

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ATIK ISI  
KULLANIMINA BİR UYGULAMA: PEM YAKIT PİLİ  
ATIK ISISININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Hazırlayan  
Oğuzhan ÇALIŞIR**

**Danışman  
Doç. Dr. Kemal ATİK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Şubat 2014  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ATIK ISI  
KULLANIMINA BİR UYGULAMA: PEM YAKIT PİLİ  
ATIK ISISININ DEĞERLENDİRİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi )**

**Hazırlayan  
Oğuzhan ÇALIŞIR**

**Danışman  
Doç. Dr. Kemal ATİK**

**Şubat 2014  
KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

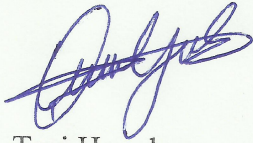
Adı-Soyadı : Oğuzhan Çalışır

İmza :



## YÖNERGEYE UYGUNLUK

Termoelektrik Jeneratörlerde Atık Isı Kullanımına Bir Uygulama: PEM Yakıt Pili Atık Isısının Değerlendirilmesi adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan

Oğuzhan Çalışır



Danışman

Doç.Dr. Kemal Atik



Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Hüseyin Yapıcı

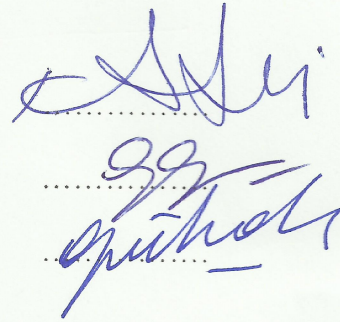
Doç. Dr. Kemal ATİK danışmanlığında **Oğuzhan ÇALIŞIR** tarafından hazırlanan “**Termoelektrik Jeneratörlerde Atık Isı Kullanımına Bir Uygulama: PEM Yakıt Pili Atık Isısının Değerlendirilmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

02/11/2014

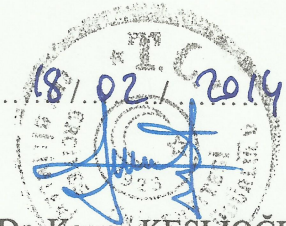
(Tez savunma sınav tarihi yazılacaktır.)

**JÜRİ:**

Danışman : Doç. Dr. Kemal ATİK  
Üye : Doç. Dr. Gamze GENÇ  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Gülşah ÖZİŞİK

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 18/02/2014 tarih ve 2014/09-13 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kazım KEŞLIOĞLU  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Kemal ATİK' e ve deney çalışmaları boyunca yardımcı olan tekniker arkadaşım Erdi Yıldız'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince sabır göstererek beni destekleyen eşime ve kızıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzhan ÇALIŞIR

Kayseri, Şubat 2014

# TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ATIK ISI KULLANIMINA BİR UYGULAMA: PEM YAKIT PİLİ ATIK ISISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Oğuzhan ÇALIŞIR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2014

Danışman: Doç. Dr. Kemal ATİK

## KISA ÖZET

Yakıt pilleri elektrokimyasal enerjiden elektrik enerjisi elde etmektedir. Elektrik enerjisinin elde edilmesi sırasında bir miktarda ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerde, ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde etmektedirler.

Bu çalışmada termoelektrik jeneratörler ile PEM yakıt pilinin atık ısıyı değerlendirilmiştir. Yakıt pilinin çıkışındaki atık ısı, termoelektrik jeneratör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Böylece kullanılmayıp atılan ısı enerjisinin bir kısmı, elektrik enerjisine çevrilerek sistemde verim artışı sağlanmıştır.

Deneyle sırasında, sistemin giriş ve çıkışındaki hava sıcaklığı, ortam sıcaklığı, termoelektrik jeneratörün ürettiği akım ve gerilim değerleri ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Bu ölçümlerden yararlanarak sistemin genel verimi hesaplanmıştır. Ölçülen değerler ve yapılan hesaplamalar sonucunda sistemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PEM Yakıt pilleri, termoelektrik jeneratör, yakıt pili ve termoelektrik jeneratör hibrid sistemi, atık ısı.

**AN APPLICATION ON THE USE OF WASTE HEAT IN  
THERMOELECTRIC GENERATORS: EVALUATION OF THE PEM FUEL  
CELL WASTE HEAT**

**Oğuzhan ÇALIŞIR**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**M.Sc. Thesis, February 2014**

**Supervisor: Doç. Dr. Kemal ATİK**

**ABSTRACT**

Fuel cells generate electrical energy from electrochemical energy. During the electrical energy obtained an amount of heat energy is revealed. Thermoelectric generators produce electrical energy from heat energy.

In this study, thermoelectric generators with waste heat of the PEM fuel cell was evaluated. The waste heat at output of the fuel cell converted into electrical energy by thermoelectric generators. Thus, a part of the cast-off heat energy, converted into electrical energy and efficiency was increased in the system.

During the experiments, input and output air temperature of system, ambient temperature, thermoelectric generator current and voltage values were measured and recorded in the computer. Using these measurements, system's overall efficiency were calculated. Usability of the system was assessed as a result of the measured values and calculations.

**Keywords:** PEM fuel cells, thermoelectric generators, fuel cells and thermoelectric power generator hybrid system, waste heat.

## İÇİNDEKİLER

### TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ATIK ISI KULLANIMINA BİR UYGULAMA: PEM YAKIT PİLİ ATIK ISISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

	<u>Sayfa</u>
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI.....	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iv
ÖNSÖZ .....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR ve SİMGELER.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xv
<b>GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>

## 1. BÖLÜM

### YAKIT PİLLERİ

<b>1.1. Genel Bilgiler.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Yakıt Pili nin Temel Çalışma Prensibi .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Yakıt Pili Çeşitleri.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4. PEM Yakıt Pili Karakteristik Özellikleri.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5. PEM Yakıt Pili nin Giriş ve Çıkış Parametrelerinin Hesaplanması .....</b>	<b>19</b>

## 2. BÖLÜM

### TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER

2.1. Genel Bilgiler .....	25
2.2. Termoelektrik Jeneratörün Temel Çalışma Prensibi .....	26
2.3. Termoelektrik Jeneratörün Yapısı ve Karakteristiği .....	28

## 3. BÖLÜM

### PEM YAKIT PİLİ-TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMİ

3.1. Genel Bilgiler.....	38
3.2. PEM-TE Sistemi Temel Çalışma Prensibi .....	39
3.3. PEM-TE Sisteminin Yapısı ve Karakteristiği .....	40

## 4. BÖLÜM

### DENEY ÇALIŞMASI ve BULGULAR

4.1. Materyal ve Metod .....	42
4.1.1. Kullanılacak Malzemeler.....	43
4.1.2. Metod .....	48
4.2 Bulgular .....	51

## 5. BÖLÜM

### TARTIŞMA - SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Değerlendirme .....	55
5.2 Sonuç ve Öneriler.....	55

KAYNAKLAR.....	57
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ .....	61
----------------	----

## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlamı</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
H <sub>2</sub>	Hidrojen gazı	--
O <sub>2</sub>	Oksijen gazı	--
N <sub>2</sub>	Azot gazı	--
I	Akım	(A)
I <sub>max</sub>	Maksimum akım	(A)
H <sup>+</sup>	Hidrojen iyonu	--
e <sup>-</sup>	Elektron	--
H <sub>2</sub> O	Su	--
G	Gibbs serbest enerjisi	(J)
H	Entalpi	(J)
T	Sıcaklık	(K)
S	Entropi	(J/K)
ΔG	Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J)
ΔH	Entalpi değişimi	(J)
ΔS	Entropi değişimi	(J/K)
$\bar{g}_{H_2}$	Molar Hidrojen Gibbs enerjisi	(J/mol)
Δ $\bar{g}$	Molar Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J/mol)
Δ $\bar{g}_{H_2O}$	Molar Su Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J/mol)
Δ $\bar{g}_{H_2}$	Molar Hidrojen Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J/mol)
Δ $\bar{g}_{O_2}$	Molar Oksijen Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J/mol)
N <sub>a</sub>	Avogadro sayısı	(6.022 x 10 <sup>23</sup> e <sup>-</sup> )
C	Coulomb sabiti	(C)
F	Faraday sabiti	(96485 C/mol)
E,ADG	Yakıt pili açık devre gerilimi	(V)
Δ $\bar{h}$	Molar entalpi değişimi	(J)
η, η <sub>f</sub>	Yakıt pili verimi	(%)
μ <sub>f</sub>	Kullanılan yakıtın toplam yakıtı oranı	--
V <sub>c</sub>	Yakıt pili çalışma gerilimi	(V)
E <sup>0</sup>	Standart basınçtaki yakıt pili Nersnt gerilimi	(V)

R	Gaz sabiti	(J/mol K)
$\Delta T$	Sıcaklık farkı	(K)
$P_0$	Atmosfer basıncı	(atm)
$P_{H_2}$	Hidrojenin kısmi basıncı	(atm)
$P_{O_2}$	Oksijenin kısmi basıncı	(atm)
$P_{H_2O}$	Suyun kısmi basıncı	(atm)
$T_0$	Çevre sıcaklığı	(K)
$\Delta V_{\text{aktivasyon}}$	Yakıt pili aktivasyon gerilim kaybı	(V)
$\Delta V_{\text{omik}}$	Yakıt pili omik gerilim kaybı	(V)
$\Delta V_{\text{konsantrasyon}}$	Yakıt pili konsantrasyon gerilim kaybı	(V)
$\lambda_a$	Anot şarj transfer katsayısı	--
$\lambda_k$	Katot şarj transfer katsayısı	--
$i$	Akım yoğunluğu	(A/cm <sup>2</sup> )
$i_0$	Değiştirilebilir akım yoğunluğu	(A/cm <sup>2</sup> )
$A_{yp}$	Polar tabaka yüzey alanı	(cm <sup>2</sup> )
$r$	Yakıt pili membran iç direnci	( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
$t_{\text{membran}}$	Yakıt pili membran kalınlığı	(cm)
$\sigma_{\text{membran}}$	Yakıt pili membran iletkenliği	( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
$\lambda_{\text{membran}}$	Yakıt pili membran nemliliği	--
$i_m$	Sınırlanmış akım yoğunluğu	(A/cm <sup>2</sup> )
$\beta_1$	Konsantrasyon aşırı gerilim değişkeni	--
$\beta_2$	Konsantrasyon aşırı gerilim sabiti	--
$m_{O_2}$	Oksijen miktarı	(mol)
$\dot{m}_{O_2}$	Oksijen miktarı	(mol/s)
$\dot{M}_{O_2}$	Oksijen miktarı	(kg/s)
$P_e$	Yakıt pili elektriksel gücü	(W)
$P_{\text{max}}$	Yakıt pili maksimum gücü	(W)
$\dot{M}_{\text{hava}}$	Hava miktarı	(kg/s)
$\dot{M}_{\text{hava çıkış}}$	Hava çıkış miktarı	(kg/s)
$\dot{m}_{H_2}$	Hidrojen miktarı	(mol/s)
$\dot{M}_{H_2}$	Hidrojen miktarı	(kg/s)
$\dot{m}_{H_2O}$	Üretilen su miktarı	(mol/s)

$\dot{M}_{H_2O}$	Üretilen su miktarı	(kg/s)
$M_{H_2O}$	Üretilen su miktarı	(kg)
$Q_{\dot{u}}$	Yakıt pilinde üretilen ısı miktarı	(W)
$\dot{m}_{soğutma}$	Soğutma havası miktarı	(kg/s)
$C_p$	Havanın özgül ısısı	(J/kg K)
$Q_e, Q_{so}$	Termoelektrik soğuk yüzeyinden emilen ısı	(W)
$Q_b, Q_{st}$	Termoelektrik sıcak yüzeyinden atılan ısı	(W)
$V$	Gerilim	(V)
$\alpha$	Seebeck katsayısı	(V/K)
$Q_p$	Peltier ısısı	(W)
$\pi$	Peltier katsayısı	(V)
$Q_t$	Thomson ısısı	(W)
$\tau$	Thomson katsayısı	(V/K)
$Q_j$	Jeul ısısı	(W)
$R$	Termoelemanın direnci	( $\Omega$ )
$Q_f$	Fourier ısısı	(W)
$U, h$	Isı transfer katsayısı	(W/m <sup>2</sup> K)
$k$	Isı iletim katsayısı	(W/mK)
$A_T$	Isı transfer yüzey alanı	(m <sup>2</sup> )
$N$	Termoelektrik modül yarı iletken çift sayısı	(adet)
$T_{so}$	Soğuk yüzey sıcaklığı	(K)
$T_{st}$	Sıcak yüzey sıcaklığı	(K)
$G$	Termoelektrik modül şekil faktörü	(cm)
$r_i$	Özdirenç	( $\Omega.cm$ )
$I_{max}$	Maksimum akım	(A)
$I_{op}$	Optimum akım	(A)
$Z$	Uygunluk faktörü	(1/K)
$T_{ort}$	Ortalama sıcaklık	(K)
STK, COP	Soğutma tesir katsayısı	--
$\Delta T_{max}$	Maksimum sıcaklık farkı	(K)
$\eta_g$	Termoelektrik modülün termodinamik verimi	(%)
$P_{TE}$	Termoelektrik modülün elektriksel gücü	(W)

$j$	Boyutsuz akım	$(\alpha I/K)$
$Q_L$	Yakıt pilinden ortama transfer olan ısı	$(W)$
$h_L$	Kritik akım yoğunluğu	$(A/cm^2)$
$A_L$	Yakıt pili efektif ısı transfer yüzey alanı	$(m^2)$
$P_{PT}$	PEM-TE sisteminin çıkış gücü	$(W)$
$\eta_{PT}$	PEM-TE sisteminin verimi	$(\%)$
$Q_{max}$	Maksimum ısı	$(W)$
$V_{max}$	Maksimum gerilim	$(W)$

## TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Yakıt pili çeşitleri [23] .....	8
Tablo 1.2.	PEM yakıt pili temel tepkimesi için Gibbs enerji değişimi [23] .....	10
Tablo 1.3.	PEM yakıt pili için $\Delta\bar{g}$ , maksimum EMK, yüksek ısıl değere göre verim limiti [23]. .....	12
Tablo 1.4.	Asit elektrolit için değişik metallerin hidrojen elektrodunun $i_0$ değerleri. ...	18
Tablo 1.5.	PEM yakıt pilindeki bazı parametrelerin değerleri [17].....	19
Tablo 1.6.	PEM yakıt pilindeki sıcaklığa bağlı bazı parametrelerin değerleri [17]. .....	19
Tablo 2.1.	Farklı malzemelerin platin elementinin referansında 0° C' deki Seebeck katsayıları [21].....	34
Tablo 4.1.	Plastik aksiyal aspiratörün özellikleri.....	43
Tablo 4.2.	Elektrikli rezistansın özellikleri. ....	44
Tablo 4.3.	Kullanılan termokuplun özellikleri. ....	46
Tablo 4.4.	Kullanılan çeviricinin özellikleri. ....	47
Tablo 4.5.	Kullanılan dönüştürücünün özellikleri. ....	48
Tablo 4.6.	Termoelektrik modülün özellikleri. ....	48
Tablo 4.7.	Deney sonucu ölçülen değerler .....	51
Tablo 4.8.	Deney sonucu hesaplanan değerler .....	52
Tablo 4.9.	PEM yakıt pilinin özellikleri .....	52

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Yakıt pili [22].....	6
Şekil 1.2.	Suyun elektrolizi (a), yakıt pilinin çalışma prensibi (b) .....	6
Şekil 1.3.	Yakıt pilinin temel yapısı.....	7
Şekil 1.4.	Yakıt pili serbest enerji diyagramı .....	9
Şekil 1.5.	YID' e göre 1 atm basınçta maksimum PEM yakıt pili verimi ve 50°C egzost sıcaklığına göre Carnot verimi [23].....	14
Şekil 1.6.	Düşük sıcaklıkta çalışan tipik bir yakıt pilinin gerilim-akım yoğunluğu grafiği [23]. .....	15
Şekil 1.7.	Yüksek sıcaklıkta (800°C) çalışan bir yakıt pilinin gerilim-akım yoğunluğu grafiği [23]. .....	15
Şekil 1.8.	Yavaş ve hızlı tepkimeler için Tafel diyagramı [23].....	15
Şekil 2.1.	Termoelektrik jeneratör. ....	26
Şekil 2.2.	Farklı iki metalin oluşturduğu gerilim.....	26
Şekil 2.3.	Farklı iki metalin oluşturduğu devrede soğutma etkisi. ....	27
Şekil 2.4.	İletken üzerinde akım ve ısı akışında oluşan ısı üretimi.....	27
Şekil 2.5.	Termoelektrik jeneratör çalışma prensibi. ....	28
Şekil 2.6.	Germanyuma katılan arseniğin (As) kristal yapıda gösterilişi. ....	29
Şekil 2.7.	N tipi yarı iletkenin gösterilişi. ....	29
Şekil 2.8.	Germanyuma katılan galyumun (Ga) kristal yapıda gösterilişi. ....	30
Şekil 2.9.	P tipi yarı iletkenin gösterilişi. ....	31
Şekil 2.10.	N tipi yarı iletkeninde elektron akışı ve ısı akış yönleri. ....	31
Şekil 2.11.	P tipi yarı iletkeninde elektron akışı ve ısı akış yönleri.....	32
Şekil 2.12.	Sadece N tipi yarı iletkenin kullanıldığı düşünülerek oluşturulan bağlantı şekli.....	33
Şekil 2.13.	Sadece P tipi yarı iletkenin kullanıldığı düşünülerek oluşturulan bağlantı şekli.....	33
Şekil 2.14.	Termoelektrik bağlantı şekli. ....	33
Şekil 3.1.	PEM-TE sisteminin çalışma şeması. ....	39
Şekil 3.2.	PEM-TE sistemindeki parametreler [17].....	40
Şekil 4.1.	PEM-TE sistemindeki plastik aksiyal aspiratör.....	43
Şekil 4.2.	Hava soğutmalı elektrikli rezistans .....	44
Şekil 4.3.	Güç ayarlayıcı (dimmer) anahtar .....	44

Şekil 4.4.	Dimmer devresi.....	45
Şekil 4.5.	Sıcak yüzeyde kullanılan alüminyum profil.....	45
Şekil 4.6.	Soğuk yüzeyde kullanılan alüminyum profil.....	46
Şekil 4.7.	K tipi termokupl.....	46
Şekil 4.8.	Ölçeme sistemindeki sinyal dönüştürücü ve çevirici.....	47
Şekil 4.9.	Termoelektrik modül.....	48
Şekil 4.10.	Deney seti şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.11.a.	Deney seti uygulama görüntüsü-1.....	49
Şekil 4.11.b.	Deney seti uygulama görüntüsü-2.....	50
Şekil 4.12.	Bağlantılar, ölçme sistemi ve profiller.....	50
Şekil 4.13.	Alüminyum profiller ve ara yalıtım malzemesi.....	51
Şekil 4.14.	Termoelektrik modülün ürettiği gerilim.....	53
Şekil 4.15.	Termoelektrik modülün çıkış gücü.....	53
Şekil 4.16.	Sıcaklık farkına bağlı termoelektrik modülün elektriksel verimi.....	54
Şekil 4.17.	PEM-TE sistemi ve PEM yakıt pilinin, akım yoğunluğu-verim eğrisi.....	54

## GİRİŞ

Proton değişim membranlı (PEM) yakıt pilinin, düşük maliyetli bir yapı malzemesi olması, tasarım ve kullanım kolaylığı, çevreyi kirletmemesi gibi birçok avantajı vardır. Bunlar yakıt pilinin en avantajlı taraflarıdır. Aynı zamanda, PEM yakıt hücresi otomotiv, dizüstü bilgisayarlar, diğer elektronik cihazlar da dahil olmak üzere yaygın uygulamalarda, düşük çalışma sıcaklığı, hızlı başlangıç, hafif ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, taşınabilir bir güç kaynağı olarak güçlü bir alternatiftir.

Bir PEM yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı katı oksit yakıt pili çalışma sıcaklığından çok daha düşüktür. Bu nedenle PEM yakıt hücresinde üretilen atık ısı, bir ısı motorunu hareket ettirmek için kullanılamaz. Yani bir PEM yakıt hücresi ve bir ısı motorundan oluşan sistem düşünülemez.

Bu çalışmada, PEM yakıt hücresi tarafından üretilen atık ısıyı kullanabilen bir termoelektrik jeneratör sistemi düşünülmüştür. Bu sistem için, termoelektrik jeneratör ve PEM yakıt pilinin mevcut modellerine dayanan bazı önemli parametreler elde edilmiştir. Daha sonra sistemin performans karakteristikleri ortaya konularak belli başlı performans parametrelerinin optimum kriterleri belirlenmiştir. Tasarlanan sistemle yapılan deneylerin sonuçlarına göre hangi oranda verim artışı elde edilebileceği değerlendirilmiştir.

Literatürde PEM yakıt pilleri ve termoelektrik jeneratörler hakkında yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Her iki sistemin birlikte kullanıldığı çalışma sayısı azdır. Bu çalışmalardan başlıcaları aşağıda verilmiştir.

Termoelektrik Jeneratörlerle ilgili birçok teorik ve uygulamalı çalışma yapılmıştır. Bunlardan önemli görülenleri özet olarak şu şekildedir: Lertsatitthanakorn [1] biomas enerjisiyle çalışan bir TE jeneratör yapmıştır.

TEP1-1264-3.4 kodlu TE eleman kullandığı bu çalışmada farklı elektriki dirençler için en fazla gücü elde etmeye çalışmıştır. 150 °C sıcaklık farkında 2.4 W güç ve % 3.2 verim elde etmiş, sistemin geri ödeme süresini hesaplamıştır. Thomas [2] enerji krizi durumlarında kullanılabilir alternatif yöntemler ve bunların teorilerinden bahsetmiştir. Bu bağlamda üç farklı TE jeneratör için üretici karakteristiklerini vermiştir. Pramanick [3] termoelektrik jeneratörün fiziksel (matematiksel) modellemesini yapmıştır. Eakburanawat [4] ısı enerjisini direkt elektrik enerjisine dönüştüren ve bataryayı şarj eden bir sistem yapmıştır. Bir mikro kontrolörle maksimum güç noktasını takip etmekte ve 7.99 W güç elde etmiştir. Kullanılan TE eleman TEP1-1264-1.5' dir. Bu modülü farklı sıcaklık ve dirençler için denemiştir. Chen vd. [5] iki katlı TE jeneratörün optimizasyonunu teorik olarak incelemiştir. İki kattaki çift sayılarını değiştirerek en iyi gücü veren durumu hesaplamışlardır. Khattab vd. [6] güneş enerjisinden yararlanarak TE jeneratörden elektrik elde edilmesi ve bu elektrikle TE soğutma yapılmasını teorik olarak hesaplamıştır. 30 kuzey enlemindeki bir bölgenin için bütün yıl ve farklı TE eleman sayıları için soğutma gücü hesaplanmıştır. Nuwayhid vd. [7] bir sobanın yüzeyine yerleştirdikleri TE jeneratörden elektrik enerjisi elde etmişlerdir. Sıcak kaynak olarak soba, soğuk kaynak olarak ise oda havası sıcaklığının kullanıldığı çalışmada elde ettikleri güç yaklaşık 4 Watttır. Chen vd. [8] çok elemanlı bir TE jeneratörde ısı transfer olayını bir sayısal örnekle incelemiştir. Sun vd. [9] sıvı doğal gazın buharlaşmasındaki aldığı ısıdan faydalanarak TE jeneratörle elektrik enerjisi üretimini analitik ve sayısal yolla hesaplamıştır. Jeneratörün optimum parametrelerini göstermişlerdir. Hsiao ve ark. [10] bir otomobil motorunun atık ısısından yararlanarak termoelektrik modüllerle elektrik enerjisi üretimini modellemişlerdir. Çalışma deneylerle de desteklenmiştir. İki Farklı TE modül için farklı sıcaklıklarda üretilen güç ve verim değerleri gösterilmiştir. Maksimum güç yoğunluğu 51.13 mW/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

PEM yakıt pilleri ile yapılan çalışmalardan bazıları şu şekildedir: Park ve Li [11] PEM yakıt pilindeki verimi artırmak için çapraz akışlı bir serpantin yapmışlardır. 3 boyutlu sayısal analizler ve deneysel ölçümler yapmışlardır. Garcı'a-Valverde ve ark. yaptıkları çalışmada [12] atmosferik veya düşük basınçlı PEM için basit bir model yapmışlardır. Sayısal analizler ve deneysel ölçümler yapmışlardır. Placca ve ark. [13] yaptıkları çalışmada, Temel Bileşen Analizi (PCA) yöntemini incelemiştir. Bu yöntemi

tamamlamak için, PEM yakıt hücresinin çoklu regresyon kullanarak deneysel modelini yapmışlardır. Kunusch ve ark. [14] bir proton değişim membranlı yakıt pili (PEMFC) için kontrol odaklı elektro statik model yığını geliştirmiştir. Yakıt pili modelini deneysel verilere dayalı, teorik düşüncelerle ve yarı-ampirik analizlerle birleştirerek geliştirmişlerdir. Guldur ve ark. [15] yaptıkları çalışmada bir alternatif enerji kaynağı adayı olan PEM yakıt pilini ele almış ve PEM yakıt pilinin performansının geliştirilmesinde kilit role sahip olan katottaki oksijen indirgenme reaksiyonu için sentezlenmiş olan uçlu platin katalizörlerin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Ay ve Arslan [16] yaptıkları çalışmada sodyum bentonit katkısı ile yakıt hücresinde su yönetimine yardımcı olunurken bipolar plaka tasarım kriterlerini de sağlayan grafit-polimer kompozit bipolar plakalar üretmeyi amaçlamışlardır. Üretilen plakaların su tutma kapasiteleri, gaz geçirgenlik ve hidrofobiklik değerlerini vermişlerdir.

PEM yakıt pili, atık ısı ve termoelektrik jeneratörlerin birlikte kullanıldığı çalışmalardan bazıları şu şekildedir: Chen ve ark. [17] PEM yakıt pili ile termoelektrik jeneratör hibrit sisteminin nümerik modellemesini yaparak incelemişlerdir. Maksimum çıkış gücünü veren optimum çalışma akımını hesaplamışlardır. Pan ve ark. [18] katı oksit yakıt pili (SOFC) ile termoelektrik jeneratör hibrit sisteminin nümerik modellemesini yaparak incelemişlerdir. Yakıt pilinin maksimum verimini ve çıkış gücünü hesaplamışlardır. Her iki çalışmada Çin Halk Cumhuriyeti Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı tarafından desteklenmişlerdir. Rosendahl ve ark. [19] mikro kojenerasyon sisteminde atık ısının bir kısmını termoelektrik jeneratörlerle elektrik enerjisine dönüştürmüşlerdir. Bu çalışma da Danimarka Kamu Hizmeti Yükümlülüğü tarafından kısmen desteklenmiştir. Weng ve ark. [25] otomobil atık ısını kullanan termoelektrik jeneratörün simülasyonunun çalışmasını yapmışlardır. Gou ve ark [26] atık ısı kullanan termoelektrik jeneratörün dinamik modellemesini yapmışlardır. Jang ve ark. [27] atık ısı kullanan termoelektrik jeneratörün optimizasyonunu yapmışlardır. Gou ve ark. [28] ile Hsu ve ark [29] düşük sıcaklık atık ısını kullanan termoelektrik jeneratörün modellemesini yapmışlardır. Wu [30] atık ısı kullanan termoelektrik jeneratörün analizini yapmıştır. Xin ve ark. [31] PEM atık ısını kullanan ısı değiştiricinin nümerik modellemesini yapmışlardır. Barelli ve ark [32], [33] PEM yakıt pili ile çalışan kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Bollini ve ark. [34] PEM yakıt ile içten yanmalı motorların teknik ve ekonomik yönden kıyaslamasını yapmışlardır. Kjelstrup ve ark. [35] PEM

yakıt pilinde Seebeck ve Peltier etkilerini incelemişlerdir. Karim ve ark. [36] metanolden güç üreten termoelektrik jeneratörü incelemişlerdir. Bensaid ve ark. [37] yüksek verimli termoelektrik jeneratörleri incelemişlerdir. Wang ve ark. [38] katı oksit yakıt pilinin termoelektrik karakteristikleri hakkında çalışma yapmışlardır. Wang ve ark. [39] katı oksit yakıt pili ile gaz pompasının güç üretim sistemini incelemişlerdir. Ratkje ve ark. [40] katı oksit yakıt pili ile termoelektrik güç ilişkisini incelemişlerdir. Zhao ve ark. [41] Rankin çevrimine göre PEM yakıt pilinin atık ısısını kullanan hibrid sistemin analizini yapmışlardır.

Bu özetlerden de görüleceği üzere son yıllarda PEM yakıt pili ve TE jeneratörlerle elektrik enerjisi üretimi konusunda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak ülkemizde bu konuda çalışan bilim insanı sayısı az ve yapılan çalışmalar yetersizdir. Yapacağımız çalışma bu konudaki eksikliği tamamlayacak yönde ve ülkemizde yapılan ilk çalışma olacaktır.

# 1. BÖLÜM

## YAKIT PİLLERİ

### 1.1 Genel Bilgiler

Yakıt pili veya hücresi, elektrik enerjisi üreten bir makinedir. Temel olarak su türbinleri, rüzgar türbinleri ve ısı makinelerinin yaptığı gibi elektrik enerjisi elde etmek için kullanılırlar. Tek farkı kullanılan enerji kaynağıdır. Enerji kaynağı olarak, hidroelektrik santrallerindeki türbinler suyu, rüzgar türbinleri rüzgarı, ısı makineleri ise ısıyı kullanırlar. Yakıt pillerinin enerji kaynağı ise kimyasal enerjidir.

Yakıt pilindeki diğer önemli fark ise doğrudan elektrik enerjisi üretmesidir. Türbinlerde ve ısı makinelerindeki su, rüzgar ve ısı enerjisi doğrudan elektrik elde etmek için kullanılamazlar. Bu enerjiler öncelikle hareket enerjisine daha sonra ise elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Yakıt pillerinde ise kimyasal enerji hareket enerjisine dönüştürülmeden doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu nedenle diğer makinelere göre verimleri daha yüksek olabilmektedir.

Yakıt pili terimi bazı kaynaklarda yakıt hücresi olarak da adlandırılmaktadır. Birden çok hücrenin kullanılmasıyla oluşan yapıya, İngilizcede "stack" kelimesinin karşılığı olan "yığın" denilmektedir. Bu çalışmada genel olarak yığın kelimesi yerine pil kelimesi kullanılmıştır.

Piyasada farklı marka ve modelde pek çok yakıt pili bulunmaktadır. Bunlar otomotiv, taşıyıcı cihazlar, elektrik üretimi vb birçok alanda kullanılmaktadır.

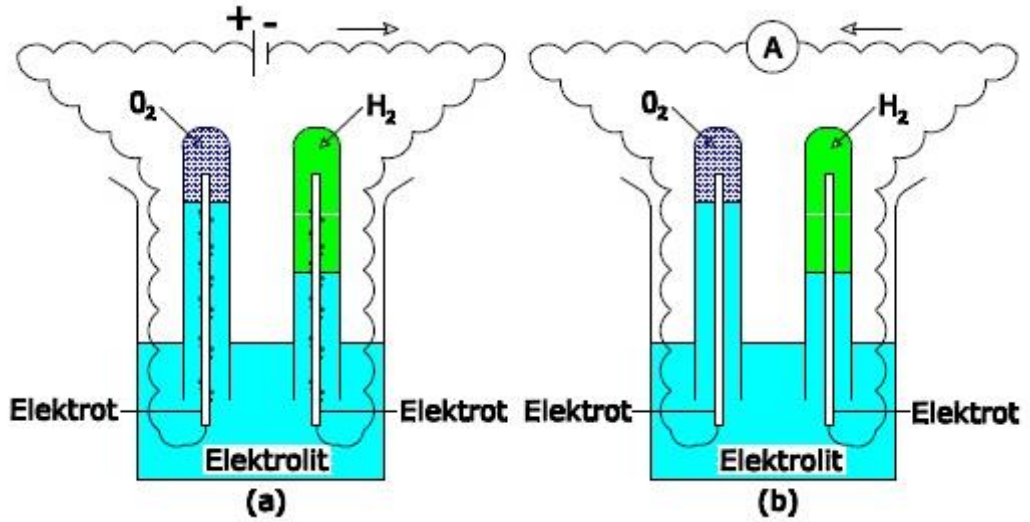
Aşağıda Şekil 1.1 'de Ballard firmasının üretmiş olduğu 1.2 kW kapasiteli bir yakıt pili görülmektedir. [22]



Şekil 1.1 Yakıt Pili [22]

## 1.2 Yakıt Pili'nin Temel Çalışma Prensibi

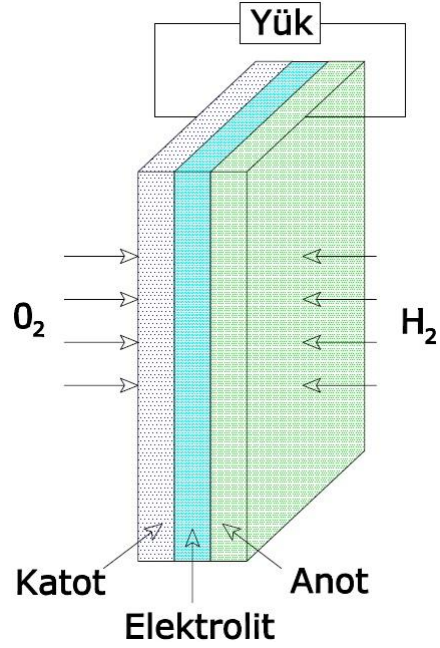
Oldukça basit bir çalışma prensibine sahip yakıt pilleri, suyun elektrolizinin tersi bir elektrokimyasal reaksiyonla çalışırlar. Şekil 1.2.a' da suyun elektrolizi gösterilmiştir.



Şekil 1.2 (a) Suyun elektrolizi, (b) Yakıt pili'nin çalışma prensibi

Şekil 1.2.b' de gösterilen deneylerde üretilen akım çok küçüktür. Bunun nedeni ise elektrotlar arası mesafenin uzun olması (elektrolit akımına direnç gösterir) ile gaz ve elektrotlar arasındaki temas yüzeyinin küçük olmasıdır. Bu problemleri çözmek

için elektrotlar ve elektrolit Şekil 1.3' deki gibi ince bir tabaka halinde yapılır. Böylece mümkün olan maksimum temas yüzeyi sağlanmış olur.



Şekil 1.3 Yakıt pilinin temel yapısı

Yakıt pilinin anodunda hidrojen gazı iyonize olarak H<sup>+</sup> iyonları ve elektronlar e<sup>-</sup> oluşur.



Elektronlar dış bir devreden dolaşarak akım oluştururlar ve elektrolitten geçen H<sup>+</sup> iyonları ve katotdaki oksijen ile birleşerek su (H<sub>2</sub>O) oluştururlar.



Burada önemli olan membranın sadece H<sup>+</sup> iyonlarının geçişine izin vermesidir. Elektronlar membrandan geçmeyerek akım oluşturmalı ve kullanılan membran buna uygun olmalıdır.

### 1.3 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri kullanılan elektrolite, hidrojen kaynağına ve çalışma sıcaklığına göre farklı tiplerde kullanılmaktadır. Tablo 1.1' de yakıt pillerinin genel sınıflandırması yapılmaktadır.

Tablo 1.1 Yakıt Pili Çeşitleri [23].

Yakıt Pili Tipi	Elektrolit malzemesi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Genel Uygulama Alanları
Alkalin Yakıt Pili(AFC)	Suda çözülmüş potasyum hidroksit	60-250	Saf O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> kullanılan uzay çalışmaları
Fosforik Asit Yakıt Pili(PAFC)	Gözenekli silikon karbid matrisi içinde fosforik asit çözeltisi	160-220	Yüksek kaliteli sabit güç sistemleri
Katı Oksit Yakıt Pili(SOFC)	Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	600-1000	Kojenerasyonlu sabit güç sistemleri, sürekli güç sistemleri
Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri(MCFC)	Gözenekli matris içinde erimiş alkali metal(Li/K veya Li/Na)	600-800	Kojenerasyonlu sabit güç sistemleri, sürekli güç sistemleri
Proton değişim membranlı veya Polimer elektrolitli yakıt pilleri(PEMFC)*	Florosülfonik asit polimeri	30-100	Taşınabilir cihazlar, otomotiv, sabit güç sistemleri

\* Doğrudan metanol ve doğrudan alkollü yakıt pilleri de bu gruba girmektedir.

#### 1.4. PEM Yakıt Pili Karakteristik Özellikleri

Tüm makinalarda olduğu gibi yakıt pilleri de giriş ve çıkış enerjisine sahiptir. Bu enerjiler sayesinde yakıt pillerinde üretilen elektrik enerjisi, verim, verim limitleri vb. genel özellikleri belirlenebilmektedir. Aşağıda Şekil 1.4 'de bir PEM yakıt pilinin serbest enerji diyagramı bulunmaktadır. Diyagramda yakıt pilinin giriş değerleri ile çıkış değerleri basitçe gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Yakıt pili serbest enerji diyagramı

PEM yakıt pilinin enerji kaynağı ısı makinalarında olduğu gibi kimyasal enerjidir. Isı makinalarında yakıt ve oksijen tepkimeye girerek yanma olayını meydana getirirler. Yanmanın etkisiyle açığa çıkan ısı enerjisi hareket enerjisine dönüştürülür. Bu hareket enerjisi ya doğrudan kullanılır ya da elektrik enerjisi üretmede kullanılır.

PEM yakıt pilinde doğrudan yanma olayı gerçekleşmez. Hidrojen molekülü anotta iyonize olarak elektrondan ayrışır. Elektronlar bağlanan dış bir devreden akarak katotta tekrar  $H^+$  iyonları ve oksijen gazıyla tepkimeye girerek su oluştururlar. Böylece elektrokimyasal süreç tamamlanmış olur.

Normalde kimyasal işlemlerin kendiliğinden oluşması beklenmez. Örneğin yakıt ile oksijenin yanması için dışarıdan enerji verilmesi gerekmektedir. PEM yakıt pilinin çalışması için dışarıdan enerji verilmesine gerek yoktur. Bunun için maddenin sahip olduğu serbest enerjiden faydalanılır.

Sabit sıcaklık ve 1 atm basınçta maddenin sahip olduğu serbest enerjisi aşağıdaki gibi formülüne edilir.

$$G = H - TS \quad (1.3)$$

Burada;

G : Gibbs Serbest Enerjisini

H: Entalpiyi

T: Mutlak Kelvin Sıcaklığını

S : Entropiyi

ifade etmektedir. G, H ve S sistemin değişkenidirler.

Fiziksel ve kimyasal süreçlerde maddenin sahip olduğu serbest enerji değil, bu enerjideki değişim miktarı kullanılmaktadır. Çünkü maddenin sahip olduğu serbest enerji (Gibbs serbest enerjisi) nadiren bilinebilmektedir. Dolayısıyla formül aşağıdaki şekilde yazılmalıdır.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.4)$$

Gibbs serbest enerjisindeki değişim ( $\Delta G$ ), sistemin giriş ve çıkışlarının serbest enerjilerindeki değişimin farkına eşittir.

$$\Delta G = \Delta G_{\text{ürünler}} - \Delta G_{\text{reaktantlar}} \quad (1.5)$$

Bu serbest enerjideki değişimleri her bir mol başına yazmak için " - " simgesi kullanılır. Örneğin  $\bar{g}_{\text{H}_2}$  hidrojen için Gibbs enerji değişimini gösterir.

PEM yakıt pili için temel tepkime şu şekildedir:



1 mol hidrojen ve yarım mol oksijene karşılık 1 mol su oluşmaktadır. Gibbs serbest enerjisi;

$$\Delta \bar{g} = \Delta \bar{g}_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \bar{g}_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} \Delta \bar{g}_{\text{O}_2} \quad (1.7)$$

Gibbs serbest enerji değişimi sıcaklıkla ve sıvı/gaz formuna göre değişmektedir. Aşağıda Tablo 1.2 ' de PEM yakıt pili temel tepkimesinin Gibbs serbest enerji değerleri verilmektedir.

Tablo 1.2 PEM yakıt pili temel tepkimesi (Denklem 1.6) için Gibbs enerji değişimi [23]

Üretilen Su Formu	Sıcaklık (°C)	$\Delta \bar{g}$ (kJ/mol)
Sıvı	25	-237.2
Sıvı	80	-228.2
Gaz	80	-226.1
Gaz	100	-225.2
Gaz	200	-220.4
Gaz	400	-210.3
Gaz	600	-199.6
Gaz	800	-188.6
Gaz	1000	-177.4

Tablodaki Gibbs serbest enerjideki değişim değerlerinin negatif olması sistemde enerjinin açığa çıktığını göstermektedir. Eğer sistemde herhangi bir kayıp olmasaydı bu enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülebilirdi. Pratikte bir kısım enerji ısı olarak sistemden atıldığından bu mümkün görünmemektedir.

Denklem 1.1' de de görüldüğü gibi PEM yakıt pilinde, 1 mol hidrojen için dış devreden  $2 N_a$  sayıda elektron geçmektedir. Bir elektronun yük değeri ise  $1.602 \times 10^{-19}$  C dur.  $N_a$  sayıdaki elektronun (1mol elektron) toplam yük değeri ise  $(N_a \times e^-)$  96485 C olmaktadır. Bu değere Faraday sabiti denmektedir ve F ile gösterilir. PEM yakıt pilinde 2 mol elektron olduğu için;

$$- 2N_a \times e^- = - 2 F \text{ ' dir.}$$

Devre etrafında hareket eden elektronların yaptığı elektriksel iş ise;

$$\text{Elektriksel İş} = Q(\text{Yük}) \times E(\text{Gerilim}) = -2F \times E \left( C \times \frac{1}{C} \right) \text{Joule dür.}$$

Sistemde hiç kayıp yoksa bu elektriksel iş Gibbs serbest enerjisindeki değişime eşit olur.

$$\Delta \bar{g} = -2FxE \quad (1.8)$$

Burada E yakıt pilinin Nernst gerilimidir. Nernst gerilimi (NG) sistemde kayıp olmadığı düşünülerek hesaplanan gerilim değeridir. Bu aynı zamanda yakıt pilinin elektromotor kuvvetini (EMK) ifade eder. NG veya EMK ;

$$E = - \frac{\Delta \bar{g}}{2F} \quad (1.9)$$

Örneğin Tablo 1.2 'den  $400^\circ\text{C}$  de çalışan yakıt pilinin NG;

$$E = - \frac{\Delta \bar{g}}{2F} = - \frac{-210.300}{2 \times 96.845} \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol}} \frac{\text{mol}}{\text{C}} \right] = 1.085 \text{ V}$$

Yakıt pillerinde her bir mol için devreden geçen elektron sayısına göre Denklem 1.9 düzenlenebilir. Devreden 3 mol elektron geçmesi durumunda Denklem 1.9' da ki 2F yerine 3F yazılır.

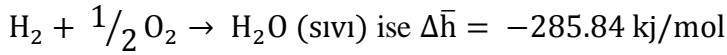
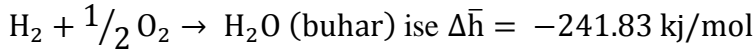
PEM yakıt pilinin verimi üretilen elektrik enerjisinin sistemin enerji değişimine oranı ile bulunur. Maksimum verim limiti sistemde hiç enerji kaybının olmadığı düşünülerek

hesaplanmaktadır. Maksimum enerji, sistemin entalpi değişim farkına eşittir. Sistemin entalpi değişimi, Gibbs serbest enerji değişimi ile entropisinin toplamına eşittir. (Pratikte işe çevrilemeyen tersinmez bir kayıp vardır. Bu kayıp  $T \times \Delta S$  ' dir.)

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1.10)$$

$$\text{Maksimum verim limiti} = \frac{\text{her bir mol yakıt için üretilen elektrik enerjisi}}{-\Delta \bar{h}}$$

$\Delta \bar{h}$  için iki farklı değer kullanılmaktadır. Bunun nedeni tepkime sonrası üretilen suyun formundan kaynaklanmaktadır. Üretilen su gaz veya sıvı formunda olabilir.



Bu değerlerin farklı olmasının sebebi hal değişimi sırasındaki gizli ısıdır. Buhar formundaki değer için üst ısıl değer (ÜİD), sıvı formundaki değer için alt ısıl değer (AİD) terimleri kullanılır. Maksimum verim limiti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{Maksimum verim limiti} = \frac{\Delta \bar{g}}{\Delta \bar{h}} \times \%100 \quad (1.11)$$

Tablo 1.3' de ÜİD değere göre hesaplanmış verim limiti, Nernst gerilimi (veya EMK) değerlerini göstermektedir.

Tablo 1.3 PEM yakıt pili için,  $\Delta \bar{g}$ , maksimum EMK, ÜİD' e göre verim limiti [23]

Üretilen Su Formu	Sıcaklık (°C)	$\Delta \bar{g}$ (kJ/mol)	Max EMK (V)	Verim limiti %
Sıvı	25	-237.2	1.23	83
Sıvı	80	-228.2	1.18	80
Gaz	100	-225.2	1.17	79
Gaz	200	-220.4	1.14	77
Gaz	400	-210.3	1.09	74
Gaz	600	-199.6	1.04	70
Gaz	800	-188.6	0.98	66
Gaz	1000	-177.4	0.92	62

PEM yakıt pilinin verimi yazılırsa [23];

$$\eta = \mu_f \frac{V_c}{1.25} \%100 \quad (1.12)$$

$\mu_f$  : Tepkimeye giren yakıtın, toplam yakıt miktarına oranıdır. 1 kabul edilmiştir.

$V_c$  : Yakıt pilinin gerilimidir.

1.25 değeri alt ısıtılarda maksimum gerilim değeridir.

$$E = -\frac{\Delta \bar{h}}{2F} = -\frac{-241830}{2 \times 96845} \left[ \frac{\text{J mol}}{\text{mol C}} \right] = 1.25 \text{ V}$$

Basınç ve reaktantların konsantrasyonu, Gibbs enerjisindeki değişimi, dolayısıyla yakıt pilinin çıkış voltajını etkiler. Örneğin ürünler ve reaktantların basıncı standart basınç (1 atm) verilirse ve çıkan su gaz formunda ise yakıt pilinin açık devre (ADG) gerilimi aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.13)$$

$E^0$  : Standart basınçtaki Nernst gerilimi (V)

R : Gaz sabiti (J/mol K)

T : Sıcaklık (K)

F : Faraday sabiti (C)

$P_{H_2}$  : Hidrojenin kısmi basıncı (atm)

$P_{O_2}$  : Oksijenin kısmi basıncı (atm)

$P_{H_2O}$  : Su buharının kısmi basıncı (atm)

Denklem 1.13 'ü sabitlerinden arındırıp daha nümerik halde yazabiliriz.

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T - T_0) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln \left( P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}} \right) \quad (1.14)$$

Yukarıdaki denklemde,

$E^0$  : 25°C 'de 1.229 (V)

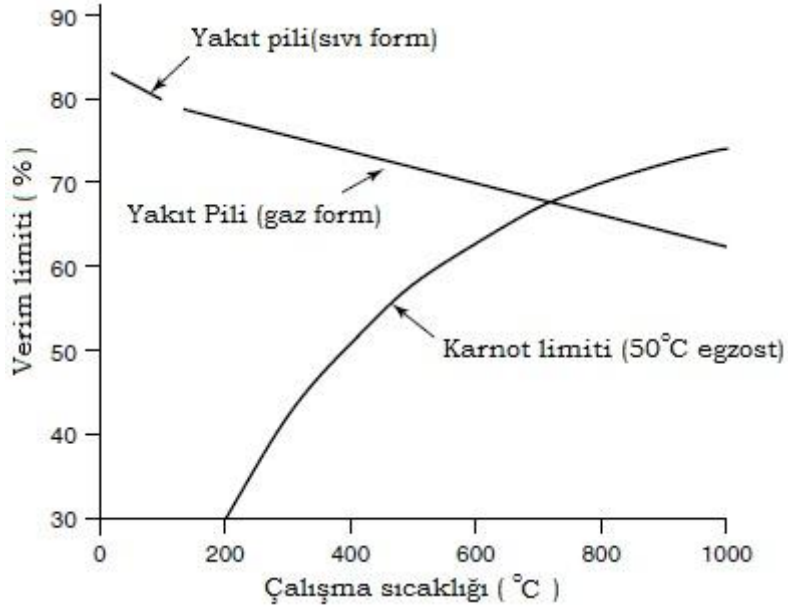
R : 8.314 (J/mol K)

$T_0$  : Çevre sıcaklığı (298 K)

F : 96845 C/mol

alınmıştır.

Aşağıda Şekil 1.5' de yakıt pili veriminin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.

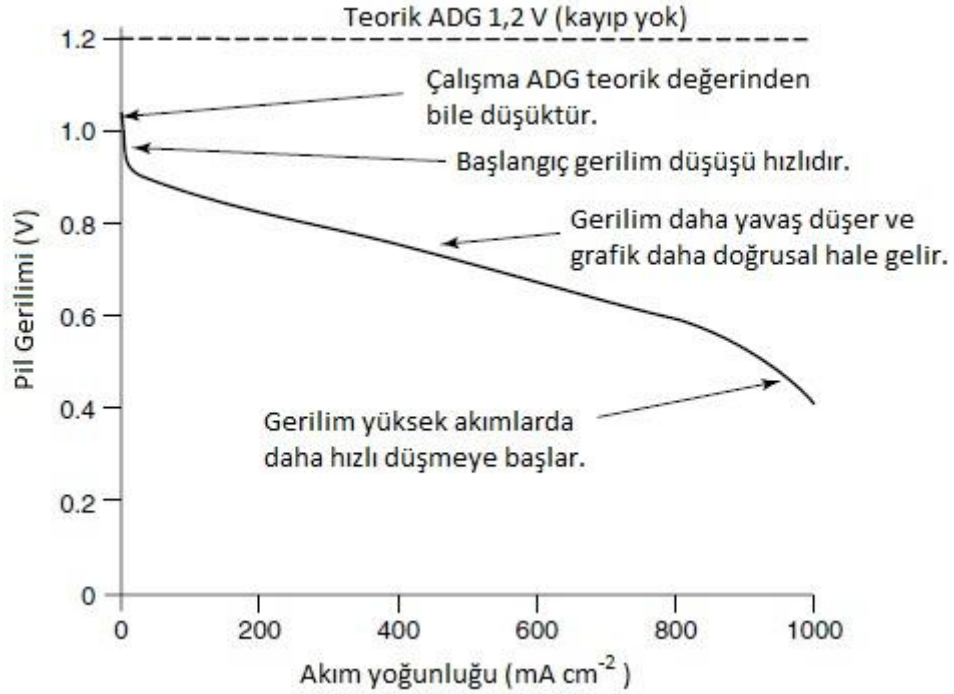


Şekil 1.5 ÜİD' e göre 1 atm basınçta maksimum PEM yakıt pili verimi ve 50°C egzost sıcaklığına göre maksimum Carnot verimi [23]

Yukarıdaki grafik bize verimin sıcaklıkla nasıl değiştiğini ve Carnot verimi ( $1 - T_{\text{çıkış}}/T_{\text{giriş}}$ ) ile karşılaştırmasını göstermektedir. Burada birkaç önemli husus vardır;

- Yüksek sıcaklıkta atılan atık ısı, düşük sıcaklıkta atılan ısıdan daha faydalıdır. (yüksek sıcaklıktaki atık ısıdan faydalanmak daha kolay ve kullanışlıdır)
- Yakıt pilini savunanların yaptıkları açıklamaların aksine, yakıt pilleri her zaman ısı makinalarının verimlerinden daha yüksek verime sahip değildir.

Aşağıda Şekil 1.6 'da düşük sıcaklıkta; Şekil 1.7 'de yüksek sıcaklıkta çalışan tipik bir yakıt pilinin geriliminin, sıcaklık ve akımla nasıl değiştiği gösterilmektedir [23].



Şekil 1.6 Düşük sıcaklıkta çalışan tipik bir yakıt pilinin gerilim-akım yoğunluğu grafiği



Şekil 1.7 Yüksek sıcaklıkta (800°C) çalışan bir yakıt pilinin gerilim grafiği [23]

Her iki şekilden de görüleceği gibi başlangıçta gerilimde bir düşüş vardır. Yüksek sıcaklıkta çalışan pillerde bu düşüş çok azdır. Başlangıç gerilim düşüşünden sonra grafik akım yoğunluğunun artmasıyla doğrusal bir şekilde azalır. Son olarak yüksek akımlarda gerilim düşüşü daha hızlı olur.

Gerilimdeki düşüşlerin birkaç nedeni vardır. Bunlardan biri elektrod yüzeyindeki tepkimelerin yavaşlığıdır. Üretilen gerilimin bir kısmı, elektronların bir elektrodan diğerine transferini sağlayan kimyasal tepkime sırasında kaybolur. Kaybolan bu gerilim kaybına " aktivasyon kayıpları" denmektedir. Bu kayıp doğrusal değildir.

Gerilimdeki düşüşün bir nedeni ise atık yakıtın elektrolitten geçmesidir. Aynı zamanda azda olsa elektrolitten elektronların geçmesidir. Elektrolit sadece hidrojen iyonlarını geçirir fakat bu geçiş azda olsa ihtimal dahilindedir. Bu yakıt geçişi ve iç kayıplar doğrudan metanollü yakıt pilleri haricinde çok önemsizdir.

Bir diğer gerilim düşüşü omik (direnç) kayıplardır. Omik kayıpların birkaç sebebi vardır. Bunlardan biri elektrodlar ile diğer bağlantıların üzerinden akan elektronların geçişine gösterilen dirençtir. Omik kayıpların bir başka sebebi de membrandan geçen hidrojen iyonlarının geçişine gösterilen dirençtir. Omik kayıplar nedeniyle oluşan gerilim düşüşü akım yoğunluğuyla orantılıdır ve doğrusaldır.

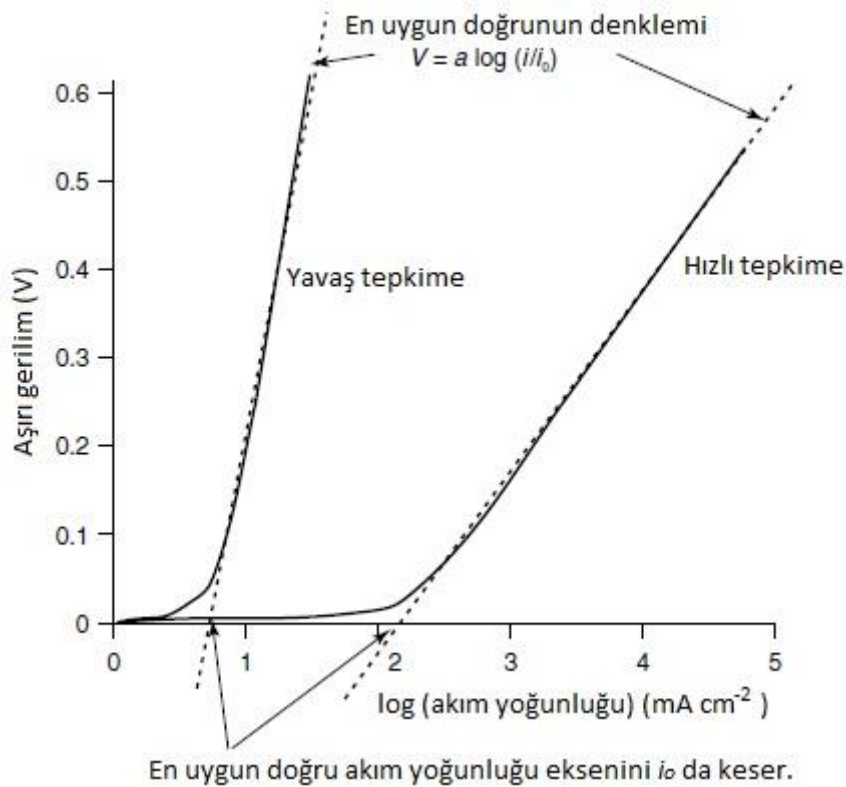
Son olarak kütle kayıpları veya konsantrasyon kayıpları denen bir kayıp vardır. Bu kaybın nedeni, kullanılan yakıt gibi, elektrod yüzeyindeki reaktantların konsantrasyonlarındaki değişimlerdir. Bu kayba bazen "konsantrasyon kaybı" denilmektedir. Çünkü konsantrasyondaki değişim, elektrod yüzeyine yeterli reaktantın taşınmamasına neden olur. Bu tip bir kayıp bazen de " kütle transfer kaybı " olarak adlandırılır. Bu kaybın üçüncü bir ismi de "Nernstian" dır. Bunun nedeni konsantrasyonun etkilerinin Nernst denklemiyle modellenmesidir.

Bu düşüşlerden dolayı yakıt pili gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_c = E - \Delta V_{\text{aktivasyon}} - \Delta V_{\text{omik}} - \Delta V_{\text{konsantrasyon}} \quad (1.15)$$

Burada  $\lambda_a$  ve  $\lambda_k$  sırasıyla anot ve katotun şarj transfer katsayısıdır.  $i = I/A_{yp}$  olup akım yoğunluğunu gösterirken,  $A_{yp}$  yakıt pilindeki polar tabakanın yüzey alanını göstermektedir ve  $i_o = 1.08 \times 10^{-21} \exp(0.086 \times T)$ ' dir. Burada önemli olan değiştirilebilir akım yoğunluğu olan  $i_o$ ' ı artırmaktır. Çünkü  $i_o$  artınca aktivasyon kaybı azalacaktır.

Yavaş tepkimelerde elektrod yüzeyinde aşırı gerilim oluşur. Bu aşırı gerilim ideal gerilime karşı koyarak gerilimi azaltır. Bu durum "Tafel Denklemi" ile açıklanır (Denklem 1.16). Aşağıda Şekil 1.8' de Tafel diyagramı gösterilmiştir [23].



Şekil 1.8 Yavaş ve hızlı tepkimeler için Tafel Diyagramı

Hızlı tepkimelerde  $i_o$  büyüktür.  $i_o$  aşırı gerilimin sıfırdan harekete başladığı noktadaki akım yoğunluğu olarak düşünülebilir. Burada önemli olan Tafel denklemi  $i > i_o$  olduğunda geçerlidir.

Akım yoğunluğu  $i_o$  oksijen elektrodunda (katotta) hidrojen elektrodundan (anottan) yaklaşık  $10^5$  kat daha küçüktür. Bu yüzden genelde hidrojen elektrodunda ki bu değer ihmal edilebilir.(en azından hidrojen yakıt pillerinde)

Aktivasyon aşırı gerilimini azaltmak için  $i_0$  akım yoğunluğunu artırmamız gerekmektedir. Bu birkaç şekilde yapılabilir;

- Bunlardan biri pil sıcaklığını artırmaktır. Örneğin Şekil 1.6 ve Şekil 1.7 'de düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerine ait voltaj/akım yoğunluğunu göz önüne alalım. Düşük sıcaklık yakıt pilinin katotunda  $i_0$  0,1 mA/cm<sup>2</sup> iken 800°C de çalışan yakıt pili için bu değer 10 mA/cm<sup>2</sup> olmaktadır. Bu 100 kat artış demektir.
- Diğer bir yol ise daha etkili bir katalizör kullanmaktır. Elektrod olarak farklı metaller kullanmak  $i_0$  akım yoğunluğunu değiştirmek demektir. Aşağıda Tablo 1.4' de bazı metallerin  $i_0$  değerleri verilmektedir.

Tablo 1.4 Asit elektrolit için değişik metallerin hidrojen elektrodunun  $i_0$  değerleri

<b>Metal</b>	<b><math>i_0</math> (A/cm<sup>2</sup>)</b>
Pb	$2,5 \times 10^{-13}$
Zn	$3 \times 10^{-11}$
Ag	$4 \times 10^{-7}$
Ni	$6 \times 10^{-6}$
Pt	$5 \times 10^{-4}$
Pd	$4 \times 10^{-3}$

- Bir başka yöntem elektrotların pürüzlülüğünün artırılmasıdır. Bu nominal gerçek alanı artırır buda  $i_0$  ' ı artırmak demektir.
- Başka bir yöntemde reaktantların konsantrasyonlarının artırılmasıdır. Örneğin hava yerine saf oksijen kullanılabilir. Bu sayede katalizör alanları reaktantlar tarafından daha etkin doldurulabilir. Bu işlem aynı zamanda Nernst gerilimini de artırır.
- Son olarak basıncı artırmak  $i_0$  akım yoğunluğunu artırır. Bu da katalizör alan doluluğunu artırır. Ayrıca Nernst gerilimini de artırmış olur.

Omik kayıplarını azaltmanın üç yolu vardır. Bunlar;

- Daha yüksek iletkenliğe sahip elektrot kullanmak,
- Bipolar tabaka veya pil bağlantılarına uygun malzeme kullanıp iyi bir tasarım yapmak,
- Mümkün olduğu kadar ince elektrolit kullanmaktır. Bu uygulamada zordur. Çünkü elektrolitler, elektrodları destekleyecek kalınlıkta olmalıdır. Ayrıca elektrodlar arasındaki muhtemel kısa devreleri önlemek için yeteri kalınlıkta olmalıdır.

Tablo 1.5 PEM Yakıt pilindeki bazı parametrelerin değerleri [17]

Parametre	Değer
Membran nemliliği $\lambda_{\text{membran}}$	6.013
Membran kalınlığı $t_{\text{membran}}$ (cm)	0.018
Çalışma sıcaklığı T (K)	373
Çevre sıcaklığı $T_0$ (K)	298
Anot şarj transfer katsayısı $\lambda_A$	1
Katot şarj transfer katsayısı $\lambda_C$	1
Konsantrasyon aşırı gerilim sabiti $\beta_2$	2

Tablo 1.6 PEM Yakıt pilindeki sıcaklığa bağlı bazı parametrelerin değerleri [17]

T (°C)	$\Delta \bar{h}$ (kJ/mol)	$P_{\text{H}_2}$ (atm)	$P_{\text{O}_2}$ (atm)	$\beta_1$
80	-284.3	2.530	0.4464	0.3236
90	-284.0	2.305	0.4068	0.3298
100	-283.7	1.995	0.3525	0.3374

Tüm kayıplar dikkate alınarak PEM yakıt pilinin gerilimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_c = E - \left( \frac{\lambda_a + \lambda_k}{\lambda_a \cdot \lambda_k} \right) \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) - ir - i \left( \beta_1 \frac{i}{i_m} \right)^{\beta_2} \quad (1.16)$$

Bu çalışmada  $V_c$  yakıt pili gerilimi, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne ait Alternatif Enerji Kaynakları Laboratuvarındaki PEM yakıt pilinin çalışma gerilimi olan 0,6 V alınmıştır.

### 1.5 PEM Yakıt Pilinin Giriş ve Çıkış Parametrelerinin Hesaplanması

Bölüm 1.4' de yakıt pilinin ürettiği gerilimden bahsedilmiştir. Bu bölümde ise Şekil 1.4' de gösterilen serbest enerji diyagramındaki diğer ürünlerden bahsedilecektir. Girişte oksijen ve hidrojen, çıkışta ise üretilen ısı ve su için hesaplamalar yapılmıştır.

Denklem 1.2' de gösterildiği gibi yarım mol oksijene karşılık iki mol elektron kullanılmaktadır. Bir mol oksijen için bu değer dört mol elektron olmaktadır. Oksijen kullanımı yazılırsa;

$$m_{\text{O}_2} = \frac{\text{Yük}}{4F}$$

Burada  $m_{O_2}$  oksijen miktarıdır. Birimi mol' dür. Birim zamana bağlı olarak düzenlenirse;

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{\text{Yük}}{4F} \frac{1}{\text{saniye}} = \frac{I}{4F}$$

Burada  $\dot{m}_{O_2}$  zamana bağlı oksijen miktarıdır. Birimi mol/s' dir. Bu değer n adet hücreye sahip yakıt pili için n ile çarpılmalıdır.

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{I n}{4F} \quad (1.17)$$

Burada, I tek bir hücrenin akım değeri, F ise Faraday sabitidir. Formül hücre sayısından bağımsız yazılmak istenirse, akım yerine güç terimi kullanılabilir.

$$\text{Güç, } P_e = V_c \times I \times n$$

$$\text{Akım, } I = \frac{P_e}{V_c \times n} \quad (1.18)$$

Bu akım değerini Denklem 1.17' de yerine koyulursa;

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{P_e}{4F \times V_c} \quad (1.19)$$

Bir mol oksijen 32 gram olduğundan, mol yerine kg olarak yazıldığında;

$$\dot{M}_{O_2} = \frac{32 \times 10^{-3} P_e}{4F \times V_c}$$

Faraday sabitini de yerine yazıldığında;

$$\dot{M}_{O_2} = 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.20)$$

Denklem 1.19, gücü verilen bir PEM yakıt pilinde, kullanılan oksijen miktarını hesaplamak için kullanılabilir.  $V_c$  verilmemiş ise verimden hesaplanabilir. O da verilmemişse iyi bir yaklaşımla 0.65 V alınabilir.

PEM yakıt pilinde saf oksijen yerine hava kullanıldığından Denklem 1.20' inin havaya göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bir mol havanın ağırlığı 28.97 gram ve bir mol havada %21 oksijen olduğu için;

$$\dot{M}_{\text{hava}} = \frac{28.97 \times 10^{-3} P_e}{0.21 \times 4F \times V_c}$$

$$\dot{M}_{\text{hava}} = 3.57 \times 10^{-7} \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.21)$$

Bununla birlikte, hava bu oranda kullanılırsa, pil çıkışında hava tamamen oksijensiz (yani oksijen tamamen kullanılmış olacaktır) kalacaktır. Uygulamada hava akışı, stokiyometrisinin yaklaşık iki katı üzerindedir. Eğer havanın stokiyometrisi  $\lambda$  ise, havanın kullanım miktarı;

$$\dot{M}_{\text{hava}} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.22)$$

Yukarıdaki denklemde kg/s birimi genelde birim zamandaki kütle akışı için kullanılır. Hava için genelde birim zamandaki hacim değeri kullanılır. Denklemdeki kg/s değeri aşağıdaki değerlerle çarpılarak hacme çevrilebilir.

- $\text{m}^3/\text{h}$  ' e çevirmek için 3050 ile,
- $\text{ft}^3/\text{dk}$  ' ya ya da SCFM ' ye çevirmek için 1795 ile,
- slm yani standart L/dk ' ya çevirmek için  $5.1 \times 10^4$  ile,
- sls yani standart L/sn ' ye çevirmek için 847 ile çarpmak gerekir.

Bazen, Denklem 1.22' de verilen giriş hava oranı ile çıkış hava oranı arasında ayırım yapmak, özellikle PEM yakıt pillerinde nem oranını hesaplamada önemli olmaktadır. Çıkış ile giriş arasındaki farka oksijen kullanımı neden olur. Çıkış havasında su buharı daha fazla olacaktır ama bu aşamada "kuru hava" olarak düşünülmüştür.

Çıkış hava miktarı = Giriş hava miktarı - oksijen miktarı

$$\dot{M}_{\text{hava çıkış}} = (3.57 \times 10^{-7} \times \lambda - 8.29 \times 10^{-8}) \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.23)$$

Kullanılan hidrojen miktarı, oksijen miktarına benzer olarak bulunabilir. Tek fark bir mol hidrojen için 2 mol elektron kullanılmasıdır.

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{I n}{2F} \quad (1.24)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{P_e}{2F \times V_c} \quad (1.25)$$

Burada  $\dot{m}_{H_2}$  hidrojen miktarıdır ve birimi mol/s' dir. Bir mol hidrojen 2.02 gram olduğundan, mol yerine kg olarak yazıldığında;

$$\dot{M}_{H_2} = \frac{2.02 \times 10^{-3} P_e}{2F \times V_c}$$

$$\dot{M}_{H_2} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.26)$$

Burada  $\dot{M}_{H_2}$  'nin birimi kg/s' dir. Bu formül PEM yakıt pilleri için geçerlidir. Örneğin hidrojen-karbonmonoksit karışımli yakıt pillerinde, karbonmonoksit miktarına bağıli olarak bu formül değişecektir. Kg/s değeri normal sıcaklık basınca 0.084 kg/m<sup>3</sup> hidrojen yoğunluğu kullanılarak, hacim değerine donüşturebilir.

PEM yakıt pilinde üretilen su miktarı da kullanılan oksijen ve hidrojen miktarına benzer olarak hesaplanabilir. Hidrojende olduğu gibi bir mol su için iki mol elektron kullanılır.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{P_e}{2F \times V_c} \quad (1.27)$$

Bir mol su 18.02 gram olduğundan, mol yerine kg olarak yazıldığında;

$$\dot{M}_{H_2O} = \frac{18.02 \times 10^{-3} P_e}{2F \times V_c}$$

$$\dot{M}_{H_2O} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \quad (1.28)$$

Burada  $\dot{M}_{H_2O}$  üretilen su miktarıdır ve birimi kg/s' dir. Örneğin, 1 kW kapasiteli bir yakıt pili 0.7 V gerilim üretir ve bir saat çalışır, üretilen su miktarı;

$$\dot{M}_{H_2O} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{1000}{0,7} = 1.33 \times 10^{-4} \text{ (kg/s)}$$

Yakıt pili bir saat çalışır,

$$M_{H_2O} = 1.33 \times 10^{-4} \times 60 \times 60 = 0.48 \text{ (kg)}$$

Yani 1 kW kapasiteli yakıt pili, bir saat içinde yaklaşık 0.5 kg su üretecektir.

Son olarak, üretilen ısı miktarı hesaplanmıştır. Bölüm 1.4' de anlatıldığı üzere, PEM yakıt pilinde ki, entalpinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülürse, çıkış voltajı 1.25 V olacaktır. Çalışma gerilimi ile bu gerilim arasındaki fark elektriğe dönüştürülemediğinden ısı olarak atılmaktadır. Denklem 1.29 ve Denklem 1.30 yakıt pilinin ürettiği ısı enerjisini göstermektedir.

n sayıdaki hücreye sahip ve I akımında çalışan yakıt pilinin ürettiği ısı;

$$Q_{\dot{u}} = n I (1.25 - V_c) \quad (1.29)$$

Burada;

$Q_{\dot{u}}$  : üretilen ısı miktarıdır (W)

Üretilen ısı miktarı, elektriksel güç bakımından yazılacak olursa;

$$Q_{\dot{u}} = P_e \left( \frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (1.30)$$

Üretilen ısının yakıt pilinden uzaklaştırılması ve pilin soğutulması gerekmektedir. Çünkü yüksek sıcaklık yakıt pilinin verimini azalmaktadır.

50°C' de çalışan ve ortalama 0.6 V pil gerilimine sahip tipik bir yakıt pilini ele alınıp, soğutma havasının 20°C' de pile girdiği ve 50°C' de çıktığı varsayılır ve ayrıca üretilen ısının %40 kadarının soğutma havasıyla uzaklaştırıldığı düşünülürse,

$$0.4 \times P_e \left( \frac{1.25}{V_c} - 1 \right) = \dot{m}_{\text{soğutma}} \times C_p \times \Delta T \quad (1.31)$$

Burada,

$C_p$  : havanın özgül ısı katsayısı (1004 j/kgK)

$\Delta T$  : sıcaklık farkı (30 K)

$V_c$  : pil gerilimi (0.6 V) alındığında, soğutma hava miktarı;

$$\dot{m}_{\text{soğutma}} = 1.4 \times 10^{-5} \times P_e \quad (1.32)$$

olarak hesaplanabilir.

Burada,

$\dot{m}_{\text{sogutma}}$ : soğutma için gerekli hava miktarıdır (kg /s).

## 2. BÖLÜM

### TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER

#### 2.1 Genel Bilgiler

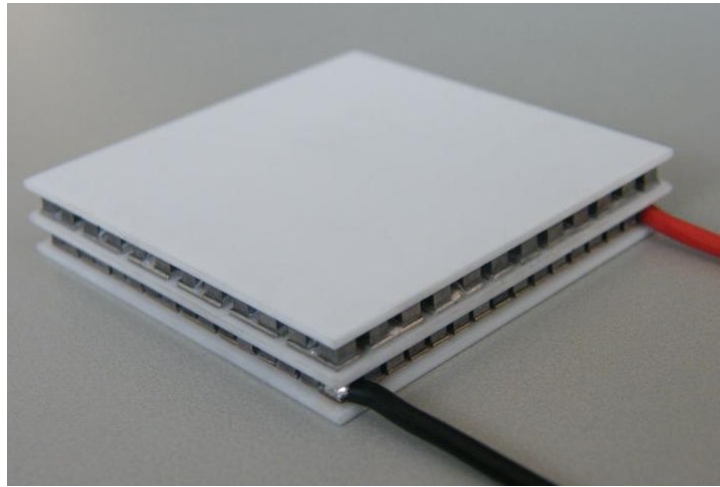
Termoelektrik jeneratörler elektrik enerjisi üreten makinalardır. Termoelektrik jeneratörler ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretebildiği gibi, elektrik enerjisinden de ısı enerjisi üretebilmektedir. Genel olarak soğutma sektöründe ve elektrik üretmek amaçlı kullanılırlar.

Termoelektrik jeneratörler, soğutma sektöründe, ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbon gaz salınımı yapmadığı ve mekanik parçaya sahip olmadığı için tercih edilebilmektedir.

Termoelektrik jeneratörlerin genel olarak verimleri düşük olmasına rağmen, ısı makinalarının kullanmadığı düşük sıcaklıktaki ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürdükleri, sessiz çalışmaları ve düşük maliyetli oldukları için elektrik üretme amaçlı kullanılabilirler.

Bölüm 2' de, termoelektrik jeneratörün ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretme konusu anlatılmıştır.

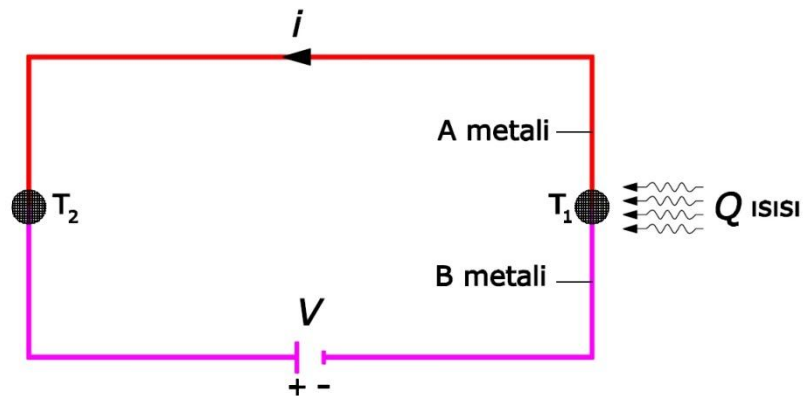
Aşağıdaki Şekil 2.1' de bir termoelektrik jeneratör gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Termoelektrik jeneratör

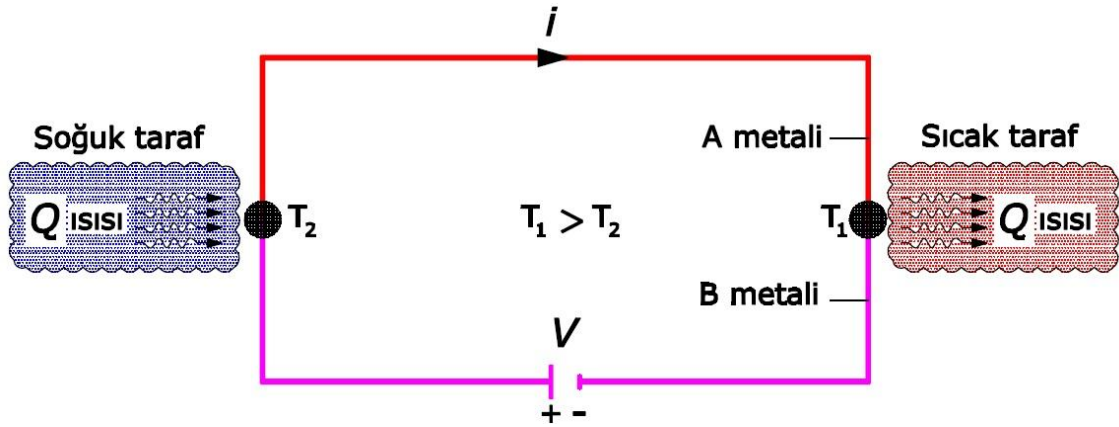
## 2.2 Termoelektrik Jeneratörün Temel Çalışma Prensibi

1821 yılında Alman fizikçi Thomas Seebeck, farklı metallere oluşan iki teli birleştirerek kapalı bir devre oluşturmuş ve yaptığı deneylerde metallere birleşim noktalarını ısıtarak devreden küçük bir akım geçtiğini saptamıştır. Aşağıda Şekil 2.2’de farklı iki metalin oluşturduğu gerilim gösterilmiştir.



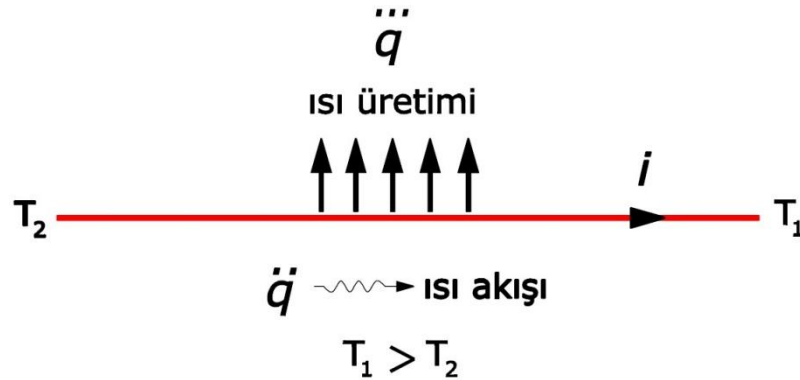
Şekil 2.2 Farklı iki metalin oluşturduğu gerilim

1834 yılında ise Fransız fizikçi Jean Charles Athanese Peltier yaptığı deneylerde termoelektrik sisteme dışarıdan potansiyel farkı uygulayarak soğutma etkisini keşfetmiştir. Şekil 2.3’de farklı iki metalin oluşturduğu devrede soğutma etkisi gösterilmiştir.



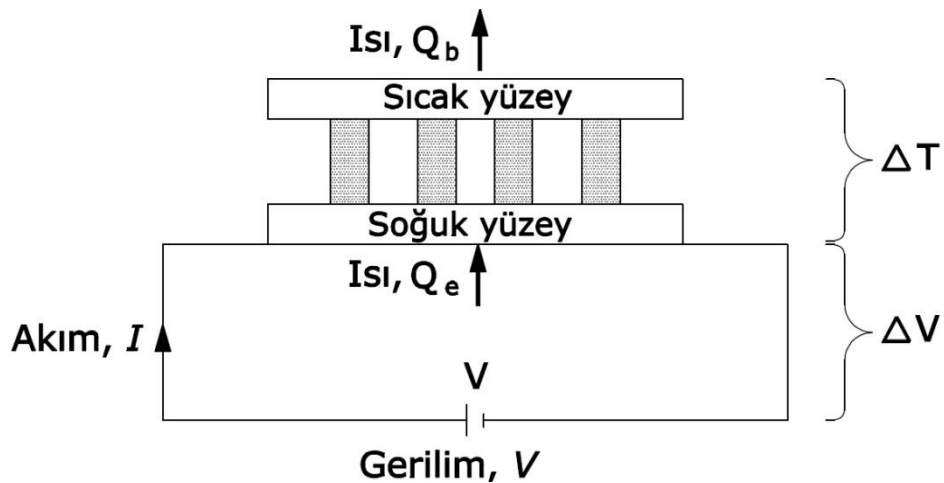
Şekil 2.3 Farklı iki metalin oluşturduğu devrede soğutma etkisi

1851 yılında ise William Thomson (Lord Kelvin) Seebeck ve Peltier 'in etkilerini birleştirmiştir. Yaptığı deneylerde, uçları arasında sıcaklık farkı bulunan devreden akım geçtiğinde iletkenin bir bölümünde ısı üretimi gerçekleştiğini saptamıştır. Bu durum Şekil 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 İletken üzerinde akım ve ısı akışında oluşan ısı üretimi

Temel çalışma prensibini 1800'lü yıllardan alan termoelektrik jeneratörler, teknolojinin özellikle yarı iletken malzemelerin gelişimiyle birlikte günümüzde Şekil 2.5 'deki gibi tasarlanmaktadır. İki seramik yüzey arasında p ve n tipi yarı iletken malzemelerden oluşan termoelektrik jeneratörler, sıcaklık farkı veya gerilim farkıyla çalışırlar. Yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşursa gerilim üreterek pil vazifesi görürler. Uçları arasında gerilim farkı oluşursa ısı pompası gibi çalışarak ısıyı bir yüzeyden diğer yüzeye transfer ederler. Böylece bir yüzey soğuk diğer yüzey sıcak olur. Şekil 2.5' de termoelektrik jeneratörün çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Termoelektrik jeneratör çalışma prensibi

### 2.3 Termoelektrik Jeneratörün Yapısı ve Karakteristiği

Termoelektrik jeneratörlerin ana malzemesi p ve n tipi yarı iletkenlerdir.

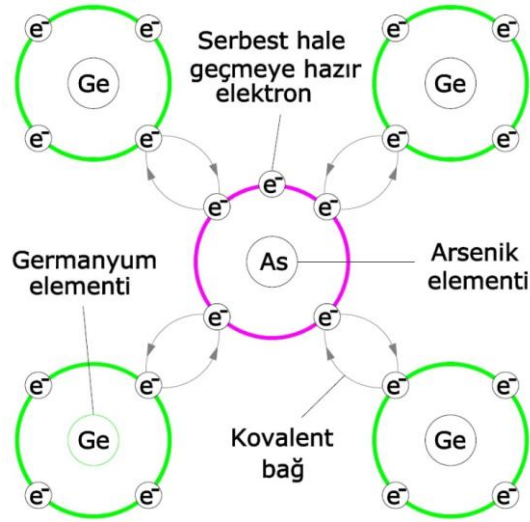
Yarı iletken malzeme olarak genellikle silisyum ve germanyum elementleri kullanılır. Silisyum ve germanyumun son yörüngesinde dört elektron bulunmaktadır. Kararlı elementlerin son yörüngesinde sekiz elektron olduğundan elektron alıp vermeye eğimli değildirler.

Silisyum veya germanyum saflaştırılıp monokristal yapıya kavuşturulduktan sonra içine son yörüngesinde beş elektron bulunan arsenik, fosfor veya antimüvan gibi elementler katılır. Silisyum veya germanyumun son yörüngesinde dört elektron olduğundan, beş elektron ile kovalent bağ oluşturarak, bir elektron diğerlerine göre daha az kararlı hale gelir. Bu elektron dışarıdan az bir enerji verildiğinde serbest hale gelmeye müsait haldedir. Bu malzemeye N tipi yarı iletken malzeme denilir.

Arsenik, fosfor veya antimüvan gibi verici elementler bir elektronlarını kaybettiklerinden pozitif yüklü iyon halindedirler. Ancak kovalent bağlı olduğundan elektriksel bir etkisi bulunmamaktadır.

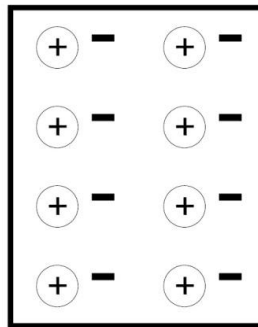
Isı, ışık veya gerilim nedeniyle kopup serbest hale gelen elektronlar, akım taşıma görevi gördüklerinden çoğunluk taşıyıcısı olarak adlandırılırlar. Ayrıca arsenik gibi, silisyum veya germanyum elementlerinin çok az bir bölümü de ısı, ışık veya gerilim nedeniyle kovalent bağlarını koparıp pozitif yüklü hale gelirler. Bunlarda akım taşıma vazifesi

yapabilirler ama sayıca az olduklarından azınlık taşıyıcısı olarak adlandırılırlar. Şekil 2.6’ da germanyuma katılan arseniğin kristal yapısı gösterilmiştir. Şekil 2.7’ de ise N tipi yarı iletkenin gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Germanyuma katılan arseniğin (As) kristal yapıda gösterilişi

## N Tipi Yarı iletken



— akım taşıyıcı serbest elektronlar

⊕ etkisiz pozitif yüklü iyonlar

Şekil 2.7 N tipi yarı iletkenin gösterilişi

N tipi yarı iletken terimindeki “ N ” harfi “ negatif ” kelimesini ifade etmektedir. Kristal yapı içerisindeki negatifli yüklü serbest elektronları sembolize ederler.

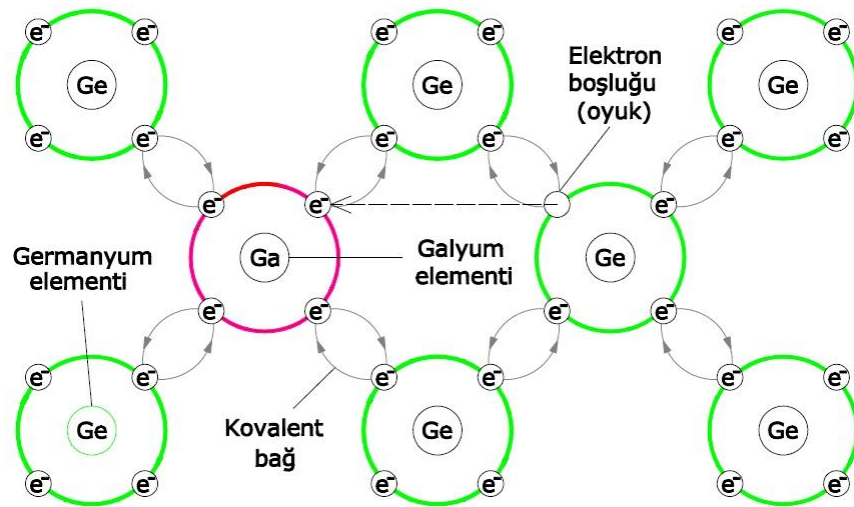
Silisyum veya germanyuma son yörüngesinde üç elektron bulunan alüminyum, galyum veya indiyum gibi elementler katılırsa, silisyum veya germanyum elementlerinden bir

elektron katkı elementlerine geçerler. Böylece katkı elementleri yörüngelerindeki üç elektronu dörde tamamlarlar.

Alüminyum, galyum veya indiyum gibi alıcı elementler bir elektron aldıklarından negatif yüklü iyon haline gelirler. Ancak kovalent bağlı olduğundan elektriksel bir etkisi bulunmamaktadır.

Bir elektronunu kaybeden silisyum veya germanyum elementlerinde bir elektron boşluğu oluşur. Bu boşluk delik veya oyuk olarak isimlendirilir. Aslında gerçek tabir “pozitif elektrik yükü” olmalıdır. Pozitif elektrik yükleri akım taşıma görevi gördüklerinden çoğunluk taşıyıcısı olarak adlandırılırlar. Ayrıca az sayıda da olsa serbest elektronlar vardır. Bunlarda akım taşıma vazifesi yapabilirler ama sayıca az olduklarından azınlık taşıyıcısı olarak adlandırılırlar.

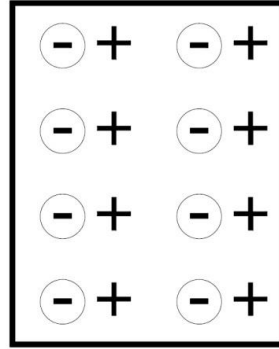
Şekil 2.8’ de germanyuma katılan galyumun kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Germanyuma katılan galyumun (Ga) kristal yapıda gösterilişi

Şekil 2.9’ da ise P tipi yarı iletken gösterilmiştir. P tipi yarı iletken terimindeki “ P ” harfi “ pozitif ” kelimesini ifade etmektedir. Kristal yapı içerisindeki pozitif yüklü elektrik yükünü sembolize ederler.

## P Tipi Yarı iletken

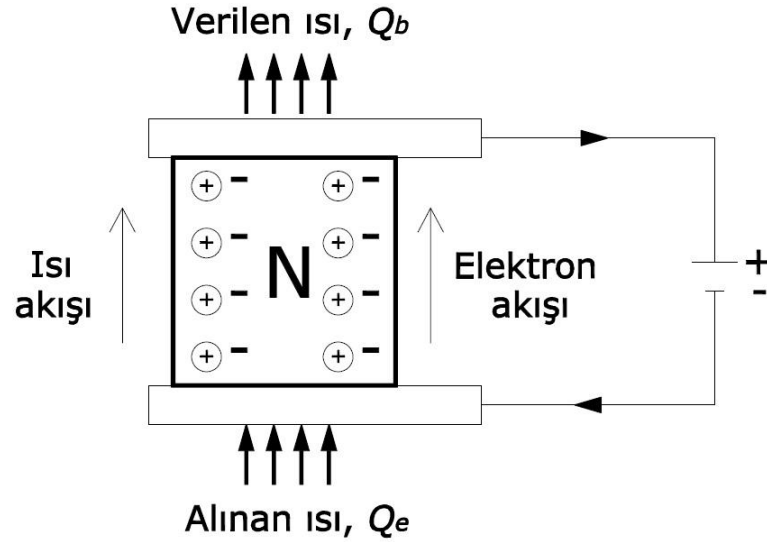


+ akım taşıyıcı pozitif elektrik yükü

⊖ etkisiz negatif yüklü iyonlar

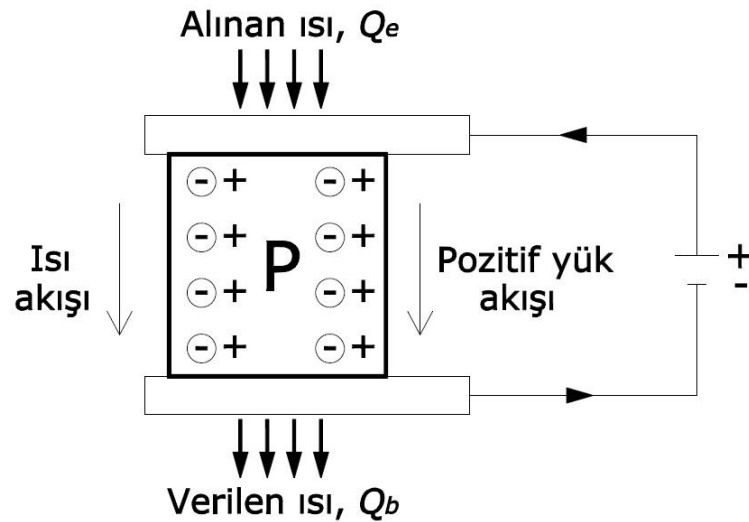
Şekil 2.9 P tipi yarı iletkenin gösterilişi

Termoelektrik jeneratörlerde, P ve N tipi yarı iletkenlere ayrı ayrı gerilim uygulandığında gösterdikleri davranış, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11' deki gibi olmaktadır.



Şekil 2.10 N tipi yarı iletkende elektron ve ısı akış yönleri

Şekil 2.10 ' da ki N tipi yarı iletkene DC gerilim uygulandığında, elektronların ve ısının akış yönleri gösterilmektedir. Negatif yüklü serbest elektronlar, kaynağın negatif kutbu tarafından itilir ve pozitif kutba doğru hareket ederek akım oluştururlar. Serbest elektronlar aynı zamanda ısı enerjisini de aynı yönde taşıyarak hareket ederler.



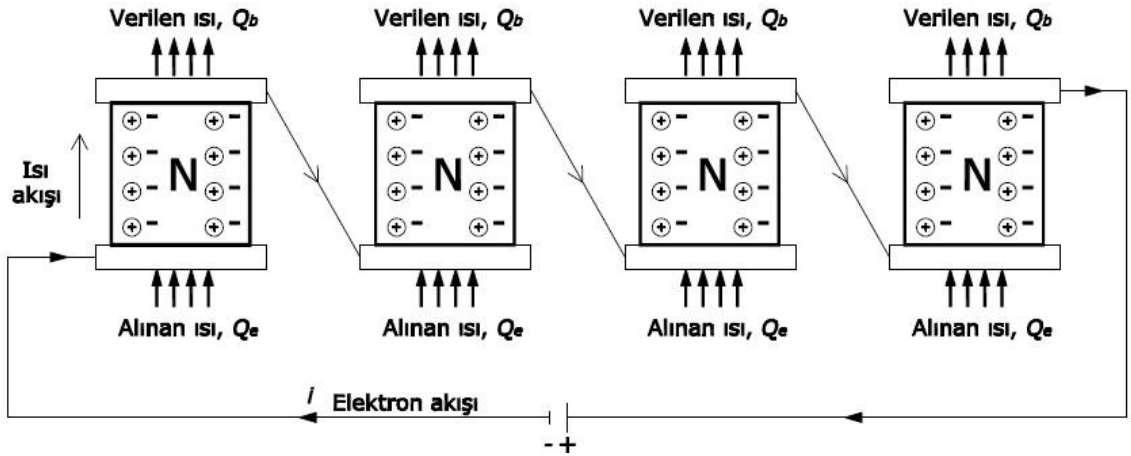
Şekil 2.11 P tipi yarı iletkende elektron ve ısı akış yönleri

Şekil 2.11 'de ki P tipi yarı iletkene DC gerilim uygulandığında, pozitif yüklerin ve ısının akış yönleri gösterilmektedir. Pozitif yükler, kaynağın pozitif kutbu tarafından itilir ve negatif kutba doğru hareket ederek akım oluştururlar. Pozitif yükler aynı zamanda ısı enerjisini de aynı yönde taşıyarak hareket ederler.

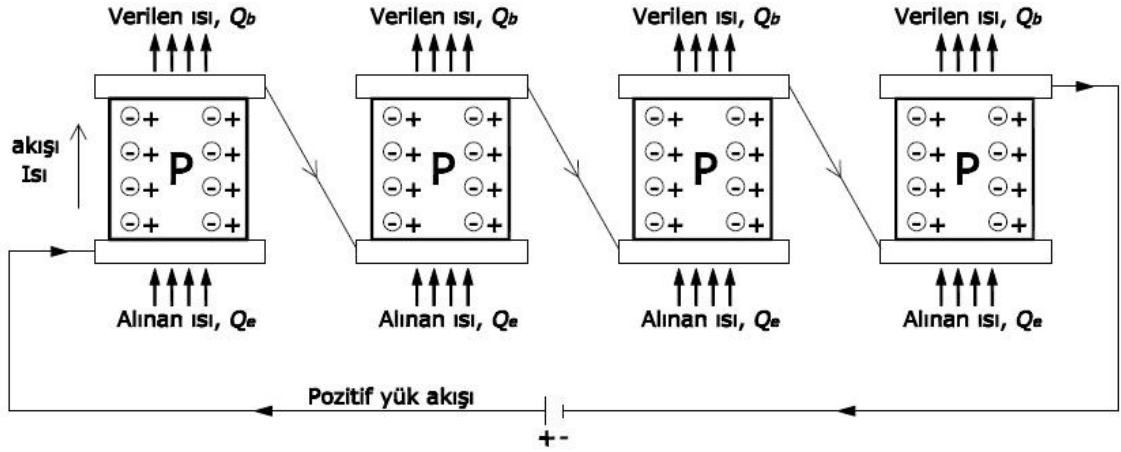
Şekil 2.10 ve 2.11' e dikkatlice bakılırsa uygulanan gerilimin yönünün aynı fakat ısı akışının ters olduğunu görülmektedir.

Bu yarı iletkenler seri bağlanarak termoelektrik jeneratörler veya modüller oluşturulabilir. Sadece N veya sadece P tipi yarı iletken kullanılabilir fakat bu bağlantıyı zorlaştırır. Bu nedenle N ve P tipi yarı iletkenler birlikte kullanılarak daha uygun bir bağlantı sağlanabilir.

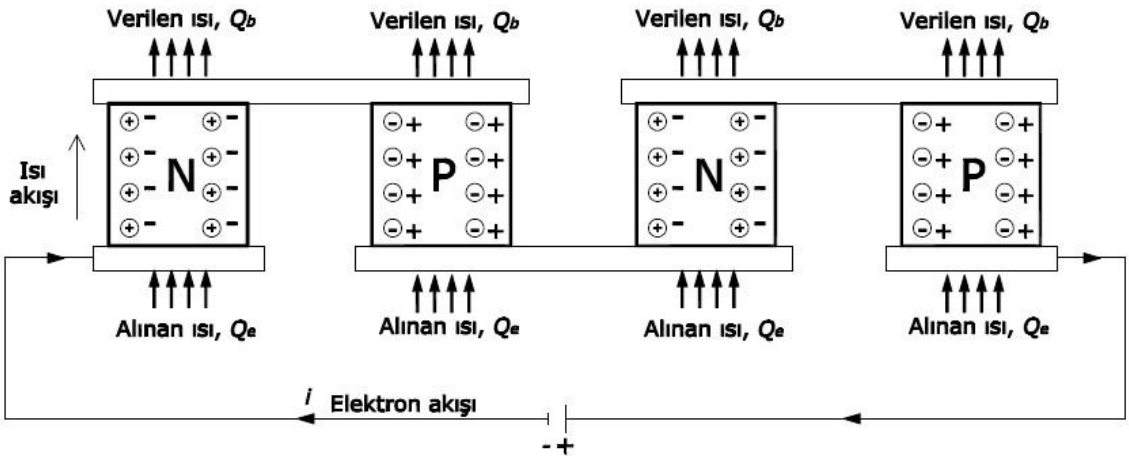
Şekil 2.12' de sadece N tipi yarı iletkenlerin kullanıldığının varsayılmasıyla oluşan bağlantı şekli gösterilmektedir. Şekil 2.13' de ise sadece P tipi yarı iletkenlerin kullanıldığının varsayılmasıyla oluşan bağlantı şekli gösterilmektedir. Şekil 2.14 ' de ise hali hazırda kullanılan termoelektrik jeneratörlerin, P ve N tipi yarı iletkenlerin birlikte kullanılmasıyla oluşan bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Sadece N tipi yarı iletken kullanıldığı düşünülerek oluşturulan bağlantı şekli



Şekil 2.13 Sadece P tipi yarı iletken kullanıldığı düşünülerek oluşturulan bağlantı şekli



Şekil 2.14 Termoelektrik jeneratör bağlantı şekli

Termoelektrik jeneratörü etkileyen beş ana parametre vardır. Bunlar Seebeck etkisi, Peltier etkisi, Jeul etkisi, Fourier etkisi ve Thomson etkisidir.

Seebeck etkisi, iki farklı metalin birleşme noktalarında farklı sıcaklıklar olduğunda, malzeme uçlarında ölçülen gerilimin, sıcaklık farkıyla orantılı olduğunu ifade eder [20].

$$V = \alpha \Delta T \quad (2.1)$$

$V$  : devrede oluşan gerilim (V)

$\Delta T$  : birleşme noktaları arasındaki sıcaklık farkı (K)

$\alpha$  : Seebeck katsayısı (V/K)

Seebeck katsayısı  $\alpha$ , bazı kaynaklarda S şeklinde de gösterilebilmektedir. Birim olarak V/K yerine  $\mu\text{V/K}$  olarak da kullanılabilir. Aşağıda Tablo 2.1' de platin metali referans alınarak değişik metallere göre Seebeck katsayıları gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Farklı malzemelerin platin referansında 0°C' deki Seebeck katsayıları [21]

Yarı iletkenler	Seebeck katsayısı ( $\mu\text{V/K}$ )	Metaller	Seebeck katsayısı ( $\mu\text{V/K}$ )
Selenyum	900,0	Molibden	10,0
Tellür	500,0	Demir	19,0
Silisyum	440,0	Nikrom	25,0
Germanyum	300,0	Antimon	47,0
n-tipi $\text{Bi}_2\text{Te}_3$	-230	Kadmium	7,5
p-tipi $\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300,0	Tungsten	7,5
PbTe	-180	Altın	6,5
$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670	Gümüş	6,5
$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410	Bakır	6,5
$\text{Pb}_{09}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360	Rodyum	6,0
$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710	Alüminyum	3,5
$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990	Karbon	3,0
$\text{SnSb}_4\text{Te}_7$	25,0	Civa	0,6
$\text{SnBi}_4\text{Te}_7$	120,0	Platin	0
$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151,0	Sodyum	-2,0
$\text{SnBi}_{2,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_7$	110,0	Potasyum	-9,0
$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90,0	Nikel	-15,0
$\text{PbBi}_4\text{Te}_7$	-53,0	Konstantan	-35,0
		Bizmut	-72,0
		Tantalyum	4,5
		Kurşun	4,0

Termoelektrik jeneratörlerde yarı iletken olarak genelde bizmut-tellurit ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), kurşun-tellurit ( $\text{PbTe}$ ), silisyum-germanyum ( $\text{SiGe}$ ) veya bizmut-antimon ( $\text{BiSb}$ ) kullanılmaktadır. Seebeck katsayısı üretilen gerilim ile doğru orantılı olduğundan, yüksek Seebeck katsayılı malzemeler kullanılmalıdır.

Peltier etkisi, soğuk ve sıcak yüzeyde ortaya çıkan ısının, devreden geçen akımla orantılı olduğunu ifade eder [20].

$$Q_p = \pi I \quad (2.2)$$

$Q_p$  : Peltier ısısı (W)

$I$  : devreden geçen akım (A)

$\pi$  : Peltier katsayısı (V)

Peltier katsayısı mutlak sıcaklık ile Seebeck katsayısının çarpımını da ifade eder.

$$\pi = \alpha T \quad (2.3)$$

Thomson etkisi, Seebeck etkisi ile Peltier etkisi arasındaki ilişkiyi verir. Böyle bir devrede oluşan ısı hem elektrik hem de sıcaklık gradyanına bağlıdır [20].

$$Q_t = \tau \Delta T I \quad (2.4)$$

$Q_t$  : Thomson ısısı (W)

$I$  : devreden geçen akım (A)

$\Delta T$  : birleşme noktaları arasındaki sıcaklık farkı (K)

$\tau$  : Thomson katsayısı (V/K)

Jeul etkisi, devreden geçen akım sonucu ortaya çıkan ısı enerjisidir. Bu etki her iki yüzeye de eşit olarak paylaştırılmaktadır. Akım (dolayısıyla gerilim) değeriyle parabolik olarak artmaktadır [20].

$$Q_j = I^2 R \quad (2.5)$$

$Q_j$  : Jeul ısısı (W)

$I$  : devreden geçen akım (A)

$R$  : termoelemanın direnci ( $\Omega$ )

Fourier etkisi, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkından doğan ısı enerjisini ifade eder. Termoelektrik jeneratör bu ısıyı bir yüzeyden diğer yüzeye pompalayarak soğutma/ısıtma yapar. Bu etkiye göre, sıcaklık farkı arttıkça ısı enerjisi artmaktadır.

$$Q_f = U A \Delta T \quad (2.6)$$

$Q_f$  : Transfer olan ısı enerjisi (W)

$U$  : ısı transfer katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)

$A_T$  : ısı transfer yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  : yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı (K)

Bütün bu etkiler birlikte yazılırsa, N adet yarı iletken çiftten (p ve n tipi) oluşan bir termoelektrik modülde, soğuk yüzeyden emilen ısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [20].

$$Q_e = Q_{so} = 2N \left( \alpha I T_{s1} - \frac{I^2 r_i}{2G} + k \Delta T G \right) \quad (2.7)$$

Burada k ısı iletim katsayısıdır (W/mK). Sıcak yüzeyden atılan ısı ise [20];

$$Q_b = Q_{s1} = 2N \left( \alpha I T_{so} + \frac{I^2 r_i}{2G} + k \Delta T G \right) \quad (2.8)$$

$N$  : TE çift sayısı

$T_{so}$  : ısı emilen taraftaki soğuk yüzey sıcaklığı (K)

$T_{s1}$  : ısı atılan taraftaki sıcak yüzey sıcaklığı (K)

$G$  : şekil faktörü (Alan/uzunluk) (cm)

$r_i$  : Özdirenç ( $\Omega$ .cm)

Devredeki gerilim ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir [24].

$$V = 2N \left( \frac{I r_i}{G} + \alpha \Delta T \right) \quad (2.9)$$

Maksimum akım [24];

$$I_{max} = \left( \frac{kG}{\alpha} \right) \left( \sqrt{1 + 2ZT_{s1}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Optimum verimin elde edildiği akım [24];

$$I_{op} = k \Delta T G \frac{(1 + \sqrt{1 + ZT_{ort}})}{\alpha T_{ort}} \quad (2.11)$$

$Z$  : uygunluk faktörü ( $\alpha^2/r_i k$ ) (1/K)

$T_{ort}$  : ortalama sıcaklık  $(T_{s1} + T_{so})/2$

Termoelektrik modülün soğutma amaçlı kullanılması durumunda verimi ve aynı zamanda soğutma tesir katsayısı (STK veya COP) [20];

$$STK = \frac{Q_{so}}{VI} \quad (2.12)$$

Optimum akımdaki optimum STK [24];

$$STK_{opt} = \left\{ \left( \frac{T_{ort}}{\Delta T} \right) \left[ \frac{\left( \frac{1 + ZT_{ort}}{2} - 1 \right)}{\sqrt{1 + ZT_{ort}} + 1} \right] \right\} - \frac{1}{2} \quad (2.13)$$

Maksimum  $\Delta T$  ( $Q=0$  için) [24];

$$\Delta T_{max} = T_{s1} - \frac{(\sqrt{1 + 2ZT_{s1}} - 1)}{Z} \quad (2.14)$$

Termoelektrik modülün termodinamik verimi [17];

$$\eta_g = \frac{Q_{so} - Q_{s1}}{Q_e} = \frac{P_{TE}}{Q_e} = \frac{Z(T_{s1} - T_{so})j - j^2}{Z(T_{s1} - T_{so}) + ZTj - j^2/2} \quad (2.15)$$

$$P_{TE} = k(T_{s1} - T_{so})j - \frac{kj^2}{Z} \quad (2.16)$$

$P_{TE}$  : modülün elektriksel çıkış gücü (W)

$j$  : boyutsuz akım ( $\alpha l/k$ )

Denklem 2.15 ve 2.16 ' dan açıkça görüldüğü gibi  $0 < j < Z(T_{s1} - T_{so})$  olduğunda  $\eta_g > 0$  ve  $P_{TE} > 0$  olmaktadır.

## 3. BÖLÜM

### PEM YAKIT PİLİ-TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMİ

#### 3.1 Genel Bilgiler

PEM yakıt pili - termoelektrik jeneratör (PEM-TE) sistemi, PEM yakıt pili ile termoelektrik jeneratörün birlikte kullanılmasıyla oluşan bir sistemdir. Bölüm 1' de açıklandığı gibi PEM yakıt pilleri oksijen ve hidrojen enerjisini kullanarak gerilim meydana getirirler. Gerilimin yanında atık olarak bir miktar su/su buharı ve ısı enerjisi açığa çıkarırlar. PEM-TE sistemi temel olarak açığa çıkan bu atık ısı enerjisini kullanarak ilave elektriksel güç üretmeyi amaçlamaktadır.

PEM-TE sistemindeki termoelektrik jeneratör Bölüm 2' de açıklandığı gibi, atık ısı enerjisini soğurarak yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluştururlar. Bu sıcaklık farkı sonucu devrede akım ve gerilim meydana gelir.

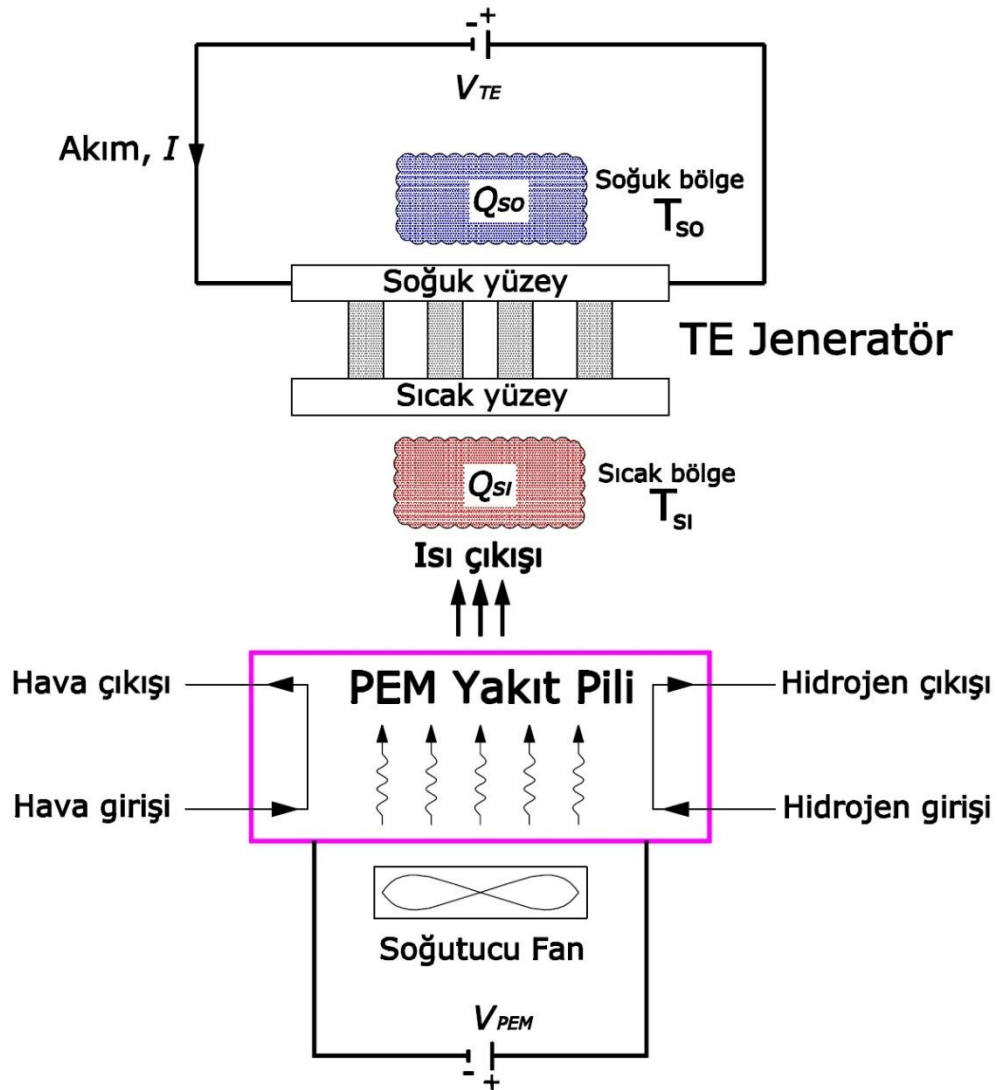
PEM-TE sistemi ile PEM yakıt pilinin çıkış gerilimine ilave gerilim üretilecektir. Böylece bu tez çalışmasının amacı olan PEM yakıt pilinin veriminin artırılması sağlanacaktır.

Bölüm 3'de PEM-TE sisteminin teorisi üzerinde durulmuştur. Bir sonraki bölüm olan Bölüm 4' de ise deneysel çalışmalarla elde edilen PEM-TE sisteminin genel verimi, çıkış gerilimi, çıkış gücü gibi parametrelerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Kurulacak sistem ölçüm amaçlı olacağından, deney sonunda elde edilecek bulgular bu ölçüde değerlendirilerek Bölüm 5' de sistemin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

### 3.2 PEM - TE Sistemi Temel Çalışma Prensibi

Şekil 3.1' de PEM-TE sisteminin çalışma şeması gösterilmektedir. Şemadan da görüleceği gibi PEM yakıt pilinin atık ısısı soğutucu bir fan yardımıyla pilden uzaklaştırılmaktadır. Bu atık ısı termoelektrik jeneratörün sıcak bölgesini oluşturmaktadır. Soğuk bölge ile sıcak bölge arasındaki sıcaklık farkı termoelektrik jeneratörün gerilim üretmesini sağlamaktadır.



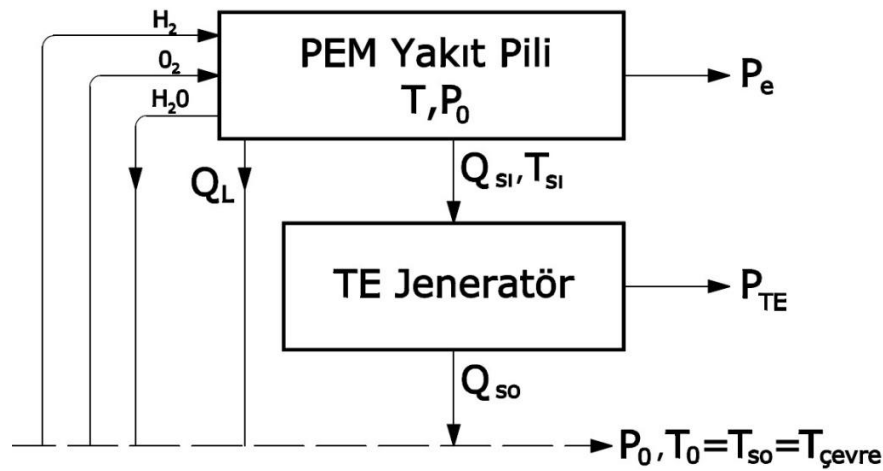
Şekil 3.1 PEM-TE sisteminin çalışma şeması

Şekil 3.1' de PEM yakıt pili termoelektrik jeneratörün güç üretmesi için bir ısı deposu gibi davranır. Böyle bir sistem kullanılarak yakıt pilindeki atık ısı uygun bir şekilde

kullanılabilir ve sonuç olarak yakıt pilinin performansı geliştirilebilir. Aşağıda teorik olarak PEM-TE sisteminin performansını incelenmiştir.

### 3.3 PEM - TE Sisteminin Yapısı ve Karakteristiği

Şekil 3.2 'de gösterildiği gibi yakıt pilinde üretilen atık ısının bir kısmı ( $Q_L$ ) doğrudan çevreye verilirken, bir kısmı da sistemdeki termoelektrik jeneratöre transfer olur.



Şekil 3.2 PEM-TE sistemindeki parametreler [17]

$Q_L$  şu şekilde ifade edilebilir;

$$Q_L = h_L A_L (T - T_0) \quad (3.1)$$

Burada  $h_L$  kayıp ısının taşınım veya iletim katsayısı,  $A_L$  efektif ısı transfer alanıdır. Termodinamiğin ilk kuralına göre, PEM yakıt pilinden termoelektrik jeneratöre transfer olan ısı miktarı belirlenebilir.

$$Q_{s1} = P_{\max} - P_e - Q_L \quad (3.2)$$

$$P_{\max} = \frac{I \Delta h}{2F} = 1.25 \times I \quad (3.3)$$

$P_{\max}$  : maksimum yakıt pili gücü (W)

$P_e$  : yakıt pili çıkış gücü (W)

$I$  : yakıt pili çalışma akımı (A) (Denklem 1.24' ten)

Denklem 2.8 ve 3.2' ye bakılırsa,  $P_{\max} - P_e > Q_L + k(T_{s1} - T_{s0})$  olduğunda sistemdeki termoelektrik cihaz jeneratör olarak çalışmaya başlar ve çıkış gücü  $P_{TE} > 0$  olur. Böyle bir durumda boyutsuz akım  $j$  şu şekilde hesaplanabilir [17].

$$j^2 - 2ZTj - 2Z(T_{s1} - T_{so}) + \left(\frac{2Z}{k}\right)A \left[ \frac{-\Delta h}{2F} i(1 - n_f) - \frac{h_L A_L}{A} (T_{s1} - T_{so}) \right] = 0 \quad (3.4)$$

PEM-TE sistemin çıkış gücü ise;

$$P_{PT} = P_{TE} + P_e \quad (3.5)$$

$$P_{PT} = k(T_{s1} - T_0)j - \frac{kj^2}{Z} + iA \left\{ 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T - T_0) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln \left( P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}} \right) - \left( \frac{\lambda_a + \lambda_k}{\lambda_a \cdot \lambda_k} \right) \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) - ir - i \left( \beta_1 \frac{i}{i_m} \right)^{\beta_2} \right\}$$

PEM-TE sistemin verimi ise;

$$\eta_{PT} = \frac{P_{TE} + P_e}{P_{max}} \quad (3.6)$$

$$\eta_{PT} = \left\{ \frac{2F}{-\Delta h i} \frac{kT_0}{A} \left[ \left( \frac{T_{s1}}{T_0} - 1 \right) j - j^2 / (ZT_0) \right] + \frac{2F}{-\Delta h} \left\{ 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T - T_0) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln \left( P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}} \right) - \left( \frac{\lambda_A + \lambda_C}{\lambda_A \lambda_C} \right) \frac{R \cdot T}{n_e \cdot F} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) - i \left( \beta_1 \frac{i}{i_m} \right)^{\beta_2} - \frac{i t_{mem}}{(0.005139 \lambda_{mem} - 0.003260) \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]} \right\} \right\}$$

Yukarıdaki denklemlerdeki  $i$  ve  $j$  birbirinden bağımsız değildir.  $i$  ve  $j$  arasındaki ilişki Denklem 3.4'den bulunabilir. Denklem 3.5 ve 3.6 şunu göstermektedir ki; PEM-TE sisteminin performansı, yakıt pilinin çalışma sıcaklığı  $T$ , sıcak bölge sıcaklığı  $T_{s1}$ , akım yoğunluğu  $i$ , polar tabakanın yüzey alanı  $A$ , yakıt pilinin ısı kayıp katsayısı  $h_L$ , uygunluk değeri  $Z$ , termal iletkenlik  $k$ , termoelektrik jeneratörün boyutsuz akımı  $j$  gibi termodinamik ve elektrokimyasal parametreler dizisine göre değişir [17].

## 4. BÖLÜM

### DENEY ÇALIŞMASI ve BULGULAR

#### 4. PEM YAKIT PİLİ-TERMOELEKTRİK JENERATÖR SİSTEMİ SİMÜLASYONU İLE DENEY YAPILMASI

##### 4.1 Materyal ve Metod

Bu bölümde, Bölüm 3' de teorik kısmı anlatılan PEM-TE sistemi için yapılan deneysel çalışma anlatılmıştır. Kullanılan materyaller sırasıyla tanıtılmış ve uygulanan metotlar ile hangi bulgulara ulaşıldığı açıklanmıştır.

PEM yakıt pilini sürekli çalıştırmak ve deney yapmak yerine, atık ısısının miktarını belirleyerek benzer ısıyı verecek bir simülasyon kullanılmıştır. Bunun için soğutma fanı ile benzer debide bir fan ve hava soğutmalı bir ısıtıcı tercih edilmiştir. Isıtıcı ve fan birleştirilmiş ve PEM yakıt pilinin atık ısı elde edilmiştir. Daha sonra, bir kanal yardımıyla bu atık ısı termoelektrik modüllerin sıcak bölgesine gönderilmiştir. Soğuk bölge olarak şebeke suyu sıcaklığı kullanılmıştır. Termoelektrik jeneratörün ısıyı soğuk bölgeye transferini kolaylaştırmak için alüminyum profiller kullanılarak, adiyabatik bir sistem oluşturmak için cam yünü izolasyon malzemesi ile sistem izole edilmiştir. Kurulan sistemin giriş ve çıkış değerlerini ölçmek için de termokupllar, sinyal dönüştürücü, pc yazılımı, ek aparatlar ve bir diz üstü bilgisayar kullanılmıştır.

Bu bölümde kurulan sistemin elemanları tanıtılarak, montajı yapılan sistem ile ilgili deney çalışmaları anlatılmıştır.

Kurulan sistem ölçüm amaçlı olduğundan, elde edilen bulgular bu ölçüde değerlendirilmiştir.

#### 4.1.1 Kullanılacak Malzemeler

PEM-TE sisteminde PEM yakıt pili kullanılmadığı için, onun yerine PEM yakıt pili gibi davranan bir simülasyondan faydalanılmıştır. Bunun için Şekil 3.1 'de PEM-TE sisteminin çalışma şemasında gösterilen soğutucu fan yerine aşağıda Şekil 4.1 'de gösterilen plastik aksiyal pencere tipi aspiratör kullanılmıştır. Aspiratörün özellikleri Tablo 4.1 'de gösterilmiştir.



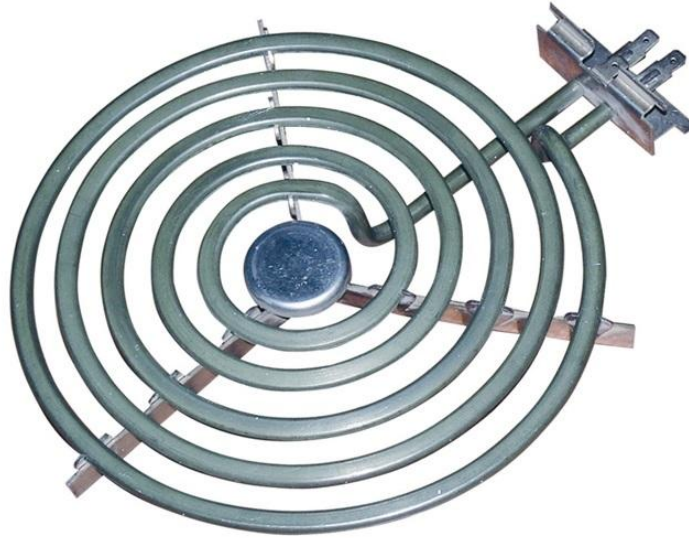
Şekil 4.1 PEM-TE sistemindeki plastik aksiyal aspiratör

Tablo 4.1 Plastik aksiyal aspiratörün özellikleri

Güç (W)	Gerilim (V)	Devir (d/d)	Debi (m <sup>3</sup> /h)	Pervane çapı (mm)	Ağırlık (kg)
20	220	2800	50	110	0.65

Şekil 3.1' de PEM-TE sistemindeki PEM yakıt pilinden atılan ısı için Şekil 4.2' deki gibi bir hava soğutmalı elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Rezistansın özellikleri Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Rezistans aspiratörün çıkışına monte edilerek, aspiratörden geçen hava ısıtılmıştır. Böylece PEM-TE sistemindeki atık ısıya benzer bir ısı enerjisi elde edilmiştir.



Şekil 4.2 Hava soğutmalı elektrikli rezistans.

Tablo 4.2 Elektrikli ısıtıcının özellikleri

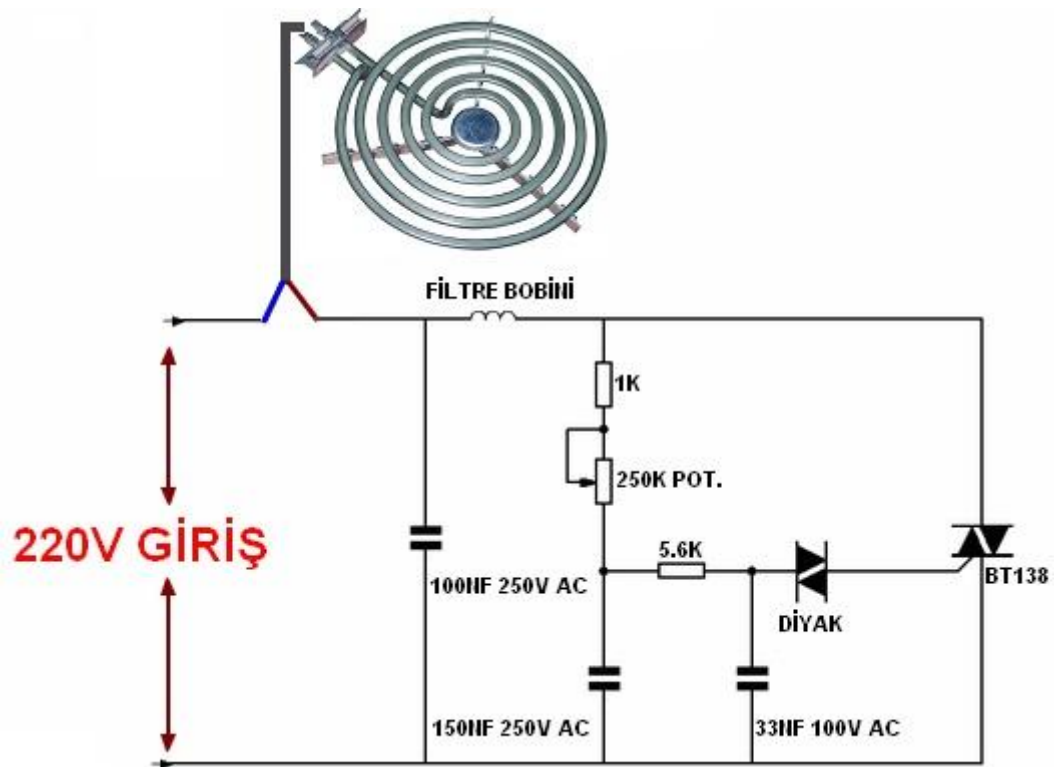
Güç (W)	Gerilim (V)	Boru çapı (mm)	Malzeme	Akım (A)	Direnç ( $\Omega$ )
750	220	8.5	CrNi	3.4	64.5

Elektrikli rezistansın sabit olan çıkış gücünü değişken hale getirebilmek için ise dimmer (güç ayarlayıcı) kullanılmıştır. Şekil 4.3' de dimmer anahtarı gösterilmiştir.



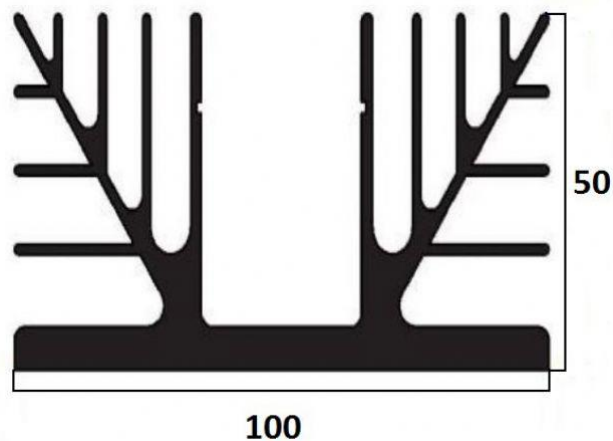
Şekil 4.3 Güç ayarlayıcı (dimmer) anahtarı.

Aşağıda Şekil 4.4 'de ise 220 V şebeke girişine göre çalışan bir dimmer devresi gösterilmektedir.

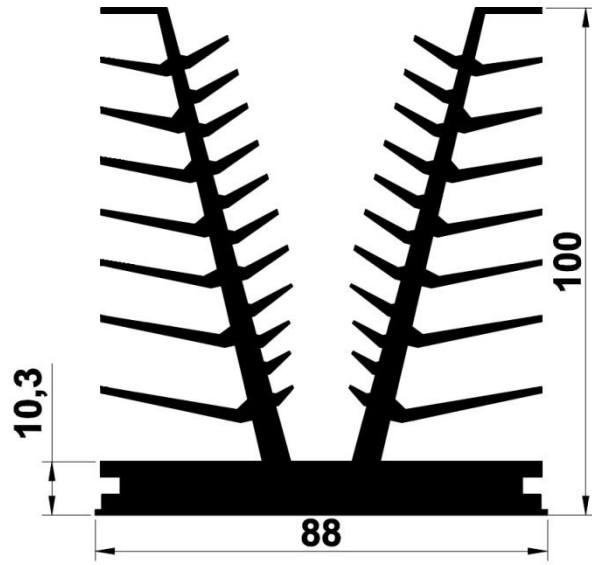


Şekil 4.4. Dimmer devresi

PEM yakıt pilinden atılan ısı, TE jeneratörler tarafından kullanılarak elektrik enerjisi üretilecektir. Atık ısının TE jeneratörlere daha iyi transfer edilmesi için alüminyum profiller kullanılmıştır. Alüminyum profiller, ısı geçişinin sıcak ve soğuk yüzeyler tarafından ayrı ayrı daha iyi yapılabilmesi için iki farklı profildedir. Aşağıda sıcak ve soğuk yüzeyler için kullanılan alüminyum profiller gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Sıcak yüzeyde kullanılan alüminyum profili.



Şekil 4.6 Soğuk yüzey alüminyum profili.

Sistemde ki sıcaklıkları ölçmek için K tipi termokupllar kullanılmıştır. Şekil 4.7' de K tipi termokupl gösterilmektedir.

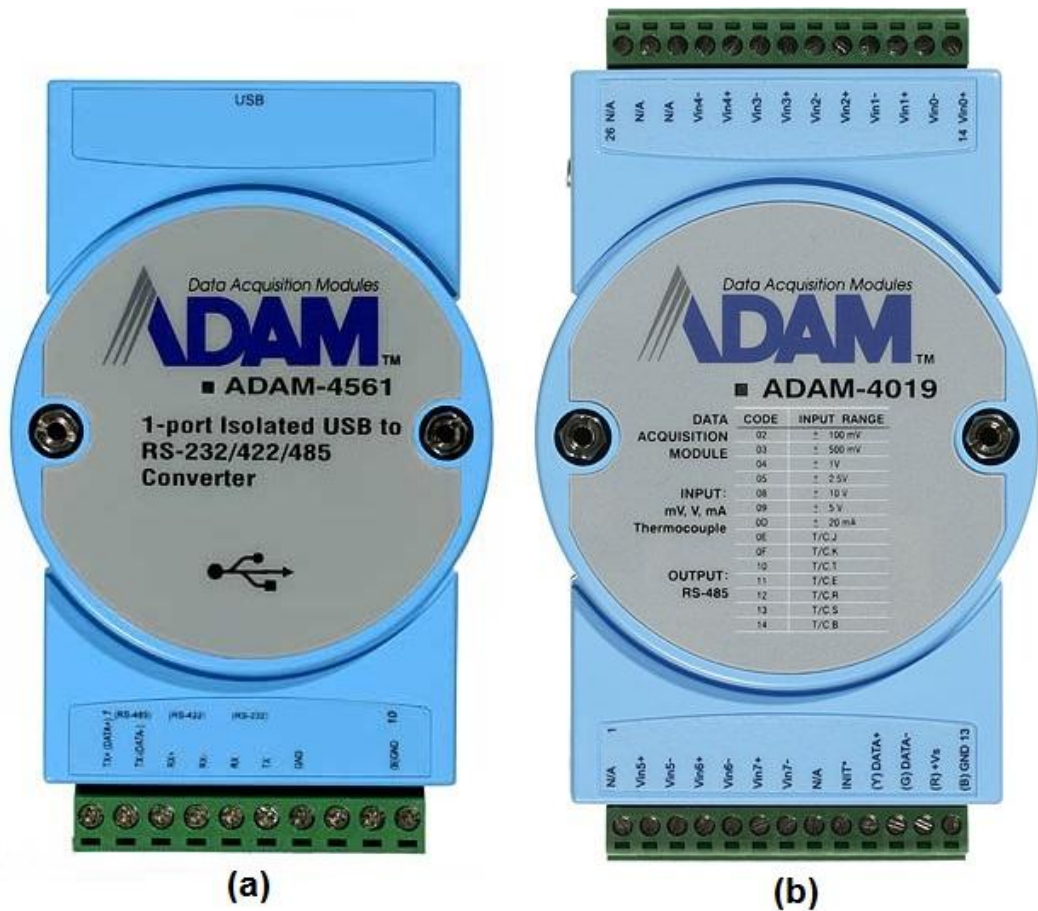


Şekil 4.7 K tipi termokupl

Tablo 4.3 Kullanılan termokuplun özellikleri

Tip	Malzeme	Ölçme aralığı (°C)
K	CrNi-Ni	-200 - 1200

Ölçülen değerleri bilgisayara kaydetmeden önce verileri dönüştürmek için bir sinyal dönüştürücü ve çevirici kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Ölçme sistemindeki sinyal dönüştürücü ve çevirici

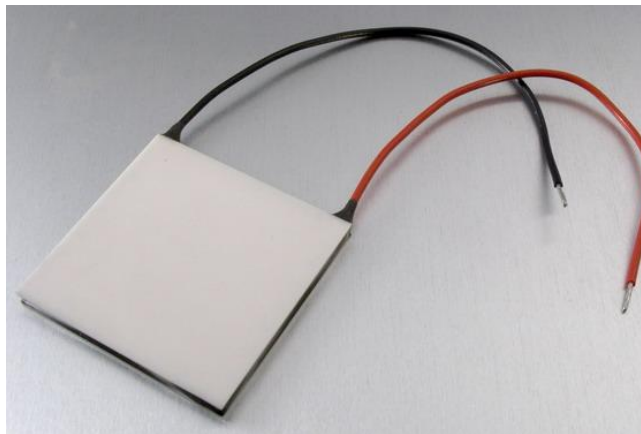
Tablo 4.4 Kullanılan çeviricinin özellikleri

<b>Kanal</b>	8
<b>Giriş Tipi</b>	V, mV, mA, T/C
<b>Giriş tipi ve sıcaklık aralığı</b>	V: +/-1V , +/-2.5V, +/-5V , +/-10V mV: +/- 100mV , +/-500mV mA: +/-20mA (w/125Ω resister) Termokupl: J 0 ila 760 C K 0 ila 1370 C T -100 ila 400 C E 0 ila1400 C R 500 ila 1750 C S 500 ila1750 C B 500 ila 1800 C
<b>İzolasyon voltajı</b>	3000 V <sub>DC</sub>
<b>Örnekleme hızı</b>	6 örnek/sn (toplam)
<b>Giriş empedansı</b>	20MW
<b>Doğruluk</b>	+/- 0.1% veya daha iyi
<b>Güç tüketimi</b>	1 W
<b>I/O Konnektör tipi</b>	13-pin plug-terminal

Tablo 4.5 Kullanılan dönüştürücünün özellikleri (4561)

<b>LED göstergeleri</b>	comm
<b>Uyum</b>	USB V1.1
<b>İletişim mesafesi</b>	Seri: 1.2 km USB: 5 m
<b>İletişim hızı</b>	Seri: 75 - 115.2 k
<b>Konnektör</b>	USB RS-232/422/485: plug-in vida terminali
<b>Data akış kontrolü</b>	Evet (RS485)
<b>Nem</b>	5-95 %RH
<b>Arayüz</b>	USB to RS-232/422/485
<b>İzolasyon koruması</b>	2500 V <sub>DC</sub>
<b>Kurulum</b>	Tak&çalıştır
<b>Çalışma sıcaklığı</b>	-10~70 °C (14~158 °F)
<b>Depolama sıcaklığı</b>	-25~85 °C (-13~185 °F)

Atık ısı enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten termoelektrik modül, Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Tablo 4.6' da ise termoelektrik modülün özellikleri gösterilmiştir.



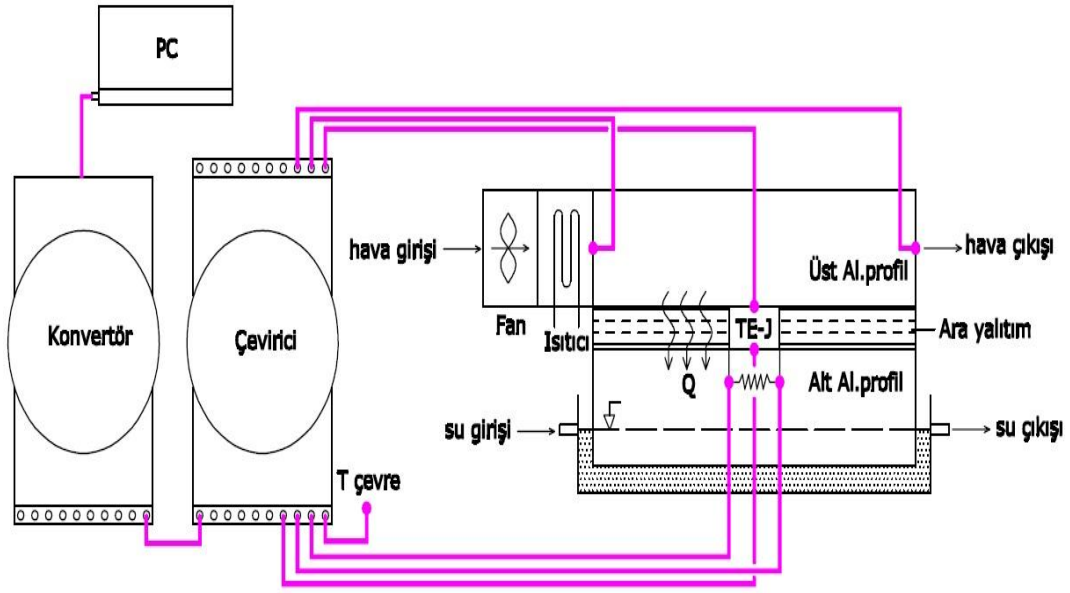
Şekil 4.9 Termoelektrik Modül

Tablo 4.6 Termoelektrik modülün özellikleri

<b>Q<sub>max</sub></b> (W)	<b>I<sub>max</sub></b> (A)	<b>V<sub>max</sub></b> (V)	<b>ΔT<sub>max</sub></b> (°C)	<b>N</b> (adet)	<b>Boyut</b> (mm)	<b>Direnc</b> (Ω)	<b>Isı iletimi</b> (W/cmK)
61	6.0	15.2	67	127	40x40x3.9	2.04	1.42x10 <sup>-2</sup>

#### 4.1.2 Metod

Deney seti hazırlandıktan, sistem çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Sistem şeması Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Şekil 4.11a ve Şekil 4.11b' de ise sistemin uygulama görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.10 Deney seti şematik gösterimi



Şekil 4.11(a) Deney seti uygulama görüntüsü-1

Şekil 4.10 ve 4.11' de görüldüğü gibi, üst alüminyum profili çevreleyen izolasyonu yapılmış kanal içerisine, çevre sıcaklığında hava girişi olmaktadır. Bu hava elektrikli bir ısıtıcıyla ısıtılmış ve kanal içerisinden geçirilmiştir. Isınan havanın bir kısmı termoelektrik modül tarafından emilerek alttaki alüminyum profile transfer edilmesi sağlanmıştır. Alt kısımdaki alüminyum profil ise ağzı açık bir kap içerisine daldırılıp, şebeke suyu ile soğutulmuştur. Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı oluşturularak termoelektrik modülün gerilim üretmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.11(b) Deney seti uygulama görüntüsü-2

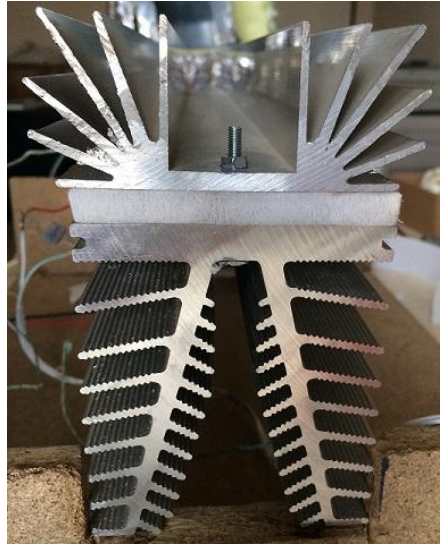
Profiller arası ısı geçişini önlemek için, bir cm kalınlığında polistren köpük levha kullanılmıştır. Böylece alt kısımdaki profilin aşırı ısınması engellenerek sıcaklık farkının artırılması sağlanmıştır.

K tipi termokupullar ile hava giriş-çıkış sıcaklığı, çevre sıcaklığı, termoelektrik modül üst-alt yüzey sıcaklığı ve termoelektrik modülün çıkış gerilimi ölçülmüştür. Ölçülen değerler bilgisayar yazılımı aracılığıyla dakikada bir kaydedilmiştir.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’ de deney setine ait bazı resimler verilmiştir. Şekil 4.13’ de kullanılan alüminyum profillerin ön görünüşü ile ara yalıtım malzemesi polistren levha gösterilmiştir. Şekil 4.12’ de ise profillerin yan görünüşü, termokupullar, ölçme sistemi ile termoelektrik modülün montajı gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Bağlantılar, ölçme sistemi ve profiller



Şekil 4.13 Alüminyum profiller ve ara yalıtım malzemesi

## 4.2 Bulgular

Aşağıda Tablo 4.7' de deney sonucu ölçülen değerler gösterilmiştir. Tablo 4.8' de ise ölçülen değerlere göre hesaplanan veriler gösterilmiştir. Tablo 4.9 ' da ise PEM yakıt pilinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.7 Deney sonucu ölçülen değerler

Açıklama	Değerler
Sistemin denge haline gelmesi için geçen süre	27 dk
Sistem denge halinde iken termoelektrik modülün ürettiği gerilim	0.9222 V
Termoelektrik modülün direnci	2.4 $\Omega$
Oda sıcaklığı	20°C
Termoelektrik modülün üst yüzey sıcaklığı	74°C
Termoelektrik modülün alt yüzey sıcaklığı	22.8°C
Sistem giriş sıcaklığı	134.4°C
Sistem çıkış sıcaklığı	81.7°C
Elektrikli ısıtıcının gerilimi	202 V

Tablo 4.8 Deney sonucu hesaplanan değerler

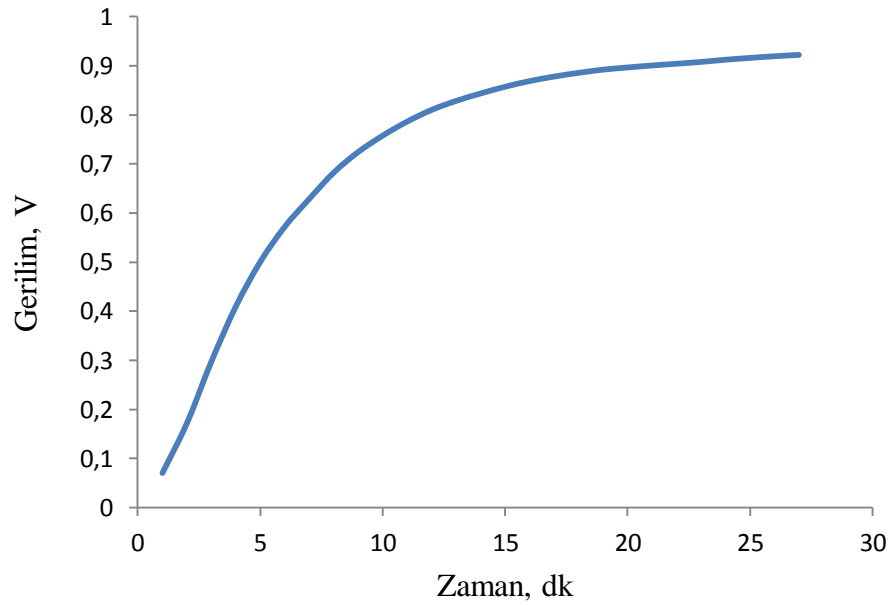
<b>Açıklama</b>	<b>Değerler</b>
Termoelektrik modülün sıcaklık farkı	51.2°C
Sistemin sıcaklık farkı	52.7°C
Sisteme giren ısı enerjisi	632 W
Sistemden çıkan ısı enerjisi	341 W
Sistemdeki faydalı ısı enerjisi	291 W
PEM yakıt pilinin ürettiği ısı enerjisi	542 W
PEM yakıt pilinin maksimum gücü	1035 W
PEM yakıt pili akım yoğunluğu	347 mAcm <sup>-2</sup>
Termoelektrik modülün pompaladığı ısı enerjisi	29 W
Termoelektrik modülün elektriksel gücü	0.35 W
Kullanılabilecek TE modül sayısı	10 adet
Termoelektrik modülün akım yoğunluğu	24 mAcm <sup>-2</sup>
Termoelektrik modülün verimi	% 1.22
PEM yakıt pilinin verimi	% 48.00
PEM-TE sisteminin verimi*	% 48.64

\* 10 adet termoelektrik modülün kullanıldığı varsayımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 4.9 PEM yakıt pilinin özellikleri

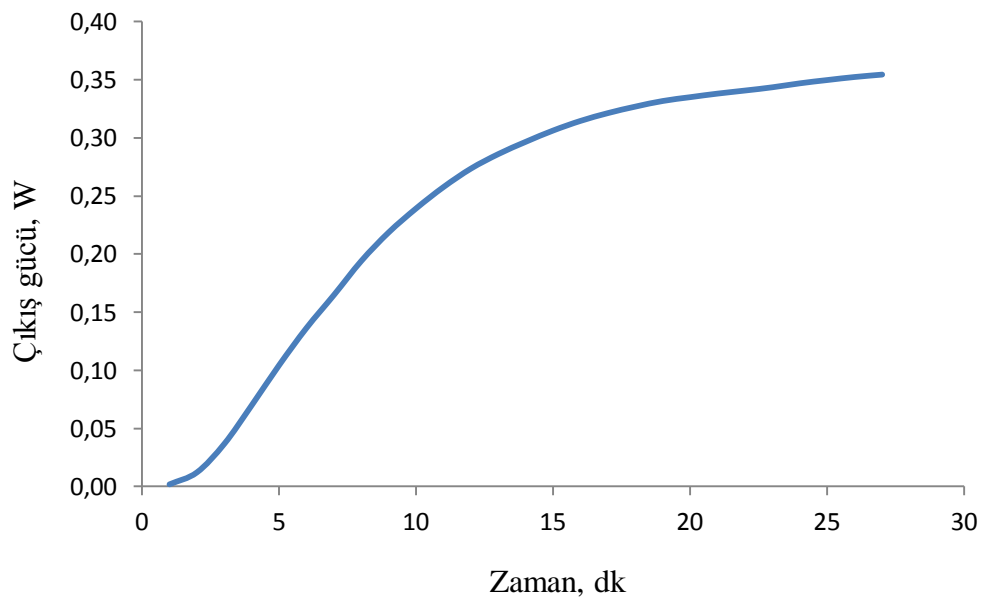
<b>Açıklama</b>	<b>Değerler</b>
Yüksüz çalışmadaki çıkış elektrik gücü	500 W
Yakıt pili hücre sayısı	19 adet
Hücre alanı	120 cm <sup>2</sup>
Hücre çalışma gerilimi (yükte)	0.6 V
Hücre boş çalışma gerilimi (yüksüz)	1.05 V
Yakıt pili boş çalışmadaki gerilimi	20 V
Yakıt pili çalışma gerilimi (yükte)	11.4 V
Yakıt pili boş çalışmadaki akım (yüksüz)	25 A
Yakıt pili çalışma akımı (yükte)	43.6 A
Yakıt pili maksimum akım	70 A

Bilgisayara kaydedilen veriler ve bu veriler doğrultusunda yapılan hesaplamalar grafikler ile gösterilmiştir. Şekil 4.14’ de termoelektrik modülün zamana bağlı ürettiği gerilim gösterilmiştir.

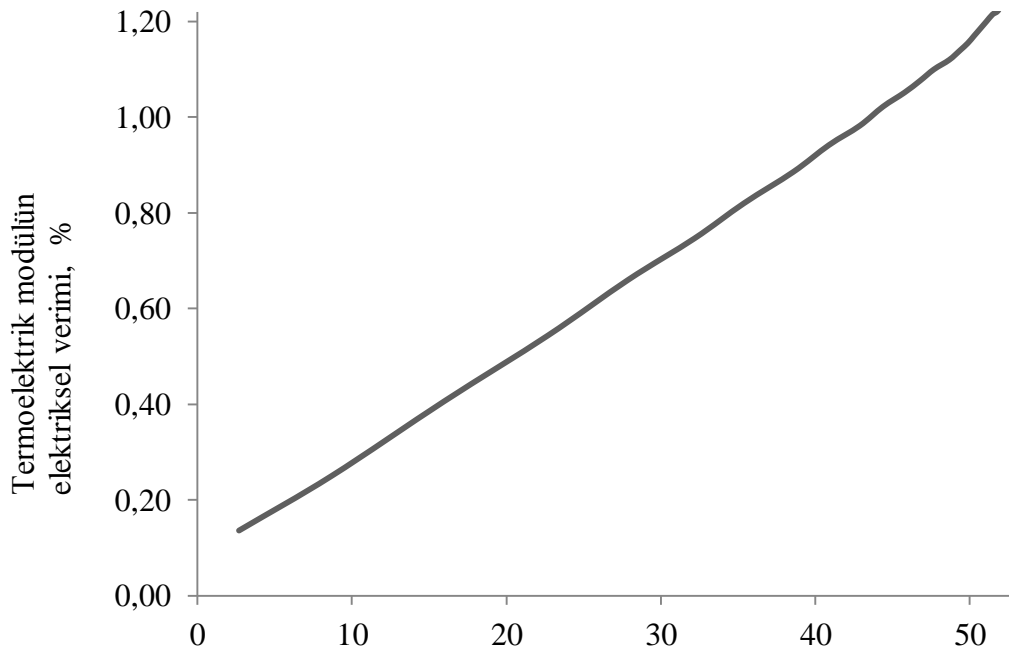


Şekil 4.14 Termoelektrik modülün ürettiği gerilim

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’ da ise sırasıyla, termoelektrik modülün çıkış gücü ile sıcaklık farkına bağlı verim eğrileri gösterilmiştir.



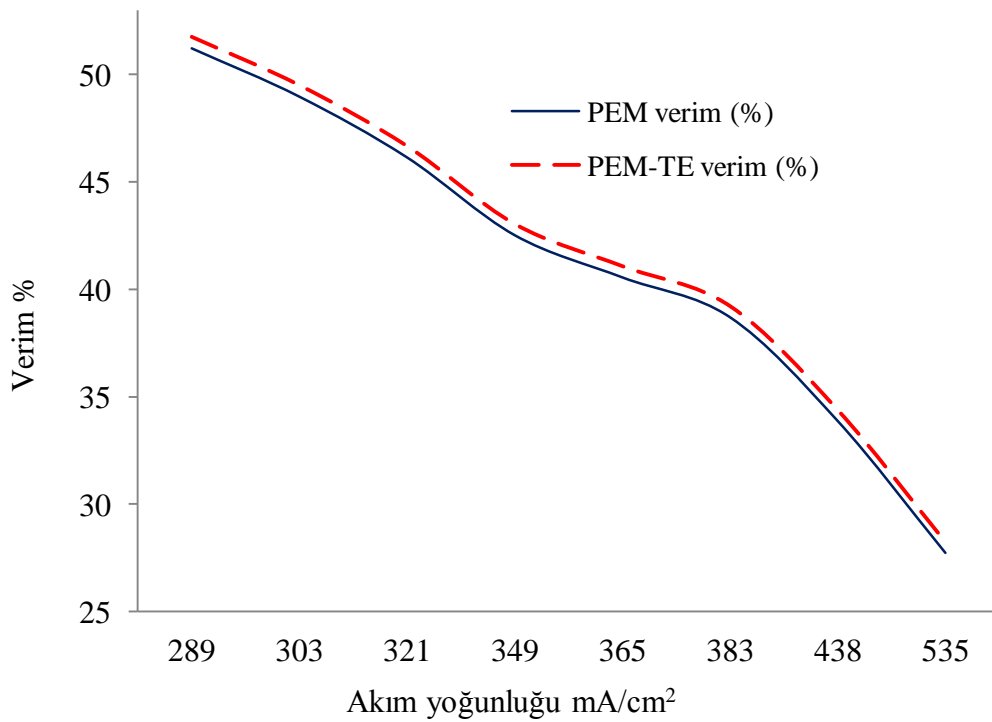
Şekil 4.15 Termoelektrik modülün çıkış gücü



Termoelektrik modülün alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, K

Şekil 4.16 Sıcaklık farkına bağlı termoelektrik modülün elektriksel verimi

Aşağıda Şekil 4.17' de PEM-TE sistemi ile PEM yakıt pilinin, akım yoğunluğuyla değişen verim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.17 PEM-TE sistemi ve PEM yakıt pilinin, akım yoğunluğu-verim eğrisi

## 5. BÖLÜM

### TARTIŞMA - SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 5.1 Değerlendirme

Bu tez çalışmasında PEM yakıt pilindeki düşük sıcaklıktaki atık ısı kullanılarak verim artışı sağlanması amaçlanmıştır. Atık ısı termoelektrik jeneratörlerle elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Sistem ölçüm amaçlı dizayn edildiğinden tek bir termoelektrik modül kullanılmıştır. Kullanılan modül TEC-1 12706T125 modülüdür. PEM-TE sistemi için 500 W elektrik gücünde yakıt pili düşünülmüştür. Gerçek yakıt pili yerine benzer çıkış değerlerini veren bir simülatör kullanılmış ve oda sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler grafikler halinde incelenmiştir.

Tek bir termoelektrik modülün çalışma gerilimi 0.92 V ölçülmüş ve çıkış gücü 0.35 W olmuştur. Termoelektrik modülün elektrik verimi %1.22 olarak hesaplanmıştır. Tek bir termoelektrik modülün sistemden çektiği ısı ise 29 W olarak hesaplanmıştır. Sistemde bulunan 291 W faydalı enerjinin 10 adet modül tarafından kullanılabilceği ve toplamda 3.5 W ilave elektrik gücü elde edilebileceği görülmüştür.

Yakıt pilinin verimi %48.00 iken PEM-TE sisteminin verimi %48.64 olarak hesaplanmış ve grafik olarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda %0.64' lük bir verim artışı sağlanmıştır.

#### 5.2 Sonuç ve öneriler

PEM-TE sistemi için elde edilen %0.64' lük verim artışı düşük görülebilir. PEM yakıt pilinin 80°C gibi düşük bir sıcaklıkta çalıştığı düşünüldüğünde, düşük sıcaklıkta ısı makinaları için kullanılmayan enerjinin az da olsa kullanılabilir hale geldiği görülmüştür. Literatürde bahsedilen [17] numaralı kaynaktaki PEM-TE sisteminde de benzer bir şekilde yaklaşık %0.60' lük bir verim artışı sağlanabileceği görülmüştür.

PEM yakıt pili yerine, katı oksit yakıt pilleri gibi yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin kullanılması halinde, çıkış sıcaklığının daha yüksek olacağı ve verim artışının daha da artacağı söylenebilir. Ayrıca verimi ve çalışma sıcaklığı daha yüksek termoelektrik modüllerin kullanılması halinde de sistemin genel veriminin daha da artacağı düşünülmüştür.

Nitekim literatürde bahsedilen [19] numaralı kaynaktaki çalışmada SOFC ile çalışan 3 kW'lık mikro kojenerasyon sisteminde, atık ısıdan %8'lik bir ilave elektrik gücü üretilmiştir. Bu çalışmada SOFC çıkış sıcaklığı yaklaşık 500°C olmuş ve yüksek sıcaklık TE jeneratörleri kullanılmıştır.

[18] numaralı kaynakta ise SOFC-TE sisteminde 600°C çıkış sıcaklığında, %5'lik bir verim artışı sağlanabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak; enerji ve enerji teknolojilerinin, dünya üzerindeki etkilerinin daha da belirgin hale geldiği günümüzde, ülkemizin kendini daha güçlü hale getirip gelişmiş ülkeler seviyesine çıkmasının, enerji ve enerji teknolojilerindeki politikalarına bağlı olduğu açıktır. Ülkemiz, sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmek ve enerji teknolojilerinin gelişimini sağlamak için ar-ge çalışmalarına daha da önem vermelidir. Termoelektrik modüllerin daha da geliştirilip verimlerinin artırılması, SOFC yakıt pilleri ile birlikte kullanılması, enerji verimli teknolojilerin geliştirilmesi için bilimsel çalışmaların artırılması ve devlet tarafından desteklenmesi ülkemize pozitif katkıda bulunacaktır.

## KAYNAKÇA

1. Lertsatitthanakorn, C., 2006. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator, **Bioresource Technology**, **98** (10): 1670-1674.
2. Thomas, J.P., Qidwai, M.A., Kellogg, J.C., 2006. Energy scavenging for small-scale unmanned systems, **Journal of Power Sources**, **159** (2): 1494–1509.
3. Pramanick, A.K., Das, P.K., 2006. Constructal design of a thermoelectric device, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **49** (7-8): 1420–1429.
4. Eakburanawat, J., Boonyaroonate, I, 2006. Development of a thermoelectric battery charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique, **Applied Energy**, **83** (7): 687–704.
5. Chen, L., Li, J, Sun, F., Wu, C., 2005. Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator, **Applied Energy**, **82** (4): 300–312.
6. Khattab, N.M., El Shenawy, E.T., 2006. Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator, **Energy Conversion and Management**, **47** (4): 407–426.
7. Nuwayhid, R.Y., Hamade, R., 2005. Desing and testing of a locally made loop-type thermosyponic heat sink for stove-top thermoelectric generators, **Renewable Energy**, **30** (7): 1101-1116.
8. Chen, L., Sun, F., Wu, C., 2005. Thermoelectric-generator with linear phenomenological heat-transfer law, **Applied Energy**, **81** (4): 358-364.
9. Sun, W., Hu, P., Chen, Z., Jia, L., 2005. Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization, **Energy Conversion and Management**, **46** (5): 789–796.
10. Hsiao, Y.Y., Chang, W.C. Chen, S.L., 2010. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, **Energy**, **35** (3), 1447-1454.
11. Park, J., Li, X., 2007. An experimental and numerical investigation on the cross flow through gas diffusion layer in a PEM fuel cell with a serpentine flow channel, **Journal of Power Sources**, **163** (2): 853–863.
12. Garcí'a-Valverde R., Espinosa, N., Urbina, A., 2012. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation, **International Journal of Hydrogen Energy**, **37** (2): 1927-1938.

13. Placca, L., Kouta, R., Candusso, D., Blachot J., Charon W., 2010. Analysis of PEM fuel cell experimental data using principal component analysis and multi linear, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35** (10): 4582–4591.
14. Kunusch, C., Puleston, P., Mayosky, M., More, J., 2010. Characterization and experimental results in PEM fuel cell electrical behaviour, **International Journal of Hydrogen Energy**, **35** (11): 5876 – 5881.
15. Guldur, Ç., Güneş, S., Karçiçeği, D., PEM yakıt hücresi katodunda kullanılmak üzere platinin uçlu alaşımlarının sentezi, karakterizasyonu ve elektrokatalitik özelliklerinin incelenmesi, (Tubitak Projesi-1001)
16. Ay, F., Arslan M., 2010. PEM tipi yakıt hücreleri için grafit-polimer kompozit bipolar plaka geliştirilmesi, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, **7** (2): 73-79.
17. Chen, X., Chen, L., Guo, J, Chen, J., 2011. An available method exploiting the waste heat in a proton exchange membrane fuel cell system. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36** (10): 6099-6104.
18. Pan, Y., Chen, X., Chen, J., 2010. Performance and evaluation of a fuel cell–thermoelectric generator hybrid system, **Fuel Cells**, **10** (6): 1164-1170.
19. Rosendahl, L.A. Mortensen, P.V., Enkeshafi, A.A., 2011. Hybrid solid oxide fuel cell and thermoelectric generator for maximum power output in micro-CHP systems, **Journal of Electronic Materials**, **40** (5): 1111-1114.
20. Atik, K., 2007. Kaskat bağlı özdeş termoelektrik modüllerin performansının araştırılması. **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, **7** (1) : 1-5.
21. Ünsaç, A., 2010. Kriyojenik Isı Değiştiricisinde Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Karakterizyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 86s.
22. (Websayfası: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/1.2%20kW%20Ballard%20Nexa%20Fuel%20Cell.JPG/view>), (Erişim tarihi: Ocak 2014).
23. Larminie, J., Dicks, A., 2003. Fuel Cell Systems Explained. John Wiley & Sons Ltd, England, 418 pp.
24. (Web sayfası: <http://www.lairdtech.com/temhandbook/>), (Erişim tarihi: Ocak 2014).

25. Weng, C., Huang, M., 2013. A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator, **International Journal of Thermal Sciences**, **71**: 302 – 309.
26. Gou, X., Yang, S., Xiao, H., Ou, Q., 2013. A dynamic model for thermoelectric generator applied in waste heat recovery, **Energy**, **52**, 201-209.
27. Jang, J., Tsaj, Y., 2013. Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system, **Applied Thermal Engineering**, **51** (1-2): 677–689.
28. Gou, X., Xiao, H., Yang, S., 2010. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system, **Applied Energy**, **87** (10): 3131–3136.
29. Hsu, T., Huang, G., Chu, H., Yu, Ben., Yao, D., 2011. Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators, **Applied Energy**, **88** (4): 1291–1297.
30. Wu, C., 1996 Analysis of waste-heat thermoelectric power generators, **Applied Thermal Engineering**, **16** (1): 63–69.
31. Xin, G., Søren, J.A., Min, C., Søren, K.K., 2012. Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery, **International Journal of Hydrogen Energy**, **37** (10): 8490 – 8498.
32. Barelli, L., Bidini, G, Gallorini, F., Ottaviano, A., 2011. An energetic–exergetic analysis of a residential CHP system based on PEM fuel cell, **Applied Energy**, **88** (12): 4334–4342.
33. Barelli, L., Bidini, G, Gallorini, F., Ottaviano, A., 2012. Dynamic analysis of PEMFC-based CHP systems for domestic application, **Applied Energy**, **91** (1): 13–28.
34. Bollini, B.L., Luz, S.J., Silva, M.E., Machin, E.B., Pedroso, D.T., Tuna, C.E., 2014. Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects, **Applied Thermal Engineering**, **63** (1): 354–361.

35. Kjelstrup, S., Vie P.J.S., Akyalcin, L., Zefaniye, P., Pharoah, J.P., Burheim, O.S., 2013. The Seebeck coefficient and the Peltier effect in a polymer electrolyte membrane cell with two hydrogen electrodes, **Electrochimica Acta**, **59** (99): 166–175.
36. Karim, A.M., Federici, J.A., Vlachos, D.G., 2008. Portable power production from methanol in an integrated thermoelectric/microreactor system, **Journal of Power Sources**, **179** (1): 113 – 120.
37. Bensaid, S., Brignone, M., Ziggioni, A., Specchia S., 2012. High efficiency Thermo-Electric power generator, **International Journal of Hydrogen Energy**, **37** (2): 1385 – 1398.
38. Wang, Q., Li, L., Wang, C., 2009. Numerical study of thermoelectric characteristics of a planar solid oxide fuel cell with direct internal reforming of methane, **Journal of Power Sources**, **186** (2): 399 – 407.
39. Wang, K., Zeng, P., Ahn, J., Ronney D., 2013. A self-sustaining thermal transpiration gas pump and SOFC power generation system, **Proceedings of the Combustion Institute**, **34** (2): 3327 – 3334.
40. Ratkje, Q.S.K., Ottøy, M., Halseid, R., Strømgård, M., 1995. Thermoelectric power relevant for the solid-polymer-electrolyte fuel cell, **Journal of Membrane Science**, **107** (3): 219 – 228.
41. Zhao, P., Wang, J., Gao, L., Dai, Y., 2012. Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell, **International Journal of Hydrogen Energy**, **37** (4): 3382 – 3391.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Oğuzhan ÇALIŞIR  
 Uyuğu: Türkiye (TC)  
 Doğum Tarihi ve Yeri: 29 Haziran 1983, Afşin  
 Medeni Durumu: Evli  
 Tel: +90 541 873 03 13  
 Fax: +90 352 332 28 13  
 e-mail: [oguzhancalisir@gmail.com](mailto:oguzhancalisir@gmail.com)  
 Yazışma Adresi: Esentepe Mah. Ahmet Gazi Ayhan Bulvarı No:153/13 38060  
 Melikgazi/KAYSERİ

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	-----
Lisans	EÜ Makine Mühendisliği	2005
Lise	Çağlayan Lisesi, Antalya	2000

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2011- Halen	Mektes Enerji LTD. ŞTİ.-Kayseri	Uzman Mühendis
2010–2011	Dia Holding - Azerbaycan	Uzman Mühendis
2007–2010	Vemeks Mühendislik - Antalya	Uzman Mühendis

### YABANCI DİL

İngilizce

### YAYINLAR

- Doğan V., Çalışır O., 2011. Yerden ısıtma sistemlerinin boyutlandırılması, 685-697. *X.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 13-16 Nisan, 2011,İzmir, Makina Mühendisleri Odası, 14*
- Doğan V., Çalışır O., 2011. Döşemeden (yerden) ısıtma sistemlerinde hesap yöntemi, 667-681. *X.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 13-16 Nisan, 2011,İzmir, Makina Mühendisleri Odası, 15*
- Çalışır O., Doğan V., 2012. Döşemeden (yerden) ısıtma sistemlerinde hesap yöntemi, *Tesisat Mühendisliği, 130 : 41-50.*