviren elektronik devreler olarak tanımlanır. Bina elektriği kullanımında tün alet ve cihazlar 220 Volt Alternatif Akımda çalışmaktadır. Bu yüzden kullanıma verilecek olan elektrik enerjisi Alternatif Akım (AC) şeklinde olacaktır.

*Akümülatör:* Elektrik enerjisini depolamaya yarayan bu sistemler konusunda çok yoğun çalışma yapılmasına rağmen, eski tip kurşun-asit akülerin yerine geçebilecek depolama sistemleri hala tam olarak geliştirebilmiş değildir. Ancak, kurşun-asit daha iyi hale getirilmiştir. KOYP Ko-jenerasyon sisteminde üretilen elektrik enerjisini kullanılmayan zamanlarda depolayıp yüksek güç talebi olduğunda devreye sokmak için kullanılacaktır.

Güç düzenleme sistemi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Güç düzenleme sistemi

Güç düzenleme sisteminin çalışması aşağıda belirtilmiştir.

KOYP beklemede, akümülatörden tüketim (Anahtar 3 kapalı, 1 ve 2 açık)

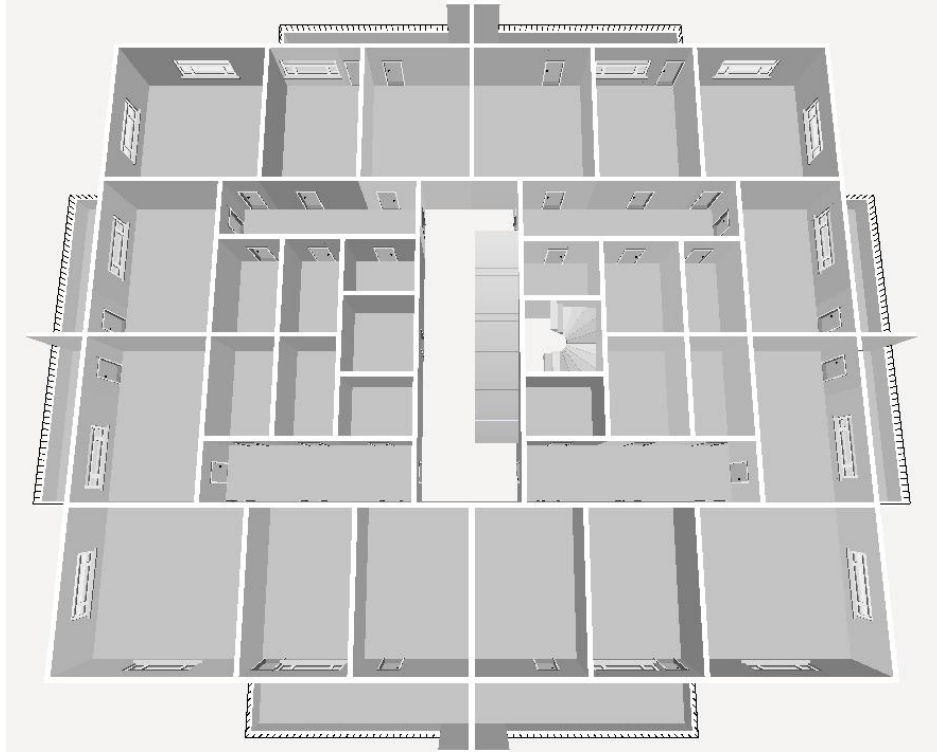
Direk tüketim ve akümülatör şarj (Anahtar 1 ve 2 kapalı, 3 açık)

Akümülatör şarj, tüketim yok (anahtar 2 kapalı, 1 ve 3 açık)

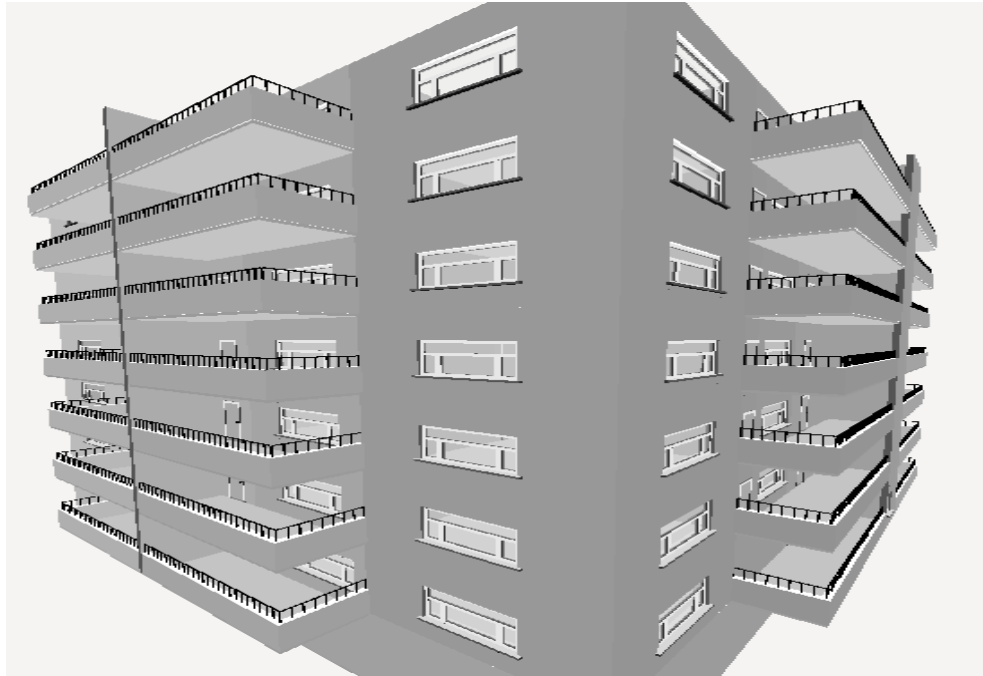
KOYP direk tüketim, akümülatör şarj yok (anahtar 1 kapalı, 2 ve 3 açık)

### 3.4 Bina İçin Gerekli Elektrik Enerjisi

KOYP ko-jenerasyon sisteminin kurulacağı bina Şekil 3.9'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.9 Örnek bina kat planı (a), Örnek bina üç boyut görünüm (b)

Bir dairede bulunan cihazların elektrik tüketimi ve kullanım saatleri bilindiği takdirde bir dairenin günlük elektrik ihtiyacı tespit edilerek binanın toplam enerji ihtiyacını bulabiliriz. Çizelge 3.2’de örnek binanın bir dairesinde kullanılacak olan elektrikli cihaz ve aydınlatmaların adedi, saatlik tüketimi ve kullanım süresi verilmiştir.

Çizelge 3.2 Bir evde kullanılan elektrik tüketen cihazlar

Cihaz Adı	Adedi	Kullanım Süresi (s)	Harcanan güç (W)
Buzdolabı 850 W A ++	1	24	20400
50 W lık TV	1	4	200
15 W tasarruflu ampul	3	6	270
1,2 kW bulaşık makinesi	1	1	1200
1,2 kW çamaşır makinesi	1	1	1200
1,4 kW elektrikli süpürge	1	0,5	700
2 kW fırın	1	1	2000
2 kW ütü	1	0,5	2000
Günlük Toplam Tüketim (Wgün) :			27970
Saatlik Tüketim (Wh) :			1165.42
Toplam güç 1165.42 Wh = 1.17 kWh dir.			

Çizelge 3.2 den 30 dairenin toplam ferdi tüketimi 35.1 kWh olmaktadır.

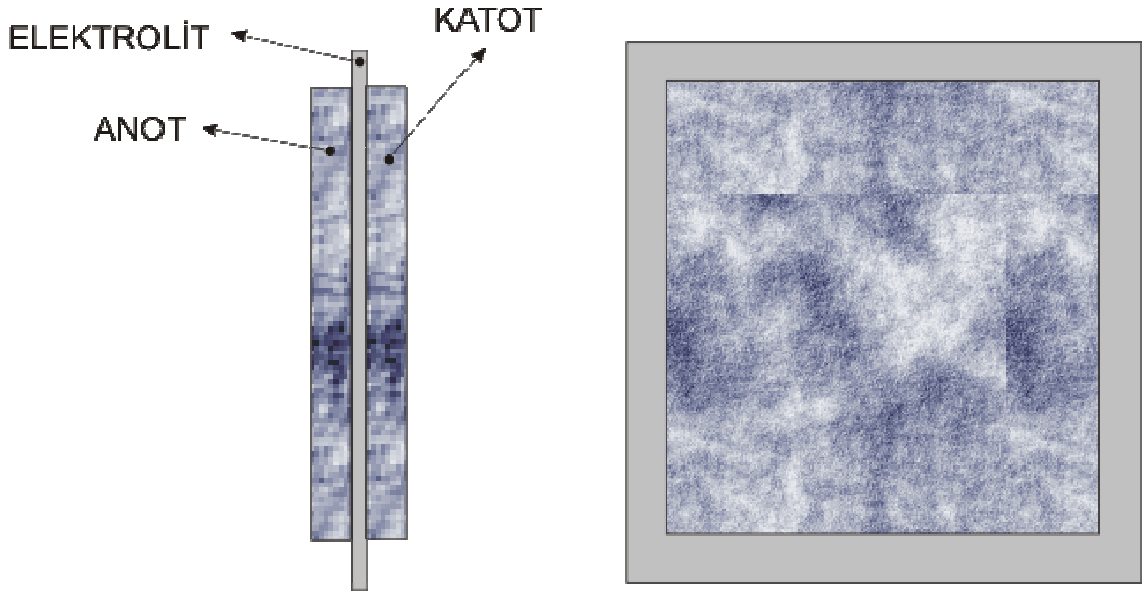
Çizelge 3.3 Binada ortak kullanılan elektrikli aletler ve aydınlatmalar

Cihaz Adı	Adedi	Kullanım Süresi (s)	Harcanan güç (W)
Hidrofor 1,5 kW Sıcak su ve soğuk su	1	8	12000
Asansör 5,5 kW (6 kişilik + 7 katlı bina)	1	10	5500
15 W tasarruflu ampul	20	1	300
Isıtma sistemi pompa ve kazanları toplam 1,2 kW	1	8	9600
KOYP işletme sürecinde sistem tüketimi yaklaşık 3,5 kW	1	24	84000
Günlük Toplam Tüketim (Wgün) :			111400
Saatlik Tüketim (Wh) :			4641.67
Binanın ortak kullanımı Toplam güç 4641.67 Wh = 4.64 kWh dir.			

Çizelge 3.3’de gösterildiği gibi 30 dairenin ortak kullanım alanları için aydınlatma asansör vb. için enerji ihtiyacı 4.64 kW olarak bulunmuştur. Bu durumda 30 daireslik binanın ferdi ve toplu kullanım alanlarının toplam enerji tüketimi 39.74 kW bulunabilir. Kurulacak olan KOYP ko-jenerasyon sisteminin üreteceği elektrik enerjisini 40 kW olarak seçilebilir.

### 3.5 KOYP Membran Alanı ve Sayısının Belirlenmesi

KOYP sistemi için kullanılacak membran şekil 3.10 da görülmektedir. Membran için hesaplamalar yapılacaktır.



Şekil 3.10 Membranın şekli

Membranın güç yoğunluğu=0.5 W/cm<sup>2</sup> alınmıştır.

$$A = x^2 \quad (3.7)$$

Membranda kullanılan enerji alanı denklem 3.7 den  $x = 15$  cm seçildiğinde 225 cm<sup>2</sup> olarak bulunur.

Bir membranın verdiği enerji ise denklem 3.8 da verilmiştir.

$$Q = A.P_{pil} \quad (3.8)$$

Denklem 3.7 den  $Q = 112.5 \text{ W}$  bulunur.

Elektrik üretim Verimi  $\mu_e = 0.50$  , yakıt tüketim verimi  $\mu_y = 0.70$  alındığında, kurulacak KOYP sisteminin gücü denklem 3.9 de ifade edilmiştir.

$$P_{KOYP} = \frac{P_{net}}{\mu_e \cdot \mu_y} \quad (3.9)$$

Denklem 3.8 den  $P_{KOYP} = 114.285 \text{ kW}$  olarak bulunur.

$$N = \frac{P_{KOYP}}{Q} \quad (3.10)$$

N hücre sayısını göstermektedir. KOYP hücre sayısını denklem 3.10 dan faydalandığımızda 1.016 adet olarak buluruz.

Bir hücreden geçen I (A) akımı Denklem 3.11'dan yararlanarak buluruz.

$$I = \frac{P}{V} \quad (3.11)$$

Çalışma şartlarında bir hücre için  $V=0.7$  alındığında  $I=160.7$  Amper bulunmaktadır.

Dizaynı yapılacak olan stak için bir hücrenin ölçüleri ve malzeme özellikleri bilinmelidir. KOYP hücresi malzemelerinin özellikleri Çizelge 3. 4'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4 SOFC hücresi kullanılan malzemeler ve özellikleri

Hücre Elemanı	Kalınlık	Malzeme
Anot	50 $\mu\text{m}$ – 150 $\mu\text{m}$	Nickel-zirconia (Ni/ZrO <sub>2</sub> )
Elektrolit	5 $\mu\text{m}$ – 150 $\mu\text{m}$	Yttria- zirconia (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> )
Katot	50 $\mu\text{m}$ – 150 $\mu\text{m}$	Stronsiyum katkılı lantan mangan (Sr-LaMn)
İnterkonnektör	0.8 mm – 1.5 mm	Paslanmaz Krom alışım
Hücre Boyutu (Katot Destekli)	2 – 3.5 mm 2.5 mm seçilmiştir.	Tüm hücre elemanları boyutlandırılması

### 3.6 Stak Sayısının Belirlenmesi ve Dizaynını Yapılması

Stak dizaynında en önemli elemanlardan biri hem hava ve yakıt gazlarını birbirinden ayırma fonksiyonu hem de elektrotlar üzerinde elektrokimyasal reaksiyon sonucu üretilen elektrik akımını toplamak için kullanılan interkonnektördür. İnterkonnektör ayrıca ardışık hücrelerin kablo kullanılmadan seri bağlanması imkanı sağlamaktadır. KOYP nin yüksek sıcaklıkta çalışması, interkonnektör malzemesinin hem oksitleyici hem de indirgeyici atmosferde bulunması ve kırılğan seramikle beraber çalışması nedeniyle ısı genleşme katsayısının seramik malzemesi ile uyumlu olması gerekmektedir.

İnterkonnektör yakıt ve havanın oksijeninin anot ve katot katalizörleri ile maksimum temasını sağlamak için üzerinde çok iyi dizayn edilmiş akış kanallarını da bulundurması ve oluşan akımın etkin bir şekilde toplanabilmesi için elektrot yüzeyleri ile maksimum kontak sağlaması gerekmektedir.

Stak tasarımında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

- ✓ Reaksiyon gazlarının her hücreye homojen olarak dağıtılması
- ✓ Her hücre için çalışma sıcaklığının homojenliğinin sağlanması
- ✓ Elektrik direnç kayıplarının en aza indirilmesi
- ✓ Reaksiyon gazlarının sızdırmazlığının sağlanması
- ✓ Mekanik dayanımın sağlanması
- ✓ Voltaj çıkışının kayıpları en aza indirilecek şekilde, güç koşullandırmaya uygun değerde olması
- ✓ Gaz nemlendirmesinin uygun şekilde yapılması

Stak dizaynı için tüm hücreler seri olarak bağlanmışlarsa yığın gerilimi hücre gerilimi ile hücre sayısının çarpımına eşittir. Denklem 3.12’de bu ilişki gösterilmiştir.

$$V_{stak} = V_{hücre} \cdot N \quad (3.12)$$

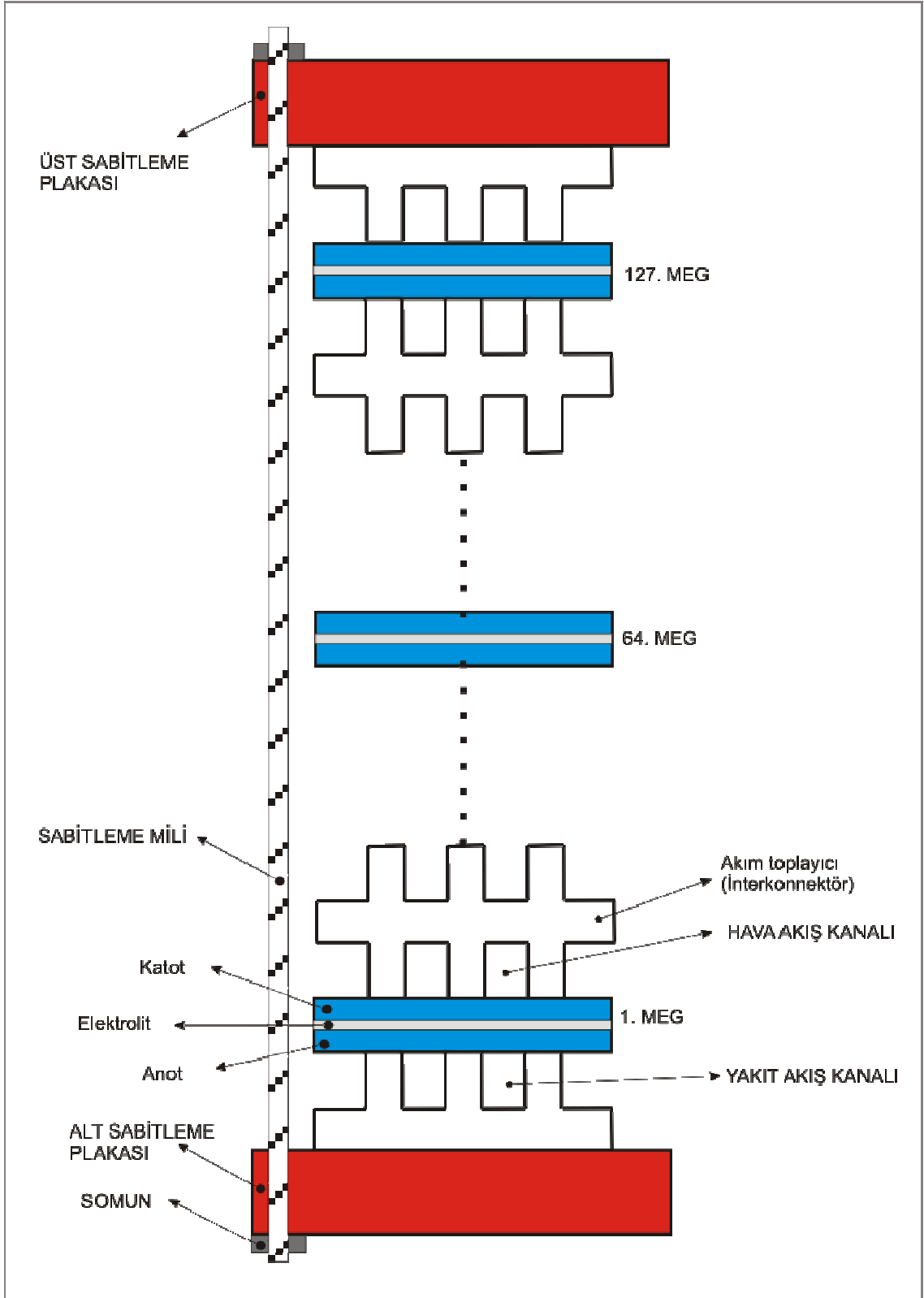
$$P = V \cdot I \quad (3.13)$$

Her bir stakın üreteceği gerilim Denklem 3.12'den gücü ise Denklem 3.13 den hesaplanabilir. Staklar 127 hücreden oluşmakta ve seri olarak bağlanacaktır.  $V_{\text{stak}} = 88.9$  volt gerilim elde edilmekte stak akımı sabit olmakta ve her bir staktan 5 kW güç elde edilecektir. Toplamda yapılacak olan 8 adet stak kendi aralarında seri modül şeklinde bağlanacaktır.

Her bir stak aynı amperi üreteceğinden stakların kendi aralarında seri bağlanması ile 711.2 Volt gerilim ve 160.6 Amper akım değerine ulaşılmaktadır. Toplam güç ise 40 kW olmaktadır.

1.016 adet KOYP hücresinden stak oluştururken bakım ve onarımın kolaylığını düşünmemiz gerektiğinde 8 stak 2 sıra halinde yerleştirerek çift yönlü montajının yapılması ile stak bakımı kolaylaştırılmakta ve stak değişimine imkan verilmektedir.

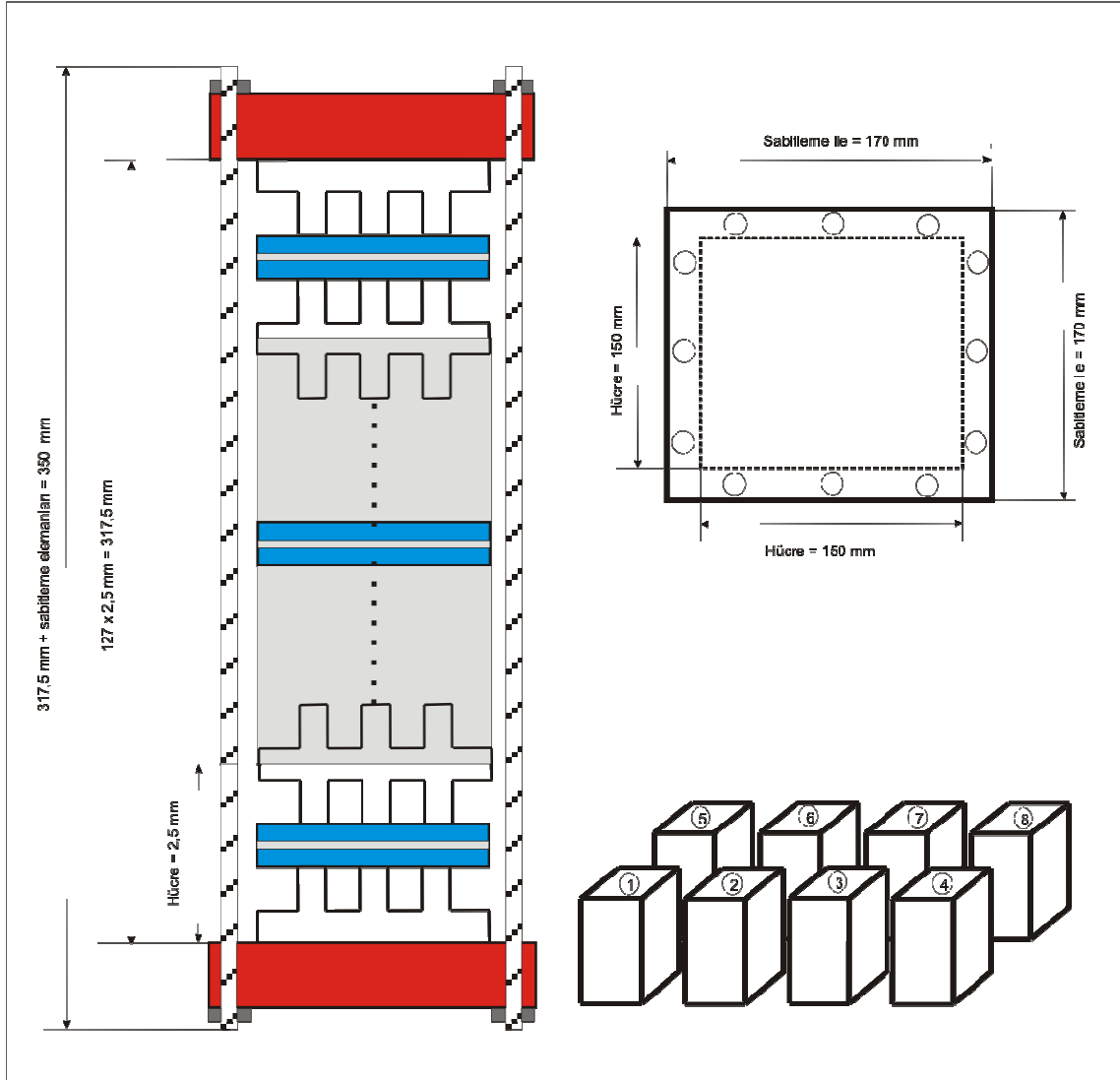
KOYP sistemi için kullanılacak olan 127 adet hücreden oluşan 5 kW gücündeki bir stakın dizaynı şekil 3.11 de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 KOYP stak dizaynı

KOYP tasarımı için ölçülendirme ve stakların yerleştirilmesi şekil 3.12 de gösterilmiştir. Burada Stak oluşturulurken ara elemanlar ve birleştirme elemanları ile

boyutlandırılması yapıp stakların yerleştirilme planı gösterilmektedir. Her bir stak 127 adet hücrenin seri bağlanması ile oluşmaktadır. Her bir stakın gücü 5kW dır. Toplamda 8 adet stak 40 kW istenilen gücü sağlamaktadır. Staklar ikişerli sıra ile yerleştirilerek bakım ve kontrol için uygun olacağı düşünülmüştür.



Şekil 3.12 KOYP sistemi için hücre ve stak tasarımı

### 3.7 Yakıt Pili İçin Gerekli Yakıt, Oksitleyici ve Çıkan Atık Su Miktarının Bulunması

Faraday yasası bir elektrokimyasal reaksiyonda üretilen ürün miktarı veya tüketilen ürün miktarının geçen akım ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Faraday

yasasını kullanarak ihtiyacımız olan hidrojen, hava ve açığa çıkan su miktarını bulabiliriz. Faraday yasası denklem 3.11 'de verilmiştir.

$$\dot{n} = iA / nF \quad (3.14)$$

Burada;

$\dot{n}$  : maddenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucu üretim veya tüketim hızı

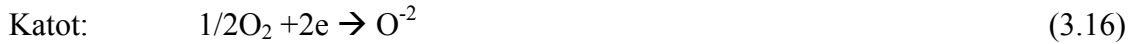
i: Akım yoğunluğu (i= 160.7 Amper olarak hesaplamıştık.)

A: aktif elektrot alanı

n: bir mol madde başına üretilen veya tüketilen elektron sayısını göstermektedir.

F: Faraday Sayısı (96.487)

Yakıt Piliinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir.



Yakıt pili hücresi için gerekli oksijen ve hava miktarını hesaplamak için denklem 3.14' den faydalanırız.

$$\dot{m} = \dot{n}.MA \quad (3.18)$$

Denklem 3.18 den hesaplandığında Çizelge 3.5 de ki reaksiyon ürünlerinin miktarı bulunur.

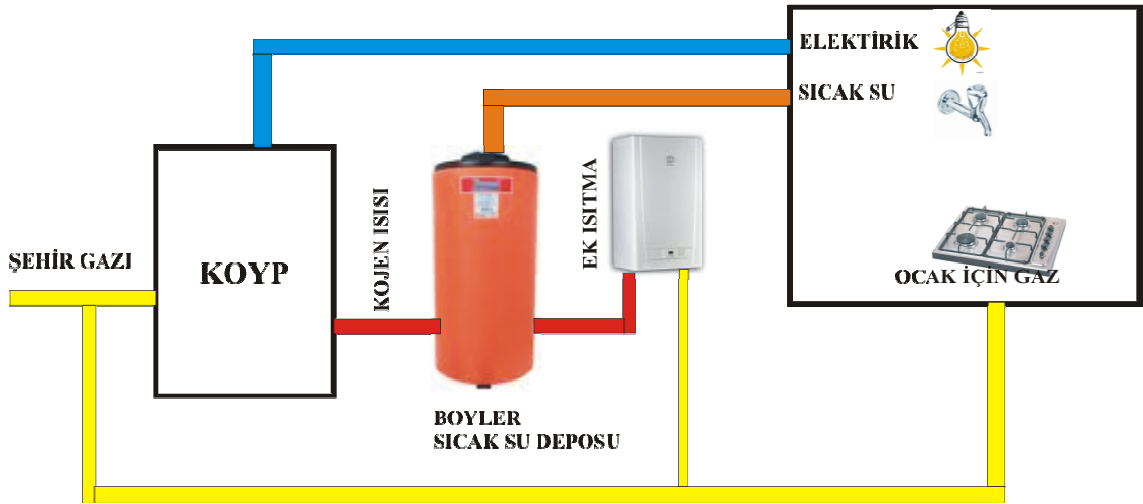
Çizelge 3. 5 KOYP'reaksiyon ürünleri miktarı (bir hücre için)

	$\dot{n}$	<b>MA</b>	$\dot{m}$
oksijen	0.4163 mol O <sub>2</sub> /s	15.9994 g/mol	6.6619 g O <sub>2</sub> /s
hidrojen	0.8377 mol H <sub>2</sub> /s	1.00784 g/mol	0.8393 g H <sub>2</sub> /s
su	0.4163 mol H <sub>2</sub> O/s	18.01508 g/mol	7.5012 g H <sub>2</sub> O /s

Çizelge 3.5 de KOYP'reaksiyona giren ve çıkan ürünlerin miktarı gösterilmiştir.

### 3.8 KOYP Ko-jenerasyon Atık Isının Kullanılması

KOYP ko-jenerasyon sisteminde konutun elektrik ve sıcak su ihtiyacı karşılanacaktır. Çalışma sistemi Şekil 3.13’de görülmektedir. KOYP ko-jenerasyon sisteminden binaya elektrik enerjisi verilecek ve sistemde açığa çıkan ısı enerjisi ısı değiştirici vasıtasıyla sıcak su deposundaki suyu ısıtacaktır. Atık ısının yetersiz olduğu durumlarda ek ısıtma sistemi devreye girerek sıcak su deposundaki suyu ısıtmak için takviye görevi yapacaktır.



Şekil 3.13 KOYP ko-jenerasyon atık ısı kullanımı

### 3.9 KOYP Ko-jenerasyon Sisteminin Isı Kazanımının Hesaplanması

KOYP sisteminde enerjinin iki bileşenden oluştuğu görülmektedir. Bu bileşenlerden ilki, sistem çıkışında kullanılabilir durumda olan enerjidir. Sistemin sabit sıcaklık ve basınçta is yapmak için hazır olan bu enerjisine Gibbs serbest (kullanılabilir) enerjisi denilmektedir. Diğer enerji bileşeni ise, entropi nedeniyle (yani sistemin düzensizliğinden ötürü) kayıp olan ve kullanılmayan enerjidir. Sabit sıcaklık ve basınç altında yakıt pilinin çalışması ile elde edilebilecek maksimum elektriksel is, elektrokimyasal tepkimenin Gibbs serbest enerjisindeki değişimle ( $\Delta G$ ) belirlenir. Bir yakıt pilinde kullanılabilir maksimum enerji, tepkimenin Gibbs serbest enerjisine bağlıdır. Bir yakıt hücresinin herhangi bir t sıcaklığı için tersinir potansiyeli, Gibbs

serbest enerjisinden hesaplanır. Gibbs fonksiyonu entalpi ve entropi değerlerinin ilişkisini gösteren denklem 3.19'dan hesaplanabilir.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.19)$$

$\Delta G$  ve  $\Delta H$  arasındaki fark, entropi değişimi ( $\Delta S$ ) ile orantılıdır. Bu denklemde  $\Delta G$  elektrik enerjisi olarak kullanılacak maksimum enerji miktarını gösterir. Yakıt hücresi içerisinde hazır bulunan toplam ısı enerjisi ise  $\Delta H$  olarak gösterilmiştir. Ürün olarak elde edilen su molekülü gaz (buhar) fazında ise  $\Delta H = -241.83$  KJ/ mol ancak ürün olarak elde edilen su molekülü sıvı fazında ise  $\Delta H = -285.84$  KJ/ mol olacaktır. Bu iki değer arasındaki fark, suyun buharlaşma molar entalpidir. Bu iki değerden büyük olanı üst ısı değer ve küçük olanı alt ısı değer olarak adlandırılır.

Bir ideal H<sub>2</sub>/hava yakıt pili sıfır akımda (açık devre durumu), 700°C ve 1 atm gaz basıncında 1.16 V sağlamalıdır. Bir yakıt pilinin 0.7 volt'da çalışması yakıttan elektrik gücüne dönüştürülecek mevcut maksimum faydalı enerjinin yaklaşık %60'ının üretilmesi demektir. Yakıtın kimyasal enerjisi denklem 3.20'de gösterilmiştir.

$$\text{Yakıtın Kimyasal Enerjisi} = \text{Elektrik Enerjisi} + \text{Isı Enerjisi} \quad (3.20)$$

Bir pilin gücü denklem 3.21 de gösterilmiştir.

$$P_{pil} = V \cdot I \quad (3.21)$$

Bir yakıt pili prosesinde mevcut maksimum gerilimin tahmin edilmesi, prosteki başlangıç durumu (H<sub>2</sub>+1/2O<sub>2</sub>) ile son durumu (H<sub>2</sub>O) arasındaki enerji farklılığının değerlendirmesini içerir. Spesifik sıcaklıkta ve basınçta bir hidrojen/hava yakıt pili reaksiyonu için maksimum pil gerilimi ( $\Delta E$ ), şeklinde hesaplanır.

1 atm sabit basınçta yakıt pili prosesinde (her mol H<sub>2</sub> için) Gibbs serbest enerji değişimi; reaksiyon sıcaklığı (T), reaksiyondaki Entalpi ( $\Delta H$ ) ve Entropi ( $\Delta S$ ) değişikliklerinden hesaplanabilir.

Çizelge 3.6 Sıcaklığa bağlı  $\Delta G$  (Gibbs) değerleri

Su Formu Ürün	Sıcaklık °C	$\Delta G$ (KJ mol <sup>-1</sup> )
Sıvı	25	-237.2
Gas	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	700	-194.1
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

1 atm basınç ve 25°C'deki (298 K) bir hidrojen/hava yakıt pili için hücre gerilimi 1,23 Volttur.

Çizelge 3.6'da  $\Delta G$  (Gibbs) sıcaklığa bağlı membranın vermiş olduğu enerji Denklem 3.22 ile ifade edilir.

$$\Delta E = - \Delta G/n.F \quad (3.22)$$

Burada;

$\Delta G$ ; reaksiyon için Gibbs serbest enerjisi değişimi

n; reaksiyondaki her mol H<sub>2</sub> için elektron mol sayısı

F; faraday sabiti (96.487 Coulombs ve Joules/Volt)

Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 700 °C  $\Delta G$  Çizelge3.1'den alınıp  $\Delta E$  değerleri hesaplandığında  $\Delta E = 1.0$  V bulunur.

KOYP çalışma şartları altında; 1 atm basınç ve 700 °C'de 0.7 V ve 0.714 A/cm<sup>2</sup> akım üreten ve toplam akımı 160.7 A olan 225 cm<sup>2</sup>'lik hücre alanına sahip bir KOYP hücresinin çalışması ele alındığında, hücrede üretilen ısı Denklem 3.23 ile hesaplanır.

$$P_{\text{ısı}} = P_{\text{toplam}} - P_{\text{elektriksel}} \quad (3.23)$$

Denklem 3.23 akım cinsinden yazılırsa denklem 3.24 oluşur.

$$P_{\text{ısı}} = (V_{\text{ideal}} - V_{\text{pil}}) \cdot I_{\text{pil}} \quad (3.24)$$

Denklem 3.24'de değerler yerine konulduğunda KOYP hücresinde 2892.6 J/dk ısı güç üretilmektedir. Üretilen ısı gücün bir kısmı sistem için gerekli ısı enerjisini sağlamakta, sistem için gerekli ısı enerjisinin fazlası ısı değiştiricide kazanılarak sıcak su olarak kullanıma verilmektedir.

Sistemimizde üretilen ısının % 20 si doğalgaz reformlamada ve giren havanın ısıtılmasında kullanılmaktadır. % 80'i 385 °C de atıl duruma düşmektedir[25]. Biz burada atıl durumdaki ısıyı 95 °C ye kadar ısı değiştiricide soğutup egzozdan çıkmasını sağlayarak ısı değiştiricide kazandığımız ısıyla 30 dairelik binanın sıcak su ihtiyacını karşılamayı düşünmekteyiz.

Kazanılan ısı miktarını Denklem 3.25'den faydalanarak bulabiliriz.

$$Q = m c \Delta(T) \quad (3.25)$$

Burada;

m: kütle

c: özgül ısı

$\Delta(T)$ : Sıcaklık farkı

Formülünden sistemden kazanacağımız atık ısı  $Q = 24845.03$  kcal/h olarak bulunur. Bulduğumuz değer kW biriminden ise 28.89 kW hesaplanmaktadır.

### 3.10 Isı Eşanjörü ve Boyler Boyutlandırılması

KOYP'un çalıştığı fakat sıcak suyun kullanılmadığı zamanlardaki atık ısıdan istifa edebilmemiz için depolu su ısıtıcı sistemi monte etmek gerekmektedir. Kazanılan atık ısının direk kullanılması durumunda hem yetersiz kalacak hem de sıcak su kullanılmayan durumlarda atık ısı zayi olacaktır. Bu durumda yalıtımlı bir depoda kullanarak sıcak suyun ısını muhafaza etmek ve sürekli atık ısıyı depodaki sıcak suya transfer etmek gerekmektedir.

#### 3.10.1 Bina sıcak su ihtiyacının belirlenmesi

Birçok türde bina için sıhhi tesisat birimi başına bir saatte düşen ,49 °C'de hesaplanan sıcak su ihtiyacı Çizelge 3.7'de verilmiştir. [26]

Çizelge 3.7 Düşük, orta ve yüksek ihtiyaca göre, çok aileli binalarda sıcak su ihtiyacı

İhtiyaç 49 °C Sıcak Su	Maksimum 2 saatlik depolama (l/kişi)	Maksimum 3 saatlik depolama (l/kişi)	Maksimum günlük depolama (l/kişi)	Ortalama Gün (l/kişi) (litre/saat)
Düşük	17	23	76	54
Orta	31	41	185	113.6
Yüksek	55	72	340	205.0

Binada 30 daire x 4 birey = 120 kişi vardır. Bu binada günlük toplam sıcak su ihtiyacı 120 x 113.6 = 13632 litre/ gün = 568 litre / saat' dir. Bu da 0.568 m<sup>3</sup> /h yapar. Denklem 3.26 dan faydalanarak Binanın ihtiyacı olan sıcak suyun kütlesi bulunur.

$$M = \rho \cdot V \quad (3.26)$$

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  olduğundan, Denklem 3.26'dan binanın 49 °C'de,  $M = 568 \text{ kg/h}$  sıcak suya ihtiyacı vardır.

Boyelerdeki sıcak suyun dağıtım hattındaki ısı kaybı ihmal edilmiştir. Boylerdeki 568 kg suyun 15 °C den 49 °C ye ısıtılması için gerekli ısı enerjisini bulmak Denklem 3.27 den faydalanmamız gerekir.

$$Q = mc\Delta(T) \quad (3.27)$$

Denklem 3.27'den hesaplandığında  $Q = 25560$  kcal/h bulunur. 30 Dairelik konutun sıcak su ihtiyacını karşılamak için 29.72 kW enerjiye ihtiyaç vardır.

Yakıt pilinden saatte 28.89 kW ısı enerjisi kazanabilmekteyiz buna mukabil binamızın sıcak su ihtiyacı 29.72 kW dır. Burada elde ede ettiğimiz ko-jenerasyon ısısı sıcak su ihtiyacımıza gerekli olan ısı enerjisini yaklaşık olarak karşılayabilmektedir. Yakıt pilleri evsel uygulamalarında sıcak su kullanımı için ısı enerji ihtiyacı KOYP Ko-jenerasyon sistemlerinde ko-jenerasyon ısısıyla karşılanabilecek orandadır.

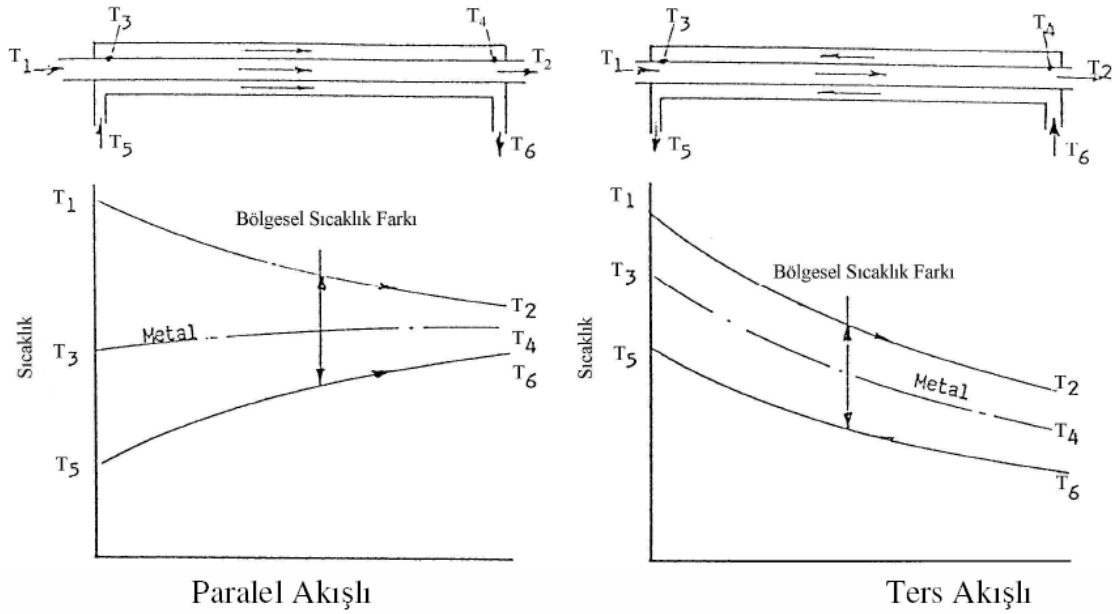
### 3.10.2 Isı değiştirici (eşanjör) boyutlandırılması

Isı değiştiricileri ısının bir ortamdan diğerine aktarılmasında kullanılır. Kızgın sudan sıcak su üretimi söz konusu ise genelde boru demetli eşanjörler kullanılır bu eşanjörler aşağıdaki özellikte olmalıdır.

- Boru demetinde bakır veya paslanmaz çelik (CrNi) kullanılır
- Dış kabuk Genellikler paslanmaz çelikten üretilir
- Su giriş, çıkış bölmeleri iyi bir ısı geçişi için ters akışlı olur.

Yakıt pilline gelen hava ve doğalgazın kimyasal olarak reaksiyona girerek ortaya bir ısı çıkmaktadır. Bu ısı ile binanın sıcak su ihtiyacını karşılanması gerekmektedir. Çıkan bu ısıya göre bir ısı eşanjörü boyutlandırılması yapılacaktır.

Aynı yönlü paralel akımlı ısı değiştirgeci için  $\Delta T_m$  logaritmik ortalama sıcaklık farkı zıt yönlü paralel akımlı ısı değiştirgecine göre daha küçüktür. Böylelikle zıt yönlü paralel akımlı ısı değiştirgecinde oluşacak ısı transferi miktarı daha büyük olur. Bu nedenle ısı değiştirgecini zıt yönlü paralel akımlı seçmek daha avantajlı olacaktır.



Şekil 3.14 Isı değiştirici (eşanjör) sıcaklık dağılımı

Bir eşanjörde kızgın sudan sıcak suya geçen ısı miktarı Denklem 3.28 ile ifade edilir.

$$Q = U.A.\Delta T_m \quad (3.28)$$

Burada;

$U$  : Toplam ısı transfer katsayısı  $930 \cdot V \cdot 0.85 (1+0.014 T_w)$   $W/m^2C$  olarak alınabilir.

$A$  : Isı geçiş alanı (Borunun toplam dış alanı) ( $m^2$ )

$\Delta T_m$  : Kızgın su ile sıcak su arasındaki logaritmik sıcaklık farkı ( $^{\circ}C$ )

$V$  : Boru içindeki su hızı (m/s)

$T_w$  : Ortalama su sıcaklığı

$Q$  : ısı değiştiricide soğuk akışkana transfer edilecek enerji (29,72 kW)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3.29)$$

Burada;

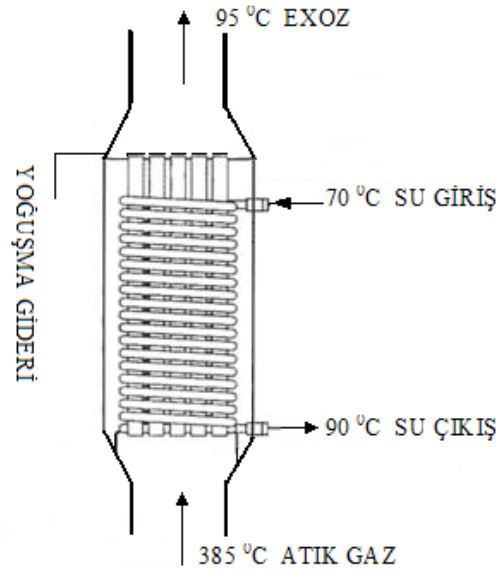
$$\Delta T_1 = T_{1g} - T_{2ç} \quad (3.30)$$

$$\Delta T_2 = T_{1ç} - T_{2g} \quad (3.31)$$

Bizim sistemimizde atık ısı 385 °C’de eşanjöre girip 95 °C’ye kadar düşürülecektir. Isı değiştiricimizde sistemden 70/90 °C sıcaklığında giriş ve çıkış sıcaklığında sıcak su kapalı devre sürekli geçirilecektir. Kapalı devre geçen sıcak suyun hızı 0.3 m/s olacak şekilde pompa seçilecek ve sistemden alacağımız g 30 dairelik bir binanın kullanım suyu ihtiyacını karşılayacak gte olan 29.72 kW gücünde olacaktır. Bu bilgiler ışığında eşanjörü aşağıdaki gibi boyutlandırabiliriz.

Denklem 3.29’dan  $\Delta T_m = 102.18$  ve  $U = 0.76836 \text{ W/m}^2\text{C}$  bulunur. Denklem 3.28’den gerekli ısı geçiş yüzey alanı  $A = 0.3785 \text{ m}^2$  bulunur.

Isı Değiştiricinin modellenmesinde ısının alınabilmesi için ısı değiştiricinin modellenmesi gerekmektedir. Modellemede en temel olay çekişi zorlaştırmadan bir tasarım yapmaktır. Bu tasarımda egzozun kesit alanı ile dik egzoz boru demetlerinin toplam kesit alanlarının toplamı eşit olmalıdır ve iyi bir çekişe imkan sağlamalıdır. şekil 3.15’de egzoz ısısından ısı elde eden ısı değiştirici gösterilmektedir.

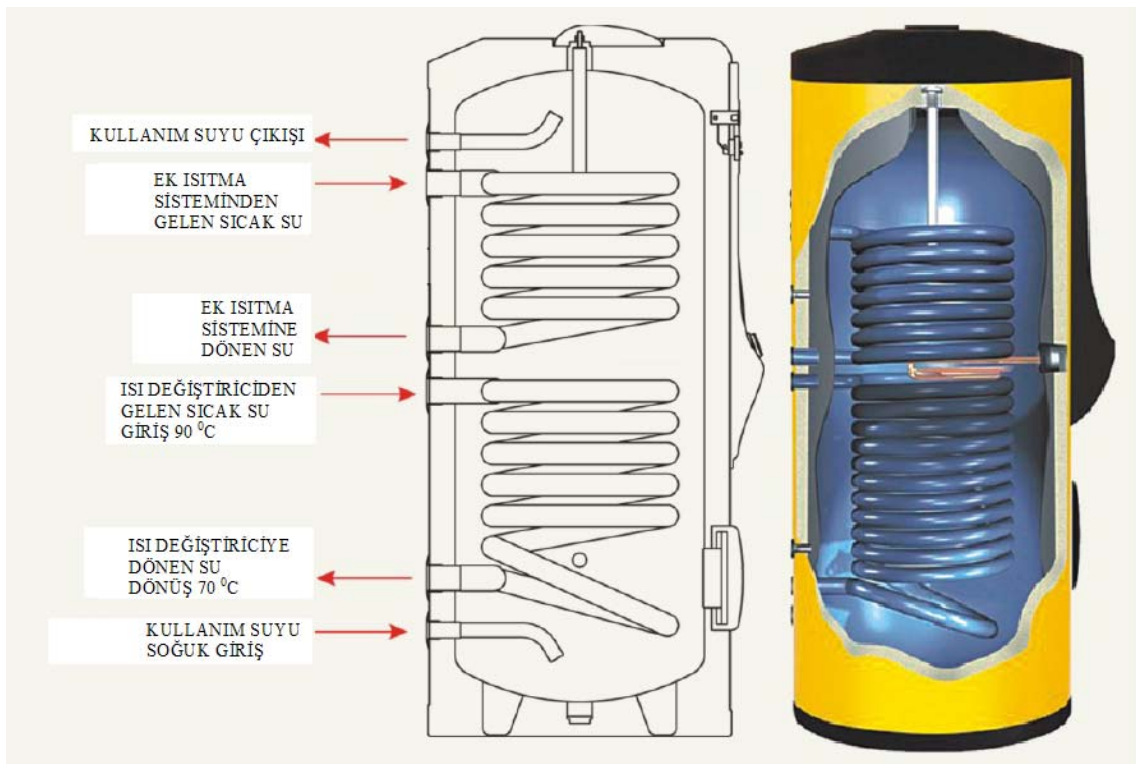


şekil 3.15 Isı değiştirici modeli

### 3.10.3 Sıcak su deposunun (boyler) boyutlandırılması

Sıcak su deposunun boyutlandırılması için talep faktörünü ve depolama faktörünü de değerlendirmek gerekmektedir.

30 dairelik binanın bir günlük sıcak su ihtiyacı 568 litre / saat olarak bulunmuştu. Sistemimizin atık ısısından maksimum seviyede faydalanabilmek için depolama kapasitemizi 3 saatlik ihtiyaca göre belirlemekte fayda vardır. Bu şekilde yaklaşık depo hacmini 1500 litre olarak seçebiliriz.



Şekil 3.16 Boyler sistemi ve modellenmesi

## BÖLÜM IV

### MALİYET ANALİZİ

Bu tezde yapılan çalışma, 30 dairelik bir binanın tüm elektrik enerji ihtiyacını ve sıcak su için ısı enerjisi ihtiyacını doğalgaz yakıtlı KOYP Ko-jenerasyon sisteminden karşılanmasıdır. Bir dairede 4 kişilik bir ailenin yaşadığı ve bu dairenin elektrikli ev aletleri ve aydınlatma için elektrik enerjisi ihtiyacı ile sıcak su ihtiyacı için ısı enerjisi ihtiyacı belirlenip, binanın tamamında ortak kullanım alanların aydınlatma, asansör, hidrofor vb. için elektrik enerjisi ihtiyacı belirlenerek bu ihtiyaçları karşılayacak KOYP Ko-jenerasyon sistemi tasarlanmıştır.

#### 4.1 Sistem İlk Yatırım Maliyeti

Sistemde ana maliyeti membran elektrot grubu oluşturmaktadır. Bu elemanların maliyeti üretim metodu ile doğrudan ilişkilidir. Hesaplar MEG'nun tape casting ve screen printing metotları ile imal edilmesi ayrıca ara bağlantı (interkonnektör) plakalarında CNC işleme ile elde edilmesi durumuna göre yapılmıştır.

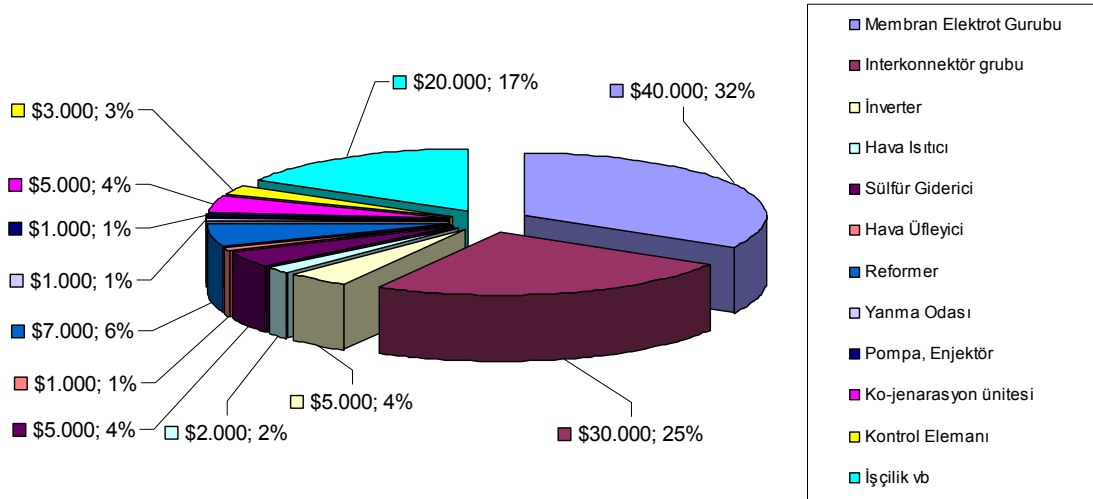
Her bir aşamada kullanılan malzemelerin fiyatları da dünyanın önde gelen seramik üreticilerinin birim fiyatları göz önüne alınarak yapılmıştır. Ayrıca maliyet analizinde üretim aşamasında, test aşamasında kullanılan cihazların ve işçilik maliyetlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir.

Çizelge 4.1'de 40 kW'lık KOYP sistemi için ana elemanlar ve maliyetleri çıkarılmıştır. Görüldüğü gibi ana maliyeti Membran, elektrot ve interkonnektör grubu oluşturmaktadır.

Çizelge 4.1 Sistem Elemanlarının Yaklaşık Maliyetleri (1 adet Üretim İçin)

<b>Eleman</b>	<b>Toplam Maliyet(\$)</b>
Membran Elektrot Gurubu	40000
İnterkonnektör grubu	30000
İnverter	5000
Hava Isıtıcı	2 000
Sülfür Giderici	5000
Hava Üfleyici	1000
Reformer	7000
Yanma Odası	1000
Pompa, Enjektör	1 000
Ko-ijenarasyon ünitesi	5000
Kontrol Elemanı	3000
İşçilik vb.	20000
<b>Toplam</b>	<b>120000</b>

Şekil 4.1’de toplam maliyetin dağılımı gösterilmektedir. Maliyetin % 32 ’si MEB % 25’i interkonnektör gurubu oluşturmaktadır.



Şekil 4.1 KOYP Maliyetinin Birimlere Dağılımı.

Maliyet seri üretimde önemli ölçüde düşmektedir (Çizelge 4.2). Sistem 10000/yıl üretimden sonra standart jeneratörlerle rekabet edebilmekte ve bu miktardan sonra hareketli parçalarının çok az olması nedeniyle daha ucuza mal olmaktadır.

Çizelge 4.2 40 kW'lık KOYP ve ko-jenerasyon sisteminin maliyet analizi

<i>Eleman</i>	<i>Tutar (\$) (1 adet)</i>	<i>Tutar (\$) (1000 adet)</i>	<i>Tutar (\$) (10000 adet)</i>	<i>Tutar (\$) (500000 adet)</i>
Membran Elektrot ve interkonnektör Gurubu	65000	50000	35000	20000
Yardımcı Elemanlar	50000	40000	25000	20000
TOPLAM	120000	90000	60000	40000

### 4.3 İşletme Maliyetleri

KOYP ko-jenerasyon sisteminin işletilmesinde işletme maliyetlerini bulmak için Çizelge 4.3 den faydalanırız.

Çizelge 4.3 Bina enerji ihtiyacı ve enerji birim maliyetleri

yıllık elektrik enerji tüketimi	350400 kWh
yıllık ısı enerji tüketimi	251412 kWh
yıllık toplam enerji tüketimi	601812 kWh
doğalgaz birim fiyatı	0.061 TL /kWh [26]
Elektrik Birim fiyatı	0.1893 kWh [27]

### 4.2 KOYP Ko-jenerasyon Sisteminin Konvansiyonel Sistemler ile Karşılaştırılması

KOYP ko-jenerasyon sistemlerinde elektrik enerjisinin yanında ısı enerjisi de üretilmektedir. Isı enerjisinin de kullanıldığı durumlarda verimi çok daha yüksek olmaktadır. KOYP ko-jenerasyon sisteminin elektriksel alternatif sistemlere göre daha yüksektir. KOYP ko-jenerasyon sistemlerinin diğer sistemlerle karşılaştırılması Çizelge 4.4 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 KOYP ko-jenerasyon sisteminin konvansiyonel sistemlerle karşılaştırılması

<b>Enerji üretim sistemi</b>	<b>KOYP Ko-jenerasyon sistemi</b>	<b>İçten Yanmalı Motor</b>	<b>Küçük Güçte Türbin-Jeneratör</b>	<b>Gaz Türbini</b>
Uygulanabilir Güç (kWe)	5-2000	25-5000	25-100	500-25000
Elektriksel Verim (%)	45-55	23-40	20-25	20-35
Gürültü (dBa)	0	50-65	50-70	70-90
NO <sub>x</sub> emisyon	<0.02	2.2-2.8	0.4-2.2	0.4-4.0

Bina enerji ihtiyacı ve birim maliyetlere göre hesaplamalar yapıldığında konvansiyonel sistemler ile KOYP ko-jenerasyon sisteminin 1 yıllık yakıt giderleri Çizelge 4.5 de gösterilmiştir. Konvansiyonel sistemlerde elektriği şebekeden almakta ısı enerjisi için şebeke den doğalgazı alarak doğalgaz yakıtlı şofbenden temin etmektedir.

Çizelge 4. 5 Bina 1 Yıllık Enerji maliyetleri karşılaştırması

	<b>Konvansiyonel sistem</b>	<b>KOYP ko-jenerasyon sistem</b>
elektrik enerjisi maliyeti	66330.72 TL	-
ısı enerjisi maliyeti	15336.13 TL	-
toplam maliyet	81666.85 TL	52776.20 TL

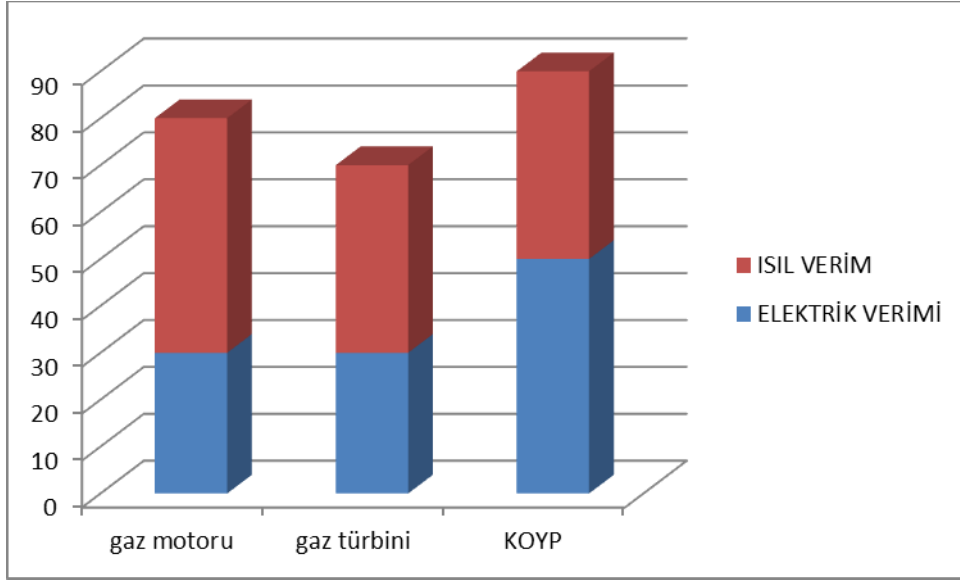
Katı oksit yakıt pili Ko-jenerasyon sisteminin konvansiyonel sisteme göre daha verimli olmaktadır. Bu sistemin tercih edilmesi durumunda enerji kullanımında yaklaşık % 35 daha avantajlı olmaktadır.

## BÖLÜM V

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 5.1 Sonuç

Konutlar için elektrik ve ısı enerjisi üretebilecek sistemler değerlendirildiğinde yakıt olarak doğalgazın kullanımı söz konusu olacaktır. doğalgaz yakıtlı elektrik ve ısı üretebilecek sistemler değerlendirildiğinde sadece verimleri değil, uygulanabilir güç aralığı, emisyon oranları, gürültü seviyeleri, kaplayacağı alan vb. faktörlerde değerlendirilmelidir. Burada KOYP ko-jenerasyon sisteminin düşünülmesinde en önemli faktör kısa vadede doğalgaz yakıtı, uzun vadede hidrojen yakıtını kullanabilmesidir. Gaz yakıtlı ko-jenerasyon sistemleri karşılaştırılması Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Gaz yakıtlı ko-jenerasyon sistemleri

Dünyada enerji ihtiyacı giderek artmakta, fosil enerji kaynakları ise giderek azalmaktadır. Petrol rezervlerinin 41 yıl, doğalgaz rezervlerinin 67 yıl, dolayında tükenmesi beklenmektedir. Bu gelişmelere bağlı olarak fosil yakıtların yerini, artan bir hızla temiz bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olan hidrojenin alacağı düşünülmektedir. Hidrojenin yanması ile sadece su açığa çıktığı için günümüzün en ciddi sorunlarını oluşturan çevre sorunları kesin olarak çözülecektir. Çevresel yöndeki sorunların çözümü ile ilgili tüm dünya duyarlı olmasına karşın, günümüzde hidrojen üretim ve taşıma

maliyetleri çok yüksektir. Bunun yanında hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pillerinin yüksek maliyetli olması da, enerji dönüşüm sistemlerinde yakıt pilinin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Hidrojen, en düşük maliyetle doğalgazdan elde edilmektedir. Türkiye’de neredeyse tüm şehirlerde konutlara dağıtım şebekesi kanalıyla ulaşmıştır. Doğalgazın konvansiyonel sistem yerine, KOYP ko-jenerasyon sistemi ile yakılması durumunda günümüz şartlarında ekonomik olup olmadığı araştırılmıştır. 30 dairelik bir konutun elektrik ve sıcak su ihtiyacının karşılanması durumunda bu sistemin ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti hesaplanmıştır. KOYP ko-jenerasyon sisteminde işletme maliyetinden edilen karla, sistemin kendini amorti etme süresi Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Üretim sayısına göre KOYP ko-jenerasyon sisteminin amorti süreleri

Üretim sayısı	(1 adet)	(1000 adet)	(10000 adet)	(500000 adet)
<b>Sistem maliyeti</b>	\$ 120000	\$90000	\$60000	\$40000
<b>Yıllık kar</b>	\$18056	\$18056	\$18056	\$18056
<b>Amorti süresi</b>	6.65 YIL	4.98 YIL	3.32 YIL	2.22 YIL

KOYP ko-jenerasyon sisteminin işletme maliyeti %35 daha avantajlı olmaktadır. İlk yatırım maliyetlerinin seri üretimle doğru orantılı şekilde düştüğü görüldü. 500.000 Adet üretime ulaşıldığında sistemin kendisini 2.2 yılda amorti edebilmektedir. Stak ömrünün en az 5 yıl sistem ömrünün 20 yıl olduğundan karlı bir yatırım olmaktadır.

## 5.2 Öneriler

KOYP ko-jenerasyon sisteminde, yakıt olarak doğalgaz mevcut doğalgaz dağıtım hattından temin edileceğinden sadece sistemin kurulum ve işletme maliyeti önemlidir. KOYP ko-jenerasyon sistemi çevresel etkileri ve sera gazı emisyonları açısından konvansiyonel sistemlere kıyasla daha yüksek performanslı bir çözümdür. KOYP ko-jenerasyon sisteminin mekanik parçaları bulunmadığından bakım maliyetleri düşüktür. Ayrıca ses kirliliği, insan üzerinde çok önemli olumsuz etkiler yaratır. Bu sistemin mekanik aksamı olmadığından ses kirliliğinin de önüne geçilmiş olur. Bu sistemin yaygınlaşması ile enerjide dışa bağımlı olan ülkemiz, enerjide yaklaşık %35 tasarruf edecektir.

Hidrojen enerjisinin kesintisiz temin edilebilmesi, uzun vadede yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilmesine bağlıdır. Kısa vadede hidrojen üretiminde doğalgazı kullanmak, mevcut teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaşmasına imkan verecektir.

Doğalgazı yakıt olarak kullanan KOYP ko-jenerasyon sistemlerinin kullanılması ekonomik görünmektedir. Tüketicinin KOYP ko-jenerasyon sistemi gibi alternatif teknolojilerin kullanımına yönelmesi için sadece piyasa koşullarının olgunlaşması veya ilgili teknolojinin ucuzlaması değil, bu konuda üretici ve tüketiciye kamusal teşviklerinde yapılması gereklidir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin artmasıyla, kısa vadede doğalgaz dağıtım hattına hidrojen vermek suretiyle şebekeye hidrojen zengin gaz verilebilir. Uzun vadede doğalgaz dağıtım hattı tamamen hidrojen hattı olarak kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Larmine JE, Dicks A. Fuel cell systems explained. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2000.
- [2] Prof. Dr. Beycan İbrahimoglu hidrojenli Enerji ureteçleri Nobel yayın:1323 1. basım Haziran 2008
- [3] Erdem IŞIK, Mustafa İNALLI , Ko-jenerasyon ve Bölgesel Isıtma Sistemlerindeki Gelişmeler, Mühendis ve Makina –Cilt 46 Sayı 550 2005
- [4] Arısoy, A., Bölgesel Isıtma, Bölgesel Isıtma ve Ko-jenerasyon Konferans Bildirileri, Makine Mühendisleri Odası Yayın No: 210, İstanbul, 73-84. 1998
- [5] Koçak, T., ve Gülşen Aksa, O., 1998, Ko-jenerasyon nedir? Ko-jenerasyon Teknikleri ve Sistem Seçimi, Bölgesel Isıtma ve Ko-jenerasyon Konferans Bildirileri, Makina Mühendisleri Odası Yay n No: 210, İstanbul, 35-58. 1998
- [6] <http://www.teias.gov.tr/ist2007/index.htm>, “Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri”, 2007.
- [7] Yavuz SALT, Salih DİNÇER, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalürji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, An Option for Special separation Operations, Membrane Proseses Journal of Engineering and Natural Sciences 2006/4
- [8] A.V. Vikrant, “Introduction to Solid Oxide Fuel Cells (SOFTC):Science and Technology,” Presented at the NETL 2001 Solid Oxide Fuel Cell Training Course, Morgantown, West Virginia, July 10-11,2001
- [9] C Singhal and Kevin Kendal, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, Elsevier 2003
- [10] ÇETİNKAYA, M. ve KARAOSMANOĞLU, V. Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı, 3e Electrotech, Bileşim Yayıncılık A.Ş, 100, s. 90- 94, İstanbul, 2002.
- [11] Olcay KINCAY, Haluk AĞUSTOS, Uğur AKBULUT Producing Hydrogen From Natural Gas by Thermal Methods Received: SigmaVol./Cilt 26, 17.03.2008
- [12] GALLIERS, S., “Fuel Cell Technology”,BSRIA, 2003
- [13] Hakan F. OZTOP, Aydın CITLAK Yakıt Pili Ko-jenerasyon Sistemlerinin Eysel ve Ticari Binalarda Uygulamaları Tesisat Mühendisliği Dergisi Sayı: 82, s. 39-48,2004.
- [14] K. Krist and J. Wright, “SOFC Residential Cogeneration,” Proc. of the 1999 Joint DOE/EPRI/GRI Fuel Cell Technology Review Conference, Chicago, IL, August 1999.

- [15] Wright, S.E., Comparison of the Theoretical Performance potential of Fuel Cells and Heat Engines, *Renewable Energy*, 29, pp. 179-195, 2004.
- [16] Entchev E., Residential fuel cell energy systems performance optimization using ‘soft computing’ techniques, *Journal of Power Sources*, 118, 212-217, 2003.
- [17] S.C. Singhal, “Solid oxide fuel cells for stationary, mobile and military applications”, *Solid State Ionics*, 405-410, 2002.
- [18] Beausoleil-Morrison I., Cuthbert D., Deuchars G., and McAlary G., “The Simulation of Fuel Cell Cogeneration Systems within Residential Buildings”, *Proc. eSim*, 40-47, The Canadian Conference on Building Energy Simulation, Montréal Canada, 2002.
- [19] Alanne K., Saari A., Ugursal V.I. and Good J., The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings, *Journal of Power Sources*, 158 403-416, 2006.
- [20] Silveira J.L., E. M. Leal, L. F. R., Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water, *Energy*, 26, 891- 904, 2001.
- [21] Ferguson, A., Ugursal, V.I., A Fuel Cell Model for Building Cogeneration Applications, *eSIM2002*, Montreal, Que., 11-13 Sept., 2002.
- [22] Kivisaari T., P. Björnbom, C. Sylwan, B. Jacquinet, D. Jansen, G. de Groot “The feasibility of a coal gasifier combined with a high-temperature fuel cell”, *Chemical Engineering Journal*, 100, 167–180, 2004.
- [23] Lisbona P., A. Corradetti, R. Bove, P. Lunghi, “Analysis of a solid oxide fuel cell system for combined heat and power applications under non-nominal conditions”, *Electrochimica Acta*, 53, 1920-1930, 2007.
- [24] Franzoni A., L. Magistri, A. Traverso, A.F. Massardo, “Thermoeconomic analysis of pressurized hybrid SOFC systems with CO<sub>2</sub> separation”, *Energy*, 33, 311–320, 2008.
- [25] Robert J. Braun Optimal Design of Solid Oxide Fuel Cell Systems for Small-scale Stationary Applications, Doctor of Philosophy, University of Wisconsin-Madison-2002.
- [26] Kapadokya Doğalgaz A.Ş., Doğalgaz Satış Faturası, Niğde Ocak- 2011
- [27] [http://www.tedas.gov.tr/268,2011\\_Yili\\_Tarifeler.html](http://www.tedas.gov.tr/268,2011_Yili_Tarifeler.html), 2011