

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN ATIK İSİSİNDAN ELEKTRİK
ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMİNİN DENEYSEL ANALİZİ**

SEVGİ FETTAH

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
2010**

**KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN ATIK ISISINDAN ELEKTRİK
ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMİNİN DENEYSEL ANALİZİ**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ELECTRICAL
ENERGY PRODUCTION SYSTEM OF SOLID OXIDE FUEL
CELLS BY USAGE OF WASTE HEAT**

SEVGİ FETTAH

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Birol KILKIŞ

Üye (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK

Üye

Prof. Dr. Cevdet TEZCAN

ONAY

Bu tez 15/09/2010 tarihinde, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

24/09/2010

Prof.Dr. Emin AKATA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TEŞEKKÜR

Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Temiz Enerjiler Laboratuvarı'nda 2007 yılından beri beraber çalışma fırsatı bulduğum Türkiye'de ve dünyada yakıt pilleri konusunda yaptığı önemli çalışmalarıyla yegâne bilim insanlarından olan çok değerli hocam Prof. Dr. Beycan İbrahimoglu'na engin bilgilerini, hayat tecrübesini, güleryüzünü hiçbir zaman benden esirgemediği bilim dünyasına ilk adımlarımı atarken fikirleriyle beni her zaman cesaretlendirdiği ve her türlü olanağı sağladığı dolayı sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Temiz Enerjiler Laboratuvarı'nda beraber çalışma fırsatı bulduğum diğer çok değerli hocam Prof. Dr. Sadig Kuliyeve her zaman bana araştırma ve geliştirme konusunda yol gösterici ve öğretici olduğu, beni sabırla dinlediği, çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımı esirgemediğinden ve katkılarından dolayı en içten dileklerle teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli fikir ve tecrübelerinden faydalandığım tez hocam Yrd. Doç. Dr. Levent Çolak'a anlayışından ve her konuda gösterdiği desteğinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çalışmayı değerlendiren jüri üyeleri Prof. Dr. Cevdet Tezcan'a ve Prof. Dr. Birol Kılış'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde destekleriyle yanımda olan, beni sabırla yetiştiren, şefkatlerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli annem Fikriye Fettah, babam Remzi Fettah ve ablam Kıymet Fettah'a; çalışmalarım boyunca katkılarını esirgemeyen, çalışma arkadaşlarım Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Temiz Enerjiler Laboratuvarı Ar-Ge mühendislerine; hiçbir zaman değerli bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen, yardımlarıyla deneysel çalışmalarına büyük katkı sağlayan teknisyen Yalçın Seven'e ve desteklerinden dolayı diğer teknisyen arkadaşlarıma ayrıca Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Gn. Md. Yrd. İbrahim Pamuk'a tez çalışmam için her türlü olanağı sağladığı, destek ve fikirleriyle yol gösterici olduğu için teşekkür ederim.

ÖZ

KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN ATIK ISISINDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMİNİN DENEYSSEL ANALİZİ

Sevgi FETTAH

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmanın amacı, literatürdeki bilgi birikiminden faydalanılarak; ülkemizde yenilenebilir enerjinin kullanımına ilgiyi arttırmak ve özellikle hidrojen enerjisi ve yakıt pili teknolojisinin gelişmesine katkıda bulunmaktır. Atık ısının geri kazanımı araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir. Bu tez çalışmasıyla, katı oksit yakıt pilinin çalışması esnasında ortaya çıkan atık ısıdan yararlanılarak; hafif, gürültüsüz çalışabilen, yedek parça sorunu olmayan; savunma sanayi, medikal vb. çeşitli uygulama alanları bulunan ve Seebeck etkisiyle ısıyı elektriğe dönüştüren termoelektrik modüller kullanılarak elektrik enerjisi üreten bir sistemin çalışabilirliğini gösterilmesi ve ileriki çalışmalara örnek oluşturması hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında atık ısıdan elektrik üretimi amacıyla tasarlanan sistem için prototip geliştirilmiş; soğutucu akışkan türlerine ve akışkanların akış hızlarına göre sistemin deneysel performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve analizler sonucunda sistemin uygulanabilirliğine, geliştirilmesine ve performansının artırılmasına yönelik görüşler ortaya atılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Katı oksit yakıt pili, atık ısı, termoelektrik modüller, hidrojen enerjisi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Levent Çolak, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION SYSTEM OF SOLID OXIDE FUEL CELLS BY USAGE OF WASTE HEAT

Sevgi FETTAH

Baskent University, Institute of Science

Department of Energy Engineering

The objective of this study is to enhance the interest of renewable energy usage by benefiting from existing knowledge about hydrogen and fuel cells, in addition to that aim, to contribute improvements on the hydrogen energy and fuel cells technology in Turkey. Waste heat recovery, is becoming a noticeable research direction through researchers. The aim of this thesis is; utilizing of the waste heat occurred during the operation of solid oxide fuel cell by using TE modules which is light, noiseless, can operate without problem of spare parts and having various application areas like defense, medical, etc. and operates by the principle of Seebeck effect to convert heat into electricity for workability of electrical power production system and for guiding to further studies. In order to investigate viability and experimental performance of the electrical energy production system, prototype has been designed and experimental setup has been constructed. Experimental performance analysis were done by changing cooling fluid and flow rate of fluids. Through the experimental results and analysis, several suggestions for system performance improvement have been proposed which guide development of this experimental setup.

KEYWORDS: Solid oxide fuel cell, waste heat, thermoelectric modules, hydrogen energy

Supervisor: Ass. Prof. Levent Çolak, Baskent University, Department of Mechanical Engineering

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii-iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v-vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. HİDROJEN ENERJİSİ.....	8
4. YAKIT PİLLERİ.....	10
4.1 Yakıt Pilinin Tarihi.....	12
4.2 Yakıt Pilinin Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri.....	12
4.3 Yakıt Pili Çeşitleri.....	14
4.4 Yakıt Pili Sistemi	15
5. KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ.....	16
5.1 Temel Bilgiler	16
5.1.1 KOYP'nin avantajları ve dezavantajları	17
5.2 KOYP Bileşenleri	18
5.3 KOYP Tasarımları.....	18
5.4 KOYP Sisteminin Ekonomik Analizi ve Mevcut Pazarı	20
6. TERMOELEKTRİĞE GİRİŞ	24
6.1 Termoelektrik Etkiler	24
6.1.1 Seebeck etkisi	25
6.2 Termoelektrik Modüller	27
6.2.1 Termoelektrik modüllerin avantajları ve dezavantajları.....	29
6.2.2 Termoelektrik modüllerin uygulama alanları.....	30
6.2.3 Termoelektrik jeneratörlerin ekonomik analizi	30
7. MATERYAL ve YÖNTEM	32
7.1 Sisteme Genel Bakış ve Sistemin Tasarımı.....	32
7.2 Deneysel Yöntem	38
7.2.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ve ölçüm aletleri.....	38

7.2.2 Ölçüm yöntemi	38
7.2.3 Kalibrasyon	39
7.3 Deneysel Çalışma.....	40
7.3.1 Su soğutmalı yöntem.....	41
7.3.2 Hava soğutmalı yöntem.....	52
7.3.3 Yüzey sıcaklıkları farkına göre elde edilen güç değerlerinin incelenmesi	71
7.4 Sonuçların Değerlendirilmesi	77
8. SONUÇ ve ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR LİSTESİ	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1	Hidrojen enerji sistemi 10
Şekil 4.2	Yakıt pilinin çalışma şeması 13
Şekil 4.3	Yığın görünümü..... 13
Şekil 4.4	Yakıt pili güç sistemi..... 15
Şekil 5.1	KOYP çalışma prensibi.....17
Şekil 5.2	Monolitik KOYP konfigürasyonu 19
Şekil 5.3	Tüp KOYP tasarımı 19
Şekil 5.4	Düzlemsel KOYP konfigürasyonu 20
Şekil 5.5	Sistemi oluşturan parçaların maliyet oranları 21
Şekil 5.6	Dünya genelinde kullanılan KOYP'lerin uygulamaya göre oranları . 22
Şekil 6.1	Basit ısı çift devresi25
Şekil 6.2	Sıcaklık farkıyla oluşturulan potansiyel farkı..... 27
Şekil 6.3	Termoelektrik modül..... 27
Şekil 6.4	TE jeneratör 28
Şekil 7.1	KOYP ve TE modül sisteminin akış şeması34
Şekil 7.2	Sistemin görünüşü..... 35
Şekil 7.3	Arasında TE modüller bulunan ısı değiştiricili elektrik üretim sistemi36
Şekil 7.4	TE modüllü ısı değiştiricinin genel görünüşü 37
Şekil 7.5	Isı değiştiricinin kesit görünümü 37
Şekil 7.6	TEC1-12706T125 TE modülün teknik çizimi 42
Şekil 7.7	Depodan gelen su soğutmalı sistemin prensip şeması 44
Şekil 7.8	Depo suyu kullanılarak elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri.....45
Şekil 7.9	Depo suyu dolaştırılarak yapılan deneylerde ortalama sonuçlara göre akım - gerilim farkı grafikleri 46
Şekil 7.10	Buzlu su soğutmalı sistemin prensip şeması..... 47
Şekil 7.11	Buzlu su kullanılarak elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri 48
Şekil 7.12	Buzlu su kullanılarak elde edilen akım - gerilim farkı değerleri..... 49

Şekil 7.13	Depo suyu ile buzlu su soğutma esnasında elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri.....	49
Şekil 7.14	TE modüllerin akım - gerilim farkı değerlerinin birbirlerine göre karşılaştırılması	50
Şekil 7.15	Soğutma suyu sıcaklığına göre elde edilen güç değerlerinin karşılaştırılması	51
Şekil 7.16	Hava soğutmalı sistemin prensip şeması	53
Şekil 7.17	Yalıtımsız hava soğutmalı sistemden elde edilen akım - gerilim farkı grafikleri.....	54
Şekil 7.18	Hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisinde elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri.....	57
Şekil 7.19	Hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisinde elde edilen akım - gerilim farkı değerleri	57
Şekil 7.20	Hava soğutmalı sistemde yalıtımlı ve yalıtımsız sistemin akım - gerilim farkı değerlerinin birbirine göre karşılaştırılması	59
Şekil 7.21	Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinin birbirlerine göre akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 7.22	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 15000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri	64
Şekil 7.23	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 15000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri.....	65
Şekil 7.24	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 20000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri	67
Şekil 7.25	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 20000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri.....	67
Şekil 7.26	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 40000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri	69
Şekil 7.27	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 40000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri.....	69
Şekil 7.28	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 8000, 15000, 20000 ve 40000 ml/dak akış hızlarından elde edilen akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması	70
Şekil 7.29	Akış hızlarına göre üretilen güç değerleri	71
Şekil 7.30	Yüzeyler arası sıcaklık farkına göre elde edilen güç değeri	73

Şekil 7.31	Akış hızına göre yüzeyler arası sıcaklık farkına göre elde edilen güç değeri	75
------------	--	----

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1	Kullanılan elektrolit tipine yakıt pilleri.....	14
Çizelge 7.1	Ölçümlerdeki belirsizlikler	39
Çizelge 7.2	TEC1–12706T125 TE modülün teknik özellikleri	41
Çizelge 7.3	Depo suyu kullanılarak elde edilen su soğutmalı sistem verileri .	44
Çizelge 7.4	Buzlu su kullanılarak elde edilen su soğutmalı sistem verileri.....	47
Çizelge 7.5	Hava soğutmalı sistem verileri	53
Çizelge 7.6	Kullanım sıcaklığına göre çeşitli ısı yalıtım malzemeleri	55
Çizelge 7.7	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (8000 ml/dak) yalıtım etkisinin incelenmesi	56
Çizelge 7.8	Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinin birbirlerine göre akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması.....	60
Çizelge 7.9	Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinden elde edilen güç değerleri.....	61
Çizelge 7.10	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (15000 ml/dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi	63
Çizelge 7.11	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (20000 ml/dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi	66
Çizelge 7.12	Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (40000 m l/ dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi	68
Çizelge 7.13	Yalıtımlı hava soğutmalı soğutma yönteminde akış hızı etkisinin incelenmesi	70
Çizelge 7.14	Soğutma yöntemlerine göre elde edilen akım- gerilim değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları	72
Çizelge 7.15	Soğutma yöntemlerine göre hesaplanan güç değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları	73
Çizelge 7.16	Su soğutmalı yöntemde akış hızına göre elde edilen akım - gerilim değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları.....	74
Çizelge 7.17	Akış hızlarına göre hesaplanan güç değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	Seebeck katsayısı
A	Amper
ΔT	Sıcaklık farkı
F	Faraday sabiti
G	Şekil faktörü
H ₂	Hidrojen
I	Thomson katsayısı
k	Isıl iletkenlik katsayısı
N	Avagadro sayısı
P	Malzemenin elektriksel iletkenliği
Π	Peltier katsayısı
Q	Birim zamandaki ısı kazancı
Q _P	Transfer edilen ısı miktarı
Q _T	Thomson ısı
Pt	Platin
R	Elektriksel direnç
T _{soğuk}	Soğuk yüzey sıcaklığı
T _{sıcak}	Sıcak yüzey sıcaklığı
U	Isı değiştiricinin toplam ısı direnci
Y ₂ O ₃	Yttrium oksit
AC	Alternatif Akım
AYP	Alkalın Yakıt Pili
COP	Soğutma Etkinlik Katsayısı
DC	Doğru Akım
DMYP	Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pili
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
LaCaMnO ₃ (LCM)	Lantan Kalsiyum Manganez filizi
LaSrMnO ₃ (LSM)	Lantan Stronsiyum Manganez filizi
PEMYP	Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili
SECA	Solid State Energy Conversion Alliance
TE	Termo Elektrik
TE ₁	Birinci TE modül
TE ₂	İkinci TE modül
TE ₃	Üçüncü TE modül
TE _{toplam}	Seri bağlı üç adet TE modül
USD	United States Dollar
V _{TE1}	Birinci TE modülün gerilimi
V _{TE2}	İkinci TE modülün gerilimi
V _{TE3}	Üçüncü TE modülün gerilimi
V _{TE toplam}	Seri bağlı TE modüllerin gerilimi
YSZ	Yttria Stabilize Zirkonya

1. GİRİŞ

Günümüzde, tüm dünyada alternatif enerji kaynaklarından enerji elde etmek amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Dünyanın üzerinde durduğu yeni ve yenilenebilir kaynaklar, jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, gel-git enerjisi, deniz dalga enerjisi olarak ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir kaynakların çevre üzerindeki olumsuz etkileri, fosil kaynaklara göre oldukça az olmasına karşın, aralıklı olarak kullanılabilmelerinden ve teknolojilerinin tam olarak gelişmemiş olması gibi nedenlerle, enerji arzı açısından bazı kısıtlara sahiptirler. Birçok enerji uzmanına göre, yenilenebilir kaynakların kısıtlı yönleri, tüm alanlarda hidrojen enerji sistemi kullanılarak çözülebilir.

Alternatif yakıtlar içinde en verimli ve kullanışlı olan hidrojendir. Hidrojenin, enerji taşıyıcısı olması, üretilmiş enerjiyi bir yerden başka bir yere taşıyabilmesi anlamına gelmektedir. Hidrojen fosil kaynaklardan elde edilebildiği gibi, yenilenebilir enerji kaynaklarından da temiz bir şekilde elde edilebilir. Hidrojen durağan güç üretme tesislerinde, ulaştırma alanında içten yanmalı bir motorda veya yakıt pillerinde kullanılabilir ve bunun sonucu ortaya çıkan salınım “su”dur.

Hidrojenin dünyadaki gelişimi yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi yönündedir. Yakıt pillerinde yakıt gazlarındaki kimyasal enerji, düşük enerjili, minimum hareketli parçalar içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir proseste elektrik enerjisine dönüştürülür.

Yakıt pilleri, boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olmasının yanı sıra aşağıdaki özellikleri nedeniyle de diğer güç sistemlerine göre daha üstündürler:

- Modülerdirler,
- Sessiz çalışabilirler,
- Kısa sürede inşaa edilebilirler,
- En az seviyede kükürt dioksit ve azot dioksit emisyonları mevcuttur,

- Yakıt olarak hidrojenin yanı sıra doğal gaz, metanol ve kömür gazlarını kullanılabilir,
- Katı atık problemleri yoktur,
- Yakıt pilleri, sürekli bakım gerektirmezler.

Günümüzde elektrolit tiplerine göre kullanılan yakıt pili çeşitleri şöyle sıralanabilir:

- a. Polimer Elektrolit Yakıt Pilleri (PEMYP)
- b. Fosforik Asitli Yakıt Pilleri (FAYP)
- c. Alkalin Yakıt Pilleri (AYP)
- d. Eriyik Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)
- e. Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)
- f. Direkt Metanol Kullanılan Yakıt Pilleri (DMYP)

Yakıt pilleri arasında en çok dikkat çeken sistem ise Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)'dir. KOYP'ler yüksek sıcaklarda çalışmakta olup ve ayrıca iyi bir performansa da sahiptir. KOYP'leri diğer yakıt pillerinden ayıran ve çekici kılan özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Yüksek çalışma sıcaklığı ve % 50-60'lara varan yüksek verime sahiptirler,
- Ortalama ömürleri 40000–80000 saattir,
- Kolaylıkla bulunabilen seramik malzemelerden üretilebilirler, Platin gibi pahalı katalizörlere ihtiyaç yoktur,
- Elektrolit problemleri yok denecek kadar azdır,
- Yüksek ısı, elektrik ile birlikte kombine edilip % 70-90'lara varan toplam verime erişebilirler.

Bu çalışma 7 bölümden oluşmaktadır. 2. bölümde KOYP ve termoelektrik (TE) modüllerin birlikte kullanılmasına ilişkin literatür araştırılması yapılmıştır. 3. bölümde, hidrojen enerjisiyle ilgili bilgiler verilmiştir. 4. ve 5. bölümde sistemin temel birimlerinden olan yakıt pilleri ve özellikle KOYP'ler üzerinde durulmuş, 6.

bölümde TE olaylardan, TE modüllerin avantaj ve dezavantajlarından ve TE modüllerin kullanım alanlarından bahsedilmiştir. 7. bölümde, tasarlanan sisteme ilişkin farklı parametreler değiştirilerek deneysel performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar kısmında ise test sonuçları analiz edilerek sistemin uygulanabilirliği tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

KOYP'lerde atık ısının kullanılması amacıyla öngörüler ve yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ceres Power Ltd tarafından 2001 yılında gerçekleştirilen projede KOYP'lerde ısı geri kazanım ünitesi alt sisteminde, sisteme mümkün olduğunca en fazla miktarda enerji sağlamak ve toplam verimi arttırmak için yığından çıkan egzozun sistem içinde tutulması ve kullanılması gerektiği bildirilmiştir [1].

Farooque ve arkadaşları tarafından 2001 yılında yapılan çalışmada; KOYP'lerde atık ısının olası kullanım alanları olarak; düşük ve yüksek basınçlı buhar üretiminde, sıcak su üretiminde, hava temizlemede, buhar ve gaz türbinlerinde kullanılması öngörülmüştür [2].

Lygre ve Matteo'nun 2001 yılındaki "KOYP güç üretim ünitesiyle bütünleşik bir CO₂ tutma ünitesi" isimli çalışmada, KOYP ünitesiyle diğer endotermik proseslerin birleştirilmesiyle etkili olarak atık ısının kullanılabilmesi öngörülmüştür. KOYP tarafından üretilen atık ısı için iki ayrı sistem tasarlanmıştır. İlk sistemde atık ısının hidrojen üretiminde; ikinci sistemde ise atık ısının biyokütle gazifikasyonunda kullanılması öngörülmüştür. CO₂ tutma üniteli KOYP sisteminde kombine bir ısı ve güç üretiminin net elektriksel verimi % 52 iken; atık ısının kullanıldığı durumda net elektriksel verimin % 60'tan fazla olduğu deneylerle kanıtlanmıştır [3].

Minh ve Powers'ın 2003 yılında hazırladığı raporda, KOYP sisteminden atık ısının elde edilmesinin yüksek verimli KOYP güç üretimi için gerekli olduğu bildirilmiş, dış bir yakıt işleme ünitesi kullanılarak endotermik buhar reformasyon prosesinin yeniden oluşumu için doğrudan atık ısıdan yararlanılabileceği, böylece KOYP sisteminin toplam veriminin artacağı belirtilmiştir [4].

Karl ve Karellas'ın 2004 yılında yaptığı çalışmada yüksek sıcaklıkta yakıt pillerinin atık ısıyı kombine bir proste kullanılırsa, enerji dönüşümünü arttıracığı ve

endotermik gazifikasyon reaksiyonuna gerekli ısının egzozdan sağlanacağı bildirilmiştir [5].

Namazian ve arkadaşları'nın 2004 yılında yaptığı "yardımcı güç ünitelerinde kullanılmak amacıyla KOYP yakıt önişleyici geliştirilmesi" isimli çalışmada; KOYP tarafından sağlanan atık ısının damıtıcı ünitesini ısıtmak için kullanılmakta olduğu söylenmiştir. KOYP atık ısıyla çalıştırılan yakıt önişleyicinin testleri ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir [6].

Cali ve arkadaşları tarafından 2005 yılından beri yürütülen İtalya'da pilot ölçekli KOYP projesinde, KOYP teknolojisinin atık ısı üretilmesine olanak verdiği; elde edilen atık ısının buhar üretiminde, sıcak ya da soğuk su ve hava üretiminde kullanılabileceği bildirilmiştir [7].

Oosterkamp'ın 2005'te yaptığı çalışmada KOYP'nin 800 °C'de çalıştığı için yüksek sıcaklık seviyelerinde atık ısının üretildiği bildirilmiştir [8]. KOYP'lerde atık ısının katot hava akışıyla atıldığı belirtilmektedir. Katot atık gazının; katot ısı değiştiricisi ve katot hava geridönüşüm kompresörü tarafından geri kazanıldığı bildirilmiştir.

Zhang ve Yamanis tarafından 2005 yılında başlanan projede, TE modülün Seebeck etkisiyle güç üretebilmesinden yararlanılarak % 65 verime ve 400 \$ / kW maliyet hedefine ulaşacak ortam basıncında ve basınçlı ortamda çalışabilen KOYP-TE modül sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada tüm sistemin ulaştığı performans ve sistemin maliyeti ile ulaşılması hedeflenen performans ve maliyet parametreleri karşılaştırılmıştır. 1 kW boyutundan kömürle çalışan MW ölçeğinde hibrit sistem tasarlanması amacıyla ara basamaklar oluşturulmuştur. Projenin ilk yarısında, en iyi sistemin basınç altında çalışan KOYP - TE sistemi olduğuna karar verilmiştir. Projenin ikinci yarısında, en uygun tasarım için üretim maliyeti ve performans özellikleri teknolojinin kurulumu ve tanımlanması, üretimde oluşabilecek sorunlar üzerinde durulmuştur [9].

Zamora ve arkadaşları'nın 2006 yılında yayınladığı çalışmada, atık ısının güç üretiminde etkili kullanımına yol açan teknolojilerdeki gelişmelerin uygulanmaya başladığı belirtilmiş; yapılan yeniliklerin sistemlerin verimliliğini arttırdığı ve

uygulamalardaki maliyetleri düşürdüğü bildirilmiştir. KOYP'lerden elde edilen atık ısının ısıtmada, sıcak su elde etmede ve soğutma sistemlerinde kullanılabileceği belirtilmiştir [10].

Zhang ve Yamanis tarafından 2007 yılında büyük çaplı maliyet etkili, yüksek verimli TE modül ve KOYP hibrit sistemi kurmak amacıyla başlatılan projede temel prensip Seebeck etkisiyle TE modülün güç üretebilmesinden yararlanılmaktır. KOYP tasarımlarında yakıtı ve yığına giren havaya önısıtma yapmak için egzoz ısı genellikle ısı değiştiriciye ya da önısıtıcıya geri döndürülmektedir. Tüm sistemin ulaştığı performans ve sistemin maliyeti ile ulaşılması hedeflenen performans ve maliyet parametreleri karşılaştırılmıştır. Projenin ilk yılında, en iyi sistemin basınç altında çalışan KOYP-TE modül sistemi olduğuna karar verilmiştir. Projenin ikinci yılında, optimal tasarım için üretim maliyeti ve performans özellikleri teknolojinin kurulumu ve tanımlanması, üretimde oluşabilecek sorunlar üzerinde durulmuştur [11].

Pedersen'in 2008 yılındaki çalışmasında gemilerde kullanılan yakıt pillerinde oluşan egzoz gazının denize verilmeden toplanarak havaya atılmasının uygun olduğu söylenmiştir [12].

Inoue ve arkadaşları'nın 2009 yılında yaptığı evsel KOYP sistemi geliştirme projesinde sistemde güç üretim ünitesi, çevre ve su ısıtmada kullanılacak atık ısı geri kazanımı ünitesi tasarlanmıştır. Tasarlanan güç üretim ve atık ısı geri kazanım ünitesinin bir bağlantı ağıyla bağlanması; su ve çevre ısıtma işlemlerinin uzaktan kontrollü olarak yapıldığı bildirilmiştir [13].

Yoshida ve arkadaşları'nın 2009'da yaptığı çalışmaya göre kombine bir KOYP ve PEMYP kullanılan sistemde, büyük ölçekli KOYP'lerin termal olarak sürdürülebilir olduğu ve atık ısılarının hidrojen üretimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabileceği bildirilmiştir. Üretilen hidrojenin PEMYP'de yakıt olarak kullanılarak doğrudan PEMYP'nin çalışmasını sağlayacağı belirtilmiştir. Ayrıca, kombine sistemin ayrı ayrı PEMYP'lere veya KOYP sistemlerine göre tüm elektriksel dönüşüm verimini arttırdığı belirtilmiştir. Sayısal hesaplamalardan, KOYP ve PEMYP'den oluşan

sistemin elektriksel veriminin, sadece KOYP sisteminin verimine göre yaklaşık % 10 daha fazla olduğu gösterilmiştir [14].

3. HİDROJEN ENERJİSİ

Sadece bir proton ve elektrondan oluşan en basit konfigürasyona sahip olan hidrojen, evrendeki atomların % 90'ından fazlasını ve toplam kütlelerin dörtte üçünü oluşturmaktadır. Hidrojen saf haliyle ve oda sıcaklığında iki atomlu bir gaz oluşturmaktadır. Bu gaz, havanın on dörtte biri yoğunluğa sahip olduğundan, havada hızla dağılmaktadır. Hidrojenin sıvı hale getirilmesi, enerji yoğun bir süreçtir ve hidrojenin -253 °C kadar soğutulmasını gerektirmektedir [15].

Renksiz, kokusuz bir gaz olan hidrojen 2,016 moleküler ağırlığı ile en hafif elementtir. Yoğunluğu havanın yoğunluğundan on dört kat küçüktür (standart sıcaklık ve basınçta 0,08376 kg / m³tür). Hidrojen 20,3 K 'nin (atmosferik basınçta) altındaki sıcaklıklarda sıvı şeklindedir. Hidrojen birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Isıl değeri 141,9 MJ / kg'dır ve gazolinin ısıl değerinden 3 kat fazladır) [16].

Evrendeki en bol bulunan element olmasına karşın, hidrojen gezegende saf halde bulunmamaktadır. Hidrojen, suda oksijenle birleşik olarak ve fosil yakıtlarda ve sayısız hidrokarbon bileşiklerde, karbon ve diğer elementlerle birleşik halde bulunmaktadır [17].

Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı da denmektedir. Hidrojen 21. Yüzyıla damgasını vuracak bir enerji taşıyıcısıdır. Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınmasında çok az enerji kaybı olan, her yerde (sanayide, evlerde ve taşıtlarda) kullanılabilen, tükenmez, temiz, kolaylıkla ısı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüşebilen, karbon içermeyen, ekonomik ve hafif olan hidrojenin; yalnız 21. Yüzyılın değil, güneş ömrü olarak öngörülen gelecek 5 milyar yılın da yakıtı olacağı söylenmektedir [18].

Hidrojen aşağıda belirtilen avantajlara sahip olmasından dolayı geleceğin ideal bir enerji taşıyıcısıdır [19]:

1. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dâhil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağı ve elektrik kullanılarak üretilebilmekte ve yüksek verimle de elektriğe çevrilebilmektedir,
2. Hidrojen gaz şeklinde, sıvı şeklinde veya katı halde depolanabilmektedir,
3. Hidrojen boru hatları veya tankerler ile uzak mesafelere taşınabilmektedir,
4. Değişik enerji formlarına, diğer yakıtlara oranla daha yüksek verimle çevrilebilmektedir,
5. Hidrojenin üretilirken, taşınırken, depolanırken veya son kullanımda çevreye zararlı herhangi bir etkisi oluşmamaktadır,
6. Hidrojenin yanması veya yakıt pilinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilmektedir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden, NO_x oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilmektedir.

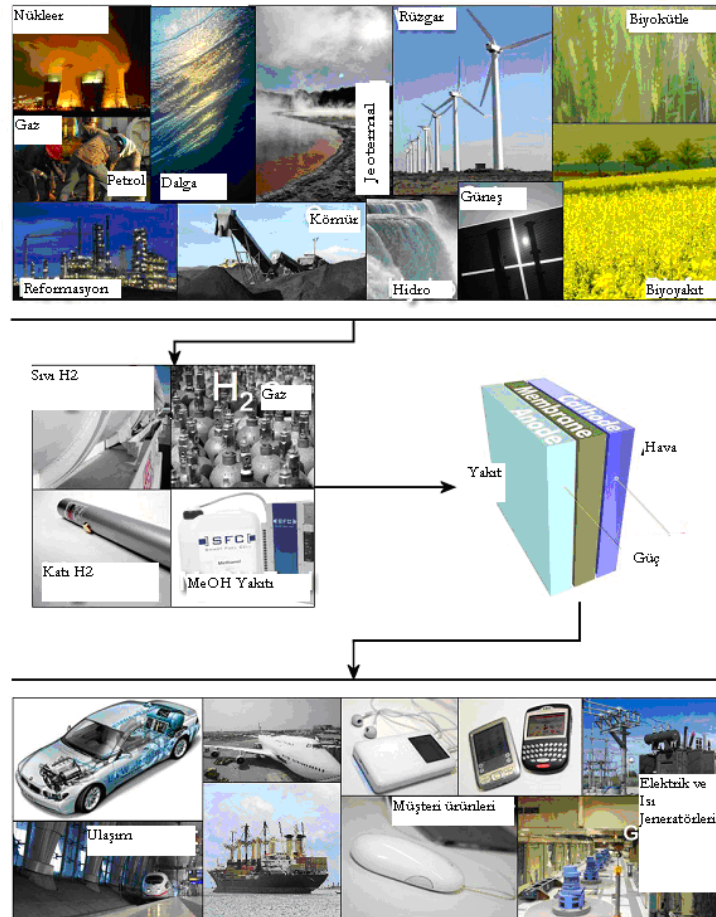
Hidrojen, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilebilen sentetik bir yakıttır. Buhar iyileştirme, atık gazların saflaştırılması, elektroliz, fotosüreçler, termokimyasal süreçler, radyoliz gibi alternatif birçok hidrojen üretim teknolojileri mevcuttur [20, 21, 22].

Su, hidrojen kaynağı olarak kullanıldığında, çevresel problemler daha az ortaya çıkmaktadır. Çünkü suyun içerisindeki hidrojenden sonraki diğer tek element oksijendir. Bütün biyolojik temelli ve fosil kaynaklar, hidrojen üretildiğinde serbest kalan çok sayıda farklı molekül içermektedir. Genellikle bunlar, aynı kirleticileri özellikle de CO₂ meydana getirmektedir [23].

4. YAKIT PİLLERİ

Hidrojenin dünyadaki gelişimi yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi yönündedir. Yakıt pilleri; verimli, ekonomik, temiz, güvenli, sessiz ve çevreyle uyumlu, enerji üretiminde kullanılan, gelecek kuşaklarda çok daha yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilen önemli yaklaşımlardan biridir.

Yakıt pilleri oldukça verimli güç üreticileridir ve tek bir aşamada elektrik üretirler, hareketli parçaları olmasının yanı sıra boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olması onları güç sistemlerine göre daha üstün kılmaktadır [24].



Şekil 4.1 Hidrojen enerji sistemi [25]

Şekil 4.1'de gösterildiği gibi pek çok üretim yöntemiyle elde edilebilen hidrojen, çeşitli yakıt pili uygulamalarına kaynaklık etmektedir [25].

Kirlilik ve sera gazı emisyonlarını azaltmanın gerekliliğinin daha iyi anlaşılması ile yakıt pillerine olan ilgi gittikçe artmıştır. Temiz ve ucuz güç için büyük umut vermelerine rağmen, yakıt pillerinin gelişimi hala çok yavaştır ve farklı uygulamalar amacıyla kullanmak için araştırmalar yapılması gerekmektedir [26].

Yakıt pillerinin uzay araçları, hava istasyonları, parklar, kırsal alanlar ve belirli askeri uygulamalarda güç kaynağı olarak kullanılmasının faydalı olduğu söylenmektedir. Hidrojen ile çalışan bir yakıt pili sistemi ideal şartlarda % 99,9 güvenilirliğe ulaşabilirler [27].

Aşağıda yakıt pili uygulamalarının bir kısmı gruplandırılarak verilmiştir [28]:

1. Sabit güç uygulamaları

- Güç üretim istasyonları
- Yedek üniteler
- Dağıtık güç üretimi
- Kombine ısı ve güç üretim sistemi olarak konutsal kullanım

2. Ulaşım uygulamaları

- Kombine ısı ve güç üretim sistemi olarak konutsal kullanım
- Otobüsler, kamyon ve arabalar
- Hava alanı içindeki terminal araçları

3. Taşınabilir uygulamalar

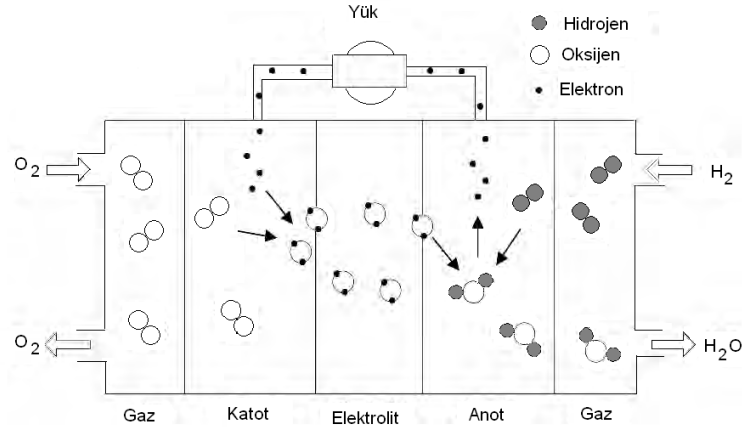
- Diz üstü bilgisayarlar

4.1 Yakıt Pilinin Tarihçesi

Yakıttaki kimyasal enerjiyi sürekli olarak elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal aletler olan yakıt pillerinin temel çalışma prensibi Christian Friedrich Schönbein tarafından 1938 yılında keşfedilmiştir [29]. Schönbein'in prensibine göre, William Grove tarafından 1939 yılında, oksijen anodu ve hidrojen katodu ile sülfürik asit çözeltisinin elektrolit olarak kullanıldığı ilk yakıt pili üretilmiştir [30]. 1960'lı yıllarda ABD uzay programında başarılı şekilde kullanımından sonra yakıt pillerine olan ilgi daha da artmıştır [31].

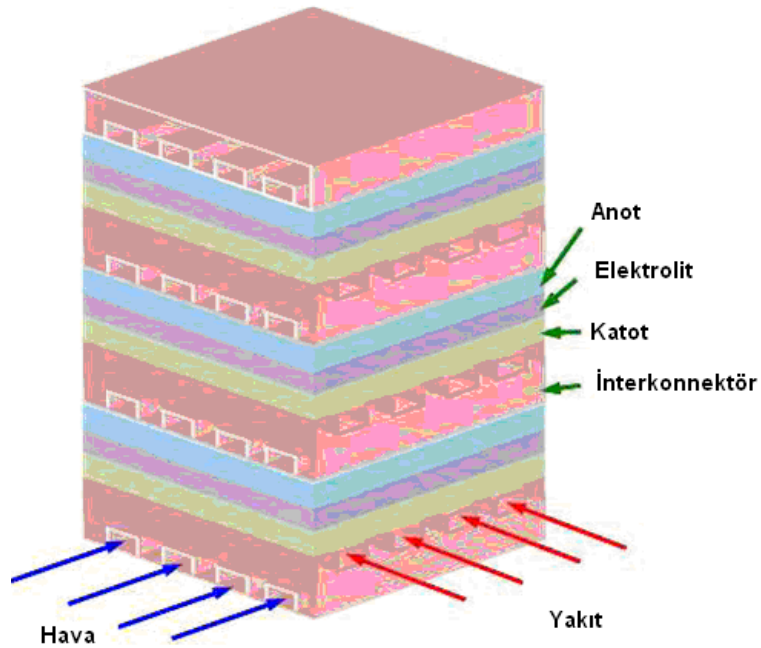
4.2 Yakıt Pilinin Bileşenleri ve Çalışma Prensibi

Yakıt pilleri elektrokimyasal araçlar olup, içinde meydana gelen kimyasal reaksiyonun enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Şekil 4.2'de tipik bir yakıt pilinin basitçe elektrot olarak görev yapan iki parça arasına sıkıştırılmış iki karbon plakadan oluştuğu görülmektedir. Bu iki uç elektrot tabaka içerisinde oksijen ve hidrojeni dağıtmak için kanallara sahiptir. Kullanılacak yakıt, yakıt pilinin anoduna, oksijen (ya da hava) ise yakıt pilinin katoduna verilmektedir. Katot tarafında kullanılan katalizörün yardımıyla yakıt, proton ve elektrona ayrıştırılmaktadır. Proton ve elektron, yakıt pilinin içinde katoda doğru ayrı rotalardan gitmektedir. Protonlar anottan katoda elektrolitten geçerek gitmektedir ve oksijenle birleşerek suyu oluşturmaktadır. Elektronlar ise anottan katoda geçerken elektrik üretmektedirler. Bu esnada elektrik enerjisinin yanı sıra ısı ve su üretilmektedir [28]:



Şekil 4.2 Yakıt pilinin çalışma şeması [23]

Elektrolit, katot ve anottan oluşan konfigürasyona tekli hücre denilmektedir. Şekil 4.3'te çoklu hücre konfigürasyonu gösterilmektedir. Tekli hücreler daha fazla güç üretecek şekilde yığın (stak) haline getirilmektedir. İnterkoneksiör (akım toplayıcılar) üzerinde gaz akış kanalları işlenmiş plakalardır. İki ya da daha fazla hücre birleştirildiğinde interkoneksiörler, sızdırmazlık contaları gerekmektedir.



Şekil 4.3 Yığın görünümü [32]

4.3 Yakıt Pili Çeşitleri

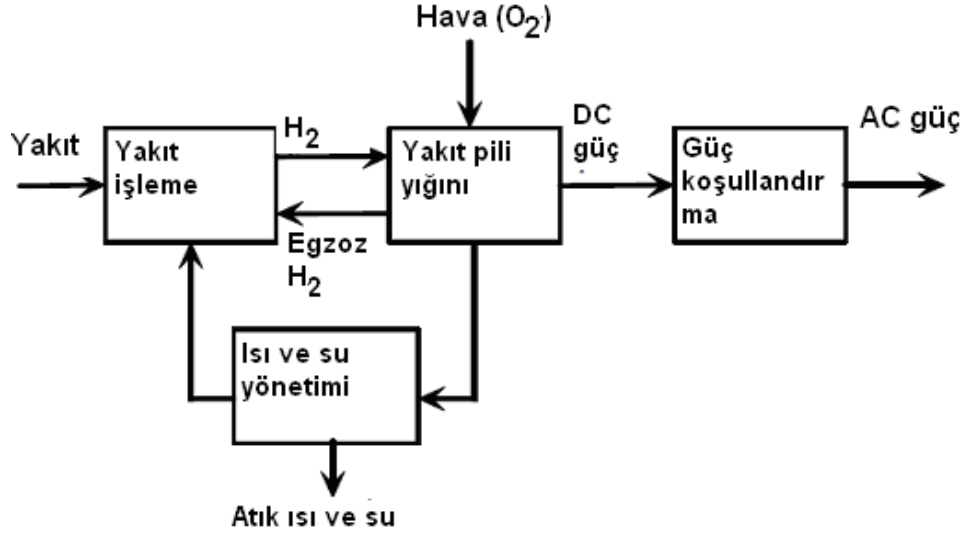
Yakıt pilleri, farklı elektrolit tipine (sıvı çözelti, katı membran veya seramik) göre sınıflandırıldığında beş çeşit yakıt pili bulunmaktadır. Elektrolit tipi ile yakıt pili çalışma sıcaklığı arasında güçlü bir ilişki vardır. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri için kullanılan seramik elektrotlara göre sıvı elektrolitler, düşük çalışma sıcaklıkları için daha uygundur. Çalışma koşullarına bağlı olarak, örneğin düşük sıcaklık yakıt pilleri (60–250 °C) ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri (600–1000 °C) olarak sınıflandırılabilir. Düşük sıcaklık yakıt pilleri genellikle PEMYP ve DMYP'dir. Orta sıcaklık yakıt pilleri FAYP'ler; yüksek sıcaklık yakıt pilleri ise EKYP ve KOYP'lerdir. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri elektrik enerjisi üretimi açısından düşük sıcaklık yakıt pillerine göre daha verimlidirler. Yüksek sıcaklık atık ısıya neden olduğundan bu ısı sabit kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilir fakat ulaşım uygulamaları için sorun içermektedir. Bilinen örnekleri; EKYP'ler ve KOYP'lerdir [24].

Çizelge 4.1 Kullanılan elektrolit tipine yakıt pilleri [24]

T (°C)	DMYP	PEMYP	FAYP	EKYP	KOYP
Elektrolit	Proton değişim membranı	Proton değişim membranı	Fosforik asit	Eriyik karbonat	Seramik
Sıcaklık aralığı °C	< 100	< 100	160–200	~650	800–1000
Yakıt	Metanol	Hidrojen	Hidrojen	Doğalgaz, kömür, biyogaz	Doğalgaz, kömür, biyogaz, hidrojen
Güç aralığı	W/kW	W/kW	kW	kW/MW	kW/MW
Uygulama örnekleri	Araçlar, portatif güç sistemleri	Araçlar, evsel uygulamalar	Ulaşım, askeri uygulamalar	Elektrik santralleri	Evsel uygulamalar, elektrik santralleri

4.4 Yakıt Pili Sistemi

Gürültü ve hava kirliliği gibi çevresel zarara neden olmamaları nedeniyle yakıt pili sistemlerinin güç üretimi için mükemmel bir seçim olduğu söylenmektedir. Şekil 4.4'te tipik bir yakıt pili güç sistemi gösterilmektedir [33].



Şekil 4.4 Yakıt pili güç sistemi [33]

- **Yakıt İşleme Birimi:** Yakıt, yakıt pilinde kullanılmadan önce mutlaka saflaştırılmalı ve işlenmelidir. Yakıt işleyici, yakıtı ön işlemden geçirerek yakıt piline gönderilmeden önce yakıtın hidrojen konsantrasyonunun arttırıldığı birimdir.
- **Yakıt Pili Yığını (Stak):** Yakıt pilinin en önemli birimi olan yığın, DC güç çıkışını arttırmak amacıyla seri bağlanmış tekli yakıt pillerinden oluşmaktadır.
- **Güç Koşullandırma Birimi:** Yakıt pilleri DC güç üretmektedir. Çoğu uygulamada ise AC güce ihtiyaç vardır. Yakıt pillerinden elde edilen DC gerilimi ilgili dönüştürücü (konverter) devreleri kullanılarak, gereken miktarda DC ya da AC gerilime çevrilmektedir.
- **Isı ve Atık Yönetimi:** Yakıt pilinde üretilen ısı ve atık gazların, ısı ve atık yönetimiyle yakıt işleme birimine geri dönüşümü gerçekleştirilmektedir.

5. KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ

5.1 Temel Bilgiler

KOYP'de 3 temel parça bulunmaktadır, bunlar; ikisi anot ve katottan oluşan elektrotlar, diğer parça ise iki elektrot arasına konulan elektrolittir.

Hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonlar sonucu elektrik akımının oluşması ve elektronların hareketinin anlaşılması açısından hidrojenle çalışan bir yakıt pilindeki elektrotlarda oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [34]:

Anot:



Anotta O^{2-} iyonları hidrojenle etkileşir ve H_2O üretir.

Katot:

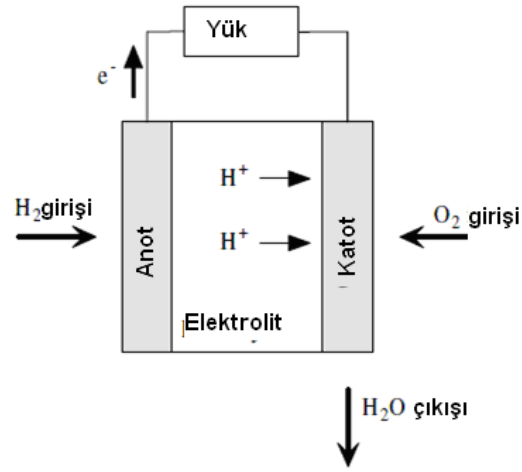


Katotta ise oksijen indirgenir. Böylece, anotta üretilen elektronların katot bölgesine ve katotta üretilen oksijen iyonlarının ise anot bölgesine taşınır, elektronlar ise anottan katoda doğru dış bir devre ile transfer olur ve bu sayede elektrik akımı üretilir. Katotta üretilen oksijen iyonları ise elektrolitin içinden geçerek anoda ulaşır ve suyu oluşturur [34].

Toplam:



Gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 5.1'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.1 KOYP çalışma prensibi [35]

5.1.1 KOYP'nin avantajları ve dezavantajları

KOYP avantaj ve dezavantajlarını yakıt hücresinin tipi ve uygulama alanı belirlemektedir. KOYP sistemlerinin avantajları [36]:

1. Yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip olmaları (% 65, kojenerasyonla % 90),
2. Yüksek çevresel duyarlılık göstermeleri,
3. Modülerlik, yakıt hücresinin fiziksel şeklinin üreteceği elektriğe bağlı olmaksızın azaltılabilir veya artırılabilir olması,
4. Farklı yakıtlarla çalışabilme özelliği ve sistem tasarımında basitlik içermeleri,
5. Egzoz ısısının, bir ısı kaynağı olarak çeşitli proseslerde kullanılabilmesidir.

KOYP'lerin dezavantajları [37]:

1. Uzun çalışmaya başlama zamanı gerektirmeleri,
2. Yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle ve yüksek sıcaklıklara dayanan malzemelerin geliştirilmesinin gerekliliği,
3. Yüksek maliyetli olmalarıdır.

5.2 KOYP Bileşenleri

KOYP'ler temel olarak anot, katot olarak isimlendirilen iki adet elektrottan ve elektrolitten oluşmaktadır. Elektrodun ana fonksiyonu tepkimeye girenler (yakıt veya oksijen) ile elektrolit arasında, tüketilmeden veya aşınmadan reaksiyonu sağlamasıdır [38].

KOYP'lerde yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle katot malzemesi olarak, Perovskite tipi Lantan Stronsiyum Manganez filizi (LaSrMnO_3 (LSM)) ve Lantan Kalsiyum Manganez filizi (LaCaMnO_3 (LCM)) kullanılmaktadır [39].

Anot malzemesi, elektronları iletmesi nedeniyle elektronik iletkenlik sağlayan gözenekli Nikel (Ni)- Yttria stabilize Zirkonya (YSZ) kullanılmaktadır [40].

Elektrolit, iyonik olarak iletken, elektriksel olarak yalıtkan özellikte olan Y_2O_3 ya da YSZ kullanılan bir bileşendir [38].

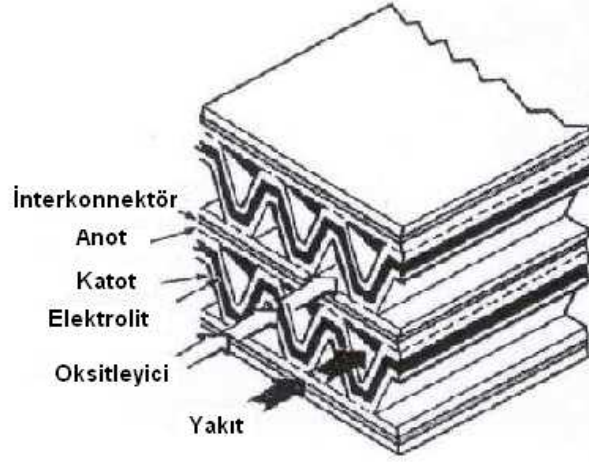
Elektrotlardan akım toplamak amacıyla interkonnektör uygulaması gerekmektedir. Elektronik iletken yapıda, elektrolite benzer özelliklere sahip seramik, metal / alaşım olmalıdır [41].

En ufak bir sızma hücre potansiyelini dolayısıyla performansı etkilediğinden hücreler arasında yüksek kalitede metal, gümüş, mika bazlı contalar gibi sızdırmazlık elemanları kullanılmaktadır [42].

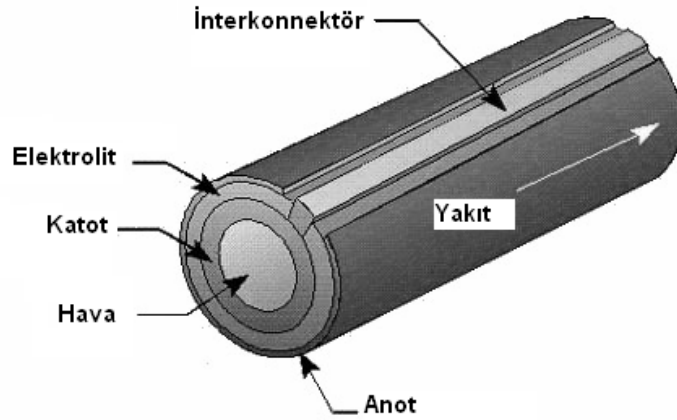
5.3 KOYP Tasarımları

Hücrelerin bağlantıları, hücrenin şekli ve yakıt ile oksijenin kanallardaki akışına göre farklılıklara sahip çeşitli KOYP konfigürasyonları mevcuttur [43]. Bunlar; monolitik, tüp ve planar KOYP olarak bilinmektedir [44]. Monolitik tasarım Şekil 5.2'de gösterilmektedir [45].

Şekil 5.3'te gösterilen tüp tasarım, en yaygın kullanılan konfigürasyon olarak bilinmektedir [46].

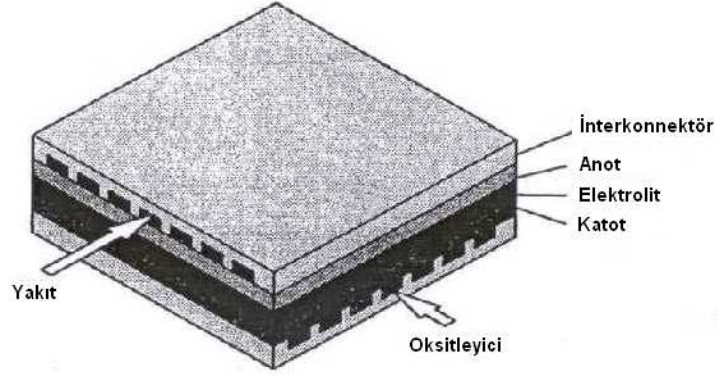


Şekil 5.2 Monolitik KOYP konfigürasyonu [44]



Şekil 5.3 Tüp KOYP tasarımı [47]

Monolitik tasarımdan farklı olarak düzlemsel KOYP'lerde, anodu, elektroliti ve katodu içeren çok tabakalı seramik tabaka kullanılmaktadır. Şekil 5.4'te düzlemsel çoklu seramik tabaka, interkonnektörlerle çevrilidir ve interkonnektörlerin yakıt ve oksitleyici için küçük gaz akış kanalları bulunmaktadır [48].



Şekil 5.4 Düzlemsel KOYP konfigürasyonu [44]

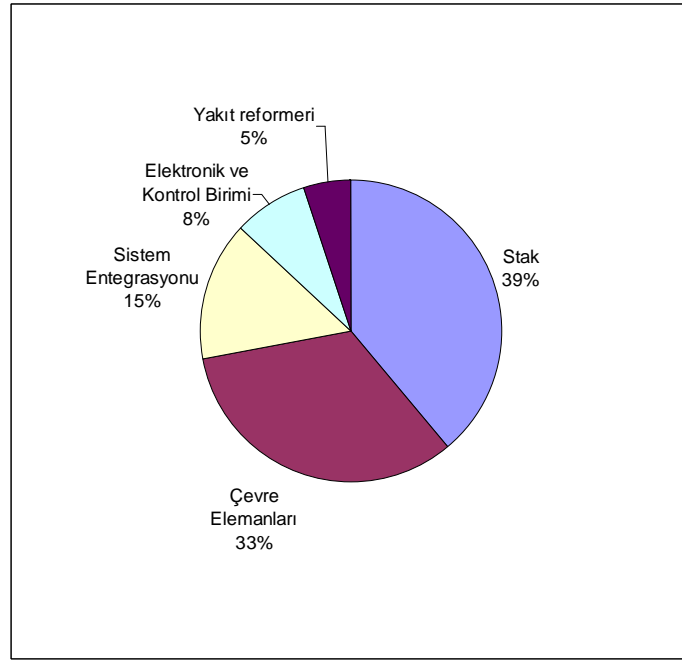
5.4 KOYP Sisteminin Ekonomik Analizi ve Mevcut Pazarı

Araştırmalara göre, hidrojenin ve yakıt pilleri gelecekte enerji pazarında büyük role sahip olacakları tahmin edilmektedir. Schoots ve arkadaşları'na göre yakıt pillerindeki gelişmeler; onların yaygın kullanımını mümkün hale getirmek amacıyla daha fazla maliyet etkili, güvenlik ve güvenilirlik seviyelerine ulaşmasını sağlayamaya yöneliktir. Günümüzde, KOYP genel maliyetlerinin son derece yüksek olduğu bilinmektedir. Şu anda yakıt pillerinin geniş alanda kullanımını sınırlayan önemli faktör nispeten yüksek maliyetlere sahip olmasıdır [49].

Amerikan Ulusal Enerji Bakanlığı tarafından yayınlanan araştırmada, enerji üretim için maliyet analizi yapılırken KOYP sistemini oluşturan yığın, yakıt ve hava kaynağı, yalıtım, reformer ve desülfürizasyon birimleri, kontrol ve güç elektroniği, amortisman, boru ve işçilik dâhil bütün bir sistemin maliyeti göz önüne alındığında 4000 \$ / kW olarak tahmin edilmektedir [50].

SECA'nın maliyet düşürme hedefi yığınların 175 \$ / kW'a mal edilmesi, tüm sistemin ise 400 \$ / kW'a düşürülmesi planlanmaktadır [51].

KOYP sisteminde, sistemi oluşturan parçaların maliyetleri kıyaslanırsa [52]:



Şekil 5.5 Sistemi oluşturan parçaların maliyet oranları [52]

Şekil 5.5'te görüldüğü gibi en yüksek maliyet parametresi yığın biriminden kaynaklanmaktadır. Sistemde çevre elemanları; yakıt pompası, hava üfleyici, ısı değiştirgeci, arka yanma odaları gibi yakıt pilinde kullanılan yan elemanlardan oluşmaktadır. Bu birimlerin toplam maliyet yüzdesi içindeki yeri ise % 33'tür. Sistem parçalarının entegrasyonu % 15'lik bir maliyete neden olmaktadır. Sistem birimlerinin birbiriyle ilişkisini sağlayan elektronik kontrol ünitesinin maliyeti ise % 8 olmaktadır. Reformer, yani yakıtın zenginleştirildiği kısım ise sistemde en düşük maliyete sahip birimdir [52].

KOYP'lerde, \$ / kW yatırım maliyetinin azaltılması amacıyla öncelikle, maliyetin azaltılması kW değerlerinin arttırılması gerekmektedir. Maliyetin azaltılması sistem birimleri arasındaki entegrasyonunun geliştirilmesine ve yığınların hacim ve ağırlıklarının azaltılmasına bağlıdır. Sistemin kW değerinin artması ise yığın veriminin, yığın çıkış gücünün, sistemin toplam veriminin ve gücünün artmasına bağlıdır. Bunlara ek olarak aşağıdaki görüşler ortaya çıkmaktadır [53]:

- KOYP'lerde ucuz elektrot malzemeleri kullanılabilir,
- Yığındaki sıcaklığın kolayca kullanılması sağlanmalıdır,

- Yüksek sıcaklıkta çalışan yığınlar zehirli gazlar tarafından zehirlenmemelidir,
- Çeşitli yakıtlarla çalışabilme olanağına sahip olmalıdır.

KOYP sistemlerini kullanım alanlarına göre üç ana grupta sınıflandırılabilir [54]: sabit uygulamalar (10 kW altındaki küçük güç üretim sistemleri ile 10 kW üstündeki büyük güç üretim sistemleri), ulaşım uygulamaları ve taşınabilir uygulamalar.



Şekil 5.6 Dünya genelinde kullanılan KOYP'lerin uygulamaya göre oranları [54]

Grafiğe göre; günümüzde dünya genelinde kullanılan birimlerinin çoğunluğu evsel güç kaynakları, kesintisiz güç kaynağı gerektiren endüstriyel uygulamalar (bankalar) ve askeri uygulamaları içeren küçük ölçekli sabit uygulamalarda kullanılmaktadır. Ulaştırma sektöründe KOYP kullanımının büyük ölçekli sabit güç üretim sistemlerinde kullanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Araştırmalar; KOYP'nin büyük ölçekli sabit uygulamalarda kullanılması amacıyla hibrid teknolojilerin geliştirilmesine; ulaşım sektöründe ise KOYP birimlerinin yardımcı güç kaynağı olarak kullanılmasına yöneliktir.

KOYP ünitelerinin kurulumu açısından dünya genelinde dağılıma bakıldığında; Avrupa'da yaklaşık % 35, oranında, Kuzey Amerika ise ikinci en büyük paya sahip

bölgedir. Bu iki bölgede, KOYP araştırma, geliştirme ve ticarileştirme faaliyetleri en yoğun şekilde devam etmektedir [54].

6. TERMOELEKTRİĞE GİRİŞ

Termoelektrik; ısı enerjisi ile elektrik enerjisi arasındaki ilgileri ve bu konuyla ilgili olayları inceleyen fizik kolu olarak bilinmektedir [55].

Termoelektrik bilimi ve teknolojisi, Seebeck etkisi tarafından elektrik gücü elde edilen ve Peltier etkisi tarafından soğutma sağlayan termoelektrik dönüştürücülerle ilişkilidir. TE jeneratörler, TE modüllerin iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı olduğunda doğru akım üreten elemanlardır [56].

6.1 Termoelektrik Etkiler

İki farklı türde yarıiletken malzemelerin kimyasal yöntemlerle birbiriyle birleştirilerek, oluşturulan devre üzerinden elektrik akımı geçirilmesiyle meydana gelen farklı sıcaklıklarda, devrede aynı anda mucitlerinin ismiyle anılan üç çeşit termoelektrik etki oluşmaktadır [57].

- Seebeck etkisi; farklı iki malzemeden oluşan bir devrede, iki birleşme bölgesi farklı sıcaklıklarda olduğunda, malzeme uçlarında ölçülen gerilimin sıcaklık farkıyla orantılı olduğunu ifade etmektedir [57].
- Peltier etkisi; birleştirilen iki farklı yarıiletken malzemeden oluşturulan devreden doğru akım geçtiğinde, TE modülde soğuk veya sıcak yüzeyde ortaya çıkan ısının devreden geçirilen doğru akımla doğru orantılı olduğunu söylemektedir [58]:

$$Q_p = \pi I \quad (6.1)$$

Q_p , birim zamanda transfer edilen ısı miktarı (W); I , devre üzerinden geçen doğru akım (A); π , Peltier sabitidir (V).

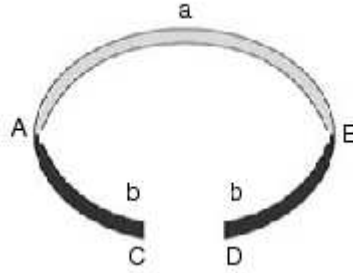
- Thomson etkisi: Seebeck ve Peltier etkileri arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bu tür evrede oluşan ısı hem elektrik akımına hem de sıcaklık farkına bağlıdır [57]:

$$Q_T = \iota \Delta T I \quad (6.2)$$

Q_T , Thomson ısısı (W), ΔT , iletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$), I , iletken üzerinden geçen akım şiddeti (A), ι , Thomson katsayısı ($\text{V} / ^{\circ}\text{C}$) dir.

6.1.1 Seebeck etkisi

Seebeck etkisi; iki farklı metalin uçları arasında oluşturulan sıcaklık farkının yarattığı elektriksel potansiyel fark olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6.1’de gösterilen a ve b iletkenleri ile termal yönden paralel ve elektriksel yönden seri bir devre oluşturulmaktadır [56]:



Şekil 6.1 Basit ısı çift devresi [56]

İki farklı yarıiletken malzemelerin birbirine seri olarak birleştirilerek oluşturulan bu devre üzerinde A ve B bağlantı noktalarında T_1 ve T_2 sıcaklık farkları yaratılırsa, C ve D açık uçlarında V elektriksel potansiyel farkı meydana gelecektir. Bunun nedeni sıcak kaynaktan soğuk kaynağa doğru hareket eden elektronların doğurduğu elektromotor kuvvettir. Ölçülen gerilim farkı “Seebeck voltajı” olarak da isimlendirilmektedir. Devrede ölçülen gerilim farkı, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı olarak değişmektedir. Şekil 6.1’de iki farklı yarıiletken malzemedan oluşturulan devrede ölçülen gerilim farkı gösterilmektedir [56]:

$$V = \alpha_{ab} (T_1 - T_2) \quad (6.3)$$

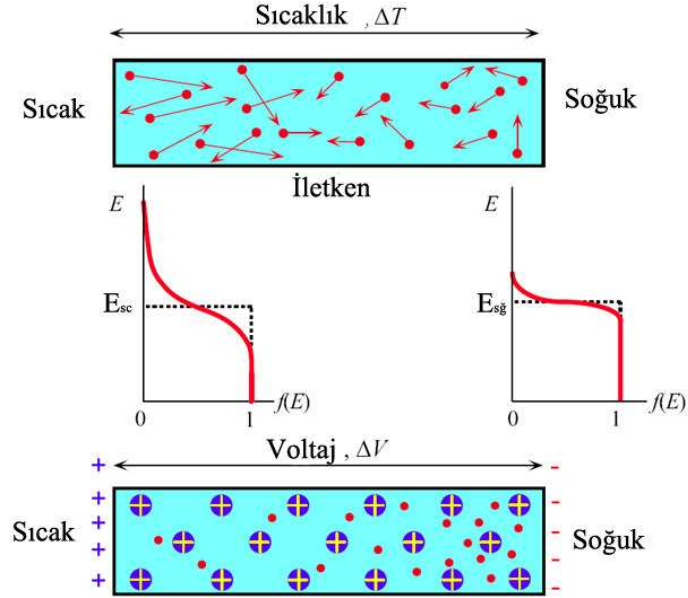
α_{ab} Şekil 6.1'de gösterilen devredeki ısı çift malzemelerinin Seebeck katsayısını göstermektedir. α 'nın değeri; devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. N tipi yarıiletken için α değeri negatif, P tipi yarıiletken için α değeri ise pozitifdir [56]:

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b \quad (6.4)$$

$$\alpha_{ab} = \frac{V}{\Delta T} \quad (6.5)$$

Devreden geçen voltaj V ile gösterilirken; α ($V / ^\circ C$) Seebeck katsayısını ΔT ($^\circ C$) yarıiletken malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir.

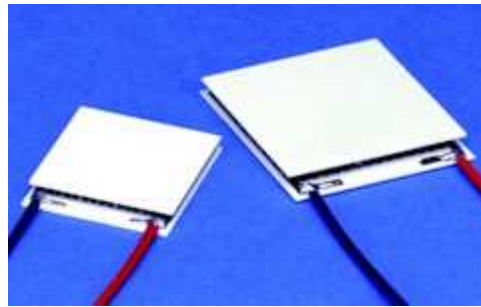
Seebeck etkisinde elektronların doğurduğu elektromotor kuvveti şöyle olmaktadır: bir iletken malzeme bir ucundan ısıtılmaya başlandığında bunu bir ucundan Şekil 6.1'de gösterildiği üzere sıcak uçtaki elektronların kinetik enerjileri fazla olduğundan soğuk bölgedeki elektronlara göre daha hızlı hareket etmektedirler. Net elektron difüzyonu sıcak taraftan soğuk tarafa olmakta ve belirli bir süre sonunda geride pozitif iyonları bırakarak elektronlar soğuk tarafta kümelenmektedir. Isı serbest elektronlar sayesinde sıcak bölgeden soğuk bölgeye taşınırken, bir yandan da potansiyel fark yaratılmış olmaktadır [59].



Şekil 6.2 Sıcaklık farkıyla oluşturulan potansiyel farkı [59]

6.2 Termoelektrik Modüller

Herhangi bir termoelektrik cihazı oluşturan modülün temelinde, iki seramik dilim arasına P ve N tipi yarıiletken malzeme birbirine elektriksel olarak seri, termal olarak birbirine paralel olacak şekilde sıkıştırılarak monte edilen mikromodül-termoелеman bulunmaktadır. Şekil 6.3'te bir TE modül görülmektedir [60].



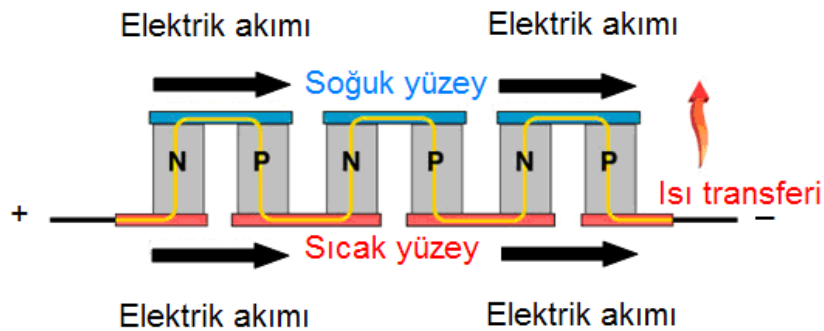
Şekil 6.3 Termoelektrik modül [60]

Bu tabakalar mekanik olarak bütün yapıyı bir arada tutmaya ve ayrı elementlerin elektriksel olarak birbirine ve dış bağlantı yüzeylerinden yalıtılmasına yardımcı olmaktadır. Bir modül içerisinde ortalama 100 adet termoeleman-mikro modül bağlantısı içermektedir. TE modül ortalama olarak, yüzey alanı 2,5 ile 50 mm² ve yüksekliği de 2,5 ile 5 mm arasında olmaktadır [61].

Termoelemanlardan oluşan bir modülün maksimum akım şiddetinin değeri termoelemanın üretiminde kullanılan TE yarıiletkenlerin kalitesine, boyutlarına ve yapısal özelliklerine göre değişmektedir [62].

TE modül devreleri iki alt kısma ayrılır: TE jeneratörler ve TE soğutucular. TE jeneratörler sıcaklık farkı dolayısıyla ısıl enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken (Seebeck etkisi); TE soğutucular elektrik enerjisini sıcaklık farkına dönüştürmektedirler (Peltier etkisi) [63].

TE jeneratörler sıcak ve soğuk yüzelerde sıcaklık farkından yararlanarak Seebeck etkisiyle DC gerilim üreten yapılardır [64]. TE jeneratörün yüzeylerine uygulanan sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak TE modüllerin uçlarından gerilim elde edilmektedir [65]. Şekil 6.4'te bir TE jeneratörün prensip şeması görülmektedir.



Şekil 6.4 TE jeneratör [66]

6.2.1 Termoelektrik modüllerin avantajları ve dezavantajları

TE soğutucular, diğer teknolojilere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır [67]:

- TE soğutucuların hareketli parçaları yoktur böylece bakıma daha az ihtiyaç duyarlar,
- Uzun ömürlüdürler, 100,000 saat çalışabilme kapasitesine sahiptirler,
- Kloroflorokarbonlar ya da herhangi bir soğutucu içermezler, dolayısıyla çevre dostudurlar,
- Yönden bağımsızdırlar, dikey veya yatay her konumda çalışabilirler, yerçekimsiz ortamda da kullanılabilirler,
- Konvansiyonel soğutmada çok küçük, çok dayanıklı bir rol üstlenirler,
- TE modüller, ısı pompası olarak tamamen tersinirdir. DC güç kaynağının polaritesinin değiştirilmesi ısının diğer yöne pompalanmasına neden olur. Soğutucu, ısıtıcı olarak görev yapmaktadırlar,
- Çok kesin olarak ($\pm 0,1$ °C) sıcaklık kontrolü yapabilirler,
- Elektriksel ya da akustik gürültü üretmezler,
- Çok hassas, küçük ortamlarda kullanılabilirler.

Dezavantajları

- TE cihazların verimi yarıiletken malzemelerin kısıtlılıkları nedeniyle düşüktür (genellikle %5),
- Buhar-sıkıştırma sistemlerine kıyasla daha düşük performans katsayısına (soğutma ve ısıtma performans katsayıları çok düşük) sahiptirler,
- Isı akışı TE aletlerin çalışması açısından önemlidir, uygun bir sıcaklık farkı oluşmadığı sürece, elektrik üretemezler,
- Düşük sıcaklık akışı uygulamalarına uygundur, yüksek soğutma yükleri için uygun olmasına karşın, buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleriyle rekabeti mümkün görülmemektedir,
- Şu an için pahalıdırlar,
- DC akım ile çalışırlar, AC akımda çalıştırmak için için dönüştürücü birimler kullanılması gerekmektedir.

6.2.2 Termoelektrik modüllerin uygulama alanları

Kullanım alanları, TE modülün geniş uygulama alanı olduğunu ve çok yönlülüğünü göstermektedir. Bu alanlar; ölçüm, biyo-teknoloji, tıp, elektronik, endüstri, genel amaçlı kullanım (evsel, mobil) ve askeri uzay alanlardır [60, 67, 68].

6.2.3 Termoelektrik jeneratörlerin ekonomik analizi

TE jeneratörlerin en önemli dezavantajı, nispeten düşük dönüşüm verimliliği (genellikle ~% 5) dir. Bu, onların güvenilirliğin büyük bir önem taşıdığı elektrik enerjisi üretiminde kullanımını kısıtlayan önemli bir neden olmaktadır [70]. Ancak son yıllarda, giderek artan çevre sorunları, özellikle küresel ısınma neticesinde konvansiyonel olmayan teknolojiler ile ilgili kapsamlı olarak elektrik ve TE güç üretimi üzerine umut verici araştırmalara ivme kazandırmıştır.

Büyük miktarlarda atık ısı dünyaya boşaltılmaktadır ve bunların sıcaklıkları ticari güç üreticileri kullanılarak geri kazanılmayacak kadar düşüktür. TE enerji üretimi düşük dereceli ısı enerjinin örneğin atık ısının elektriğe doğrudan dönüşümü için umut verici olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [71].

Riffat ve Ma'ya [67] göre, atık ısı bazlı çalışan TE teknolojilerde, termal enerji girdisinin maliyetlerini dikkate almak gereksizdir ve dolayısıyla termoelektrik güç jeneratörlerinin düşük dönüşüm verimliliği kritik bir dezavantaj değildir.

Bir TE modülün dönüşüm verimliliği nispeten düşük olmasına rağmen, atık ısıyı kullanarak TE üretim ideal bir uygulama olarak görülmektedir [72]. Bu durumda TE modülün işletim maliyeti, TE modül maliyetiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Çünkü enerji girdisi, yani yakıt maliyeti ucuz ya da bedavadır. Bu nedenle, atık ısıyı kullanarak TE enerji üretiminde önemli amaçlardan biri; cihazların birim güç başına düşen maliyetini azaltmaktır. Birim güç başına maliyet, cihaz geometrisinin optimizasyonu, üretim kalitesinin artırılmasıyla ve cihazın daha büyük bir sıcaklık farkı altında çalıştırılmasıyla azaltılabilir. Cihazların

performans ve ekonomik olarak karşılaştırılabilirliği, geliştirilen TE malzemelere ve TE modüllere bağlıdır [73].

7. MATERYAL ve YÖNTEM

7.1 Sisteme Genel Bakış ve Sistemin Tasarımı

Bu tez çalışması temel olarak; sistemin tasarımı, prototip geliştirilmesi ve geliştirilen prototipin test edilmesi ve deneysel sonuçların analizi bölümlerinden oluşmaktadır. Sistem; elektrik ve ısı üreten konvansiyonel güç üretim sistemine alternatif bir güç üretim sistemi olarak dünyada araştırmacıların ilgisini çeken ve literatür araştırması kısmında pek çok avantajından bahsedilen KOYP ve KOYP'nin atık ısısından yararlanılmak amacıyla ısı değiştiricinin arasına yerleştirilmiş TE modüllerden oluşmaktadır. Sistemi oluşturan KOYP sistemi Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Temiz Enerjiler Ar-Ge Laboratuvarı'nın bünyesinde geliştirdiği tamamen kendi tasarımı olan bir güç üretim sistemidir. KOYP ve TE modüllerin kullanımıyla oluşturulan bu tür bir sistemin tasarım ve test edilmesine ilişkin literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmadığından, sistem kendi türünde bir ilk oluşturmaktadır.

Çalışmanın amacı, atık ısının geri kazanımı anlamında, KOYP tarafından üretilen ısıyı, elektrik enerjisine çevirmek, çevrim esnasında ortaya çıkabilecek enerji kayıplarını mümkün olduğunca azaltarak sistemi verimli hale dönüştürmektir.

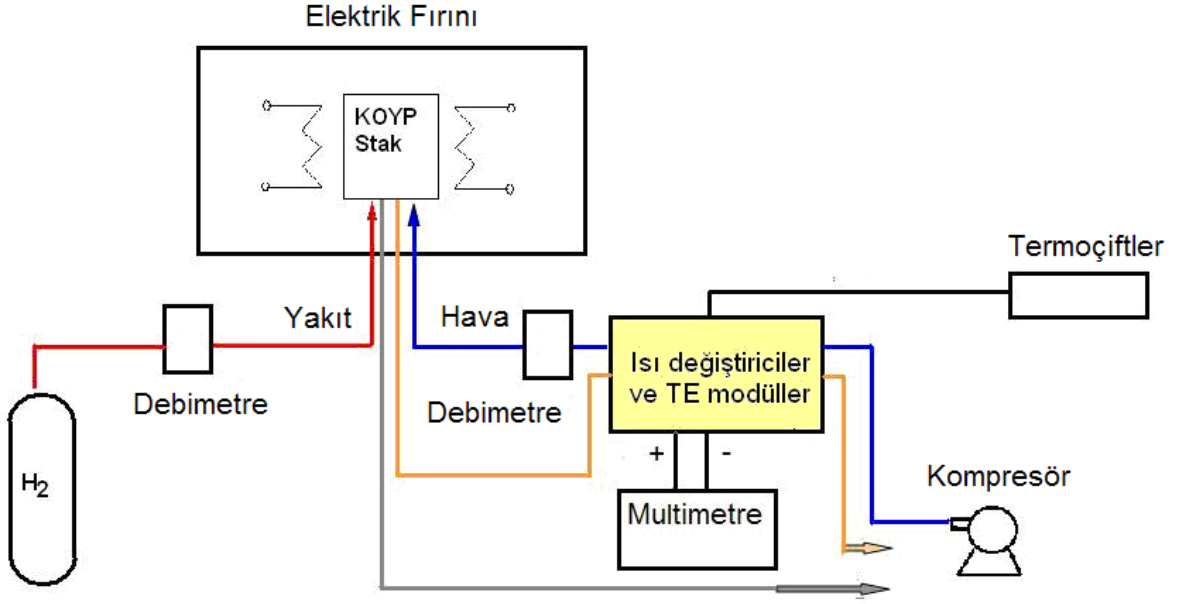
Bugün, KOYP'lerde egzoz ısısının açığa çıktığı bilinmektedir. Egzoz gazı, yığını 420 °C civarında bir sıcaklıkta terk etmektedir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıktaki egzoz gazının; yakıt pili birimlerinin ön ısıtmasında, kojenerasyon sistemlerde ve KOYP sistemine ek olarak ekstra bir güç üretiminde kullanılmasına ilişkin literatürde çalışmaların olduğu bilinmektedir. Isıdan elektrik üretimi prensibinden hareketle fazladan güç üretimi için TE modüller umut vadetmektedir. TE modüller diğer güç üretim sistemleriyle kıyaslandığında; hiçbir kloroflorokarbon içermemesi, daha az bakım gerektirmesi, kararlı halde çalışma, uzun bir çalışma ömrüne sahip olması (100.000 saat) ve hareketli parçaya sahip olmaması gibi nedenlerle tercih edilmiştir.

Termoelektriğin en umut verici uygulamalarından biri, elektrik enerjisi üretimi için atık ısının geri kazanılmasıdır [74, 75].

Tsuyoshi ve arkadaşları, ticari TE modüller çok yüksek bir performansa sahip olmamalarına rağmen ucuz, sağlam ve kurulumu kolay olması nedeniyle; düşük sıcaklıklarda atık ısı geri kazanımı için uygun olduğu bildirilmiştir [76].

Bir TE modül, ısı geri kazanımında ısıdan elektrik üretiminde yani ısıyı doğrudan Seebeck etkisi ile elektriğe dönüştürmede etkin olarak kullanılabilir. Bu tez çalışmasında; tasarlanan KOYP-TE modül sistemiyle, KOYP'de oluşan atık ısının verimli şekilde kullanılarak Seebeck etkisiyle elektriğe dönüştürülmesiyle KOYP tarafından üretilen güce ek olarak fazladan güç üretmesi amaçlanmıştır. Ek olarak üretilen gücün, çeşitli uygulamalarda kullanılması öngörülmektedir. Gücün kullanımına yönelik çalışmalar Vestel Savunma Sanayi A.Ş. Temiz Enerjiler Ar-Ge Laboratuvarı tarafından yürütülmekte, çeşitli poster ve makale sunumları ile ulusal ve uluslararası konferanslarda sunum imkânı bulmaktadır. Üretilen elektrik; sistemin elektronik kontrolünün sağlanmasında, hidrojen ve oksijen üretiminde elektrolizörlerin çalıştırılmasında vb. çeşitli uygulamalarda kullanılacaktır [77]. TE modülün yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturularak TE modül bir DC güç kaynağı gibi davranmasıyla TE modüller Seebeck etkisiyle elektrik üretecektir. Seebeck etkisiyle üretilen elektrik; PEM tipi elektrolizörün çalışması için gerekli güç kaynağını oluşturmaktadır. Bu sayede, KOYP ünitesi için gereken hidrojenin PEM elektrolizöründen sağlanması mümkün olmaktadır. Üretilen hidrojen ve oksijen atık ısıdan yararlanılarak üretilmesi neticesinde, yakıt pili sisteminin daha ekonomik ve verimli olmakta; atık ısının dışarı atılmadan daha düşük sıcaklıklara düşürülerek kullanılmasıyla, kullanım alanının aşırı ısınmamasını önlenmektedir [78].

KOYP'den elde edilen atık ısıdan TE modüller kullanılarak yararlanılması amaçlanan bu tez çalışmasında; bahsi geçen KOYP'nin egzoz gazından yararlanmak amacıyla TE modüller kullanılarak değişik tasarımlara gidilmiş, tasarlanan deney düzeneğiyle deneysel performans analizleri yapılmıştır. Sistemin en iyi konfigürasyonuna gidilmesi amacıyla çeşitli tasarımlar ve uygulamalar gerçekleştirildikten sonra, Şekil 7.1'de kurulan deney düzeneği, atık ısının kullanımına en uygun tasarım kabul edilmiştir. Şekil 7.1'de sistemin genel akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 7.1 KOYP ve TE modül sisteminin akış şeması

KOYP'lerin bir karakteristik özelliği, PEMYP aksine, önceden ısıtılması zorunluluğudur. Ayrıca, KOYP'nin en iyi koşullarda çalışması ve kararlı çalışmasını sürdürmek amacıyla sistemin sürekli ısıtılması gerekmekte olduğu bilinmektedir. Yakıt pillerindeki elektrolitleri, iyonik iletkenliği sağlamak için yeterince sıcak olduğunda yakıt pili çalışmaya başlamaktadır. Yakıt pillerinin çalışmaya başlaması için; elektrolitlerin iyonik iletkenliği sağlayacak yeterli sıcaklığa ulaşması gerekmektedir. Genellikle, küçük yığınların ısıtılmasında elektrikli ısıtıcılar kullanılmaktadır [79]. Sistemin ön ısıtılmasının sağlanması amacıyla, Şekil 7.1'de görüldüğu üzere, KOYP yığını elektrikli fırınının içine yerleştirilmiştir.

Deneyler, KOYP'nin yakıt olarak saf H₂ ve oksitleyici olarak hava kullanıldığı durumda gerçeleştirilmiştir. KOYP'nin çalışmasını sağlayacak saf hidrojen, hidrojen tüpünden; hava ise kompresör aracılığıyla verilmektedir. Sisteme verilen hidrojen ve havanın akış hızı debimetreler ile kontrol edilmektedir. KOYP'nin çalışma prensibi gereği kullanılan saf H₂ ve hava, sistemden ayrı ayrı dışarı atılmaktadır. Anot tarafından su, katot tarafından ise kullanılmış hava gazı karışımı (egzoz gazı) çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, katot çıkışından elde edilen egzoz gazının ısı enerjisinden elektrik enerjisi sağlanmaktadır. Isıl enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlamak amacıyla iki adet bakırdan yapılmış özel

tasarlanmış, ısı değiştirici ve ısı değiştiricilerin arasına Seebeck etkisiyle elektrik üretebilen 3 adet TE modül kullanılmıştır.

Sistemde sıcaklık ölçümü amacıyla termočiftler ve gerilim / akım değerlerini ölçmek amacıyla multimetreler kullanılmıştır.



Şekil 7.2 Sistemin görünüşü

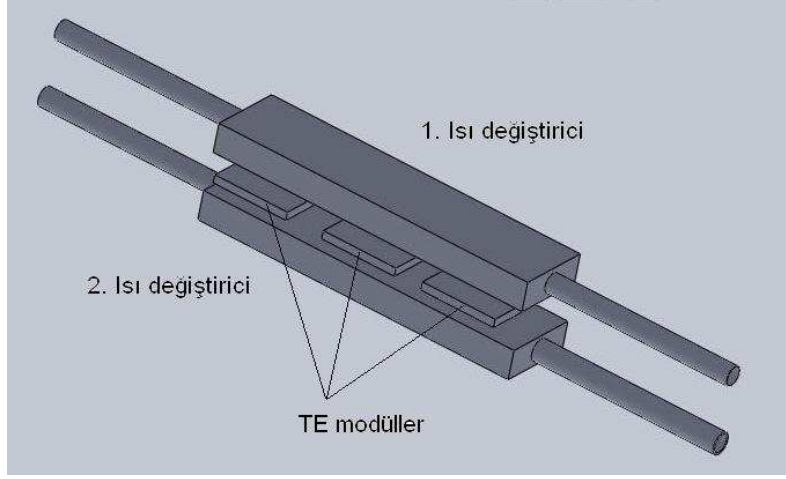
Bu tez çalışmasında, tasarlanan sistemin testleri, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Testler, sistem kararlı durumda çalışırken ve farklı çalışma şartlarında denenmiştir: Gerçekleştirilen testler temel olarak:

- TE modüllerin yüzeylerinin soğutulması amacıyla su soğutmalı sistemin denenmesi,
- TE modüllerin yüzeylerinin soğutulması amacıyla hava soğutmalı sistemin denenmesi,
- Hava soğutmalı sistemde yalıtımın etkisinin incelenmesi,
- Hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisinde havanın akış hızının değişiminin sisteme olan etkisinin incelenmesi şeklindedir.



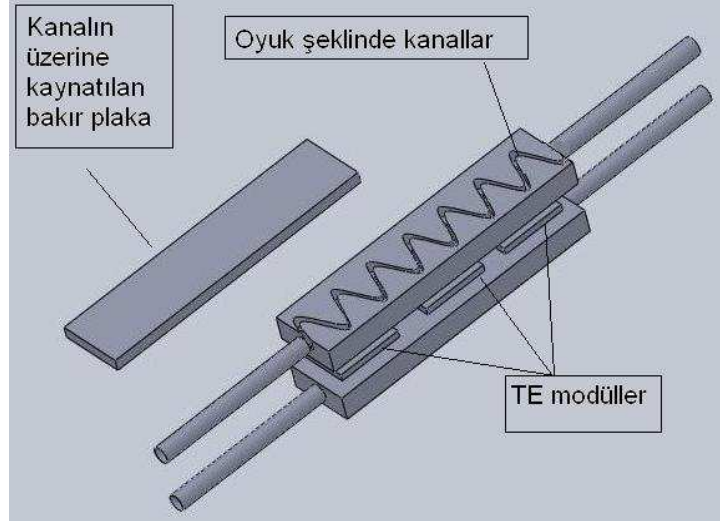
Şekil 7.3 Arasında TE modüller bulunan ısı değıştiricili elektrik üretim sistemi

Literatürden görüleceği gibi; KOYP'lerin çalışması, performansı, elektrotların, membranın verimliliklerinin arttırılması, interkonnektör malzeme seçimi, akış kanalı tasarımları, KOYP evre elemanları, KOYP'nin konfigürasyonları, KOYP'de meydana gelen problemler, KOYP ömür testleri başlı başına birer çalışma konusu olup buradaki veriler, KOYP'nin ideal şartlarda çalıştığı durumda oluşan atık ısının değerlendirilmesine yöneliktir. Çalışmada, KOYP'nin performansının, çalışma şartlarının sabit olduğu ve sabit güç ürettiği varsayılmıştır. Isı değerştirici ve TE modüllerden oluşan sisteminin KOYP ıkış güç değerlerinden bağımsız olarak çalıştığı yani sadece KOYP egzoz gazından yararlandığı durumda çalıştığı için bu varsayıma gidilmiştir. Egzoz gazının sıcaklığı, KOYP'nin çalışma sıcaklığına ve sisteme verilen H₂ ve hava miktarıyla değerşmektedir. Bu parametrelerden KOYP'nin çalışması için gereken sıcaklığın sabit 800 C sıcaklık olması nedeniyle fırın sıcaklık parametresi değerştirilmemiş, sisteme verilen havanın hızı değerştirilerek ölçümler kaydedilmiştir. Ayrıca, hız parametresinin değerştirilmesine ek olarak; TE modüllerin yüzeylerinin soğutulması amacıyla su soğutmalı testler ve hava soğutmalı sistem testleri, ısı değerştiricilerde yalıtımın etkisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. İleriki aşamalarda, sistemin tasarımına bağlı olarak, farklı çalışma koşulları ve parametre değerşikliklerine yönelik daha farklı çalışmaların yapılması öngörülebilir.



Şekil 7.4 TE modüllü ısı değiştiricinin genel görünüşü

Şekil 7.4'te verilen ısı değiştirici tasarımı 3 adet TE modül kullanımına göre yapılmıştır. Isı değiştirici, kullanılacak TE modül sayısı, hava ve H₂ kullanım miktarı sistemin büyüklüğüne göre değişebilecektir.



Şekil 7.5 Isı değiştiricinin kesit görünüşü

İyi bir ısı iletken olan bakırdan yapılmış ısı değiştiricilerin boyutları 17 cm x 4 cm x 1,5 cm'dir. Şekil 7.5'te gösterilen ısı değiştiricilerde kanal şeklinde oyuklar mevcuttur. Isı değiştiricinin akış kanalının serpantin şeklinde olması sistemde akışkanların dolaşma yolunu ve süresini uzatacağından; ısının, ısı değiştiricide

daha fazla kalması neticesinde daha fazla ısı verim elde edeceği öngörülmüştür. Oyukların derinliği 0,5 cm, genişliği 0,5 cm'dir. Şekil 7.5'te gösterildiği üzere, oyukların üstü bakır plaka ile kaynatılarak kapatılmıştır, her iki ısı değiştirici de aynı tasarıma sahiptir. Bu çalışmada, tasarlanan ısı değiştiriciler ile akışkanlar birbirine ters olarak sisteme girecek şekilde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

7.2 Deneysel Yöntem

7.2.1 Deneylerde kullanılan parametreler ve ölçüm aletleri

1. TE modüllerin açık devre gerilimi, akımı ve güç çıkışı: voltmetre, ampermetre ve diğer aksesuarlar (bağlantı kabloları vb.)
2. Yakıt ve hava tüketimi: yakıt ve hava debimetreleri
3. Yığının ısıtıldığı fırın sıcaklığı: sıcaklık göstergeli termoçift
4. Egzoz gazı sıcaklığı: sıcaklık göstergeli termoçiftler
5. Ortam koşulları sıcaklığı: sıcaklık göstergeli termoçiftler
6. TE modüllerin yüzey sıcaklıkları: sıcaklık göstergeli termoçiftler
7. Isı değiştiriciye giren ve ısı değiştiriciden çıkan akışkanların sıcaklığı: sıcaklık göstergeli termoçiftler
8. Isı değiştiricilerin boy, en ve genişliği: ölçüm cetveli
9. Yalıtım kalınlığı: ölçüm cetveli ile ölçülmüştür.

7.2.2 Ölçüm yöntemi

KOYP'nin ısıtıldığı fırının sıcaklığı, sıcaklık göstergeli termoçiftler ile ölçülmüştür.

TE modüllerin elektriksel çıkış gerilimlerinin ölçülmesi amacıyla TE modüllerin elektriksel çıkış noktalarına multimetre yerleştirilmiştir, ölçümler TE modüllerin ayrı ayrı ve 3 adet TE modülün seri bağlı olduğu durumda gerçekleştirilmiştir.

Yakıt akışı, yakıt pili sisteminin verimliliğinin ölçümünde önemli bir rol oynamaktadır. KOYP test sisteminde, hidrojen ve havanın sisteme yakıt olarak ne

kadar verildiğini gösteren New Flow marka FCS model H₂ ve hava debimetreler, KOYP ünitesine girmeden önce kontrol edilmiştir.

Isı değiştiricilerin giriş ve çıkışına yerleştirilen sıcaklık göstergeli termoçiftler ile soğutucu akışkanların ve egzoz gazının sıcaklığı; ortamın sıcaklığı ve TE modüllerin sıcak ve soğuk yüzeyleriyle temasta olan termoçiftler ile llmştr.

7.2.3 Kalibrasyon

Deneylerde kullanılan ölüm araçlarının, ölüm doğruluğu ve güvenirliğinin sağlanması amacıyla cihazların kalibrasyonu yaptırılmıştır.

Sistemde lm yapılmak amacıyla kullanılan aletlerin (termoçiftler, voltmetre ve ampermetreler, debimetreler, cetvel) kalibrasyonları TSE şartlarına uygun olarak hizmet veren “Sojusttest Metroloji ve Kalibrasyon Merkezi” ne teslim edilerek kalibrasyonları yapıldıktan sonra kalibrasyon sertifikaları ile birlikte teslim alınmıştır.

Çizelge 7.1 lmlerdeki belirsizlikler

Hata Kaynağı	Belirsizlik
Fluke 115 Dijital Multimetre, akım okuma	1,0
Fluke 115 Dijital Multimetre, gerilim okuma	0,2
Honeywell Göstergeli Sıcaklık lerler (DC 1010)	1,6
Protherm Fırın PLF 100 / 3	1,6

Çizelge 7.1’de gösterildiği üzere, ölümlerde kullanılan ölüm aletleriyle; akım değerleri $\pm 1,0$ gerilim değerleri $\pm 0,2$; sıcaklık ölüm değerleri $\pm 1,6$ ve fırın sıcaklık ölüm değerleri $\pm 1,6$ belirsizlik ile okunmuştur.

7.3 Deneysel Çalışma

Bu tez çalışmasında tümüyle Vestel Savunma Sanayi tarafından geliştirilen KOYP test ünitesi ve test düzeneği kullanılmıştır. Şekil 7.1'de gösterilen test ünitesi temel olarak iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar; yakıt ve havanın sisteme girişi ile belli sıcaklığa ulaştıktan sonra çalışmaya başlayan KOYP fırını ve TE modüllü ısı değiştirici düzeneğidir.

KOYP yığınlarının yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır ve soğuk olarak çalışmaya başlamadıkları nedeniyle fırın içine yerleştirilerek 700–800 °C çalışma sıcaklığına kadar ısıtılmaları gerekmektedir [80]. Bu deneyde kullanılan düşük güç üreten yığın, 800 °C sıcaklığa kadar ısıtılıp kendisini çalıştıracak ısıya ulaştığında kapatılmıştır.

Bu çalışmada, KOYP-TE sisteminin tasarımının yapılması, test edilmesi ve odaklanılmıştır. Elektrik üretimi için tasarlanan sistemde, farklı parametreler değiştirilerek deneysel çalışmaları yapılmıştır. Soğutucu akışkan değiştirilerek TE modüllerin sıcak ve soğuk yüzey performansları, hava akış hızının etkisi incelenmiştir. Sistemin elektriksel performansı deneysel analizlerle belirlenmiştir.

KOYP'nin sıcaklığı kademeli olarak artırılarak 800°C'ye gelindiğinde veriler kaydedilmeye başlanmıştır. Sistem çıkışından elde edilen sıcaklıklar termočiftler ile, akım, gerilim, sıcaklık parametrelerinin ölçümü kalibrasyonlu ölçüm cihazlarıyla sağlanmıştır.

TE soğutma modülünde elektrik akımının etkisiyle bir tarafta sıcaklık düşerken diğer tarafta sıcaklık artmaktadır. Bu ısının yüzeyden uzaklaştırılmaması durumunda TE modülün kısa zamanda bozulduğu görülmüştür. Bunu önlemek için ısınan yüzeyin sıcaklığını düşürmek gerekmektedir. Bunun için değişik yöntemler vardır. Bunlardan bazıları; alüminyum soğutucu koymak suretiyle, fan koymak suretiyle ve sıvı dolaştırmak suretiyle yapılan soğutmalardır [81]. Bu çalışmada, TE modüller aşağıdaki soğutma yöntemleri kullanılarak soğutulmuştur:

1. Su ile soğutma
2. Hava ile soğutma

Bu iki soğutma türü kullanılarak elde edilen akım, gerilim ve güç değerlerinin karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Buna ek olarak, hava soğutmalı sistemde yalıtımın ve yalıtımlı durumda sisteme verilen havanın akış hızının etkisi incelenmiştir.

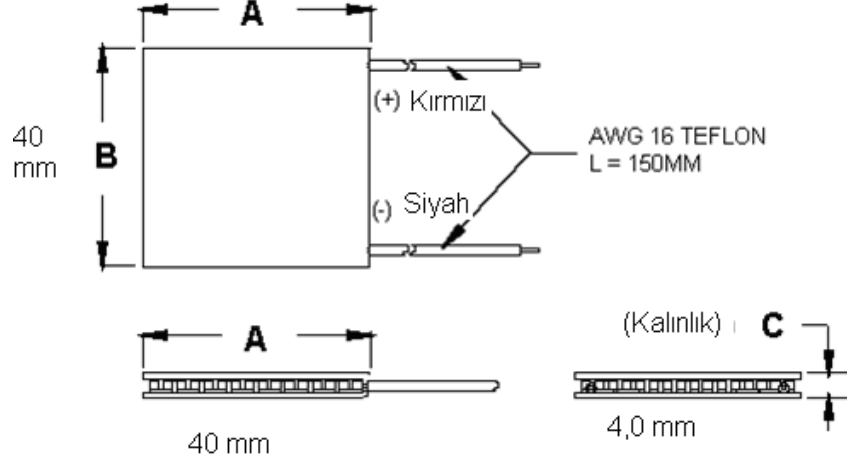
7.3.1 Su soğutmalı yöntem

Riffat ve Ma [82]'ya göre su soğutmalı zorlanmış konveksiyon ısı değiştiricileri çok iyi bir performansa sahiptir. Bu görüşten hareketle, bakır ısı değiştiricilerde su soğutmalı yöntem denenmiştir.

Sistemde ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlayan Seebeck etkisi prensibiyle çalışan ve iki adet bakır ısı değiştirici arasında, sıcaklık farkı oluşturulduğunda ısı pompası görevi görecek 40 mm x 40 mm x 4,0 mm ebatlarında TEC1–12706T125 model TE modülden 3 adet kullanılmıştır. TE modüller açık devre gerilimini arttırmak amacıyla seri bağlanmıştır. Bu TE modüller üreten firmanın teknik özelliklerinde verilmiş ΔT aralıklarında istenilen gerilim farkını üretmektedirler. Şekil 7.6'da gösterilen TE modülün teknik özellikleri Çizelge 7.2'de verilmiştir [83].

Çizelge 7.2 TEC1–12706T125 TE modülün teknik özellikleri [83]

Model	U _{max} V	I _{max} A	ΔT_{max} °C	Q _{max} W	R (Ω)
TEC1-12706T125	15.2	6	67	61	61



Şekil 7.6 TEC1–12706T125 TE modülün teknik çizimi

Şekil 7.5'te verilen ısı değiştirici, bakırdan yapılmış olup bakırlar serpantin şeklinde işlenmiştir, her iki ısı değiştirici arasında 3 adet TE modül bulunmaktadır.

TE modüllerin bir yüzeylerinin ısınması ise egzoz gazından gelen sıcaklıkla sağlanmaktadır. Burada sadece egzoz gazının sıcaklığı kullanılmaktadır. Su ise ayrı bir şekilde KOYP sistemiyle ilişkili olmadan çevrilmektedir. Bu düşünce, ileride kullanılacak KOYP sisteminde evsel kullanım suyunun ısıtılmasına yönelik bir çalışma olarak değerlendirilebilir.

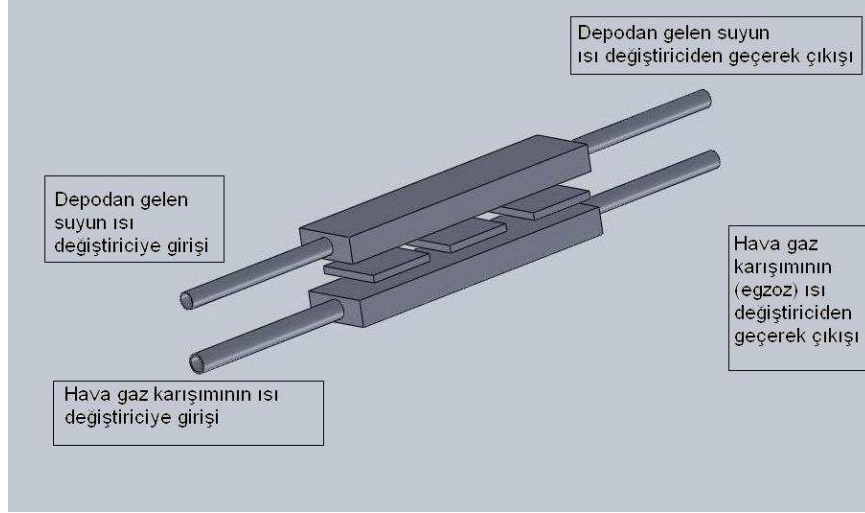
Su soğutmalı sistemde, suyun sıcaklık değerleri değiştirilerek iki farklı sıcaklık değerinde denemeler gerçekteşirilmiiştir. İlkinde, üstteki ısı değiştiricide, depodan gelen su dolaştırılarak su soğutmalı sistem uygulanmıştır. Depodan gelen su, 24 °C sıcaklıkta olarak ısı değiştiriciye girmektedir. İkinci tip denemelerde ise bir yüzeyden 7 °C'lik buzlu su dolaştırılmıştır. Soğutucu akışkan üstte bulunan ısı değiştiricilerden geçerken; alttaki ısı değiştiriciden ise egzoz gazı geçirilerek TE modüllerin yüzeylerindeki sıcaklık farkından elektrik üretmesi için gerekli olan sıcaklık farkı oluşturulmuştur. Bu deneyler sonucunda Seebeck etkisiyle üretilen elektrik akımı ve gerilim farkı Fluke marka- Fluke 115 True RMS model dijital multimetre ile ölçülmüştür. Sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklık ölçümleri ise termooçiftler ile gerçekteşirilmiiştir.

Su soğutmalı sistem deneyleri; aynı ortam sıcaklığında, sistemin yalıtılmadığı durumda, KOYP'nin ideal çalıştığı durumda, KOYP'ye giren hava giriş sıcaklığı ve miktarı, hidrojen giriş sıcaklığı ve miktarı aynı olacak şekilde ayarlandığı ve soğutucu akışkanın zorlanmış taşınımıyla sistemde dolaştırıldığı durumda gerçekleştirilmiştir.

Deneyler süresince TE modülün sıcak yüzey, soğuk yüzey, soğuk hava giriş, sıcak hava çıkış, sıcak egzoz giriş ve sıcak egzoz çıkışı ile dış ortam sıcaklığı ve üretilen gerilim farkı ve akım değerleri ölçülmüştür. TE modüllerin sıcak yüzeyi ve soğuk yüzeyi temasta olan bakır ısı değiştiricilerin yüzeyleri aracılığıyla ölçülmüştür. TE modüller yatay şekilde ısı değiştiricilerin arasına yüzeylerine termal macun sürülerek yerleştirilmiş, 1'den 3'e kadar numara verilmiştir. Egzoz gazının ısı değiştiriciye girdiği TE modül birinci TE modül (TE_1), ortadaki TE modül ikinci TE modül (TE_2) ve son olarak egzoz gazının sistemden çıktığı yerdeki TE modül üçüncü TE modül (TE_3) olarak adlandırılmıştır. TE modüllerin ayrı ayrı ve tümünün seri bağlı olduğu durumda açık devre geriliminde, gerilim farkı ve akım değerleri ölçülmüştür. Fırın ideal çalışma sıcaklığı olan 800 °C sıcaklıkta çalıştırıldığında elde edilen güç değerleri üzerinde durulmuştur. Deneyler 1 bar basınç altında tüpten gelen 8000 ml/dak H_2 sabit değerine karşılık 8000 ml/dak hava KOYP'yi besleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her TE modülden elde edilen gerilim farkı değerleri ayrı ayrı ölçülmüş, ayrıca seri bağlı devrede TE modüllerin toplam açık devre gerilimleri de ölçülmüştür. Ölçümler 15 dak. aralıklarla kaydedilmiş, elde edilen verilerle sıcaklık-zaman ve akım - gerilim grafikleri çizilmiştir. TE modüllerin her birinden geçen akım ise devrenin seri bağlı olması, her TE modülde ve toplamda aynı olmaktadır.

7.3.1.1 Depo suyu kullanılarak soğutma yöntemi

Soğutma suyu, sabit bir sıcaklıkta olan depodan gelmekte ve ısı değiştiriciye pompalanmaktadır.

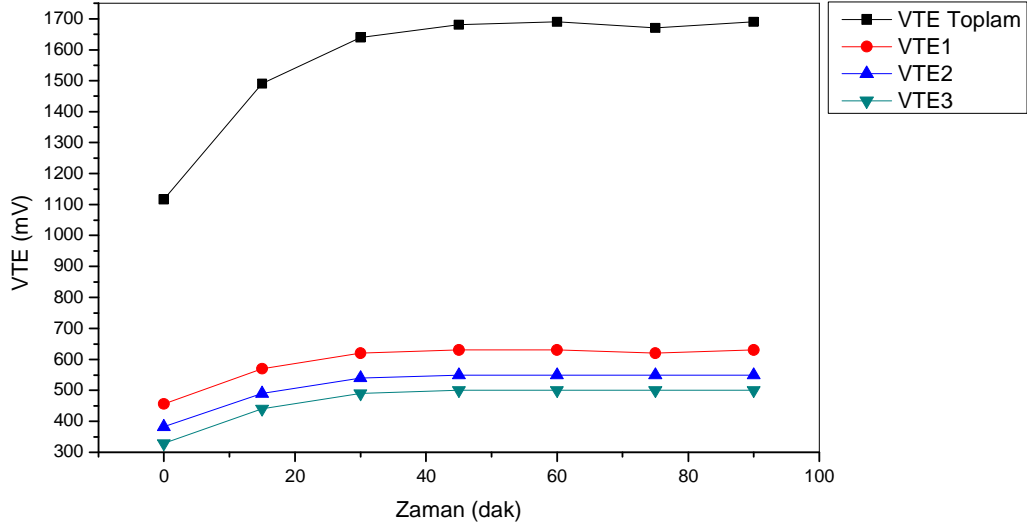


Şekil 7.7 Depodan gelen su soğutmalı sistemin prensip şeması

Ortam sıcaklığı 23 °C iken, KOYP çalışma şartında, KOYP katot tarafından çıkan hava gaz karışımı, ısı değiştiriciye 420 °C ile girmektedir. 24 °C'deki su sisteme Ulka marka Model E, Tip= EP77 230 V 50 Hz ED % 100 CIF 28 W gücünde pompa kullanılarak verilmiştir. Bakırdan yapılmış iki adet ısı değiştiricinin çevresi herhangi bir yalıtım malzemesi ile kaplanmamıştır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi 59 °C olurken, soğuk yüzeyi 38 °C olarak elde edilmiştir.

Çizelge 7.3 Depo suyu kullanılarak elde edilen su soğutmalı sistem verileri

Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (°C)	Tçıkış soğutucu akışkan (depo suyu) (°C)	I (mA)
0	1117	456	382	329	31	26	20
15	1490	570	490	440	32	25	21
30	1640	620	540	490	33	25	21
45	1680	630	550	500	34	26	23
60	1690	630	550	500	34	26	22
75	1670	620	550	500	35	26	22
90	1690	630	550	500	35	27	21

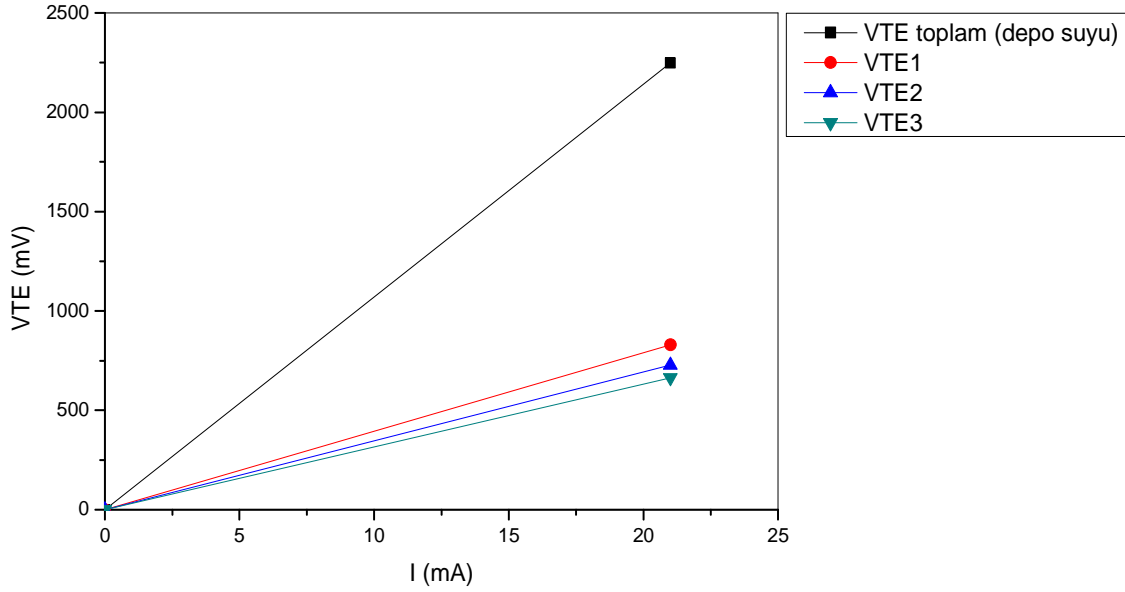


Şekil 7.8 Depo suyu kullanılarak elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri

Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 1568 mV olurken, ilk TE modülden elde edilen gerilim farkı (TE_1) 593 mV, ikinci TE modülden elde edilen gerilim farkı (TE_2) ortalama 517 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim farkı 465 mV olmaktadır. Elde edilen akım ortalama 21 mA olmaktadır. Buna göre; sıcak egzoz gazı sisteme ilk girdiğinde sıcaklık farkı nedeniyle daha çok gerilim farkı elde edilirken, sistemden çıkmasına yakın elektriksel verimi düşmektedir. Egzoz gazının yüksek sıcaklıkta ısı değiştiriciye girdiği yerdeki TE modülden elde edilen gerilim farkının diğer teker teker ölçüldüğünde elde edilen değerlerden daha fazla olmasının nedeni; ΔT farkının fazla olmasına bağlı olarak (akışkanlar arasındaki büyük sıcaklık farkı nedeniyle TE modüllerden pompalanan ısının fazla olması) Seebeck etkisiyle üretilen gerilim farkının fazla olmasına neden olmasıdır. Akışkanların bakır ısı değiştiriciyi terk etmesine yakın yerlerde ısı değiştiricilerin arasındaki sıcaklık farkının giderek azalmasıyla TE modüllerden elde edilen gerilimler birbirlerine göre kıyaslandığında daha da azalmaktadır.

KOYP katot tarafından çıkan hava gaz karışımı yani sıcak akışkan, ısı değiştiriciye 420 °C ile girerken; ısı değiştiriciden geçerek ortalama 33 °C olarak dışarı atılmaktadır. Isısının büyük kısmı, dışarıya atılmadan önce buradan geçerken

kaybedilmektedir. Depodan gelen 24 °C'deki suyun sıcaklığı ise sistemden ortalama 26 °C olarak çıkmaktadır. Katotta kullanılarak dışarı atılan hava gaz karışımının sıcaklığı ise ortalama 33 °C olmaktadır. Buna göre; sıcak egzoz gazının sıcaklığının bir kısmı, TE modüller aracılığıyla soğuk yüzeye pompalanarak soğutma suyunun sıcaklığı artmaktadır.

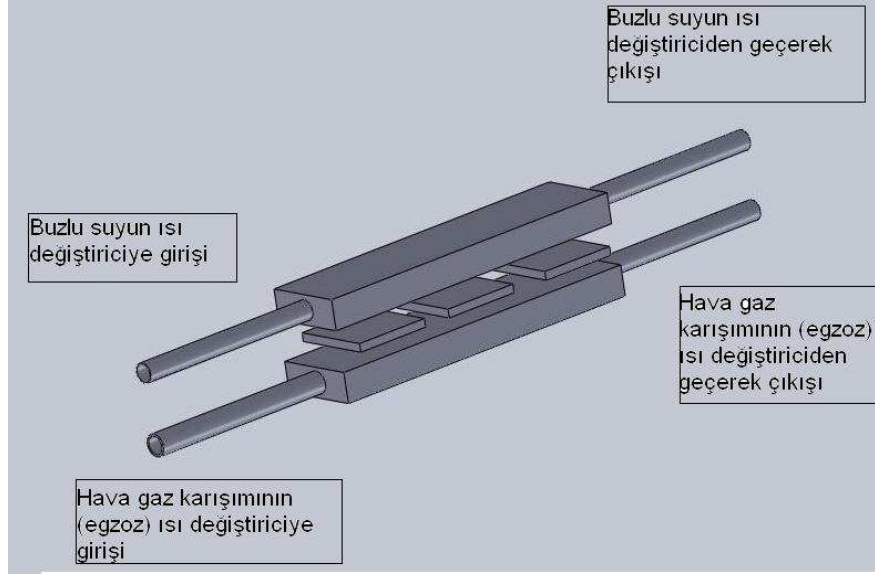


Şekil 7.9 Depo suyu dolaştırılarak yapılan deneylerde ortalama sonuçlara göre akım - gerilim farkı grafikleri

Şekil 7.9'da deneysel verilerin ortalamaları alınarak su soğutmalı sistemde depodan gelen su kullanılarak elde edilen akım - gerilim farkı değeri görülmektedir. Burada, TE modüllerden elde edilen toplam açık devre geriliminin en fazla olduğu, en az gerilimin ise üçüncü TE modülden (TE_3) elde edildiği görülmektedir.

7.3.1.2 Buzlu su kullanarak soğutma yöntemi

Sistemde, 7 °C sabit sıcaklıkta tutulan buzlu su şeklinde verilir suyun çevrimi için Ulka marka Model E, Tip= EP77 230 V 50 Hz ED % 100 Cl.F 28 W gücünde pompa kullanılmıştır. Bakırdan yapılmış iki adet ısı değiştiricinin çevresi herhangi bir yalıtım malzemesi ile kaplanmamıştır.

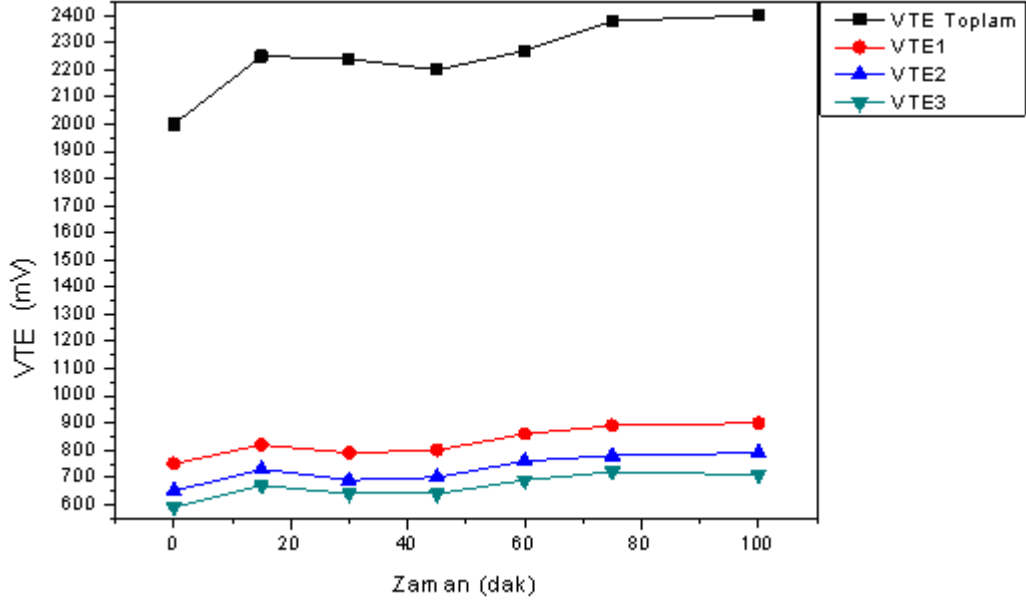


Şekil 7.10 Buzlu su soğutmalı sistemin prensip şeması

Çizelge 7.4 Buzlu su kullanılarak elde edilen su soğutmalı sistem verileri

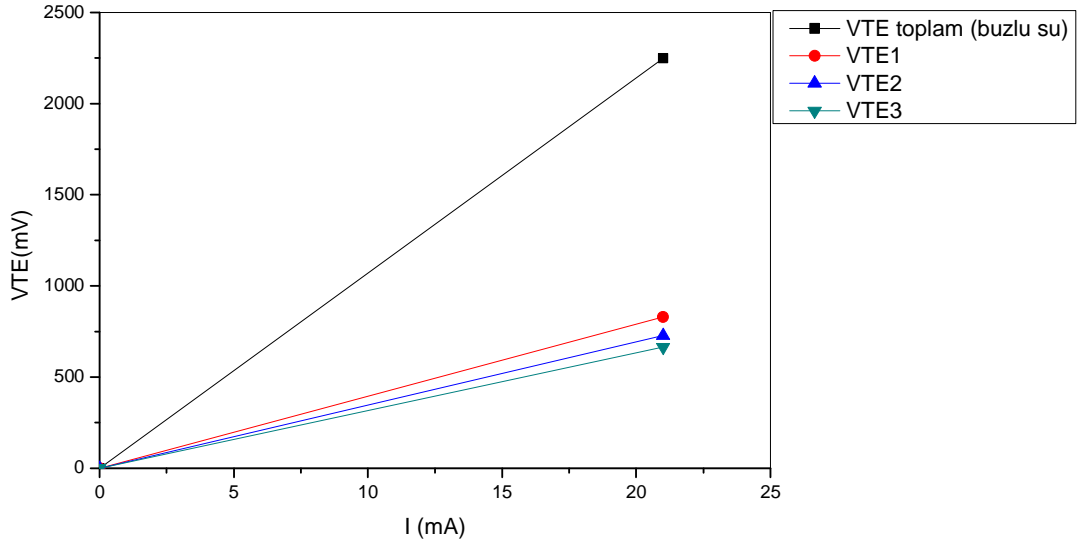
Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) ($^{\circ}C$)	Tçıkış soğutucu akışkan (buzlu su) ($^{\circ}C$)	I (mA)
0	2000	750	650	590	20	14	25
15	2250	820	730	670	22	14	30
30	2240	790	690	640	21	15	30
45	2200	800	700	640	22	15	25
60	2270	860	760	690	23	16	26
75	2380	890	780	720	24	19	27
90	2400	900	790	710	24	19	28

Çizelge 7.4'te görüleceği üzere verimin açık devre gerilimi depo suyu verilerine göre artmıştır. TE modüllerin ısı pompalama verimlerinin arttığı söylenebilmektedir. Değerler incelendiğinde, $7^{\circ}C$ sıcaklıkta sisteme giren buzlu suyun, ısı değiştiriciden geçtikten sonra sistemi ortalama $16^{\circ}C$ ile terk ettiği görülmektedir. Katotta kullanılarak dışarı atılan hava gaz karışımının sıcaklığı ise ortalama $22^{\circ}C$ olmaktadır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi $68^{\circ}C$ olurken, soğuk yüzeyi $35^{\circ}C$ olarak ölçülmüştür. Buna göre, sıcak taraftan TE modüller aracılığıyla buzlu suya daha çok ısı pompalanmış, TE modülün soğutma verimi artmıştır.



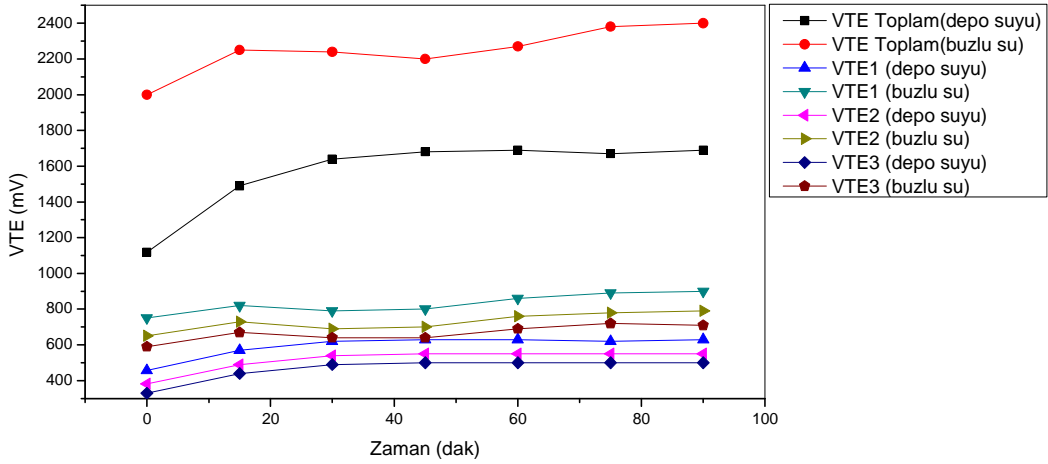
Şekil 7.11 Buzlu su kullanılarak elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri

Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 2248 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 830 mV, ikinci TE modülden (TE_2) elde edilen gerilim farkı ortalama 728 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim farkı ortalama 665 mV olmaktadır. Yalıtımsız koşulda, soğutucu akışkanın 7 °C olduğu durumda, ölçülen akım değeri ortalama 27 mA olmaktadır. Buzlu su soğutma yönteminde de, sıcak egzoz gazı sisteme ilk girdiğinde soğutucu akışkan ile aralarındaki sıcaklık farkı nedeniyle daha çok gerilim farkı elde edilmektedir. Egzoz gazı, ısı değiştiriciden geçerken ısısının bir kısmını temasta olduğu ısı değiştiricilere ve dolayısıyla TE modüllere aktarırken sıcaklığı gittikçe düşmektedir ve zamanla sistemden çıkarken sıcaklık farkının azalmasına bağlı olarak üretilen gerilim farkı düşmektedir.



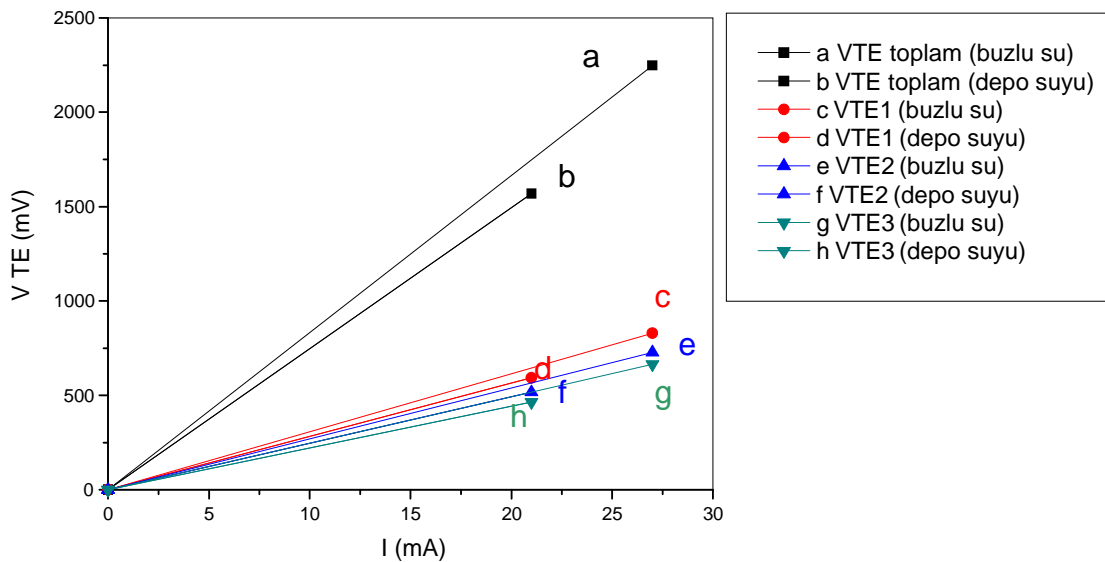
Şekil 7.12 Buzlu su kullanılarak elde edilen akım - gerilim farkı değerleri

Şekil 7.12’de deneysel verilerin ortalamaları alınarak su soğutmalı sistemde buzlu su kullanılarak elde edilen akım - gerilim farkı değeri görülmektedir. Grafikte, toplam seri bağlı TE modüllerin açık devre gerilimi en fazla olduğu sistemde en az değer egzozun sistemden çıkışına yakın olan üçüncü TE modülden (TE₃) elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7.13 Depo suyu ile buzlu su soğutma esnasında elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri

Depo suyu ve buzlu su ile yapılan su soğutmalı deneylerin verileri Şekil 7.13'te karşılaştırıldığında; her bir TE modülden elde edilen gerilim farkının ve TE modüllerden toplam üretilen gerilim farkının ve akım değerlerinin, buzlu su ile yapılan soğutmada daha fazla olduğu görülmektedir. Buna göre, sadece suyun sıcaklığı değiştirilerek aynı koşullar uygulandığında (yalıtımsız koşulda, hidrojen giriş sıcaklığı ve miktarı, hava giriş sıcaklığı ve miktarı, aynı ortam sıcaklığı) yapılan su soğutmalı deneylerde, suyun sıcaklığının üretilen güce etkisi olduğu söylenebilmektedir, yani suyun sıcaklığı azaldığında, yaklaşık iki kat daha fazla miktarda üretildiği görülmektedir. TE modüllerin yüzeylerindeki sıcaklık, soğutucu akışkanın sıcaklığından daha fazla olduğundan; TE modüllerin ısınan yüzeyinden soğutucu akışkana doğru iletimsel ısı transferi gerçekleşmektedir. Buzlu su soğutmalı sistemde, suyun sıcaklığı depo suyu soğutmalı sisteme göre daha düşük olduğundan; buzlu su soğutmalı sistemde TE modüllerin yüzeyinden suya gerçekleşen daha fazla ısı transferi olmakta, dolayısıyla TE modüllerin sıcak yüzeylerinden atılan ısı daha fazla olmaktadır. TE modüllerin sıcak yüzeyleri, buzlu su soğutmalı sistemde ısıyı daha iyi pompaladığından TE modüllerin iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı daha çok olmakta bu da daha fazla güç üretimine sebep olmaktadır. Ayrıca, su ile soğutmalı sistem deneylerinde yalıtım olmadığından ısı kayıpları nedeniyle sistemin istenen verimde çalışmadığı görülmüştür.

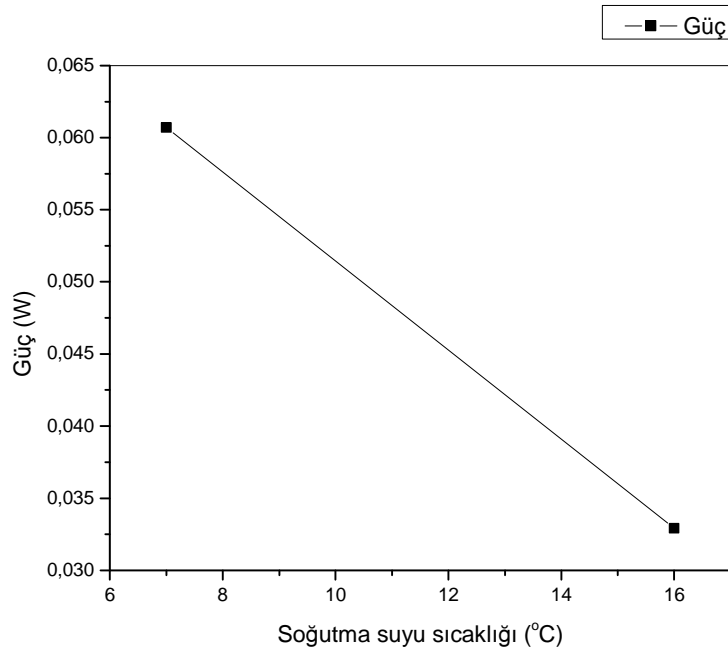


Şekil 7.14 TE modüllerin akım - gerilim farkı değerlerinin birbirlerine göre karşılaştırılması

Şekil 7.14'te deneysel verilerin ortalamaları alınarak su soğutmalı sistemde depodan gelen su ile buzlu su kullanılarak elde edilen akım - gerilim farkı değerinin karşılaştırılması görülmektedir. Buna göre; her bir TE modülün ve TE modüllerin seri bağlanmasıyla oluşan toplam gerilim farkı değerlerinin, soğutma yöntemi olarak buzlu su kullanıldığında daha yüksek olduğu grafiklerden görülmektedir.

7.3.1.3 Soğutma suyu sıcaklığına göre elde edilen güç değerlerinin incelenmesi

Kullanılan soğutma suyu sıcaklığının sistem verimine etkisinin irdelenmesi amacıyla Şekil 7.15 çizilmiştir.



Şekil 7.15 Soğutma suyu sıcaklığına göre elde edilen güç değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 7.15'te soğutma suyu sıcaklığı arttığında elde edilen gücün azaldığını göstermektedir. Buna göre, soğutma suyu sıcaklığı ne kadar düşük olursa sistemden elde edilen güç o kadar fazla olacaktır.

Analizlere dayanarak; soğutma yöntemi olarak su soğutmalı sistem kullanıldığında buzlu su soğutmalı sistemin kullanılması elektriksel verimi arttıracak, üretilen güç daha fazla olacaktır. Bunun nedeni, düşük sıcaklıkta suya TE modüller tarafından pompalanacak ısının daha fazla olması neticesinde sıcaklık farkının artmasına bağlı olarak üretilen gerilimin artması gösterilebilir.

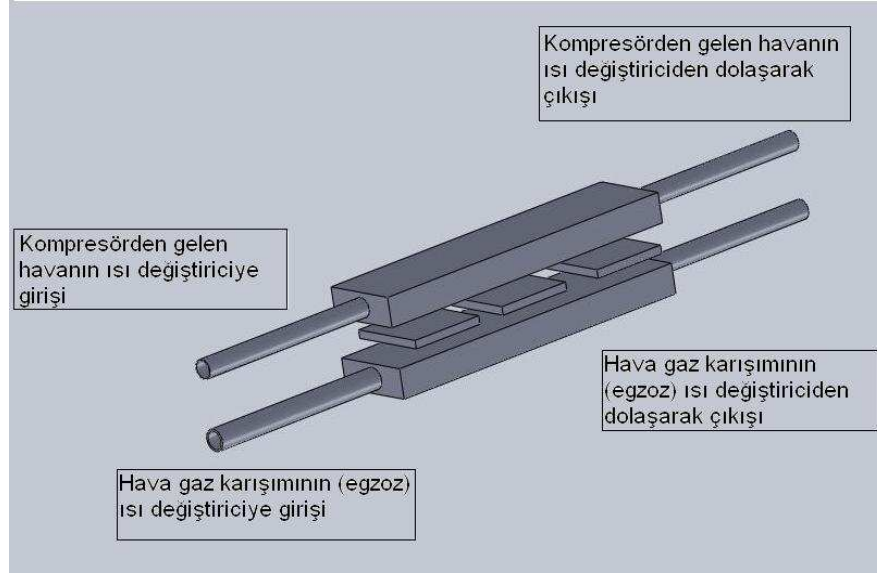
7.3.2 Hava soğutmalı yöntem

Sistemde, TE modüllerin bir yüzeylerinin soğutulması amacıyla soğutucu akışkan olarak hava da kullanılmıştır. Hava soğutmalı sistemin yalıtımsız ve yalıtımlı olduğu halde elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak, sistemde havanın akış hızı değiştirilerek elde edilen gerilim ve değerleri karşılaştırılmıştır.

7.3.2.1 Yalıtımsız sistem incelemesi

KOYP'nin çalışma prensibi gereği, katot tarafına verilen kompresörden gelen hava, serpantin şeklinde kanaldan geçerek TE modüllerin bir yüzeyiyle temas ederek yüzeyi soğutmaktadır. Katoda verilen havanın sistemde kullanıldıktan sonra kullanılmayan kısmının sistemden dışarı çıkmasıyla oluşan egzoz gazı ise TE modüllerin diğer yüzeyiyle temas ederek TE modüllerin yüzeyini ısıtmaktadır. Böylece TE modülün yüzeyleri arasında sıcaklık farkı sebebiyle elektrik enerjisi üretilmiş olmaktadır.

Hava soğutmalı yöntemin kullanıldığı sistemin prensip şeması Şekil 7.16'da gösterilmektedir. Hava soğutmalı yalıtımsız sistem deneyleri KOYP'nin 1 bar basınç altında tüpten gelen H₂'nin 8000 ml/dak akış hızında ve kompresörden gelen hava ise 8000 ml/dak akış hızında KOYP'ye verilme koşullarında gerçekleştirilmiştir.

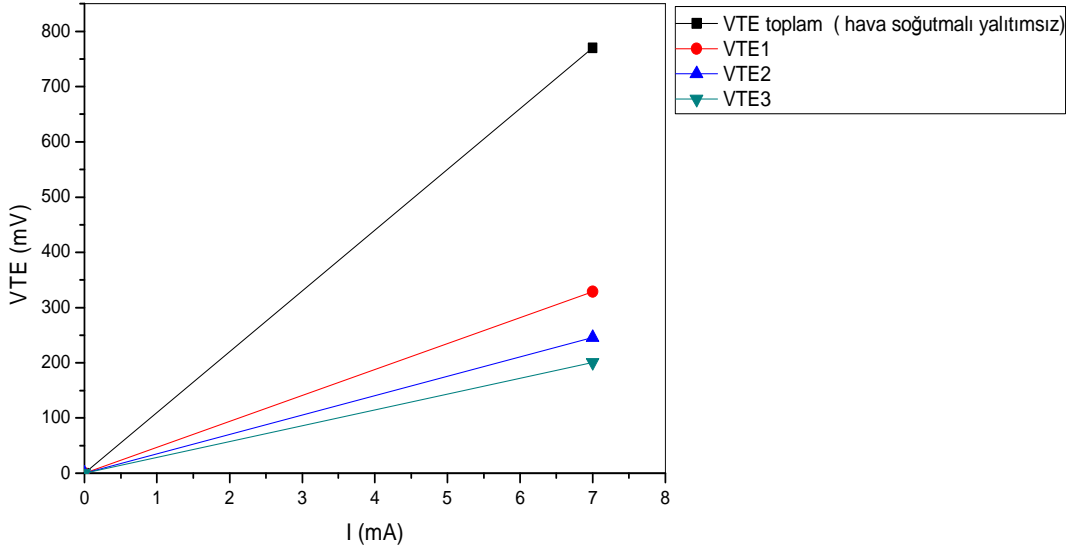


Şekil 7.16 Hava soğutmalı sistemin prensip şeması

Çizelge 7.5 Hava soğutmalı sistem verileri

Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (°C)	Tçıkış soğutucu akışkan (hava) (°C)	I (mA)
0	667	289	211	165	46	23	5
15	692	297	220	177	50	23	6
30	719	306	228	185	53	23	8
45	731	311	230	186	62	24	8
60	734	311	233	191	61	24	7
75	730	310	231	188	61	24	9
90	729	310	231	188	61	25	9

Çizelge 7.5'te KOYP sisteminin katoduna 8000 ml/dak akış hızı ile verilen hava için elde edilen değerler görülmektedir. 23 °C olarak sisteme giren hava, ısı değiştiriciden geçtikten sonra ortalama 24 °C olarak sistemi terk etmektedir. Katotta kullanılarak dışarı atılan hava gaz karışımının sıcaklığı ise ortalama 56 °C olmaktadır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi 38 °C olurken, soğuk yüzeyi 25 °C olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.17 Yalıtımsız hava soğutmalı sistemden elde edilen akım - gerilim farkı grafikleri

Çizelge 7.5'teki verilerden, sistemin düşük gerilim farkı ürettiği görülmektedir. Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 770 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 329 mV, ikinci TE modülden (TE_2) elde edilen gerilim farkı ortalama 246 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim farkı ortalama 201 mV olmaktadır. Elde edilen akım ortalama 7 mA'dır. Sistem çok düşük akım değerine sahiptir.

Sıcak egzoz gazı sisteme ilk girdiğinde sıcaklık farkı nedeniyle daha çok gerilim farkı elde edilirken, sistemden çıkmasına yakın verimi düşmektedir. Bunun nedeni olarak, ısı değiştiriciden çıkışına yakın, TE modüllerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının azalması gösterilebilir.

Çizelge 7.5'teki verilerden, yalıtımsız hava soğutmalı sistemde, TE modüllerden elde edilen akım değeri yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan havanın düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması, sistemde yalıtımın olmaması nedeniyle TE modüllerden ve ısı değiştiricilerden çevreye ısı kayıplarının olması gibi nedenlerle soğutmanın tam olarak

gerçekleşmediği görülmüştür. TE modüllerin dezavantajlarından biri ısı akışı sağlanmadığında elektrik üretememeleridir. Hava soğutmalı yalıtımsız sistemde, soğutmanın sağlanamaması da TE modüllerin yüzeyleri arasında ısı akışının az olmasına sebep olmuş, böylece elde edilen akım çok az olmuştur. Isı akışının sağlanması amacıyla hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisi incelenmiştir.

7.3.2.2 Sistemde yalıtım etkisinin incelenmesi

Yalıtımın etkisini görmek amacıyla, ısı değiştiricilerin etrafının yalıtım malzemesiyle kaplanması öngörülmüştür. Yalıtım malzemesi seçerken ısı yalıtım malzemelerinin maksimum kullanım sıcaklıkları göz önüne alınmıştır [84].

Çizelge 7.6 Kullanım sıcaklığına göre çeşitli ısı yalıtım malzemeleri [84]

Isı Yalıtım Malzemesi	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (°C)
Seramik Yünü	1800
Kaya yünü	750
Cam Köpüğü	430
Camyünü (Bakaliti)	250
Poliüretan	110
Kauçuk Köpüğü	116
Polietilen Köpüğü	105
Expanded Polistren	75/80
Extrude Polistren	75/80

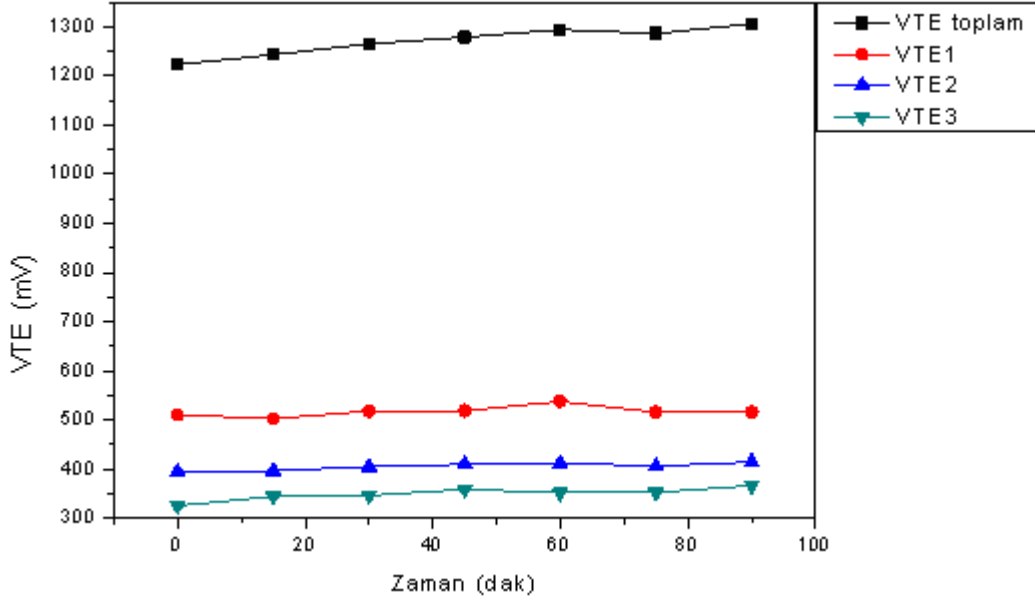
Yalıtım malzemesi olarak Çizelge 7.6'dan yararlanılarak, TE modüllü ısı değiştirici düzeneğinin çalışma şartlarına en uygun, yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzeme olarak seramik yünü seçilmiştir. Bakır ısı değiştiricilere giriş ve çıkış boruları ve bakır değiştiricilerin gövdesinin izolasyonu seramik yünü ile yapılmıştır. Yalıtım kalınlığı 1 cm'dir. Seramik yününün ısı iletkenlik katsayısı 100° C'de 0,030 W / mK'dir [84]. Yalıtım etkisinde sistemin incelenmesi deneyleri 1 bar basınç altında tüpten sisteme gelen 8000 ml/dak H₂ sabit değerine karşılık 8000, 15000, 20000 ve 40000 ml/dak hava KOYP'yi besleme koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tasarımda, iki adet ısı değiştiriciden altta bulunan ısı değiştiriciye KOYP sisteminden gelen hava gaz karışımı verilmektedir. Böylece, TE modüllerin alt yüzeyleri ısınmaktadır. KOYP sisteminin çalışma prensibi gereği sisteme kompresör aracılığıyla verilen hava, st kısımdaki ısı değiştiriciden geçerek KOYP sistemine verilmektedir. Böylece TE modüller tarafından alt ısı değiştirici yüzeyinin ısınmasıyla bu diğer yzeeye pompalanan ısı ile soğutulmuş olmaktadır. Termoçiftler ile llen TE modüllerin sıcak yüzeyi 97 C olurken, soğuk yüzeyi 47 C olarak elde edilmiştir. Kompresörden 24 C ile giren ısı değiştiriciye giren hava, ısı değiştiriciyi ortalama 25 C ile terk etmektedir. Burada hız etkisinden söz edilebilir. Yüksek hız nedeniyle soğuk taraftaki gaz ısı değiştiriciye çok hızlı giriş ve çıkış yaptığından soğutma etkisi tam olarak gösterilememektedir. Ayrıca, havanın soğutma katsayısının sudan daha düşük olması da soğutma veriminin düşük olmasında etkilidir.

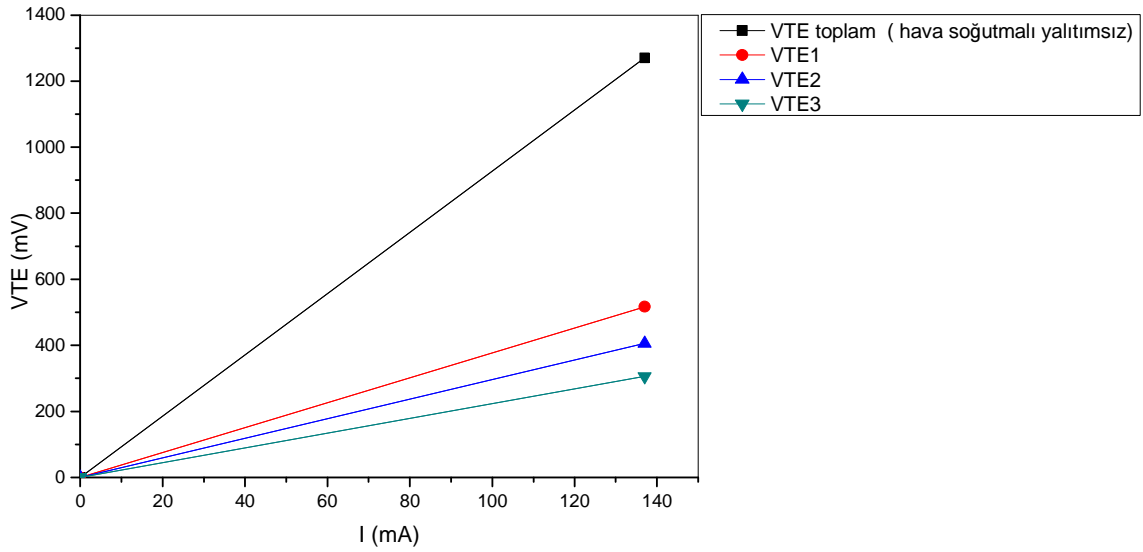
Çizelge 7.7 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (8000 ml/dak) yalıtım etkisinin incelenmesi

Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (C)	Tçıkış soğutucu akışkan (hava)	I (mA)
0	1223	511	395	326	50	24	124
15	1243	503	397	345	59	24	134
30	1265	518	405	347	62	25	140
45	1279	519	410	359	78	25	144
60	1294	538	413	352	79	25	138
75	1286	516	406	353	83	25	137
90	1306	516	415	367	85	26	142

Egzozdan çıkıp bakır ısı değiştiriciye giren egzoz gazınının sıcaklığını 420 C olarak llmştr. Egzoz gazı bakır ısı değiştirici içinde dolaştıktan sonra ısı değiştiriciyi ortalama 71 C ile terk etmektedir.



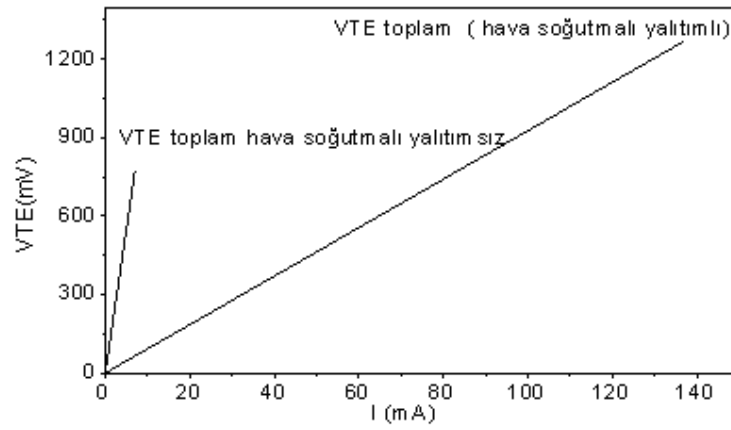
Şekil 7.18 Hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisinde elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri



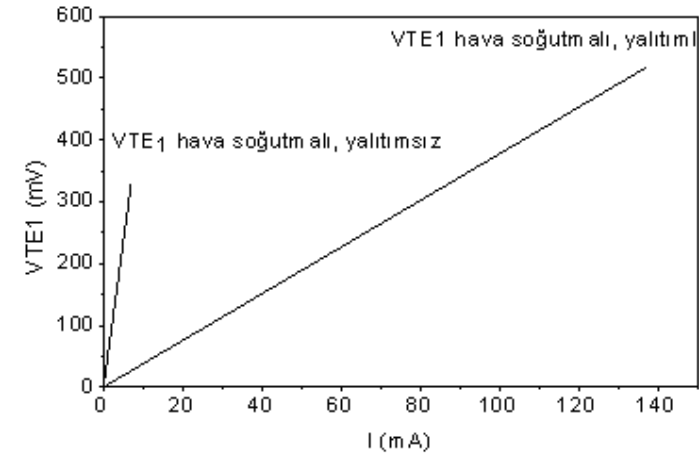
Şekil 7.19 Hava soğutmalı sistemde yalıtım etkisinde elde edilen akım - gerilim farkı değerleri

Şekil 7.19'da deneysel verilerin ortalamaları alınarak yalıtım etkisinde hava soğutmalı sistemin akım - gerilim farkı değeri görülmektedir.

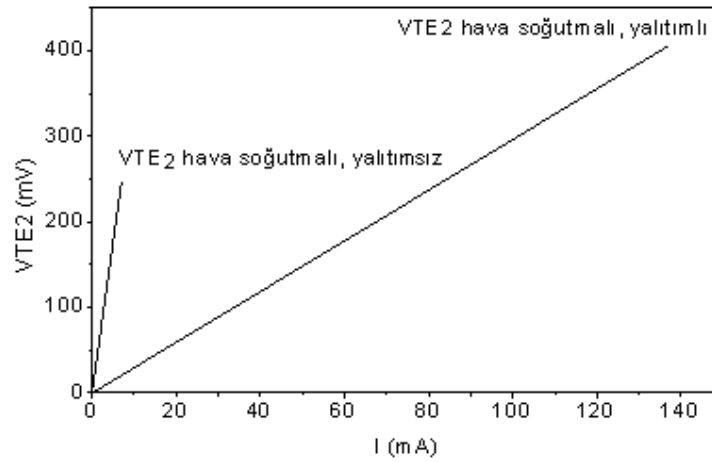
Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 1270 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 517 mV, ikinci modülden (TE_2) elde edilen gerilim farkı ortalama 406 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim farkı ortalama 306 mV olmaktadır. Yalıtımlı durumda elde edilen akım ortalama 137 mA olmaktadır. Deneysel koşullar değiştirilmeden hava soğutmalı sistemde, yalıtım etkisinde soğutmanın gerçekleştiği söylenebilmektedir. Soğutmanın gerçekleştirilmesiyle, TE modüllerin yüzeyleri arası ısı akışı hızlanmış, bu nedenle daha fazla elektrik akımı üretilmiştir. Yalıtım etkisindeki hava soğutmalı sistemin daha verimli çalıştığı görülmüştür. Sistemin elektriksel verimi artmıştır.



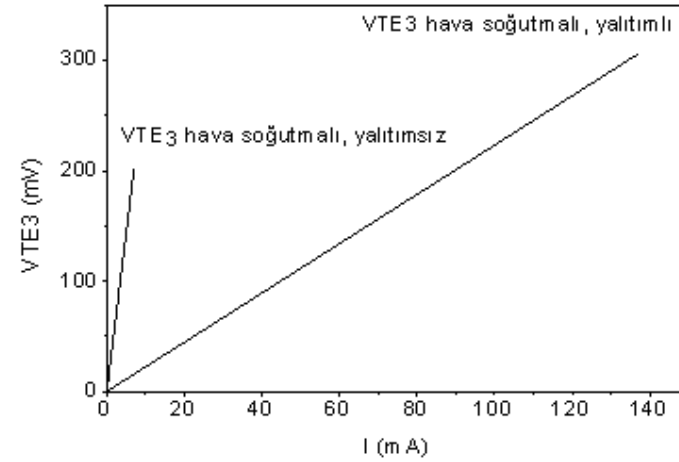
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7.20 Hava soğutmalı sistemde yalıtımlı ve yalıtımsız sistemin akım - gerilim farkı değerlerinin birbirine göre karşılaştırılması

Şekil 7.20 (a)'da hava soğutmalı yalıtımlı ve yalıtımsız sistemlerde seri bağlı toplam 3 adet TE modülden elde edilen akım – gerilim değerleri, (b)'de hava soğutmalı yalıtımlı ve yalıtımsız sistemlerde birinci TE modülden elde edilen akım – gerilim değerleri, (c)'de hava soğutmalı yalıtımlı ve yalıtımsız sistemlerde üçüncü TE modülden elde edilen akım – gerilim değerleri ve (d)'de ise hava soğutmalı yalıtımlı ve yalıtımsız sistemlerde üçüncü TE modülden elde edilen akım – gerilim değerleri görülmektedir. Her dört grafikte de, yalıtım etkisinde sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır. Grafiklerin eğimleri direnç değerini vermektedir, buna göre grafikler incelendiğinde hava soğutmalı yalıtımsız sistemde direncin değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir, yani sistemde akım – gerilim değerlerinin düşük olması, yalıtımsız sistemin yüksek direnç nedeniyle ısı akışına izin vermemesi, dolayısıyla elektrik akımının üretilmemesinin sonucu olarak gösterilebilir. Deneysel verilerin ortalamaları alınarak yalıtımlı ve yalıtımsız sistemde karşılaştırmalı akım - gerilim (I-V) grafikleri çizilmiştir.

$$P = V_{TE_{toplam}} \cdot I \quad (7.1)$$

Yukarıdaki formül kullanılarak, toplam TE modül açık devre gerilimi ile elde edilen akım değerlerinin çarpılmasıyla hesaplanan güç değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.8'de listelenmiştir.

Çizelge 7.8 Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinin birbirlerine göre akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması

I (mA)	V _{TE} toplam (mV)	V _{TE1} (mV)	V _{TE2} (mV)	V _{TE3} (mV)	Kullanılan Soğutma Yöntemi
21	1568	593	517	465	Su soğutmalı, depo suyu
27	2248	830	728	665	Su soğutmalı, buzlu su
7	770	329	246	201	Hava soğutmalı, yalıtımsız
137	1270	517	406	306	Hava soğutmalı, yalıtımlı

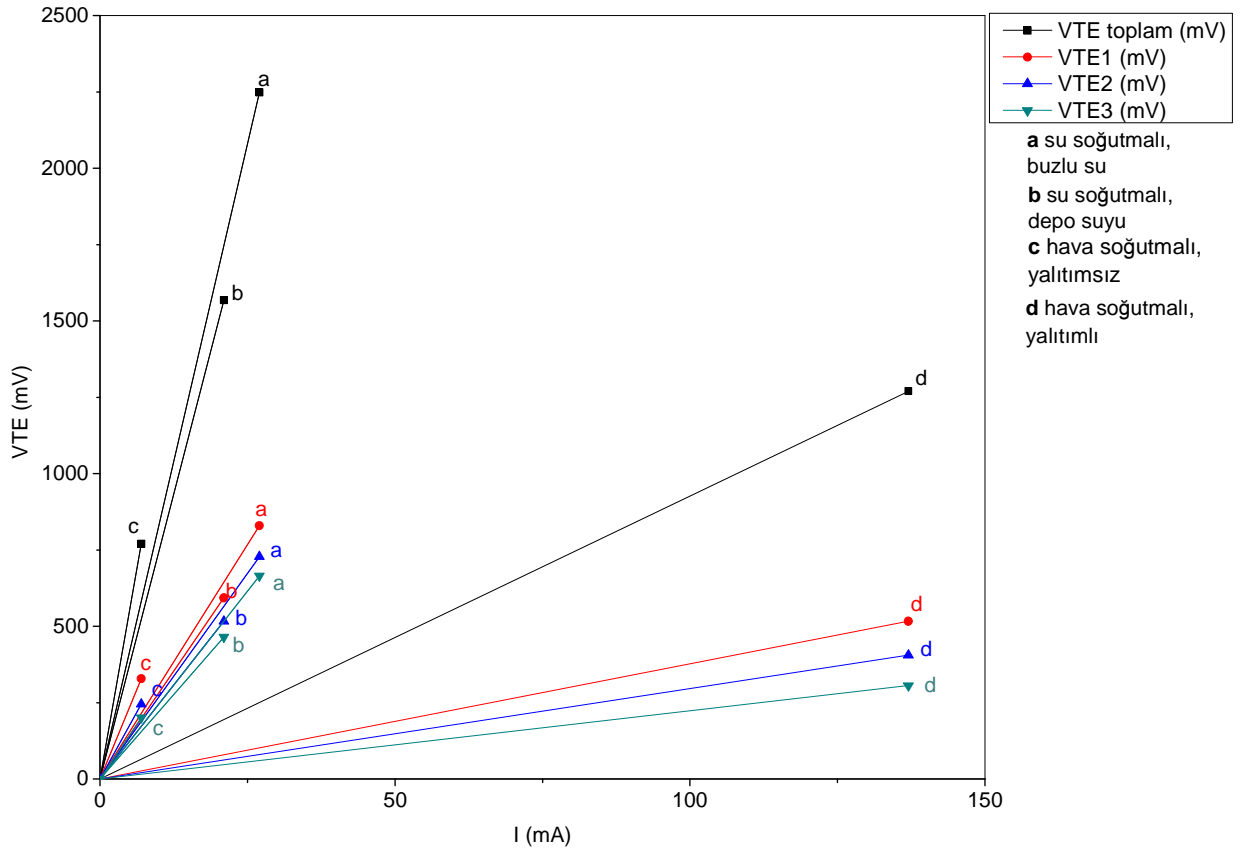
Çizelge 7.8'de verilen açık devre gerilimleri incelendiğinde, seçilen soğutma sistemlerinden, seri bağlı devrede TE modüllerden elde edilen açık devre

geriliminin en yüksek değeri buzlu su soğutmalı sistemde elde ettiği görülmüştür. Suyun ısı iletkenlik katsayısının havaya göre daha fazla olması ve soğutucu düşük sıcaklıkta olması verimini arttırmıştır. Fakat güç olarak sistemin verimi kıyaslanırsa, hava soğutmalı yalıtımlı sistemde akım değerinin en yüksek olduğu göz önüne alındığında:

Çizelge 7.9 Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinden elde edilen güç değerleri

Kullanılan Soğutma Yöntemi	Güç değeri P (W)
Su soğutmalı, depo suyu	$3,2928 \times 10^{-2}$
Su soğutmalı, buzlu su	$6,0696 \times 10^{-2}$
Hava soğutmalı, yalıtımsız	$0,539 \times 10^{-2}$
Hava soğutmalı, yalıtımlı	$17,399 \times 10^{-2}$

Çizelge 7.9'da kullanılan soğutma yöntemine karşılık verilen güç değerlerinde, en yüksek güç değeri elde edilen sistem hava soğutmalı, yalıtımlı sistem olarak görülmektedir. Buna göre, sistemde kullanılacak soğutma yöntemi olarak, hava soğutmalı, yalıtımlı sistemin en iyi değerlere sahip olduğu görülmektedir. Yalıtımlı hava soğutmalı yöntem tezin amacına yönelik olarak, elde edilen gücün fazla olmasını, atık ısının faydalı ve ekonomik kullanımını sağlayacaktır.



Şekil 7.21 Sistemi soğutmak için kullanılan soğutma yöntemlerinin birbirlerine göre akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 7.21’de verilen sistem soğutma yöntemlerinin birbirine göre kıyaslandığında; yalıtımsız sistem davranışlarının tüm TE modüllerde benzer olduğu görülmüştür. Grafiklerin eğiminden dirençlerin yüksek olduğu söylenebilmektedir. TE modüllerin dirençlerinin yüksek olması ısının bir yüzeyden diğer yüzeye aktarılmasında zorluk yaratacağından, elektrik üretiminde verimin düşük olmasına neden olacaktır.

7.3.2.3 Sistemde akış hızı etkisinin incelenmesi

Yakıt pili çalışma koşullarına uygun olacak şekilde daha büyük güç üretim sisteminde, sisteme verilecek hava hızının değiştirilmesi söz konusu olmaktadır. Buna göre tasarlanan sistemde hız etkisine yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, sistemin aynı şartlar altında, yalıtım etkisinde daha fazla güç üretmesinden hareketle, sistemin yalıtım koşulundaki denemelerine devam edilmiştir.

Yalıtım etkisinde 8000, 15000, 20000 ve 40000 ml/dak akış hızlarında sisteme giren soğurucu akışkan olarak kullanılan hava için deneysel analizler gerçekleştirilmiştir.

7.3.2.3.1 Hava soğutmalı yalıtımlı sistemde 15000 ml/dak akış hızının incelenmesi

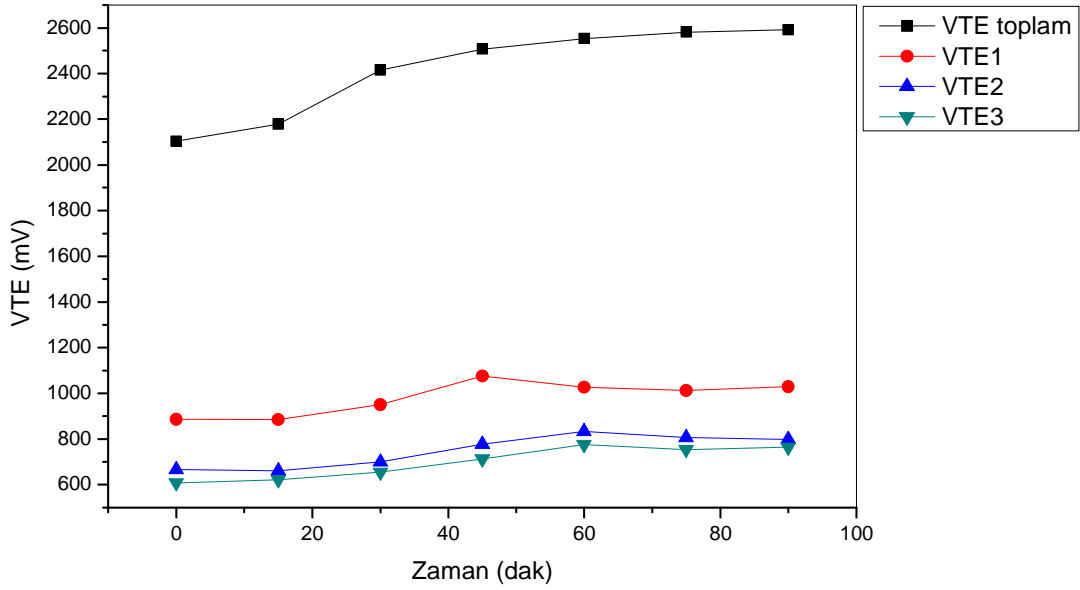
Sisteme kompresörden gelen havanın akış hızı 15000 ml/dak olacak şekilde denemeler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.10 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (15000 ml/dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi

Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (°C)	Tçıkış soğutucu akışkan (hava) (°C)	I (mA)
0	2104	886	666	608	126	24	183
15	2178	885	661	621	128	24	226
30	2416	951	699	654	148	24	228
45	2507	1075	777	712	156	25	234
60	2553	1026	776	833	168	25	238
75	2581	1012	753	806	168	25	239
90	2592	1029	764	799	169	25	252

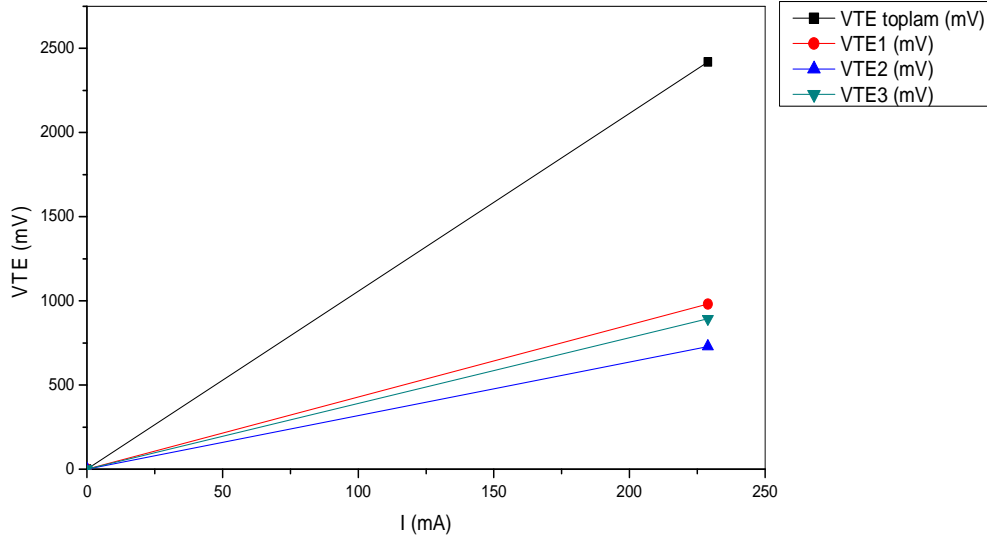
Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 2418 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 981 mV, ikinci modülden

(TE₂) elde edilen gerilim farkı ortalama 728 mV ve üçüncü TE modülden (TE₃) elde edilen gerilim fark ortalama 894 mV olmaktadır. Sisteme verilen hava 24 °C ile girerken, ortalama 25 °C ile sistemden çıkmaktadır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi 128 °C olurken, soğuk yüzeyi 61 °C olarak elde edilmiştir. Elde edilen akım ortalama 229 mA olurken, katottan çıkan atık gaz karışımı sıcaklığı ortalama 152 °C olmaktadır.



Şekil 7.22 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 15000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri

Şekil 7.22'de sistemde deneysel koşullar değiştirilmeden yapılan denemelerde TE modüllerden toplam elde edilen gerilim farkı değeri 8000 ml/dak akış hızındakinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7.23 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 15000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri

Şekil 7.23'de gösterilen akım - gerilim farkı grafiğinden sistemde elde edilen akım değerinde de artış olduğu görülmektedir. Havanın sistemden dolaştıktan sonra sistemi terk ederken, sıcaklığı artmıştır.

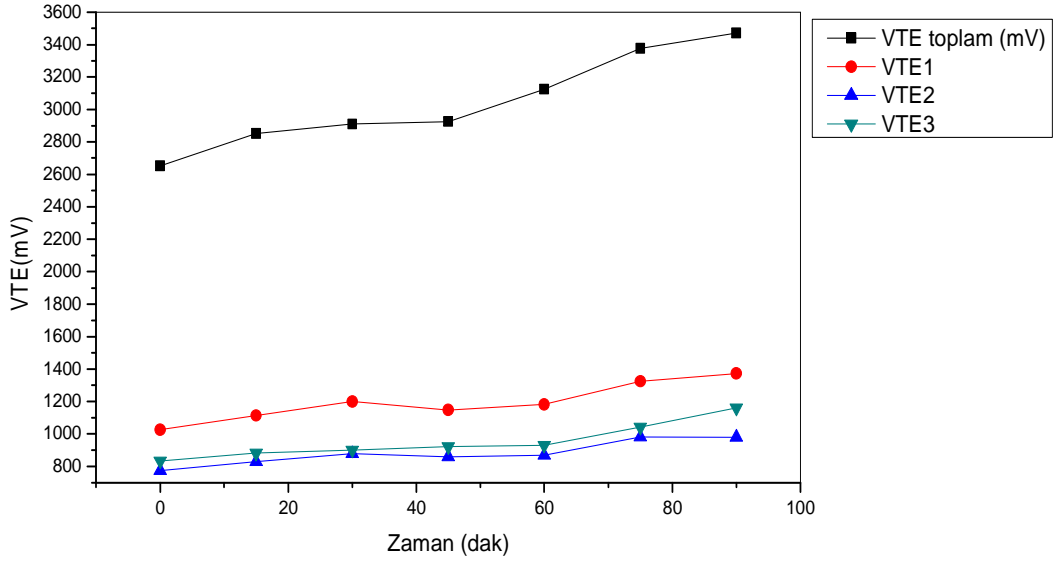
7.3.2.3.2 Hava soğutmalı yalıtımlı sistemde 20000 ml/dak akış hızının incelenmesi

Yalıtım etkisindeki sistemde, kompresörle sisteme verilen havanın akış hızı değeri 20000 ml/dak olacak şekilde arttırılarak deneysel koşullar değiştirilmeden deneylere devam edilmiştir.

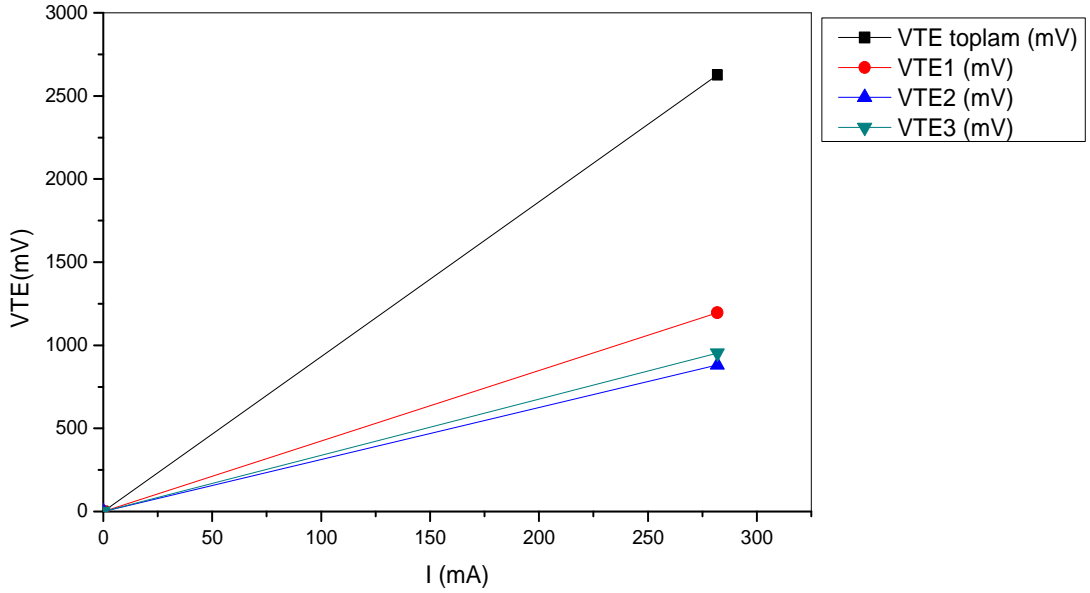
Çizelge 7.11 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (20000 ml/dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi

Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (°C)	Tçıkış soğutucu akışkan (hava) (°C)	I (mA)
0	2653	1026	773	834	154	24	228
15	2851	1114	828	882	162	24	246
30	2911	1200	878	901	168	24	312
45	2926	1148	859	922	186	25	262
60	3125	1182	869	930	183	26	296
75	3377	1324	982	1042	195	26	319
90	3471	1373	980	1160	198	26	314

Sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 2626 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 1195 mV, ikinci TE modülden (TE_2) elde edilen gerilim farkı ortalama 881 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim fark ortalama 953 mV olmaktadır. Sisteme verilen hava 24 °C ile girerken, ortalama 25 °C ile sistemden çıkmaktadır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi 151 °C olurken, soğuk yüzeyi 72 °C olarak ölçülmüştür. Elde edilen akım ortalama 282 mA olurken, katottan çıkan atık gaz karışımı sıcaklığı ortalama 178 °C olmaktadır. Buna göre 8000, 15000 ml/dak'da alınan açık devre gerilimi ve akım değerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.



Şekil 7.24 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 20000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri



Şekil 7.25 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 20000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri

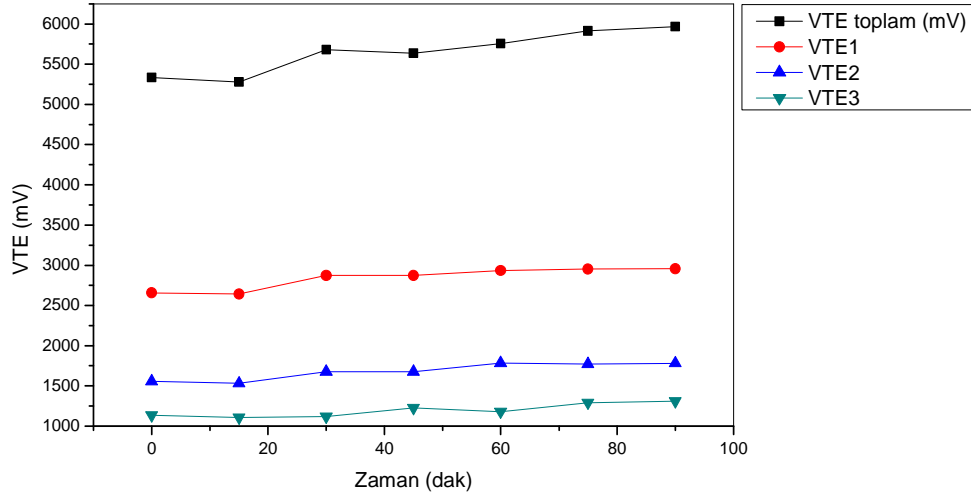
7.3.2.3.3 Hava soğutmalı yalıtımlı sistemde 40000 ml/dak akış hızının incelenmesi

Yalıtım etkisindeki sistemde, kompresörle sisteme verilen havanın akış hızı değeri 40000 ml/dak olacak şekilde artırılarak deneysel koşullar değiştirilmeden deneylere devam edilmiştir.

Çizelge 7.12 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde (40000 m l/ dak) hava akış hızı etkisinin incelenmesi

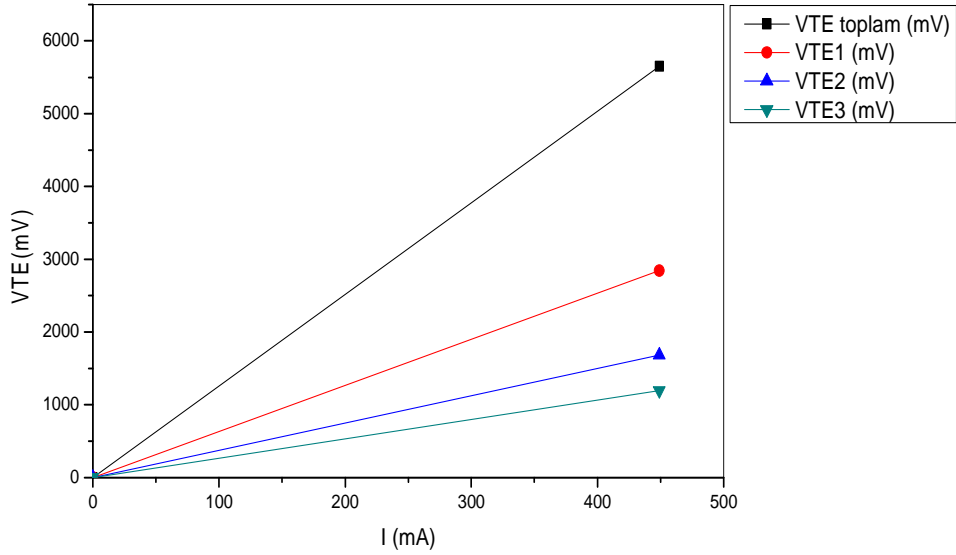
Zaman (dak)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Tçıkış sıcak akışkan (egzoz) (°C)	Tçıkış soğutucu akışkan (hava) (°C)	I (mA)
0	5334	2655	1554	1132	185	24	407
15	5279	2642	1530	1104	184	24	411
30	5683	2871	1675	1117	190	25	445
45	5636	2872	1676	1225	190	26	462
60	5758	2934	1785	1179	196	26	494
75	5915	2954	1770	1291	198	27	449
90	5965	2957	1779	1309	195	27	475

Çizelge 7.12'den görüldüğü üzere sistemde, TE modüllerden alınan toplam gerilim farkı ortalama 5653 mV olurken, ilk TE modülden (TE_1) elde edilen gerilim farkı ortalama 2841 mV, ikinci TE modülden (TE_2) elde edilen gerilim farkı ortalama 1681 mV ve üçüncü TE modülden (TE_3) elde edilen gerilim fark ortalama 1194 mV olmaktadır. Sisteme verilen hava 24 °C ile girerken , ortalama 26 °C ile sistemden çıkmaktadır. Termoçiftler ile ölçülen TE modüllerin sıcak yüzeyi 192 °C olurken, soğuk yüzeyi 71 °C olarak ölçülmüştür. Elde edilen akım ortalama 449 mA olurken, katottan çıkan atık gaz karışımı sıcaklığı ortalama 191 °C olmaktadır.



Şekil 7.26 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 40000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen zamana karşı gerilim farkı değerleri

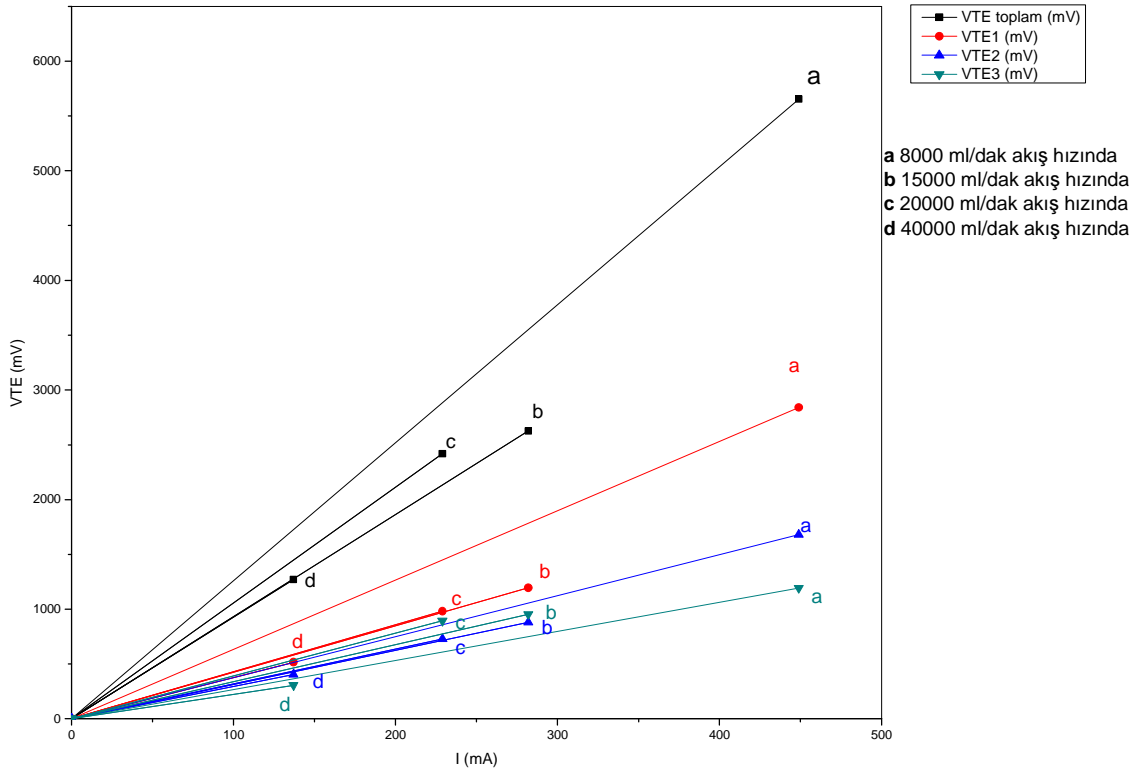
Şekil 7.26'da TE modüllerden üretilen gerilim farkının en fazla 40000 ml/dak akış hızında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.27 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 40000 ml/dak hızla verilen havadan elde edilen akım - gerilim farkı değerleri

Çizelge 7.13 Yalıtımlı hava soğutmalı soğutma yönteminde akış hızı etkisinin incelenmesi

I (mA)	V_{TE} toplam (mV)	V_{TE1} (mV)	V_{TE2} (mV)	V_{TE3} (mV)	Akış Hızı (ml/dak)
137	1270	517	406	306	8000
229	2418	981	728	894	15000
282	2626	1195	881	953	20000
449	5653	2841	1681	1194	40000

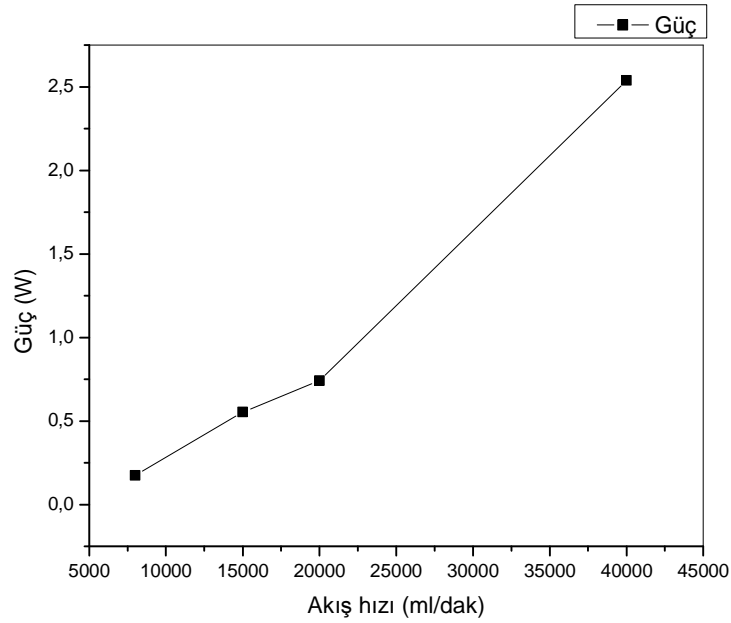


Şekil 7.28 Yalıtımlı hava soğutmalı sistemde 8000, 15000, 20000 ve 40000 ml/dak akış hızlarından elde edilen akım - gerilim farkı değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 7.13'teki verilerden yararlanılarak çizilen Şekil 7.28'de yüksek açık devre gerilimi ve akım değerinin, 40000 ml/dak akış hızında elde edildiği görülmektedir. Buna bağlı olarak hava akış hızının artırılması, açık devre geriliminin artmasına

neden olmaktadır Buna göre havanın akış hızı ile elde edilen gerilim arasında aralarında doğru orantılı bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Büyük ölçekli sistemlerde elde edilen gerilimin havanın akış hızıyla artacağı öngörülmektedir.

Çizelge 7.13'ten yararlanılarak akış hızlarına göre elde edilen güç değerleri grafiği çizilecek olursa:



Şekil 7.29 Akış hızlarına göre üretilen güç değerleri

Şekil 7.29'a göre; üretilen güç, akış miktarının artmasıyla artmaktadır. Yani, akış hızıyla güç değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu söylenebilmektedir.

7.3.3 Yüzey sıcaklıkları farkına göre elde edilen güç değerlerinin incelenmesi

Bakır ısı değiştiricilerin yüzeyinden, TE modüllerin sıcak ve soğuk yüzeylerinin sıcaklık farkları Honeywell marka termoçiftler ile ölçülmüştür. Ölçülen değerlere göre su soğutmalı ve hava soğutmalı sistemde elde edilen akım ve gerilim farkı değerleri Çizelge 7.14'te verilmiştir:

Çizelge 7.14 Soğutma yöntemlerine göre elde edilen akım- gerilim değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları

I (mA)	V _{TE} toplam (mV)	Yüzey sıcaklığı T _{sıcak} (°C)	Yüzey Sıcaklığı T _{soğuk} (°C)	ΔT(°C)	Kullanılan Soğutma Yöntemi
21	1568	59	38	21	Su soğutmalı, depo suyu
27	2248	68	35	33	Su soğutmalı, buzlu su
7	770	38	25	13	Hava soğutmalı, yalıtımsız
137	1270	97	47	50	Hava soğutmalı, yalıtımlı

Güç değeri hesaplamaları, seri bağlı olan TE modüllerden toplam alınan açık devre gerilimi ve ortalama akım değerine göre yapılmıştır. Bu çizelgedeki akım ve gerilim farkı değerleri kullanılarak güç hesabına göre elde edilen değerler Çizelge 7.15'te verilmiştir.

Literatürde atık ısının TE modüllerle elektrik enerjisine dönüşümüyle ilgili yapılan çalışmalarla sistemden elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Buna göre, Erel [85] tarafından yapılan çalışmada, bacalardan atılan atık ısıdan yararlanılarak TE modüllerde sıcaklık farkı oluşturmak suretiyle elektrik üretilmesi amaçlanan çalışmada, TE dönüştürücü olarak TEC1–12708 model TE modül kullandığında, su soğutmalı sistemde oluşan sıcaklık farkı en fazla iken (24 °C), üretilen gerilim farkı 0,55 V, sıcaklık farkı en az iken (7,9 °C) ise elde edilen gerilimin 0,17 V olduğu belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen çıkış gücü ise 22,6 °C iken üretilen güç 21,28 mW olurken, 7,9 °C'de üretilen güç 2,09 mW olmuştur.

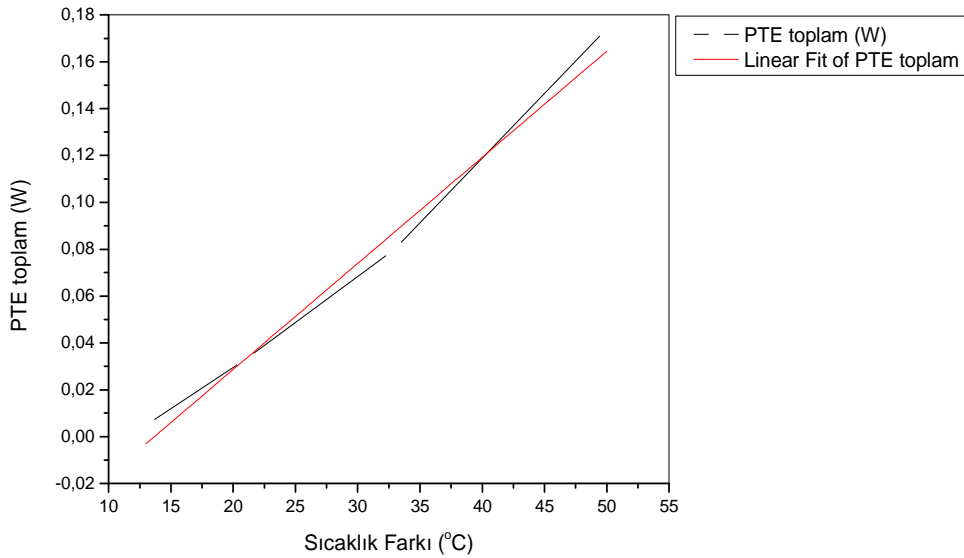
Bu tez çalışmasında ise, 3 adet TE modülden üretilen elektrik gücü aynı üretici firmadan satın alınan TE modül yüzeyleri arasındaki su soğutmalı sistemde 21 °C sıcaklık farkında modül başına üretilen 0,52 V gerilim farkı değerleri makaledeki değerlerle uyumluluk göstermektedir.

Çizelge 7.15 Soğutma yöntemlerine göre hesaplanan güç değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları

Kullanılan Soğutma Yöntemi	Güç Değeri $P_{TE \text{ toplam}} \text{ (W)}$	TE Modüllerin Sıcaklık Farkı $\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$
Su soğutmalı, depo suyu	0,033	21
Su soğutmalı, buzlu su	0,061	33
Hava soğutmalı, yalıtımsız	0,005	13
Hava soğutmalı, yalıtımlı	0,174	50

Erel [85] tarafından yapılan çalışmada TE modüllerin yüzey sıcaklıklarına göre güç analizinde 21,5 °C'de üretilen güç 19,61 mW olmaktadır. Bu tez çalışmasında ise, makalede ölçüm alınan sıcaklık farkı değerine uyumlu, su soğutmalı sistemde üretilen gerilim farkı, modül başına ortalama 10,98 mW'dir. Makalede ölçülen değerler bu çalışmada elde edilen değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.15'ten yararlanarak gerilim farkı değerlerine göre üretilen güç eğrisi çizilmiştir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı fazla olduğunda açık devre gerilimlerinin arttığı gözlenmektedir:



Şekil 7.30 Yüzeyler arası sıcaklık farkına göre elde edilen güç değeri

Şekil 7.30'daki grafiğe göre sıcaklık farkı değerleri arttığında, elde edilen güç P (mW) artmaktadır. Deneysel sonuçlarla uyumlu eğri çizimi yöntemiyle lineer olarak artan bir fonksiyon olan aşağıdaki denklem elde edilmiştir:

$$y = a + bx \quad (7.2)$$

Şekil 7.30'daki grafik, denklem 6.3'te verilen Seebeck formülündeki sıcaklık farkı ve üretilen gerilim farkı değerleri arasında lineer davranışa benzer bir davranış göstermektedir.

Denklemden, sıcaklık farkı T(°C) ile güç değeri P (mW) arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Sabitlerin değerleri grafik çizim programından türetilmiştir. Denkleme göre, yüksek güç değeri elde edilmesi için modüllerin yüzeyleri arasında yüksek sıcaklık farkının oluşturulması gerekmektedir. Fakat sıcaklık farkı TE modüllerin çalışma limitleri arasında olmalıdır.

Çizelge 7.16 Su soğutmalı yöntemde akış hızına göre elde edilen akım - gerilim değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları

I (mA)	V _{TE} toplam (mV)	Yüzey sıcaklığı T _{sıcak} (°C)	Yüzey Sıcaklığı T _{soğuk} (°C)	ΔT(°C)	Su soğutmalı Soğutma Yönteminde Akış Hızı (ml/dak)
137	1270	97	47	50	8000
229	2418	128	61	67	15000
282	2626	151	72	79	20000
449	5653	192	71	121	40000

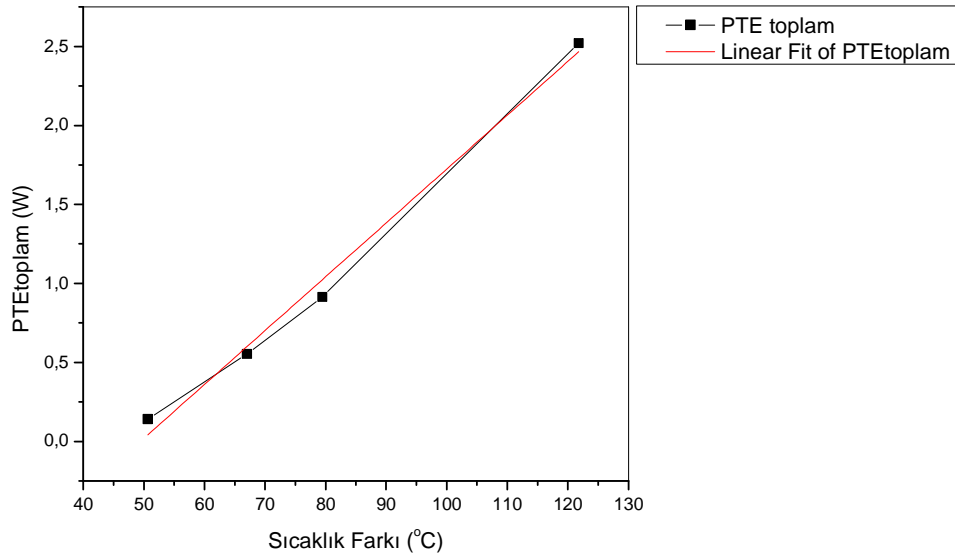
Çizelge 7.16'dan görüleceği gibi, sıcaklık farkı ΔT(°C) en fazlayken, maksimum gerilim farkı; sıcaklık farkı ΔT(°C) en azken, minimum gerilim farkı elde edilmektedir.

Hesaplamalar, seri bağlı olan TE modüllerden toplam alınan açık devre gerilimi ve ortalama akım değerine göre yapılmıştır. Bu çizelgedeki akım ve gerilim farkı değerleri kullanılarak güç hesabına göre elde edilen değerler Çizelge 7.17'de verilmiştir.

Çizelge 7.17 Akış hızlarına göre hesaplanan güç değerleri ve TE modüllerin yüzey sıcaklık farklılıkları

Hava soğutmalı Soğutma Yönteminde Akış Hızı (ml/dak)	Güç Değeri $P_{TE \text{ toplam}}$ (W)	TE modüllerin Sıcaklık Farkı $\Delta T(^{\circ}C)$
8000	0,17399	50
15000	0,55372	67
20000	0,74053	79
40000	2,53819	121

Seri bağlı olan TE modüllerden toplam alınan açık devre gerilimi ve ortalama akım değerine göre yapılan hesaplamalar Çizelge 7.17'deki akım ve gerilim farkı değerleri kullanılarak güç hesabına göre yüzey sıcaklık grafiği çizilmiştir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının fazla olması halinde açık devre geriliminin arttığı görülmüştür.



Şekil 7.31 Akış hızına göre yüzeyler arası sıcaklık farkına göre elde edilen güç değeri

Şekil 7.31'de sıcaklık farkı değerleri artmasıyla elde edilen gücün P (mW) arttığı gösterilmiştir. Deneysel sonuçlarla uyumlu eğri çizildiğinde; denklemdeki değerlere uyan fonksiyon, denklem 7.2 de verilen lineer fonksiyona benzemektedir.

Şekil 7.31'deki grafik, denklem 6.3'te verilen Seebeck formülündeki sıcaklık farkı ve üretilen gerilim farkı değerleri arasındaki lineer davranışa benzer bir davranış göstermektedir.

Denklemden, sıcaklık farkı $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ ile güç değeri P (mW) arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Sabitlerin değerleri grafik çizim programından türetilmiştir. Denkleme göre, yüksek güç değeri elde edilmesi için modüllerin yüzeyleri arasında yüksek sıcaklık farkının oluşturulması gerekmektedir.

7.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada kurulan sistemde, deneysel parametrelerin ölümünden elde edilen sonuçlarda, iki tür hatanın oluşmuş olacağı tahmin edilmektedir. Bunlardan ilki, cihazlardan okunan değerler ile gerçek değerler arasında ölümler esnasında oluşan fark olmasından kaynaklanmaktadır. Bu farkların azaltılması amacıyla sistemde kullanılan ölüm aletlerinin kalibrasyonu sonucunda, cihazların ölümlerindeki belirsizlikler en aza indirilmiştir.

Deneysel yöntemde öncelikle, ölüm yapılacak parametreler ve ölümlerin gerçekleştirilmesi amacıyla gerekli koşullar analiz edilmiştir. lmlerin gerçekleştirileceği cihazların çalışabilirliği kontrol edilmiş, ölümlerin doğruluğunun sağlanması amacıyla kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Verilerin kaydedilmesi esnasında cihazlardan ve dikkatsiz veri toplamadan kaynaklanan hatalar meydana gelmiştir. Ölüm cihazlarından kaynaklanan hatalar, fırın sıcaklık değerlerinde $\pm 1,6$, akım değerlerinde $\pm 1,0$ gerilim değerlerinde $\pm 0,2$, sıcaklık ölüm değerlerinde $\pm 1,6$ belirsizlik ile gerçekleşmiştir. Yapılan deneylerde, hata kaynaklarının sıcak akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları, TE modüllerin yüzey sıcaklıkları ve TE modüllerin akım ve gerilim farkı ölümlerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Sistemde, sıcaklık ölümündeki hatalar, ölüm cihazındaki belirsizlikten, bağlantı kablolarındaki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, deneylerde, ısı akış ynnn sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru olması ve TE modüllerin kalınlığının çok az olması neticesinde, soğuk tarafın sıcaklığı yüksek egzoz gazı sıcaklığından kısa sürede etkilenmektedir. TE modüllerin yüzeylerinin sıcaklık değerleri, belli süre sonra birbirine yaklaşarak elde edilen akım ve gerilim farkı ölümlerini etkilemekte ve ölümlerde hataya sebep olmaktadır.

Deneysel hataların en aza indirilmesi için, deneysel veriler ölüm aralığı ve hassasiyeti daha yüksek aletlerin kullanılması ve bu aletlerin uygun ölüm noktalarına yerleştirilmesi gerekmektedir. Örneğin, sistemdeki sıcaklık değerleri sıcaklık sensörleriyle algılanıp dijital olarak veri toplayıcıyla kaydedilirse deneysel verileri okumada daha doğru sonuçlar elde edilecektir.

Sistemin kendi türünde bir ilki oluşturması, literatürde bu tez çalışmasına referans olacak herhangi bir teorik model olmaması ve asıl amacın böyle bir sistemin çalışabilirliğinin gösterilmesi olması nedeniyle deneysel verilerle bir hata hesabı oluşturulamamıştır.

Sistemde, iki türlü soğutma yöntemi kullanılmıştır, ilki su soğutmalı ikincisi ise hava soğutmalı yöntemdir. Havanın ısı iletkenlik katsayısı (0,026 W / mK) suyun ısı iletkenlik katsayısına (0,61 W / mK) kıyasla daha düşük olmaktadır. Isı iletkenlik katsayılarından da beklendiği gibi; sistemde kullanılan soğutma yöntemleri analiz edildiğinde, sistemden elde edilen verimin en fazla buzlu su soğutmalı sistemde gerçekleştiği görülmüştür. Her ne kadar su soğutmalı sistemin verimi yüksek olsa da, kurulacak sistemlerde soğutmanın sisteme giriş havasıyla yapılması öngörüldüğünden ayrıca su soğutmalı sistem için gerekli olan soğutma enerjisini harcamamak için hava soğutmalı sistemin, soğutma için uygun olacağı düşünülmektedir. Hava soğutmalı sistemin veriminin düşük olması ve TE modüller arası ısı akışının yeterli düzeyde gerçekleşmemesi, sistemin yalıtılmasıyla minimuma indirilmiş ve verim artırılmıştır.

Çizelge 7.15'te elde edilen verilere dayanarak, yalıtım etkisindeki hava soğutmalı sistemde elektrik akımının, yalıtımsız sisteme kıyasla arttığı söylenebilmektedir. Sistemde, elde edilen akım ve gerilim farkı değerlerinin yalıtımlı koşulda daha doğru sonuçlar vereceği öngörülmektedir.

Hava soğutmalı yalıtımlı sistemde akış hızı etkisine göre analiz yapıldığında, sisteme 40000 ml/dak akış hızıyla verilen havanın, TE modüllerin ısınan yüzeylerindeki sıcaklığın, yüzeyden uzaklaştırılmasında daha etkili olduğu görülmüştür. İlerideki çalışmalarda, sisteme yalıtımlı olduğu koşulda deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinin uygun olacağı öngörülmektedir.

Elektriksel performans, TE modüllerin markasına, modeline ve geliştirilen malzemelere göre değişmektedir. Piyasada bulunan TE modüllerden, performansı daha yüksek olan TE modüller seçildiğinde sistemde üretilen elektrik enerjisinin bir miktar artacağı öngörülmektedir.

Sistemde toplam verim, ısı değiştiricilerin boyutu, tasarımı, malzemesi, soğutucu ve sıcak akışkanların ısısından daha fazla yararlanılması amacıyla yapılacak akış kanalı tasarımına bağlı olmakla beraber, bu tür sistemlerde yapılan duyarlılık analizlerinde TE modülün düşük verimde olmasının daha etkili olduğundan dolayı üretilen elektrik enerjisinin çok fazla bir artış göstereceği beklenmemektedir.

Seebeck etkisi, doğrudan ısının elektriğe dönüşümü prensibine dayandığından, sistemde meydana gelebilecek ısı kayıplarının, üretilen elektrik enerjisini etkileyebileceği düşünülmektedir. Ancak, bu çalışmada yapılan analizlerde, elektrik üretimi için kullanılan TE modül verimlerinin çok düşük olması sebebiyle ısı kayıpları göz önüne alınmamıştır. TE modüller ile ısı değiştirici arasındaki temas direncinin minimuma indirmek için termal macun kullanılmıştır. Bu şekilde, sıcak yüzey ile soğuk yüzey arası ısı geçişi etkin hale getirilmiştir.

Sistemde üretilen elektrik enerjisinin arttırılması ve egzoz gazı ısısının daha verimli şekilde çevrilmesi amacıyla, atık ısıdan elektrik üretim sistemin egzoz çıkışına yakın olması gerekmektedir. Tasarımda egzoz gazı, ısı değiştiricilere plastik borular ile gelmektedir, bu nedenle borulardan ısı kaybı olmaktadır. İleriki çalışmalarda, atık ısısının sıcaklığından daha fazla yararlanılması için yeni tasarlanabilecek atık ısı geri kazanım ünitesinin egzoz çıkışına çok yakın olması ve borulardan gerçekleşebilecek ısı kaybının önlenmesi amacıyla boruların etrafının yalıtımlı olması öngörülmektedir.

KOYP'nin atık ısıdan elektrik enerjisi üretim sistemine etkisi incelendiğinde; çalışma modları (operasyon modunda, dinlenme durumunda, acil kapanma durumunda vb.), membranların performansı, yakıt ve hava akış hızları, malzemelerin uyumlu çalışması, performansı ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak elde edilen egzoz gazı sıcaklığını etkilediği düşünülmektedir. KOYP'nin günlerde ileriki çalışmalarda geliştirilmesine bağlı olarak düzgün, tam performanslı çalıştığı durumlarda, atık ısı gerikazanım sisteminin, bu çalışmada elde edilen sonuçlardan daha iyi değerler verebileceği öngörülmektedir.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneyler ve analizler sonucunda, TE modül tarafından üretilen gerilim farkının, TE modülün çalışma şartları aşılmadan TE modüllerin yüzeyleri arasında oluşan sıcaklık farkıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Sistemde kullanılan, su soğutmalı ve hava soğutmalı yöntemler birbirine göre kıyaslandığında buzlu su soğutmalı sistemden elde edilen gerilim farkı değeri diğerlerine göre yüksek olmasına rağmen akım ve gerilim farkının çarpımıyla hesaplanan güç değeri en yüksek olan sistemin hava soğutmalı yalıtımlı sistem olduğu görülmüştür. Deneysel koşullar değiştirilmeden yalıtımlı hava soğutmalı sistemde hava akış hızı parametresi değiştirilerek gerilim farkı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler incelendiğinde; 8000, 15000, 20000 ve 40000 ml/dak akış hızlarından en yüksek gerilim farkı ve akım üreten sistemin 40000 ml/dak akış hızında gerçekleştiği görülmüştür. Soğutucu akışkanın geçtiği ısı değiştiricinin TE modülleri soğutma kapasitesi, soğutucu akışkan olarak kullanılan havanın akış hızıyla sıkı sıkıya ilişkili olduğu görülmüştür. 40000 ml/dak'da Seebeck etkisi nedeniyle TE modüllerden elde edilen gerilim farkı en yüksek olmuştur. Seebeck etkisiyle debi ilişkisi irdelendiğinde, debi arttığında, türbülanslı akış ile birlikte havanın ısı taşınım katsayısı da artmaktadır. Artan ısı taşınım katsayısı nedeniyle, yüzeyin soğutulması daha fazla gerçekleşmekte, yüzeyden ısının çekilmesi kolaylaşmaktadır. Buna bağlı olarak üretilen gerilim farkı artmaktadır. Soğutucu akışkanın akış hızı arttıkça soğutma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, sıcak ve soğuk akışkanın sisteme girişinde ve sistemden çıkışında birbirine paralel yönlü paralel akışı neticesinde oluşan sıcaklık farkı, ısı değiştiricilerle temasta olan TE modüllerin sıcak yüzey ve soğuk yüzeyleri arasında daha fazla sıcaklık farkına neden olduğundan Seebeck etkisiyle elde edilen gerilim farkının da arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada, KOYP sisteminden çıkan atık gazın soğutma yöntemi olarak; su soğutmalı ve hava soğutmalı soğutma türleri denenmiştir. Su soğutmalı olarak uygulanan sistemde, suyun sıcaklığı düşürüldüğünde, TE modüllerin sıcak ve soğuk yüzeylerindeki sıcaklık farkının artmasına bağlı olarak üretilen elektrik enerjisinin arttığı gözlenmiştir. Hava soğutmalı sistemde ise, yalıtım etkisinde ve

soğutucu akışkan olarak kullanılan havanın yüksek hava akış hızında verildiğinde üretilen elektrik enerjisinin su soğutmalı sisteme göre daha fazla olduğu görülmüştür. Hava soğutmalı sistemin buzlu su soğutmalı sisteme göre uygun görülmesinin nedeni; laboratuvar koşullarında gerçekleşen bu çalışmada kullanılan sistemin buzlu su soğutmalı şekilde uygulandığında üretilen elektrik enerjisinin Çizelge 7.15'teki verilerden yararlanarak depodan gelen suya göre daha fazla olduğu söylenebilmektedir, ancak soğutucu akışkan olarak sistemde soğuk su veya buzlu su kullanıldığında, soğuk su veya buz üretmek amacıyla harcanacak güç göz önüne alınmalıdır. Buz üretmek amacıyla harcanan güç ile soğutucu akışkan olarak soğuk su ya da buzlu su kullanıldığında üretilen güç karşılaştırıldığında, üretilen gücün tüketilenden daha fazla olması gerekeceği düşünülmektedir.

KOYP'nin çalışma prensibi gereği, sisteme hava ve genellikle yakıt olarak hidrojen verilmektedir. Literatür incelendiğinde, Pashey ve arkadaşları 2001'de yayınladıkları çalışmada, KOYP'nin katoduna, yüksek sıcaklıkta havanın verilmesini öngörmüştür [86]. Amerikan Ulusal Enerji Teknoloji Laboratuvarı Enerji Bölümü'nce yapılan çalışmada ise, KOYP'nin katoduna verilecek oda sıcaklığındaki havanın 450 °C civarında sisteme girişini tasarlayan sistem geliştirmiştir [87]. Ralph ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, tasarlanan 5 kW gücündeki KOYP'ye giren havanın ısıtılması amacıyla hava ön ısıtıcılar geliştirmiş, ısıtılan havanın ise sistemin verimini arttıracakları bildirilmiştir [88].

Literatür araştırmalarından hareketle, soğutucu akışkan olarak havanın kullanıldığı durumda, atık ısıdan elektrik enerjisi üreten bu sistemin, KOYP'ye giren havanın ön ısıtmasında, fazladan güç kullanılmadan bir miktar sıcaklığının artırılmasına yardım etmesine rağmen deneysel verilerden hareketle (bu çalışmada en fazla 2 °C'lik bir hava sıcaklığı artışı görülmüştür) havanın 450 °C'ye kadar ısıtılmasına yetecek kadar sıcaklık oluşturulamayacağı ve bu tür bir çalışmanın ancak laboratuvar şartlarında denemeler yapılmasına uygun olabileceği görüşü ortaya çıkmaktadır. Pashey ve arkadaşları, Ralph ve arkadaşlarının görüşlerine dayanarak, KOYP'ye girecek oda koşullarında havanın ısıtılmasına yönelik, 420 °C civarında sistemden çıkan egzoz gazı sıcaklığının, enerjinin akılcı kullanımı amacıyla farklı şekilde değerlendirilmesine yönelik görüşler ortaya çıkmaktadır.

Yapılacak hesaplamalarla, sisteme yerleştirilecek bir ısı değiştirici yardımıyla, egzoz gazının sıcaklığından yararlanılarak KOYP'ye giren havanın ön ısıtılmasının sağlayabileceği öngörülmektedir.

KOYP teknolojisinin dünyada ve ölkemizde henüz yaygınlaşmamış olması, yeterli seviyede bilgi birikiminin olmaması ve konunun halen araştırma aşamasında olması nedeniyle çeşitli problemleri ve bilinmezlikleri mevcuttur. Bu problemler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzeme kısıtlılığı, KOYP'nin pahalı bir teknoloji olması, membranların geliştirilmesinde ve istenen performansın elde edilememesinde, malzemelerin temininde, hidrojenin sisteme yakıt olarak verilmesinde, hidrojenin konsantrasyonunda, kullanılmayan yakıt oranında, hidrojen üretiminde, taşınmasında ve dağıtımında yaşanabilecek problemlerdir. Bu etmenler KOYP'nin performansını etkilemektedir. KOYP, yüksek sıcaklıkta yüksek verimle çalışan bir sistem olduğundan sistemde meydana gelebilecek bir problem KOYP'nin çalışmasını, dolayısıyla sistemden elde edilen atık ısıyı da etkilemektedir. Çalışma performansı düşük olduğunda ya da dinlenme modu gibi farklı çalışma modlarında, elde edilen egzoz gazı sıcaklıkları azalmaktadır, bu da TE modüllerin performansını etkilemekte, üretilen elektrik enerjisi miktarını düşürmektedir. Buna ek olarak, TE modüllerin de yapıldığı yarıiletken malzemesine bağlı olarak, düşük ısıl verimleri ve performans kayıpları olmaktadır.

Bu çalışmada, elektrik üretim sisteminin temel bileşenleri, TE modüller, ısı değiştiriciler, borular ve kablolar ve yalıtım sistemidir. Toplam maliyet, yatırım ve işletme maliyeti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bu çalışmadaki atık ışıdan elektrik üretim sisteminin KOYP sistemi hariç kurulumu yaklaşık 500 USD, yıllık bakım onarım maliyetiyle birlikte toplam maliyet 10 yıllık işletim için yaklaşık 750 USD olarak öngörülmektedir. Sistemden elde edilen güç değerleri laboratuvar şartlarında elde edilmiştir ve geliştirilmesi gerekmektedir. Çizelge 7.17'de en fazla güç üretilen deneysel çalışma, 40000 ml/dak akış hızında hava soğutmalı yalıtımlı sistemde 2,53 W olarak elde edilmiştir. Yapılan hesaplamada, yıllık elde edilen elektrik üretimi düşük olduğundan, geri ödeme süresinin uzun olacağı beklenmektedir. Burada, sistemin günde 20 saat, operasyonel modda çalışacağı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre, günde, 50,6 Wh, yılda 369,38 kWh, 10 yılda 3693,8 kWh ürettiği hesaplanmıştır. Sistemden üretilen elektriğin 10

yıl boyunca ödeme süresi TEDAŞ'tan [89] elde edilen 20,077 kuruş/kWh birim elektrik fiyatı 1 Eylül 2010 15:30 Merkez Bankası kuru ile USD' ye çevrilerek (1 USD = 1,520 TL) [90] birim satış fiyatı yaklaşık olarak 0,1320 USD/kWh birim fiyatından hesaplanırsa 10 yıl boyunca sistemden üretilen elektrik enerjisi kazancı 487,58 USD olmakta, geri ödeme süresinin 15 yıl olduğu hesaplanmıştır. Yapılan analize göre, bu aşamada sistemin yeterli düzeyde ekonomik olmadığı görülmektedir.

Egzoz gazı, yüksek sıcaklıkta sistemi terk etmektedir, buna göre atık ısının en verimli ve en akılcı şekilde kullanım gereksinimi ön plana çıkmaktadır. Atık ısının bu sistemde akılcı kullanımı amacıyla, 420 °C sıcaklıkta egzoz gazı sıcaklığı, sisteme giren havanın ön ısıtılması amacıyla ısı değiştiricide faydalandıktan sonra sistemin çıkışında TE modüller ile elektrik üretimi sistemin kurulumu, yapılacak hesaplamalara bağlı olarak öngörülmektedir. Havanın ön ısıtılması güç harcanmadan sağlanarak KOYP sisteminin çalışma şartlarını sağlayacaktır.

Sistem, ilk kez denenen bir sistemdir, bu çalışmayla atık ısıdan elektrik üretimi sisteminin çalışabilirliğinin gösterilmesinin yanı sıra, asıl amaç atık ısının kullanılabilirliğinin irdelenmesidir. Egzoz gazı sıcaklığının yani atık ısının kullanımına yönelik bu tür bir çalışma, TE modüllerin düşük verimli olması, ticari olarak kullanılan TE modüllerin yüksek sıcaklığa dayanmaması, yeterli düzeyde ekonomik olmaması ve egzoz gazının sıcaklığının enerjinin faydalı kullanılmasına yönelik ortaya atılan fikirlerden yola çıkarak, TE modüllerle atık ısıdan elektrik üretimi, atık ısının kullanımı için bu aşamada en uygun çözüm olarak görülmemektedir.

Atık ısının sistemde elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılması amacına yönelik bu tez çalışmasında kurulan sistemin uygulanabilir olup olmadığı, enerjinin faydalı ve verimli kullanımı sağlanıp sağlayamadığının daha iyi değerlendirilebilmesi için, ileriki aşamalarda bu tür sistemlerin analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, bahsi geçen atık ısının değerlendirilerek elektrik üretimine yönelik gerçekleştirilen ve Şekil 7.29, Şekil 7.30 ve Şekil

7.31'deki analizlere göre bu tür bir sistemin çalışabilirliği gösterilmişse de, sistemin kurulmasına, işletilmesine ve enerjinin akılcı kullanımına göre analizi yapıldığında sistemin ticari olarak uygulanabilir olmadığı söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] A Blance of Plant Component Evaluation For The Ceres Power SOFC System, Ceres Power Ltd., <http://www.berr.gov.uk/files/file38779.pdf>, 2007.
- [2] FAROOQUE, M. et. al., Fuel Cells - The clean and efficient power generators, Proceedings of the IEEE, vol.89, s.1819–1829, 2001.
- [3] Lygre, Asle and Matteo, C.E., Solid Oxide Fuel Cell Power Plants with Integrated CO₂ capture, Second Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage, Göteborg, October 26, 2001.
- [4] Minh, N. and Powers, J., Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Solid Oxide Fuel Cell Semi-Annual Report, April 2003 – September 2003, Issued, October 2003.
- [5] Karl, J. and Karellas, S., Highly Efficient SOFC Systems with Indirect Gasification, Proceedings of the 6th European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Lucerne, Switzerland, vol.2, p. 534-545, 2004.
- [6] Namazian, M. et al., Fuel Preprocessor for a solid oxide fuel cell auxiliary power units Final Report, 2004.
- [7] Cali, M. et al., The EOS project: a SOFC pilot plant in Italy – safety aspects, In: HySafe, International Conference On Hydrogen Safety, Pisa (Italy), December, 2007.
- [8] OOSTERKAMP, P.F. van den, Critical Issues In Heat Transfer For Fuel Cell Systems, Energy Conversion and Management, vol.47, no.20, s.3552-3561, 2005.
- [9] Yamanis, J. and Zhang, J., Techno-Economic Feasibility of Highly Efficient Cost-Effective Thermoelectric-SOFC Hybrid Power Generation Systems Final Technical Report, United Technologies Research Center, 1 October 1, 2005 –2007.
- [10] Zamora, I. et al., Cogeneration in Electrical Microgrids, International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Spain, 2006.
- [11] Yamanis, J. and Zhang, J., Techno-Economic Feasibility of Highly Efficient Cost-Effective Thermoelectric-SOFC Hybrid Power Generation Systems, December 2007 Report 2, DE-FC26-05NT42626 United Technologies Research Center, 2007.
- [12] Petersen, Dave, Fuel Cell Integration to a DC Power System, Fuel Cell Feasibility Study Final Report, 43p., 2008.
- [13] Inonue, Shuichi., The Status of Home-Installed SOFC System Development at Osaka Gas, Fuel Cell Development Dept. Osaka Gas Co. Ltd., 2008.

- [14] Yakabe, H. and Yamaha, S., A combined system of an SOFC and PEFCs Tokyo Gas Co. Ltd., 2009.
- [15] Noyan, Ömer, F., Hidrojenin Özellikleri, II.Ulusal Hidrojen Kongresi, Ankara, s.41-55, Temmuz 2003.
- [16] Barbir, Frano, Safety Issues of Hydrogen in Vehicles, International Association for Hydrogen Energy, Technical Papers, www.iahe.org/hydrogensafetyissues.htm, 2003.
- [17] PENNER, Stanford, S. Steps toward the hydrogen economy, Journal of Energy, vol.31, no.1, s.33–43, 2006.
- [18] Eral, M., (Koordinatör), Tübitak-TTGV Bilim-Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu, Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Raporu, Ankara, 1998.
- [19] SHERRIF, S.A. et al. Towards a Hydrogen Economy, The Electricity Journal, vol.18, s.62-76, 2005.
- [20] DINCER, Ibrahim, Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems, International Journal of Hydrogen Energy vol.27, pp.265-285, 2002.
- [21] Barbir, Frano, Review of Hydrogen Conversion Technologies, International Association for Hydrogen Energy, Technical Papers, www.iahe.org, 2003.
- [22] Veziroğlu, Nejat. T., Hydrogen Energy System: A Permanent Solution To Global Problems, International Association for Hydrogen Energy, Technical Papers, www.iahe.org, 2003.
- [23] WAEGEL, A. et al. Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface, Bulletin of Science, Technology & Society, vol.26, no.4, s.288-298, 2006.
- [24] DINCER, Ibrahim, Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Sustainable Future, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, vol.2, no.1,s.1-14, 2008.
- [25] Harrison, Karl, Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future, UK Sustainable Hydrogen Energy Consortium, University of Oxford, <http://www.foresight.gov.uk>, 2007.
- [26] ZEGERS, Pieter, Fuel cell commercialization: The key to a hydrogen economy, Journal of. Power Sources vol.154, s.497, 2006.
- [27] PRABHA Acharya R., An advanced fuel cell simulator. Master of science thesis. B.E. College of Engineering, Texas A&M University, 2004.

- [28] HOOGER, Gregor, Fuel Cell Technology Handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 1667s. 2003.
- [29] SAMMES, Nigel, Fuel Cell Technology Reaching Towards Commercialization, Springer, 298s. 2006.
- [30] CHEN, Eric, L., History. of Fuel Cell Technology Handbook, G. Hoogers edited, CRS Press, 2003.
- [31] YAMAMOTO, Osamu, Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects, *Electrochimica Acta*, vol.45, p.2423–2435, 2000.
- [32] BOVE, Roberto and BASU S., Solid Oxide Fuel Cells: Principles, Designs and State-of-the-Art in Industries, in *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*, vol.267-285 , Ed. Springer New York, pp. 267–285, 2007.
- [33] Maru, Hans. C., Fuel cell systems and potential applications, *Symposium Proceedings: Fuel Cells Technology Status and Applications*, Institute of Gas Technology, Chicago, IL, pp.33–44, November 1981.
- [34] CHENG, Zhe, Investigations into the interactions between sulfur and anodes for solid oxide fuel cells, Doctor of Philosophy Thesis, Georgia Institute Of Technology, 238p., 2008.
- [35] BOVE, Roberto, and UBERTINI, S., Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results, *Journal of Power Sources* vol.159, s.543–559, 2006.
- [36] YAMAMOTO, O. et al. In: S.P.S. Badwal, M.J. Bannister and R.H.J. Hannink, Editors, *Science and Technology of Zirconia V*, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, p. 733, 1993.
- [37] Schimdt, M., Heizgerät mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen für den Haushalt, Sulzer Hexis AG, Winterthur, Conference procedures: Status der Entwicklung und Anwendung der Brennstoffzellentechnik, Bremen, 11 November 1999.
- [38] LARMIE, James and DICKS, Andrew, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd Edition, Wiley & Sons, p.433, 2003.
- [39] STAMBOULI, A.B., Solid oxide fuel cells a review of environmentally clean and efficient source of energy, *renewable and sustainable energy reviews* vol.6, no.5, s.433-455, 2002.
- [40] GHOSH, Ujjal, One dimensional modeling of planar solid oxide fuel cell, M.Sc. thesis, Ohio University, College of Engineering and Technology, 212p. 2005.
- [41] KAWADA, T.and MIZUSAKI, J., Current electrolytes and catalyst, Chapter 70, in *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications*, W.

- Vielstich, A. Lamm, and H. A. Gasteiger, Eds., John Wiley & Sons, pp. 987–1001, 2003.
- [42] FERGUS, Jeffrey W., Oxide anode materials for solid oxide fuel cells, *Solid State Ionics*, vol.177, pp. 1529–1541, 2006.
- [43] LAOSIRIPOJANA, N. and WIYARATN, W., Energy and Environment, *Reviews on Solid Oxide Fuel Cell Technology*, *Engineering Journal*, vol.13, no.1, 2009.
- [44] MINH Nguyen, Q. and TAKAHASHI, Takehiko, *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*, Elsevier Ltd, 1995.
- [45] POEPEL, R. and Dusek, J. T., Solid oxide fuel cell having monolithic cross flow core and manifolding, US Patent 4476196, October 9, 1984.
- [46] ORMEROD, Mark R., Solid oxide fuel cells. *Chemistry Society Review*, vol.32, s.17–28, 2003.
- [47] SINGHAL, Subhash and C., KENDALL, Kevin, *High emperature solid oxide fuel cells. fundamentals, design and applications*, Elsevier Ltd., 2003.
- [48] OECD/IEA, *Energy Technology Analysis, Report, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells Paris*, 256p. 2005.
- [49] Schoots, K. and Kramer, G.J., Technology learning for fuel cells: An assessment of past and potential cost reductions *Energy Policy*(2010, doi:10.1016/j.enpol.2010.01.022), 2010.
- [50] U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, DOE/NETL Brochure, *Distributed Generation*, http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/publications/Dist_Gen_brochure_final_1.pdf, June 2003.
- [51] Doyon, Jody, SECA Solid Oxide Fuel Cell Power Plant System Cost Reduction, FY 2007 Annual Report, 2007.
- [52] Shaffer, Steven, SECA Review Meeting Development Update on Delphi's Solid Oxide Fuel Cell Power System, <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/seca/pdf/Shaffer.pdf>, 2006.
- [53] Agnew, Gerry, Rolls-Royce, Overview of Advanced Hybrid Concept, Realizing Vision 21 with fuel cell / gas Turbine hybrids, <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/Hybrid/Hybrid2Agnew.pdf>, 2002.
- [54] Gemma Crawley, *Fuel Cell Today*, Opening doors to fuel cell commercialisation, *Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)*, www.fuelcelltoday.com, January 2007, erişim:20 Mayıs 2010.

- [55] İnternet: Termoelektrik, Büyük Türkçe Sözlük
<http://tdkterim.gov.tr/bts/?kategori=verilst&kelime=termoelektrik&ayn=tam>,
erişim 20 Mayıs 2010.
- [56] ROWE, David, M., CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press LLC, 701p. 1995.
- [57] ROWE, David, M., BHANDARI, Chandra, M., Modern Thermoelectrics s.1–8, 1983.
- [58] CENGEL, Yunus ve BOLES, Michael, A., Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, çevirmen Taner Derbentli ,Literatür yay., s.442, 1996.
- [59] KASAP, S.O., Principles of Electronic Materials and Devices, Mc Graw Hill, NY, 2006.
- [60] İnternet: www.melcor.com, Erişim: 23.03.2010.
- [61] RIFFAT, S.B. and QIU, G., Comperative Investigation of Thermoelectric Air-Conditioners Versus Vapour Compression and Absorption Air-Conditioners, Applied Thermal Engineering, vol.24,s.1979-1993, 2004.
- [62] Yavuz, A.H. ve Ahıska, R., Hakim M., 2006. Bulanık Mantık Kontrollü Termoelektrik Beyin Soğutucusu. ELECO'2006 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, B8–07, Bursa, 2006.
- [63] TSAI, H. L. and LIN, M. L. Model building and simulation of thermoelectric module using matlab/simulink, Journal of Electronic Materials Ind. Appl.,vol.43, s.505, 2007.
- [64] AHISKA, R. vd. Standart Termoelektrik Modülün Z Parametresinin Ölçülmesi için Yeni Yöntem ve Sistem, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol.19, no.4, s.467-473, 2004.
- [65] AHISKA, R. and DİŞLİTAŞ, S., Microcontroller Based Thermoelectric Generator Application, G.U. Journal of Science, vol.19, no.2, s.135-141, 2006.
- [66] ÖZGÜN, Haluk, Termoelektrik Jeneratörlerin Çok Düşük Sıcaklıklarda Teorik Ve Deneysel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, 139 s, 2009.
- [67] RIFFAT, S.B., MA, X., Thermoelectrics: a review of present and potential applications, Applied Thermal Engineering vol.23, s.913–935, 2003.
- [68] BULUT, H., Termoelektrik Soğutma Sistemleri, Soğutma Dünyası, sayı 31, s.9-16, 2005.
- [69] SALES, Brian, Progress in New Thermoelectric Materials, Fall 2004 MRS Meeting, Boston MA Symposium s.4.5., 2004.

- [70] ROWE David, M. and Min Gao. Evaluation of thermoelectric modules for power generation. *Journal of Power Sources* vol.73, s.193–198, 1998.
- [71] ROWE, David M., Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. *Int Journal of Innovative Energy Systems Power*; vol.1,s.13–23, 2006.
- [72] YODOVARD, P. et al., The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants. *Energy Sources* vol.23,s. 213–224, 2001.
- [73] CHEN, L. Et al., Performance optimization of a twostage semiconductor thermoelectric-generator. *Applied Energy* vol.82, s.300–312, 2005.
- [74] Rowe, David M., Development of improved modules for economic recovery of low temperature waste heat, *Proceedings of the 6th International Conference on Thermoelectrics*. Dresden, Germany, 1997.
- [75] GAO, M. et al. Optimization of thermoelectric module geometry for waste heat electrical power generation, *Journal of Power Sources*, vol.38, 1991.
- [76] Tsuoyschi, A. et al. A study of commercial thermoelectric generation in a processing plant of combustible solid waste, *Proceedings of the 6th International Conference on Thermoelectrics*, Dresden, Germany, 1997.
- [77] İbrahimoglu, B. et al. Mathematical Modeling of the Electrical Energy Production System by using the Waste Heat of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) *Kabul Edilmiş Bildiri, Ege Enerji Sempozyumu*, 2010.
- [78] Fettah, S. et al. Economically Usage of Hydrogen in Solid Oxide Fuel Cells, *Presented Paper, Poster Presentation*, s.828–829, *ICHMS*, Ukraine, 2009.
- [79] BARCLAY and Frederick, J., *Fuel Cells, Engines and Hydrogen An Exergy Approach*, John Wiley & Sons Ltd., s 72, 2006.
- [80] Pyke, S.H and Howard, P.J., *Planar SOFC Technology: stack Desing and Development for Lower Cost and Manufacturability*, DTI/Pub URN 02/1350, 2002.
- [81] Demirel, Hüseyin, Sıçanlar İçin Sıcaklık Kontrollü Hipotermiya Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 13-15 Mayıs 2009.
- [82] RIFFAT, S.B. and MA, X, Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. *International Journal of Energy Research*, vol. 28, s.753–768, 2004.
- [83] Internet: <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>, erişim tarihi 23.03.2010.

- [84] Dikmen, Volkan Tesisatlarda Yalıtımın Önemi, Yapıda Isı Yalıtımı Konferansı, Bildiriler Kitabı Y11, İstanbul, s.167, ODE, Şubat 1999.
- [85] EREL, Şerafettin, A Thermoelectrical approach to the waste energy thrown by chimneys, International. Journal of. Engineering Research & Development, vol.1, no.1,January 2009.
- [86] Pashey, M. et al., Design&Build A 5kW Thermally Self-Sustaining IP-SOFC Stack, DTI-Pub URN 01/1162, UK,2001.
- [87] Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Conceptional Desing of POX /SOFC 5kW net System,USA,2000.
- [88] Ralph, J. M. et al., Materials and design for SOFC auxiliary power units, <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/FC/94.pdf>, erişim:04.09.2010.
- [89] Internet: www.tedas.gov.tr, erişim:05.05.2010.
- [90] Internet: www.tcmb.gov.tr; erişim:05.05.2010.