



T.C.

DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER İLE
ENTEĞRE EDİLMİŞ BİR TERMÖELEKTRİK
JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan

GÖKBERK KARADİREK

İstanbul, 2024



T.C.

DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER İLE
ENTEĞRE EDİLMİŞ BİR TERMOELEKTRİK
JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan

GÖKBERK KARADİREK

202291085009

0009-0001-2522-0523

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Utku HELVACI

İstanbul, 2024

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Farklı Faz Değiştirici Malzemeler ile Entegre Edilmiş Bir Termoelektrik Jeneratör Modülünün Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

10.06.2024

GÖKBERK KARADİREK



YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV TUTANAĞI

Doküman No	FR.1.26
Yürürlük Tarihi	1.11.2017
Revizyon Tarihi	4.12.2020
Revizyon No	2
Sayfa	1 / 1

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Tarih : 05. / 07 / 2024

Anabilim/Anasanat Dalı : Makina...Mühendisliği.....

Öğrencinin Adı Soyadı : Gökberk Karadirek.....

Öğrenci No : 202291085009.....

Tez Danışmanının Adı Soyadı : Dr. Huseyin Utku Helvacı.....

İkinci Tez Danışmanının Adı Soyadı :

Tezin Başlığı : Farklı...Faz...Değiştirici...Malzemeler...ile...Entegre Edilmiş
Bir Termoelektrik Jeneratör Modülünün DeneySEL Olarak İncelenmesi

Doğuş Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin 32.Maddesi uyarınca yapılan değerlendirmeler sonunda;

☒ tezin kabul
edilmesine

☐ tezde düzeltme
verilmesine

☐ tezin
reddedilmesine

oy birliği / oy çokluğu ile karar verilmiştir. Gereği için arz olunur.

Danışman Üye

Üye

Üye

Üye

Üye

Anabilim/Anasanat Dalı Başkanı Onayı:

Doğuş Üniversitesi ("Üniversite") olarak kişisel verilerinizin güvenliği hakkında azami hassasiyet göstermekteyiz. Üniversite olarak, Üniversite ile ilişkili tüm şahıslara ait her türlü kişisel verinin 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu ("KVKK")'na uygun olarak işlenmesine ve gizliliğinin sağlanmasına büyük önem vermekteyiz. Anayasa m.20/3 ile tanınan "kişisel verilerinizin korunmasını isteme" hakkınızın bilincinde olarak, KVKK kapsamında tanımlı "Veri Sorumlusu" sıfatıyla, kişisel verilerinizi mevzuata uygun şekilde işlemekteyiz. Daha geniş açıklama için Doğuş Üniversitesi <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

As Doğuş University ("University"), we show maximum sensitivity about the security of your personal data. As a university, we attach great importance to the processing and confidentiality of all personal data of all individuals associated with the University in accordance with the Law No. 6698 on Protection of Personal Data ("KVKK"). Being aware of your right to "ask for the protection of your personal data" recognized by the constitution article 20/3, as "Data Controller" defined within the scope of KVKK, we process your personal data in accordance with the legislation. For a broader explanation you can visit <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

hakkımızda: about us kişisel-verilerin-korunmasi: protection of personal data

(Form No: FR-001, Revizyon Tarihi:30.09.2016, Revizyon No:00)

Adı ve Soyadı : Gökberk Karadirek
Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Utku Helvacı
Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans Tezi – 10.06.2024
Alanı : Makine Mühendisliği
Anahtar Kelimeler : Termoelektrik jeneratör (TEJ), faz değiştirici malzeme (FDM), atık ısı, elektrik üretimi

ÖZET

FARKLI FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER İLE ENTEGRE EDİLMİŞ BİR TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Dünya üzerinde fosil kaynaklar ile üretilen enerji sonucunda ortaya çıkan atık ısı sebebiyle elde edilen enerjinin büyük bir kısmından faydalanılamamaktadır. Bu çalışmanın amacı, enerji kaynağı olarak atık ısının kullanıldığı, termoelektrik jeneratörlerin, faz değiştirici malzemeler ile çalışması ve elektrik enerjisi üretimi sağlanmasıdır. Proje kapsamında atık ısı kaynağının ortamda bulunduğu sürece ek olarak, olmadığı süreçte de elektrik üretiminin sürekliliğinin sağlanması ve ayrıca farklı özelliklere sahip iki faz değiştirici malzemenin aynı şartlar altında kullanıldığında elektrik enerjisi üretimine etkisi incelenmiştir. Araştırma kapsamında, her biri ayrı iki aşamadan oluşan iki ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki farklı formda faz değiştirici malzeme için de aynı koşullar altında ve aynı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Her iki faz değiştirici malzemenin de daha yüksek değerde ve daha uzun süreli elektrik enerjisi üretimine imkân sağladığı gözlenmiştir. Faz değiştirici malzemelerin termoelektrik jeneratörlerin soğuk yüzeylerindeki sıcaklık dalgalanmalarını önlediği ve daha stabil bir sıcaklık aralığı yakalanmasını sağladığı saptanmıştır. Bulgular incelendiğinde, tasarlanmış bu sistemin düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilineceği sonucuna varılmıştır. Çalışma, termoelektrik jeneratörler ve faz değiştirici malzemelerin entegre olmuş sistemleri aracılığıyla enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji üretimi konularında bir bakış açısı sunmaktadır. Termoelektrik jeneratörler ve faz değiştirici malzemelerin birlikte kullanımını; atık ısı kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin sürekliliğini sağlama potansiyelini ortaya koymakta, bu alanda literatüre katkı sunmaktadır. Araştırmanın bulguları ve gelecek araştırmalar için önerilerinin sonraki süreçlerde yapılacak araştırmalarda yeni yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Name and Surname : Gökberk Karadirek
Supervisor : Assist. Prof. Hüseyin Utku Helvacı
Degree and Date : M.Sc. Thesis – 10.06.2024
Major : Mechanical Engineering
Key Words : Thermoelectric GENERATOR (TEG), phase change material (PCM), waste heat, electricity generation

ABSTRACT

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A THERMOELECTRIC GENERATOR MODULE INTEGRATED WITH DIFFERENT PHASE CHANGE MATERIALS

A significant portion of the produced energy remains untapped due to the waste heat generated by energy production from fossil fuels. The aim of this study is to utilize waste heat as an energy source, by integrating thermoelectric generators with phase change materials to generate electrical energy. Within the scope of this project, the continuity of electricity production is ensured both when the waste heat source is present and absent. Additionally, the impact of two different phase change materials with varying properties on electricity generation under the same conditions is investigated. As part of the research, two separate experiments, each consisting of two distinct phases, were conducted. These experiments were performed under the same conditions and durations for both forms of phase change materials. It was observed that both phase change materials enabled higher and more prolonged electricity generation. It was also found that the phase change materials prevented temperature fluctuations on the cold surfaces of the thermoelectric generators, maintaining a more stable temperature range. Upon examining the findings, it was concluded that this designed system could be used for electricity generation in low-temperature waste heat applications. The study offers a perspective on energy efficiency and sustainable energy production through integrated systems of thermoelectric generators and phase change materials. The combined use of thermoelectric generators and phase change materials demonstrates the potential for continuity of electricity generation through the efficient utilization of waste heat sources contributing to the literature in this field. It is believed that the findings of this research and the recommendations for future studies will aid in the development of new approaches in subsequent research efforts.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖZET

ABSTRACT

TABLolar LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
SİMGELER LİSTESİ	vi
KISALTMALAR	viii

GİRİŞ.....	1
------------	---

BİRİNCİ BÖLÜM ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

1.1. Çalışmanın Amacı.....	7
1.2. Tezin İçeriği	7
1.3. Literatür Araştırması.....	8

İKİNCİ BÖLÜM TERMoeLEKTRİK

2.1. Termoelektrik Etkiler.....	12
2.1.1. Seebeck Etkisi	13
2.1.2. Peltier Etkisi	15
2.1.3. Thomson Etkisi	17
2.2. Termoelektrik Malzemeler.....	18

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLER

3.1. Termoelektrik Jeneratörlerin Tarihçesi.....	20
3.2. Çalışma Prensibi	21
3.3. Termoelektrik Jeneratörlerin İç Yapısı	22
3.4. Termoelektrik Jeneratörlerin Verimi ve Tasarım Kriterleri	24
3.5. Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanım Alanları	25

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER

4.1. Faz Değiştirici Malzemelerde Isı Depolama	28
4.1.1. Duyulur Isı Depolama	28
4.1.2. Gizli Isı Depolama.....	29
4.2. Faz Değiştirici Malzemelerin Sahip Olması Gereken Özellikler	30
4.3. Faz Değiştirici Malzemelerin Kullanım Alanları.....	30
4.4. Faz Değiştirici Malzemelerinin Sınıflandırılması	31

4.4.1.Organik Faz Değiştirici Malzemeler	33
4.4.2.İnorganik Faz Değiştirici Malzemeler	34
4.4.3.Ötektik Faz Değiştirici Malzemeler	34
4.5.FDM'nin Çalışma Prensibi	35

BEşİNCİ BÖLÜM DENEY DÜZENEğİ

5.1.Deney Düzeneninde Kullanılan Malzemeler	38
5.2.Deney Düzenenęi Tasarımı	44
5.3.Deney Metodu	48
5.3.1.Deney 1	48
5.3.2.Deney 2	49

DENEY SONUÇLARI VE TARTIşMA	50
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKÇA	58

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 1 Termoelektrik Jeneratörlerin Uygulama Alanları	26
Tablo 2 Sulu NaCl ve KCl Çözeltileri İçin Donma-Erime ve Alt Soğutma Aralıkları	34
Tablo 3 Bazı Ötektik FDM'ler	35
Tablo 4 SP1848-27145 SA Modülü Özellikleri	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1. Yenilenebilir Enerji Görselleri	2
Şekil 2. Güneş Panelleri	3
Şekil 3. Rüzgâr Türbinleri	3
Şekil 4. Su Çarkları	4
Şekil 5. Seebeck Etkisi	14
Şekil 6. Peltier Etkisi	16
Şekil 7. Thomson Etkisi	18
Şekil 8. TEJ Modüllerinin Yapısı	21
Şekil 9. TEJ'lerin Fiziksel Etkileri	22
Şekil 10. Duyulur ve Gizli Isıların Faz Değişim Süreci Boyunca Sıcaklık Kontrolleri 27	
Şekil 11. Faz Değişiminde Sıcaklık-Zaman Diyagramı	28
Şekil 12. Faz Değiştirici Malzemelerin Sınıflandırılması	31
Şekil 13. Farklı türdeki FDM'lerin Genel Özellikleri	32
Şekil 14. Organik ve İnorganik FDM'lerin Avantajları ve Dezavantajları	32
Şekil 15. Organik Faz Değiştirici Malzemeler	33
Şekil 16. FDM'ye Sağlanan Enerji ile Sıcaklık Değişimi	36
Şekil 17. Isı Kaynağı	38
Şekil 18. Bağlantı Şekli	39
Şekil 19. Dimmer Anahtar	39
Şekil 20. Fan	40
Şekil 21. TEJ Soğuk Yüzey	41
Şekil 22. TEJ Sıcak Yüzey	41
Şekil 23. Termal Yapıştırıcı	42
Şekil 24. HIOKI LR 450	42
Şekil 25. FDM-1	43
Şekil 26. FDM-2	44

Şekil 27.	Deney Düzeneği İçin Oluşturulmuş Kutu.....	44
Şekil 28.	TEJ Bağlantı Kabloları	45
Şekil 29.	TEJ Kablo Bağlantı Şekli.....	45
Şekil 30.	Harici Isı Kaynağı Konulandırılması	46
Şekil 31.	Deney Düzeneği-1	47
Şekil 32.	Deney Düzeneği-2	47
Şekil 33.	FDM-1 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün sıcaklık dağılımları.....	51
Şekil 34.	FDM-1 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün yüzey sıcaklık farkları ve voltaj üretimi.....	53
Şekil 35.	FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün sıcaklık dağılımları.....	53
Şekil 36.	FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün yüzey sıcaklık farkları ve voltaj üretimi.....	55
Şekil 37.	FDM-1 ve FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün maksimum güç üretimi	56

SİMGELER LİSTESİ

A	:	Kesit Alan (m^2)
c_k	:	Katı Fazın Sabit Basıncındaki Özgöl Isı kapasitesi ($kJ/kg \cdot K$)
c_s	:	Sıvı Fazın Sabit Basıncındaki Özgöl Isı kapasitesi ($kJ/kg \cdot K$)
c_p	:	Sabit Basıncındaki Özgöl Isı Kapasitesi ($kJ/kg \cdot K$)
E	:	Üretilen Elektrik Enerjisi ($W \cdot \text{saat}$)
H_e	:	Erime Gizli Isısı (kJ/kg)
I	:	Elektrik Akımı (A)
k	:	Isı İletim Katsayısı ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
L	:	Uzunluk (m)
m	:	Kütle (g)
n	:	Termoeleman Çifti Sayısı
P	:	Güç (W)
P_y	:	Yük Direncinin Absorbe Ettiği Güç (W)
Q	:	Absorbe Edilen Isı Akısı (W)
R	:	Direnç (Ω)
R_y	:	Yük Direnci (Ω)
T	:	Mutlak Sıcaklık (K)
T'	:	Ortalama Mutlak Sıcaklık (K)
V	:	Voltaj (V)
ZT	:	Başarı Ölçüsü Değeri ($1 \cdot K^{-1}$)
α	:	Seebeck Katsayısı ($V \cdot K^{-1}$)
ΔT	:	Sıcaklık Farkı (K)

λ	:	Termal İletkenlik ($W \cdot K^{-1}$)
π	:	Peltier Katsayısı (V)
ρ	:	Elektrik Öz Direnci ($\Omega \cdot m$)
σ	:	Elektriksel İletkenlik ($1 \cdot \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)
τ	:	Thomson Katsayısı ($V \cdot K^{-1}$)
W	:	Güç Birimi (Watt)
kW	:	Güç Birimi / 10^3 (KiloWatt)
mV	:	Güç Birimi / 10^{-3} (MiliVolt)
mW	:	Güç Birimi / 10^{-3} (MiliWatt)

KISALTMALAR

AC	:	Alternatif Akım
Bi₂Te₃	:	Bizmut Tellürür
DC	:	Doğru Akım
EMF	:	Elektromotor Kuvvet
FDM	:	Faz Değiştirici Malzeme
PbTe	:	Kurşun Tellürür
PDMS	:	Polidimetilsiloksan
PEG	:	Polietilen Glikoller
PV	:	Fotovoltaik
SiGe	:	Silikon Germanyum
TE	:	Termoelektrik
TEJ	:	Termoelektrik Jeneratör

GİRİŞ

Dünyanın enerji ihtiyacı, sürekli yükselen insan popülasyonu sebebiyle günden güne artmaktadır. Özellikle endüstri devrimi sonrası gerek teknolojinin ilerlemesi gerek insanların yaşam şekilleri enerji gereksinimini arttırmıştır. 1970’lerde ortaya çıkan ve sonrasında süregelen petrol krizi ile birçok enerji sorunu baş göstermeye başlamıştır. Enerji gereksiniminin artması ile doğan ihtiyaç; kömür, doğalgaz ve benzeri fosil yakıtların daha çok kullanılmasına ve çevreye verilen zararın artmasına yol açmıştır. Toprak kirliliği, su kirliliği, karbon emisyonu, hava kirliliği gibi birçok noktada doğaya verilen tahribat artmıştır (Öymen ve Ömeroğlu, 2020). Hayvan türleri yok olma tehlikesi ile karşı karşıya gelmiş, bitki örtüsü zarar görmüş veya yer yer yok olmaya başlamıştır. Çevre ve enerji konuları aslında birbirinden ayrı görünen ama birbiri ile bağlantısı mutlak olan iki konudur. Fosil yakıt kullanımı sebebi ile ortaya çıkan doğa tahribatı ve enerji gereksiniminin önlenemez artışı, alternatif enerji kaynaklarına yönelime bir zemin hazırlamıştır. Ortaya çıkan bu eğilim farklı fikirlerin belirmesine ön ayak olmuştur. Bu fikirler ışığında, çözüm arayışlarındaki dikkat doğal kaynaklara yönlendirilmiştir. Doğal kaynaklar sayesinde çevre kirliliğine sebep olan faktörlerin etkilerinin azaltılması ayrıca planlanmaktadır. Ayrıca karbon nötr bir döngü gerçekleştiğinden, çağımızın en büyük sorunlarından olan fosil yakıt kullanımına bağlı karbon salınımının artması sorununa da bir çözüm olmaktadır (Erdoğan, 2020). Ekonomik açıdan bakılacak olunur ise, yenilenebilir enerji, kaynakların azalması ve ihtiyacın çoğalması sebebiyle artan maliyetlerin önüne geçilmesi açısından son derece önemli bir konuma sahiptir. Bu sebepler ışığında birçok ülkenin enerji politikaları da bu bağlamda geliştirilmektedir. Böylece yerel ve bölgesel bir şekilde doğal enerji kaynakları kullanımında artış gözleneceği öngörülmektedir (Aydoğdu, 2021).

Doğal enerji kaynakları yani yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesinin, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesinin önüne geçilememesi ve fosil yakıt kaynaklarının çevreyi tahrip etmesi dışında da sebepleri vardır. Bu sebeplerin en önde geleni ise sürdürülebilir olmasıdır. Küresel ölçekte, hali hazırda kabul gören bir kavram olan sürdürülebilirlik, enerji ihtiyacı ve kullanımı konusunda da önemli bir yer arz etmektedir. Enerji kapsamında sürdürülebilirlik yalnızca doğal kaynaklardan sağlanması mümkün olan bir durumdur. Yenilenebilir enerji evrenin kendi öz kaynakları kullanılarak enerji üretilmesi ve bu enerji kaynağının sonsuz bir döngüde

olması olarak tanımlanabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları 7 temel başlıkta incelenebilir. Bu kaynaklar; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, dalga ve gel-git enerjisi olarak sınıflandırılabilir. Hangi kaynağın en verimli olduğu bölgeye ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişebilmektedir. Her bir kaynaktan, kendi içerisinde özelleşmiş makinelerle donatılmış birçok sistem kullanılarak maksimum verim elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu sistemlere örnek olarak, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, jeotermal enerji santralleri, gelgit türbinleri ve benzeri sistemler gösterilebilir (Öymen ve Ömeroğlu, 2020).



Şekil 1. Yenilenebilir Enerji Görselleri

Kaynak: GD. (t.y.). Yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirme hizmetleri. Erişim adresi: <https://www.netgd.com.tr/tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-degerleme-hizmetleri>

Güneş enerjisi; isminden anlaşılacağı üzere kaynağı güneş olup, günümüzde en çok enerji sağlanan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu sebeple, hali hazırda en çok yatırım yapılan yenilenebilir enerji alanı olarak da popülerliğini korumaktadır. Ancak güneşin yaydığı enerjinin azımsanamayacak kadarı yeryüzüne ulaşmadan yok olmaktadır. Bu sebep ile güneş enerjisine alternatif olarak kullanılabilecek projeler geliştirilmeye çalışılmaya devam etmektedir.



Şekil 2. Güneş Panelleri

Kaynak: Serdar. (t.y.). Güneş enerjisinden elektrik üretimi. Erişim adresi: <https://www.serdar.com.tr/tr/gunes-enerjisinden-elektrik-uretimi>

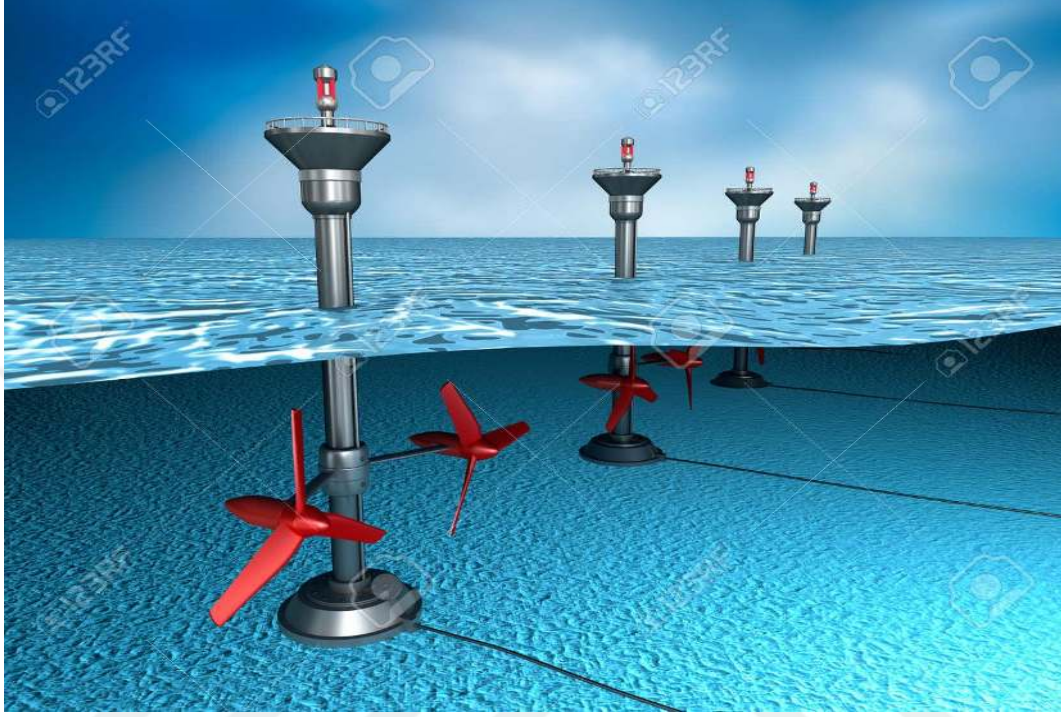
Rüzgâr enerjisi; yenilenebilir enerji kaynakları arasında bilinen en eski kaynaklardandır. Bu enerji daha çok eski yıllarda rüzgâr değirmenlerinde, su pompalama ve buğday öğütme işlemlerinde kullanılmaktaydı. Günümüzde de hali hazırda elektrik üretimi için bu enerjiden yararlanılmaktadır (Kaldellis ve Zafirakis, 2011).



Şekil 3. Rüzgâr Türbinleri

Kaynak: Enerji Teknolojileri. (2015). Rüzgâr enerjisi. Erişim adresi: <https://enerjiteknolojileri.wordpress.com/2015/04/16/ruzgar-enerjisi/>

Dalga ve gel-git enerji kaynakları; okyanuslar ve denizlerdeki dalga enerjisi, gel-git enerjisi, deniz akımları enerjisi, tuz değişimi etkiler ile enerji üretilebilen enerji kaynaklarıdır.



şekil 4. Su arkları

Kaynak: Elektrikde. (2019). Gelgit enerjisinin elektrik üretiminde kullanılması. Erişim adresi: <https://www.elektrikde.com/gelgit-enerjisinin-elektrik-uretiminde-kullanilmasi/>

Bu sistemler ile üretilen enerji ise, farklı türlerde ortaya çıkabilir. Bunlardan başlıcaları elektrik ve ısınma gibi yaşamsal öneme sahip enerji türlerdir. Elektrik, günlük hayatta en çok tüketilen ve neredeyse yaşam kaynağı durumunda olan bir enerji türü olduğundan, çoğu yenilenebilir enerji sistemi elektrik üretimi için geliştirilmektedir. Bunun başlıca sebeplerine değinilecek olunur ise elektrik diğer enerji çeşitlerine kolaylıkla dönüştürülebilen ve uygulama alanı genişliği açısından fazlasıyla geniş bir yelpazeye sahip bir enerji biçimidir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Bahsedilen yenilenebilir enerji kaynakları sürdürülebilir ve çevre dostu olmaları sebebi ile kullanımı günden güne arttırılmaya çalışılan enerji kaynaklarıdır. Enerji üretim sürecinde, geri dönölmesi zor olan çevresel tahribatlara yol açmadan, kuşaklararası kullanım benimsenmelidir. Bu bağlamda, tüm enerji kaynaklarından

yapılan üretim yeni teknolojilerle değerlendirilmeli, zenginleştirilmeli, sürdürülebilmelidir.

Öte yandan yenilenebilir enerji kaynakları her ne kadar gelişime açık ve ilerlemekte olan bir konu olsa da günümüzde fosil yakıtlar ile üretilen enerji dünya üzerinde üretilen enerjinin %80'inden fazlasını oluşturmaktadır (Arı ve Yılmaz, 2023). Ancak teknolojik gelişmelerin yetersizliği sebebi ile fosil yakıtlar ile enerji üretiminde kazancın yanı sıra yüksek miktarda kaybedilen enerji de mevcuttur. Bu kayıpların en önde geleni ise atık ısıdır. Enerji dönüşümleri esnasında ortaya çıkan ısı enerjisinin büyük bir kısmı faydalanılamayan bir enerji olarak kaybedilmektedir. Bu kayıp %50 ile %70 gibi azımsanamayacak kadar büyük bir orandadır (Oyedepo ve Fakaye, 2021). Günümüzde fabrikalar, fırınlar ve üretim tesisleri olmak üzere birçok yerde atık ısı meydana gelmektedir. Bu ısıdan faydalanılarak kaybedilen enerjinin bir kısmı geri kazanılabilir. Atık ısının enerjiye dönüştürülmesi, atıkların bir kaynak olarak görülmesini sağlarken çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar da sağlar. Geleneksel yenilenebilir enerji sistemlerinin yanı sıra, atık ısı gibi kayıp sayılabilecek bir enerjinin geri dönüştürülmesini sağlayan yenilenebilir enerji sistemleri de mevcuttur.

Atık ısıyı yararlı bir enerjiye dönüştürerek fayda sağlamak için termoelektrik (TE) malzemeler önemli bir seçenek olabilmektedir. Bu üretimi sağlayacak malzemelerin, çalışma prensibi termoelektrik etkilere dayanmaktadır. Termoelektrik etkiler 3 farklı etki olarak görülmektedir. Bu etkiler; Seebeck Etkisi, Peltier Etkisi ve Thomson Etkisi'dir. Seebeck Etkisi ile ortaya çıkan enerji, elektrik enerjisidir (Rowe, 2006). Elektrik enerjisinin üretilmesi için kullanılan modüller ise termoelektrik modüller olarak adlandırılmaktadır. Temel olarak sıcaklık farkından yararlanılarak elektrik üretilmesi sağlanmaktadır. Bu proje kapsamında kullanılan Seebeck Etkisi ile çalışan ve termoelektrik jeneratör (TEJ) olarak adlandırılan çeşididir. Bu jeneratör sıcak yüzeyi olarak adlandırılan yüzeyinin ısıtılması ile elektrik üretmektedir. Termoelektrik jeneratörler genellikle; askeri uygulamalar ve uzay uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu proje kapsamında atık ısıdan elektrik üretilmesi hedeflendiği için termoelektrik jeneratörler kullanılmıştır.

Termoelektrik jeneratörler atık ısıdan elektrik üretimi elde edilmesini sağlamaktadır ancak ısıнын atık olarak kalmasını engelleyememekte ve yalnızca atık ısı kaynağı var olduğu sürece işlevsel olmaktadır. Atık ısıнын termoelektrik jeneratör modülünün soğuk yüzeyinde, ortamı ısıtmayacak şekilde depolanabilmesi sayesinde sistem her iki yönlü olarak çalıştırılabilmektedir. Bu depolama faz değıştirici malzemeler ile sağlanabilmektedir. Atık ısı kaynağının var olmadığı sürede sıcak yüzey olarak adlandırılan yüzey soğumaktadır. Soğuk olarak adlandırılan yüzey ise bulunduğu ortamda depolanan ısıнын, ortama geri verilmesi ile sıcaklığını arttırabilmektedir. Bu sayede sistem her iki yönlü çalışabilmekte ve elektrik üretimi devam edebilmektedir. Bu depolama sürecinde kullanılan faz değıştirici malzemeler sisteme tersinir çalışabilme özelliğı kazandırmaktadır. Bu sayede sistemde bir döngü oluşturulacak ve atık ısı kaynağının ortamda bulunduğu süre boyunca sıcaklık farkı ile elektrik üretilecek ve aynı zamanda atık ısı da depolanacaktır. Atık ısı kaynağı var olmadığı süreçte ise depolanan ısı ortama verilerek sistemin elektrik üretimine devam etmesi sağlanacaktır.

Bu depolama için kullanılan faz değıştiren malzemeler herhangi bir ısıl enerjiyi gizli olarak depolayabilme yetisine sahip olan malzemeler olarak bilinmektedir. Nitekim bu malzemelerin en önemli özellikleri de bu yapılarından kaynaklanmaktadır. Faz değıştirici malzemeler ortam sıcaklıklarına bağılı olarak faz değışimine uğrarlar. Bu faz değışimleri katı halden sıvı hale doğru gerçekleşen bir döngüde sağlanır. Bu faz değışimleri sırasında ortaya çıkan ısı durumu, endotermik olarak gerçekleşir. Bu özellik de ortamdaki ısıнын enerjisinin faz değıştirici malzemeler ile absorplanması sağlanmaktadır. Faz değıştirici malzemeler TEJ'ler ile entegre olarak kullanılmakta ve birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının artması, termal stabilite sağlanması, iki yönlü elektrik üretimi gerçekleştirmesi ve TEJ modülünün güvenli bir şekilde çalışmasının sağlanması olarak sıralanabilir.

BİRİNCİ BÖLÜM

ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu bölümde tez çalışmasının genel amacı, kapsamı ve kaynak taraması hakkında detaylı bilgilendirmeler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, termoelektrik jeneratörlerin, faz değiştirici malzemeler ile entegre bir şekilde çalışması sonucunda elektrik enerjisi üretilmesi konu olarak ele alınacaktır. Projenin kapsamı ise atık ısı kaynağının var olduğu sürece ek olarak, var olmadığı süreçlerde de elektrik üretiminin devamlılığının sağlanması ve farklı özelliklere sahip iki faz değiştirici malzemenin sistemin elektrik üretimine olan etkisi incelenmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, enerji kaynağı olarak atık ısının kullanıldığı FDM ile entegre bir TEJ modülünden elektrik üretilmesidir. Bu kapsamda, TEJ modülü tasarlanacak, imal edilecek ve deneysel testleri gerçekleştirilecektir. FDM olarak farklı erime sıcaklığı ve termofiziksel özelliklere sahip iki farklı malzeme kullanılacak ve bu malzemelerin TEJ modüllerine uygulanabilirliği ve elektrik üretimine olan etkileri incelenecektir.

1.2. Tezin İçeriği

Bu çalışma kapsamında, atık ısı ile kaybedilen enerjinin geri kazanılabilmesi üzerine bir deney düzeneği tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım sırasında, 4 adet SP1848-27145 SA model termoelektrik jeneratör ve 2 farklı forma sahip faz değiştirici malzeme kullanılmıştır. Termoelektrik jeneratörlerin soğuk taraflarına faz değiştirici malzemelerin yerleştirilmesi ile başlatılan deneyin ilk bölümünde, ayarlanabilir bir ısı kaynağı ile ısıtılmış olan termoelektrik jeneratörlerin sıcak yüzeylerinin sıcaklıkları artmaya başlamaktadır. Bu sırada ortamdaki ısıyı üzerine çeken faz değiştirici malzemeler sayesinde termoelektrik jeneratörlerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı korunmuştur ve/veya artmıştır. Bu sayede elektrik üretimi sağlanmıştır. Aynı deney farklı faz değiştirici malzeme ile tekrarlanmış ve her iki deneyde de sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, termoelektrik etkilerden bahsedilmiştir. Her etki ayrı ayrı anlatılmıştır. Ayrıca bu etkileri gösteren ve kullanımı en yaygın malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise deney düzeneğinin en önemli parçası olan ve elektrik üretimini gerçekleştiren termoelektrik jeneratörler hakkında çeşitli bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler; tarihçesi, çalışma prensibi, iç yapısı, tasarım kriterleri ve verimlilikleri gibi başlıkları kapsamaktadır. Dördüncü bölümde ise faz değiştirici malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir. Faz değiştirici malzemelerin içeriği ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, deney düzeneği anlatılmıştır. Deney düzeneğinin tasarım kriterlerinde göz önünde bulundurulan noktalar, düzeneğin kurulumunda kullanılan malzemeler ve bu deney gerçekleştirilirken izlenmiş olan yöntem anlatılmıştır. Altıncı bölümünde ise deney sonuçları, bulgular, tartışma ve geleceğe yönelik yapılabilecek geliştirme önerileri yer almaktadır. Bu sonuçlar grafiklerle desteklenerek, literatürde yer alan konu ile ilgili araştırmalar ile yorumlanmıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Literatürde FDM ile bütünleşik biçimde çalışan farklı TEJ uygulamalarına yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada yapılan kaynak taramasında incelenen makaleler ve ana sonuçları aşağıda yer almıştır.

Byon ve Jeong (2020), enerji toplama bloğu olarak isimlendirdikleri termoelektrik jeneratör ve faz değişim malzemesinin entegre edildiği bir sistem tasarlayıp imal etmişlerdir. İmal edilen sistem binaların dış duvarlarındaki atık ısıyı toplayıp elektrik üretmektedir. Mevcut sistem ısıyı Seebeck etkisine dayanarak elektriğe dönüştürmektedir. Bu etki TEJ'in iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak değişmektedir. Bu amaçla, TEJ'in soğuk yüzeyine ısı emici görevi yapan bir faz değişim malzemesi kullanmışlardır. İmal edilen sistemin deneysel testlerinde hesaplanan temsili duvar sıcaklıkları ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Sonuçlar mevcut sistemin 0.03 W ve 0.3V ortalama güç ve voltaj ile bir yılda 2.1 kW'lık elektrik üretimi göstermiştir.

Jaworski vd. (2016), ısı kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanıldığı bir TEJ tasarlamışlardır. Soğutma yöntemi olarak FDM kullanılmış ve soğuk taraftan duyulur ve gizli formda ısıyı alarak sıcaklığını düşük tutmaya yardımcı olmuştur. Sistemin performans karakteristikleri deneysel olarak üretilen voltaj ve akım değerleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında FDM'lerin, TEJ'ler ile kullanımının uygun olduğunu sonuca varılmıştır.

Başka bir çalışmada Tuoi vd. (2020), FDM ile entegre edilmiş ısı kaynağı olarak ortam sıcaklığı değişimini kullanan bir termoelektrik jeneratörün teorik ve deneysel incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Sistem ortam sıcaklığının 5°C'den 35°C'ye değiştiği koşullarda 0.6 mW maksimum güç üretimi gerçekleştirmiştir.

Liao vd. (2020), aynı deney esnasında tek faz değiştirici malzemesi (FDM) yerine iki farklı formda FDM kullanan yeni bir termoelektrik enerji üretme cihazının performansı incelenmektedir. Deneysel sonuçlar, çift FDM tabanlı cihazın ortalama güç çıkışının tek FDM tabanlı cihazdan %35,8 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Tek FDM cihazlarının ortalama güç çıkışı 0.5558 mW iken, çift FDM cihazının ortalama güç çıkışı 0.8144 mW olarak ölçülmüştür. Çift FDM tabanlı termoelektrik enerji toplama cihazı, geniş sıcaklık aralıklarında daha dengeli bir güç üretimi sağlamaktadır.

Liu vd. (2016), araç egzozlarında atık ısı olarak kaybedilen enerjinin geri kazanılması için iki farklı TEJ prototipi modellemiş ve incelemiştir. Bu deney prototiplerinin ilki tek aşamalı TEJ sistemine ikincisi ise iki aşamalı bir TEJ sistemine sahiptir. Tek aşamalı TEJ sisteminin termal verimliliği %4,04 iken iki aşamalı TEJ sisteminin termal verimliliği %5,35 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre iki aşamalı TEJ'in termal verimliliği, aynı koşullarda tek aşamalı TEJ'e göre %32 daha yüksek olarak hesaplanmıştır.

Elefsiniotis vd. (2020), termal enerji depolama için organik ve inorganik faz değiştirici malzemelerin (FDM'ler) performansını karşılaştırarak bir TEJ ile değerlendirilmesini ele alıyor. Çalışma, pozitif (+35°C ila -5°C) ve negatif (+5°C ila -35°C) sıcaklık aralıklarındaki performansı inceliyor. Çalışmada, inorganik

malzemelerin daha fazla enerji üretebilmesine rağmen, kap malzemesine karşı daha korozif oldukları görülmüştür.

Gao vd. (2019), raylı sistemlerden termoelektrik enerji hasadı için bir prototip geliştirilmiştir. Bu sistem ile uzak ve şebeke dışı bölgelerde ray kenarındaki sensörlerin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Prototip, 8°C'den 29,2°C'ye kadar termal gradyanlarda 5,8mW ile 316,8mW arasında güç üretebilmektedir. Geliştirilen sistem, cep telefonu gibi cihazları şarj edebilmiştir.

Yap, Naayagi ve Woo (2016), insan vücudundan elde edilen ısı enerjisinin termoelektrik jeneratör (TEJ) kullanılarak mobil cihazların şarj edilmesi amacıyla nasıl kullanılabilirliğini çalışmıştır. TEJ'lerin farklı sıcaklık farkları ile nasıl çalıştığı, verimlilikleri ve çeşitli kullanım alanları ele alınmış ve vücut sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki farkın küçük olması durumunda elde edilen voltajın düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak kol tarafından üretilen vücut ısısının, uygun soğutma uygulanması durumunda sürekli olarak, maksimum 150 mV gerilim elde etmek için kullanılabilirliği görülmüştür.

Yu, Youn ve Song (2021) grafen aerogelle desteklenen faz değiştirici malzeme (FDM) kompozitlerine polidimetilsiloksan (PDMS) entegrasyonu ile termoelektrik enerji hasat verimliliğinin artırılması hakkındaki çalışmada FCM kompozitlerinin faz geçişi sırasında mekanik özellikleri iyileştirmek ve hacim küçülmesini en aza indirmek hedeflenmiştir. Araştırmanın sonuçları PDMS ile modifiye edilmiş grafen aerogellerin, faz değiştiren malzemelerin hacim küçülmesini ve sızıntı sorunlarını etkin bir şekilde azalttığını göstermektedir.

Gürbüz vd. (2023) güneş enerjisi sistemlerinde hem pasif hem de aktif soğutma yöntemlerini kullanarak verimliliği artırmayı hedefleyen yeni bir hibrit sistem tasarımı üzerine çalışmıştır. PV panellerin verimliliğini artırmak amacıyla termal yönetim sistemleri geliştirilmesi hedeflenmiş, PV panellerin arka yüzeyine yerleştirilen faz değiştirici malzemeler (FDM) ile pasif soğutma sağlanırken, termal elektrik jeneratörü (TEJ) kullanılarak aktif soğutma yapılmıştır. Herhangi bir modifikasyon yapılmadan deney düzeneğine adapte edilen panel ve PV-FDM-TEJ sistemi karşılaştırılmış ve

hibrit sistemin güç çıktısı daha yüksek bulunmuş, ayrıca standart PV panel verimliliğinin yaklaşık %30'dan %35,2'ye çıktığını göstermiştir.



İKİNCİ BÖLÜM

TERMoeLEKTRİK

Termoelektrik, elektronların bir iletken malzeme üzerinde termal olarak uyarılması ile başlayan akışın sonucunda ortaya çıkan ısı ve elektrik etkileşimidir. Termoelektrik etki kısaca, farklı sıcaklıklardaki malzemeler arasında elektrik akımı ve gerilim oluşması veya farklı gerilim ve elektrik akımlarında da sıcaklık farklarının oluşması olgusu olarak tanımlanabilir. Konu ile ilgili ilk araştırma Alman asıllı fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından, 19. yüzyılın başlarında yapılmıştır. Sonrasında ise 1830'lu yıllarda Fransız fizikçi Jean Charles Athanase Peltier tarafından geliştirilen fikir, son halini ise 1850'li yıllarda İngiliz fizikçi William Thomson tarafından almıştır (Rowe, 2006).

2.1. Termoelektrik Etkiler

Rowe (2006) ise termoelektrik etkileri şu şekilde tanımlamıştır: "Termoelektrik etki, farklı sıcaklıklardaki iki farklı iletken veya yarı iletken malzemenin birleştirilmesiyle oluşan bir elektromotor kuvvettir (EMF)". Bu EMF, sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır ve termoelektrik jeneratörlerin çalışma prensibini oluşturur. Seebeck, Peltier ve Thomson olarak 3 temel etki olarak tasnif edilir. Bu etkiler çalışmayı yapan bilim insanlarından ismini almakta olup her biri, bir önce yapılmış olan çalışmanın geliştirilmesi neticesinde ortaya çıkmıştır.

Termoelektrik etki, ısı ve elektrik enerjisinin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan bir fenomendir. Sıcaklık farkları bulunan malzemeler arasında elektrik akımı ve gerilim üretme veya tam tersi, elektrik akımı ile sıcaklık farkı yaratması sebebiyle; enerji dönüşümü, sıcaklık kontrolü, ölçüm gibi birçok alanda önemli bir konumda yer almaktadır (DiSalvo, 1999). Termoelektrik malzemeler ise termoelektrik etkinin özelliklerini göstermesine izin veren genellikle yarı iletken malzemelerdir. Bu malzemelerin performansı, Seebeck Katsayıları, elektriksel ve termal iletkenlik gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Yoshihama ve Kaneko, 2020).

Termoelektrik etki, birçok alanda kullanılabilmektedir. Bunlardan başlıcaları, termoelektrik jeneratörler ve termoelektrik soğutma sistemleridir. Bunun dışında

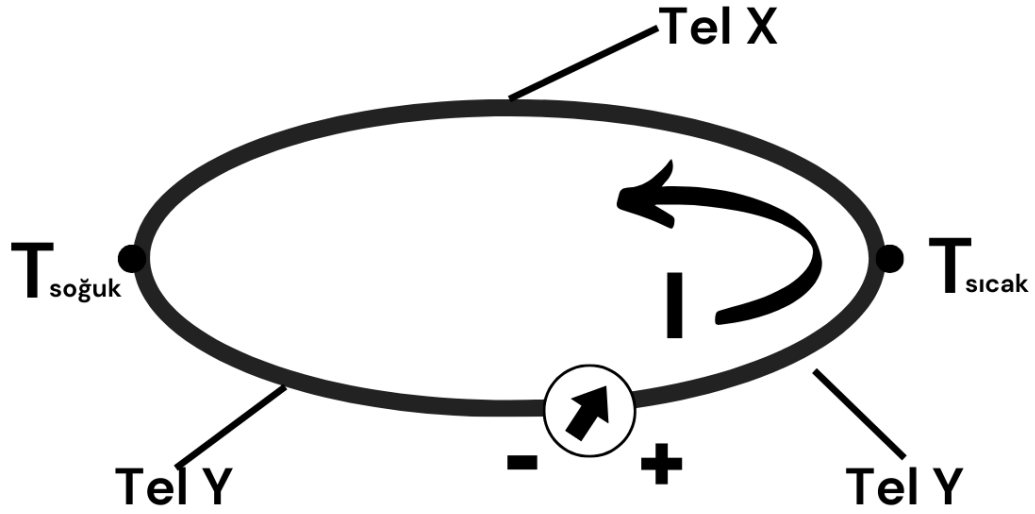
termoelektrik teknolojiler çeşitli alanlarda da kullanımlara sahiptirler. Otomotiv, savunma sanayi, uzay, tüketici elektroniği gibi birçok sektörde kullanılmaktadırlar. Özellikle son yıllarda termoelektrik malzemelerin performansını arttırmak ve verimliliklerini geliştirmek uygulama alanlarını daha da genişletmiştir.

2.1.1. Seebeck Etkisi

Isı ve elektrik enerjisi arasındaki etkileşim sonucunda oluşan bir etkidir. Enerji dönüşümü ve sıcaklık yönetimi gibi alanlarda önemli bir yere sahiptir. Bu etkiler arasında en bilineni belki de bahsi geçen etki olan Seebeck etkisidir. 1800'lü yılların ilk çeyreğinde yapılmış olan çalışmalar sonucu ispatlanmıştır. Birbirinden farklı sıcaklık değerlerine sahip iki farklı iletken ya da yarı iletkenin etkileşimi sonucu oluşan bir EMF'dir.

Tritt (2011) ise Seebeck Etkisi'ni şöyle tanımlamıştır: "Seebeck etkisi, bir sıcaklık farkının doğrudan elektriğe dönüştürülmesidir.". Seebeck etkisi kısaca malzemelerin sıcaklık gradyanlarına maruz kalmaları sonucunda elektronların ve pozitif yük taşıyıcılarının farklı enerji seviyelerine sahip olmasından kaynaklanır.

Malzemeler ısıtıldığında, farklı içeriklere sahip olmaları sebebi ile sıcaklıkları arasında fark oluşmaktadır. Sıcak taraftaki yük taşıyıcıları daha yüksek enerji miktarına sahipken soğuk taraftaki yük taşıyıcıları sıcak tarafa göre daha düşük enerji miktarına sahiptirler. Bu enerji farkı neticesiyle enerjinin sıcak taraftan soğuk tarafa hareket etmesi neticesiyle elektrik akımının oluşmasına sebep olur. Bu sayede elektrik üretilmektedir. Şekil 5'te Seebeck Etkisi şematik olarak gösterilmiştir.



Seebeck Etkisi

Şekil 5. Seebeck Etkisi

Kaynak: Uyarlanmıştır: Pamukkale Üniversitesi. (t.y.). Thermoelectric effects. Erişim adresi: <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/en/sayfa/thermoelectric-effects-2>

Seebeck Katsayısı ise bir malzemenin termoelektrik dinamiklerine göre performansı hakkında fikir edinilmesini sağlayan önemli bir parametre olarak önümüze çıkmaktadır. Birim sıcaklık farkı başına oluşan gerilim olarak tanımlanabilir. Volt/Kelvin birimi ile ifade edilir. Yüksek Seebeck Katsayısı'na sahip olan malzemeler, verimlilik yönünden daha üsttedirler.

Buna ek olarak, Seebeck Etkisi sonucu üretilen voltajı hesaplamak için kullanılan denklem ise Denklem 2.1.'de gösterilmiştir.

$$\alpha_x - \alpha_y = \frac{V_{Seebeck}}{T_{Sıcak} - T_{Soğuk}} \quad 2.1.$$

Kullanım alanlarına bakılacak olunur ise Seebeck Etkisi, endüstriyel ve teknolojik alanlarda oldukça önemli bir konumda kendine yer bulmaktadır. En yaygın kullanım alanları ise şunlardır: 'termoelektrik jeneratörler', 'otomotiv', 'uzay endüstrisi' olmak üzere çeşitlilik göstermektedirler. Rowe 2006, termoelektrik jeneratörleri şöyle tanımlamıştır: "Termoelektrik jeneratörler, hareketli parçası

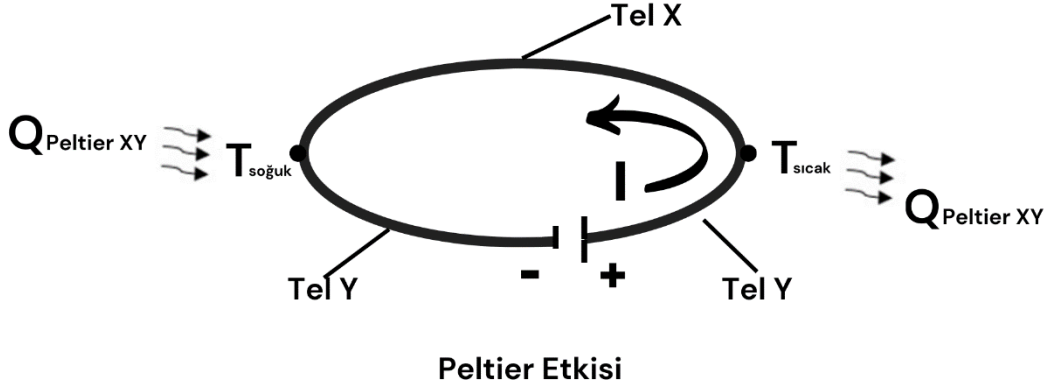
olmayan, sessiz ve güvenilir enerji dönüşüm cihazlarıdır. Atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştürerek enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptirler.". Seebeck etkisinin bir diğer kullanım alanı da sıcaklık ölçümüdür. Sıcaklık ölçümü için kullanılan termokuplların temelini oluşturmaktadır. Termokupllar, farklı sıcaklıklardaki iki farklı metalin birleştirilmesiyle oluşan ve sıcaklık farkına bağlı olarak bir gerilim üreten cihazlardır. Bu cihazlar gerilim, sıcaklık ölçümü için de oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Sonuç olarak Seebeck Etkisi, ısı ve elektrik enerjisi arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan günümüz teknolojisinde de önemli bir konumda bulunan bir olgudur. Sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından da oldukça önemli bir yere sahiptir. Buna ek olarak, termoelektrik malzeme performanslarının gelişmesi ile kullanım alanının fazlasıyla yaygınlaşacağı öngörülmektedir (Snyder ve Toberer, 2008).

2.1.2. Peltier Etkisi

Peltier Etkisi elektrik akımının bir termoelektrik malzemeden geçtiğinde ısı emilimi ve salınımı ile sonuçlanan bir süreç olarak tanımlanabilir. 1834 yılında Jean Charles Athanase Peltier tarafından keşfedilmiştir. Bu etki temelinde termoelektrik malzemeden elektrik akımı geçtiğinde bir bağlantı noktasında ısı emilimi diğer bağlantı noktasında ise ısı yayılımı olarak gerçekleşir. Bu sayede Peltier Etkisi ile soğutma ve ısıtma uygulamaları yapılabilir. Riffat ve Ma (2003) şu şekilde tanımlamıştır: "Peltier Etkisi, bir elektrik akımının bir termoelektrik çiftten geçtiği zaman, bir bağlantı noktasında ısı emilimi ve diğer bağlantı noktasında ısı salınımı ile sonuçlanan bir süreçtir.". Peltier Katsayısı ise bir malzemenin Peltier Etkisi'ne yatkınlığını belirleyen önemli bir parametredir. Emilen ve salınan ısı miktarının birim elektrik başına düşen kısmı olarak tanımlanabilir.

Peltier Etkisi, Seebeck Etkisi'nin keşfi sonrası araştırmaların devam ettirilmesi sayesinde ortaya çıkarılmış bir fenomendir. Bu ardı ardına keşifler arasında mutlak bir ilişki söz konusudur. Peltier Etkisi kısaca, ısının, elektrik enerjisine dönüşmesidir. Bu olay, tam tersi olan elektrik enerjisinin ısı enerjisine doğrudan dönüşümünü de ifade edebilmektedir. Doğru akımın bir devre üzerinden geçmesi ile termoelektrik bir

modülün plakalarının birleşme noktalarında sıcaklık farkı meydana gelir. Bir plaka soğurken diğer plaka ısınır. Peltier Etkisi, Şekil 6’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Peltier Etkisi

Kaynak: Uyarlanmıştır: Pamukkale Üniversitesi. (t.y.). Thermoelectric effects. Erişim adresi: <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/en/sayfa/thermoelectric-effects-2>

Ek olarak, Peltier ve Seebeck Katsayıları arasındaki ilişki Denklem 2.2.’de gösterilmiştir.

$$\pi_{xy} = \alpha_{xy} * T \quad 2.2.$$

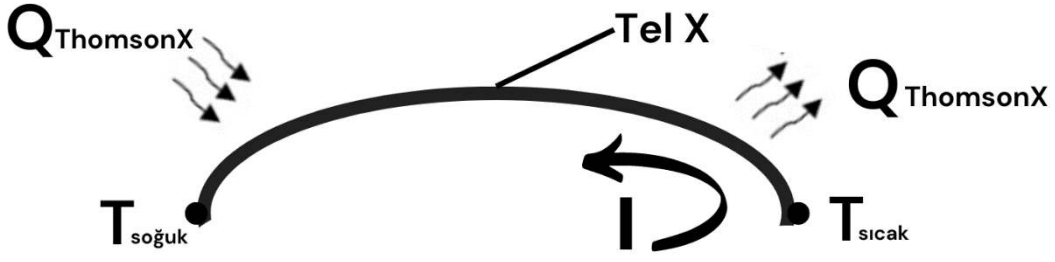
Peltier Etkisi, çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanlarda halihazırda kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanı ise elektronik malzemelerin hassas sıcaklık kontrollerini sağlamakta kullanılan termoelektrik soğutuculardır. Termoelektrik soğutucular hareketli parçalara sahip olmayan kompakt, sessiz ve hızlı tepki veren elektronik cihazlardır. Aynı şekilde bahsi geçen etki laboratuvar ortamlarında kullanılan Peltier ısıtıcılarında da kullanılır. Bahsi geçen ısıtıcılar hızlı ve hassas sıcaklık denetimi gözetilmesi gereken durumlarda kullanıma oldukça uygun bir durumdadır. Örneğin, laboratuvar ortamlarında, özellikle de DNA amplifikasyonu, protein denatürasyonu ve enzimatik reaksiyonlar benzeri uygulamalarda oldukça yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır (Lineykin ve Dashevsky, 2012). Peltier Etkisi göz önünde bulundurularak, gelecekte termoelektrik malzemelerin gelişimleri ile kullanım alanlarının artması ve daha verimli olması beklenmektedir.

2.1.3. Thomson Etkisi

Termoelektrik etkiler, göz önünde bulundurulduğunda genellikle Seebeck ve Peltier etkisinin ön planda bulunduğu bu nedenle de Thomson etkisinin daha geri planda kaldığı söylenebilir. Thomson Etkisi, bir termoelektrik malzemede sıcaklık gradyanı boyunca elektrik akımı geçmesi sonucunda ısı emilimi ve salınımı etkisidir. 1851 yılında William Thomson tarafından keşfedilmiştir. Akımın ve sıcaklık gradyanının yönüne bağlı olarak ısı emme ve salma şeklinde gerçekleşen bir olgudur. Bu durum malzemede entropi değişiminden kaynaklanır. Entropi kısaca bir sistemin düzensizliği ve rastgeleliği ölçüsü olarak tanımlanabilir. Termodinamiğin ikinci yasası göz önün alındığında bir sistemin, izole olması koşulu ile entropisi zaman içerisinde artış gösterecektir. Bu durum enerjinin düzenli bir formdan düzensiz bir forma dönüşme isteğinden kaynaklanmaktadır. MacDonold (1962) Thomson Etkisini şöyle tanımlamaktadır: "Thomson Etkisi, bir iletkenin farklı noktaları arasında sıcaklık farkı olduğunda ve bu iletkenin bir elektrik akımı geçtiğinde, iletkenin ısıyı emmesi veya salması olgusudur."

Thomson Katsayısı ise bir malzemenin Thomson Etkisine yatkınlığını belirleyen önemli parametrelerden birisidir. Birim sıcaklık gradyanı ve birim elektrik akımı başına emilen veya salınan ısı miktarı olarak tanımlanabilir ve Volt/Kelvin birimiyle de ifade edilir. Termoelektrik malzemenin performansı konusunda, Thomson Etkisi doğrudan bir etkiye sahiptir. Termoelektrik jeneratörleri, termoelektrik soğutucular gibi elektronik cihazlarda Thomson Etkisinin de diğer etkilerle birlikte göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir (Brostow vd., 2014). Üzerinden akım geçen bir iletkenin herhangi iki noktasında sıcaklık farkı varsa, bu durum Joule Isısı olarak adlandırılır. Ancak akım yönüne göre başka bir ısı oluştuğu da bulunmuştur (Das, 2018). Bu Thomson Isısı'dır. Thomson Katsayısı ve Seebeck Katsayısı arasındaki ilişki Denklem 2.3.'de gösterilmiştir. Thomson Etkisi'nin şematik gösterimi ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

$$\tau_{xy} = T * \frac{d\alpha_{xy}}{dT} \quad 2.3.$$



Thomson Etkisi

Şekil 7. Thomson Etkisi

Kaynak: Uyarlanmıştır: Pamukkale Üniversitesi. (t.y.). Thermoelectric effects. Erişim adresi: <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/en/sayfa/thermoelectric-effects-2>

Araştırmada Seebeck, Peltier ve Thomson Etkileri, termoelektrik alanının temel taşlarını oluşturan ve birbirini tamamlayan etkiler oldukları işlenmiştir.

2.2. Termoelektrik Malzemeler

Termoelektrik malzemeler, sıcaklık farklarından enerji üretebilen iletken veya yarı-iletken materyallerin genel tanımıdır. Termoelektrik malzemelerle ilgili ilk araştırmalar, Seebeck tarafından başlatılmıştır. Seebeck, Bizmut ve Nikel gibi elementlerle çalışarak termoelektrik özelliklerini keşfetmiş ve 35 farklı metalin termoelektrik kullanılabilirliğini belirlemiştir. Bu çalışmaların sonucunda, bu metallerin kullanım sıralamaları da belirlenmiştir (Goldsmid, 2014). En yaygın bilinen termoelektrik malzemeler arasında; Bi_2Te_3 , SiGe , yarı Heusler alaşımları ve PbTe yer almaktadır.

Bizmut Tellürür (Bi_2Te_3); oda sıcaklığına yakın uygulamalar için en iyi termoelektrik malzemeler arasında olduğunu bilinmektedir. Yüksek Seebeck Katsayısı ve elektriksel iletkenliğe sahip olması gibi nedenlerle alanda tercih edilir. Ancak, nispeten yüksek termal iletkenliği, verimlilik üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Snyder ve Toberer, 2008).

Kurşun Tellürür (PbTe); orta sıcaklık aralıklarında (400-600 °C) daha istendik bir performans gösteren bir malzemedir. PbTe 'nin yüksek Seebeck Katsayısı ve istendik elektriksel iletkenliği nedeniyle orta sıcaklık aralıklarında en yaygın kullanılan malzemelerden biri olduğunu belirtilmektedir (Rowe, 2006).

Silikon Germanyum (SiGe) alaşımları, ise yüksek sıcaklık aralıklarında (600-1000°) daha çok tercih edilen malzemelerdir. Yüksek sıcaklık koşullarında daha iyi stabiliteleri ve mekanik dayanıklılık özellikleri nedeniyle ön plana çıkmaktadırlar. (Samarelli vd, 2014).

Yarı-Heusler Alaşımları; yüksek sıcaklık uygulamaları yeni nesil termoelektrik malzemelerdir. Yüksek güç faktörleri bu malzemelerin ne çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca düşük termal iletkenlikleri de en önemli özelliklerinden biridir (Quinn ve Bos, 2021).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLER

Termoelektrik Jeneratörler, farklı sıcaklıklardaki iki farklı iletken ve/veya yarı iletken malzemenin birleşim noktalarında oluşan sıcaklık farkından dolayı elektrik üretimi sağlayan makinelerdir.

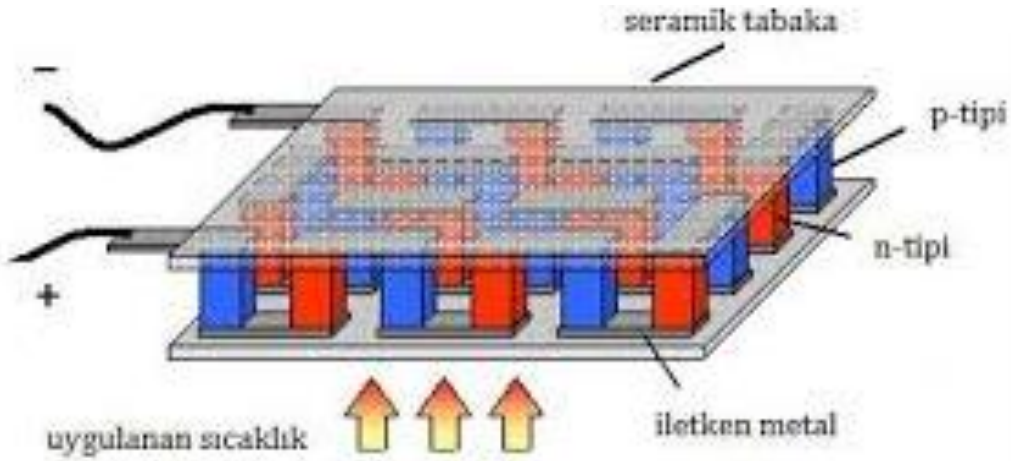
3.1. Termoelektrik Jeneratörlerin Tarihçesi

Termoelektrik jeneratörler 19. yüzyılın başlarına, Thomas Johann Seebeck'in farklı iki metalin birleştirildiği bir devrede sıcaklık farkı olduğunda elektrik akımı oluştuğunu keşfetmesine dayanmaktadır. Bu keşif, "Seebeck Etkisi" olarak isimlendirilip termoelektrik jeneratörlerin temel çalışma prensibini oluşturmaktadır. 1834'te Jean Charles Athanase Peltier, Seebeck Etkisi'nin tersini keşfetmiş; elektrik akımının iki farklı metalin birleşim noktasından geçtiğinde, ısı emilimi veya salınımı olduğunu fark etmiştir. Bu etkinin adlandırılması "Peltier Etkisi" olarak yapılmıştır. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında termoelektrik malzemeler ve cihazlara yönelik araştırmaların sayısı giderek hız kazanmıştır (Beretta vd., 2019).

Keşfedildiği dönemin koşulları, malzeme yetersizlikleri, keşfin yaygın pratikte kullanımını sınırlandırmıştır. 1960'larda yarı iletkenlerin keşfi ile alanda önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Yarı-iletken malzemelerin daha yüksek Seebeck Katsayılarına sahip olmaları mevcut uygulama alanlarındaki verimliliği arttırmıştır. Yıllar içerisinde askeri, uzay gibi alanlarda yenilikçi bir yaklaşıma gidilip termoelektrik jeneratörler kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lardan itibaren ise nanoteknoloji alanındaki gelişmeleri termoelektrik malzemelerin verimliliklerini daha da arttırmıştır. Bu sayede daha yüksek Seebeck Katsayılarına sahip olup daha düşük termal iletkenliklere sahip yeni malzemeler geliştirilmiştir. Nihayetinde termoelektrik jeneratörler daha geniş bir yelpazede kullanılmaya başlanmışlardır. Günümüzde, termoelektrik jeneratörler hala gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu nedenden dolayı verimliliklerinin artırılması için yeni araştırmalara hız kesmeden devam edilmektedir (Beretta vd., 2019).

3.2. Çalışma Prensibi

Seebeck Etkisi, sıcaklık farkının elektrik potansiyeli farkına dönüştürülmesini ifade etmektedir. Bir termoelektrik jeneratörde, p tipi ve n tipi olmak üzere yarı iletken malzeme bir araya getirilir. Sonrasında sıcaklık farkı oluşmaya başladığında, yük taşıyıcıları (elektronlar gibi) sıcak taraftan soğuk tarafa doğru bir hareket oluşturacaktır. Bu hareket ile bir elektrik akımı oluşacak ve bu da bir potansiyel fark yaratacaktır. Bu sayede elektrik enerjisi üretilecektir (Jouhara vd., 2021). Bahsedilen potansiyel fark oluşumu sürecin temelini oluşturan durum olarak öne sürülebilir. Peltier Etkisi'nde ise bir elektrik akımının iki farklı iletkenin birleştiği noktadan geçtiğinde, birleşme noktasında ısı emilimi veya ısı yayılımı meydana gelmesinden oluşan bir fenomen olarak tanımlanmaktadır. Bu etkiler, termoelektrik jeneratörlerde soğutma veya ısıtma uygulamalarında kullanılabilirler (Pourkiaei vd., 2019). Thomson etkisinde ise bir iletken boyunca sıcaklık gradyanı varken elektrik akımı geçtiğinde, iletkenin farklı bölgelerinde ısı emilimi veya ısı yayılımı meydana getirmesi durumudur. Bu etki, Seebeck ve Peltier Etkilerine göre daha küçük bir etkidir ancak termoelektrik jeneratörlerin performansını etkileyebilir (Jouhara vd., 2021).

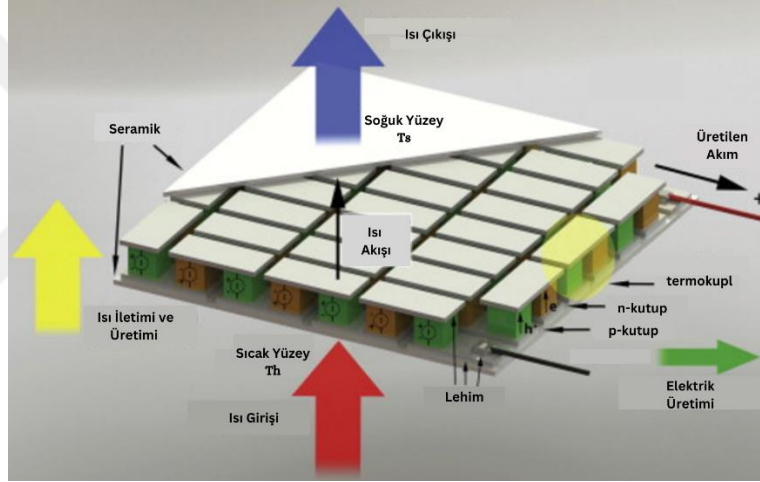


Şekil 8. TEJ Modüllerinin Yapısı

Kaynak: Yağmur, Y. ve Taşdelen, K. (2019). Termoelektrik üreteç ile kalorifer radyatörlerinden elektrik üretiminin deneysel incelenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 3(2), 152-160.

3.3. Termoelektrik Jeneratörlerin İç Yapısı

TEJ'ler termal açıdan bakıldığında paralel elektriksel açıdan bakıldığında ise seri olarak bağlanmıştır. P ve N kutupları olmak üzere iki ayrı uca sahiptir. P ucu pozitif uç olarak tanımlanabilir. Bu uç pozitif değerinde bir Seebeck Katsayısı'na sahiptir. N ucu ise negatif uç olarak tanımlanmaktadır. Bu uçta ise negatif değerinde bir Seebeck Katsayısı gözlemlenmektedir. Uçlar birbirlerine bakır elektrotlar ile bağlıdır. TEJ'lerin çıkışında renkleri genellikle kırmızı ve siyah olan kablolar bulunmaktadır. Bu kabloların uçlarına bağlanan ekipmanlar sayesinde elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Bu üretim sırasında oluşan akım doğru akım (DC) olarak ortaya çıkmaktadır. Yapısı sayesinde sıcaklık farkı arttıkça oluşan elektrik üretimi artmaktadır. Şekil 9'da TEJ'in genel görseli paylaşılmıştır (Jouhara vd., 2021).



Şekil 9. TEJ'lerin Fiziksel Etkileri

Kaynak: Uyarlanmıştır: Elzalik, M., Rezk, H., Shehata, E. G., Thomas, J., ve Mostafa, R. (2019). INC-MPPT algorithm for maximizing energy conversion efficiency of thermoelectric generating system. *Engineering Research Journal*, 162, M34-M49.

TEJ'lerin uygulamalarında sürekli olarak zorlayıcı koşullar altında çalıştığı gözlemlenmektedir. Bu zorlu koşulların temeli ise mekanik ve termal olarak etkilenmeleri kaçınılmaz derecede, yüksek sıcaklıklarda çalışmalarınıdır. Bu koşullarda çalışabilmeleri için TEJ'lerin yüksek gerilmelere dayanıklı olabilmelerini gerektirmektedir. Aynı zamanda bu gerilmelerin yaratacağı mekanik yorgunluk, TEJ'lerin tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilirken göz ardı edilmesi mümkün olmayan bir başka etmendir. TEJ'lerin tasarım geometrisi ve verimlilikleri arasında mutlak bir ilişki de söz konusudur.

TEJ'lerin, iç dirençlerini hesaplamakta kullanılan denklem, Denklem 3.1.'de gösterilmiştir.

$$R = A^{-1} * \rho * L \quad 3.1.$$

TEJ'ler elektriksel olarak seri bağlı birçok termoeleman çiftten oluşmaktadır. Bu çiftlerin n tane olduğu düşünülür ise kullanılması gereken denklem, Denklem 3.2.'de gösterilmiştir.

$$R_{Toplam} = \left[(A_{poz})^{-1} * \rho_{poz} * L_{poz} + (A_{neg})^{-1} * \rho_{neg} * L_{neg} \right] * n \quad 3.2.$$

Bunun yanı sıra, TEJ'lerin, termal iletkenliklerini hesaplamak için gerekli denklem, Denklem 3.3.'de gösterilmiştir.

$$\lambda = L^{-1} * A * k \quad 3.3.$$

Öte yandan, TEJ'ler termal olarak paralel bağlı birçok termoeleman çiftten oluşmaktadır. Bu çiftlerin n tane olduğu düşünülür ise kullanılması gereken denklem, Denklem 3.4.'de gösterilmiştir.

$$\lambda_{Toplam} = \left[(L_{poz})^{-1} * A_{poz} * k_{poz} + (L_{neg})^{-1} * A_{neg} * k_{neg} \right] * n \quad 3.4.$$

TEJ'lerde oluşan potansiyel farkı hesaplamak için gerekli olan denklem ise Denklem 3.5.'de gösterilmiştir.

$$V_{TEJ} = V_2 - V_1 = (I * R - (\alpha * \Delta T)) * n \quad 3.5.$$

Denklem 2.1.'de gösterilmiş olan ve Denklem 3.5.'de gösterilmiş olan denklemler entegre edildiğinde ortaya çıkan ve potansiyel farkı hesaplamak için kullanılabilen bir diğer denklem, Denklem 3.6.'da gösterilmiştir.

$$V_{TEJ} = I * R * n - V_{Seebeck} \quad 3.6.$$

TEJ'lerde ortaya çıkan elektrik akımını hesaplamak için kullanılması gerekli olan denklem, Denklem 3.7.'de gösterilmiştir. Bu denklemde yer alan yük direnci

(R_y), TEJ'lerin çıkış uçları ile birleştirilmiş olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi elektriksel gücünden faydalanabilmektir. Denklem 3.7. ve Denklem 3.8. denklemlerinde gösterilmiştir. Denklem 3.8.'de TEJ tarafından yüke iletilen gücü, Denklem 3.9.'da ise yük tarafında, üzerinde kapsadığı gücü göstermektedir.

$$I = \frac{(n * \alpha * \Delta T)}{n * R + R_y} \quad 3.7.$$

TEJ'lerin ürettiği elektriksel gücü hesaplamak için kullanılan denklem ise Denklem 3.8. ve Denklem 3.9. denklemlerinde gösterilmiştir. Denklem 3.8.'de TEJ tarafından yüke iletilen gücü, Denklem 3.9.'da ise yük tarafında, üzerinde kapsadığı gücü göstermektedir.

$$P = (\alpha * \Delta T * I - R * I^2) * n \quad 3.8.$$

$$P = -V_{TEJ} * I = (R * I^2 - \alpha * \Delta T * I) * n \quad 3.9.$$

Yük direncinin kapsadığı elektriksel gücü hesaplamak için kullanılan denklem ise Denklem 3.10.'da gösterilmiştir.

$$P_y = I^2 * R_y \quad 3.10.$$

3.4. Termoelektrik Jeneratörlerin Verimi ve Tasarım Kriterleri

TEJ'lerin verimliliği sistemden çıkan elektriksel enerjinin sisteme giren toplam elektriksel enerjiye oranlanması ile bulunmaktadır. Bu hesaplama yapılırken içerisinde ısı değiştiricilerin verimi ve TEJ'lerin elektriksel verimi göz önünde bulundurulmaktadır (Champier, 2017).

Malzeme seçimi, termoelektrik jeneratörlerin tasarım aşamasında göz önüne alınması gereken en önemli unsurlarından biridir. Termoelektrik malzemelerin performansı ise değer faktörü olan, 'Başarı Ölçüsü' olarak adlandırılan ve 'ZT' şeklinde gösterime sahip bir birim ile ölçülmektedir. Bu ZT'nin hesaplanmasında kullanılan denklem, 3.11.'de gösterilmiştir (Orr vd., 2016).

$$ZT = \frac{\alpha^2 * T'}{\rho * k} \quad 3.11$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 3.12$$

Denklem 3.11’de yer alan denklem içerisinde, Denklem 3.12’de yer alan eşitlik entegre edildiği takdirde ortaya çıkan ve Denklem 3.13 gösterilen denklem de ZT Katsayısı’nın hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$ZT = \frac{\alpha^2 * T * \sigma}{k} \quad 3.13$$

Yüksek ZT değerine sahip malzemeler, daha iyi termoelektrik verimlilik sağlamaktadır. Termoelektrik etkili, malzemelerin sahip olması istenilen özellikleri şöyle sıralanmaktadır (Jouhara vd., 2021).

- Yüksek elektriksel iletkenlik
- Yüksek Seebeck Katsayısı
- Düşük termal iletkenlik

Bu özellikler, performansı doğrudan etkilemekte olup yüksek Seebeck Katsayısı, sıcaklık farkından daha fazla elektrik enerjisi üretilmesini sağlayacaktır. Yüksek elektriksel iletkenlik ise Joule Isınması olarak bilinen etki nedeniyle oluşan enerji kayıplarını azaltır. Düşük termal iletkenlik istenilmesinin sebebi ise sıcak ve soğuk taraflar arasındaki sıcaklık farkının korunmasına yardımcı olup bu sayede daha fazla elektrik enerjisi üretilmesini sağlamaktır (Champier, 2017). ZT değeri dışında TEJ’lerin tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer faktörler arasında termal temas direnci, elektriksel temas direnci ve parazitlik kayıplar bulunmaktadır.

3.5. Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanım Alanları

Termoelektrik jeneratörler, günden güne gelişmekte ve kullanımı yaygınlaşmakta olan bir teknolojidir. 2010 yılı öncesi, konu ile ilgili yapılan araştırmalarda 225 civarında termoelektrik malzemenin olduğu ileri sürülmekteydi. Ancak 2010 yılı sonrasında araştırmaların hız kazanması ve ardı ardına yeni malzemeler keşfedilmesi ile bu sayı neredeyse 600’e dayanmaktadır (Zoui vd., 2020).

Bu gelişmeler sonucunda kullanım alanları da günden güne gelişmiş ve çeşitlenmiştir. Başlıca kullanım alanları ve bu alandaki kullanım örnekleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Termoelektrik Jeneratörlerin Uygulama Alanları

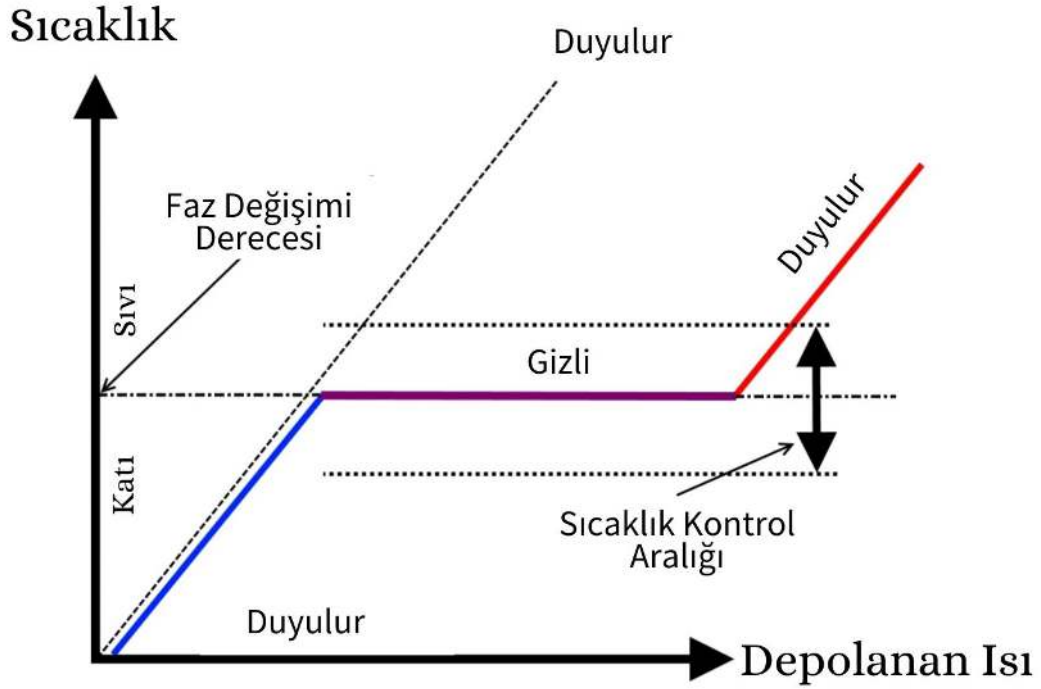
Uygulama Alanları	Örnekler
Atık Isı Enerji Hasadı	Otomobil egzoz ısısı geri kazanımı, endüstriyel proses ısısı değerlendirilmesi
Elektronik Soğutma	Bilgisayar işlemcileri, lazer diyotlar, optik ekipman
Isı Pompaları	Taşınabilir soğutucular, ilaç saklama, bilimsel deneyler
Diğer Uygulamalar	Uzay araçları (Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör) ve sensörler

Kaynak: (Uyarlanmıştır: Snyder, G. J. ve Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 7(2), 105-114.; Goldsmid, H. J. (2010). Introduction to Thermoelectricity. Springer Berlin Heidelberg.; Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L. ve diğerleri. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. International Journal of Thermofluids, 9, 100063.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER

Faz değıştirci malzemeler herhangi bir ısı enerjisiyi gizli olarak depolayabilme yetisine sahip olan malzemeler olarak bilinmektedir. Faz değıştirci malzemeler, FDM olarak kısaltılmışlardır. Kendi içerisinde ısı alışverişı bulunan ve bu ısı alışverişini depolayabilen malzemelerdir. FDM'lere gizli ısı depolayan malzemeler de denmektedir (Bakırhan, 2023). Her bir faz değıştirci malzemenin kendine özgü bir gizli ısı depolama kabiliyeti de bulunmaktadır. Günümüzde, faz değıştirci malzemeler çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bir evin iç ve dış konforunun sağlanması adı altında yapılan yalıtım malzemesi, tekstil sektörü ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kullanıma elverişli malzemelerdir (Yağcı vd., 2019).

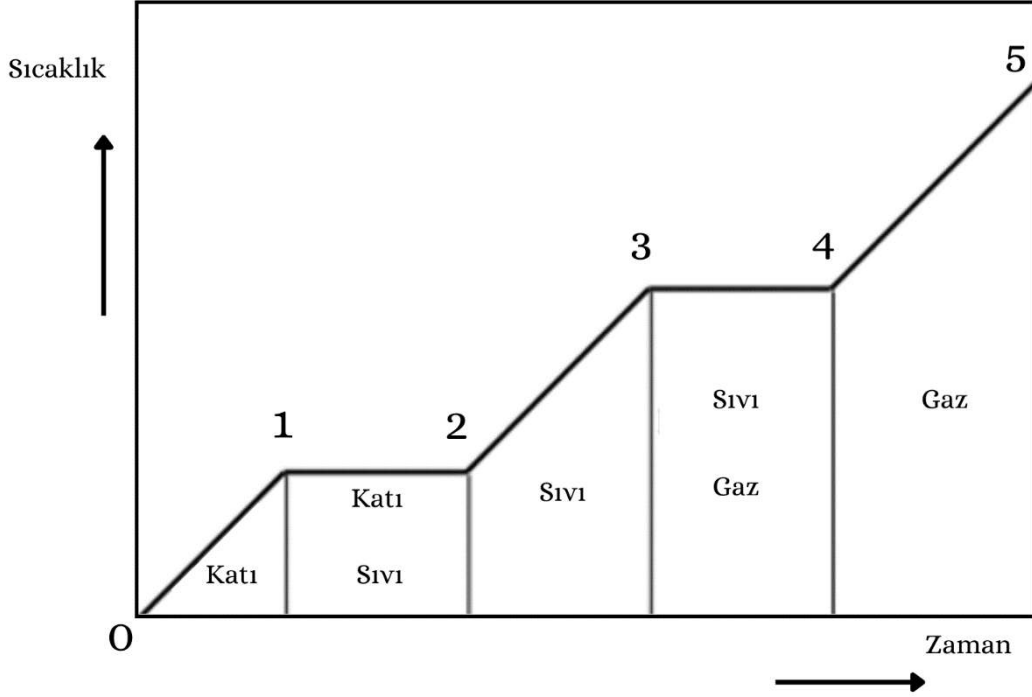


Şekil 10. Duyulur ve Gizli Isıların Faz Değişim Süreci Boyunca Sıcaklık Kontrolleri

Kaynak: Uyarlanmıştır: Skovajsa, J., Koláček, M. ve Zálešák, M. (2017). Phase change material based accumulation panels in combination with renewable energy sources and thermoelectric cooling. *Energies*, 10 (152), 1-19.

4.1. Faz Değiştirici Malzemelerde Isı Depolama

Faz değiştirici malzemeler diğer malzemelerden farklı olarak yalnızca duyulur değil hem duyulur hem de gizli ısı depolayabilme yeteneğine sahiptir.



Şekil 11. Faz Değişiminde Sıcaklık-Zaman Diyagramı

Kaynak: Uyarlanmıştır: Stritih, U. ve Novak, P. (1996). Solar heat storage wall for building ventilation. Renewable Energy, 8(1-4), 268-271.

4.1.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, faz değiştirici malzemeleri sıvı ya da katı maddelerin ısı depolama kapasitesinden dolayı çeşitli ortam sıcaklıklarına bağlı kalınarak oluşturulan bir sistemdir. Bu sistemde madde sıcaklık depolayarak hal değişimine uğramaktadır. Ancak sıcaklık depolanırken ısı kaybına uğramaya elverişli bir sistemdir. Bu depolama şeklinin kullanılabildiği sistem olarak sıcak su tankları gösterilebilir. Duyulur ısının hesaplanmasında kullanılan denklem, Denklem 4.1.'de gösterilmiştir (Stritih ve Novak, 1996).

$$Q = \int_{T_0}^{T_1} m * c_p * (T) * dT = m * c_p * (T_1 - T_0) \quad 4.1.$$

4.1.2. Gizli Isı Depolama

Faz değiştirici malzemeler faz değişimi sırasında ortamdan almış olduğu ve tekrar ortama geri verdiği ısı enerjisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Faz değişimi belli sıcaklık aralıklarında ortaya çıkan termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayabilmektedir. Maddelerin faz değişimleri sırası ile katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-gaz şeklinde gerçekleşmektedir. Katı-katı faz değişimi sırasında ortaya çıkan gizli ısı miktarı diğer dnüşümlere göre azdır. Sıvı-gaz ya da katı-gaz faz değişiminde açığa çıkan gizli ısı miktarı katı-katı veya sıvı-katı faz değişimlerinde açığa çıkan gizli ısı miktarından oldukça fazladır. Bundan dolayı faz değişimleri sırasında hacim değişimleri gözlemlendiği için kullanılan materyallerin bu şartlara dayanıklı olması önemli bir husustur (Stritih ve Novak, 1996).

Faz değiştirici malzeme içeren sistemin gizli ısı depolama kapasitesi Denklem 4.3.'de gösterilmiş olan denklem ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m * c_p * dT + m * H_e + \int_{T_3}^{T_4} m * c_p * dT \quad 4.2.$$

$$Q = m * [H_e + c_k * (T_2 - T_1) + c_s(T_4 - T_3)] \quad 4.3.$$

Enerjiyi gizli formda depolayabilme özelliği faz değiştirici malzemelerin en önemli özelliği sayılabilir. Bu sayede çok çeşitli formlarda ve çalışma şekillerine göre üretilmeleri mümkün olmaktadır. Bu sebep ile malzemeler doğrudan kullanılabilir. Doğrudan kullanımın yanı sıra mikro veya makro boyuta sahip kapsülleme yöntemleriyle de kullanılabilir (Demirbaş, 2006).

Faz değiştirici malzemeler katı-sıvı dnüşümleri için gizli ısı meydana getirirler. Bu olay yalnızca bu hal değişimi için değil, sıvı-gaz, katı-katı dnüşümleri içinde geçerlidir. Katı -sıvı faz değişim için geçerli gizli ısı; enerji depolama kabiliyeti açısından en çok kullanılan fiziksel özelliktir. Malzeme sıvı faza geçerken sabit sıcaklıkta kalır ve bu değişim sabit hacimde gerçekleşir. Ancak, katı-sıvı faz değişiminde, gizli ısının kullanılabilmesi için değişimin tersinir olması oldukça önemlidir. Sıvı-gaz faz değişimi için termal depolanma kullanılmamaktadır. Bunun temel sebebi, yüksek hacim değişiklikleri ile gerçekleşen faz değişimi esnasında ortaya

çıkan gizli ısıнын, yüksek buhar basıncına sebep olmasıdır. Katı-katı faz değişimi, maddenin kristal yapısında gerçekleşip ortaya çıkan ısıyı depolanmaktadır. (Stritih ve Novak, 1996).

4.2. Faz Değiştirici Malzemelerin Sahip Olması Gereken Özellikler

Faz değiştirici malzemeler uygun sıcaklıklar ve kullanım alanları itibari ile birçok özelliğe sahip olmalılardır. Bunlardan birkaçı;

- Isıl iletkenliği yüksek olmalıdır.
 - Öz ısıları yüksek olmalıdır.
 - Değişken sıcaklıklarda faz değiştirme özelliğine sahip olmalıdır.
 - Düzenli bir biçimde faz değişimi karakteristiği sağlamalıdır.
 - Kimyasal bozulma göstermemelidir.
 - Faz değiştirici malzemelerin sıvı faz formunda iken aşırı soğumasını önlemek için çekirdekleşme hızı yüksek olmalıdır.
 - Isının geri kazanılması için de kristal büyüme hızı yüksek olmalıdır.
- (Yağcı vd., 2019)

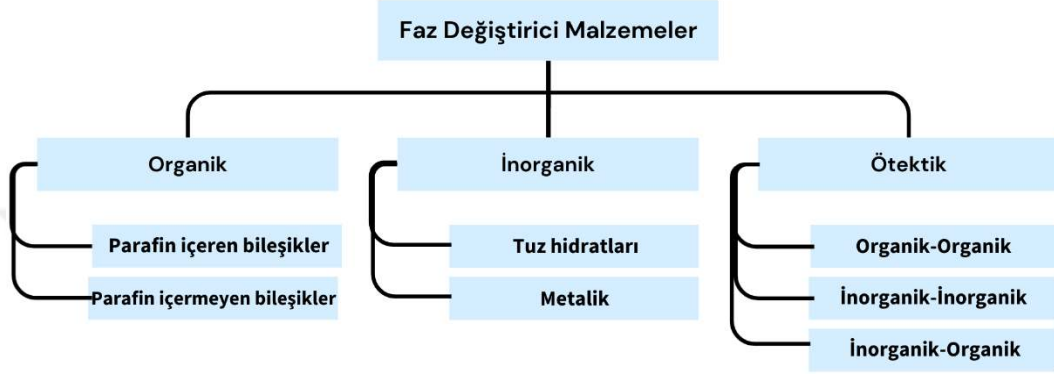
4.3. Faz Değiştirici Malzemelerin Kullanım Alanları

Faz değiştirici malzemeler enerji depolama kapasitelerine göre çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu alanlar;

- Soğutma endüstrisi
- Arabaların termal aktivite etkinlikleri
- Tekstil sektörü
- Tıbbi uygulamalarda
- Uzun mekiklerinin termal uygulamalarında.
- Binalarda ısınması ve soğutulması amacıyla yalıtım (Yağcı vd., 2019)

4.4. Faz Değiştirici Malzemelerin Sınıflandırılması

Faz değiştirici malzemeler, çalışma sıcaklıklarına göre belirli kapsamlarda kullanılmak üzere birçok farklı çeşitte bulunmaktadır. Ancak, FDM'ler, temel olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar organik, inorganik ve ötektik malzemelerdir (Sharma vd., 2009).



Şekil 12. Faz Değiştirici Malzemelerin Sınıflandırılması

Kaynak: Uyarlanmıştır: Kılıç Bakırhan, E. (2023). Faz değiştiren malzemelerin bina yaşam döngüsü evrelerindeki mevcut potansiyelleri ve gelişmeye açık yönleri. *Journal of Spatial Science*, 1(1), 109-126.

Ayrıca, FDM'ler, hal değişimlerine göre sınıflandırılabilir. Maddenin katı halinden gaz haline ve maddenin sıvı halinden gaz haline geçerken, bulunduğu ortamdaki enerjiyi, yüksek miktarda soğurmaktadır. Bununla beraber, hacim olarak genişleme gözlemlenmektedir (Bakırhan, 2023). Maddenin katı halinden katı haline geçen FDM'ler için ise durum tam tersi şekilde seyreder. Bu sebeple, birçok uygulama özelinde kullanıma uygun olmayabilir.

Maddenin katı halinden sıvı haline geçen FDM'ler ise yüksek miktarda gizli ısı ortaya çıkaran mekanizmalara sahip olmalarıyla ayrışır. Sınıflandırılan FDM'lerin birbirinden ayırtıcı olarak değerlendirilen özellikleri, Şekil 13'te gösterilmiştir.

Faz Değiştirici Malzemeler		
Organik	İnorganik	Ötektik
-Geniş sıcaklık aralıklarında çalışırlar. -Yüksek gizli füzyon ısısına sahiptirler. -Süper soğumaya uğramazlar. -Ayrışmaya uğramazlar. -Parafin petrol içerdiğinden kullanımı küresel ısınmaya neden olur. -Yanıcı olabilirler, fiyatları inorganiklere göre yüksektir. - Örneğin parafin mumu, polietilen glikol, stearik asit vb.	-Muhafazaları için kaba ihtiyaç duyarlar. -Düşük maliyetli ve ulaşılabilir. -Yanıcı değildirler. -Düşük hacim değişikliğine sahiptir. -Çevresel etkilerin azaltılmasında parafinlere göre daha iyidir. -Geri dönüştürülebilir. -Yüksek erime entalpisine sahiptir. -Termal ve kimyasal yönden stabildir. -Geleneksel inşaat malzemeleri ile uyumludur. - Örneğin kalsiyumklorit heksahidrat, sodyumsülfatdekahidrat vb.	-Keskin erime sıcaklarına sahiptir (istenen erime sıcaklarının ayarlanmasında kullanılabilir). -Organik bileşiklere göre hacimsel ısı depolama yoğunluğu biraz daha fazladır. -Ayrışmaya uğramazlar.

Şekil 13. Farklı türdeki FDM'lerin Genel Özellikleri

Kaynak: Uyarlanmıştır: Kılıç Bakırhan, E. (2023). Faz değiştiren malzemelerin bina yaşam döngüsü evrelerindeki mevcut potansiyelleri ve gelişmeye açık yönleri. *Journal of Spatial Science*, 1(1), 109-126.

Organik malzemeler parafin mumları, yağ asitleri ve polietilen glikollerdir (PEG). İnorganik malzemeler tuz hidratlar, tuzlar ve metalik bileşiklerdir (Dal, 2020).

	Organik	İnorganik
Avantajları	Aşındırıcı değil Düşük soğutma veya düşük soğuma Kimyasal ve termal kararlılık	Büyük faz değişim entalpisi
Dezavantaj	Düşük faz değişim entalpisi Düşük ısı iletkenliği Çabuk alev alma	Alt soğuma Aşınma Faz ayrımı, termal kararlılık eksikliği

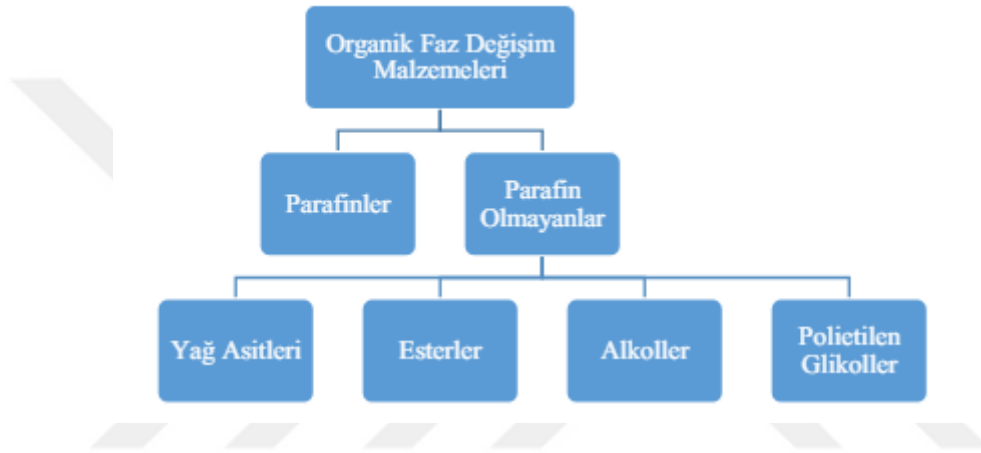
Şekil 14. Organik ve İnorganik FDM'lerin Avantajları ve Dezavantajları

Kaynak: Dal, İ. (2020). *Yüksek performanslı stabil faz değişim malzemesinin geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi:

<https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/1419/10347935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

4.4.1. Organik Faz Değiştirici Malzemeler

Organik faz değiştirici malzemeler kristal ve korozif olmayan FDM'ler olarak bilinmektedir. Kendi içerisinde parafin esaslı ve parafin esaslı olmayan olarak ayrılmaktadır. Organik FDM'lerin en belirgin özelliği, faz değişimi süresince kendi formunu koruması ve herhangi bir bozunum göstermemesidir (Sharma vd., 2009). Organik faz değiştirici malzemelerin alt sınıfları olan parafin esaslı FDM'ler ve parafin esaslı olmayan FDM'ler Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Organik Faz Değiştirici Malzemeler

Kaynak: Dal, İ. (2020). *Yüksek performanslı stabil faz değişim malzemesinin geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/1419/10347935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bu tabloda yer alan FDM'ler, farklı alanlarda uygun malzeme seçimi yapılarak istenen uygulamaları gerçekleştirir. Parafin esaslı malzemelerin avantajlarına bakılır ise, güvenli çalışma, öngörülebilir sonuç alma, uygun fiyatlı olması, aşındırıcı özelliklere sahip olmaması ile öne çıktığı görülmektedir. Bu avantajlarının yanı sıra, düşük sıcaklık iletkenliğine sahip oluşu ve orta derecede yanıcı oluşu dezavantajları olarak görülmektedir.

Parafin esaslı olmayan malzemelerin avantajları arasında ise termal kararlılık, kimyasal dayanıklılık, korozif olmama, zehirli özellik göstermemek gösterilebilir. Ancak oldukça yanıcı olmaları, yüksek sıcaklıklarda kararsız durum göstermeleri de dezavantajlı olduğu noktalarıdır.

Bahsedilen bu avantaj ve dezavantaj kıyası, uygunluk durumunun seçimi yapılırken değerlendirilmesi gereken önemli kriterlerdir (Dal, 2020).

4.4.2. İnorganik Faz Değiştirici Malzemeler

İnorganik faz değiştirici malzemeler tuz hidratlarıdır. Yapılan karışımlarda tuz ilavesi ile soğutmayı en aza indirmek mümkün kılınır. Bu malzeme türü yoğunluk ve entalpi değerlerinin geniş spektruma hitap etmesi bakımından, diğer FDM'lere göre daha çeşitli alanlarda kullanılmaya elverişlidir. Korozif etkiye sahip olmaları nedeniyle korozyona dayanıklı malzemelerde kullanımları daha uygundur. Tablo 2'de sıklıkla kullanımı tercih edilen bazı tuzlara ait donma ve erime sıcaklığına ait bilgiler verilmektedir (Dal, 2020).

Tablo 2. Sulu NaCl ve KCl Çözeltileri için Donma-Erime ve Alt Soğutma Aralıkları

Çözeltiler	Alt Soğutma (°C)	Donma Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı(°C)	ΔT
%5 NaCl	3.87	-3.87/-4.27	-4.87/-3.18	3.04
%10 NaCl	6.28	-7.60/-7.70	-7.80/-6.10	6.56
%15 NaCl	5.30	-15.19/-15.29	-10.40/-9.20	10.88
%20 NaCl	2.79	-18.22/-17.92	-18.92/-14.62	16.45
%21 NaCl	2.20	-18.46/-18.36	-18.36/-18.26	17.77
%22 NaCl	1.60	-21.95/-21.85	-20.15/-19.65	19.17
%23 NaCl	0.20	-20.89/-21.39	-22.39/-20.89	20.66
%24 NaCl	0.30	-20.19/-19.79	-22.08/-19.59	-
%5 KCl	1.59	-3.38/-3.58	-3.28/-2.08	2.32
%10 KCl	7.48	-6.60/-7.10	-11.79/-6.00	4.80
%15 KCl	4.40	-12.80/-13.20	-11.40/-9.60	-
%20 KCl	5.59	-12.93/-13.13	-10.23/-9.43	-
%21 KCl	4.80	-10.35/-10.65	-10.15/-9.65	-
%22 KCl	6.90	-10.45/-11.25	-10.95/-9.15	-
%23 KCl	7.48	-12.12/-12.82	-12/-9.83	-
%24 KCl	5.10	-10.80/-11.10	-11.10/-9.10	-

Kaynak:Dal, İ. 2020. “Yüksek performanslı stabil faz değişim malzemesinin geliştirilmesi.” (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/1419/10347935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

4.4.3. Ötektik Faz Değiştirici Malzemeler

FDM'ler arası en düşük donma sıcaklığına sahip ötektik faz değiştirici malzeme grubu en az iki bileşenden elde edilmektedir. Organik-organik, organik-inorganik veya inorganik-inorganik olmak üzere üç farklı formda olabilmektedir. Bu FDM türlerinin termal iletkenliğinin, tuz hidrat FDM'lerle karşılaştırıldığında aynı

değerde veya daha yüksek değerde olması beklenmektedir. Tablo 3'te sıklıkla karşılaşılan bazı ötektik FDM özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. Bazı Ötektik FDM'ler

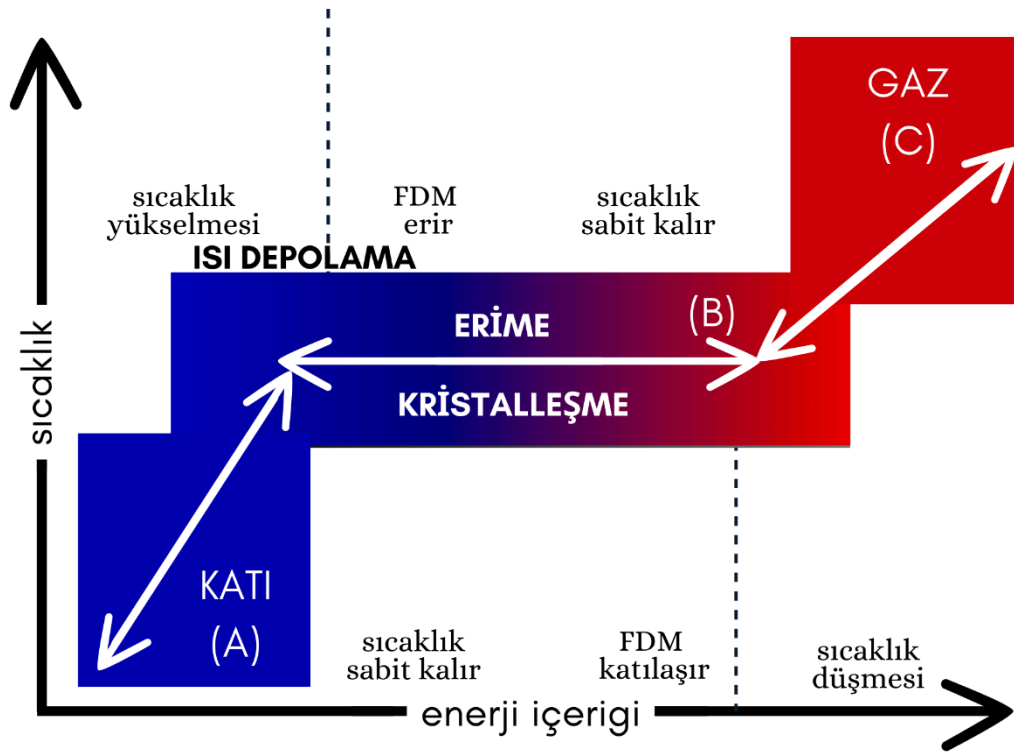
Ötektik Bileşikler	Kütle Oranı	T _m	ΔH _m	C _{p,s}	C _{p,l}	λ _s	λ _l	ρ _s	E _{çujunluk}	Fiyat	
		°C	kJ/kg	J/kg.K		mW/m.K		Kg/m ³	kWh/m ³	£/m ³	£/kWh
Ürc-KCl	89-11	115	227	1690	1960	830	0.60	1370	83	197	2.4
LiNO ₃ – NaNO ₃ – KNO ₃	30-1852	123	140	1170	1440	790	530	2068	79	1979	25
LiNO ₃ – KNO ₃	34-66	133	150	1170	1350	960	520	2018	82	2167	26
KNO ₃ – NaNO ₂	56-44	141	97	1180	1740	730	570	1994	52	504	9.7
KNO ₃ – NaNO ₃ – NaNO ₂	53-641	142	110	1170	1730	720	570	2006	60	497	8.3
KNO ₃ – NaNO ₃	48-52	149	124	1050	1630	580	520	2080	70	994	14
LiNO ₃ – NaNO ₂	62-38	156	233	1570	1910	1120	660	2296	143	3816	27
LiNO ₃ – KCl	58-42	160	272	1260	1350	1310	590	2196	161	3409	21
LiNO ₃ – NaNO ₃ – KCl	45-505	160	266	1320	1690	880	590	2297	166	2852	17
HCOONa – HCOOK	45-55	176	175	1150	930	630	430	1913	92	421	4.6
LiOH – LiNO ₃	19-81	183	352	1600	2000	1330	690	2124	202	5165	26
LiNO ₃ – NaNO ₃	49-51	194	262	1350	1720	870	590	2317	165	3084	19
LiNO ₃ – NaCl	87-13	208	369	1540	1560	1350	630	2350	235	5254	22
KNO ₃ – KOH	80-20	214	83	1030	1350	880	540	1905	43	611	14
KNO ₃ – NaNO ₃	55-45	222	110	1010	1490	730	510	2028	61	482	8.0
LiBr – LiNO ₃	27-23	228	279	1340	1380	1140	570	2603	196	6134	31
LiOH – NaNO ₃ – NaOH	6-6727	230	184	1300	2000	780	670	2154	107	538	5.0
NaNO ₂ – NaNO ₃	55-45	233	163	1310	2130	590	640	2210	97	382	3.9
CaCl ₂ – LiNO ₃	13-87	238	317	1500	1530	1370	690	2362	204	5325	26
LiCl – LiNO ₃	9-91	244	342	1580	1610	1370	640	2351	218	6019	28
NaNO ₃ – NaOH	86-14	250	160	1190	1860	660	600	2241	97	339	3.5

Kaynak: Dal, İ. 2020. “Yüksek performanslı stabil faz değişim malzemesinin geliştirilmesi.” (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/1419/10347935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

4.5. FDM'nin Çalışma Prensibi

FDM'ler ısı depolama yeteneğine sahip malzemelerdir. Denklem 4.4'te verilen eşitlik dikkate alınarak A kimyasalının, B ve C kimyasalına evrildiği ve tersinir çalışan, üç basamaklı bir sistemdir.

$$A + Q(ısı) \rightleftharpoons B + C \quad 4.4.$$



Şekil 16. FDM'ye Sağlanan Enerji ile Sıcaklık Değişimi

Kaynak: Uyarlanmıştır: Mishra, A., Shukla, A. ve Sharma, A. (2015). *Latent heat storage through phase change materials* (Doktora tezi), Devi Ahilya Üniversitesi.

Bu sistemin reaksiyona başlaması için ısı emilimine ihtiyaı vardır. Bunun sebebi kimyasal A'nın, B ve C'ye dnüşmesini sağlamaktır. Katı fazda bulunan FDM'nin iç yapısındaki bağlar kopar ve katı faz durumu bozularak sıvı faz durumuna geçmeye başlar. Ortam sıcaklığında artış gözlemlenmesi bunun sebebi olarak açıklanabilir. Bağların kopma sürecinde ise FDM'nin tamamı sıvı faz durumuna geçene kadar ortamdaki sıcaklığın sabit kalacağı gözlenecektir. Bunun sebebi ise FDM'nin hal değişim süreci boyunca ısıyı absorbe etme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu dngünün durmaksızın devam edebilmesi için B ve C kimyasalları sürekli olarak A kimyasalını oluŐtırmaya eğilim göstermektedir. Bu sebep ile uygun ortam őartları oluŐtuėunda B ve C kimyasalları, önceki aŐamalarda soėurulmuŐ ve depolanmıŐ ısıyı serbest bırakarak FDM'nin tekrar katılaŐmasına vesile olmaktadır. Bu olayın gerçekleşmesi için gerekli uygun ortam koşulları bağlı nem, basınç ve sıcaklığın uygun değerlerde olmasına bağlıdır (Mishra vd., 2015).

BEŞİNCİ BÖLÜM

DENEY DÜZENİĞİ

Bu araştırma kapsamında 2 ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney, 2 farklı aşamadan oluşmuştur. Deneylerde kullanılacak TEJ'lerin, ısıtılması gereken yüzeyleri sıcak yüzeyler, soğutulması gereken yüzeyleri ise soğuk yüzeyler olarak adlandırılmıştır. İlk deney, toz formunda bulunan FDM ile gerçekleştirilmiştir. İkinci deney ise parafin mum formunda olan FDM ile gerçekleştirilmiştir. Deney sürecinde toz formda bulunan FDM, FDM-1 olarak adlandırmış, parafin mum formunda olan FDM ise FDM-2 olarak adlandırılmıştır. Ayrıca, deneyler sürecinde ilk aşama, ısıtma çevrimi olarak adlandırılmış, ikinci aşama ise soğutma çevrimi olarak adlandırılmıştır.

Deneylerin ilk aşaması olan ısıtma çevrimi sürecinde; atık ısı kaynağı olan bir durum tasarlanmış ve incelenmiştir. Atık ısı kaynağı, dimmer ile ayarlanabilir bir rezistans ile simüle edilmiştir. Bu kaynak, TEJ modüllerinin birinci yüzeylerini ısıtarak, modüllerin elektrik üretmesini sağlamıştır. Bu süreçte, TEJ modüllerinin ikinci yüzeylerinde bulunan FDM'ler (bahsedildiği üzere FDM'ler, her bir deney için farklı formdadır.) atık ısıyı depolamış ve TEJ modüllerinin ikinci yüzeylerinin, soğuk kalmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, atık ısının çevreye yayılımının önüne geçilmesi ve yüzeyler arası sıcaklık farkının artırılması hedeflenmiştir. Her iki deneyin de ilk aşamaları, bu adımların tamamlanmasının ardından sonlandırılmıştır. Bunun akabinde deneylerin, ikinci aşamaları başlatılmıştır.

Deneylerin ikinci aşaması olan soğutma çevriminde ortam koşullarının değiştiği ve ısı kaynağının işlevsiz olduğu durum modellenmiş ve incelenmiştir. Soğutma çevrimi sürecinde ise atık ısı kaynağının işlev göstermediği durumu oluşturmak için ortam fan ile tekrar simüle edilmiştir. Deneyin bu aşamasında, sistemin tersine bir etki göstererek FDM'ler içerisinde depolanan ısıyı dış ortama yaymaya başlamıştır. Bu ortamda yer alan TEJ modüllerinin soğuk yüzeylerinin ısınması beklenmiştir. Fanın çalıştığı ortam olan alt bölmenin, sıcaklığı zaman içerisinde düşmüştür. Bu sıcaklık düşüşünden kaynaklı, TEJ'lerin sıcak yüzeylerinin, soğumaya başlaması gözlenmiştir. TEJ'ler yapıları gereği yüzeyleri arası sıcaklık farkı sebebi ile elektrik üretimi yapan cihazlar olduklarından, elektrik üretimine devam

edilmiştir. Soğutma çevrimi sırasında açığa çıkan sıcaklıkların, ısıtma çevriminde olduğu kadar yüksek değerlerde olmaması sebebiyle TEJ modüllerinde herhangi bir zarar oluşmamıştır. Her iki FDM formu için, her iki döngünün de tamamlanmasının ardından deney tamamlanmış ve sonuçlar alınmıştır.

Deneyler her iki formdaki FDM içinde aynı koşullar altında ve aynı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Deney sürecini etkileyebilecek bütün etmenler kontrol edilmiş ve olası hatalar minimize edilmiştir.

5.1. Deney Düzeneginde Kullanılan Malzemeler

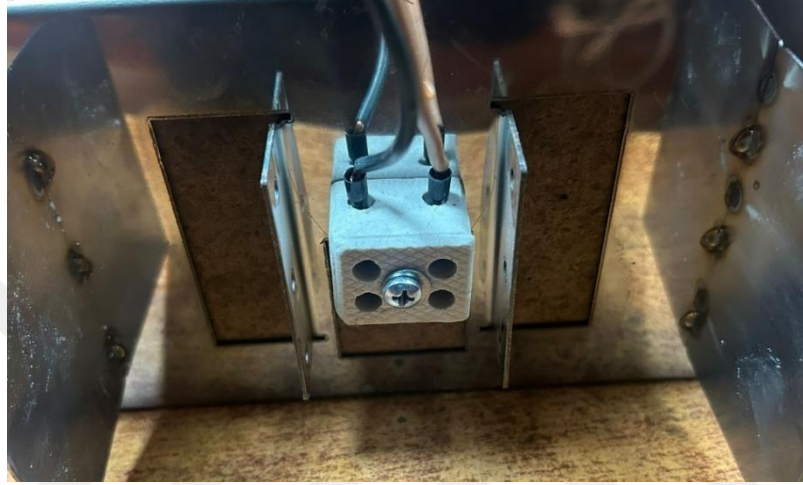
Çalışma için gerekli olan deney düzeneginin kurulumunda gerekli temel materyaller; ısı kaynağı (dimmer anahtar ile kontrol edilebilir rezistans), fan, strafor, termal yapıştırıcı, alüminyum plakalar, takviyeli alüminyum yapışkan bant, 4 adet termoelektrik jeneratör, 7 adet termokupl, veri kaydedici gibi elemanlardır. Bunların yanı sıra kablo, sıra klemensi, multimetre, hassas terazi ve benzeri yardımcı materyal ve ölçüm cihazları da kullanılmıştır.

Isı kaynağı; 725 mm uzunluğunda, 0.8 mm tel kalınlığı olan bir Resistohm 135 cinsi telin sarılarak, yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir yalıtım malzemesinin arasına yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 17).



Şekil 17. Isı Kaynağı

Daha sonrasında güvenlik koşulları gözetilerek ile AISI 304 kalite paslanmaz çelikten oluşan bir hazne içerisine yerleştirilmiştir. Maksimum 2000 W güç üretebilmektedir. Elektrik bağlantısı, bir seramik klemensin, paslanmaz sac plakanın altına monte edilmesi ve telin iki ucunun bu klemensin ucuna bağlanması ile kurulmuştur. Seramik klemensin diğer tarafına ise yüksek sıcaklıklara ve yanmaya dayanıklı bir kablo ile bağlantı yapılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Bağlantı Şekli

Priz ile seramik klemens arasındaki kısma AC 220 V bir dimmer anahtar yerleştirilmiştir. Bu anahtar sayesinde telin üzerinden geçen akım istenildiği gibi ayarlanabilecek hale getirilmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Dimmer Anahtar

Fan; 119 x 119 x 38 mm ebatlarında olup EBMPAPST markadır. Mono faz olarak çalışan bu fan, 2650 rpm dönüş hızına sahiptir. Metal muhafaza ve pervanelere sahiptir (Şekil 20).



Şekil 20. Fan

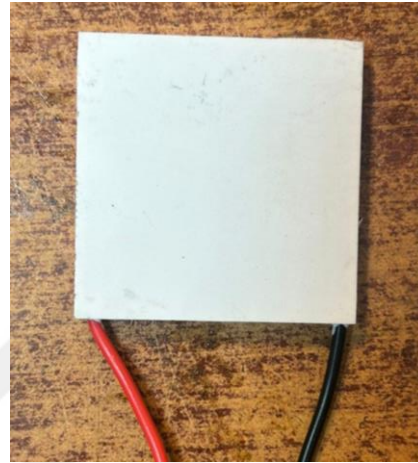
Straforlar; 20 mm kalınlığında XPS serisidir. Deney düzeneğinde, yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde deneyin gerçekleştirileceği kutunun oluşturulması için belirli boyutlarda kesilmiş ve dış ölçüleri 300 x 250 x 500 mm olacak 2 bölmeli bir kutu olacak şekilde birleştirilmiştir. Kutunun alt bölümü 390 mm yüksekliğe, üst bölümü ise 50 mm yüksekliğe sahiptir. Kutunun birleştirilebilmesi, rijit bir forma gelmesi ve yalıtımının artabilmesi için dış ve iç yüzeylerinin tamamı takviyeli yapışkan alüminyum bantlar ile kaplanmıştır.

Termoelektrik jeneratörler; 40 x 40 x 4 mm ebatlarında, 'SP 1848 27145 SA' modelidir. Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde 4 adet TEJ kullanılmıştır. Yüzeyleri arası sıcaklık farkına göre ürettiği elektrik enerjisi değişebilen bu cihazlar, sırası ile; 20 °C sıcaklık farkında 0,97 V ve 225 mA, 40 °C sıcaklık farkında 1,8 V ve 368 mA, 60 °C sıcaklık farkında 2,4 V ve 469 mA, 80 °C sıcaklık farkında 3,6 V ve 559 mA, 100 °C sıcaklık farkında 4,8 V ve 669 mA değerlerine ulaşabilmektedir. Maksimum 4,8 V üretebilmekte ve 120 °C sıcaklığa dayanabilmektelerdir. Soğuk taraf (Şekil 21) ve sıcak taraf (Şekil 22) arasındaki fark

ise model numarasının basılı olduğu yüzeye göre veya üzerinde lehimli bir şekilde bulunan siyah ve kırmızı kabloların konumlarına göre belirlenmektedir. Bu araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde kullanılan TEJ'lerde, yazısız yüzey sıcak taraf olarak kabul edilmektedir.



Şekil 21. TEJ Soğuk Yüzey



Şekil 22. TEJ Sıcak Yüzey

SP1848-27145 SA, düşük elektriksel güç uygulamaları için tasarlanmış Bizmut Tellürür (Bi_2Te_3) tabanlı bir termoelektrik jeneratördür. Bizmut tellürün oda sıcaklığına yakın uygulamalar için uygun olması nedeniyle bahsi geçen malzeme tercih edilmiştir. Termal yapıştırıcı ile monte edilmeye uygun bir yapısı vardır. Bu potansiyel nihayetinden elektrik enerjisi oluşumunu sağlamaktadır. SP1848-27145 SA'nın güç çıkışı sıcaklık farkları ve yük direncine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Düşük sıcaklık farklarında güç üretebilme yeteneği düşük güç üretimlerinde uygun bir seçenek olarak öne çıkmasını sağlamaktadır.

Tablo 4. SP1848-27145 SA Modülü Özellikleri

Parametre	Özellik
Genişlik (mm)	40
Uzunluk (mm)	40
Kalınlık (mm)	3,8
Kütlesi (gram)	25
Seramik Gofret Kalınlığı (mm)	1
Yüzey Malzemesi	Seramik
Pozitif Ayak Malzemesi	Bi_2Te_3
Negatif Ayak Malzemesi	Bi_2Te_3

Seebeck Katsayısı (V/K)	0,054
Maksimum Çalışma Sıcaklığı(°C)	120 °C

Termal Yapıştırıcı; Kafuter markadır. K-5204K modeli bir yapıştırıcıdır. Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde, TEJ'ler ve alüminyum plaka arasındaki teması sağlaması amacı ile yapıştırıcı olarak kullanılmıştır (Şekil 23).



Şekil 23. Termal Yapıştırıcı

Termokupllar; PVC yalıtım malzemesine sahiptir. 2 damarlı bir kablo görüntüsündedir. Ölçüm sıcaklık aralığı -55 ila +130 °C'dir. '+' ucu oluşturan teller nikel krom içeriklidir. '-' ucu oluşturan teller ise nikel içeriklidir. Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde 7 adet termokupl kullanılmıştır.

Veri kaydedici; HIOKI markasının, LR450 modeli kullanılmıştır. DC voltaj, sıcaklık, kümülatif darbe, dönüş ölçümü yapabilmektedir. Verileri anlık olarak kaydedebilmekte ve aynı anda 20 farklı veri kaydı yapabilmektedir. Veri kaydını CF karta veya USB belleğe gerçek zamanlı gerçekleştirmektedir. Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde, 8 adet ölçüm girişi kullanılmıştır. Bunlardan 7 adedi sıcaklık ölçümü, 1 adedi ise DC voltaj ölçümü yapılması için kullanılmıştır.

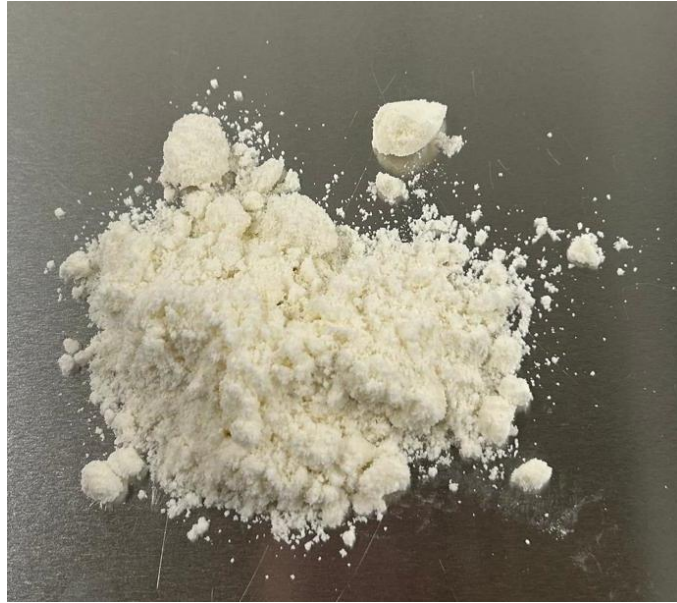


Şekil 24. HIOKI LR 450

Alüminyum plakalar; her iki plaka kalınlığı da 1 mm'dir. Üst bölmede bulunan plaka dıştan dışa 170 x 250 mm ölçülerindedir. Kenarlarında 10 mm kıvrımlar olacak şekilde bükülmüştür. Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinde FDM'nin doldurulması için kullanılmıştır. Alt bölmede bulunan plaka ise 160 x 40 mm ölçülerindedir. TEJ modülleri ile ısı kaynağı arasına yerleştirilmiştir.

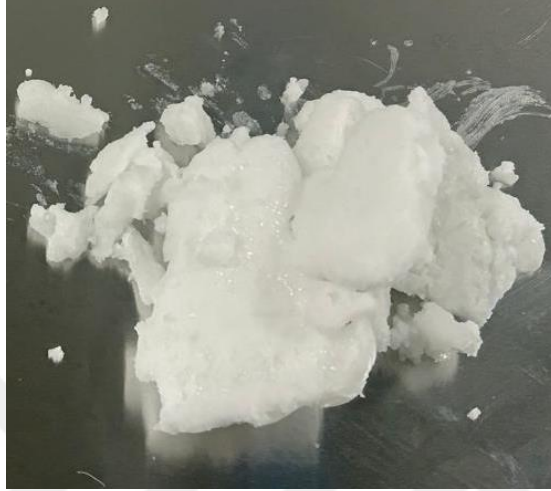
Faz değiştirici malzemeler, gizli ısı depolama yeteneği sayesinde oldukça geniş çalışma alanına sahiptirler. Bu işlevini katı-sıvı veya sıvı-gaz fazları arasında oluşan ısı alma verme olayları sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, kullanılan faz değiştirici malzemeler, bu özellikler dikkate alınarak seçilmiştir. Bu çalışmada iki farklı FDM kullanılmıştır. Bunlardan biri FDM-1, diğeri ise sıvı formda bulunan FDM-2'dir.

FDM-1 (Şekil 25), 19 ila 28 °C arasında erimeye başlamaktadır. Ek olarak maksimum depolayabileceği sıcaklık değeri yaklaşık 121 °C'dir. Bu malzeme, ortalama bir oda sıcaklığında dahi ısı alışverişine başlayabilmektedir. Bu ısı alışverişini gizli ısı olarak yorumlanır. Deney düzeneğinde yer alan, alüminyum plakalar arasında oluşan en ufak ısı değişiminde dahi etkinlik gösterebilmesi, bu malzemenin düşük sıcaklıklarda erimeye başlaması özelliği sayesinde. FDM-1'in c_p değeri 2,89 $kJ/kg * K$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 25. FDM-1

FDM-2'nin (Şekil 26) ise bu araştırma projesi kapsamında, tercih edilmesinin sebebi deney için gerekli özellikleri barındırmasıdır. FDM-1'e benzer şekilde erime noktası istenen değer aralığındadır. FDM-2'nin erime noktası 29 ila 36 °C'dir. FDM-2'nin c_p değeri $2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 26. FDM-2

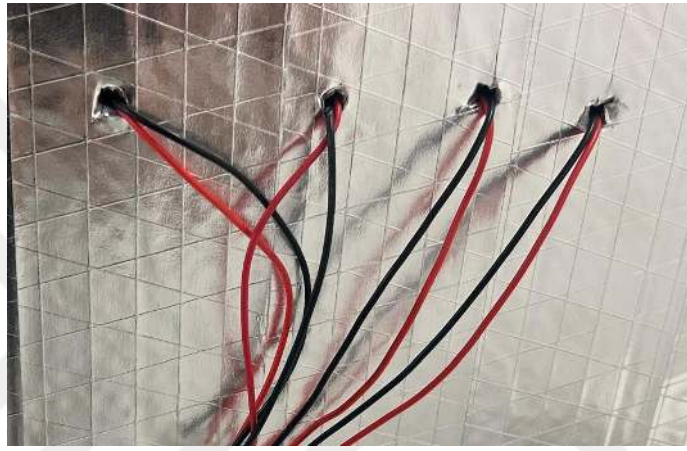
5.2. Deney Düzeneği Tasarımı

Araştırma kapsamında deney düzeneğini oluşturmak için, öncelikle 250 x 300 x 500 mm ölçülerinde straforlardan oluşturulmuş bir kutunun tamamı, takviyeli yapışkan alüminyum bantlar ile kaplanmıştır. Kutu iki ayrı bölme şeklinde tasarlanmıştır. Bu bölmeler, alt bölme ve üst bölme olarak adlandırılmıştır (Şekil 27).



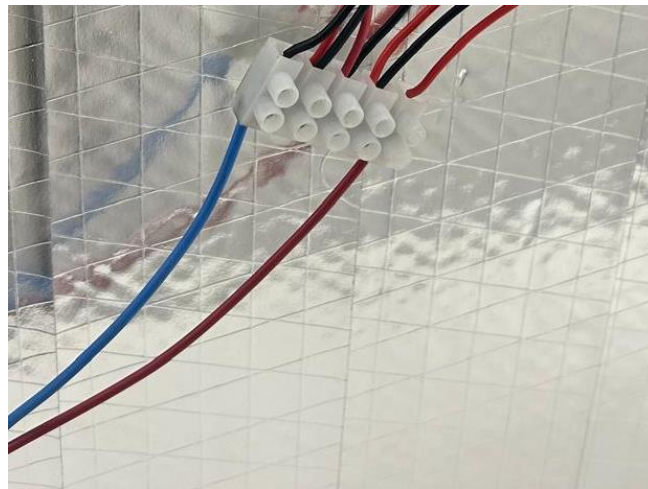
Şekil 27. Deney Düzeneği İçin Oluşturulmuş Kutu

Üst bölme için kutudan bağımsız bir kapak yapılmıştır. Tasarım aşamasında, kutu ölçüleri belirlenirken, ısı kaynağının TEJ'lere yakınlaştırılabilmesi veya uzaklaştırılabilmesi için gerekli mesafe göz önüne alınmıştır. Sonrasında alt bölme ile üst bölme arasına TEJ'ler yerleştirilmiştir. TEJ'ler termal yapıştırıcı yardımı ile üst bölmenin zemininde yer alan 170 x 250 mm ebatlarındaki alüminyum plaka ve alt bölmede yer alan 40 x 160 mm ebatlarındaki alüminyum plaka arasına yapıştırılmıştır. Kutunun arka kısmında delikler açılarak TEJ'lerin kabloları, elektrik bağlantısının gerçekleştirilmesi için kutunun dışına taşınmıştır (Şekil 28).



Şekil 28. TEJ Bağlantı Kabloları

Kutunun dışına taşınan TEJ'lerin kabloları sıralı klemens yardımı ile seri olarak bağlanmıştır. Daha sonra seri bağlanan sıralı klemens, harici 2 kablo ile veri kaydediciye taşınarak TEJ'lerin bağlantıları tamamlanmıştır (Şekil 29).



Şekil 29. TEJ Kablo Bağlantı Şekli

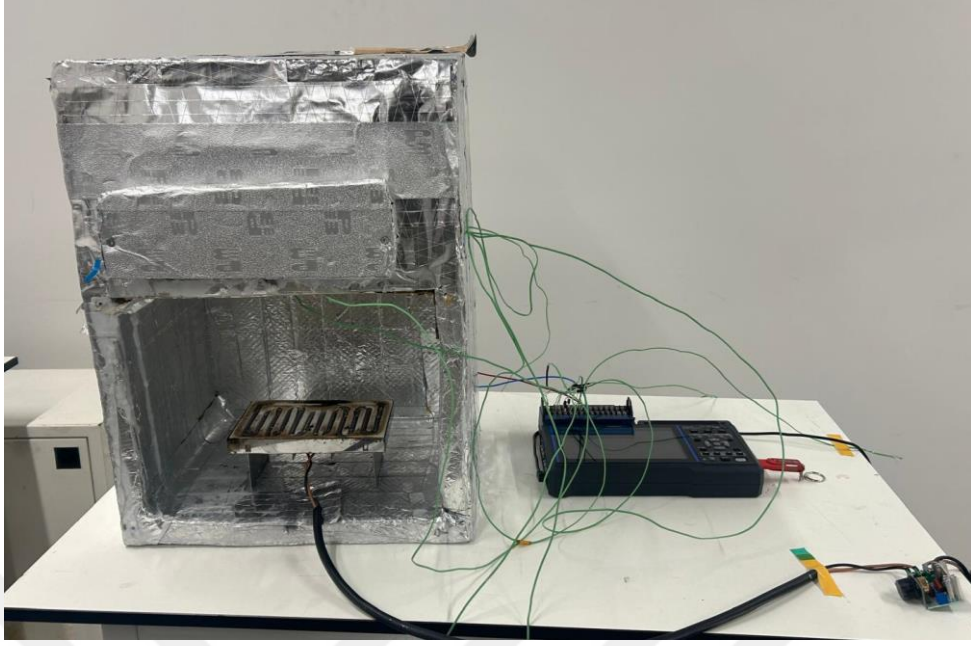
Isı kaynağı ise kutunun alt bölme olarak adlandırılan kısmının, zeminine yerleştirilmiştir. Bu sayede TEJ'ler ve ısı kaynağı arasındaki mesafe 300 mm olarak sabitlenmiştir (Şekil 30). Isı kaynağı dimmer sayesinde ayarlanabilir bir durumda olduğundan deney başlangıcı öncesinde 32 W güç üretecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 30. Harici Isı Kaynağı Konumlandırılması

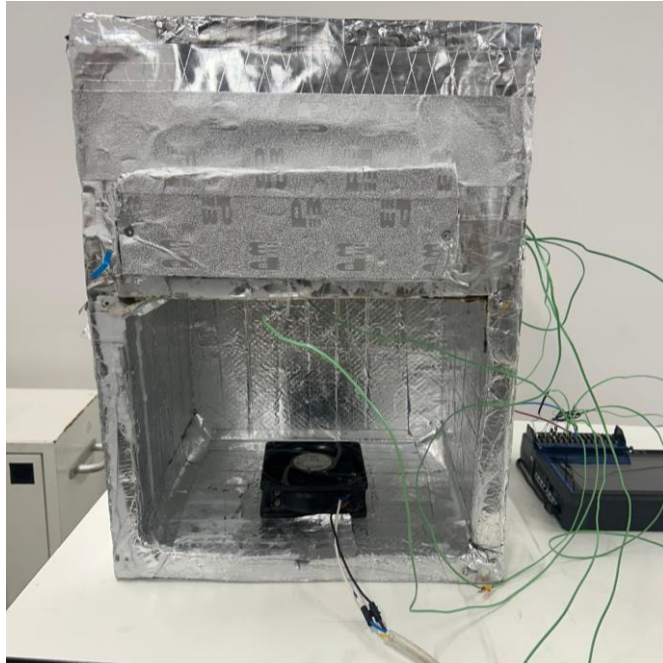
Deney sürecinde, TEJ'lerin 120 °C sıcaklıktan sonra hasar alarak, işlevsiz bir duruma gelmelerinden sebep düzenli aralıklar ile sıcaklık kontrolü yapılmış ve 120 °C'yi aşmaması sağlanmıştır.

Termokuplları ölçümlerin yapılacağı noktalara konumlandırmak için kutunun farkı yerlerine delikler açılmış ve konumlandırılmanın tamamlanmasının ardından tekrar yalıtılmıştır. Termokuplların 2 adedi TEJ'lerin sıcak yüzeylerinden, 2 adedi TEJ'lerin soğuk yüzeylerinden, 2 adedi FDM'nin içerisinden ölçüm alınabilecek şekilde konumlandırılmıştır. Çevre sıcaklığının ölçümü için bir termokupl kullanılmıştır. Her bir noktadan 2 adet ölçüm alınmasının sebebi, termokuplların olası ölçüm hatalarını minimize etmektir. Deney tamamlandığında aynı noktada bulunan termokuplların ölçümünü yapmış olduğu değerlerin ortalamaları alınarak sonuç kısmına eklenmiştir. Deney düzeneği kurulumunun tamamlanmasının ardından, FDM'ler belirli ölçekler ile alüminyum plakalar üzerine yerleştirilmiş ve deney başlatılmıştır (Şekil 31).



Şekil 31. Deney Düzeneği-1

Çalışma kapsamında oluşturulan deney iki aşamadan oluşması sebebiyle, deneyin ilk aşamasının tamamlanmasının ardından fan, ısıtıcı kaynağının yerini almış ve hava sirkülasyonu başlatılmıştır (Şekil 32).



Şekil 32. Deney Düzeneği-2

Bu aşama gerçekleştirirken FDM'lerin olduğu bölmenin kapağı açılmamıştır. Termokuplların ve TEJ'lerin herhangi biri yerinden oynatılmamış veya herhangi bir ekstra etkiye maruz kalmamışlardır.

5.3. Deney Metodu

Araştırma kapsamında oluşturulan deney düzeneğinin hazırlanmasının ardından, ilk olarak deneylerde kullanılacak FDM miktarı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken deneyin yapılacağı kutunun üst bölmesinin hacmi esas alınmıştır. Deney sürecinde kullanılan kutunun üst bölmesinin ebatları 170 x 250 x 50 mm olarak sabitlenmiştir. Kutunun üst bölmesinin hacmi 2125 cm^3 'tür. Her iki deney içinde esas alınan hacmin %70'i FDM ile doldurulacaktır. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda deney düzeneğine koyulacak FDM'nin hacmi, her iki deney içinde $1487,50 \text{ cm}^3$ 'tür. Bu değer baz alınarak her bir deney için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

5.3.1. Deney 1

İlk deneye başlanırken, deney öncesi hesaplanmış esas hacim göz önünde bulundurularak deney düzeneğine koyulacak olan FDM-1'in kütlesinin hesaplanması amaçlanmıştır. FDM-1'nin özkütlesi, kütle ve hacim ilişkisinden yola çıkılarak $0,34 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Kütle, özkütle ve daha öncesinde hesaplanmış hacim ilişkisi kullanılarak, deneyde kullanılacak olan FDM-1'nin kütlesi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, deney düzeneğine 505,75 gram FDM-1 koyulmuştur. FDM'nin eklenmesi sonrasında termokuplların konumları, dimmer anahtarın ayarı gibi önemli etmenlerin kontrolleri tamamlanmış ve deney başlatılmıştır. Deney 420 dakika boyunca devam etmiş ve bu süre zarfında ölçülen bütün veriler anlık olarak kaydedilmiştir. Deneyin ilk aşaması 420 dakikanın sonunda tamamlanmış ve veriler kayıt altına alınarak, ikinci aşamaya geçiş için hazırlıklar başlamıştır. İkinci aşamanın başlaması için ısı kaynağı deney düzeneğinden çıkartılmış ve yerine fan koyulmuştur. Fan çalıştırılmış ve deney 180 dakika daha sürdürülmüştür. Deneyin ikinci aşamasının da tamamlanmasının ardından veriler tekrar kayıt altına

alınmış ve ilk deney tamamlanmıştır. İlk deney çıktısı olarak alınan değerlerin ortalamaları alınmış ve incelenmiştir.

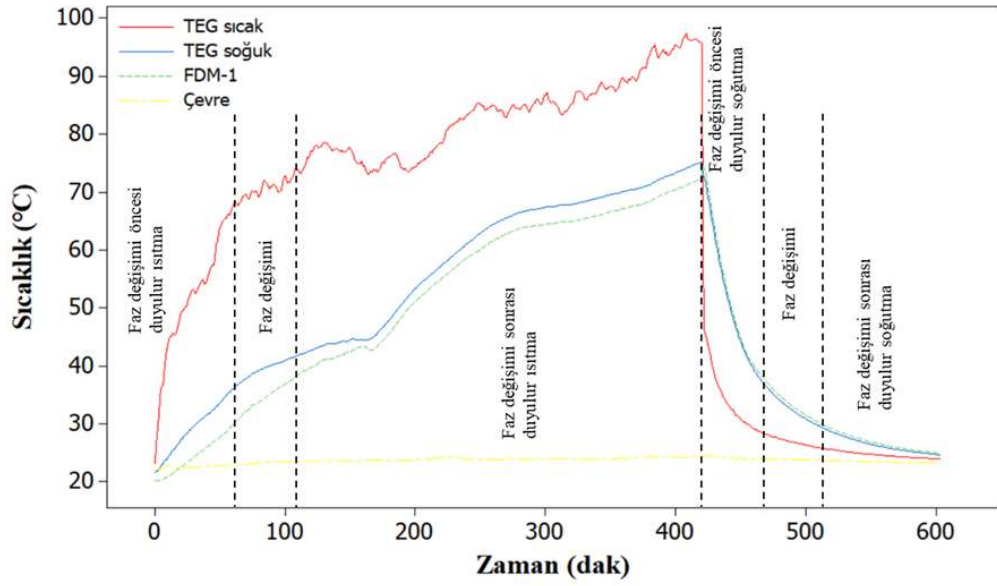
5.3.2. Deney 2

İkinci deneyin yapımına başlanırken, deney öncesi hesaplanmış esas hacim göz önünde bulundurularak FDM-2'nin hacminin hesaplanması amaçlanmıştır. Daha sonra FDM-2'nin özkütlesi, kütle ve hacminden yararlanılarak $0,86 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. İlk deneyde izlenen metotların aynısı izlenerek 1271,51 gram FDM-2'nin deney düzeneğine koyulması gerekliliği hesaplanmıştır. Deney düzeneğine 1270 gram FDM-2 koyulmuştur. İlk deneyde gerçekleştirilen prosedürlerin aynısı gerçekleştirilmiş ve ikinci deneyin ilk aşaması başlatılmıştır. İki FDM arasında kıyaslama yapılabilmesi adına, bu deneyin de ilk kısmı 420 dakika boyunca sürdürülmüş ve veriler anlık olarak kaydedilmiştir. Sonrasında, ilk deneyde olduğu gibi bu deneyde de ısı kaynağı çıkartılarak yerine fan koyulmuş ve deneyin ikinci aşaması başlatılmıştır. Tekrar aynı sebep gözetilerek, deneyin ikinci aşaması da 180 dakika sürdürülmüştür. Deneyin ikinci aşamasının tamamlanmasının ardından elde edilen sonuçlar birinci aşamasında ve ilk deneyde de yapıldığı gibi kayıt altına alınmış ve ikinci deney aşaması da sonlanmıştır. İkinci deneyde de ilk deneyde olduğu gibi kaydedilmiş değerlerin ortalamaları alınmış ve incelenmiştir.

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bir önceki bölümde TEJ modülünün tasarımı imalatı ve testlerinin gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Bu bölümde ise modülün farklı 2 FDM kullanılarak termal ve elektriksel test sonuçları incelenmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, her bir test 2 çevrimden oluşmaktadır bunlar ısıtma ve soğutma çevrimleridir. Isıtma çevriminde TEJ'in sıcak yüzeyi bir dış ısı kaynağı ile ısıtılmış ve soğuk yüzey ile temas halinde olan FDM bu çevrim boyunca ısıyı duyulur ve gizli olmak üzere depolamıştır. Isıtma çevrimi sonlandığında ise sistem tersine olarak çalışmaya devam ederek elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Soğutma çevrimi olarak adlandırılan bu kısımda, bir önceki çevrimde depoladığı ısıyı ortama veren FDM, yine bir önceki çevrimde soğuk ve sıcak olan yüzeyleri tam tersine çevirerek voltaj üretimi devam etmiştir. Her iki FDM için de ısıtma çevrimi 420 dakika, soğutma çevrimi 180 dakika boyunca devam etmiştir ve toplamda her bir deney 600 dakika sonunda sonlandırılmıştır.

Şekil 33 ısıtma ve soğutma çevrimleri boyunca TEJ'in yüzey sıcaklıkları, FDM-1 ve çevre sıcaklıklarını göstermektedir. Isıtma çevriminde TEJ'in sıcak tarafına bağlı olan alüminyum plakaya harici bir ısı kaynağı uygulanmıştır. Bu ısı geçişi, TEJ'in sıcak ve soğuk taraflarının sıcaklıklarını arttırmıştır. Ancak, sıcaklık artış hızı her iki taraf için farklıdır. Bunun nedeni, FDM'nin, TEJ'in soğuk tarafına temas etmesi ve bir ısı emici olarak hareket etmesidir. FDM, soğuk taraftaki ısıyı emerek soğuk yüzeyin sıcaklık artış hızını azaltmıştır.

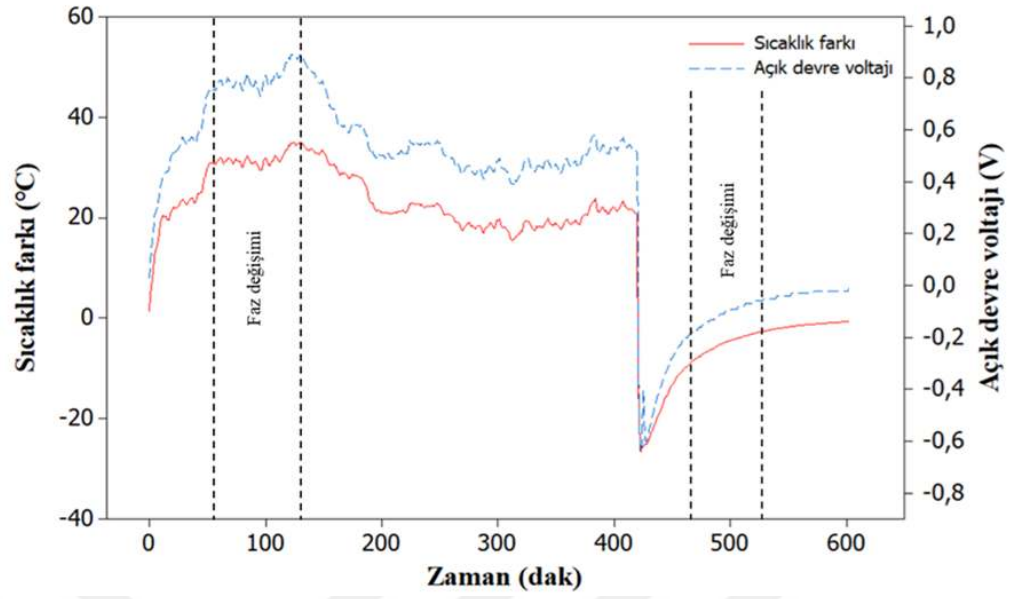


Şekil 33. FDM-1 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün sıcaklık dağılımları

FDM-1 için ısıtma çevrimi 3 alt kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, ‘faz değişimi öncesi duyulur ısıtma, faz değişimi ve faz değişimi sonrası duyulur ısıtma’dır. Başlangıç sıcaklığı 20 °C olan FDM-1, soğuk yüzeyden ısı çekerek sıcaklığını arttırmıştır. Bu sıcaklık artışı, faz değişim başlangıç sıcaklığına (29°C) kadar devam etmiştir. Bu kısım yaklaşık 60 dakika sürmüştür. Daha sonra soğuk yüzeyden ısı emmeye devam eden FDM-1, bu ısıyı gizli ısı olarak depolamaya devam eder ve malzeme faz değişimine uğrar. Bu kısım yaklaşık 45 dakika devam etmiştir. Faz değişim süreci sonlandıktan sonra FDM-1 soğuk taraftan tekrar duyulur ısı formunda ısı çekerek sıcaklığı artmaya devam eder. Isıtma çevrimi 420 dakika sonunda sonlandırılmıştır. Isıtma çevrimi sonlandırıldıktan sonra, TEJ modülünün sıcak yüzeyine etki eden ısı kaynağı kaldırılmış ve yerine bir fan konulmuştur. Isıtma çevriminde ısı kaynağının etki ettiği sıcak yüzey, soğutma çevriminde TEJ modülünün soğuk yüzeyi olmuş ve soğuk yüzey ile çevre ortam arasındaki ısı transfer miktarını dolayısıyla soğuk yüzeyden çekilecek ısı miktarını arttırmak amacı ile fan kullanılmıştır. Isıtma çevrimi boyunca hem duyulur hem de gizli ısı formunda depoladığı enerjiyi çevreye veren FDM-1 bir önceki çevrimde soğuk yüzey olan kısmın bu çevrimde sıcak yüzey olarak çalışmasını ve voltaj üretmesini sağlamıştır. Şekil 33’te gösterildiği gibi, soğutma çevrimi başlangıcında mavi ile belirtilen soğuk yüzey TEJ modülünün en yüksek sıcaklığa sahip kısmı, kırmızı ile gösterilen sıcak

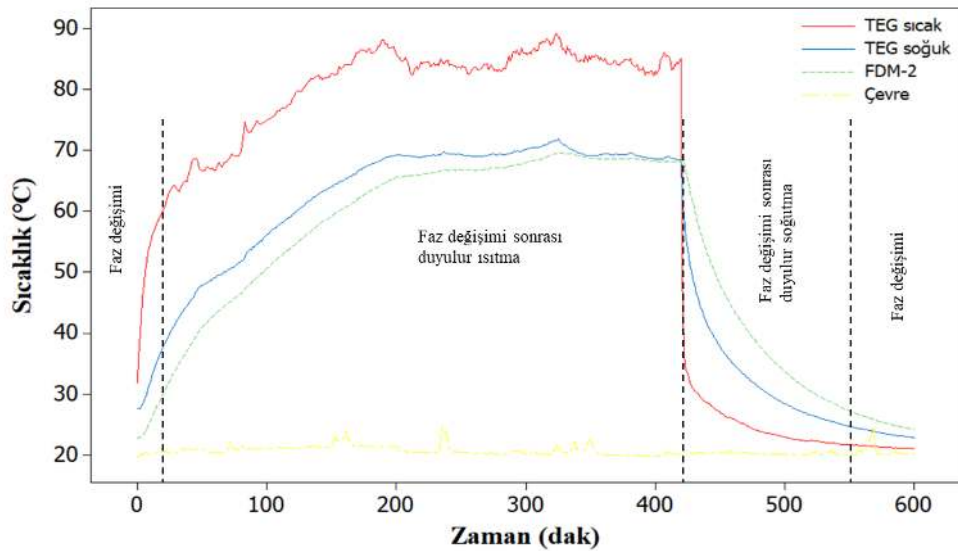
yüzey ise modülün en soğuk kısmı haline gelmiştir. Soğutma çevrimi de ısıtma çevrimi gibi 3 alt kısımdan oluşmuştur. Bunlar faz değişimi öncesi duyulur soğutma, faz değişimi ve faz değişimi sonrası duyulur soğutmadır. Faz değişimi öncesi duyulur soğutma kısmında başlangıç sıcaklığı 74 °C olan FDM-1 depoladığı ısıyı modülün soğuk yüzeyine aktararak ısı kaybetmeye başlar ve dolayısıyla sıcaklığı düşer. FDM-1 ile sıcak ve soğuk yüzeylerin de sıcaklıkları düşüş gösterir. FDM-1 sıcaklığı 36 °C'ye ulaştığında faz değişimi (katılaşma) başlar. Faz değişimi yaklaşık olarak 50 dakika devam etmiş ve daha sonra duyulur soğutma başlamıştır. Soğutma çevrimi 600 dakika sonunda, bu aynı zamanda FDM-1, sıcak ve soğuk yüzeylerinin sıcaklıklarının eşitlendiği noktada sonlandırılmıştır.

Önceki bölümlerde TEJ modülünün elektrik üretiminin iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak değiştiğinden bahsedilmiştir. Şekil 34'te TEJ modülünün iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve voltaj üretimi sıcak ve soğuk çevrim için gösterilmiştir. Sıcaklık farkı ile voltaj üretimi beklenildiği gibi benzer bir trende sahiptir. Isıtma çevriminin ilk kısmında sıcak ile soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı artış göstermiştir. Bunun sebebi FDM-1'in soğuk yüzeyden ısı çekmesi ile sıcaklık artışının sıcak yüzeyin sıcaklık artışında göre daha yavaş kalmasıdır. Faz değişimi kısmında sıcaklık farkı 35,1 °C ile en yüksek değerine ulaşmış ve en yüksek voltaj üretimi (0,89 V) gerçekleşmiştir. Faz değişimi kısmından sonra sıcaklık farkı kademeli olarak düşme eğilimi göstermiş dolayısıyla voltaj üretimi de azalma eğilimi göstermiştir. Isıtma çevrimi boyunca TEJ modülü ortalama 0,58 V voltaj üretebilmiştir.



Şekil 34. FDM-1 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün yüzey sıcaklık farkları ve voltaj üretimi

Soğutma çevriminde sıcak ile soğuk yüzey yer değiştirmiş olsa da iki yüzey arasında sıcaklık farkı oluşmasından dolayı TEJ modülü negatif voltaj üretebilmiştir. Sistem soğutma çevrimi boyunca ortalama -0,13 V voltaj üretimi gerçekleştirebilmiştir.



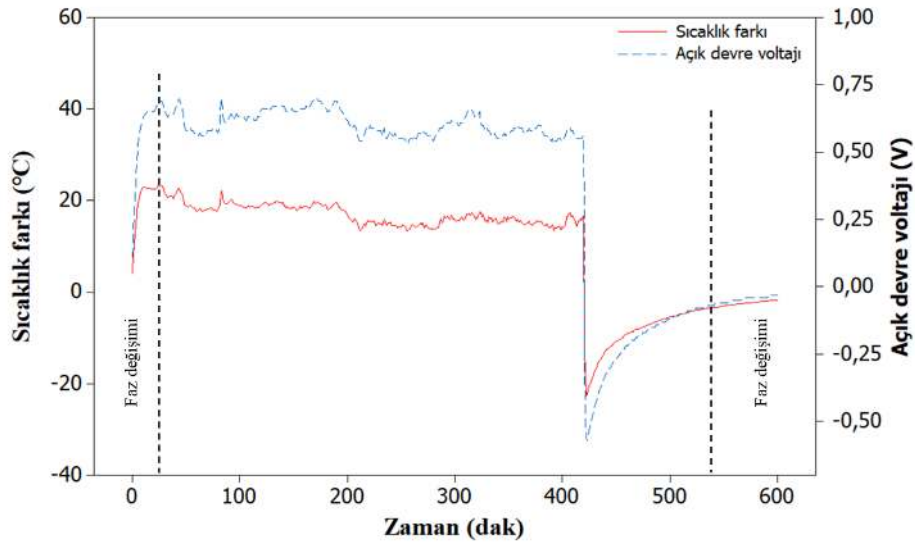
Şekil 35. FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün sıcaklık dağılımları

Şekil 35 ısıtma ve soğutma çevrimleri boyunca TEJ'in yüzey sıcaklıkları, FDM-2 ve çevre sıcaklıklarını göstermektedir. FDM-1'den farklı olarak ısıtma ve soğutma çevrimi 2 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar faz değişimi ve faz değişimi sonrası duyulur ısıtma/soğutmadır. Isıtma çevriminin başlangıcında FDM-2'nin sıcaklığı (22,7 °C) faz değişim sıcaklık aralığı içerisine düştüğü için faz değişimi öncesi duyulur ısıtma bölgesi oluşmamıştır. Faz değişim bölgesi FDM-2'nin sıcaklığının 28 °C'ye ulaşması sonrası (15 dakika) faz değişimi sonlanmış ve faz değişimi sonrası duyulur ısıtma gerçekleşmeye başlamıştır. FDM-1'de gözlemlenen sıcaklık artış eğilimi FDM-2 için de gözlemlenmiştir. Harici ısı kaynağı sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklıklarının artmasına sebep olmuş fakat bu artış soğuk yüzey için daha düşüktür. Aynı şekilde bunun sebebi soğuk yüzey ile temas halinde olan FDM-2'nin yüzeyden ısı çekmesi ve soğuk tarafın sıcaklık artışının gecikmesidir. Isıtma çevriminin sonuna kadar FDM-2 soğuk yüzeyden ısı çekmeye devam ederek iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının azalmasını geciktirmiştir. Isıtma çevrimi 420 dakika sonunda sonlandırılmıştır.

FDM-1'de uygulanan prosedür aynı şekilde FDM-2 için de uygulanmış ve TEJ modülünün sıcak yüzeyine etki eden ısı kaynağı kaldırılmış ve yerine bir fan konulmuştur. Şekil 35'te gösterildiği gibi, soğutma çevrimi başlangıcında mavi ile belirtilen soğuk yüzey TEJ modülünün en yüksek sıcaklığa sahip kısmı, kırmızı ile gösterilen sıcak yüzey ise modülün en soğuk kısmı haline gelmiştir. Isıtma çevriminde olduğu gibi soğutma çevrimi de 2 alt kısımdan oluşmuştur. Isıtma çevriminde sistemde en düşük sıcaklığa sahip FDM, soğutma çevriminde sistemin en yüksek sıcaklığına sahip bir ısı kaynağı olarak temas ettiği soğuk yüzeye ısınıp vererek sıcaklığa düşmüştür. Bu kısım faz değişimi öncesi duyulur soğutma olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak 120 dakika devam etmiştir. Daha sonra sıcaklığı faz değişim sıcaklığına kadar düşen FDM-2 faz değiştirmeye (katılaşmaya) başlamış ve deney sonuna kadar faz değişimi bölgesinde kalmıştır.

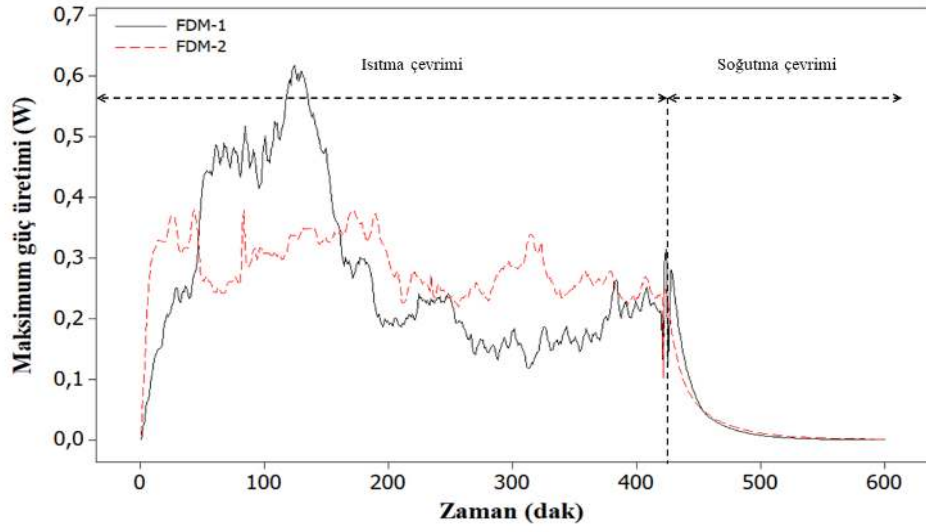
Şekil 36, TEJ modülünün iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve açık devre voltaj üretimini göstermektedir. Benzer şekilde sıcaklık farkı ile voltaj üretimi benzer bir trende sahiptirler. Deneyin başında faz değişimi bölgesinde olan FDM-2 soğuk yüzeyden ısı çekerek, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının artmasına sebep olmuş ve böylece voltaj üretimi de ani bir artış göstermiştir. Daha sonra duyulur ısıtma

bölgesine geçen FDM-2, soğuk yüzeyden ısı çekmeye devam etmiş ve sıcaklık farkını belli bir aralıkta tutmuştur. Bu bölgede maksimum sıcaklık farkı 23,4 °C'ye ve maksimum voltaj üretimi de 0,7 V olarak ölçülmüştür. Bu bölgede TEJ modülü ortalama 0,6 V voltaj üretmiştir. Soğutma çevrimi kısmında ise sıcaklık farkı ve voltaj üretimi ısıtma çevrimine kıyasla daha düşük olsa bile bu bölgede ortalama -0,15 V voltaj üretimi sağlanmıştır.



Şekil 36. FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün yüzey sıcaklık farkları ve voltaj üretimi

Her iki FDM'nin ısıtma ve soğutma çevrimlerinde ürettikleri maksimum güç Şekil 37'de gösterilmiştir. FDM-1 ile bütünleşik sistem ortalama 0,19 W, FDM-2 ile bütünleşik sistem ise ortalama 0,2 W güç üretimi gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 37. FDM-1 ve FDM-2 ile bütünleştirilmiş TEJ modülünün maksimum güç üretimi

Buna ek olarak, TEJ modülünün ürettiği toplam elektrik enerjisi aşağıda belirtilen eşitlik ile hesaplanmıştır. FDM-1 ile bütünleşik sistem 600 dakika sonunda 264,04 $W * saat$, FDM-2 ile bütünleşmiş sistem ise 180,21 $W * saat$ 'lik elektrik enerjisi üretmiştir.

$$E = \int_0^t P_{maks} * dt \quad 6.1.$$

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında termoelektrik etkiden yararlanılarak atık ısı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretmek amacı ile farklı iki FDM ile bütünleşik bir TEJ modülü tasarlanmış, imal edilmiş ve deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

- Mevcut sistem düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında elektrik üretimi için kullanılabilir.
- Sistemde kullanılan her iki FDM, modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının oluşmasında ve sıcaklık farkının azalmasının geciktirilmesinde dolayısıyla daha yüksek değerde ve uzun süreli voltaj üretimine olanak sağlamıştır.
- Soğuk taraf ile temas halinde bulunan FDM'ler soğuk yüzeydeki sıcaklık dalgalanmalarını önlemiş ve daha stabil bir sıcaklık aralığı yakalanmasını sağlamıştır.

Buna ek olarak deneyler sırasında sıcak yüzeyin sıcaklık dağılımının çok fazla dalgalanmaya maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bunu önlemenin bir yolu FDM'nin sıcak yüzeyle de temas edecek şekilde kullanılmasıdır. Bu hem sıcak taraftaki sıcaklık dalgalanmalarını önleyecek hem de TEJ modülünün yüksek sıcaklıktan etkilenip, zarar görme riskini de azaltacaktır. Ayrıca, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının artırılması ve bu farkın daha uzun süre korunmasının bir yolu da FDM ile temas ettiği yüzey arasındaki termal direncin azaltılmasıdır. Bu FDM'in içerisine ısıl iletim katsayısı görece yüksek nano partiküllerin eklenmesi veya daha yüksek ısıl iletim katsayısına sahip kompozit FDM'ler kullanılması ile sağlanabilir. Bunun yanı, ısıtma ve soğutma çevrimlerinin süreleri uzatılarak elektrik enerjisi üretim süresi uzatılabilir. Ek olarak, termal ve mekanik gerilmelere daha dayanıklı, termal iletkenliği düşük ve elektrik iletkenliği ise daha yüksek termoelektrik malzemelerden oluşan TEJ modülleri kullanarak elektrik enerjisi üretimi arttırılabilmesi de bir başka araştırma konusu olabilir.

KAYNAKÇA

- Arı, F. ve Yılmaz, V. (2023). Türkiye’de ve Dünya’da enerji kaynaklarının genel görünümü ve alternatif enerji kaynaklarının önemi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 34, 496-519.
- Aydoğdu, Ç. (2021). Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve Türkiye’de yansımaları. *Journal of Academic Projection*, 6(1), 52-74.
- Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J. M., Kanatzidis, M. G., Narducci, D., Martin- Gonzalez ve diğerleri. (2019). Thermoelectrics: From history, a window to the future. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 138, 100501.
- Brostow, W., Granowski, G., Hnatchuk, N., Sharp, J. ve White, J. B. (2014). Thermoelectric Phenomena. *Journal of Materials Education*, 36(5-6), 175186.
- Byon, Y.-S. ve Jeong, J.-W. (2020a). Annual energy harvesting performance of a phase change material-integrated thermoelectric power generation block in building walls. *Energy and Buildings*, 228, 110470.
- Byon, Y.-S. ve Jeong, J.-W. (2020b). Phase change material-integrated thermoelectric energy harvesting block as an independent power source for sensors in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109921.
- Byon, Y.-S., Lim, H., Kang, Y.-K., Yoon, S.-Y. ve Jeong, J.-W. (2019). Passive generation from a novel thermoelectric energy harvesting system model integrated with phase change material. *E3S Web of Conferences*, 111, 03060.
- Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167-181.

- Chen, G., Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Fleurial, J.-P. ve Caillat, T. (2003). Recent developments in thermoelectric materials. *International Materials Reviews*, 48(1), 45-66.
- Dal, İ. (2020). *Yüksek performanslı stabil faz değişim malzemesinin geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://acikkaynak.bilecik.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11552/1419/10347935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Das, A. K., (2018). A review on thermoelectric effects and phenomenon. *International Journal of Research in Engineering, IT and Social Sciences*, 8(9), 242-247.
- Demirbaş, M. F. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: An overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 85-95.
- DiSalvo, F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. *science*, 285(5428), 703-706.
- Elefsiniotis, A., Kiziroglou, M. E., Wright, S. W., Toh, T. T., Mitcheson, P. D., Becker, T. ve diğerleri. (2013). Performance evaluation of a thermoelectric energy harvesting device using various phase change materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 476, 012020.
- Elektrikde. (2019). Gelgit enerjisinin elektrik üretiminde kullanılması. Erişim adresi: <https://www.elektrikde.com/gelgit-enerjisinin-elektrik-uretiminde-kullanilmasi/>
- Elgendi, M., Tamimi, J. AL, Alfalahi, A., Alkhoori, D., Alshanqiti, M. ve Aladawi, A. (2022). Wall panels using thermoelectric generators for sustainable cities and communities: A mini-review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1074(1), 012003.
- Elzalik, M., Rezk, H., Shehata, E. G., Thomas, J., ve Mostafa, R. (2019). INC-MPPT algorithm for maximizing energy conversion efficiency of thermoelectric generating system. *Engineering Research Journal*, 162, M34-M49.

- Enerji Teknolojileri. (2015). Rüzgâr enerjisi. Erişim adresi: <https://enerjiteknolojileri.wordpress.com/2015/04/16/ruzgar-enerjisi/>
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303.
- Gao, M., Su, C., Cong, J., Yang, F., Wang, Y., ve Wang, P. (2019). Harvesting thermoelectric energy from railway track. *Energy*, 180, 315–329.
- GD. (t.y.). Yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirme hizmetleri. Erişim adresi: <https://www.netgd.com.tr/tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-degerleme-hizmetleri>
- Goldsmid, H. (2014). Bismuth Telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation. *Materials(Basel)*, 7(4), 2577-2592.
- Goldsmid, H. J. (2010). *Introduction to Thermoelectricity*. Springer Berlin Heidelberg.
- Gürbüz, H., Demirtürk, S., Akçay, H., ve Topalcı, Ü. (2023). Thermal stabilization and energy harvesting in a solar PV/T-PCM-TEG hybrid system: A case study on the design of system components. *Energy Conversion and Management*, 294, 117536.
- Jaworski, M., Bednarczyk, M. ve Czachor, M. (2016). Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 96, 527-533.
- Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L. ve diğerleri. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063.
- Kaldellis, J. K., ve Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 36(7), 1887-1901.

- Kılıç Bakırhan, E. (2023). Faz değıştiren malzemelerin bina yaşam döngüsü evrelerindeki mevcut potansiyelleri ve gelişmeye açık yönleri. *Journal of Spatial Science*, 1(1), 109-126.
- Liao, X., Liu, Y., Ren, J., Guan, L., Sang, X., Wang, B. ve diğeri. (2020). Investigation of a double-PCM-based thermoelectric energy-harvesting device using temperature fluctuations in an ambient environment. *Energy*, 202, 117724.
- Lineykin, S. ve Dashevsky, Z. (2012). Peltier devices for DNA diagnostics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(18), 183001.
- Liu, C., Pan, X., Zheng, X., Yan, Y. ve Li, Weizhong. (2016). An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust. *Journal of the Energy Institute*, 89(2), 271–281.
- Macdonald, D.K.C. (1962). *Thermoelectricity: An Introduction to the Principles*. John Wiley ve Sons.
- Mishra, A., Shukla, A. ve Sharma, A. (2015). *Latent heat storage through phase change materials* (Doktora tezi), Devi Ahilya Üniversitesi.
- Orr, B., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M. ve Singh, R. (2016). A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 101, 490-495.
- Oyedepo, S. O. ve Fakeye, B. A. (2021). Waste heat recovery technologies: pathway to sustainable energy development. *Journal of Thermal Engineering*, 7(1), 324-348.
- Öymen, G. (2020). Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerindeki rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(39), 1069-1087.
- Pamukkale Üniversitesi. (t.y.). Thermoelectric effects. Erişim adresi: <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/en/sayfa/thermoelectric-effects-2>
- Pourkiaei, S. M., Ahmadi, M. H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L. ve diğeri (2019). Thermoelectric cooler and thermoelectric

- generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*, 186, 115849.
- Quinn, R. J. ve Bos, J.-W. G. (2021). Advances in half-heusler alloys for thermoelectric power generation. *Materials Advances*, 2(19), 6246-6266.
- Riffat, S. B. ve Ma, X. (2003). Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 913-935.
- Rowe D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press.
- Samarelli, A., Ferre Llin, L., Cecchi, S., Frigerio, J., Chrastina, D., Isella, G. ve diğeri. (2014). Prospects for SiGe thermoelectric generators. *Solid-State Electronics*, 98, 70-74.
- Serdar. (t.y.). Güneş enerjisinden elektrik üretimi. Erişim adresi: <https://www.serdar.com.tr/tr/gunes-enerjisinden-elektrik-uretimi>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Skovajsa, J., Koláček, M. ve Zálešák, M. (2017). Phase change material based accumulation panels in combination with renewable energy sources and thermoelectric cooling. *Energies*, 10 (152), 1-19.
- Snyder, G. J. ve Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105-114.
- Stritih, U. ve Novak, P. (1996). Solar heat storage wall for building ventilation. *Renewable Energy*, 8(1-4), 268-271.
- Tritt, T. M. (2011). Thermoelectric phenomena, materials, and applications. *Annual Review of Materials Research*, 41(1), 433-448.
- Tuoi, T. T. K., Toan, N. Van ve Ono, T. (2020). Theoretical and experimental investigation of a thermoelectric generator (TEG) integrated with a phase change material (PCM) for harvesting energy from ambient temperature changes. *Energy Reports*, 6, 2022-2029.

- Wright, D. A. (1962). Thermoelectricity: an introduction to the principles. *Physics Bulletin*, 13(10), 283-284.
- Yağcı, O. K., Avcı, M. ve Aydın, O. (2019). Melting and solidification of PCM in a tube-in-shell unit: Effect of fin edge lengths' ratio. *Journal of Energy Storage*, 24, 100802.
- Yağmur, Y. ve Taşdelen, K. (2019). Termoelektrik üreteç ile kalorifer radyatörlerinden elektrik üretiminin deneysel incelenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 3(2), 152-160.
- Yamashita, O. (2009). Resultant Seebeck coefficient formulated by combining the Thomson effect with the intrinsic Seebeck coefficient of a thermoelectric element. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2394-2399.
- Yap, Y. Z., Naayagi, R. T. ve Woo, W. L. (2016). Thermoelectric energy harvesting for mobile phone charging application. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 3241–3245.
- Yoshihama, H. ve Kaneko, H. (2021). Design of thermoelectric materials with high electrical conductivity, high Seebeck coefficient, and low thermal conductivity. *Analytical Science Advances*, 2(5-6), 289-294.
- Yu, C., Youn, J. R., ve Song, Y. S. (2022). Enhancement in thermo-electric energy harvesting efficiency by embedding PDMS in form-stable PCM composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(3), 700–709.
- Zhang, P., Xiao, X. ve Ma, Z. W. (2016). A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. *Applied Energy*. 165, 472-510.
- Zoui, M. A., Bentouba, S., Stocholm, J. G. ve Bourouis, M. (2020). A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications. *Energies*, 13(14), 3606.