POLİMER-BOROFEN NANOKOMPOZİTLERİN TERMOELEKTRİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOELEKTRİK AYGIT ÜRETİLMESİ

Doğan Esatoğlu
201405101

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Prof. Dr. Nevin TAŞALTIN

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Şubat, 2022

POLİMER-BOROFEN NANOKOMPOZİTLERİN TERMOELEKTRİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOELEKTRİK AYGIT ÜRETİLMESİ

Doğan ESATOĞLU
201405101
ORCID: 0000-0002-2613-191X

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Anabilim Dalının Adı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Prof. Dr. Nevin TAŞALTIN

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Şubat, 2022



JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Bu belge, Yükseköğretim Kurulu tarafından 19.01.2021 tarihli *"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"* ile bildirilen 6689 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında gizlenmiştir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

Bu belge, Yükseköğretim Kurulu tarafından 19.01.2021 tarihli *"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"* ile bildirilen 6689 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında gizlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, gerekli yönlendirme, yardımları ve katkıları ile destek olan değerli Prof.Dr. Nevin Taşaltın'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi herzaman yanımda durarak bana destek olan eşim Meryem Esatoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans yapmam için imkan, fırsat ve destek sunan değerli Şirketim Enerjisa'ya ve yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

Doğan Esatoğlu

Şubat, 2022

ÖZ

POLİMER-BOROFEN NANOKOMPOZİTLERİN TERMOELEKTRİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE TERMOELEKTRİK AYGIT ÜRETİLMESİ

Doğan Esatoğlu
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Prof. Dr. Nevin TAŞALTIN
Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022

Endüstride faaliyet gösteren şirketlerin yapmış olduğu tüketim noktalarında ortaya çıkan atık ısı, atmosfere bırakıldığında işe yaramayan ve küresel ısınmaya büyük ölçekte neden olur. Bugün küresel bazda endüstriyel faaliyetler ve enerji sektörleri (elektrik santralleri, petrol rafinerileri, demir çelik fabrikaları, vs.) küresel bazda en fazla enerji tüketen alanlardır. Sonuç olarak, sıcak egzoz yoluyla çok büyük miktarlarda endüstriyel atık ısı çevreye salınmaktadır. Bu atık ısıların geri kazanılabilmesi ve tekrar kullanılması, düşük karbonlu ve daha az maliyetli bir enerji kaynağı olmak için bir fırsat sağlayacaktır. Ayrıca, kayıp olan bu ısının çevresel etkilerinin azaltılması için katkı sağlayacaktır. Kayıp olan atık ısının tekrar kullanılacak seviyede kazanılmasına yardımcı olan metotlardan biri termoelektrik jeneratördür. TE jeneratör, katı hal elektronik güç kaynakları olarak elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilirler. Termoelektrik jeneratörlerin atık ısıdan kayıp olan enerjiyi yakalaması ve dönüştürmesi ideal bir durumdur. Termoelektrik jeneratör imalatı endüstrilerde üretilen sıcaklık aralıklarına göre yapılmıştır. Buradaki amaç en iyi malzeme ile en iyi güç üretmektir. Bu tezde ultrasonikasyon yöntemi ile borofen nanolevhaları ve Polipirol (PPy): Borofen nanokompoziti hazırlanıp ITO/PPy: Borofen nanokompozit tabanlı termoelektrik jeneratörler (TEG'ler) hazırlanarak ve karakterize edilerek, PPy'nin Performansı: Borofen nanokompozit bazlı TEG, Borophene ilavesiyle performansının önemli ölçüde artırılması hedeflenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Termoelektrik Jeneratör, Atık Isının geri kazanımı, Termoelektrik üretim, Termoelektrik enerji üretimi, Enerji toplanması, Borofen; PPy.

ABSTRACT

DETERMİNATİON OF THE THERMOELECTRİC CHARACTERİZATİONS OF POLYMER-BOROPHENE NANOCOMPOSİTES AND PREPARATİON OF THE THERMOELECTRİC DEVİCE

Doğan Esatoğlu
Master Thesis
Department of Electrical-Electronical Engineering
Electrical-Electronics Engineering Programme
Thesis Advisor: Prof. Dr. Nevin Taşaltın
Maltepe University Graduate School, 2022

Waste heat generated at the consumption points made by companies operating in the industry is useless when released into the atmosphere and causes global warming on a large scale. Today, industrial activities and energy sectors (power plants, oil refineries, iron and steel factories, etc.) on a global basis are the areas that consume the most energy on a global basis. As a result, huge amounts of industrial waste heat are released into the environment via hot exhaust. Recovering and reusing these waste heats will provide an opportunity to become a low-carbon and less costly energy source. In addition, it will contribute to reducing the environmental effects of this lost heat. Thermoelectric generator is one of the methods that helps to recover the lost heat at a level to be used again. TE generators can meet the electrical energy needs as solid state electronic power sources. It is an ideal situation for thermoelectric generators to capture and convert the energy lost from waste heat. Thermoelectric generator manufacturing was made according to the temperature ranges produced in industries. The aim here is to produce the best power with the best material. In this thesis, borophene nanosheets and Polypyrrole (PPy): Borophene nanocomposite are prepared and ITO/PPy: Borophene nanocomposite based thermoelectric generators (TEGs) are prepared and characterized. aimed to increase.

Keywords: Termoelectric generator, Waste heat recovery, Termoelectric Manufacturing, Termoelectric power generation, Energy harvesting; Borophene; PPy.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZ v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
TABLOLAR LİSTESİ ix
ŞEKİLLER LİSTESİ x
KISALTMALAR xiv
ÖZGEÇMİŞ xvii
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1. Genel Bakış 1
1.2. Amaçlar 4
1.3. Varsayımlar ve Sınırlamalar 6
1.4. Tez Anahtarı 6
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7
2.1. Atık Isı Geri Kazanımı 7
2.2 Termoelektrik 9
2.2.1. Termoelektrik Cihazlar 10
2.3. Termoelektrik Etkiler 11
2.3.1. Seebeck Etkisi 12
2.3.2. Peltier Etki 14
2.3.2.1. Termoelektrik Soğutma Cihazı 15
2.3.3. Thomson Etkisi 16
2.3.4. Joule Isı Fenomeni 17
2.3.5. Güç Üretimi 17
2.4. Termoelektrik Malzemeleri 18
2.4.1. Termoelektrik Performans 20
2.4.2. Elektriksel İletkenlik. 21
2.4.3. Termal İletkenlik 22
2.4.4. Termoelektrik Liderlik Şekilini Artırma Yaklaşımları 26
2.5. Termoelektrik Malzemeler 27
2.6. Düşük Sıcaklık Malzemeleri 28
2.7. Orta Sıcaklık Malzemeleri 29
2.7.1. Skutterudıtes 29
2.7.2. Kalkojenit 30
2.7.3. Latrat 31
2.7.4. Yarım Heussler Bileşikleri 33
2.7.5. Silisitler 34
2.7.5.1. Yüksek Mangan Silisitleri (Mg_2Si bazlı malzeme) 35
2.7.6. Yüksek Sıcaklık Malzemeleri 38
2.7.7. Oksitler 38

2.8. Üretme 40
2.9. Termoelektrik Modüller 43
2.9.1. Temas Dirençleri 45
2.9.2. Termoelektrik Enerji Hasat 46
2.9.3. Termoelektrik Jeneratörün Avantajları 47
2.9.4. Termoelektrik Jeneratör Uygulamaları 47
BÖLÜM 3. TASARIMCILAR VE MODELLEME İÇİN TEORİK ANAHTAR 48
3.1. Tasarım 48
3.1.1. Tasarım Sürecindeki Adımlar 48
3.1.2. ISI KAYBI HESAPLAMASI 51
BÖLÜM 4. CİHAZLARIN MODELLENMESİ 56
4.1. Isı Değiştirici Etkisi Ve Malzeme Optimizasyonu 63
4.1.1. Üretim Maliyetlerinin Hesaplanması 70
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA ve ölçümler 74
5.1. Deneysel Çalışma 74
5.2. Hazırlanan Borophene ve PPy'nin yapısal ve kimyasal analizi : borofen nanokompozit 76
5.3. TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı 79
5.3.1. Arayüz 80
5.3.2. Kullanım 80
5.4 Hazırlanan TEG'lerin Termoelektrik Performansı 84
BÖLÜM 6. SONUÇ 86
KAYNAKÇA 87

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Bu tablo baca gazları içindir. Gazların sıcaklığına göre yoğunluk ve viskozite gibi bazı fiziksel özelliklerin değerlerini verir [55] 52

Tablo 2. Sistemin model bileşenlerine ait veriler 54

Tablo 3. Soğutucu sisteminin özellikleri [66] 66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Enerji taşıyıcısından son kullanıma kadar hollanda endüstrisinin enerji dengesi [5]..... 3

Şekil 2. Termoelektrik elektrik üretimi, endüstriyel faaliyetler sırasında kaybedilen muazzam miktardaki boşa harcanan enerjinin bir kısmını geri kazanmanın bir yolunu sunar [6] 4

Şekil 3. Termoelektrik jeneratör prensibi blok şeması 5

Şekil 4. Atık ısı-güç diyagramı [8] 8

Şekil 5. Atık ısı geri kazanımı için üç temel bileşen gereklidir [7] 9

Şekil 6. Bir termoelektrik cihazın temel birimi [11] 10

Şekil 7. Serideki termoelektrik elemanlar [13]..... 11

Şekil 8. Yük taşıyıcıların hareketi [16]..... 12

Şekil 9. Güç üretim modunda tek bir termo-elektrik çifti 13

Şekil 10. Birbirine benzemeyen iki malzeme arasındaki peltier etkisini gösteren bir şema [15] 14

Şekil 11. Tipik bir termoelektrik soğutucunun şematik diyagramı [21]..... 16

Şekil 12. Bir sıcaklık gradyanına maruz kalan tek bir termokupl tarafından güç üretimi [24] 18

Şekil 13. Termoelektrik jeneratörün gerilim, akım ve güç özellikleri [25]..... 18

Şekil 14. Termoelektrik Malzemeler [13] 19

Şekil 15. Yük taşıyıcı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak zt (au: keyfi birimler) [18] 24

Şekil 16. Sıcak taraf sıcaklığının bir fonksiyonu olarak termoelektrik cihazların verimliliği soğuk tarafı ile farklı malzemeler 300 k'de tutulur [29] 25

Şekil 17. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak farklı malzemelerin zt'sine genel bakış [27]27

Şekil 18. Skutterudites'in temel yapısı [37] 30

Şekil 19. a) tip ı klatratın kristal yapısı, na_8si_{46}. Si atomlarından (mavi) ve konuk na atomlu iki farklı kafesten oluşan çerçeve, tetrakaidecahedral kafes; mavi) ve beşgen on iki yüzlü kafes (yeşil). b) tip vııı klatratın kristal yapısı, $eu_8ga_{16}ge_{30}$. çerçeve (mor) ge ve ga atomlarından oluşur. ([ax]: a = köşe sayısı, x = yüz sayısı). [14] .. 32

Şekil 20. Yarı heusler malzemelerinin zt liyakatinin son teknoloji termoelektrik figürü [38] 34

Şekil 21. Zt mg değerleri $mg_2si_{0.4}sn_{0.6}$ sıcaklığın bir fonksiyonu olarak katı çözelti ve hms. Bu malzemeler, bir gösteri modülü [30] için n- ve p-tipi malzemeler olarak kullanılmıştır 35

Şekil 22. Karşılık gelen si/mn oranları ve si ile hms'nin farklı yapısal formülleri içindekiler [29]..... 36

Şekil 23. Termoelektrik sıcaklık aralığında en yüksek zt'ye sahip diğer termoelektriklere kıyasla silisit termoelektriklerinin en iyi temsilcilerinin liyakat rakamı [43]..... 37

Şekil 24. (a) atık ısı hasadı ve soğutma uygulamaları için çeşitli termoelektrik (te) malzemelerin şematik karşılaştırması. (b) te malzemelerinde kullanılan elementlerin bolluğu [44] 39

Şekil 25. Termoelektrik modülün imalatı için tipik adımları gösteren şema [45]..... 40

Şekil 26. Mikro yapılı pbte bazlı termoelektrik malzemelerde ortak bir bileşen olan $agsbte_{2'nin}$ faz diyagramı . Faz diyagramının sınırları hakkındaki karmaşıklık ve belirsizlikler, küçük proses dalgalanmalarının termoelektrik malzeme oluşumunu nasıl etkileyebileceğini gösterir [45]..... 41

Şekil 27. Bir termoelektrik modülün bileşenleri [48]..... 44

Şekil 28. Bir te modülü içindeki kontak dirençleri [23] 46

Şekil 29. Genel bir termoelektrik enerji toplama sistemi blok şeması [50] 47

Şekil 30. Kabul edilebilir bir tasarım elde etmek için yinelemeli süreç [54] 50

Şekil 31. Genel tasarıma genel bakış 53

Şekil 32. Önerilen termoelektrik jeneratör modeli tasarımının şematik görünümü 55

Şekil 33. Bir termokupldaki ısı hızının şeması [20] 56

Şekil 34. Termoelektrik jeneratörün yapısı ve termal direnç ağı. 57

Şekil 35. Çoklu dizi ısı emicisi 63

Şekil 36. Sıcak ve soğuk yan ısı eşanjörlerinden ve bir termoelektrik modülden oluşan bir termoelektrik enerji toplayıcı için eşdeğer termal devre [67] 68

Şekil 37. Te ve ısı eşanjörünün termal dirençlerinin oranının bir fonksiyonu olarak güçteki değişim [67] 70

Şekil 38. Doldurma faktörünü açıklayan termoelektrik modül şeması [68] 71

Şekil 39. Hazırlanan teg'nin şematik gösterimi. 75

Şekil 40. (a) teg'in elektrik devresi ve **(b)** teg ölçüm düzeninin şematik gösterimi. 76

Şekil 41. Boron öncülü ve borofen nano tabakalarının xrd grafiği. 77

Şekil 42. **(a** ve **b)** hrtem görüntüleri, **(c)** hazırlanan borophene nanosheetlerinin fft görüntüsü. 77

Şekil 43. **(a)** sem mikrografı ve **(b)** ppy: borofen nanokompozitinin ftır analizi. 79

Şekil 44. Tc-xx-pr-59 sıcaklık kontrol cihazı 80

Şekil 45. iletişim portu seçimi 81

Şekil 46. Yazılım ve kontrol arasındaki iletişim başlatma 82

Şekil 47. Kontrolörden gelen bilgiler ekranı. 82

Şekil 48. Sensör seçim ekranı 83

Şekil 49. Regülatör ayar ekranı 83

Şekil 50. Voltaj değişimine karşı sıcaklık değişimi; (a) ıto/ppy tabanlı teg ve (b) ıto/ppy: borofen nanokompozit bazlı teg 85

KISALTMALAR

TE : Termoelektrik

TEC : Termoelektrik Soğutucu

TEG : Termoelektrik Jeneratör

WHP : Atık ısı gücü

CHP : Isı ve Güç kombinesi

IWH : Endüstriel atık ısı

HRSG : Isı geri kazanımlı buhar jeneratörü.

SEMBOLLER

V : Gerilim [V]

I : Akım [A]

l : Uzunluk [m]

q : Isı [W]

P : Güç [W]

A : Alan [m^2]

ZT : Değer figürü

N : Termokupl sayısı

η : Verimlilik

θ : Isıl direnç [K/W]

R : Elektriksel direnç [Ω]

T : Sıcaklık [K yada ℃]

N : Modüldeki çift sayı

VOC : Jeneratörün açık devre çıkış geriliminin volt cinsinden ifadesi

RTE : Birkaç paletin elektrik direnci

α : Ortalama Seeback katsayısı (Volt/°K cinsinden)

ΔT : Jeneratördeki sıcaklık farkı (℃ cinsinden)

CM,B : Birleştirilmiş malzemenin işlenmesiyle ilişkili maliyet ($/kg)

CM,A : Alan imalat maliyeti ($/m2)

CHX : Her iki ısı esanjörünün maliyeti ($/(W/K))

σ : Elektriksel iletkenlik ($S.cm^{-1}$)

S : Seeback katsayısı (V/K)

Pf : Güç faktörü ($(Wcm^{-1}).K^2$)

ÖZGEÇMİŞ

Doğan Esatoğlu

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eğitim

Derece	*Yıl*	*Üniversite, Enstitü, Anabilim/Anasanat Dalı*
Y.Ls.	2022	Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Ls.	2014	Okan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği
Lise	2002	Aydın Çine Endüstri Meslek Lisesi,Elektrik

İş/İstihdam

Yıl	*Görev*
2014 -	Elektrik Elektronik Mühendisi. AYEDAŞ

BÖLÜM 1. GİRİŞ

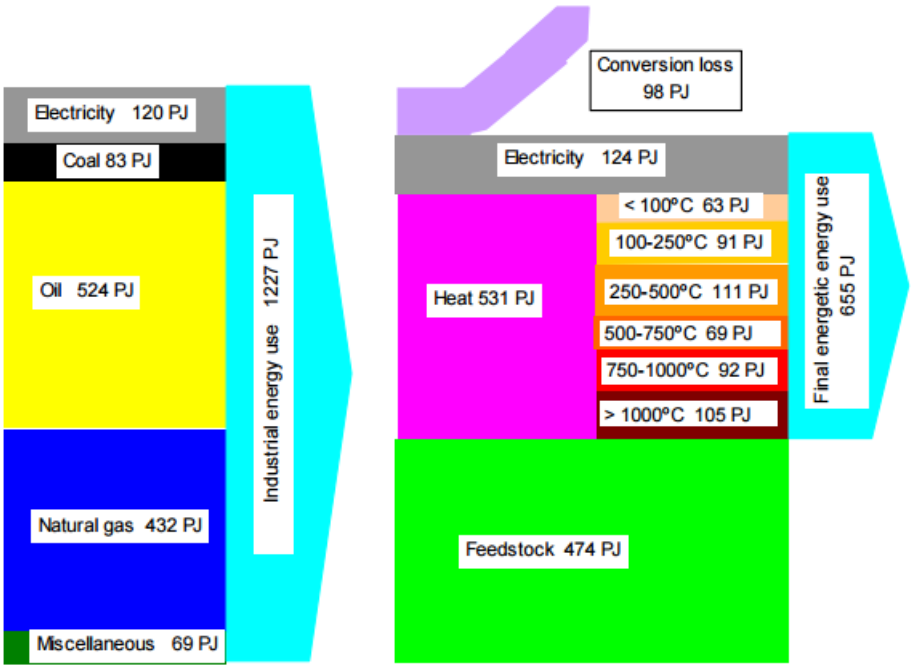
İmalat veya proses endüstrisi çok büyük miktarda enerji tüketir ve bu tüketilen miktarın yaklaşık yarısı baca gazları ve radyan ısı enerjisi şeklinde çevreye atık ısı olarak yayılır . Sistemin verimliliğini artırmak için atık ısının (hasat) en azından bir kısmını yakalayarak, örneğin tesisin küçük algılama elektronik cihazlarını beslemek için elektrik enerjisine dönüştürecek ve bu durumu iyileştirmeye açık bir ihtiyaç vardır. Ayrıca bu geri kazanım, küresel ısınmaya sebep olan emisyonun azaltılmasına yardımcı olur. Atık ısıyı yakalamak için kullanılan birçok teknoloji vardır. Normalde atık ısıyı geri kazanmak için kullanılan yöntemler, atık ısının yoğunluğuna göre birbirinden farklılık gösterir. Örneğin bazıları düşük sıcaklık için yeterli değildir, bazıları atık ısıyı faydalı enerjiye dönüştürmek için hareketli parça gerektirir bazıları ise çevre dostu değildir. Bu çalışma, Termoelektrik jeneratörlerin verimlerinin artırılmasına odaklanmaktadır. Bu teknoloji, doğrudan ısıdan güce dönüşüm için ilginç bir teknolojidir ve performansın iyi derecede artırılıcağını ön görmektedir. Termoelektrik jeneratörler, düşük seviyeli termal enerjinin elektrik gücüne dönüştürülmesinde potansiyel uygulamalar sunar. Özellikle atık ısı geri kazanımı söz konusu olduğunda, termal enerji girdisinin maliyetini dikkate almak gereksizdir ve enerji tasarrufu ve emisyon azaltma gibi ek avantajlar vardır.[1] Bu aygıtlar dikkate dikkate alınmalıdır. Termoelektrik jeneratörler düşük sıcaklık uygulamalarında dahi çalışırlar, yenilenebilir enerji kaynakları vardır ve gürültü üretmezler.

1.1. Genel Bakış

Enerji tüketimi, bir bölgenin ekonomik büyümesine ve çevre kirliliğine belirli bir sektörün etkisini yansıtan önemli bir parametredir. Farklı enerji istatistik kurumlarından gelen mevcut raporlar, hem endüstriyel faaliyetlerin hem de enerji sektörlerinin (elektrik santralleri, petrol rafinerileri, kok fırınları vb.) dünya çapında en fazla enerji tüketen sektörler olduğunu ve sonuç olarak büyük miktarlarda endüstriyel atıkların salınmasından sorumlu olduğunu göstermektedir. Sıcak egzoz gazları, soğutma ortamı, sıcak ekipman yüzeylerinden ve ısıtılmış ürünlerden kaybedilen ısı yoluyla çevreye atık ısı Endüstirel atık ısının (IWH). geri kazanılması ve yeniden kullanılması, düşük karbonlu ve daha az

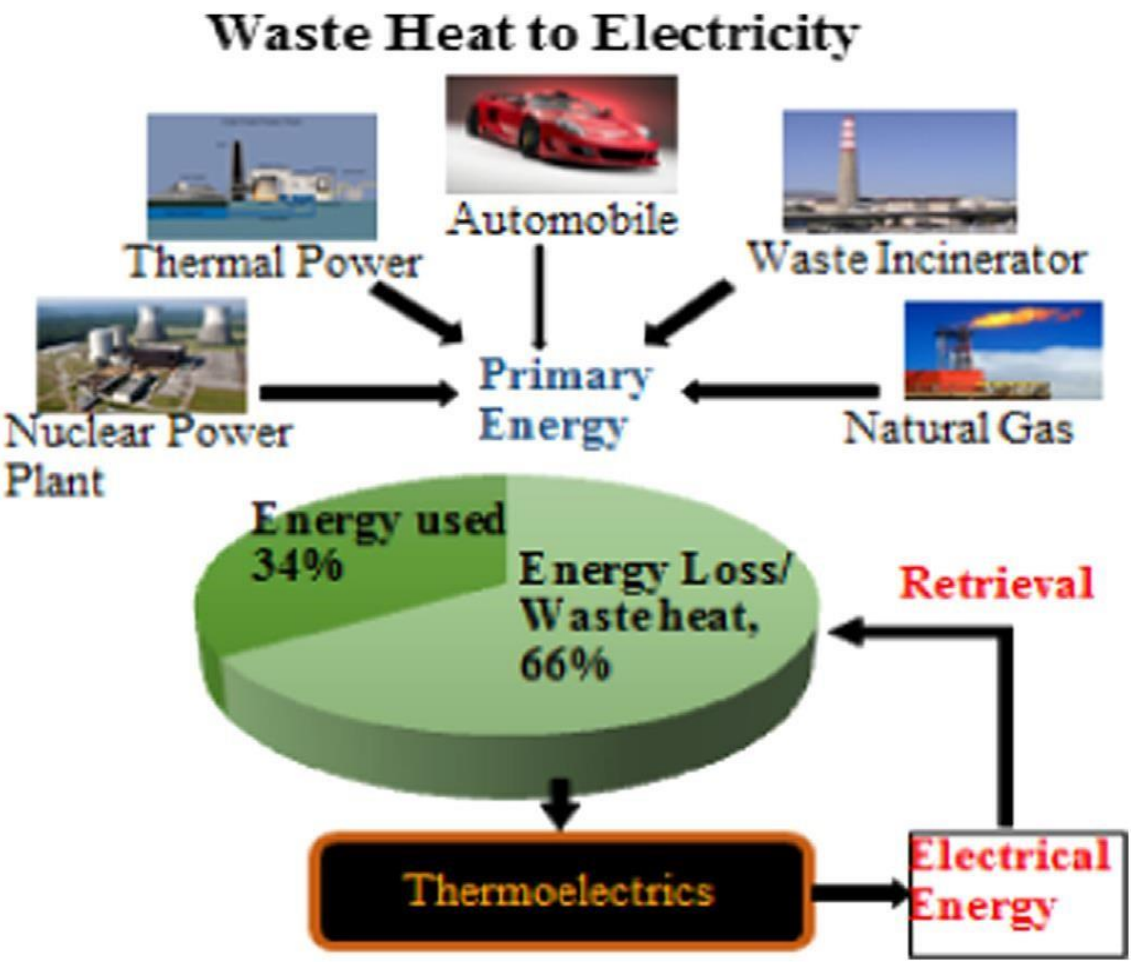
maliyetli bir enerji kaynağı için önemli bir fırsat sağlayacaktır. Ayrıca, çevresel etki ve maliyetlerin azaltılması sektörün rekabet gücünü de iyileştirebilir [2].

Günümüzde enerji sorunları küresel anlamda bir odak noktası haline gelmiştir. Enerji güvenliği, enerji fiyatları, giderek daha rekabetçi hale gelen küresel pazarlar ve katı çevresel emisyon düzenlemeleri gibi çeşitli ulusal sorunlar, enerji dönüşümü ve kullanımı için verimli, sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir teknolojilerin aranmasında temel itici güçlerdir. Kimyasallar, yiyecek ve içecekler, demir-çelik, kağıt hamuru ve kağıttan oluşan proses endüstrileri, endüstriyel enerji kullanımının %50'sinden fazlasını temsil eden önemli enerji kullanıcılarıdır. Hendricks ve Choate, çoğu endüstrinin aşırı atık ısıyı geri dönüştürememesi nedeniyle, imalat sanayi enerjisinin %33'ünün doğrudan atmosfere veya soğutma sistemlerine atık ısı olarak deşarj edildiğini bildirmiştir. Ayrıca, küresel enerji talebi, enerji, verimli teknolojilerin kullanılmaması durumunda, 2030 yılına kadar 2005 yılındaki düzeye kıyasla yaklaşık %35 - %95'e kadar artacaktır. Enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için büyük çabalar sarf edilmiştir, ancak büyük miktarda atık enerji geri kazanımı gerektiren gaz, sıvı ve katı formlarda hala önemli miktarda enerji israf edilmektedir [3]. Fransız endüstrisinde, nihai enerjinin %75'i fırınlar, reaktörler, kazanlar ve kurutucular gibi termal amaçlar için kullanılır. Ancak bu ısının yaklaşık %30'unun tahliye edilen sıcak egzoz gazı, soğutma suyu ve ısıtılmış ürün şeklinde boşa harcandığı varsayılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde metal ve metalik olmayan mineral ürün imalatında, enerjinin %20-50'si atık ısı olarak kaybedilmektedir. Türkiye'de çimento fabrikalarında prosesin toplam ısısının maalesef %51'i kaybolmaktadır. Karbondioksit emisyonu oluşturan fosil yakıtların yanması, endüstride ısı üretiminin birincil kaynağı olarak kabul edilmektedir [4]. Hollanda endüstrisindeki toplam enerji kullanımının %80'inden fazlası ateşlenmiş fırınlarda ya da farklı basınç seviyelerinde buhar şeklinde ısı ihtiyacını içerir, şekil 1. Bu ısının çoğu sonunda soğutma suyu, soğutma kuleleri, baca gazları ve diğer ısı kayıpları yoluyla ortam atmosferine salınır. Bu ısı kaybına 'Endüstriyel atık ısı' diyoruz. Bu atık ısı yeniden kullanılabilirse, büyük enerji tasarrufu mümkündür. Hollanda'daki toplam endüstriyel atık ısının yılda 250 PJ'den (PJ = Petajoule = 1*10 15 J) fazla olduğu tahmin edilmektedir [5].



Şekil 1. *Enerji taşıyıcısından son kullanıma kadar hollanda endüstrisinin enerji dengesi [5]*

Yukarıda belirtilen tüm nedenlerden dolayı, endüstriyel proseslerde ısıtma, elektrik veya mekanik güç üretmek için atık ısının yakalanması ve yeniden kullanılması yoluyla geri kazanılması gerekmektedir. Bu şekilde proses verimliliği artacak, daha az yakıt tüketilecek ve dolayısıyla daha az karbondioksit salınacaktır [4]. Yüksek ve orta dereceli sıcaklık atığı, elektrik üretmek için buhar türbini ve gaz türbini çalıştırılarak doğrudan kullanılabilir. Ancak düşük sıcaklık aralığında atık ısının kullanımında bir takım zorluklar vardır[3]. Atık ısı kaynaklarından doğrudan elektrik enerjisi üretilen Termoelektrik (TE), sera gazı emisyonlarının azaltılmasına hayati katkılar sağlama ve daha temiz enerji biçimleri sağlama konusunda umut verici sonuçlar göstermektedir [6] . Termoelektrik Jeneratör (TEG), Şekil 2'de gösterildiği gibi Seebeck etkisi yoluyla ısıyı elektriğe dönüştürmek için kullanılabilir.

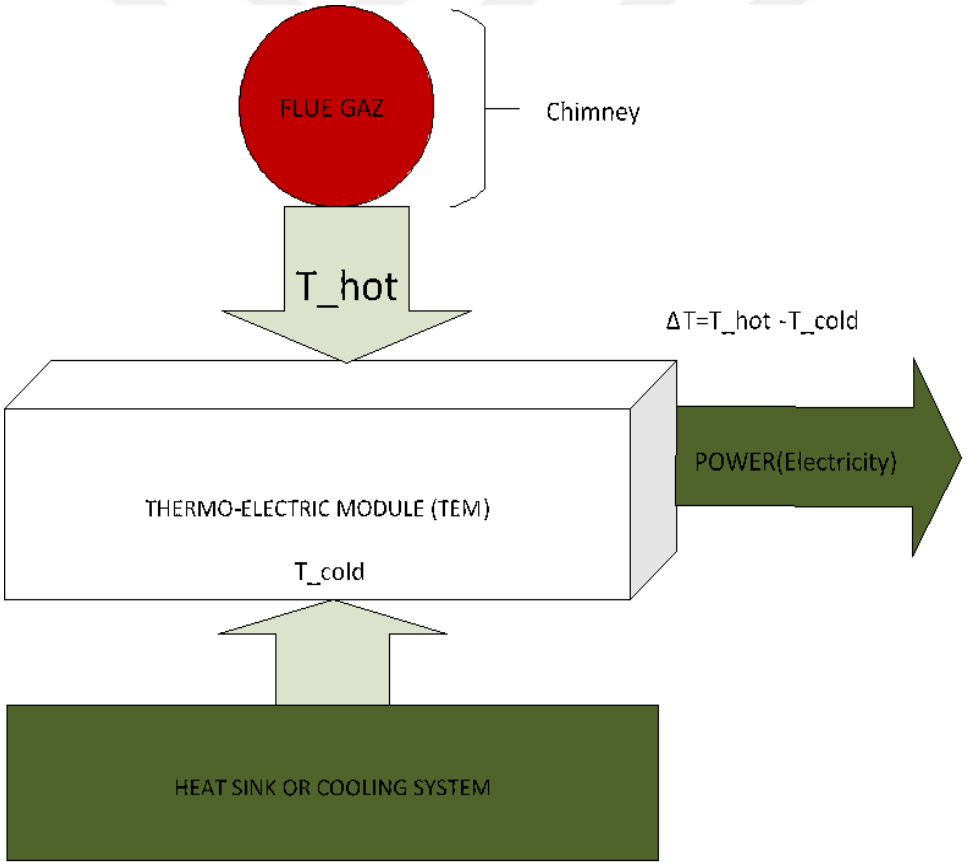


Şekil 2. *Termoelektrik elektrik üretimi, endüstriyel faaliyetler sırasında kaybedilen muazzam miktardaki boşa harcanan enerjinin bir kısmını geri kazanmanın bir yolunu sunar [6]*

1.2. Amaçlar

Bu tezin amacı,Borofen nanolevhaları ve Polipirol (PPy): Borofen nanokompoziti hazırlanması ve Polimer-borofen nanokompozitlerin termoelektrik karakteristiklerinin belirlenerek atık ısı geri kazanımı için bir termoelektrik jeneratör tasarlamak ve modellemek, aynı zamanda TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı ile ölçümlenmesi, optimum gücü optimum malzemeler ile ölçüp, yapılan ölçümün çıktıları ile hesaplamaktır. Şekil 3, bir tarafta sıcak, diğer tarafta soğuk olduğunda elektriğin üretilebileceği, ayrıntılarda amacı göstermektedir. görevi tam olarak doldurmak için aşağıdaki noktalar kabul edildi.

- Termoelektrik malzemenin değerlendirilmesi
- Atık ısının yenilenebilir enerji kaynakları olarak nasıl kullanılacağının incelenmesi.
- Atık ısı geri kazanımı için endüstride termoelektrik uygulaması
- Ultrasonikayon yönetmi ile borofen nanolevhaları ve Polipirol (PPy): Borofen nanokompoziti hazırlanması.
- ITO/PPy: Borofen nanokompozit tabanlı termoelektrik jeneratör (TEG) hazırlanması.
- Termoelektrik jeneratörün, TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı ile ölçümlenmesi ve sonuçlarının yorumlanması.



Şekil 3. *Termoelektrik Jeneratör Prensibi Blok Şeması*

1.3. Varsayımlar ve Sınırlamalar

Tez, ultrasonikasyon yöntemi ile borofen nanolevhaları ve Polipirol (PPy): Borofen nanokompoziti hazırlanacak. ITO/PPy: Borofen nanokompozit tabanlı termoelektrik jeneratörler (TEG'ler) hazırlanarak ve karakterize edilecek. PPy'nin Performansı: Borofen nanokompozit bazlı TEG, Borophene ilavesiyle sıcaklık değişimindeki performansı izlencek ve PPy:Borofen nanokompozit TEG'in ayrıntılı olarak araştırılmasına odaklanacaktır. Borofen katkılı nanokompozit polimerin, Peltier ile termoelektrik jeneratör oluşturularak TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı ile ölçümlenmesi ile verimi incelenecektir.

1.4. Tez Anahtarı

Bölüm 2, Literatür taraması ile konu hakkındaki teorik verileri açıklar, Bölüm 3, atık ısısını ve nasıl kullanıldığını, termoelektrik, uygulamasını ve malzemelerini açıklar. Bölüm 4, termoelektrik jeneratörlerin, ısı eşanjörünün ve soğutucunun tasarımından bahseder. Bölüm 5, Ultrasonikasyon yöntemi ile borofen nanolevhaları ve Polipirol (PPy): Borofen nanokompozitin hazırlanması, ITO/PPy: Borofen nanokompozit tabanlı termoelektrik jeneratörler (TEG'ler) hazırlanarak ve karakterize edilmesi ve hem analitik hem de Peltier soğutuculu termoelektrik jeneratör ün TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı ile ölçümlenmesi, Bölüm 6, Sonuçları tartışır ve tamamlar.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

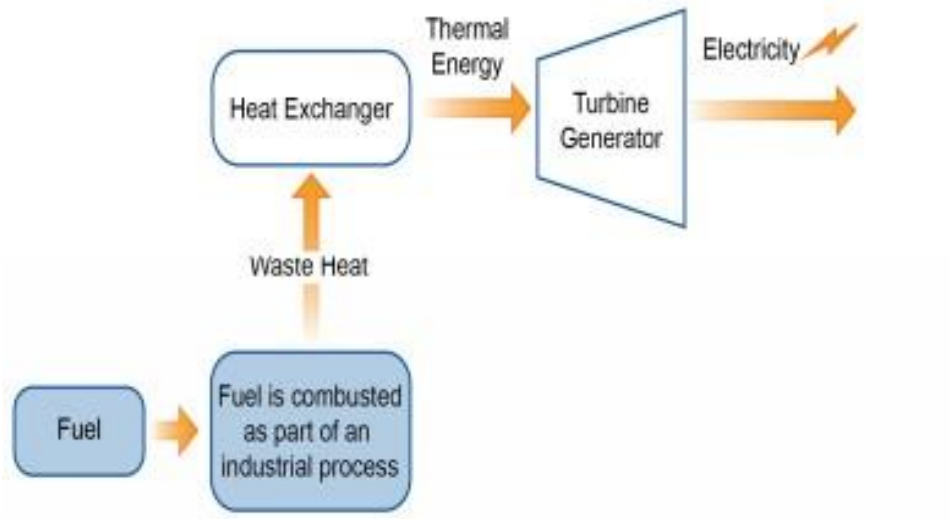
Bu kısım atık ısıdan, nereden geldiği ve bu atık ısıyı nasıl yakalayıp, tesisin genel verimliliğini artırmak için nasıl kullanabileceğimizden bahsediyor.

2.1. Atık Isı Geri Kazanımı

Endüstriyel atık ısı, endüstriyel süreçlerde pratik kullanıma sunulmadan üretilen enerjiyi ifade eder. Atık ısı kaynakları, atmosfere boşaltılan sıcak yanma gazlarını, endüstriyel proseslerden çıkan ısıtılmış ürünleri ve sıcak ekipman yüzeylerinden ısı transferini içerir. Atık ısı sıcaklığı, atık ısı geri kazanımı fizibilitesini belirleyen önemli bir faktördür. Atık ısı sıcaklıkları, 100- 200°F [40-90°C] civarında düşük sıcaklıklara sahip soğutma suyu dönüşleri ve 2.400°F [1,320°C] üzerinde baca sıcaklıklarına sahip cam eritme fırınları ile önemli ölçüde değişebilir. Isı transferini ve geri kazanımını sağlamak için atık ısı kaynağı sıcaklığının soğutucu sıcaklığından daha yüksek olması gerekir.

a) Isı eşanjörünün birim yüzey alanı başına ısının aktarıldığı hız.

b) Isı kaynağından ısıyı başka bir enerji biçimine (yani mekanik veya elektrik) dönüştürmenin maksimum teorik verimini etkiler. Son olarak, sıcaklık aralığı, ısı değiştirici tasarımlarında malzeme seçimi için önemli sonuçlara sahiptir [7]. Atık ısı gücü (WHP), mevcut bir endüstriyel süreç tarafından atılan ısıyı yakalama ve bu ısıyı güç üretmek için kullanma sürecidir (Şekil 4). Rafineriler, çelik fabrikaları, cam fırınları ve çimento fırınları gibi enerji yoğunluğu fazla olan endüstriyel süreçlerin tümü, elektriksel üretim için donanımlı teknolojilerle kullanılabilecek sıcak egzoz gazları ve atık ısı akışları salmaktadır. Güç için endüstriyel atık ısının geri kazanımı, hem termal enerji (ısıtma veya soğutma) hem de elektrik üretmek için büyük ölçüde kullanılmayan bir birleşik ısı ve güç (CHP) türüdür [8].

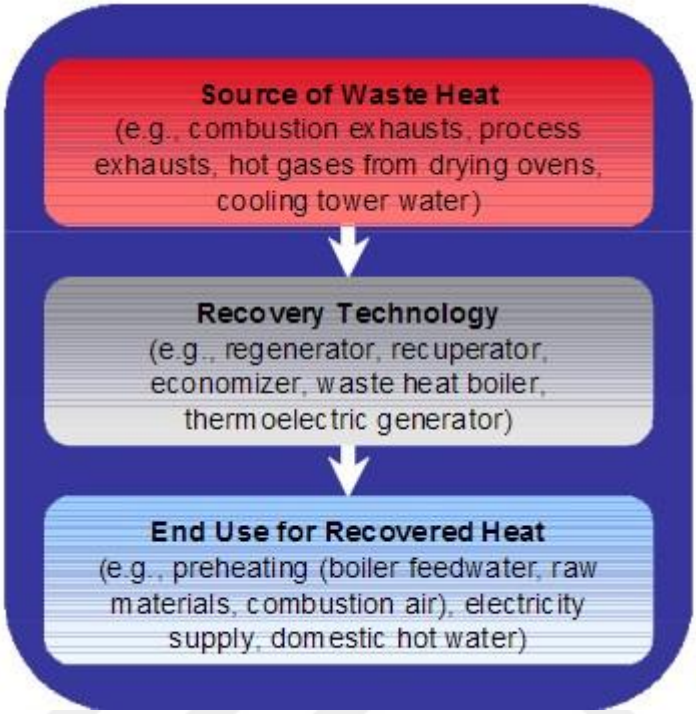


Şekil 4. *Atık ısı-güç diyagramı [8]*

Günümüzde küresel ısınma, kentsel ısı adası ve dünya petrol arz ve talebinin istikrarsız dengesi gibi bazı önemli çevre ve enerji sorunlarıyla karşı karşıyayız. Ancak bu sorunlarla ilgili çözüm arayışları halen devam etmektedir. Atık ısı geri kazanımı, tesislerden ve makinelerden atılan ısıyı elektrik enerjisine dönüştürerek enerji verimliliğini artırabileceğinden en iyi çözümlerden biri olarak kabul edilir. Bu teknoloji aynı zamanda atık ısının neden olduğu atmosferik sıcaklık artışlarını önleyecek ve ısı enerjisini geri kazanarak fosil yakıt tüketimini azaltacak ve böylece CO_2 emisyonlarını da azaltacaktır. [9].

Günümüze kadar elektrik enerjisi üretimi en çok elektromanyetik indüksiyona dayalı jeneratörlerden sağlanmaktadır. Pistonlu buhar motorları, içten yanmalı motorlar, buhar ve gaz türbinleri, elektrik enerjisi üretimi için petrol, kömür ve doğal gaz gibi kimyasal ısı kaynaklarının ve nükleer ısının kullanılmasında bu tür jeneratörlerle birleştirilmiştir. Modern elektrik santrallerinde kullanılan ısı kaynakları listesine jeotermal enerji, güneş enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları da ekleniyor. Ancak tüm bu santrallerin ortak bir dezavantajı vardır; termal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi, hareketli ve aşınmaya maruz kalan makine ekipmanlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. En yaygın olarak kullanılan atık ısı geri kazanım teknolojilerinden bazıları şekil 5'te verilmiştir. Bu çalışma için önerilen sistem, ısıyı elektrik gücüne dönüştürebilen yerleşik termoelektrik modüllere atık ısı veya

kullanılmamış termal enerji sağlayarak elektrik enerjisi üretmektir. Başlıca avantajları, düşük bakım gereksinimi, yüksek modülerlik ve geniş bir sıcaklık aralığında ısı kaynaklarından yararlanma imkanıdır [10].



Şekil 5. *Atık ısı geri kazanımı için üç temel bileşen gereklidir [7]*

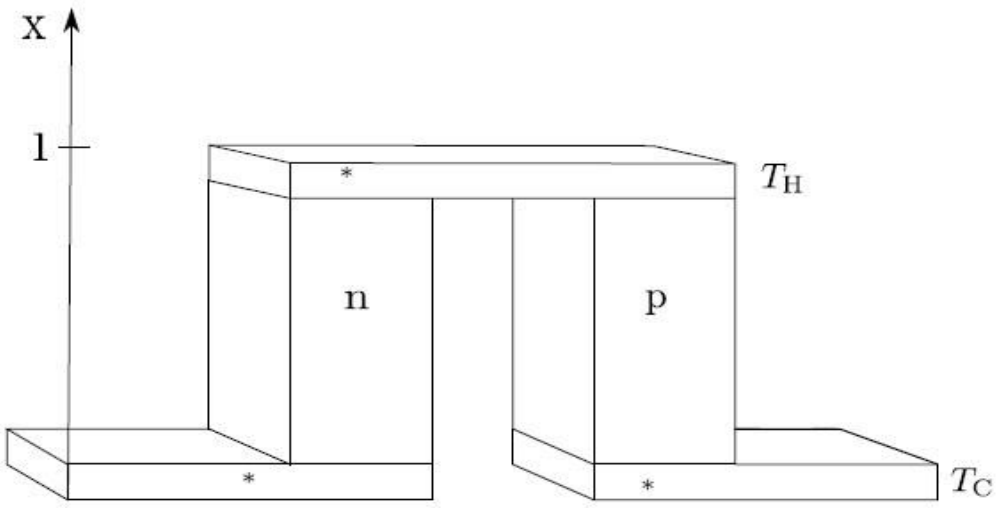
2.2 Termoelektrik

Termoelektrik terimi, bir elektrik yükü akışının bir sıcaklık gradyanından kaynaklandığı veya bunun tersi bir ısı akışının bir elektrik potansiyeli gradyanından kaynaklandığı fenomeni ifade eder. (sıcaklık farkının elektrik ürettiği veya tam tersi fenomenler) Bu fenomenler üç etki içerir; Seebeck, Peltier ve Thomson etkisi. Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck, termoelektrik etkilerin ilkini 1821'de keşfetti. Birbirine benzemeyen iki metalden oluşan bir devrenin, bağlantı noktaları iki farklı sıcaklıkta tutulursa pusula iğnesini saptıracağını buldu. Başlangıçta, bu etkinin sıcaklık farkının neden olduğu manyetizma nedeniyle olduğunu düşündü, ancak bunun indüklenen bir elektrik akımından kaynaklandığı anlaşıldı. Etkilerin ikincisi, 1834'te Fransız saatçi Jean Charles Athanase Peltier tarafından gözlemlendi.Bir akım iki farklı metalin birleşiminden geçirildiğinde meydana gelen küçük ısıtma veya soğutma etkisini keşfetti. Üçüncü etki,

1856'da İngiliz fizikçi William Thomson (daha sonra Lord Kelvin) tarafından gözlemlendi. Bir iletkende hem sıcaklık gradyanı hem de elektrik akımı akışı olduğunda çevre ile bir ısı alışverişi olduğunu keşfetti, bu ısı etkisi Joule ısıtmaya ek olarak gelir. Ayrıca Seebeck ve Peltier etkileri arasındaki karşılıklı bağımlılığı fark etti ve termodinamik teorisini uygulayarak Peltier ve Seebeck etkilerini tanımlayan katsayılar arasında bir ilişki kurdu. (Bu ilişkiler Kelvin ilişkileri olarak bilinir.) Termoelektrik etkilerin keşfinden sonra termoelektrik alanında yavaş bir ilerleme olmuştur. Termoelektrik etkilerin uygulamaları sıcaklık ölçümleriyle sınırlıydı. 1930'larda yarı iletkenlerin keşfiyle alana yeni bir ilgi geldi. 1950'lerde termoelektrik malzemeler olarak yarı iletkenlerin tanıtılması, Peltier buzdolaplarını ve özel uygulamalar için yeterli verimliliğe sahip termoelektrik jeneratörleri yapmayı mümkün kıldı.

2.2.1. Termoelektrik Cihazlar

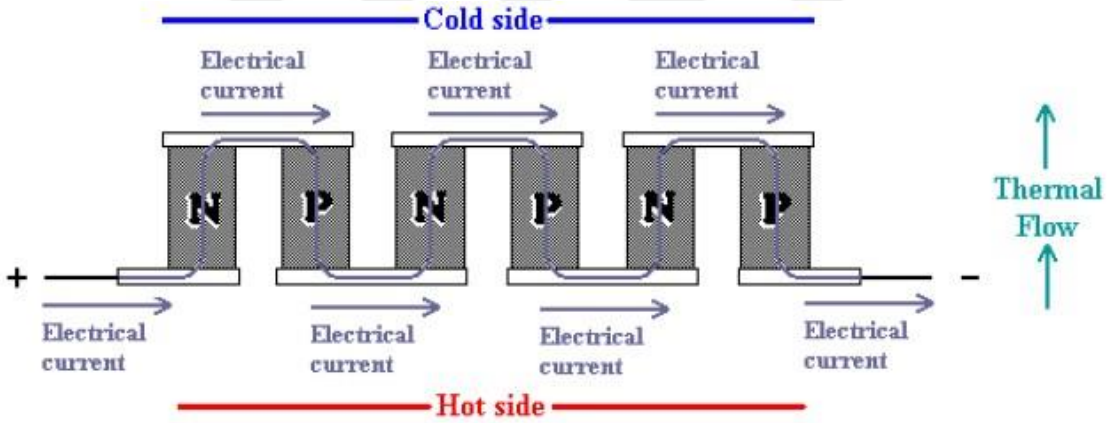
Termoelektrik (TE) cihazlar, atık ısıyı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebildikleri için son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Cihaz yarı iletkenlerden yapılmıştır ve normalde dikdörtgen paralel boru şeklindedir [12].



Şekil 6. *Bir termoelektrik cihazın temel birimi [11] .*

Termokupl adı verilen bir çift n ve p tipi yarı iletken, bir TE modülün temel birimidir. Temel birimin şematik bir çizimi şekil 6'da gösterilmektedir. n-tipi ve p-tipi

yarı iletkenler bir uçta elektriksel olarak bağlanmıştır. Elektrik iletkenleri şekilde * ile işaretlenmiştir. T_H ve T_C sırasıyla bağlantı sıcaklığı ve taban sıcaklığıdır. Tipik yarı iletken çifti geometrisi şekil 6'da gösterildiği gibidir ve yarı iletkenlerin boyutları tipik olarak milimetre mertebesindedir [11]. Bir termoelektrik cihaz, bir dizi termokupl kullanarak termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu cihaz, uydular, uzay sondaları ve hatta insansız tesisler için güvenilir bir güç kaynağıdır. Güneşten çok uzaktaki gezegenlere doğru uçan uydular, elektrik üretmek için yalnızca güneş panellerine güvenemezler. Şekil 7'de , bir malzemenin sıcak tarafındaki Elektronlar, soğuk taraftakinden daha fazla enerjiye sahiptir. Bu elektronlar sıcak taraftan soğuk tarafa akacaktır. Tam bir devre yapılabilirse, elektrik sürekli akacaktır. Yarı iletken malzemeler en verimli olanlardır ve "p tipi" ve "n tipi" çiftleri halinde birleştirilir. Elektronlar "n tipi"nde sıcaktan soğuğa doğru akarken, "p tipinde" elektron delikleri sıcaktan soğuğa doğru akar. Bu, seri olarak elektriksel olarak birleştirilmelerine izin verir. Elemanlar, voltaj ve güç çıkışını artırmak için seri olarak birleştirilir [13]



Şekil 7. *Serideki Termoelektrik Elemanlar [13]*

2.3. Termoelektrik Etkiler

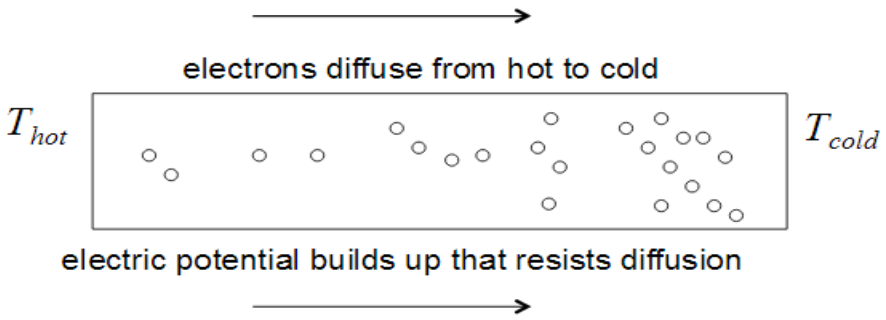
TE etki, sıcaklık farklarının doğrudan gerilime dönüştürülmesi ve bunun tersi olarak tanımlanır. Bir termoelektrik cihaz, her iki tarafa farklı bir sıcaklık uygulandığında bir potansiyel fark oluşturur. Tersine, böyle bir cihaza voltaj uygulandığında, bir sıcaklık farkı yaratır. Atom ölçeğinde, uygulanan bir sıcaklık gradyanı, malzemedeki yük taşıyıcılarının sıcak taraftan soğuk tarafa yayılmasına neden olur, böylece ısıtıldığında genleşen ve gaz akışına yol açan klasik bir gaza benzer bir termal akım indükler. Bu etki,

elektrik üretmek, sıcaklığı ölçmek veya nesnelerin sıcaklığını değiştirmek için kullanılabilir. Isıtma ve soğutmanın yönü uygulanan voltajın polaritesi tarafından belirlendiğinden, TE cihazlar aynı zamanda verimli sıcaklık kontrolörleridir. "Termoelektrik etki" terimi, ayrı ayrı tanımlanmış üç etkiyi kapsar: Seebeck etkisi, Peltier etkisi ve Thomson etkisi. Çoğu ders kitabında Peltier-Seebeck etkisi olarak bilinir. Bu isim, Fransız fizikçi Jean Charles Athanase Peltier ve Estonyalı-Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck'in etkinin bağımsız keşiflerinden dolayı verilmiştir. Dirençli bir malzemeye voltaj uygulandığında üretilen bir ısı olan Joule ısıtması, genellikle TE etki olarak adlandırılmasa da ilişkilidir. Peltier-Seebeck ve Thomson etkileri termodinamik olarak tersine çevrilebilirken, Joule ısıtması değildir [14].

2.3.1. Seebeck Etkisi

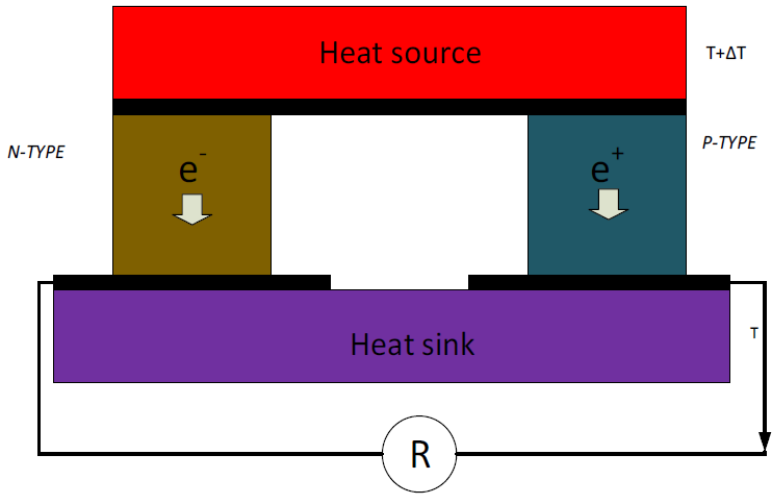
İletken bir malzeme bir termal gradyana tabi tutulduğunda, yük taşıyıcıları gradyan boyunca sıcaktan soğuğa doğru hareket eder; bu Seebeck etkisidir; iki farklı malzeme birleştirilirse ve bağlantılar farklı sıcaklıklarda tutulursa (T ve $T + \Delta T$) sıcaklık farkı ΔT ile orantılı bir voltaj farkı (ΔV) geliştirildi . sıcaklık gradyanı ($\Delta V / \Delta T$), Seebeck katsayısı (α) veya termogüç olarak adlandırılan malzemelerin içsel bir özelliği ile ilgilidir. [15]

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = -\frac{\text{Vhot} - \text{Vcold}}{\text{Thot} + \text{Tcold}}$$, Seebeck katsayısı: α [V/K]



Şekil 8. *Yük taşıyıcıların hareketi [16]*

Açık devre durumunda, Şekil 8 de görüldüğü gibi yük taşıyıcıları soğuk bölgede birikecek ve bu da bir elektrik potansiyel farkının oluşmasına neden olacaktır [16]. Aslında, üst ve alt arasındaki sıcaklık farkı, elektronları ve delikleri (eksik elektronları) sıcak taraftan uzaklaştırır. Bu durum sıcak ve soğuk taraflar arasında bir dengesizliğe yol açar. Başka bir deyişle, tıpkı bir pil gibi, üreteç olarak kullanılabilecek bir potansiyel fark oluşturur. Örneğin; arabanızdaki radyoya güç vermek [17] (Şekil 9). Seebeck etkisi, bir sıcaklık farkının şarj akışını nasıl oluşturduğunu açıklar.



Şekil 9. *Güç üretim modunda tek bir termo-elektrik çifti*

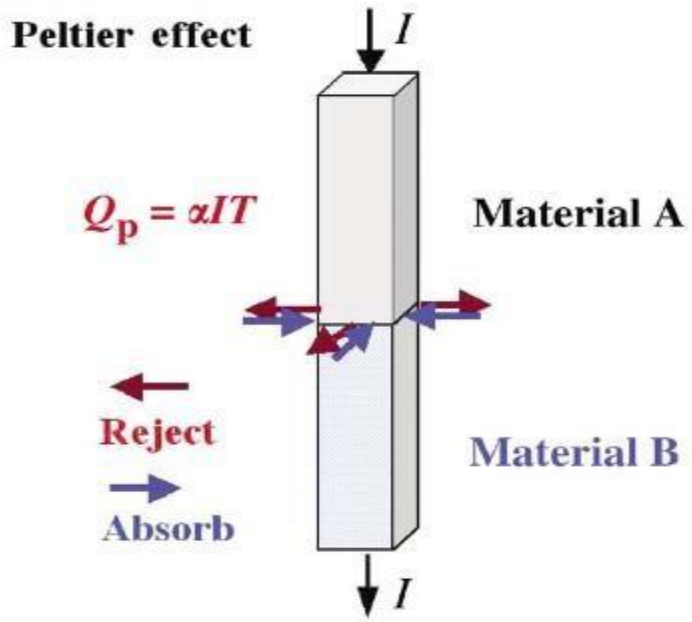
Seebeck katsayısı *n* - tipi malzemeler için negatif ve *p*- tipi malzemeler için pozitiftir . Dejenere yarı iletkenlerde ve metallerde, Seebeck katsayısı denklem (2)'de açıklandığı gibi sıcaklığa bağlıdır.

$$\alpha = -\frac{\pi^2 k^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n}\right)^{2/3} \qquad (2)$$

Denklem (2)'de, *k* Boltzmann sabitidir, *h* Planck'ın sabitidir, e elektronun yüküdür ve bu aynı zamanda bir sabittir. Daha sonra, Seebeck katsayısı yük taşıyıcıların etkin kütlesi, *m** ile orantılıdır . Ayrıca, büyük bir Seebeck katsayısı için küçük bir yük taşıyıcı konsantrasyonu, *n* , gereklidir [18].

2.3.2. Peltier Etki

Seebeck etkisinin tersi de mümkündür: iki bağlantıdan bir akım geçirerek bir sıcaklık farkı yaratabilirsiniz. Bu süreç 1834 yılında Peltier adlı bilim adamı tarafından keşfedilmiştir ve bu nedenle Peltier etkisi olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda açıklanan Joule ısıtmasına benzerlik gösterebilir fakat Joule ısıtmasında akım sadece içinde aktığı malzemenin sıcaklığını arttırır. Peltier efekt cihazlarında ise bir sıcaklık farkı yaratılır: bir bağlantı daha soğuk ve bir bağlantı daha sıcak hale gelir [19]. Basitçe Peltier, iki farklı malzemenin (A ve B) birleşiminden bir elektrik akımı geçerse, akımın yönüne bağlı olarak bağlantıda ısının emildiğini veya reddedildiğini gözlemlemiştir, şekil 10; sıcaklığını sabit tutmak için [15, 20].



Şekil 10. *Birbirine benzemeyen iki malzeme arasındaki peltier etkisini gösteren bir şema [15] .*

Peltier soğutucuları, diğer bazı soğutma cihazları kadar verimli olmasa da, hassastır, kontrol edilmesi ve ayarlanması kolaydır. Peltier efekt cihazları, mikrodenetleyiciler ve bilgisayar işlemcileri gibi mikroelektronik cihazlar için kullanılan soğutuculardır . Bu durum kullanıcılar için işlemcinin aşırı ısınmasının

önüne geçerek süreçte kesintiye neden olmadan daha hızlı bir şekilde mikroişlemcileri overclock etmelerine yardımcı olmaktadır [19] . Peltier fenomeni ile ilişkili ısı gücü denklem (3)'teki gibi hesaplanabilir.

$$Q_P = \pi I = \alpha T_j I \quad (3)$$

Burada,

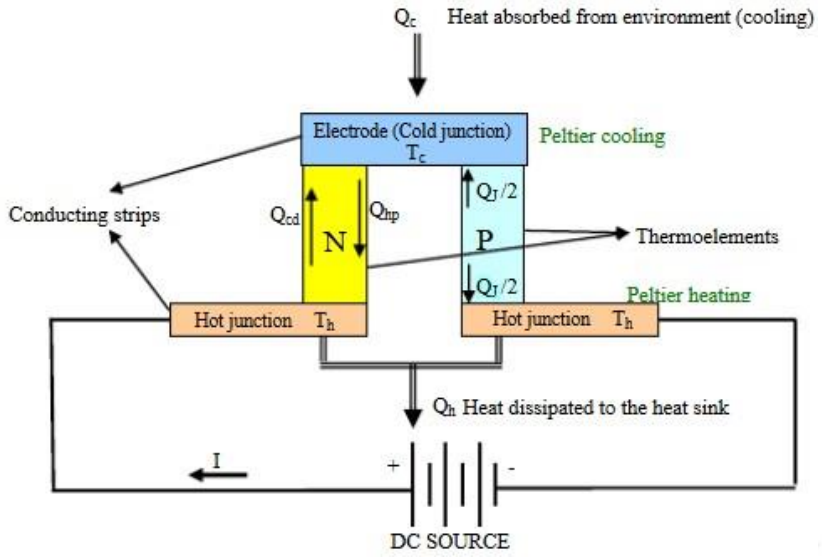
I-termoelektrik modülde akan elektrik akımı

π -Peltier katsayısı Seebeck katsayısı α ile ifade edilebilir ve son denklik kelvin bağıntısından gelir;

T_j - bağlantı sıcaklığı

2.3.2.1. Termoelektrik Soğutma Cihazı

Termoelektrik soğutmada (veya termoelektrik soğutuculardа) kullanılan termoelektrik cihazlar, elektrik enerjisini bir sıcaklık gradyanına dönüştürmek için Peltier etkisine dayanır. Bir termoelektrik soğutucuya düşük voltajlı bir DC güç kaynağı uygulanırsa, ısı termoelektrik soğutucunun bir tarafından diğer tarafına aktarılır. Bu nedenle termoelektrik soğutucunun bir yüzü soğutulur ve diğer yüzü ısıtılır. Şekil 11, elektrik akımının N-tipi elemandan P-tipi elemana aktığı bir termoelektrik buzdolabı olarak kabul edilen bir termoelektrik soğutma modülünü göstermektedir. Sıcaklık T_C, soğuk birleşimde azalır ve ısı daha düşük bir sıcaklıkta bir soğuk birleşme çevreye aktarılır. Bu işlem, taşıma elektronları soğuk bağlantı yoluyla P-tipi element içindeki düşük enerji seviyesinden N-tipi element içindeki yüksek enerji seviyesine geçtiğinde gerçekleşir. Aynı zamanda taşıma elektronları emilen ısıyı T_h sıcaklığındaki sıcak bağlantı noktasına taşır . Bir termoelektrik soğutucunun kalitesi, N-tipi ve P-tipi termoeleman çiftine uygulanan elektrik akımı gibi parametrelere bağlıdır. , sıcak ve soğuk tarafların sıcaklıkları, soğuk taraf ile cihazın yüzeyi arasındaki elektriksel temas direnci, termoelementin ısıl ve elektriksel iletkenlikleri ve termoelektrik soğutucunun sıcak tarafındaki ısı emicinin ısıl direnci [21].



Şekil 11. *Tipik bir termoelektrik soğutucunun şematik diyagramı [21]*

Termoelektrik soğutma çiftleri, genellikle fazlalık (n-tipi) veya elektron eksikliği (p-tipi) oluşturmak için yüksek oranda katkılı bizmut tellürden yapılan iki yarı iletken elemandan yapılır. Soğuk bağlantıda emilen ısı, devreden geçen akım ve yarı iletken çiftlerinin sayısı ile orantılı bir oranda sıcak bağlantıya aktarılır [22].

2.3.3. Thomson Etkisi

Thomson etkisi, TE malzemesi içinde aktif olan Peltier etkisinin sürekli bir türevi olarak görülebilirken, Peltier etkisi sadece farklı malzemeler arasındaki arayüzlerde meydana gelir [23]. Thomson olayı, Peltier etkisindeki gibi iki malzemenin birleşim noktasından değil, iki farklı sıcaklıktaki nesneler arasına yerleştirilmiş homojen bir elektrik iletkeninde akan bir elektrik akımının varlığında gerçekleşir. Akımın yönüne bağlı olarak, iletken hacminden bir ısı emilir veya dağıtılır. Örneğin elektronlar akımın taşıyıcılarıysa ve daha yüksek sıcaklıklara doğru hareket ediyorsa, termal dengeyi sağlamak için dışarıdan ısı olarak bir enerji almaları gerekir. Tersi durum, mevcut akışın ters yönünde gerçekleşir. Bu etkinin nicel modeli (4) tarafından tanımlanmıştır (Lovell et al., 1981) [24].

$$Q_{T=}\mu_T.I.\frac{dT}{dx} \tag{4}$$

Burada,

μ_T-Thomson, katsayısı

Thomson etkisinin termoelektrik cihazların performansı üzerindeki etkisi çok zayıftır, ancak çok yüksek sıcaklık gradyanları için mevcuttur ve ihmal edilemez.

2.3.4. Joule Isı Fenomeni

Bir malzemeden akım geçtiğinde, elektrik enerjisinin bir kısmı kaybolur ve ısıya dönüştürülür. Bu saf bir termoelektrik etki değildir, ancak tüm malzemelerde mevcuttur ve hem termoelektrik jeneratörlerde hem de Peltier soğutuculardа [23] performansı düşüren önemli ancak istenmeyen bir etkidir. Joule ısı üretimi en yaygın olarak bilinen fenomendir ve elektrik devrelerinde akan bir akımla ilişkilidir., Daha önce açıklananın aksine Joule etkisi tersine çevrilemez ve malzeme tarafından yayılan bir ısıda elektrik akımı varlığında sıfır olmayan dirençle kendini gösterir. (5) [24].

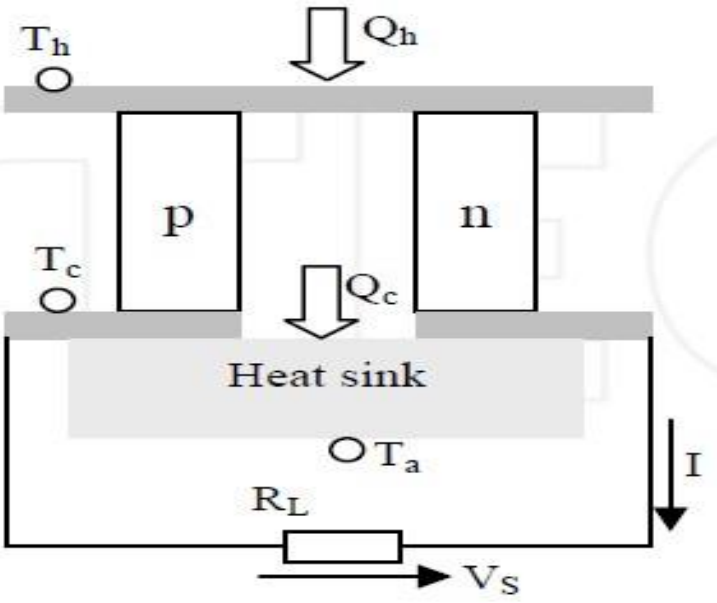
$$Q_j = I^2.R \tag{5}$$

2.3.5. Güç Üretimi

Bir termoelektrik çift veya bir sarmal seri olarak bağlandığında, çiftler iki farklı sıcaklıkta T_c ve T_h iki nesne arasına yerleştirildiğinde - örneğin bir soğutucu ve bir ısı kaynağı , Seebeck voltajı V_S üretebilir , Şekil 12. Bu durumda sadece Seebeck etkisi ve ısı iletimi olayı meydana gelir**.** Elektromotor kuvvet ise V_S dirençli bir yük ile kapatılır $R_{,L}$, sonra, bir elektrik gücü P edilir (denklem 6) üretilir ve termoelektrik modül tarif edilen tüm olguları kullanmaktadır [24].

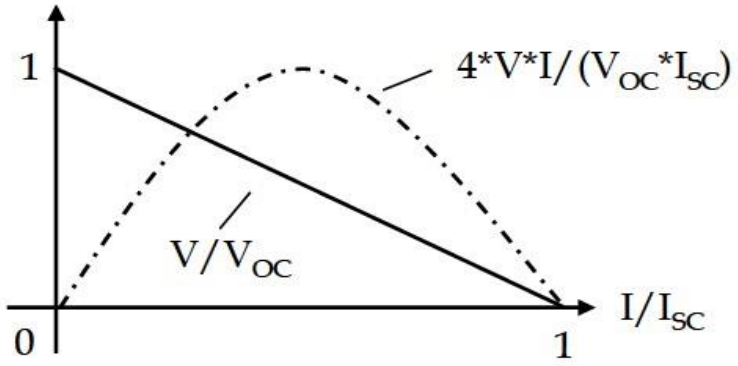
$$P = I^2 R_L = \left(\frac{V_S}{R_L+R_S}\right)^2 .R_L = \left(\frac{\alpha(T_H-T_C)}{R_L-R_I}\right)^2 .R_L \tag{6}$$

Burada, R_L termoelektrik çiftlerin iç direncidir.



Şekil 12. *Bir sıcaklık gradyanına maruz kalan tek bir termokupl tarafından güç üretimi [24] .*

Doğrusal gerilim-akım karakteristiği ve güç çıkışı Şekil 13'te gösterilmektedir, Maksimum güç çıkışı yarı açık devre geriliminde ve yarı kısa devre akımındadır (tüm eşleşen yüklerde olduğu gibi) [25], maksimum güç çıkışı denklemde (37).

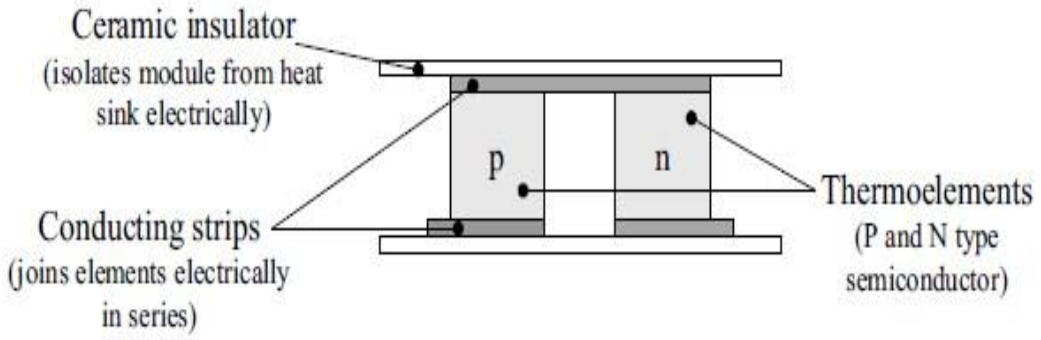


Şekil 13. *Termoelektrik jeneratörün gerilim, akım ve güç özellikleri [25]*

2.4. Termoelektrik Malzemeleri

Tüm malzemeler termoelektrik etkiler sergiler ancak 'termoelektrik malzemeler' ısıyı elektriğe dönüştürmede iyi olan malzemeleri tanımlamak için kullanılır [17].

Termoelektrik malzemeler, küresel enerji krizini çözmek için yenilenebilir enerji dönüşüm teknolojilerinde çok önemlidir. Füzeler ve uzay araçları gibi üst düzey teknolojik uygulamalar için uygun oldukları kanıtlanmıştır. Cihazların termoelektrik performansı, öncelikle kullanılan malzemelerin tipine ve bunların Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik ve termal kararlılık gibi özelliklerine bağlıdır. Klasik inorganik malzemeler, organik malzemelere kıyasla gelişmiş termoelektrik tepkileri nedeniyle önem kazanmıştır [26]. Günümüzde çok çeşitli farklı termoelektrik(TE) malzemeler mevcuttur, bunlardan bazıları yıllardır bilinmekte ve kullanılmaktadır, diğerleri ise hem fizik anlayışındaki hem de daha gelişmiş üretim süreçlerindeki daha yeni gelişmelerin bir sonucudur. Termoelektrik malzemeler, kristal yapı, dönüşüm verimliliği, maliyet ve sıcaklık aralığı gibi birçok farklı düzeyde kategorize edilebilir [27]. Şekil 14, bir termoelementin yapısını göstermektedir. Modüller tipik olarak yaklaşık yüz öğeden oluşur. Modüller, Peltier soğutucuları veya yüksek sıcaklık jeneratörleri olarak oluşturulabilir. Bunların her ikisi de aynı malzemeleri kullanır ve güç üretmek için kullanılabilir, ancak ısıl elemanların iletken şeride nasıl lehimlendiği konusunda farklılık gösterirler [13]. Seebeck'in keşfinden bu yana, birçok malzemenin termoelektrik üretmek için yararlı olduğu düşünülmüştür. İlk TEG'ler, diğerleri arasında antimon, bizmut, bakır, demir, kurşun, çinko ve farklı alaşımlar gibi elektrik iletkenlerine ve yarı iletkenlere dayanıyordu. Daha sonra 20. yüzyılda, diğer birçok termoelektrik malzemeler (TM) geliştirildi seramik, kompozitler, vb. Tüm bu materyallerin ampirik olarak, bir araştırmacının kişisel deneyimine dayalı binlerce denemeyle elde edildiği vurgulanmalıdır. Bu nedenle, TM'ler alanındaki ilerleme, esas olarak termoelektrik etkilerin doğası ile ilgili temel bilgilerdeki gelişmelere bağlıdır [28].



Şekil 14. *Termoelektrik Malzemeler [13]*

2.4.1. Termoelektrik Performans

Termoelektrik cihazların performansı büyük ölçüde yapıldıkları malzemelerin verimliliğine bağlıdır, bir TEG yapımında kullanılan malzeme bu cihazların performansının kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar. Verimlilik, Seebeck katsayısı (α), elektriksel özdirenç (ρ) ve termal iletkenlik (k) arasındaki kombinasyonu ifade eden termoelektrik değer (Z) değeri ile değerlendirilir (Denklem 7) [29] . TEG cihaz imalatında kullanıma uygun hale getirmek için bu malzemelerin performansını tanımlayan birçok özellik vardır. Bir malzemenin termoelektrik uygulamalar için potansiyeli, büyük ölçüde malzemenin liyakat rakamının bir ölçüsüne göre belirlenir.

$$Z = \frac{\alpha^2}{k^* \rho} \tag{7}$$

Burada,

Z - Termoelektrik malzeme değerliliği

α - Denklem (1) ile verilen Seebeck katsayısı

ρ -Elektrik özdirenci (tersi elektriksel iletkenlik σ)

k - Toplam ısıl iletkenlik.

T değeri (termoelektrik modülün sıcak ve soğuk plakalarının ortalama mutlak sıcaklığı) ile çarpılarak boyutsuz hale getirilebilir.

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{k^* \rho} = \frac{\alpha^2 T \sigma}{k} \tag{8}$$

$$T = \frac{T_{H+T_C}}{2} \tag{9}$$

$\frac{\alpha^2}{\rho}$ elektriksel güç faktörü ve termoelektrik özellikler olarak adlandırılır.

malzemenin dönüşüm verimini verir ve bu nedenle termoelektrik malzemeleri değerlendirirken en önemli özelliklerdir. Tüm bu değerler (Elektriksel İletkenlik, Termal İletkenlik), şekil 15'te görüldüğü gibi malzemelerin yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır.

Bunun temel nedeni, malzeme ve yarı iletkenlerde dikkate alınması gereken ana taşıma mekanizmasının yük taşıyıcıların difüzyonu olmasıdır. Seebeck katsayısı, hareketli yük taşıyıcıları tarafından taşınan entropinin taşıyıcının yüküne bölünmesiyle elde edilen bir ölçüdür ve denklem (10) ile açıklanabilir.

$$\alpha \sim \frac{1}{eT}\langle E - E_F \rangle \tag{10}$$

Burada,

e-elektrik yükü,

E_F-Fermi enerjisi ve $\langle E - E_F \rangle$ - taşıyıcı başına ortalama enerji, fermi enerjisinin fazlası.

Yük taşıyıcıların yayılımlı hareketi her zaman sıcaktan soğuk uca doğru olacaktır. Elektronlar çoğunluk taşıyıcılarsa, Seebeck katsayısı negatif olacaktır. Buna n-tipi malzeme denir. Seebeck katsayısı, yük taşıyıcılarının sayısı ile ters orantılıdır. Bu, şekil 15'te [30] gösterilmektedir.

2.4.2. Elektriksel İletkenlik.

Elektriksel iletkenlik, malzemenin yük taşıyıcılarını malzeme içinde hareket ettirme yeteneğidir. Elektriksel iletkenlik ile ilgili formüller (11) ve (12) numaralı denklemlerde sunulmaktadır.

$$\sigma = n\mu e \tag{11}$$

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*} \tag{12}$$

Elektriksel iletkenlik, *σ,* bir sabit olan elektron *e'nin* yük taşıyıcı konsantrasyonu, *n,* yükü ve ayrıca yük taşıyıcının hareketliliği, μ ile orantılıdır . Hareketlilik, sırayla, yük taşıyıcıların çarpışmaları arasındaki süre olan gevşeme süresi, τ ile orantılıdır ve yük taşıyıcıların etkin kütlesi, m^* ile ters orantılıdır . Bu nedenle, Seebeck katsayısını artıran düşük taşıyıcı konsantrasyonu ve yüksek etkili kütle gibi faktörler, daha düşük elektriksel iletkenliğe neden olan faktörlerdir [18]. Metallerde, iletim için uygun birçok taşıyıcı ve durum vardır, tipik

olarak $n \approx 10^{22}$ taşıyıcı cm^{-3}. Elektrik iletkenliği daha sonra metaller için çok büyüktür; $10^{6} (\Omega\, cm)^{-1}$.Yine için yarı iletkenlerde, iletimin gerçekleşmesi için taşıyıcıların bir boşluk boyunca termal olarak uyarılması gerekir. İletkenlik, hem deliklerin hem de elektronların katkılarıyla gerçekleşebilir.

$$\sigma = n\, \mu\, e + pe\, \mu\, h \tag{13}$$

Burada,

n - elektron konsantrasyonu

μ e - lektron hareketliliği,

p- delik konsantrasyonu

μ_h - delik hareketliliği.

Bir yarı iletkende yüksek iletkenlik elde etmenin iki temel yolu vardır. Uyarmak üzere bir çok küçük bir boşluğa sahip olan bir yarı-iletken bir yüksek iletkenliğe ulaşmak için iki temel yolu (E vardır $_G$ <k $_B$ T) k $_B$ Boltzmann sabiti ve enerji boşluğu E $_G$, ya da çok yüksek olmasından hareketlilik taşıyıcıları Elektriksel iletkenliğin tipik değerleri 10^{-4} ile $10^{4} (\Omega\, cm)^{-1}$ arasındadır, ancak bunlar biraz keyfi sınırlardır [15] .

2.4.3. Termal İletkenlik

Termal iletkenlik, malzemelerin malzeme boyunca ısı iletme yeteneğini tanımlar. Formül (14)'te görülebilen ısıl iletkenliğin iki bileşeni vardır:

$$k_{toplam} = k_{e} + k_{l} + k_{bp} \tag{14}$$

Toplam termal iletkenlik , yük taşıyıcılar tarafından taşınan ısıyı tanımlayan termal iletkenliğin elektronik bileşeni olan k_e ve kafes titreşimleri (fononlar) yoluyla aktarılan ısıyı tanımlayan termal iletkenliğin kafes bileşeni olan $k_{l'den}$ oluşur ve $k_{bp'dir}$. elektron deliği çiftlerinin oluşumu ve rekombinasyonu nedeniyle bipolar termal iletkenlik. Wiedemann-Franz yasası, metallerde ve dar bant aralıklı yarı iletkenlerde termal iletkenliğin elektronik katkısını tanımlar. Kanun, termal iletkenliğin, denklemde açıklanan ilişki yoluyla elektriksel iletkenlik ile ilgili olduğunu belirtir. (15):

$$k_e = L\,\sigma\,T \tag{15}$$

Isıl iletkenliğin elektronik bileşeninin elektriksel iletkenlik ile doğru orantılı olduğu görülebilir. burada L orantı sabitine Lorenz sayısı denir.

Niteliksel olarak bu ilişki, hem ısı hem de elektrik aktarımının metaldeki serbest elektronları içerdiği gerçeğine dayanır. Termal iletkenlik, enerjinin ileriye doğru taşınmasını arttırdığından, ortalama parçacık hızı ile artar. Bununla birlikte, çarpışmalar elektronları yükün ileri taşınmasından saptırdığı için, parçacık hızı arttıkça elektriksel iletkenlik azalır. Bu, termal iletkenliğin elektrik iletkenliğine oranının, kinetik sıcaklıkla orantılı olan ortalama hızın karesine bağlı olduğu anlamına gelir [18, 31]. Bu denklemlerden, termal iletkenliğin elektronik katkısının, elektrik iletkenliğine lineer olarak nasıl bağlı olduğu görülebilir. ZT değerini artırmak için $\frac{\sigma}{k_e}$ oranının maksimize edilmesi gerektiğinden $\boldsymbol{k_{l'nin}}$ azaltılması gerekir.

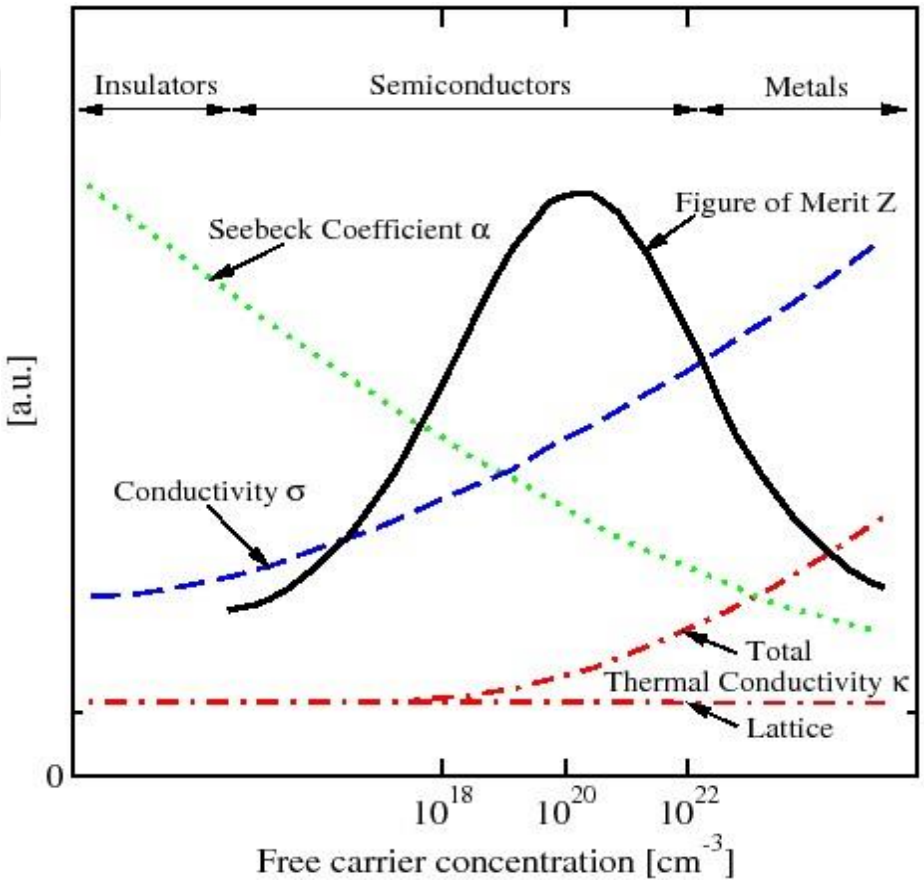
Bu, optimal termoelektrik malzemenin "Fonon-cam, elektron-kristal" olarak adlandırılmasına yol açmıştır; burada fononlar bir camda olduğu gibi (amorf malzeme) bozulurken elektronlar kristalli bir malzemede olduğu gibi daha serbest hareket edebilmektedir [30]. Kafes termal iletkenliği, kafes titreşiminden kaynaklanır; bu nedenle değeri büyük ölçüde titreşim moduna bağlıdır. Atomik titreşimler, 0 K'nin üzerindeki tüm kristal sistemlerde mevcuttur. Fonon kavramı, hem titreşim frekansı hem de sıcaklıkla ilgili olarak kafes titreşimlerinin nicelenmiş enerjisi olarak kabul edilir. Sıcaklık yükseldikçe, atomik ajitasyonların genliği artar, bu da sistemlerdeki fononların sayısının arttığı anlamına gelir. Basit bir kristal katı için, kafes ısıl iletkenliği, kafes titreşimlerini bir fonon gazı olarak ele alan Debye denklemine (16) dayanmaktadır; burada C_v hacim ısı kapasitesidir, v ortalama fonon grubu hızıdır (ses hızı) ve λ fonon ortalama serbest yoldur [29].

$$k_l = \frac{1}{3} C_v v \lambda \tag{16}$$

Bipolar termal iletkenlik, hem elektronların hem de deliklerin ısı iletimine katkıda bulunduğu içsel uyarımların sıcaklık aralığında bulunur. Çalışma halindeki termoelektrik malzemeler için, bu iletim, malzeme bir sıcaklık gradyanına maruz kaldığında, sıcak

tarafta soğuk taraftan daha fazla sayıda elektron-delik çifti üretildiği için gerçekleşir. Ek olarak, soğuk tarafta meydana gelen rekombinasyon, malzemelerin bant aralığına karşılık gelen ve toplam termal iletkenliğe katkıda bulunan belirli bir miktarda enerjiyi serbest bırakır [29]. Bipolar termal iletkenlik, denklem 17 'ye göre hesaplanır, burada e ve h sırasıyla elektronların ve deliklerin katkısını gösterir.

$$k_{bp} = \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 \frac{1}{\rho_e + \rho_h} (S_e + S_h)T \tag{17}$$

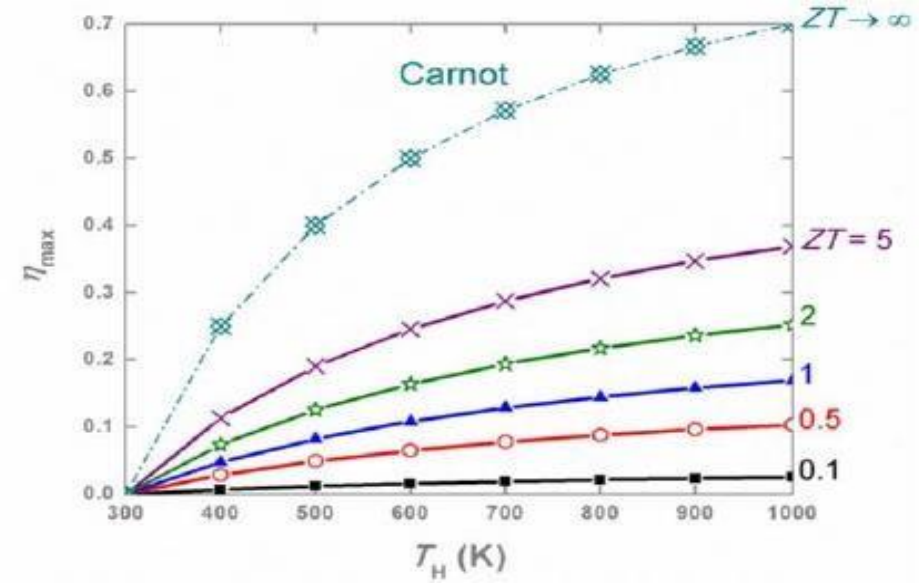


Şekil 15. *Yük taşıyıcı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak zt (au: keyfi birimler) [18] .*

Kaynaktan *ZT* denklemi, hangi görüntüler yüksek Seebeck katsayısı, yüksek elektrik iletkenliği ve düşük termal iletkenliği bir malzeme termoelektrik uygulamalara

uygun olduğu açıktır. Şekil 15, farklı malzemeleri ve bunların *ZT* ile ilişkilerini gösterir ve metallerin iyi elektriksel iletkenliğe sahip olduğunu ancak yüksek taşıyıcı konsantrasyonu nedeniyle düşük Seebeck katsayısına sahip olduğunu gösterir. Ayrıca metaller ayrıca yüksek ısı iletkenliğine sahiptir; bu nedenle metaller iyi termoelektrik malzemeler değildir. Yalıtkanlar ise çok düşük ısıl iletkenliğe ve yüksek Seebeck katsayısına sahiptir ancak zayıf elektrik iletkenleridir. Bu nedenle, yalıtkanlar termoelektrik uygulamalar için de kullanılamaz. Ancak yarı iletkenler ideal termoelektrik malzemelerdir [18]. Termoelektrik cihazların verimliliği, sıcak ve soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkından ve T_H ve $TC_{C'nin}$ sıcak ve soğuk taraf sıcaklığı olduğu Carnot verimi (denklem 45) ile sınırlanan malzemelerin liyakat rakamından hesaplanır. , sırasıyla ve *T* ortalama sıcaklık (Şekil 16).

$$\eta_{max} = (1 - \frac{T_C}{T_h}) \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_C}{T_h}} \quad (18)$$



Şekil 16. *Sıcak taraf sıcaklığının bir fonksiyonu olarak termoelektrik cihazların verimliliği soğuk tarafı ile farklı malzemeler 300 k'de tutulur [29] .*

ZT'ye ek olarak , teoriye göre, bir TEG'nin nihai verimliliği, Carnot verimliliği $\eta_c = (T_h - T_c)/T_h$ tarafından belirlenir ve sınırlandırılır . Eğer T_C sabit bir

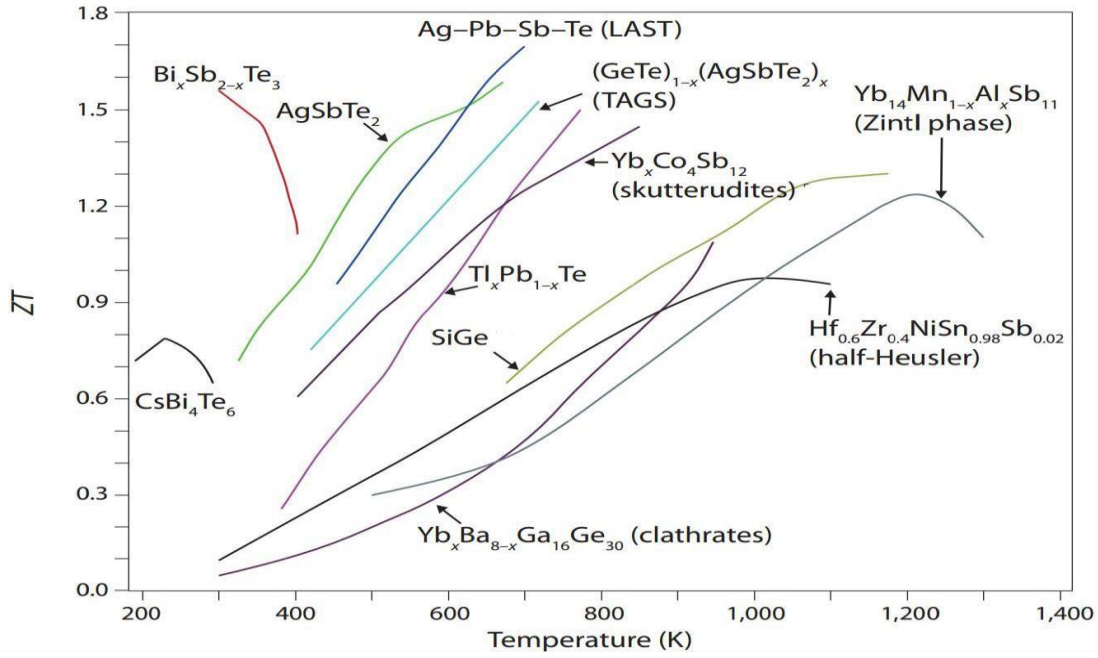
sıcaklıkta tutulur, sonra daha yüksek bir T_h Tegs daha yüksek nihai verimliliği yol açacaktır. Başka bir deyişle, TEG boyunca büyük sıcaklık gradyanı, yüksek verimli bir sonuç verebilir [32]. Değerlilik rakamının değeri genellikle dönüştürme verimliliği ile orantılıdır. Bu nedenle boyutsuz ZT terimi , farklı termoelektrik malzemeler kullanan modüllerin potansiyel dönüşüm verimliliğini karşılaştırmak için çok uygun bir rakamdır. Çalışma sıcaklığı farkının bir fonksiyonu olarak ve termoelektrik malzemenin değerinin bir dizi değeri için dönüştürme verimliliği Şekil (16)'da gösterilmektedir. Δ *T'deki* bir artışın, Carnot verimliliği tarafından belirtildiği gibi dönüşüm için kullanılabilir ısıda karşılık gelen bir artış sağladığı açıktır. Bu nedenle büyük ΔT avantajlıdır [33]. Verimlilik hakkında daha fazla ayrıntı modelleme bölümündedir.

2.4.4. Termoelektrik Liderlik Şekilini Artırma Yaklaşımları

Denklem (8)'de gösterildiği gibi, termoelektrik değerlilik miktarı, Seebeck katsayısının elektriksel iletkenlik ile çarpımı ve termal iletkenlik ile bölünmesinin karesidir; sonuç mutlak sıcaklık ile çarpılır. Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenlik, yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır ve pratik bir şekilde aynı anda artırılamaz. Termoelektrik değerin en yüksek adayını (güç faktörü) sağlayan optimum bir yük taşıyıcı yoğunluğu vardır. Yük taşıyıcı yoğunluğundan bağımsız olarak yalnızca bir parametre değiştirilebilir; bu, fonon ve elektron olmak üzere iki kısımdan oluşan termal iletkenliktir. Bu parçalar az ya da çok bağımsız olarak değiştirilebilir. Katı çözümler oluşturma yöntemi, termal iletkenlikte önemli azalmalara izin verir. Bu yöntemde, aynı kristal yapıya sahip iki izovalent malzemenin çözeltisi, fonon saçılımını arttırmak ve böylece termal iletkenliği azaltmak için kullanılabilir. ZT'yi en üst düzeye çıkarmak, minimum termal iletkenlik gerektirir. Değerlilik rakamını arttırmanın bir başka yöntemi de durum yoğunluğunu (DOS) arttırmaktır. Bazı malzemelerde bunu başarmak çok zordur, çünkü durumların yoğunluğu tipik olarak yalnızca böyle bir değişiklik üretmenin hiçbir yolu olmayan bir malzemenin bant yapısına bağlıdır. Bununla birlikte, katı çözümlerde, değerlilik rakamını artırmak için bant yapısını değiştirmek bazen mümkündür. [34]

2.5. Termoelektrik Malzemeler

Günümüzde çok çeşitli farklı termoelektrik (TE) malzemeler bulunmaktadır. Bazıları onlarca yıldır bilinmekte ve kullanılmaktadır, diğerleri ise hem fizik anlayışındaki hem de daha gelişmiş üretim süreçlerindeki daha yeni gelişmelerin bir sonucudur. TE malzemeleri, kristal yapı, dönüşüm verimliliği, maliyet ve sıcaklık aralığı gibi birçok farklı seviyede kategorize edilebilir [27]. Geleneksel TE malzemeleri, çalıştıkları sıcaklık aralığına göre üç gruba ayrılabilir **:** düşük sıcaklık malzemeleri (200500 K), orta sıcaklık malzemeleri (500-800 K) ve yüksek sıcaklık malzemeleri (800 K). Bazen nanokompozit TE'lerin, Seebeck katsayısının sıcaklık bağımlılığını, elektriksel iletkenliği ve termal iletkenliği etkin bir şekilde değiştirerek optimum sıcaklık aralığında belirli bir dereceye kadar kaymalar sergiledikleri bulunmuştur. Bununla birlikte, bu tür kaymalar tipik olarak nispeten küçüktür ve normalde maksimum ZT'yi bir sıcaklık aralığından diğerine taşımaz. Şekil 17, yukarıda bahsedilen üç sıcaklık aralığında gruplandırılmış gömülü nano inklüzyonlar ile TE nanokompozitlerindeki son başarıları özetlemektedir [35].



Şekil 17. *Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak farklı malzemelerin zt'sine genel bakış [27]*

2.6. Düşük Sıcaklık Malzemeleri

Bi_2Te_3-Sb_2Te_3 alaşımları 200-400 K sıcaklık aralığında çalışan son teknoloji TE malzemeleridir. Oda sıcaklığındaki diğer dökme malzemelere kıyasla 1 civarındaki nispeten yüksek ZT değerleri nedeniyle, Bi_2Te_3-Sb_2Te_3 alaşımları, bilimsel enstrümantasyon, içecek sebilleri ve araba koltuklarının soğutma ve sıcaklık düzenlemesindeki uygulamalarla çeşitli ticari TE cihazlarında tercih edilen malzeme olmuştur. Bi_2Te_3 bazlı malzemelerin ek uygulamaları, yanma proseslerinden ve hatta elektronik devrelerden gelen düşük kaliteli atık ısının geri kazanılmasında yatmaktadır.

Poudel, malzeme performansında çarpıcı bir gelişme sağladı. 2008'de yığın p-tipi $Bi_xSb_{2-x}Te_3$ alaşımına nano ölçekli kristal özellikler ekleyerek 373 K'da 1.4'lük bir ZT değeri elde ettiklerinde . Bu numune, Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 ticari külçelerinin Ar atmosferi altında bilyeli öğütülmesiyle elde edilen nano tozların sıcak presleme ile hazırlanmıştır . Geliştirilmiş ZT, büyük olasılıkla yüksek çözünürlüklü mikroskobik analizle ortaya konan Sb bakımından zengin fazların ve Te çökeltilerinin nano-tane sınırlarında artan fonon saçılması nedeniyle malzemenin kafes termal iletkenliğinde önemli bir düşüşün bir sonucuydu. Bu çalışma, $Bi_xSb_{2-x}Te_3$ alaşımlarının tane yapısını çeşitli nano inklüzyonlarla uyarlama konusunda bir dizi çalışmayı motive etti. $Bi_xSb_{2-x}Te_3$'ün SiC, ZnAlO, PbTe ve Zn_4Sb_3 nanoinklüzyonları ile heterojen nanokompozitleri diğer araştırmacılar tarafından üretilmiş ve TE özellikleri nano inklüzyonların etkisiyle karakterize edilmiş ve değerlendirilmiştir. Genel olarak, nano inklüzyonların varlığının, tane sınırlarında fonon saçılımını arttırdığı ve sonuç olarak nanokompozitlerin kafes ısıl iletkenliğini azalttığı bulundu. Bununla birlikte, bazı durumlarda, azalan kafes ısıl iletkenliğini telafi etmekten daha fazla elektriksel taşıma özelliklerinde önemli bir azalma vardır ve bu da ZT'nin azalmasına neden olur. Bu tür bir örnek, Bi içine PbTe nanopartiküllerin eklenmesi için bildirilmiştir $Bi_xSb_{2-x}Te_3$ bağlı Pb dahil edilmesine taşıyıcı konsantrasyonu artan bir olumsuz katkılama etkiye neden olduğu bulunmuştur matris, $_2$PbTe nanopartiküllerden. Benzer şekilde, n-tipi ikili Bi_2Te_3 alaşımları üzerinde de benzer çalışmalar yapılmıştır . Zhao et al. SiC nanoparçacıklarını toplu Bi_2Te_3 içinde dağıtmak için bir dizi deney gerçekleştirdi . Elde ettikleri sonuçlar, bu nanoparçacıkların eklenmesinin, SiC içermeyen yığın referansına göre sadece liyakat rakamını %18 arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda Vickers sertliği,

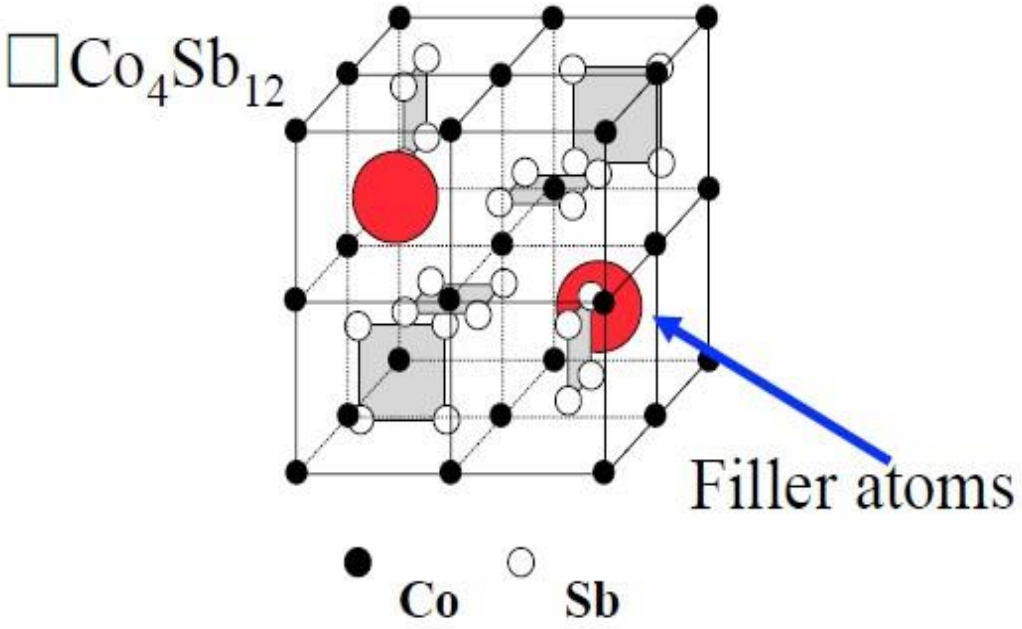
Young modülü ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri etkili bir şekilde iyileştirdiğini ve malzemelerin çekiciliğini iyileştirdiğini gösterdi. cihaz üretimi [35].

2.7. Orta Sıcaklık Malzemeleri

Orta sıcaklık çalışma aralığında kararlı ve yüksek dönüşüm verimliliğine sahip TE malzemeleri, sıcak bir araştırma konusudur, çünkü bu tür malzemeler ulaşım sektörü ve egzoz ısısı üreten endüstriler için atık ısı geri kazanımını önemli ölçüde etkileyebilir. Orta sıcaklıktaki TE malzemelerinin en belirgin temsilcileri, skutteruditler, kurşun kalkojenitler, yarı-Heusler, klatratlar, Zn 4 Sb 3 ve Mg 2 Si bazlıdır. Burada, performanslarını daha da artırmak için bu malzemelerle nano inklüzyonların kullanımını gözden geçiriyoruz [35].

2.7.1. Skutterudıtes

Skutteruditler, Şekil 18'deki mineral $CoAs_{3'e}$ dayanan kristal yapılardır. Bu kristal yapılar, gövdenin merkezinde, doldurulmuş skutteruditler oluşturmak üzere büyük metal atomlarını barındırmak için kullanılabilen oyuklara sahiptir. Bu metal atomları, fonon saçılımını manipüle edebilir, bu da kafesin termal iletkenliğinin azalmasına neden olur ve sonuç olarak ZT değerlerini arttırır. Aslında,$Ce_{0.9}$ Fe $_3$ ÇoSb$_{12}$ ve $Ba_{0.30}$ $Ni_{0.05}$ $Co_{3.95}$ Sb_{12} 500 gibi dolu skutterudites 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ZT, 1 den daha yüksek değere ulaşır [36] .



Şekil 18. *Skutterudites'in temel yapısı [37]*

Skutterudite, Norveç'in Skutterud bölgesinde yaygın olarak çıkarılan kobalt ve arsenik bazlı bir mineralin adıdır. Bu bileşik $CoAs_3$ formülüne sahiptir ve prototip görevi görür. Daha genel olarak aynı kübik kristal yapıya sahip MX_3 (M = Fe, Co, Rh, Ir, Ni X = P, As, Sb) bileşikleri o zamandan beri 'skutteruditler' olarak bilinmektedir [38]. Genel olarak, ikili skutteruditler, ~0.1 eV küçük bant aralıkları, yüksek taşıyıcı hareketlilikleri ve mütevazı Seebeck Katsayıları olan ancak çok yüksek termal iletkenlikleri olan yarı iletkenlerdir. Açık yapı, termoelektrik uygulamalar için potansiyellerinin anahtarıdır. Boşlukları yabancı atomlarla doldurmak muhtemelen kafes ısıl iletkenliğini önemli ölçüde azaltabilir ve liyakat rakamını geliştirmek için elektronik özellikleri değiştirebilir [39]

2.7.2. Kalkojenit

Kalkojenit bileşikleri, havada yüksek stabiliteye ve yüksek erime noktalarına sahip yarı iletkenler olan potansiyel termoelektrik malzemeler grubudur. Diğer elementleri barındırmadaki güçlü esneklikleri ve kükürt, selenyum ve tellür arasındaki elektronegatiflikteki küçük fark nedeniyle, geniş bir aralıkta termoelektrik uygulamalar için uygun enerji boşluklarına (eg0.1–0.8 eV) sahip kalkojenit yarı iletkenleri sentezleme

potansiyeli yüksektir. sıcaklık. Çeşitli kalkojenit bileşikleri arasında Bi_2Te_3, p-tipi $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$ ve n-tipi $Bi2Te_{3-x}Se_x$ gibi katı çözeltileri ile birlikte, büyük ölçekli ürünler için en yaygın olarak kullanılan termoelektrik malzemelerdir. PbTe, 770 K'de maksimum ZT'si yaklaşık 0.8 olan ve bu nedenle ara sıcaklıklarda güç üretimi için kullanılan kalkojenit bileşiklerinin bir başka önemli örneğidir. Son çalışmalar, germanyum bazlı TAGS'in (Te-Ag-Ge-Sb) PbTe'den daha yüksek performansa sahip olduğunu, ancak yüksek süblimasyon hızı, yüksek maliyeti ve düşük sıcaklıkta faz geçişinin varlığının pratik uygulamaları için engel olabileceğini göstermiştir. [14].

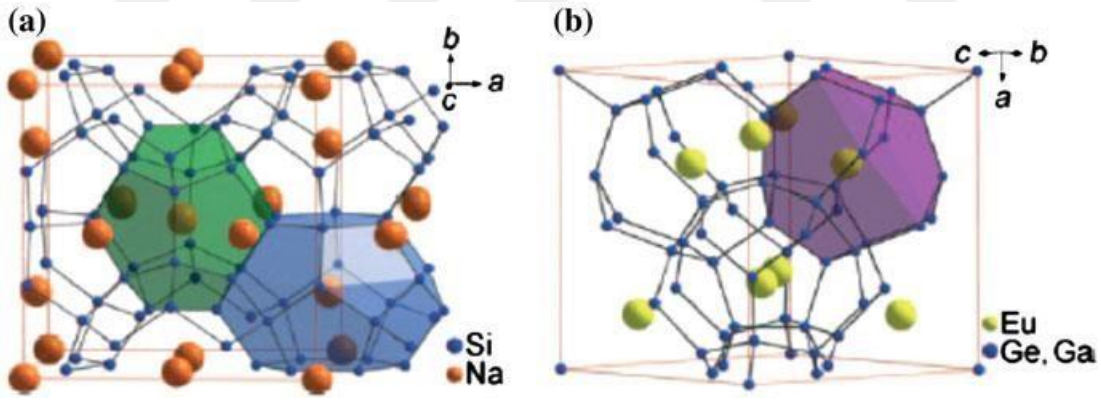
2.7.3. Latrat

Klatrat, tetrahedral olarak koordine edilmiş Al, Ga, Si, Ge veya Sn'den oluşan açık çerçevelerle karakterize edilir, bu nedenle düşük termal iletkenliğe sahiptir. Çerçeve yapısı içinde, büyük elektropozitif atomları birleştirebilen çeşitli kafesler vardır. Tip I ve Tip II olmak üzere iki ana yapı tipi vardır ve Tip I daha sık görülür. Tip I yapısı genel bir formül $X_2Y_6E_{46}$ (örneğin Şekil 19, Na_8Si_{46}) ile temsil edilebilir, burada X ve Y iki farklı çokyüzlü kafes E_{20} ve E_{24} içinde kapsüllenmiş "konuk" atomlardır. tetrahedral olarak koordine edilmiş çerçeve atomlarını temsil eder. Tip II yapı E_{20} ve E_{28} kafeslerden oluşmaktadır. Kafes fononlarını sallayabilen ve saçabilen bu kafeslerde konuk atomların mevcudiyetinin, çerçevenin açık yapısı ile birlikte kafes ısıl iletkenliğini etkin bir şekilde azalttığı kabul edilmiştir [14].

Yeni bir çalışmada, TiO_2 nanoparçacıklar toplu Ba dahil edilmiştir $_8Ga_{16}Ge_{30}$ kompozitler SPS (ardından tozların karıştırılmasıyla yapılmıştır matrisi, Kıvılcım plazma sinterleme). Isı iletkenliği büyük bir azalma TiO içeriğinin artmasıyla malzeme gözlendi $_2$ nanopartiküller fakat bu, ne yazık ki, elektrik iletkenliğinin büyük bir azalma eşlik edilmiştir. Optimum performans gösterdi, bununla birlikte, TiO 0.4 hac.% Bulunan $_2$ ZT üzerindeki toplam etkisi, pozitif olduğu yerde,. Hall ölçümleri, en iyi performans gösteren kompozit malzeme için artan bir taşıyıcı konsantrasyonu gösterdi; bunun, nanoparçacıkların dahil edilmesinden kaynaklanan bir doping etkisinden kaynaklandığı yorumlandı. Büyük olasılıkla, bir kısmı veya TiO en $_2$ sinterleme işlemi ile düşürüldü ve element Ti katkı maddesi olarak hareket etmek matris girmiştir. TiO_2 içeriği çok yüksek olduğunda, bu indirgeme işlemi o kadar etkili

olmadı ve bu nedenle malzemenin performansı düştü ve bu da optimum nano inklüzyon konsantrasyonunun mevcudiyetine neden oldu [40].

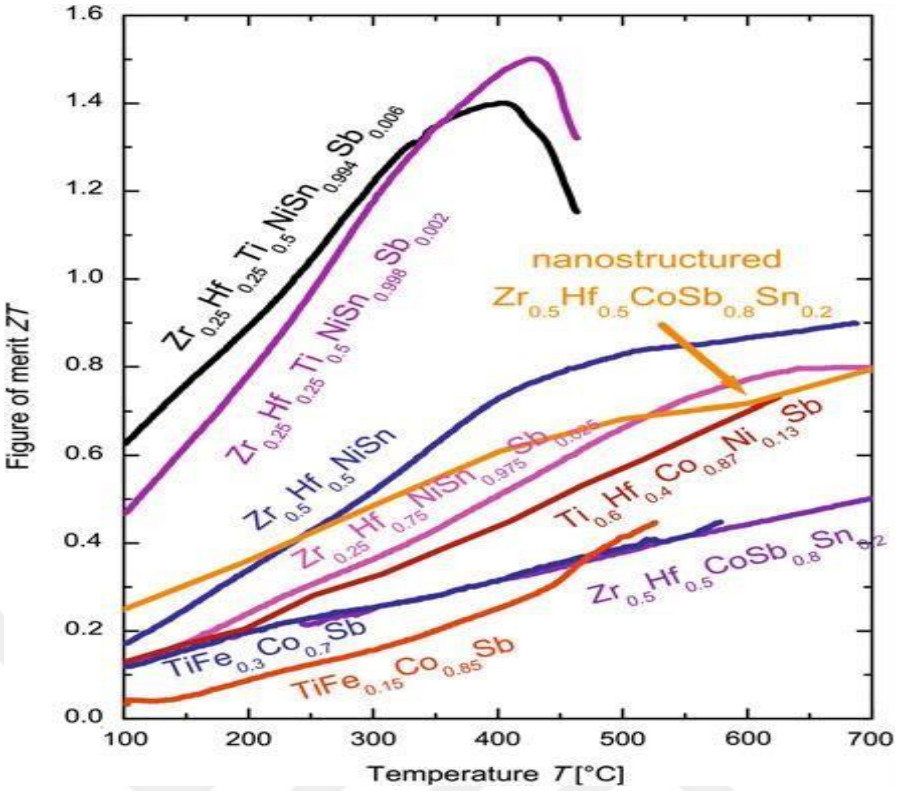
Yeni bir çalışmada, TiO_2 nanoparçacıklar toplu Ba dahil edilmiştir $_8$ Ga $_{16}$ Ge $_{30}$ kompozitler SPS (ardından tozların karıştırılmasıyla yapılmıştır matrisi, Kıvılcım plazma sinterleme). Isı iletkenliği büyük bir azalma TiO içeriğinin artmasıyla malzeme gözlendi $_2$ nanopartiküller fakat bu, ne yazık ki, elektrik iletkenliğinin büyük bir azalma eşlik edilmiştir. Optimum performans gösterdi, bununla birlikte, TiO_2 0.4 hac.% Bulunan ZT üzerindeki toplam etkisi, pozitif olduğu yerde,. Hall ölçümleri, en iyi performans gösteren kompozit malzeme için artan bir taşıyıcı konsantrasyonu gösterdi; bunun, nanoparçacıkların dahil edilmesinden kaynaklanan bir doping etkisinden kaynaklandığı yorumlandı. Büyük olasılıkla, bir kısmı veya TiO en $_2$ sinterleme işlemi ile düşürüldü ve element Ti katkı maddesi olarak hareket etmek matris girmiştir. TiO $_2$ içeriği çok yüksek olduğunda, bu indirgeme işlemi o kadar etkili olmadı ve bu nedenle malzemenin performansı düştü ve bu da optimum nano inklüzyon konsantrasyonunun mevcudiyetine neden oldu [40].



Şekil 19. *A) tip ı klatratın kristal yapısı, na $_8$ si $_{46}$. Si atomlarından (mavi) ve konuk na atomlu iki farklı kafesten oluşan çerçeve, tetrakaidecahedral kafes; mavi) ve beşgen on iki yüzlü kafes (yeşil). B) tip vıı klatratın kristal yapısı, $eu_8ga_{16}ge_{30}$. Çerçeve (mor) ge ve ga atomlarından oluşur. ([ax]: a = köşe sayısı, x = yüz sayısı). [14]*

2.7.4. Yarım Heussler Bileşikleri

Bileşiklerin en çok yönlü sınıflarından biri, adını keşfeden Fritz Heusler'den alan Heusler bileşikleridir [38]. Bugün, Heusler malzemeleri sınıfı 1.500'den fazla farklı bileşik içerir ve Heusler (genel formül X_2YZ) ve yarı Heusler (XYZ) bileşiklerine ayrılabilir, X ve Y geçiş metalleridir ve Z bir ana grup elementidir [14 , 38] Bugün, yarı-Heusler bileşikleri sınıfındaki iyi termoelektrik bileşikler için yapılan araştırmalar, özellikle *n*- tipi için NiTiSn ve *p*- tipi malzemeler için CoTiSb'ye dayalı iki sisteme odaklanmıştır . Bu bileşikler diğer elementlerle kolaylıkla katkılanabilir ve böylece bant yapısı değiştirilebilir. NiTi (Sn, Sb) malzemeler için, 650 K'da 70 $\mu W / cm$ K'ye kadar güç faktörlerine ulaşılabilir , bununla birlikte, yaklaşık 10 $\mu W / mK$'lık nispeten yüksek termal iletkenlik nedeniyle , 650 K'da sadece 0,45'lik bir değer rakamı başarıldı. 700 K'da 1.5 değerindeki en yüksek değerlerden biri Sb-katkılı için rapor edildi$NiTi_{0.50}Zr_{0.25}Hf_{0.25}$sn. Termoelektrik performansın optimizasyonu için diğer ana grup ve geçiş metalleri ile başka ikameler yapılmıştır (bkz. Şekil 20). Bu bileşik için ana zorluk, termal iletkenliğin azaltılmasıdır. Bu, fonon saçılımını önemli ölçüde etkileyecek olan sisteme tane sınırlarının eklenmesiyle kolayca yapılabilir. Bir yol, $CoMn_{(1-x)}Ti_xSb$ katı çözeltisinin CoTiSb ve CoMnSb bileşiklerine faz ayrımının kullanılmasına dayanmaktadır. Diğer bir yol, yığın numunelerin bilyeli öğütülmesiyle nanotozlar yaratılarak ve son olarak sıcak presleme ile yoğun yığın malzeme elde edilerek nanoyapıların tanıtılmasıdır. Bu , Zr_0 için 700^0 C'de 0,8'lik bir *ZT* ile %60 *ZT artışına* yol açar $_{.5}Hf_{0.5}CoSn_{0.8}Sb_{0.2}$ Heusler bileşiği. Yarı Heulser bileşiklerinin bir avantajı, *n* - ve *p* tipi bileşiklerin benzer kimyasal ve fiziksel özellikleridir , bu da onları termoelektrik modüller için çekici kılar [38] .

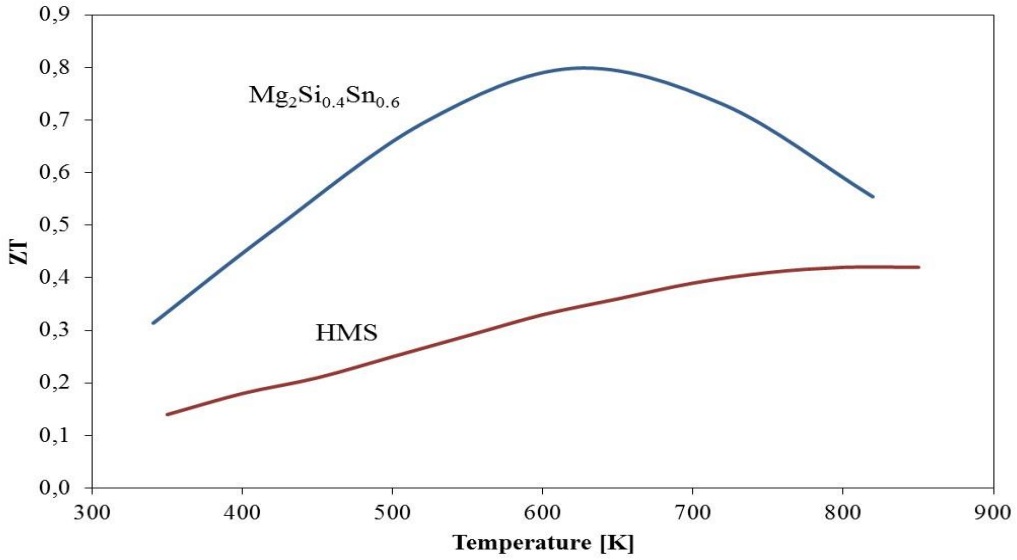


Şekil 20. *Yarı heusler malzemelerinin zt liyakatinin son teknoloji termoelektrik figürü [38] .*

2.7.5. Silisitler

Silisitler, termoelektrik enerji üretimi için ilginç bir malzeme grubudur, çünkü sadece iyi termoelektrik özellikler göstermezler, aynı zamanda daha ucuz ham maddeler kullanırlar ve iyi mekanik ve kimyasal stabilite sunarlar. Daha yüksek manganez silisit (HMS, $MnSi_x$, x=1.70-1.77), silisit grubunun en umut verici TE malzemesidir. Karmaşık ve büyük kristal yapıya sahip bir malzeme örneğidir. Fononlar atomlar arasındaki büyük mesafe tarafından etkin bir şekilde dağıldığından, bu genellikle termal iletkenliğin kafes kısmının amorf davranışına yol açar. Kristal yapının c ekseni, kristalin güçlü bir anizotropisine ve dolayısıyla termoelektrik ve mekanik özelliklere yol açan dikey eksenlerin uzunluğunun üç katından fazladır. Bir HMS malzemenin ZT eğrisi Şekil 21. Krom disilisid, $CrSi_2$ bulunan, bir başka ilginç silisid malzemedir. HMS'ye benzer altıgen bir kristal yapıya sahiptir, ancak yine de yaklaşık 0,3'ten daha yüksek ZT değerleri ile yapılmamıştır. Diğer silisit türleri $FeSi_2$, Ru_2Si_3 ve CoSi'dir [30]. Silisit esaslı termoelektrik malzemeler yüksek potansiyele sahiptir, çünkü silisit dünyada en yaygın

malzemelerden biridir, yerkabuğunda daha yaygın olan tek element oksijendir. Bu, diğer kıt termoelektrik malzemelerle karşılaştırıldığında üretilmesini ucuz hale getirir. Silisidin bol olması tek olumlu yanı değil, aynı zamanda çevre dostu olması ve nadir veya toksik elementler içermemesidir [41].

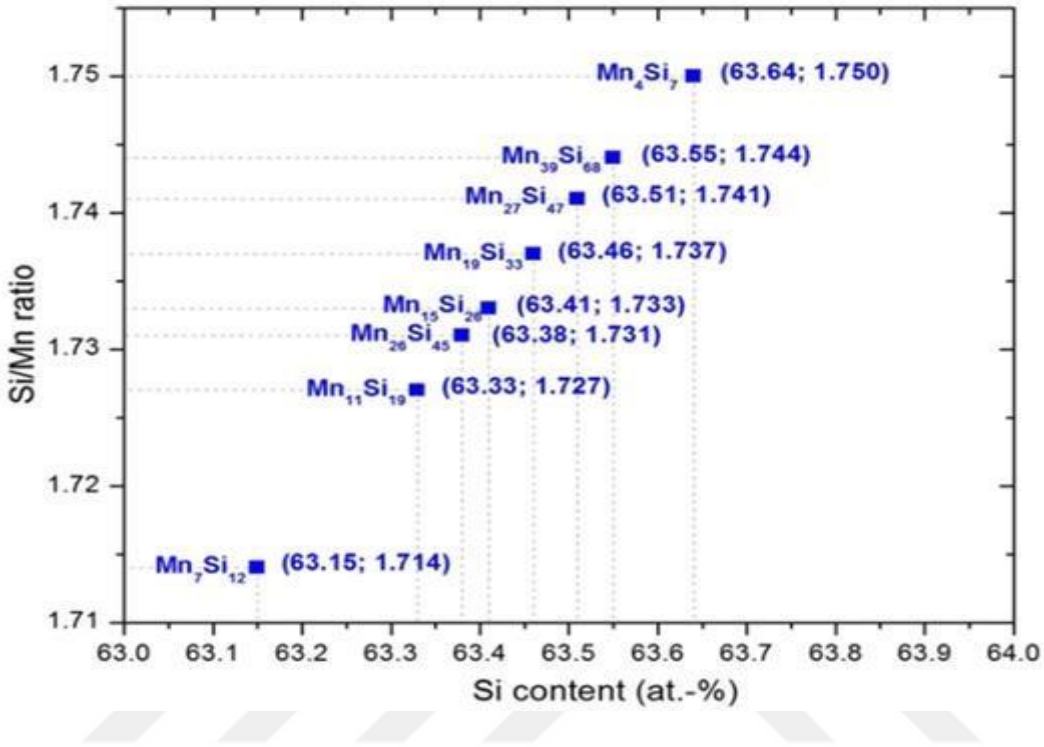


Şekil 21. *Zt mg değerleri $mg_2si_{0.4}sn_{0.6}$ sıcaklığın bir fonksiyonu olarak katı çözelti ve hms. Bu malzemeler, bir gösteri modülü [30] için n- ve p-tipi malzemeler olarak kullanılmıştır .*

2.7.5.1. Yüksek Mangan Silisitleri (Mg_2Si bazlı malzeme)

İdeal bir TE malzemesi sadece yüksek bir ZT değerine sahip olmamalı, aynı zamanda bol ve toksik olmayan elementlerden oluşmalıdır. Bu nedenle Mg_2Si esaslı malzemeler son zamanlarda çok ilgi görmektedir. 800 K'da $MgSi_{0.4}Sn_{0.6}$ katı çözeltilerinde 1.1'lik bir ZT_{max} değeri elde edildi [40]. Yüksek mangan silisit yapısı ve termoelektrik özellikleri açısından en ilginç malzemelerden biridir. Mn-Si sisteminin faz diyagramının dikkatli bir şekilde incelenmesi, 1 428 K'da aperitektik reaksiyonda daha yüksek manganez silisit (HMS) üretilebileceğini ve bileşiminin $MnSi_{1.72}$ olarak belirlendiğini göstermektedir. HMS'nin homojenlik bölgesinin çok dar olduğu bulunmuştur (%0,3'ten fazla değil). HMS oluşum yöntemi diğer araştırmacılar tarafından

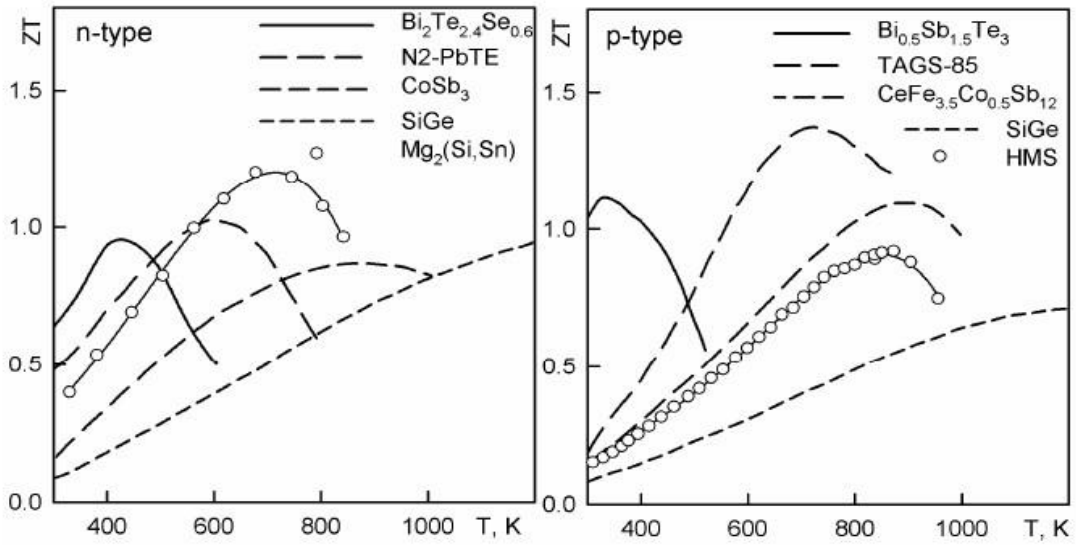
da doğrulanmıştır; bununla birlikte, farklı makalelerde HMS'nin bileşiminin farklı olduğu rapor edilmiştir ve fikir birliği, HMS'nin $MnSi_{1.70}$ ila $MnSi_{1.77}$ bileşim aralığında var olabileceği yönündedir [42].



Şekil 22. *Karşılık gelen si/mn oranları ve si ile hms'nin farklı yapısal formülleri içindekiler [29]*

HMS'nin bileşim formülünün ilk günlerde yanlışlıkla $MnSi_2$ olduğuna inanılıyordu . 1968'de, MnSi ve $MnSi_{2'ye}$ kıyasla daha iyi termoelektrik performansa sahip çatlaksız Mn_4Si_7 yapma işlemi , karışımın eritilmesini, eriyiğin katılaştırılmasını, katı eriyiğin ezilmesini ve ince bölünmüş parçacıkların sıcak preslenmesini içeren bir prosesin patenti alındı. O zamandan beri HMS, termoelektrik uygulamalar için potansiyel adaylar olarak tüm dünyadaki malzeme araştırmacılarından büyük ilgi gördü. Şekil 22, Si miktarlarının (%63-64 at. -%) Mn'yi aştığı bilinen tek bileşiklerin Yüksek Manganez Silisitler (HMS) olduğunu göstermektedir. Faz diyagramına ilk bakış, HMS'nin sürekli bileşimlere sahip katı çözeltiler olduğu izlenimini verir. [26] Mn_7Si_{12}, $Mn_{11}Si_{19}$, $Mn_{26}Si_{45}$, $Mn_{15}Si_{26}$, $Mn_{19}Si_{33}$, $Mn_{27}Si_{47}$, $Mn_{39}Si_{68}$ ve Mn_4Si_7 dahil olmak üzere farklı yapısal formüllere sahip farklı bileşikler mevcuttur. [29].

HMS bileşikleri, çeşitli nedenlerle çeşitli atmosferlerde ısıtma döngüleri sırasında yüksek stabiliteye sahip termoelektrik modüller üretmek için potansiyel malzemelerdir. İlk olarak, manganez ve silikonu oluşturan elementler toksik değildir ve ucuzdur. İkincisi, bu bileşikler vakumda süblimleşme olmadan 1100 K'ye kadar yüksek ısı kaynaklarında kullanılabilirler ve yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı oldukça dirençlidirler [29]. En iyi Silisitler bu iddiaları karşılamaktadır. Gerçekte: Si-yerkabuğunun en yaygın elementleri arasında dördüncü elementtir. En iyi silisit termoelektriklerinin Si ve çoğunluk bileşenleri ucuzdur, nadir veya toksik elementler içermez ve çevre dostudur. Ayrıca, çeşitli elektron taşıma mekanizmalarını temsil ederler, bu nedenle aralarında yeni termoelektrik sınıflarının temsilcileri bulunabilir **.** Şekil 23 magnezyum silis bazlı termoelektrik, *n*- tipi diğer termoelektriklerle karşılaştırıldığında 600-850 K sıcaklık aralığında en iyisidir [43] .



Şekil 23. *Termoelektrik sıcaklık aralığında en yüksek zt'ye sahip diğer termoelektriklere kıyasla silisit termoelektriklerinin en iyi temsilcilerinin liyakat rakamı [43]*

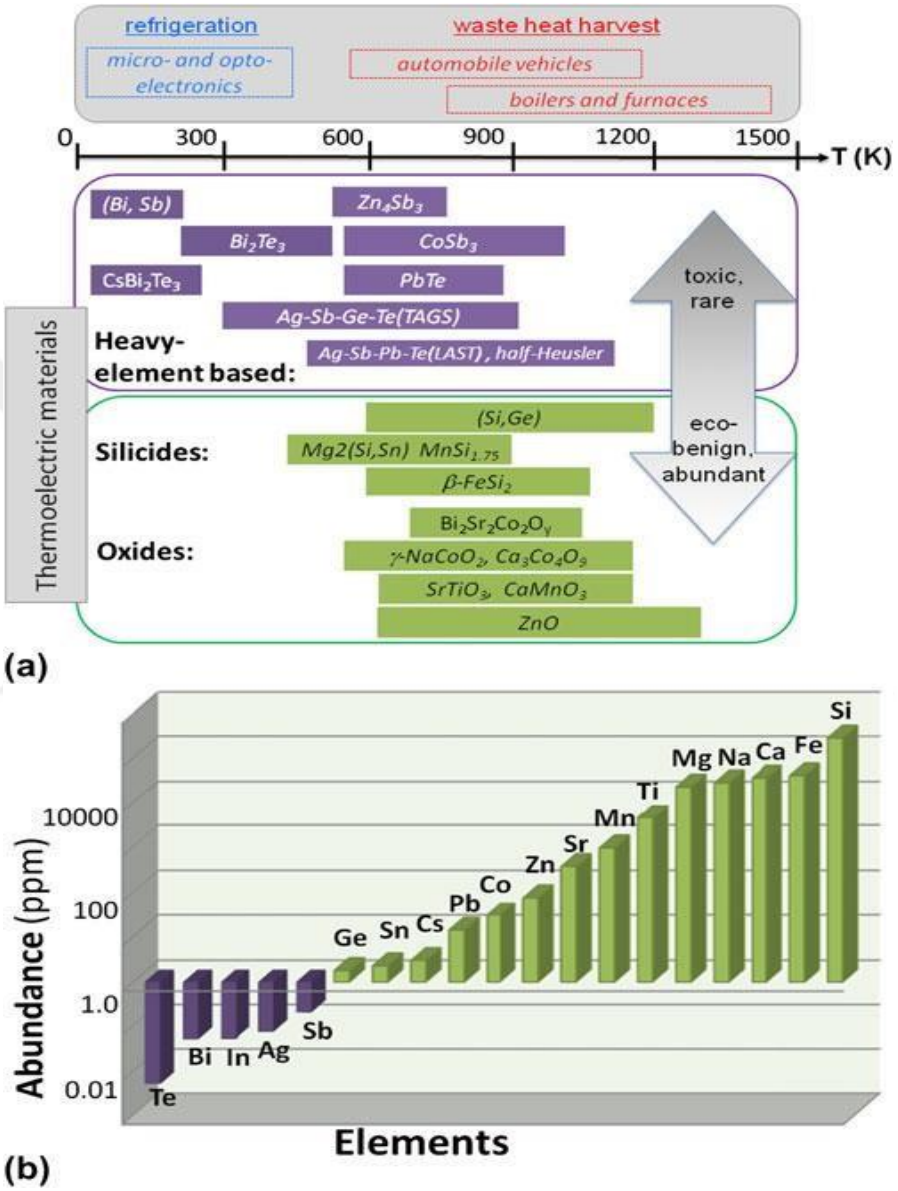
2.7.6. Yüksek Sıcaklık Malzemeleri

800 K'nin üzerindeki bir sıcaklık aralığında çalışan TE malzemeleri, derin uzay araştırmaları için sondalarda kullanılan güç jeneratörleri için özellikle ilgi çekicidir. Silisyum-germanyum (SiGe) alaşımları ve lantan kalkojenitler, iyi termal kararlılıkları ve nispeten yüksek ZT değerleri nedeniyle son yıllarda yüksek sıcaklık TE cihazlarında çalışılan ve kullanılan başlıca adaylardır. Özelliklerini iyileştirmeye yönelik son çabalar, bilyeli öğütülmüş nano tozların sıkıştırılması yoluyla alaşımların tane boyutunun azaltılmasını içerir. Jeng ve diğerleri tarafından 2008'de nanopartiküllerin SiGe alaşımlarının termal iletkenliği üzerindeki etkilerini incelemek için teorik bir model sağlanmış olmasına rağmen, bu alanda nano inklüzyonların kullanımına çok az dikkat çekilmiştir. Nano inklüzyonların etkilerinin fiziksel olarak daha iyi anlaşılmasına ulaşıldığında, nano inklüzyonların yüksek sıcaklıktaki TE malzemelerinin performansını da artırmaya yardımcı olacağı makul bir şekilde tahmin edilebilir [35]. Şekil 24, Cleary'ye atık ısının sıcaklık aralığına göre bazı termoelektrik malzeme uygulamalarını göstermektedir.

2.7.7. Oksitler

Termoelektrik malzeme uygulaması, çalışma sıcaklığı aralığı ve bileşen elemanların bolluğu ve çevre dostu olması bakımından şekil 24 a); Mevcut en son teknoloji ürünü TE malzemeleri ile karşılaştırıldığında oksitlerin ZT'si hala düşük olsa da, oksitler temel ve uygulama açısından birçok doğal değere sahiptir. İlk olarak, oksitlerin yüksek kimyasal ve termal kararlılığı, Şekil 24(a)'daki havadaki malzemelere büyük bir sıcaklık gradyanının uygulanmasına izin verir, böylece Denklem (18)'de düşük ZT'yi bir şekilde telafi eden yüksek bir Carnot verimliliğine yol açar. İkincisi, büyük sıcaklık gradyanı, termoelektrik olarak uygun olabilen yeni doğrusal olmayan, yerel olmayan TE etkilerini (örneğin, Benedicks etkisi) indükleyebilir. Üçüncüsü, oksitler kimyasal çok yönlülükleri ve yapısal karmaşıklıkları ile öne çıkarlar ve bu da yapısal ve bileşimsel uyarlamada büyük bir esneklik sunar. Son olarak, oksitler, hammadde maliyeti ve çevre dostu olma açısından kesinlikle avantajlıdır. Herhangi bir büyük ölçekli termoelektrik uygulaması için, hammadde maliyeti performanstan sonra önemli bir husustur. Örneğin, Te'nin artan fiyatı, Tecontaining yüksek performanslı nanoyapılı TE malzemelerinde ZT'nin geliştirilmesini bir şekilde bozar. Bu nedenle, bol miktarda

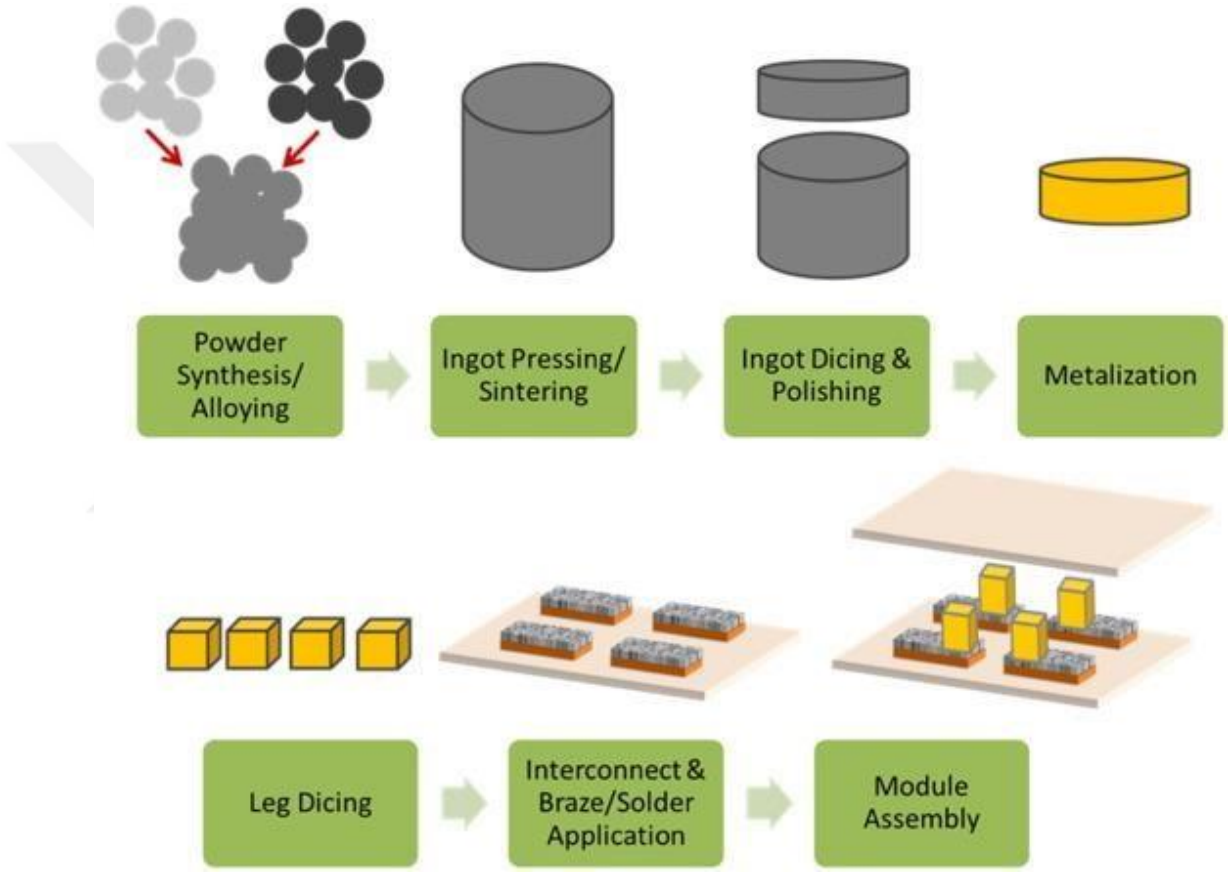
bulunan Şekil 24(b)'ye dayanan yüksek performanslı TE malzemeleri ve yüksek kimyasal ve termal kararlılığa sahip toksik olmayan elementler, uygulanabilir büyük ölçekli uygulamalar için çok önemlidir. Şekil 24 (a)'da gösterildiği gibi, oksitler özellikle havada yüksek sıcaklıkta elektrik üretimi için uygundur [44].



Şekil 24. *(a) atık ısı hasadı ve soğutma uygulamaları için çeşitli termoelektrik (te) malzemelerin şematik karşılaştırması. (b) te malzemelerinde kullanılan elementlerin bolluğu [44] .*

2.8. Üretme

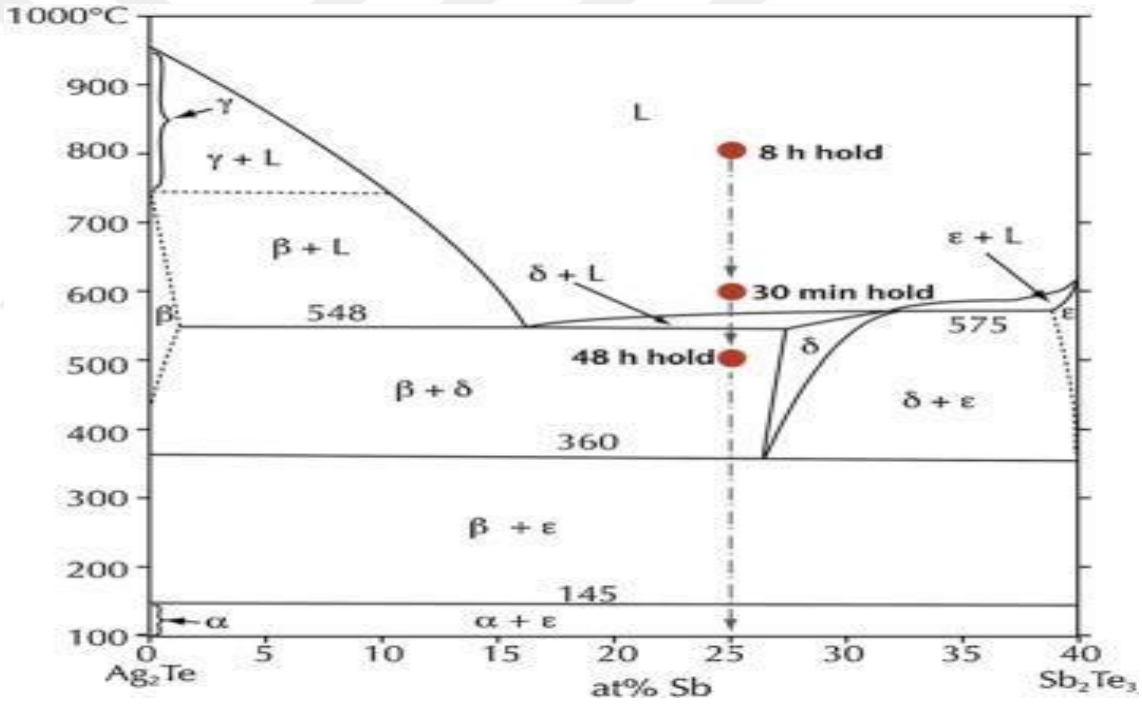
Termoelektrik cihazların üretim süreci, kullanılan termoelektrik malzemenin tipine göre değişir. Burada sağlanan genel bakış, dökme malzemeler ve en geleneksel üretim süreci için geçerlidir. Tüm TE malzemeleri ve cihazları için kapsamlı değildir, ancak malzemelerle yaygın olarak karşılaşılan mühendislik zorlukları hakkında anlayışı geliştirmek için bir referans olarak sağlanmıştır. Bir TE cihazı üretim sürecinin bir şeması Şekil 25'te [45] gösterilmektedir.



Şekil 25. *Termoelektrik modülün imalatı için tipik adımları gösteren şema [45]*

Proses verimi, TE cihazlarının üretimi için önemli bir husustur. Birincil verim endişesinin malzeme sentezine ve karakterize edilebilen numune sayısına karşılık geldiği malzeme geliştirme ve karakterizasyonunun aksine, cihaz üretim sürecinde daha birçok adım vardır. Termoelektrik malzeme sentezi, genellikle bileşen elementlerin bilyalı öğütme tozları yoluyla gerçekleştirilir. Bu uzun bir süreç olsa da, bir işleme reçetesi oluşturulduğunda yüksek verimle oldukça tekrarlanabilir. Bununla birlikte, belirli bir

kompozisyonu tekrar tekrar elde etmek için süreci oluşturmak zor olabilir. Tam karıştırma gereklidir ve toz parçacıklarına yeterli enerji verilmelidir. Termoelektrik malzemeler de eritme işlemleriyle yapılabilir. TE malzemelerinin faz diyagramları, her bir fazın elde edildiği dar proses pencerelerini gösterir ve termoelektrik malzeme özellikleri faza bağlıdır. Örneğin, $AgSbTe_2$, mikro yapıların termoelektrik performansı iyileştirdiği bildirilen TAGS ve LAST termoelektrik malzemeler gibi PbTe bazlı malzemelerdedir. $AgSbTe_2$ için faz diyagramı (Şekil 26), fazdaki karmaşık değişiklikleri ve dolayısıyla proses parametreleri nedeniyle ortaya çıkabilecek mikro yapıları gösterir. Bu nedenle proses dalgalanmaları, faz varyasyonları, mikro yapı oluşumu, sentez prosesinin tekrarlanabilirliği ve sonuçta ortaya çıkan malzeme özellikleri ile sonuçlanabilir.



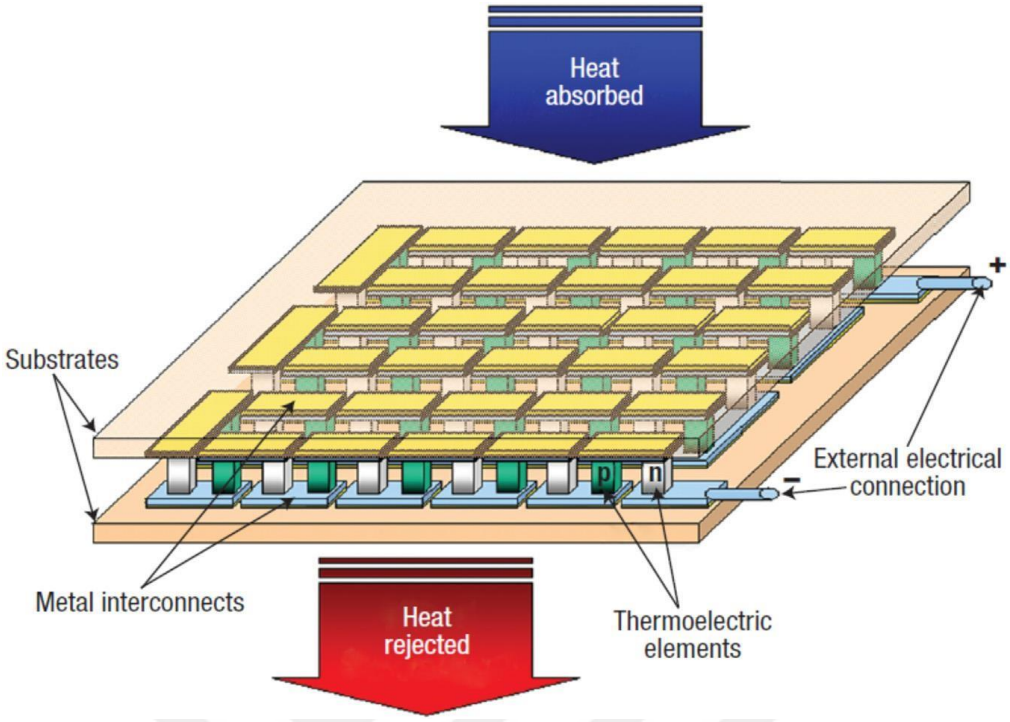
Şekil 26. *Mikro yapılı pbte bazlı termoelektrik malzemelerde ortak bir bileşen olan* $agsbte_2$*'nin faz diyagramı . Faz diyagramının sınırları hakkındaki karmaşıklık ve belirsizlikler, küçük proses dalgalanmalarının termoelektrik malzeme oluşumunu nasıl etkileyebileceğini gösterir [45]*

TE malzemesi toz veya partikül formunda sentezlendikten sonra, tipik olarak sıcak presleme veya kıvılcım plazma sinterleme yoluyla külçeler halinde konsolide edilir. Malzemelere genel bakış bölümünde tartışıldığı gibi, proses gazı ortamında süblimleşme ve stabilite/reaktivite dikkate alınmalıdır. Belirli bir TE malzemesi uygulamanın çalışma sıcaklığında kararlı olabilirken, malzemeyi yoğunlaştırmak için konsolidasyon işlemi (veya diğer üretim işlemleri) daha yüksek bir sıcaklıkta gerçekleşebilir. Külçeler daha sonra termoelektrik ayakları oluşturmak üzere küp şeklinde doğranır ve malzemenin kırılganlığı bu işlem adımında birincil endişe kaynağıdır. Bir termoelektrik bacağın herhangi bir ufalanması bacak yüzey alanını değiştirir ve bacağın hem termal hem de elektrik direncini etkiler. Bu da, özellikle her bir bacağın geometrisi aynı olmadığında sistem performansını etkiler. Yontulmuş bacaklar bir cihazda kullanılmayacak ve üretim süreci verimini azaltacaktır. Ayrıca, küp şeklinde doğrama ve ardından ufalama çatlamanın başlamasına neden olabilir. Bu çatlaklar, TE cihazının çalışması sırasında sonraki işlem adımlarında veya daha da kötüsü yayılabilir. Mikro çatlaklar bile TE malzemesinde termal ve elektriksel taşımayı etkileyebilir. Küpleme adımı ayrıca, zar atma sonrası bacak boyutları zar atma ekipmanının özelliklerine (örneğin testere bıçağı genişliği, zar atma derinliği) bağlı olduğundan, ulaşılabilir bacak boyutlarını da sınırlar. İnce film termoelektriklerinin ortaya çıkışı, yaygın olarak yarı iletken endüstrisi ile ilişkilendirilen üretim süreçlerini ortaya çıkardı. Süper örgüler ve nanoteller gibi yapılar önerilmiştir ve moleküler ışın epitaksi, kimyasal buhar biriktirme, buhar-sıvı-katı büyüme ve akımsız aşındırma dahil olmak üzere biriktirme, büyütme ve/veya aşındırma mikro/nanofabrikasyon işlemleri ile yapılmıştır. Ek olarak, hem inorganik hem de organik malzemeler için çözelti işleme teknikleriyle oluşturulan termoelektrik malzemelerin son gösterimleri gösterilmiştir. İnce film termoelektriklerinin yapılmasına yönelik bu yaklaşımlar oldukça çeşitli olduğundan, genelleştirilebilir, standart bir üretim süreci akışı henüz mevcut değildir. İmalat sırasında malzeme karakterizasyonu benzersiz bir zorluk teşkil etmektedir. TE malzemelerinin termoelektrik özelliklerini karakterize etmek için hem standart hem de özel yapım ekipman mevcuttur. Ancak bunlar, TE malzemesinin ayrı numunelerini (örneğin bir külçe veya bir TE ayağı) barındıracak şekilde tasarlanmıştır ve numuneye özel temaslar yapılmalıdır. Bu nedenle, teknikler yıkıcıdır, çünkü karakterizasyon numunesi sonradan bir TE cihazı için kullanılamaz. Karakterizasyon süreci de zaman alıcıdır, bu nedenle genel üretim süreci

akışında bir darboğaz haline gelir. Üretim sürecinde uygulanabilecek standart, hat içi karakterizasyon teknikleri değerli olacaktır. Malzemenin cihaza dahil edildiği şekliyle karakterizasyonunun yanı sıra, malzemenin diğer cihaz bileşenlerine olan elektriksel ve termal kontakları ile birleştirilen etkin özelliklerinin belirlenmesini sağlarlar. Hatalı cihazlar üretim sürecinde daha erken tespit edileceğinden, hat içi karakterizasyon proses verimini artırabilir ve israfı azaltabilir [45].

2.9. Termoelektrik Modüller

Bu bölümde, termoelektrik modüllerin bileşenlerinin tanımı ve işlevselliği tartışılmaktadır. Termoelektrik jeneratörler (TEG'ler), yüzeyler arasındaki sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir yarı iletkenden yapılmış yenilenebilir enerji cihazlarıdır [46]. Termoelektrik jeneratör (TEG), ısı girdisi olarak 1000K'nin altındaki düşük sıcaklıklardan güç üretmek için kullanılan sistemdir. Egzoz ısısının geri kazanılması için en iyi yöntemdir. Otomobiller, kazanlar, odun sobaları vb. birçok alanda kullanılabilir. Bir TEG'nin verimliliği termoelektrik malzemelere bağlıdır. Dünyanın temel araştırması yenilenebilir enerjiyi kullanmaktır. TEG'in en büyük avantajı yeşil enerji kullanmasıdır. TEG esas olarak Seebeck etkisi ilkesine dayanmaktadır. Bir termoelektrik jeneratörün verimliliği yaklaşık %5'tir. Bir ısı kaynağı, yüksek sıcaklığı sağlar ve ısı, bir termoelektrik dönüştürücüden, kaynağın altındaki bir sıcaklıkta tutulan bir ısı emiciye akar [47].



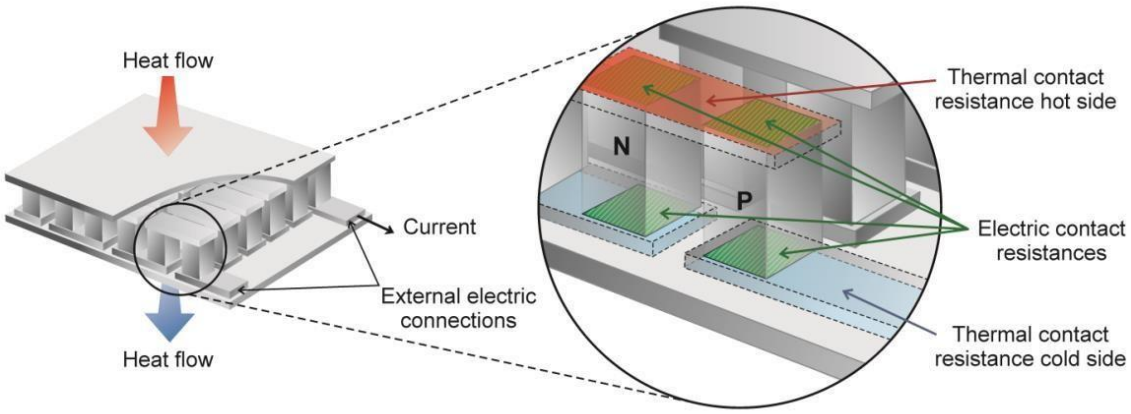
Şekil 27. *Bir termoelektrik modülün bileşenleri [48]*

Modüller, termoelektrik güç jeneratörleri veya soğutucular içindeki temel yapı taşlarıdır. Modüller, elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel olarak bağlanan yarı iletken termoelektrik çiftlerin bir matrisidir. Termoelektrik çiftler ve bunların elektrik ara bağlantıları, iki seramik substrat arasına sıkıştırılmıştır. Şekil 27 , bir termoelektrik modülün farklı bileşenlerinin düzenini gösterir. Bir termoelektrik modülün ana bileşenleri (1) termoelektrik elemanlar (veya bacaklar), (2) seramik substratlar, (3) metal ara bağlantılar ve (4) harici elektrik bağlantılarıdır [49]. Termoelektrik elemanlar (veya bacaklar), termoelektrik modüllerde elektrik üretmek için kullanılan çiftlerdir. Bizmut-tellürit, kurşuntellürid, antimon tellürid, silikon-germanyum yarı iletken alaşımları gibi malzemelerden oluşturulurlar. Malzeme seçimi, uygulama alanına ve çalışma sıcaklığı aralığına bağlıdır. Termoelektrik ayaklar, şekil 27'de gösterildiği gibi modül içinde düzenli bir matris içinde düzenlenmiştir. Termoelektrik modülü harici montaj yüzeylerinden elektriksel olarak yalıtmak için seramik substratlar kullanılır. Alt tabakalar ayrıca minimum termal dirençle ısı transferi sağlamak için iyi bir termal iletkenliğe sahip olmalıdır. Yaygın bir seramik substrat alüminyum oksittir (Al_2O_3). Metal ara bağlantılar, termoelektrik ayaklar arasında elektrik kontakları görevi görür. Kontaklar,

tüm bacaklar elektriksel olarak seri olarak bağlanacak şekilde düzenlenmiştir. Harici elektrik bağlantıları, güç üretimi durumunda modülü bir elektrik yüküne veya modülün termoelektrik soğutma için kullanılması durumunda bir elektrik kaynağına bağlamak için kullanılır. Termoelektrik modüller, ısı eşanjörleri ile birlikte TPG (Termoelektrik enerji üretimi) için sistemler oluşturmak için kullanılır [49].

2.9.1. Temas Dirençleri

İki katı malzeme arasında, ara yüz hiçbir zaman mükemmel temas halinde değildir. Yüzeyler mükemmel pürüzsüz görünse bile, yüzeyler birbirine bastırıldığında hava dolu boşluklar oluşturacak yüzeylerde her zaman mikroskobik pürüzler olacaktır. Bu boşluklar, gerçekte temas halinde olan yüzey alanını, yüzey pürüzlülüğüne, malzemelerin yumuşaklığına ve temas basıncına ne kadar bağlı olduğunu azaltır. Oksitler veya diğer safsızlıklar gibi potansiyel yüzey kaplamaları, bir arayüz üzerindeki hem termal hem de elektriksel iletkenliği etkileyebilir. Termal temas dirençlerinin büyüklüğü, yüzeyleri yumuşatarak veya yumuşatarak veya temas basıncını artırarak boşlukların alanını en aza indirerek azaltılabilir. Temas dirençlerini düşürmenin bir başka yolu da boşlukları iletkenliği yüksek bir malzeme ile doldurmaktır. Boşlukları doldurmak ve termal temasları güçlendirmek için yaygın olarak ince bir termal gres veya grafit tabakası kullanılır. Böyle bir malzeme havadan çok daha iyi termal iletkenliğe sahiptir, ancak metallerden çok daha düşüktür. Elektriksel temas dirençlerini düşürmenin yaygın bir yöntemi, yüzeyi oksitlenmeye dirençli, yumuşak, elektriksel olarak iletken bir malzeme ile kaplamaktır. Teknik olarak faydalı ancak pahalı bir kaplama malzemesi seçimi altındır. Altın katmanın kalınlığı önemlidir ve Nagaraju, çok ince bir altın katmanın temas direncini azaltmak yerine artacağını göstermiştir. En önemli temas dirençleri, termoelektrik peletlerin her iki tarafındaki elektrik dirençleri ve konektörler ile seramik plakalar arasındaki termal dirençlerdir. Peletler ve metal konektörler arasında termal temas direnci de olabilir. Termal ve elektriksel temas dirençlerinin yerleri Şekil 28 [23]'te vurgulanmıştır.

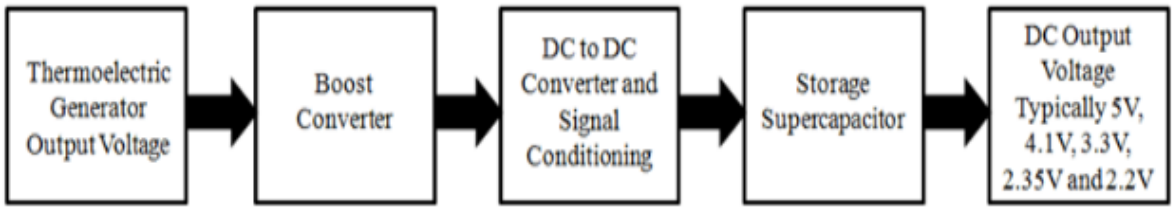


Şekil 28. *Bir te modülü içindeki kontak dirençleri [23]*

2.9.2. Termoelektrik Enerji Hasat

Standart bir termoelektrik modül tarafından üretilen termoelektrik çıkış voltajı, akımı ve elektrik gücü nispeten küçük olmasına rağmen, termoelektrik çıkış voltajı, bir boost dönüştürücü ve düşük güçlü DC'den DC'ye dönüştürücü kullanılarak yararlı ve kararlı bir seviyeye yükseltilebilir. DC'den DC'ye dönüştürücüden gelen elektrik gücü çıkışı daha sonra biriktirilir ve bir süper kapasitörde ileride kullanılmak üzere depolanırsa, sistemin potansiyel çıkış akımını ve dolayısıyla termoelektrik enerji hasat sisteminin toplam elektrik güç çıkışını artırmak mümkündür. Bir termoelektrik enerji toplama sisteminin basitleştirilmiş bir blok şeması Şekil 29'da gösterilmektedir. Birçok uygulamada, tek bir termoelektrik modülün çıkış voltajı bir DC'yi DC'ye doğrudan çalıştırmak için çok düşük olmasına rağmen, bir boost dönüştürücü kullanmak her zaman gerekli değildir. dönüştürücü. DC'den DC'ye dönüştürücünün çıkışı, diğer düşük güçlü elektronik sistemlere güç sağlamak, bir pili yeniden şarj etmek için doğrudan bir elektrik yüküne bağlanabilir veya gösterildiği gibi - elektrik depolama amacıyla bir süper kapasitöre bağlanabilir. Süper kapasitörde depolanan enerji daha sonra zamanla biriktirilebilir ve gerektiğinde yüke bırakılabilir. Sisteme süper kapasitör eklenmesi, kısa bir süre için de olsa bir yük tarafından çok daha yüksek seviyelerde akım çekilmesini sağlar ve sistemi daha çok yönlü hale getirir. Ticari olarak temin edilebilen yükseltici dönüştürücüler ve düşük güçlü DC'den DC'ye dönüştürücüler, 20mV'luk çok düşük

termoelektrik çıkış voltajlarından çalışabilir ve 2,2V ila 5V arasında bir DC çıkış voltajı verir [50].



Şekil 29. *Genel bir termoelektrik enerji toplama sistemi blok şeması [50]*

2.9.3. Termoelektrik Jeneratörün Avantajları

Termoelektrik güç jeneratörleri, diğer teknolojilere göre birçok farklı avantaj sunar, [51] bunlardan bazıları şunlardır:

- Son derece güvenilirdirler (tipik olarak 100.000 saat kararlı durumda çalışmayı aşarlar) ve mekanik hareketli parçaları olmadığı ve önemli ölçüde daha az bakım gerektirdiği için sessiz çalışırlar;
- Basit, kompakt ve güvenlidirler;
- Boyutları çok küçüktür ve neredeyse ağırlıksızdırlar;
- Yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler;
- Elektriğin sınırlı olduğu veya hiç olmadığı kırsal güç kaynağına özgü küçük ölçekli ve uzak uygulamalar için uygundurlar;
- Çevre dostudurlar;
- Konum bağımlı değildirler ;

2.9.4. Termoelektrik Jeneratör Uygulamaları

Termoelektrik jeneratörler (TEG'ler) havacılık, askeri ve otomobil uygulamalarında kullanım bulur. Otomobil endüstrileri, araçların yakıt verimliliğini artırmak ve atık ısıdan elektrik enerjisi üretmek için TEG'leri yanmalı motorlarla birleştirmeye çalışıyor. Daha yüksek yakıt verimliliği, otomobiller için iyi bir kilometre performansı sağlar ve üretilen elektrik enerjisi araç lambaları için kullanılabilir. Termoelektrik jeneratörler ayrıca uzay araçlarına güç sağlamak için kullanılır [52]

BÖLÜM 3. TASARIMCILAR VE MODELLEME İÇİN TEORİK ANAHTAR

Bir güç üreten termoelektrik modülün geleneksel tasarımı, genellikle, modülün termal ve elektriksel temas dirençlerinin ihmal edildiği basit bir model kullanılarak türetilen bir dizi formüle dayanır. Modül geometrisinden bağımsız olan dönüştürme verimliliği için bir ifade türetilmiştir. Sonuç olarak, termoelektrik jeneratörün tasarımı, yalnızca iki sınırlayıcı durumdan birini elde etmek için yük direncini eşleştirerek yönlendirilir: maksimum dönüşüm verimliliği veya maksimum güç çıkışı. Bununla birlikte, bir termoelektrik modülün hem güç çıkışı hem de dönüşüm verimliliği, belirli bir değer değeri için termoelement uzunluğuna, temas özelliklerine ve çalışma sıcaklık farkına bağlıdır. Maksimum güç çıkışı elde etmek için gereken optimum uzunluk, maksimum dönüştürme verimliliği için gerekenden farklıdır. Açıkça, güç üretimi için uygun bir termoelement uzunluğu, maksimum güç çıkışı ve maksimum dönüşüm verimliliği gereksinimleri arasında bir uzlaşma olacaktır. Modül yapım maliyeti, güç çıkışıyla yakından ilgilidir, dönüştürme verimliliği ise çalıştırma maliyetini belirler. Güç üretimi için modül geometrisi, üretilen elektriğin maliyetini en aza indirmek için optimize edilmelidir. Bu projede, optimize edilmiş bir modül tasarımı elde etmek için gerekli formüller ve grafikler sağlanmaya çalışılır [53].

3.1. Tasarım

Tasarım genellikle yeni veya mevcut sorunları çözmek için yeni yöntemler, cihazlar ve tekniklerin geliştirildiği yaratıcı bir süreç olarak kabul edilir. Birçok meslek, yeni düzenlemelere, yapılara veya eserlere yol açan yaratıcılıkla ilgilense de, tasarım mühendislik eğitimi ve uygulamasında önemli bir unsurdur. Artan dünya çapındaki rekabet ve yeni, geliştirilmiş ve daha verimli süreç ve teknikler geliştirme ihtiyacı nedeniyle, tasarıma artan bir vurgu yapılmaktadır [54].

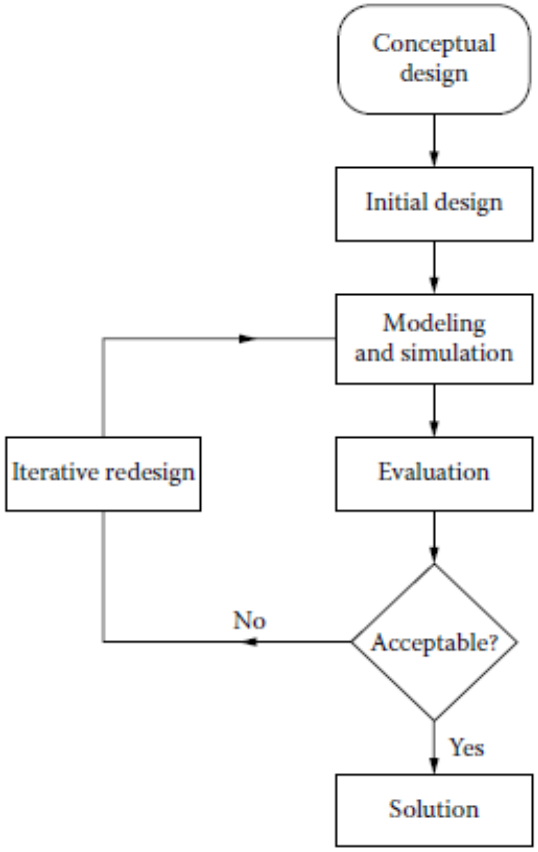
3.1.1. Tasarım Sürecindeki Adımlar

Kavramsal tasarım, sistemin temel yaklaşımını ve genel özelliklerini verir. Bunlar, sonraki nicel tasarım sürecinin temelini oluşturur. Başlangıç veya ilk

tasarım daha sonra sistemin konfigürasyonu, problem ifadesinden verilen miktarlar ve tasarım değişkenlerinin uygun seçimi açısından belirtilir. Tasarım değişkenlerinin bu ilk seçimi, diğer benzer tasarımlardan elde edilen bilgilere, mevcut mühendislik uygulamalarına ve deneyime dayanmaktadır. Yaklaşımlar ve idealleştirmeler kullanılarak, sistemin bu ilk tasarımı için basitleştirilmiş bir model geliştirilebilir, böylece davranışı ve özellikleri analiz edilebilir. Genel olarak, tipik termal sistemlerdeki yönetim denklemlerinin karmaşıklığı nedeniyle, çeşitli koşullar altındaki sistem davranışı, *simülasyon* olarak bilinen bir işlemle bilgisayarda incelenir. Bazı durumlarda deneysel veya fiziksel bir model de kullanılabilir. Modelleme ve simülasyon çalışmasından elde edilen çıktılar, tasarımcının tasarımı, problem ifadesinde verilen gereksinimler ve kısıtlamalara göre değerlendirmesine olanak tanır. Bu gereksinimleri ve kısıtlamaları karşılayan kabul edilebilir bir tasarım elde edilirse, süreç sonlandırılabilir veya sistemi iyileştirmek veya optimize etmek amacıyla başka tasarımlar aranabilir. Kabul edilebilir bir tasarım elde edilemezse, tasarım çeşitlendirilir ve modelleme, simülasyon ve tasarım değerlendirme süreçleri tekrarlanır. Bu adımlar, tatmin edici bir tasarım elde edilene kadar gerçekleştirilir. Bu yinelemeli prosedürün verimliliğini artırmak için farklı stratejiler benimsenebilir. Şekil 30, kavramsal tasarımla başlayan ve burada bahsedilen adımlardan bazılarını gösteren tipik bir genel tasarım prosedürünü göstermektedir. Genellikle mühendislik tasarım süreci, problem ifadesi ve kavramsal tasarım elde edildikten sonra nicel tasarım yönlerine odaklanır. Daha sonra, tasarım süreci, fiziksel sistemin ilk tasarımı ile başlar ve tasarımın, sistemin geliştirilmesinde yer alan imalat ve montaj tesislerine iletilmesiyle sona erer. Tasarım probleminin formülasyonu ve kavramsal tasarım bu sürecin öncüleridir ve çeşitli aşamalarda önemli bir rol oynar. Böylece tasarım ve optimizasyon sürecini oluşturan temel adımlar şu şekilde sıralanabilir [54]:

1. İlk fiziksel sistem 5. Yineleme ve kabul edilebilir bir tasarımın elde edilmesi
2. Sistemin modellenmesi 6. Sistem tasarımının optimizasyonu
3. Sistemin simülasyonu 7. Otomasyon ve kontrol
4. Farklı tasarımların değerlendirilmesi 8. Nihai tasarımın iletilmesi

5. Yineleme ve kabul edilebilir bir tasarım elde etme
6. Sistem tasarımının optimizasyonu
7. Otomasyon ve kontrol
8. Nihai tasarımın iletilmesi



Şekil 30. *Kabul edilebilir bir tasarım elde etmek için yinelemeli süreç [54]*

Bir termoelektrik jeneratör tasarımı sırasında dikkate alınan üç temel nokta [53]:

1. Özellikler: çalışma sıcaklıkları T_C, T_H ve gerekli güç çıkışı P (ve/veya çıkış voltajı veya akımı I).
2. Malzeme parametreleri: termoelement malzemelerinin Z (α ρ γ) termoelektrik özellikleri ve modülün elektriksel ve termos kontak özellikleri.

3. Tasarım parametreleri: termoelement uzunluğu L, kesit alanı A ve termokupl sayısı N.

Kullanılacak malzemeler Şekil 24'e atıfta bulunulmaktadır; Endüstriyel uygulama için termoelektrik malzemeleri (Kazan bant fırınları), çevre dostu malzemeler ve bolluk bazlı göstermektedir. Bu durumda silisli malzeme seçilir; burada P-tipleri için HMS (yüksek manganlı silisli malzemeler), N-tipi malzemeler için $Mg_2Si_{0.4}Sn_{0.6}$, iletken malzemeler için bakır (arası Seebeck malzemeleri ve alt tabakaları) ve alt tabakalar için alümina(Al_2O_3). Çıkış gücü, malzeme maliyetine göre optimum olmalıdır. İstenen soğuk sıcaklık $10\ ^0$C'dir, sıcak taraf sıcaklığı 3B'den yapılan ölçümden alınmıştır. Fırının aşağısında sıcaklık $800\ ^0$C, çatının tepesinde fırından 10.3 m uzaktaydı; $230\ ^0$C sıcaklık ölçüldü; bu sıcaklıkların değişmesi, bir kayıp olduğunu kanıtlar, bu kayıp modüle giriş olacak. içinde ilave ölçülen ortalama hız akış, 12m / s'dir. ölçülen değerlerden ısı akısı hesaplanmıştır.

3.1.2. ISI KAYBI HESAPLAMASI

Bacanın iki noktası arasında hesaplanan ısı kaybı termoelektrik jeneratör için ısı kaynağıdır, sürekli akışta olduğu varsayılarak baca gazı özellikleri tablo 1'de verilmiştir.

bacadaki herhangi bir noktada termal enerji denklemi

$$Q_X = C_p \times V \times \rho \times A_c \times T_x \tag{19}$$

Burada;

C_p - havanın özgül ısı kapasitesi (J/(Kg-K)) T_x -Herhangi bir yerdeki sıcaklık

V - Baca hızı(m/s) A_c - Kesit alanı(m^2)

ρ - yoğunluk (hava) 1.223 Kg/m^3 v - kinematik viskozite [m^2/s]

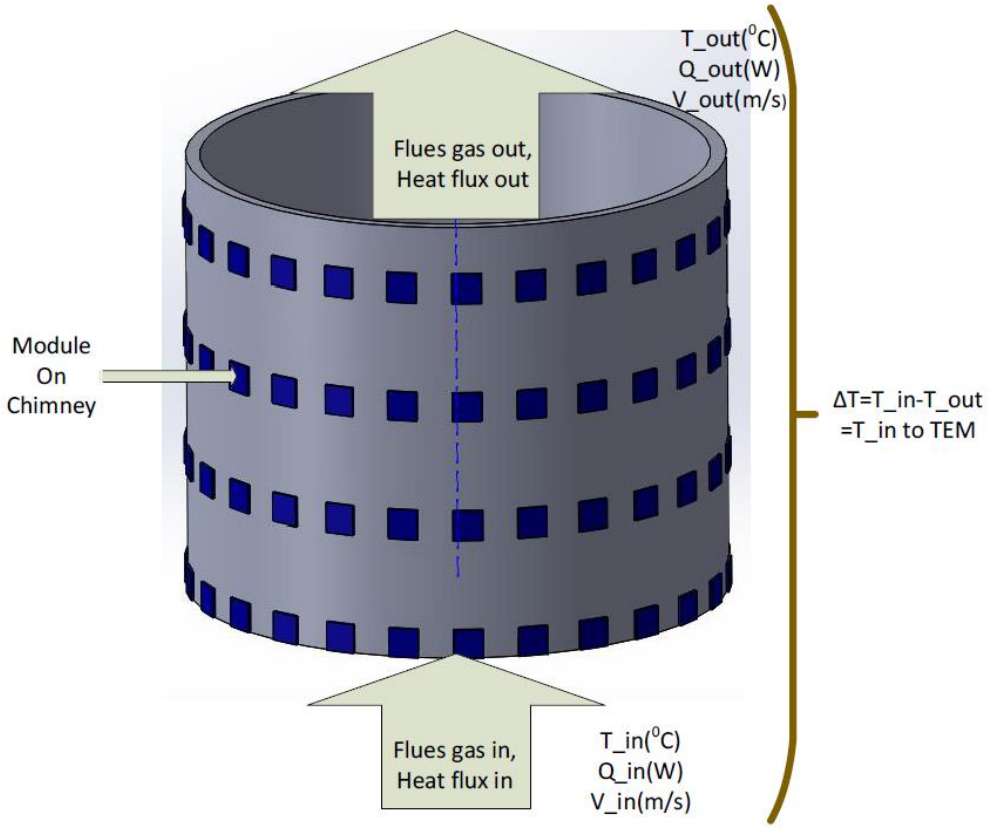
μ - dinamik viskozite

Tablo 1. *Bu tablo baca gazları içindir. Gazların sıcaklığına göre yoğunluk ve viskozite gibi bazı fiziksel özelliklerin değerlerini verir [55]*

T	ρ	C P	μ *10 ^{6}	*ν* *10 ^{6}
^{0}C]	[kg / ^{3}]	[kj/kgK]	[Pas]	[m ^{2} /sn]
0	1.295	1.042	15.8	12.2
100	0.95	1.068	20.4	21.54
200	0.748	1.097	24.5	32.8
300	0.617	1.122	28.2	45.81
400	0,525	1.151	31.7	60.38
500	0.457	1.185	34.8	76.3
600	0.405	1.214	37.9	93.61
700	0.363	1.239	40.7	112.1
800	0.33	1.264	43.4	131.8
900	0.301	1.29	45.9	152.5
1000	0,275	1.306	48.4	174.3
1100	0.257	1.323	50.7	197.1
1200	0.24	1.34	53	221

Hesaplamada akışın laminer olduğu, bacanın düzgün olduğu, baca gazının termokonveksiyonunun kalınlık boyunca iletime eşit olduğu, yani kayıpsız olduğu kabul edilmiş ve her yöne üniform olarak dağılmıştır. Denklemden (19), ısı akışı eksenel olarak bacaya, tablo 1'deki verileri kullanarak, 800 ^{0}C'de ısı akışı $Q_{1073\ K}$ = 1517.7kw, 210 ^{0}C'de bacadan eksenel olarak ısı çıkışı Q_{483K} = 1133. 9kw. Şekil 32'ye bakın,

sıcaklık kaybı 590 ^{0} C'dir, bu, sıcak sıcaklık veya modüle giriştir . Aynı şekilde 383,8 kw olan fark yapılarak ısı kaybı hesaplanır. Bacanın iki noktası arasındaki uzunluk(L) 10.2 m, yüzey alanı veya yanal alan 19.4 m ^{2} ve ortalama ısı akısı 19.783 kw/m $^{2\ dir}$, bu değer termoelektrik modüle giriş olan değerdir.



Şekil 31. *Genel tasarıma genel bakış*

Şekil 31'den, modüllerin bacaya monte edildiği, tasarıma göre 26 modülün baca çevresine uyduğu sisteme genel bakış. Baca ile modül arasında eşanjör ihtiyacı vardır; Isı eşanjörü, sıcak tarafta, yüksek sıcaklıklara bozulmadan dayanabilecek şekilde çelik veya alüminyumdan yapılmıştır ve bu tezde malzeme optimizasyonunda yoğunlaşma ısı eşanjörü üzerindedir. Alüminyum, yüksek sıcaklıklarda bir miktar kozmetik bozulmaya sahip olacaktır. Isı eşanjörünün işlevi, geleneksel bir modülün üzerine monte edilebileceği düz bir yüzey oluşturmak ve ayrıca baca ile modül arasında bir katman görevi görerek aşırı ısınmayı önlemektir . Bu eşanjör, yüksek sıcaklığa dayanabilmeli ve ısı akışına izin verecek yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmalıdır , bu çalışmada önerilen

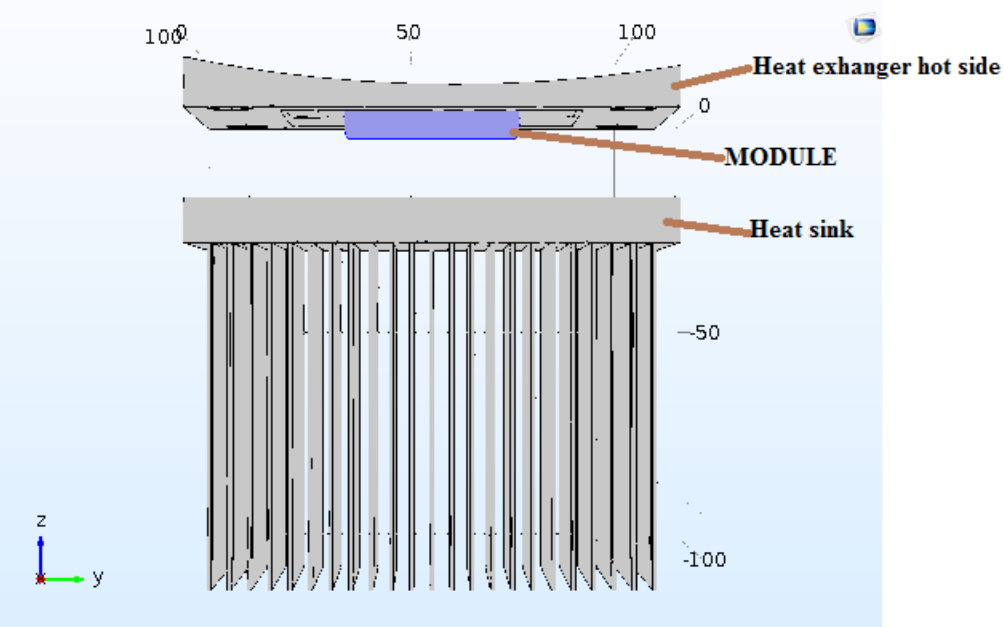
baca üzerine montaj yöntemi, ısı eşanjörünün baca üzerine kaynaklanmasıdır; Daha sonra ısı eşanjörüne cıvata ve somunlarla monte edilen termoelektrik jeneratör daha fazla bilgi veya detay [56]'dadır. Tablo 2, tüm sistemin boyutunu açıkça göstermektedir.

Tablo 2. *Sistemin model bileşenlerine ait veriler* .

PARÇALAR	BOYUT(mm)				
	Uzunluk	Genişlik	yükseklik	çap	kalınlık
Baca			15021	600	
ısı eşanjörü (Sıcak taraf)	26.5	26	0,2	300 (Yarıçap)	3
TEG Modülü	26	26.5			

Yukarıdaki Tablo 2'deki veriler kullanılarak, tam termoelektrik jeneratör için farklı parçaların tasarımı yapılmıştır; bir tarafında silindirik şekle sahip olması gereken şekil 32 sıcak taraf ısı eşanjörü veya sıcak lavabonun tepesinden başlayarak; Böylece baca üzerinde çiftleşebilmek için, soğutucuya yerleştirilmiş termoelektrik modül, son olarak soğuk taraf sistemi soğuk taraf sıcaklığını sabit bir değerde tutacak şekilde, bu çalışma için $10\ ^{0}$C alınmıştır. Kanatlı dağıtıcı ısı eşanjörü, basınç uygulamak için cıvata ve somun ile doğal konveksiyon soğutma ve alkışlama sistemini kullanmak için seçilmiştir . Termoelektrik modül jeneratörler, çıkış gerilimini artırmak için elektriksel

olarak seri olarak baca üzerine monte edilecektir.Modelleme ve simülasyonda tek modül düşünülmüş ve tüm malzemeler hassas ısı eşanjörleri optimize edilecektir.

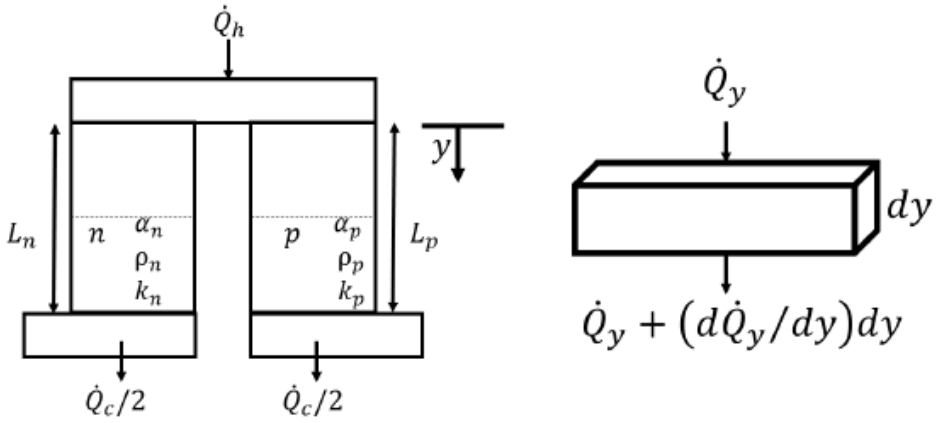


Şekil 32. *Önerilen termoelektrik jeneratör modeli tasarımının şematik görünümü*

BÖLÜM 4. CİHAZLARIN MODELLENMESİ

Bir termal analizi uygun şekilde gerçekleştirmek için, temeldeki karmaşık fenomenin pratik yönleri bilinmeli ve bu nedenle varsayımlar ve basitleştirmeler yapılmalıdır. Bunu göz önünde bulundurarak, kararlı durum varsayılır, radyasyondan kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilir, termokupllar arasındaki boşluğun mükemmel bir şekilde izole edildiği varsayılır, y-yönündeki ısı transferinin olduğu varsayıldığından, termokupllar içindeki eksenel ısı iletimi ihmal edilir. baskındır ve termokupldaki akım akışının da y-yönünde tek boyutlu olduğu varsayılır [20], paralel kaçak kaybı yoktur. Bu varsayımları takiben, şekil 33'te gösterilen sonsuz küçük bir dy elemanı için enerji dengesi denklemi şu şekilde verilebilir:

$$Q - \left(Q_y + \frac{dQ_y}{d_y} d_y\right) + \frac{I^2 \rho}{A} d_y = 0 \qquad (20)$$



Şekil 33. *Bir termokupldaki ısı hızının şeması [20]*

Denklem (20)'deki ilk terim , elemanın yüzeyi boyunca ısı transferini temsil eder. (20)' deki ikinci terim , elektrik akımının bacaktan geçişinden kaynaklanan ısının serbest bırakılmasıyla ilişkili Joule ısıtma etkisini temsil eder. Joule ısısı eleman boyunca dağıtılır, bu nedenle ısının yarısı bir tarafa doğru akar ve diğer yarısı termokuplun karşı tarafına gider. Sınır koşulları $T(y) \mid_{y=0} = T_h$ ve $T(y) \mid_{y=L} = T_C$ bir kez denklem 20'ye uygulandığında verim:

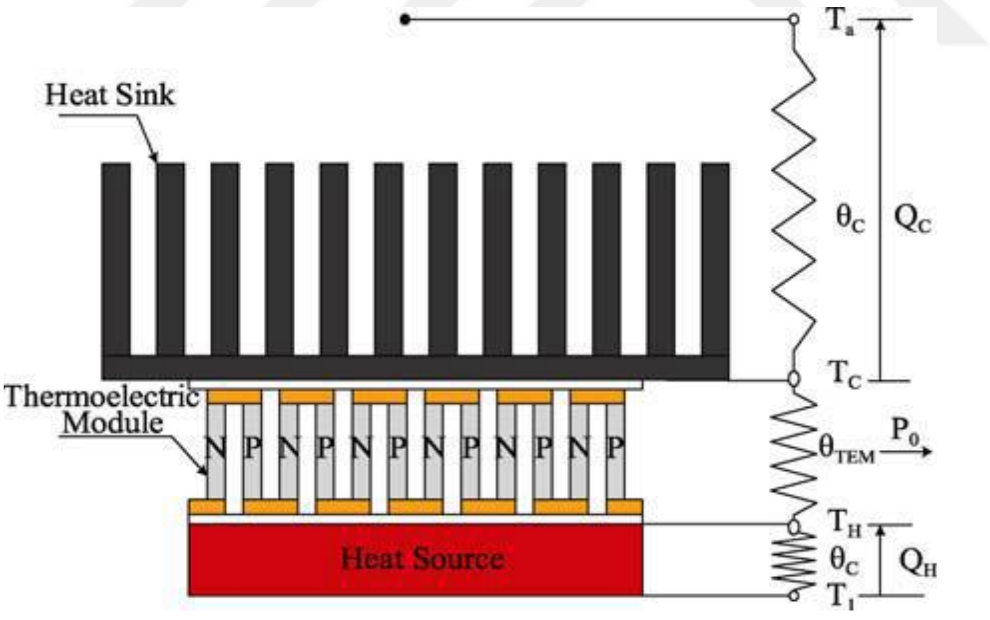
$$T(y) = \frac{I^2 \rho y^2}{2A^2 k} + \left(\frac{T_c - T_h}{L} + \frac{I^2 \rho L}{2A^2 k}\right) y + T_h \qquad (21)$$

Hangi bir termokupl boyunca sıcaklık dağılımını temsil eder. Termokupların sıcak ve soğuk bağlantı noktalarındaki enerji denklikleri sırasıyla şu şekilde verilmiştir.

$$Q_h = (\alpha_p - \alpha_n)T_h I + \left(-k_p A_p \frac{dT}{dy}|_{y=0} - k_n A_n \frac{dT}{dy}|_{y=0}\right) = 0 \quad (22)$$

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n)T_c I + \left(-k_p A_p \frac{dT}{dy}|_{y=L} - k_n A_n \frac{dT}{dy}|_{y=L}\right) = 0 \quad (23)$$

Denklemler (22) ve (23) birinci terim denklem ile verilmektedir ilişkisi kullanılarak Peltier ısı hesapları ise (3) , Seebeck kat bir fonksiyonu olarak yazılabilir. İkinci terim, sırasıyla y = 0 ve y = L sınırlarında Fourier'in termal iletim yasasını temsil eder. Pratik olarak bir termoelektrik jeneratör, ısı kaynağı, termoelektrik modül (TE modülü) ve ısı emici olmak üzere üç parçadan oluşur. Isı kaynağından kısmen emilen ısı, TE modülü vasıtasıyla elektrik gücüne dönüştürülür ve kalan kısım ısı emiciden salınır. Şekil 35, Şekil termal ağ, termal direnç oluşur Θ_H ısı kaynağı ve TE modülü, TEM termal direnci arasında Θ_{TE} ve termal TEM ve soğutucu [57] arasındaki direnç Θ_C.



Şekil 34. *Termoelektrik jeneratörün yapısı ve termal direnç ağı.*

Şekil 34'e göre, ısıl dirençler Θ_h ve Θ_C şu şekilde tanımlanır:

$$\Theta_h = \frac{T_l - T_h}{Q_h} \quad (24)$$

$$\Theta_C = \frac{T_c - T_\alpha}{Q_c} \quad (25)$$

burada T_1 ısı kaynağı sıcaklığıdır, T_H ve T_C sırasıyla TEG sıcak ve soğuk tarafının sıcaklığıdır ve T_a ortam sıcaklığıdır. Q_H, TEG'in ısı kaynağından emdiği ısıdır ve Q_C, TEG'in soğuk tarafından salınan ısıdır. Θ_C, ısı yayılım şiddeti olarak tanımlanabilir. Θ_C ne kadar küçükse, ısı yayılım yoğunluğu o kadar yüksek ve ısı dağılımı o kadar iyi olur. Termal olarak paralel olarak bağlanan bir modülün N çiftinin toplam termal direnci,

$$\Theta_{TEM} = \frac{T_l - T_{Hh}}{Q_h} \quad (26)$$

θ_{TE} ,tek bir termokupl için termal dirençtir. Aşağıdaki türetmede, tüm ısıl transfer kayıpları ve ısıl temas dirençleri yok sayılır. Newton'un ısı transferi yasasını kullanarak, sistem kararlı duruma geldiğinde [58], denklem (22) ve (23) aşağıdaki gibi olur:

$$Q_h = N\left(IT_h\alpha - \frac{1}{2}I^2R_{TE} + K(T_h - T_c)\right) = \frac{T_l - T_h}{\Theta_h} \quad (27)$$

$$Q_c = N\left(IT_c\alpha + \frac{1}{2}I^2R_{TE} + K(T_h - T_c)\right) = \frac{T_c - T_a}{\Theta_c} \quad (28)$$

Burada,

$$R_{TE} = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} + R_c \quad (29)$$

$$K = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \quad (30)$$

P - tipi ve N- tipi termokupların benzer olduğunu varsayarsak, $R_{TE} = \frac{\rho L}{A}$ olur ve genel bir durum için, malzemenin ısıl iletkenliği $K = \frac{kA}{L} = \frac{1}{\Theta}$ ile verilir. Burada, $\rho = \rho_p + \rho_n$: malzemenin özdirenci (Ω m) ve $k = k_p + k_n$, R_c kontak direncidir. Hem (27) hem de (28) Denklemlerinde, köşeli parantez içindeki ilk terimler üretilen Peltier ısısını (güç) temsil ederken, ikinci ve üçüncü terimler sırasıyla Joule ısısı (güç) ve Fourier ısısı (güç) transferini gösterir. Joule teriminin önündeki 1/2 oranı, TEG modülü n-tipi elemanlarla aynı sayıda p-tipi elemana sahip olduğundan, sıcak bağlantı ve soğuk bağlantının her birinin toplam oluşturulan Joule ısısının yarısını "tükettiğini" gösterir. Arasındaki fark olarak Q_h ve Q_c, sistemin çıkış gücü de akım ve dış yük direnci ile ifade edilebilir R_L, 1 göz önüne alınarak st termoelektrik modülü boyunca termodinamik kanunu gibidir:

$$Q_h - Q_C = P_L = N[\alpha I_L (T_H - T_C) - I^2 R_{TE}] \quad (31)$$

Bununla birlikte, Şekil 12'deki güç çıkışı, harici bir yük direnci ile şu şekilde tanımlanabilir:

$$Q = N * I^2 R_L \quad (32)$$

Denklemler (31) ve (32) $P = V_L I$ ile eşitlenirse gerilimi şu şekilde verir:

$$V_L = NIR_L = N[\alpha (T_H - T_C) - IR_{TE}] \quad (33)$$

Açık devrede maksimum voltaj oluşur, burada Denklem **(** 33) 'de I = 0 , Maksimum voltaj

$$V_{OC} = N\alpha (T_H - T_C) \quad (34)$$

Denklem (33)'ten, modül için elektrik akımı şu şekilde elde edilir:

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_{TE} + R_L} \quad (35)$$

Maksimum akım kısa devrede meydana gelir, burada Denklem (35)'de R_L =0, modül için maksimum akım

$$I_{max} = \frac{\alpha \Delta T}{R_{TE}} \tag{36}$$

Yukarıdaki denklemden, akım *I* termokupl sayısından bağımsızdır. Denklem (32) ve (35) birleştirildiğinde:

$$P_L = \frac{N\alpha^2 \Delta T^2}{(R_L + R_{TE})^2} R_L \tag{37}$$

Burada α ($\alpha = \alpha_{Pn}$) arasında Seebeck katsayısı farkı α_p ve a_n ($\alpha = \alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n|$), ΔT arasındaki sıcaklık farkı olan , $T_{,H}$ ve T_C ($\Delta T = T_H - T_C$), R_{TE} Termoelektrik jeneratörün elektrik direncidir, R_L Termoelektrik jeneratörün yük direncidir. Yük direnci R_L, zaman TEG iç direnci R_{TE} eşittir. TEG tarafından verilen maksimum çıkış gücünün üretilmesi eşleşmiş bir yük durumuna [59]:

$$P_{Lmax} = \frac{N\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{TE}} R_L \tag{38}$$

Genel olarak, bir termoelektrik güç jeneratörü , halihazırda mevcut olan termoelektrik malzemelerin nispeten küçük boyutsuz liyakat figürü (ZT < 1) nedeniyle düşük verimlilik sergiler . İletilen gücün oranı olarak tanımlanan bir termik jeneratörün dönüşüm verimi (W_e) sıcak birleşimde ısı girişine (Q_H) termoelektrik modülünün verilir,

tarafından $\eta = \frac{W_e}{Q_h}$ veya termoelektrik jeneratörün termodinamik verimliliği ile elde edilir:

$$\eta = \frac{yük\ için\ sağlanan\ güç}{sıcak\ kavşaktan\ emilen\ ısı} \tag{39}$$

Yüke sağlanan güç, yük direncinin sadece Joule ısıtmasıdır, R_L , $I^2 R_{L'ye}$ eşittir . Sıcak bağlantıda emilen ısı, Peltier terimi artı yukarıda açıklandığı gibi sıcak bağlantıdan çekilen ısıdır. Peltier ısısı $\pi I = a IT_h$ ile verilir. Seri bağlı n-tipi ve p-tipi yarı iletken elemanların direnci R ise, o zaman devrede akan I akımı Ohm Yasası ile şu şekilde verilir:

$$I = \left(\frac{R}{R_{total}}\right) = \frac{\alpha(T_H - T_c)}{R + R_L} \tag{40}$$

Sıcak bağlantıdan çekilen ısı Fourier terimiyle verilir, ancak Seebeck voltajından üretilen akımdan Joule ısınması olacağından, bir miktar ısı da üretilecek ve sıcak bağlantıya geri dönecektir. Joule ısısının yarısının taşınacağını ve yarısının sıcak bağlantıya geri döneceğini varsaymak olağandır ve böylece [60].

Q_h = Fourier - Joule ısıtma + yarım Joule ısıtma geri dönşümü

$$= kA(T_h - T_c) - I^2R + \frac{1}{2}I^2R = kA(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2R \tag{41}$$

Şimdi bu terimleri birleştirerek verimliliği hesaplamaya geçebiliriz ve eğer yüke sağlanan güç sadece Joule ısıtma ile üretilirse

$$\eta = \frac{yük\ için\ sağlanan\ güç}{sıcak\ kavşaktan\ emilen\ ısı} = \frac{yük\ için\ sağlanan\ güç}{peltier + sıcak\ bağlantıdan\ çekilen\ ısı(Q_h)}$$

$$= \frac{I^2R_L}{\alpha IT_h + kA(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2R} \tag{42}$$

Sıcak bağlantıda çekilen akım, gerilim ve ısı değeri girilerek tüm bu değerler Ek C'dedir, Denklem (42) olur.

$$\eta = \frac{(1 - \frac{T_C}{T_H})\frac{R_L}{R}}{\left(1 + \frac{R_L}{R}\right) - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T_C}{T_h}\right) + \frac{\left(1 + \frac{R_L}{R}\right)^2 \frac{T_C}{T_h}}{ZT_c}} \tag{43}$$

Maksimum verimliliği bulmak için, küçük bir cebir işlemi ile bu denklemin çözülmesi gerektir. $\frac{d\eta}{d(\frac{R_L}{R})} = 0$. Sonuç $\frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + ZT}$ ilişkisini verir.

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right)\frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_h}} \tag{44}$$

burada, $T = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$ ve ZT termoelektrik için boyutsuz değer değeri tanımlanır. denklem (8). Termodinamiğin ikinci yasasıyla sınırlanan, tersinir bir ısı motoru olarak çalışan bir termoelektrik güç üretecinin ideal (mutlak maksimum) verimliliği Carnot verimliliğidir [51].

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \tag{45}$$

Tersinmez bir termoelektrik jeneratörün maksimum dönüşüm verimliliği aşağıdakiler kullanılarak tahmin edilebilir:

$$\eta_{max} = \eta_{Carnot} \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_C}{T_h}} \; veya \; \eta_{max} = \eta_{Carnot} * \eta_{r.d} \tag{46}$$

Burada,

$\eta_{r.d}$ - azaltılmış cihaz verimliliği

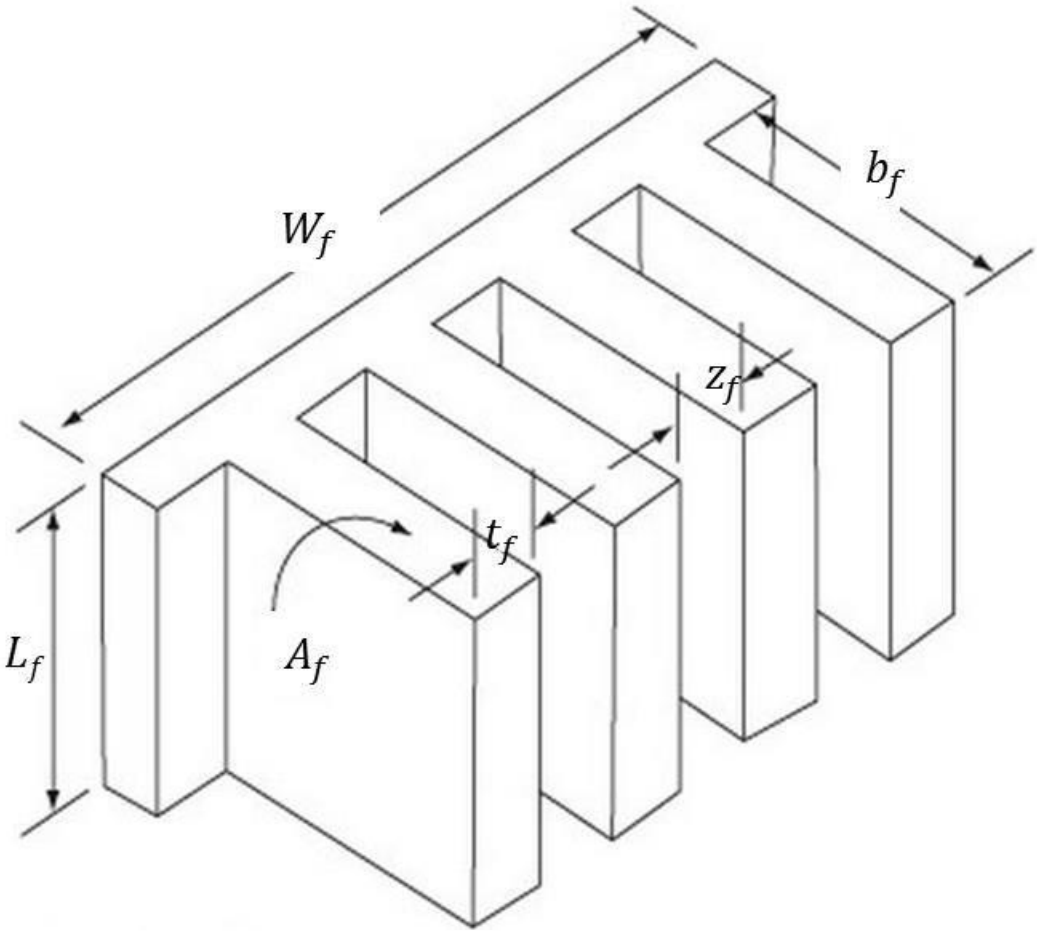
Bu denklemi kullanarak araştırmacılar, ısı yoluyla ne kadar enerji girildiğine ve termoelektrik malzemeden ne kadar enerji çıktığına bağlı olarak termoelektrik cihazların verimliliğini anlayabilirler. Bu denklem, termoelektrik cihazların verimliliğini diğer teknolojilerle karşılaştırmak için kullanılabilir. Örneğin, standart yanmalı motorlar %33 verimliliğe sahipken, mevcut termoelektrik cihazlar %214 civarında verimliliğe sahiptir. Formül *44'ten* , yaklaşık 1'lik bir *ZT* ve 300 K'lik soğuk taraf sıcaklığı ve yaklaşık 600 K'lik sıcak taraf sıcaklığı ile %10'luk bir verimin elde edilebileceği görülebilir. Araştırmacıların malzemelerin *ZT'sini* önemli ölçüde iyileştirmeleri gerektiği açıktır . *ZT* denklemindeki her bir terim Seebeck katsayısından [18] başlayarak ayrıntılı olarak incelenecektir. Bununla birlikte, maksimum güç verimliliği de vardır. Çoğu üretici, ürünleri için bir özellik olarak maksimum güç verimliliğini kullanıyor[61],Maksimum güç denklem(43)'te $\frac{R_L}{R} = 1$ Maksimum güç verimliliği η_{mp} elde edilir.

$$\eta_{mp} = \frac{1-\frac{T_C}{T_h}}{2-\frac{1}{2}\left(1-\frac{T_C}{T_h}\right)+\frac{4\frac{T_C}{T_h}}{ZT_C}} \tag{47}$$

İki termal verimlilik olduğuna dikkat edin: maksimum güç verimliliği η_{mp} ve maksimum dönüşüm verimliliği η_{maks} .

4.1. Isı Değiştirici Etkisi Ve Malzeme Optimizasyonu

Bu bölüm ısı eşanjörü ile ilgilidir ve ısı emicide başlar. Termoelektrik modülü bir soğutucuya bağlamanın temel amacı, kanatlardan gelen ısı transfer hızı miktarını maksimize etmektir. Şekil 35'da gösterildiği gibi belirli boyutlarda, genişlikte (W_f), uzunluk (L_f) ve profil uzunluğunda (b_f) termal direnci en aza indirmek için optimize edilebilecek bazı parametreler vardır. Bu parametreler , ısı alıcının [62] kanat kalınlığı (t_f) ve kanat aralığıdır (z_f).



Şekil 35. *Çoklu dizi ısı emicisi*

Soğutucu olarak hava kullanılır; Küçük kanat aralığı ve düşük hava akış oranları nedeniyle, elektronik modüllere uygulanan tipik plaka kanatlı ısı alıcılardaki hava akışı,

laminer akış olarak kabul edilebilir [63]. Isı transfer katsayısını hesaplamak için Rayleigh sayısı, Ra_L [64].

$$Ra_L = \frac{g\beta(|T_S - T_\infty|) * L_f^3}{\upsilon\alpha} \quad (48)$$

Pr=0.72 olduğunda havanın özel durumu için ;

$$h_L = \frac{k_{air}}{L_f} * 0{,}517 * Ra_L^{0{,}25} \quad (49)$$

g yerçekimi, β eşittir $1/T_f$ burada $T_f = (T_h + T_{amb})/2$, k_{air} havanın ısıl iletkenliği, L_f ısı eşanjörünün derinliği ve Pr Prandtl sayısıdır.

Bu nedenle, belirli bir taban alanı için soğutucudan doğal taşınımla ısı transferini maksimize eden bir optimum boşluk olmalıdır $W_f L_f$, burada W_f ve L_f sırasıyla soğutucu tabanının genişliği ve yüksekliğidir, Şekil 35.When gösterilen e esas izotermal ve yüzgeç kalınlık t_f isimli kanat aralığı Z göre küçük $_f$ [65], uygun kanat boşluğu (Z_{tercih} Bar-Cohen tarafından belirlenen bir dikey Isı soğurma kısmı için) ve Rohsenow olmak

$$Z_{opt} = L_f * 2.714 * Ra_L^{-0.25} \quad (50)$$

Kanat sayısı şu şekilde hesaplanır:

$$n_f = \frac{W_f}{Z_{opt+t_f}} \quad (51)$$

Denklem (51) kanat kalınlığı t_f, boşlukla karşılaştırıldığında t_f çok küçük olduğunda ihmal edilebilir. Yüzgeçler arasında Z_f, Bu nedenle, Mereu ve diğerleri tarafından önerilen laminer tabanlı analitik yöntem, ısı emici sistemini analiz etmek ve optimize etmek için kullanılır. Dar kanalların limiti için, hava akışı, tam gelişmiş bir akış olarak kabul edilir. Böylece toplam ısı transfer oranı bu şekilde kullanılarak elde edilir [66]:

$$Q_s = \frac{\rho W_f b_f Z_f^2 \Delta P}{1+t_f/z 12\mu L_f} C_p (T_w - T_\infty) \quad (52)$$

Burada;

ρ -akışkan yoğunluğu, μ -akışkan viskozitesi,

C_p - sabit basınçta özgül ısı,

Δp- soğutucu boyunca basınç düşüşü,

T_W kanatların edilmiş maksimum yüzey sıcaklığı ve

T_∞ FLUID giriş sıcaklığı (hava).

Basitlik için kanat yüzeylerinin izotermal (yani T_W) olduğu varsayılmalıdır . Büyük kanalların limiti için, kanatçıklar arası boşluk, hava akışının bir sınır tabaka akışı olarak yaklaşık olarak alınması için yeterince büyüktür. Sonuç olarak, toplam ısı transfer oranı [66] olarak ifade edilir:

$$Q_1 = 1{,}208 k_f W_f b_f \frac{T_s - T_\infty}{1+t_f/z_f} \left(\frac{Pr L_f \Delta P}{\rho v^2 Z_f^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (53)$$

Burada,

k_f –akışkan termal iletkenliği,

v - akışkan kinematik viskozitesi

Pr - Prandtl sayısı.

Belirli bir soğutucu hacmi $W_f \times b_f \times L_f$ için, maksimum ısı transfer hızına karşılık gelen optimal bir kanat-kanat aralığı Z_{opt} vardır. Z_{opt} ' nin değeri, denklem (52) ve denklem (53)'teki iki asimptotun kesişmesiyle elde edilebilir, bu da şunları verir:

$$\frac{Z_{opt}}{L_f} = 2.73 \left(\frac{\Delta P L_f^2}{\mu \alpha}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (54)$$

Bu nedenle, maksimum ısı transferi Q_{max} tekabül eden Z_{opt} denklem (52) ya da denklem (53) içine denklem (54) değiştirilmesi ile elde edilebilir. Ayrıca, soğutucunun

TEG'nin performansı üzerindeki etkisini dahil etmek için bu çalışmada etkin bir ısı transfer katsayısı kullanılmıştır [66]. Efektif ısı transfer katsayısı şu şekilde tanımlanır:

$$h_{eff} = \frac{Q_{max}}{A_B(T_w - T_\infty)} \tag{55}$$

burada A_B, ısı emicinin taban alanıdır. Soğutucu tabanının termal direnci önemsiz ise, soğutucu geometrisinin veya akışkan çalışma koşullarının etkisi, TEG simülasyonunda bir sınır koşulu olarak uygulanabilen etkin ısı transfer katsayısı ile karakterize edilebilir, tablo 3 Bu çalışmada kullanılan farklı parametreleri gösterir.

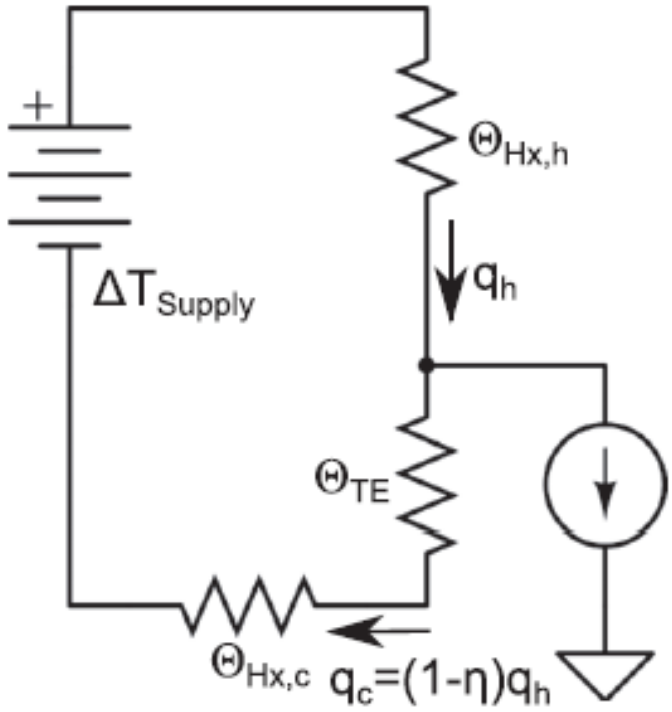
Tablo 3. *Soğutucu sisteminin özellikleri [66]* .

Soğutucu sisteminin özellikleri	Mülk
Alüminyum (kanat için)	$k_f = 237$ W / m ° K
Hava (soğutma sıvısı için)	$k_g = 26{,}3 \times 10^{-3}$ W/m K
	ρ = 1.1614 kg/m3
	$\mu = 184{,}6 \times 10^{-7}$ N s/m ^{2}
	$\alpha = 22{,}5 \times 10^{-6}$ m ^{2}/s
	$C_{ı\text{-}\,p} = 1007$ J / kg K
	$\nu = 15{,}89 \times 10^{-6}$ m ^{2}/s

Bir TEG sisteminin tasarımı normalde ısı eşanjörü seçimiyle başlar. Bunun nedeni, ısı eşanjörlerinin sistemdeki fiziksel olarak en büyük bileşenler olması muhtemeldir; termoelektrik modül, karşılaştırıldığında tipik olarak küçüktür. Pratik termoelektrik jeneratörler, sıcak ve soğuk taraf ısı eşanjörlerinden ve bir termoelektrik modülden oluşur. Bu modül, toplam voltajı [67] artırmak için seri olarak bağlanmış birçok ayrı p ve n bağlantısından oluşur . Genel tasarım şekil 35'te gösterilmektedir. Bir TEG ve karşılık gelen ısı eşanjörleri tasarlanırken, maksimum güç üretimi elde etmek için bu bileşenlerin boyutlandırılması dikkatle düşünülmelidir. Sistem, Şekilde gösterildiği gibi bir termal devre olarak modellenebilir.

37. Sıcak tarafta, ısı (Q_h) termal dirençli bir ısı eşanjöründen $\Theta_{Hx,h}$ ve TE modülüne akar. Öyleki ısı, Peltier ve Thomson etkileri nedeniyle, $Q_h \neq Q_c$ *olacak* şekilde kararlı durumda bile TE içindeki ısı sapması nedeniyle önemli olabilir . Bunu modellemek için, ısıl direnç Θ_{TE} ve bir ısı emicinin bir kombinasyonunu kullanırız.

TE (Q_c), TE'ye (Q_h) giren ısıdan daha azdır . Soğuk tarafta, TE'den çıkan ısı daha sonra termal dirençli $\Theta_{Hx,c}$ olan bir ısı eşanjörü tarafından dağıtılır .



Şekil 36. *Sıcak ve soğuk yan ısı eşanjörlerinden ve bir termoelektrik modülden oluşan bir termoelektrik enerji toplayıcı için eşdeğer termal devre [67]*

İki ısı eşanjörü boyunca sıcaklık düşüşleri, ısı akışı ve ısıl direncin ürünü olarak yazılabilir.

$$\Delta T\,Hx\,,\,h = Q\,h\,\Theta\,Hx\,,\,h\;\;,\,\Delta T\,Hx\,,\,c = (\,1-\eta/\,)\,Qh\,\Theta\,Hx\,,\,c \tag{56}$$

Bunlar, iki ısı eşanjörü boyunca toplam sıcaklık düşüşünü vermek için toplanabilir ($\Delta\,T_{\,Hx}$). Kombine termal direnç $\Theta_{\,Hx}$, bireysel ısı eşanjörünün termal dirençlerinin ağırlıklı toplamı kullanılarak hesaplanır

$$\Delta T_{\,Hx} = Q_h\,(\,\Theta_{\,Hx,} + (\,1-\eta\,)\,\Theta_{\,Hx\,,\,C}\,) = Q_h\,\Theta_{\,Hx} \tag{57}$$

Daha sonra, TE boyunca sıcaklık düşüşü, TE'ye giren ısı ile ilgilidir.

$$\Delta T_{\,TE} = Q_h\,\Theta_{TE} \tag{58}$$

$\Delta\,T_{Hx}$ ve $\Delta T_{\,TE}$ ‘nin üretilen güç üzerindeki etkilerini incelemek için önce gücün $P = \eta\,Q_h$ ile verildiğini hatırlatalım. Bu değerler, ısı eşanjörlerinin ve TE'nin

termal dirençleri ile belirlenir; iki termal direnç (Θ_{Hx} ve Θ_{TE}) eşittir. Şekil 36'deki termal devreyi kullanarak, sıcaklık farkı

TE şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta T_{TE} = \Delta T_{tedarik} \frac{\Theta_{TE}}{\Theta_{Hx}+\Theta_{TE}} \quad (59)$$

Toplam $\Delta T_{\text{tedarik}}$ şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta T_{\text{tedarik}} = Qh(\Theta Hx + \Theta TE) \quad (60)$$

Denklem (46), (59) ve (60)'ı Denklem (42)'de yerine koymak, üretilen güç için bir ifade verir.

$$P = \frac{\Delta T_{tedarik}^2 \eta_{r,d}}{T_h} \frac{\Theta_{TE}}{(\Theta_{Hx}+\Theta_{TE})^2} \quad (53)$$

Θ_{Hx} ve Θ_{TE} 'nin bireysel değerlerini dikkate almak yerine $\omega = \frac{\Theta_{TE}}{\Theta_{Hx}}$ oranı tanımlarız.

Gücü, Şekil 37'de x'in bir fonksiyonu olarak çizerken , ω = 1 olduğunda güç maksimize edilir. Öyle ki P_{max} denklem (54) olur. Maksimum güç noktası, iki termal dirençe eşittir. Önemli güç kayıpları oluştuğunda $\frac{\Theta_{TE}}{\Theta_{Hx}} \neq 1$

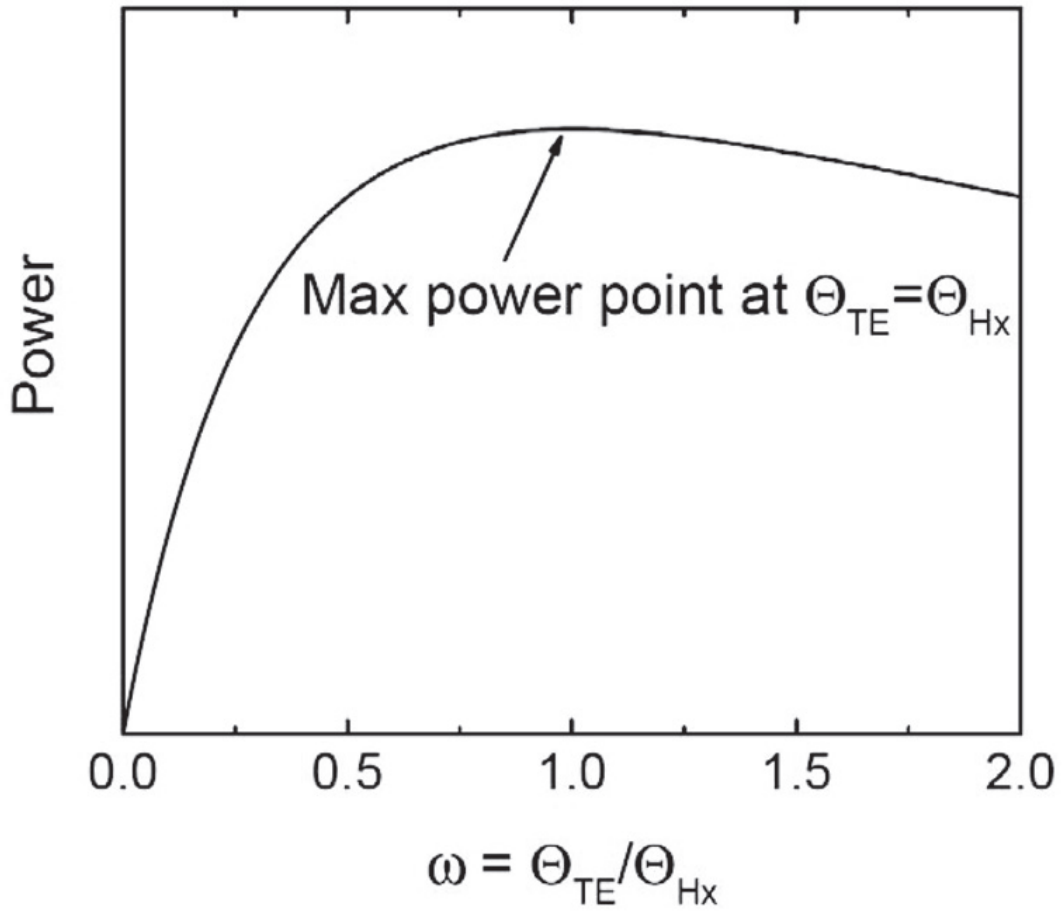
$$P_{max} = \frac{\Delta T_{tedarik}^2 \eta_{r,d}}{T_h \Theta_{Hx}} \quad (54)$$

Burada,

Hx - Isı eşanjörü için dayanım

$\eta_{r,d}$ -düşük cihaz verimliliği (denklem 46)

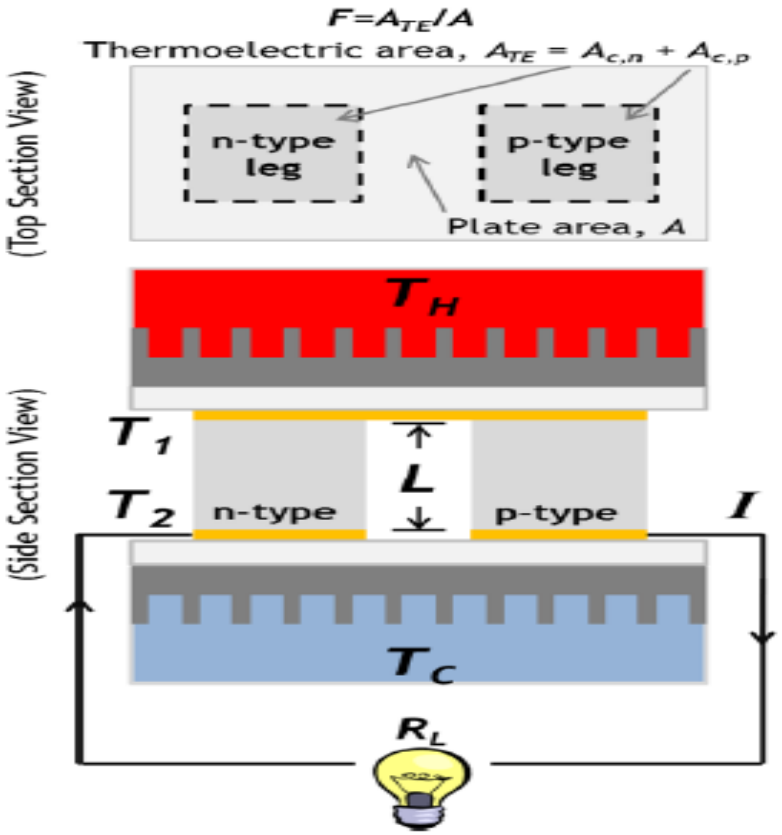
Denklem (54)'ün payda değerini en aza indirmek için, termo direncin mümkün olduğunca düşük olması gerektiği açıktır, bu, denklem (30)'dan yüksek termo iletkenliğe sahip olduğu anlamına gelir, termodirenç, ısı eşanjörünün kalınlığı azaltılarak azaltılabilir veya uzunluk (L) optimum değerde. sonraki bölüm, bu kalınlığı azaltmanın önemini açıkça göstermektedir.



Şekil 37. *Te ve ısı eşanjörünün termal dirençlerinin oranının bir fonksiyonu olarak güçteki değişim [67] .*

4.1.1. Üretim Maliyetlerinin Hesaplanması

Maliyet açısından malzeme değerlendirmesi, modelleme önemlidir ve güç çıkışını etkilemeden mümkün olduğunca minimum maliyetin kullanılmasına yardımcı olur. Bu bölüm, malzeme ve performans dikkate alınarak bir termoelektrik jeneratörün nasıl modelleneceğini açıklar. Aşırı ısının olduğu durumlarda (yani yakıt/ısı serbest), maksimum güç koşulu m=1 en uygunudur ve en düşük maliyeti verir. Isının maliyetli olduğu durumlarda maksimum verim koşulu daha uygun olabilir [68].



Şekil 38. *Doldurma faktörünü açıklayan termoelektrik modül şeması [68]*

Bir termoelektrik cihazın doldurma faktörü F ve bacak uzunluğu L, baskın tasarım parametreleridir. Doldurma faktörü, Şekil 38'da gösterildiği gibi, aktif termo-elektrik malzemenin kapladığı alanın plaka alanına oranıdır, A. Geleneksel termoelektrik modül mimarisine aykırı olsa da, F>1 olan cihazları tasavvur etmek mümkündür. Doldurma faktörünün tersi, termal konsantrasyon faktörü olarak bilinir. Doldurma faktörünü azaltarak daha az aktif malzeme kullanılır ve cihazın toplam maliyeti düşürülebilir. Birçok uygulamada, doldurma faktörü, diğer sistem kısıtlamaları (örneğin, mekanik sağlamlık, voltaj/alan gereksinimleri) tarafından bazı minimumların üzerinde olacak şekilde sabitlenir. Bu sabit dolgu faktöründe ayak uzunluğu azaltılarak daha az malzeme kullanılır ve maliyet düşer. Bununla birlikte, sabit bir ısı eşanjörü ve sabit F için, termoelektrik bacak uzunluğu belirli bir optimumun altına düşürüldüğünde, cihaz boyunca sıcaklık düşüşü azalır ve çıkış gücü düşer. Güç çıkışı ve malzeme hacmi arasındaki bu rekabet, maliyeti en aza indiren ve güç çıkışını en üst düzeye çıkaran

optimum bir geometrinin varlığını önerir [68]. Bu nedenle, termoelektrik jeneratörler için en uygun metrik (G), $/W bazında şu şekilde ifade edilmelidir:

$$G = \frac{C}{P_{gen}} \tag{55}$$

Burada,

P_{gen} - Jeneratörün elektrik gücü çıkışı
C - Cihazın sermaye maliyeti.

Sermaye maliyeti malzeme, imalat ve ısı eşanjörü maliyetlerini içerir. Dönüştürme için mevcut ısının maliyeti hariçtir, Hem C hem de P_{geni} büyük ölçüde L ve F'ye bağlıdır. Maliyet-performans optimizasyonu ayrı ayrı C veya $P_{geninden}$ ziyade G üzerinde gerçekleştirilmelidir [68].

Cihaz fiziğine ek olarak, hem malzeme hem de üretim maliyetleri genel maliyet ölçütünü etkiler. Denklem (55)'deki C maliyeti, dökme hammadde maliyetinin CB ($/kg) bir fonksiyonudur. Dökme malzemenin işlenmesiyle ilişkili üretim maliyeti $C_{M,B}$ ($/kg), alan imalat maliyeti $C_{M,A}$ ($/m^2) ve her iki ısı eşanjörünün maliyeti C_{HX} ($/(W/K)). Toplam maliyet C ayrıca ısı eşanjörünün ısı transfer katsayısına U, aktif malzemenin yoğunluğuna ρ, bacak uzunluğuna ve seramik plakaların alanına (A) bağlıdır:

$$C = \left((C_{B+}C_{M,A})\rho L + C_{M,A}\right)AF + C_{HX}UA \tag{56}$$

Burada,

$C''' \rightarrow C_{B+}C_{M,A}$, $C'' \rightarrow C_{M,A}$

İlk ifadedeki terimlerin toplamı hacimsel maliyet C‴($/m^3) ve ikinci terim alan maliyeti C″($/m^2) olup, her ikisi de üretim maliyetlerini içerir.

Yukarıda da belirtildiği gibi optimum malzemeler kullanılarak maliyet minimize edilmektedir. [68]'e atıfta bulunulan bu çalışmada, alınan yüksek manganlı silisidin dökme malzemenin (Cm) saf maliyeti 127.51 $/kg, üretim maliyeti (CMm) 1.10 $/kg, üretim alanı (CMA) 168.23 $/kg'dır. m^2, alüminyumdan yapılan her iki ısı eşanjörünün (Chx) maliyeti 2.60; $ / kg ve aktif malzemenin yoğunluğu (ρ) için eşit 4166kg / m^3 Tablo 4'ten en iyi değerleri göz önüne alınarak, MATLAB .With kullanım birim güçte

metrik değeri veya maliyet hesaplanır 0,05 $ / W; bu değer, yapılan diğer araştırmalara göre belirlenen aralıktadır ve uygun maliyetlidir.

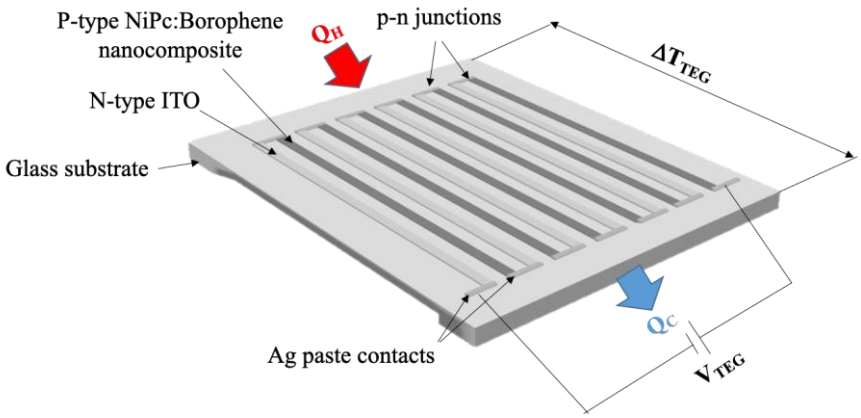
Diğer önemli nokta ise optimum dolum faktörüne sahip olmaktır, hesaplananın 1'den küçük olması, malzemenin optimize edildiğini ve (54) denkleminden optimum gücün optimum maliyete karşılık geldiğini gösterir.Bu çalışmada TE'nin optimum gücü bulunmuştur.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ÖLÇÜMLER

5.1. Deneysel Çalışma

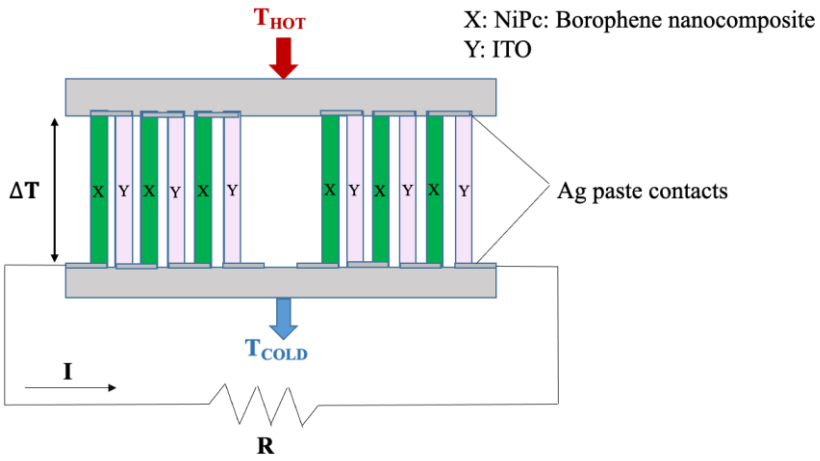
Kullanılan tüm kimyasallar saf analitik saflıktaydı ve daha fazla saflaştırılmadan kullanıldı. Bor öncü mikropartikülleri (>99.95 saflık) Nanografi'den satın alındı. ITO kaplı camlar ve PPy , Sigma Aldrich'ten satın alındı . Borofen, [69] yayında açıklanan sonikasyon yöntemi kullanılarak hazırlandı. 5 mg borofen ve 5 mg PPy, nitrojen kontrollü ortamda 15 dakika boyunca 200W uygulanarak 10 ml deiyonize su içinde sonike edildi.Hazırlanan Borophene ve PPy'nin morfolojileri: borofen nanokompozit , Cu-Kα radyasyonu (λ = 1.5406 Å), Tarama Elektronlu Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu (HRTEM) (JEOL JEM-ARM200CFEG UHR-TEM), X-Işını Kırınımı (XRD) (PAN analitik Xpert-Pro) ile karakterize edildi. Tramalı Elektron Mikroskopu (SEM, FEI FEG QUANTA 450) ve FTIR (Perkin Elmer, Spectrum Two, 4000 ile 500 cm^{-1} arasında frekans , 4 cm^{-1} ve 8 tarama çözünürlüğü) teknikleri. PPy çözümü ve PPy: Borofen nanokompozit çözeltileri , SEM analizi için Quick Coater SC-701 püskürtme sistemi (Sany Electron) kullanılarak ince bir altın tabaka ile kaplandı.

ITO kaplı cam substrat, bir kimyasal izolasyon bandı kullanılarak desenli bir şekilde kaplandı. ITO kaplı camın üzerine 6 eşit aralıklı (1 mm eninde ve 4 cm uzunluğunda) bant kesilerek yapıştırılmıştır. Daha sonra desenli bantla kaplanmış ITO kaplı cam yatay olarak 20:4 HC1: deiyonize suya batırıldı ve deiyonize su kullanılarak yıkandı ve 10 saat sonra nitrojen kullanılarak kurutuldu. Bantlar soyulduktan sonra cam üzerinde 6 adet İTO şeridi elde edilmiştir. Daha sonra, PPy ve hazırlanan PPy nanokompozit çözeltileri, desenli ITO kaplı cam üzerine damlatılarak döküldü, oda sıcaklığında 30 dakika kurutuldu. Daha sonra PPy ve hazırlanan PPy nanokompozit kaplamalar ince pamuklu çubuklar kullanılarak desenlendi ve cam üzerine 6 şerit PPy ve hazırlanan PPy nanokompozit elde edildi. Hazırlanan TEG'nin (6-çift np malzemesi) cam substrat üzerinde şematik gösterimi Şekil 40'ta verilmiştir . 6 çift ITO, PPy ve hazırlanan PPy nanokompozit şeritlerin seri bağlantısını sağlayan İTO, PPy ve hazırlanan PPy nanokompozitin üst ve alt kenarlarına gümüş macun uygulanmıştır . Voltaj ölçümü için TEG'nin her iki tarafındaki uç şeritlerde gümüş bir macun kullanıldı.

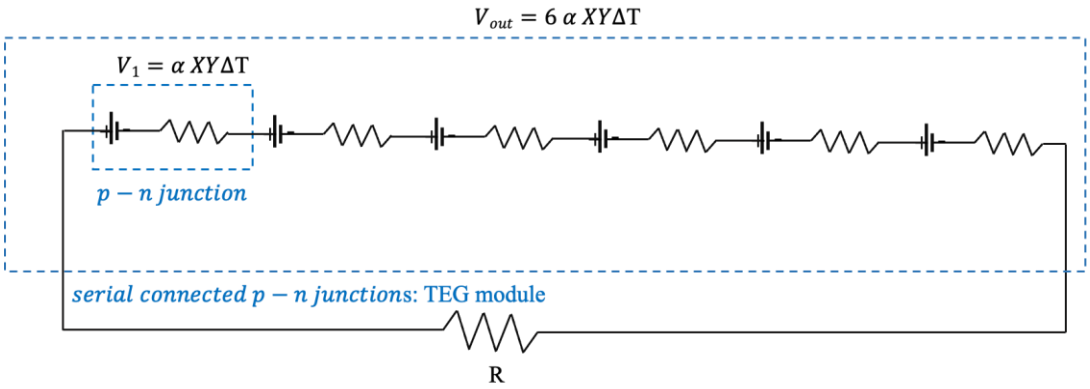


Şekil 39. *Hazırlanan teg'nin şematik gösterimi.*

Termoelektrik ölçümler Hazırlanan TEG'lerin çoğu, sıcaklık kontrollü iki blok (bir peltier ve aynı boyutta bir blok) arasındaki hava boşluğuna TEG asılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcak tarafın (peltier tarafı) sıcaklığı, 293-338 K aralığında bir ısıtıcı ile değiştirildi. TEG'nin sıcak ve soğuk taraflarının ara yüzeyindeki sıcaklıklar, termal olarak iletken bir macunla bağlanan Pt100 termokupları ile doğrudan ölçüldü. TEG'nin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki termovoltaj, bir GW Instek GDM83-51 ile gümüş macun uçlarında ölçülmüştür. Termoelektrik ölçüm düzeninin şematik gösterimi Şekil 40'ta verilmiştir .



(a)



(b)

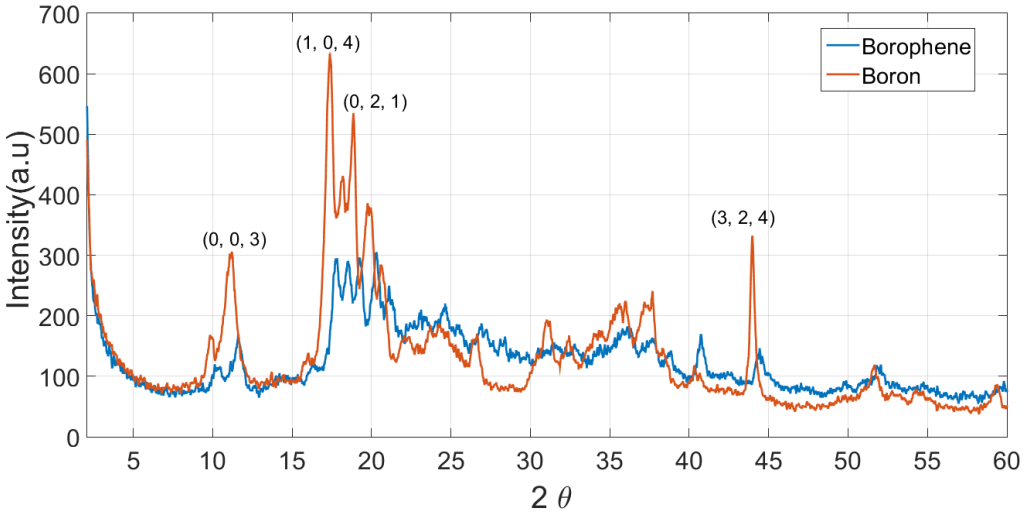
Şekil 40. *(a) teg'in elektrik devresi ve (b) teg ölçüm düzeninin şematik gösterimi.*

5.2. Hazırlanan Borophene ve PPy'nin yapısal ve kimyasal analizi : borofen nanokompozit

Bu çalışmada, Borophene ve PPy: Borophene nanokompozitinin yüzey ve kimyasal özelliklerini araştırdık. Boron öncülü ve Borofen nano tabakalarının XRD grafiği Şekil 41'de verilmiştir . Borofenin kristalit boyutları Scherrer denklemi kullanılarak hesaplandı,

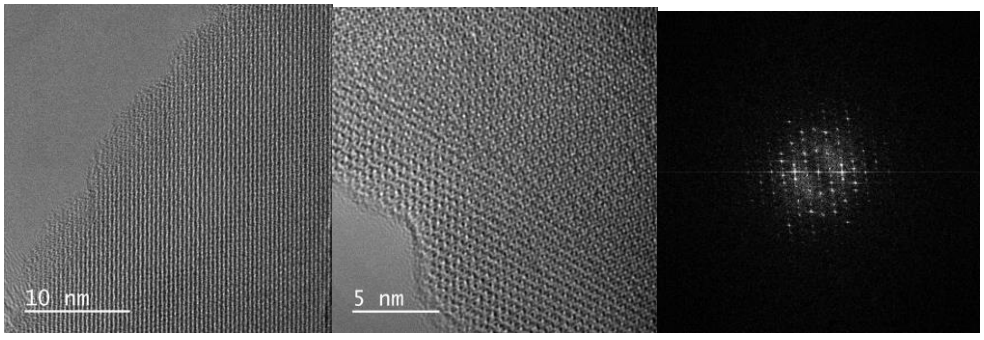
$D = k\lambda/\beta\cos\theta$

Burada, D: kristalitlerin ortalama boyutu, θ: kırınım açısı, β: XRD zirvesinin yarı maksimumundaki tam genişlik, λ: CuKα radyasyonunun dalga boyu (0.15418 nm) ve K: 0.89. Analiz, PDF31-0207 kartına göre β-eşkenar dörtgen boron (003), (104), (021) ve (324) düzlemlerine karşılık gelen borofenin karakteristik piklerini tasvir etmiştir (birim hücre parametreleri: a=10.925 Â, b=10.925Â ve c=23.814Â). XRD desenleri, R-3m (No. 166) uzay grubu [70] ile merkez simetrik β-eşkenar dörtgen borofen kristal yapısına endekslendi . Borofen nanolevhasının kristalit boyutlarının 16.97 nm olduğu bulundu.



Şekil 41. *Boron öncülü ve borofen nano tabakalarının xrd grafiği.*

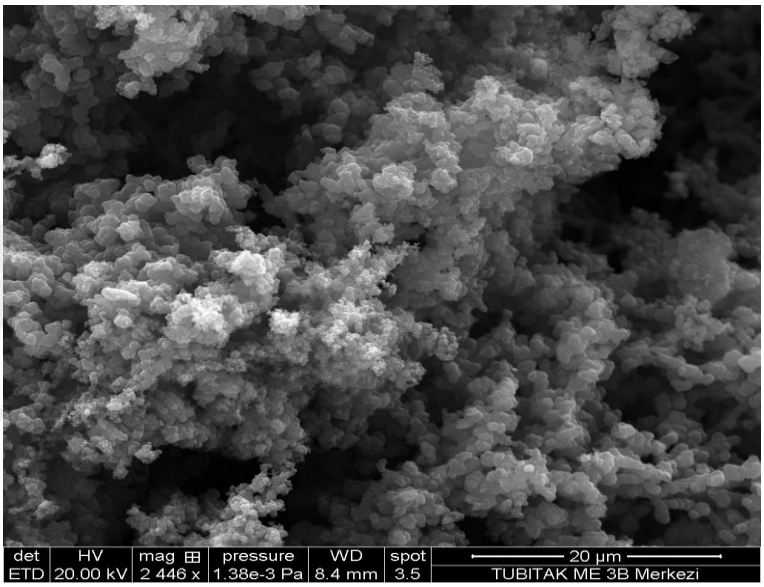
Borophene nano tabakalarının HRTEM görüntüleri Şekil 42'de verilmiştir. HRTEM görüntüleri, Borofenin yüzeyinde iki boyutlu (2D) bir tabaka yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Borofen nano tabakaları paralel atomik çıkıntıları gösterir (Şekil 42a). Borofen nano tabakaları ayrıca 0.41 nm kafes aralığı ile kristal yapıya sahiptir (Şekil 42b). Tek bir borofen nano tabakası, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kırınım modeli ile incelendi (Şekil 42c). Ayrıca, XRD sonucu, hazırlanan Borophene'nin HRTEM görüntüsü ile iyi bir uyum içindeydi.



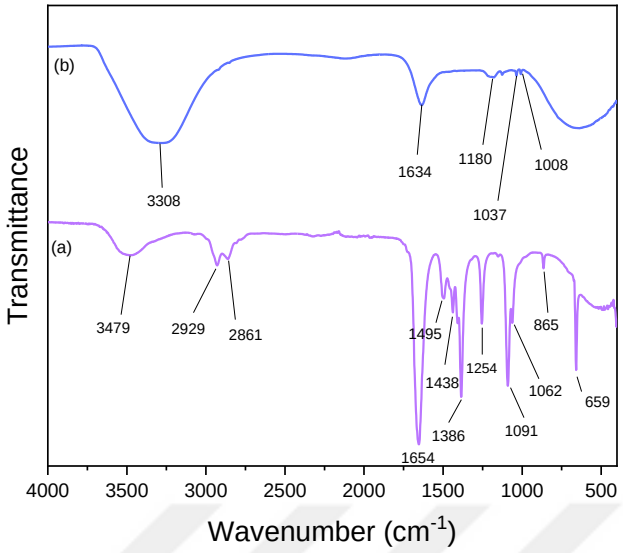
(a) (b) (c)

Şekil 42. ***(a** ve **b)** hrtem görüntüleri, **(c)** hazırlanan borophene nanosheetlerinin fft görüntüsü.*

Şekil 43'te SEM görüntüleri verilmiştir. PPy: Borofen nanokompozitinin tanecikli üniform bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 43a). Borophene ve PPy: Borophene nanokompozitinin kimyasal fonksiyonel grupları FTIR tekniği ile analiz edildi (Şekil 43b). FTIR sonuçlarına göre Borofenin karakteristik pikleri 2968 cm^{-1} (BB), 2938 cm^{-1} (BH), 1424 cm^{-1} (BH), 1263 cm^{-1} (BO), 1015 cm^{-1} olarak gözlenmiştir . (B – O – B titreşimleri) ve 541cm^{-1} (sp ^{2} bağlı h-BN) [78, 79]. Hazırlanan PPy: Borofen nanokompozitinin karakteristik pikleri 1020 cm^{-1} (CH düzlem dışı deformasyon titreşimleri (pirol halkası)), 772 cm^{-1} (γ-NH düzlem dışı titreşim) ve 456'da gözlendi. cm^{-1} (B–O–B germe) [51].



(a)

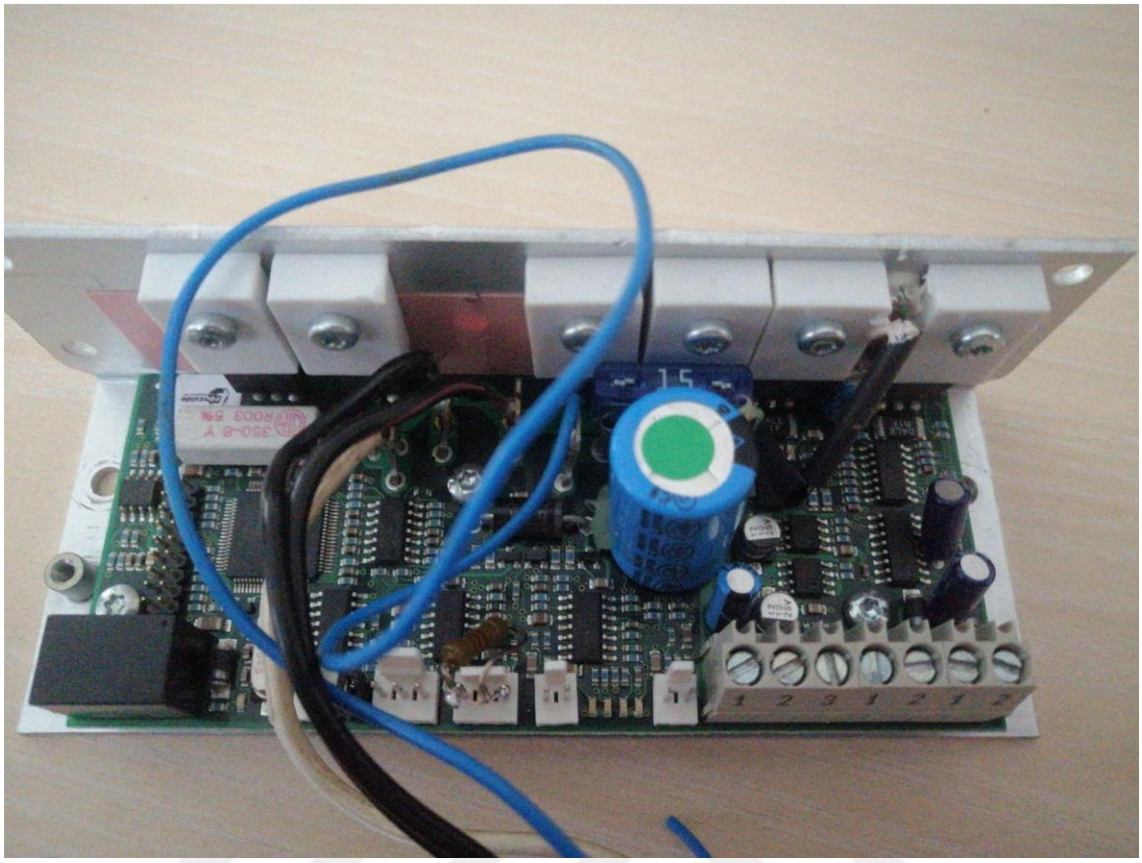


(b)

Şekil 43. *(a) sem mikrografi ve (b) ppy: borofen nanokompozitinin ftır analizi.*

5.3. TC-XX-PR-59 Sıcaklık Kontrol Cihazı

PR-59 sıcaklık kontrol cihazı Şekil 44, hassas sıcaklık kontrol doğruluğu gerektiren termoelektrik tertibatların tersine çevrilebilir (soğutma/ısıtma) kontrolü için tasarlanmıştır. Kontrolör sadece sıcaklığı düzenlemekle kalmaz, aynı zamanda iki programlanabilir fan çıkışına ve bir alarm çıkış rölesine sahiptir. Kontrolör, parametreleri ve ayarları gerçek zamanlı olarak okumak ve kontrol etmek için R2-232 ile bağımsız bir ünite ara yüzü olarak kullanılabilir. Çıkış parametrelerinin programlanması ve görsel olarak gözden geçirilmesi için kullanımı kolay bir PC yazılımına sahiptir[71].



Şekil 44. *Tc-xx-pr-59 sıcaklık kontrol cihazı*

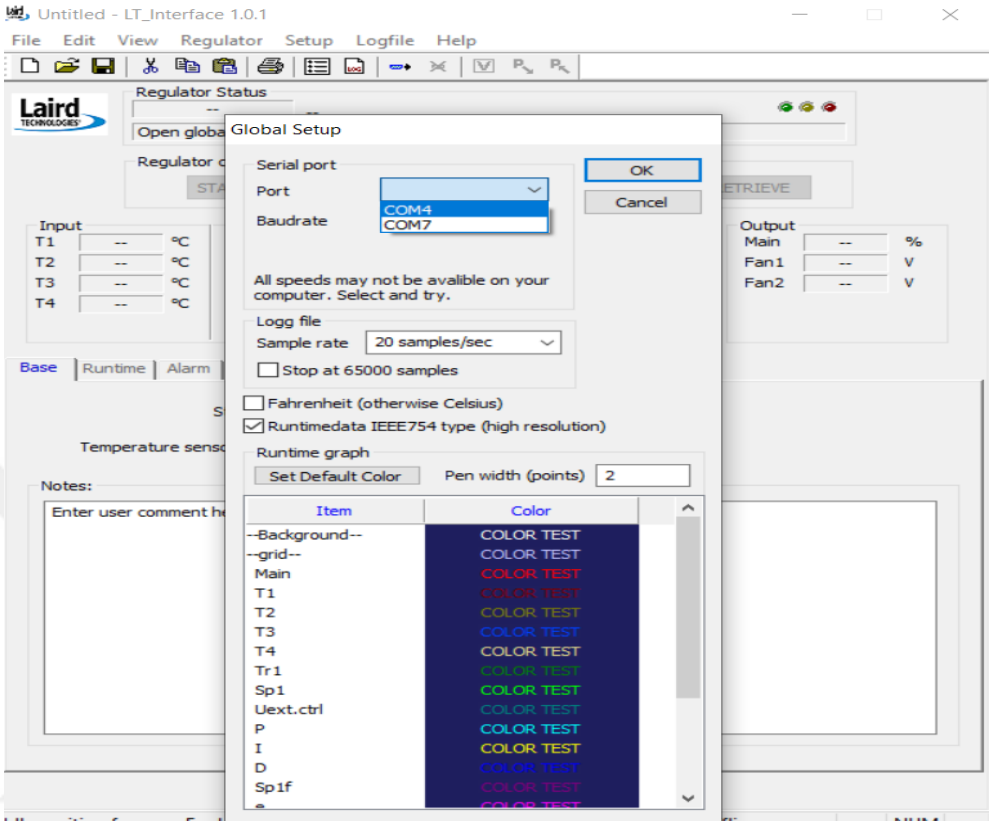
5.3.1. Arayüz

Cihazda, çalışma zamanı verileri için seri ara yüz, Bir adet yüksek çözünürlüklü ana sensör, Alarm için iki sensör girişi Regülatör modu, PID regülatörü, aç/kapa kontrolü , Algo modu, Ana akım ölçme , FAN akımının ölçüme, İki adet fan kontrolü, daha sonra farklı yazılımlarda analiz edilebilir ara yüze sahip olup bu işlem için çalışma zamanı verilerini dosyaya kayıt edilir[71].

5.3.2. Kullanım

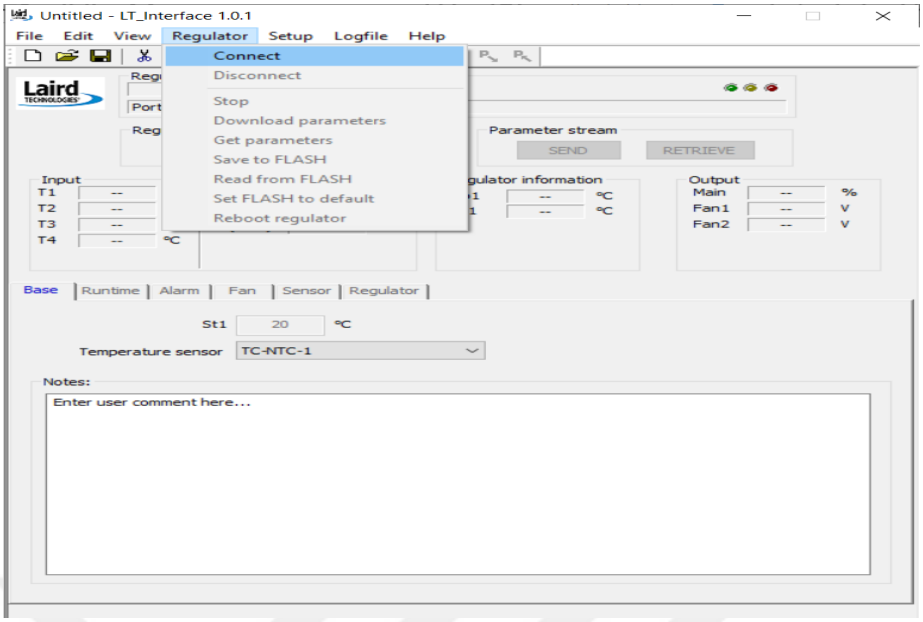
Öncelikle LT_ınterface uygulamasını web sitesinden indirerek PC ye kurulması gerekmektedir. Kontrol ünitesine uygun güç kaynağı bağlantısı yapıldıktan sonra PC iletişimi için bağlantıları yapılır. Kontrol cihazı açılır ve PC'de LT-Ara yüz yazılımı başlatılır. Uygulanan gerilim termoelektrik montajda Vmax değerini geçmemesi önemlidir. Ayrıca akım değeri 15 amperi geçerse, MOSFET'lerin aşırı ısınması durumu ortaya çıkabilir bu durumu önlemek için için harici fan kullanmak gerekir [71]. Yazılımın

kontrolüne başlayabilmek için önce Şekil 45 da gösterildiği gibi “Kurulum>Global kurulum” sekmesinden PR-59'un bağlandığı iletişim portu seçilmelidir.

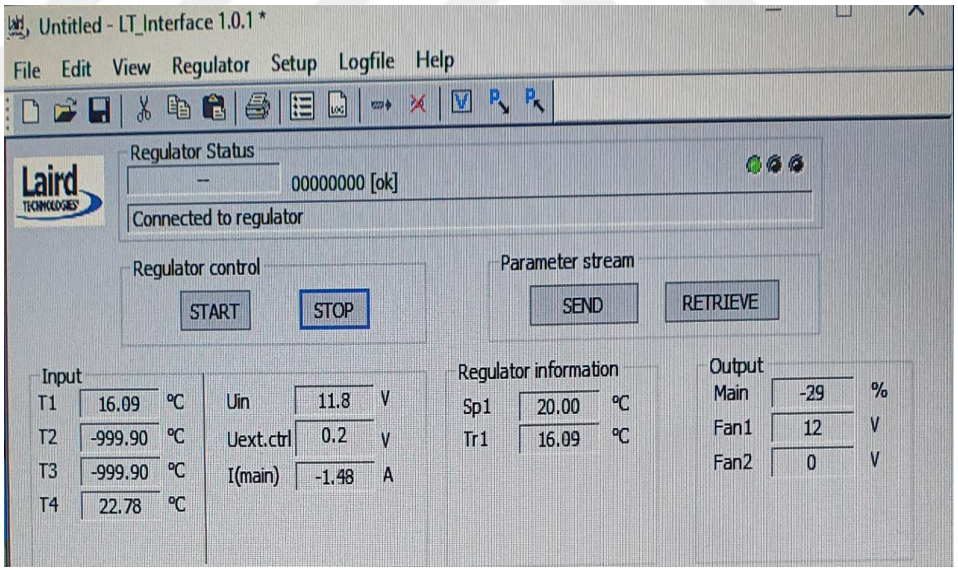


Şekil 45. *İletişim portu seçimi*

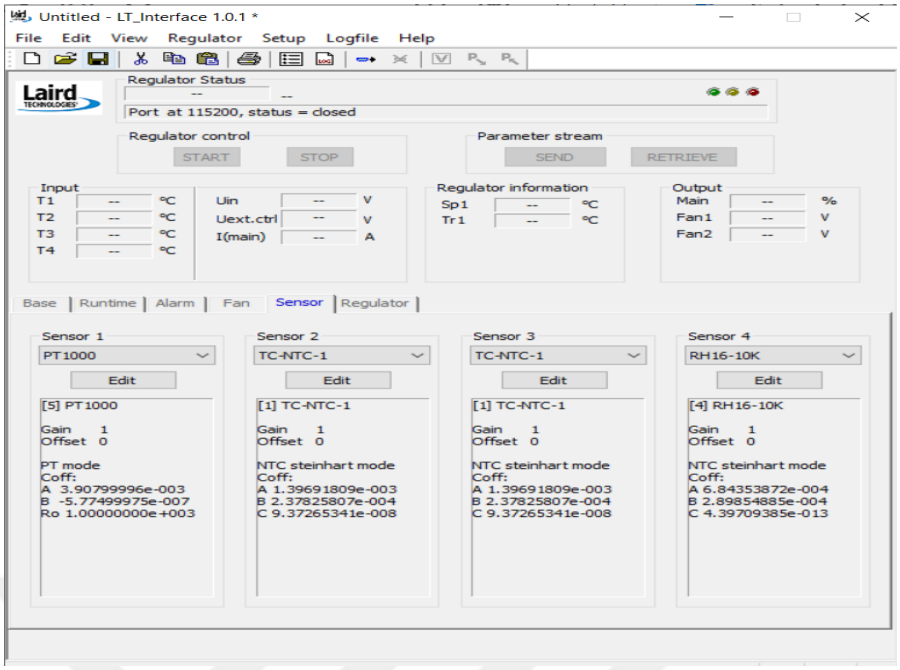
Daha sonra yazılım ve kontrolör arasında iletişimi kurmak için Şekil 46 da görüldüğü gibi “Regülatör > Bağlan” yapılır. Bu aşamadan sonra ekranımızda Şekil 47 de görüldüğü gibi kontrolörden gelen bilgiler görülebilir. Şekil 48 de görüldüğü gibi sensor sekmesinden kullanılacak sıcaklık sensorü seçilir.



Şekil 46. *Yazılım ve kontrol arasındaki iletişim başlatma*

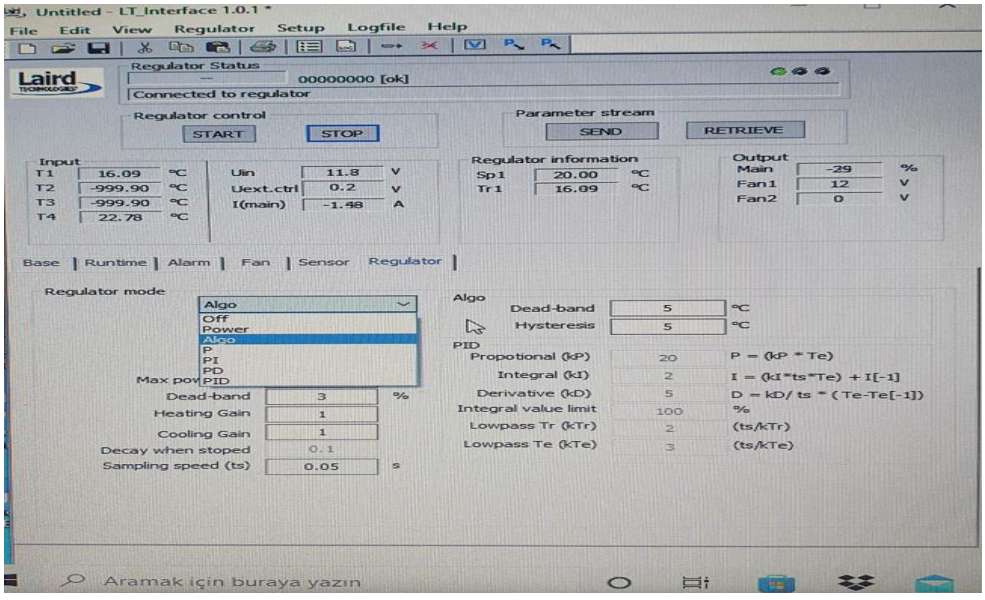


Şekil 47. *Kontrolörden gelen bilgiler ekranı.*



Şekil 48. *Sensör seçim ekranı*

Regülatör, Kapalı, Güç, Algo, P, PI, PD, PID modları ile çıkış güçleri kontrol edilebilir, uygulama özelinde etkin performansı elde etmek için belirli parametrelerin giriş yapıldığı bir alan olarak tanımlanmıştır [71]. Şekil 49 da gösterilen ekranda kullanılacak olan mod seçilerek uygun parametre değerlerinin girişi sağlanabilir.

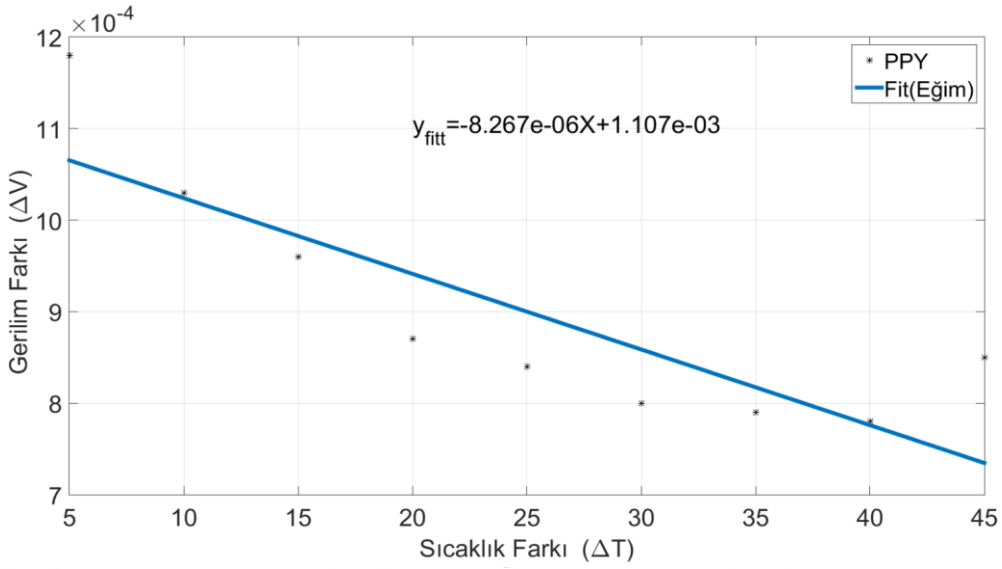


Şekil 49. *Regülatör ayar ekranı*

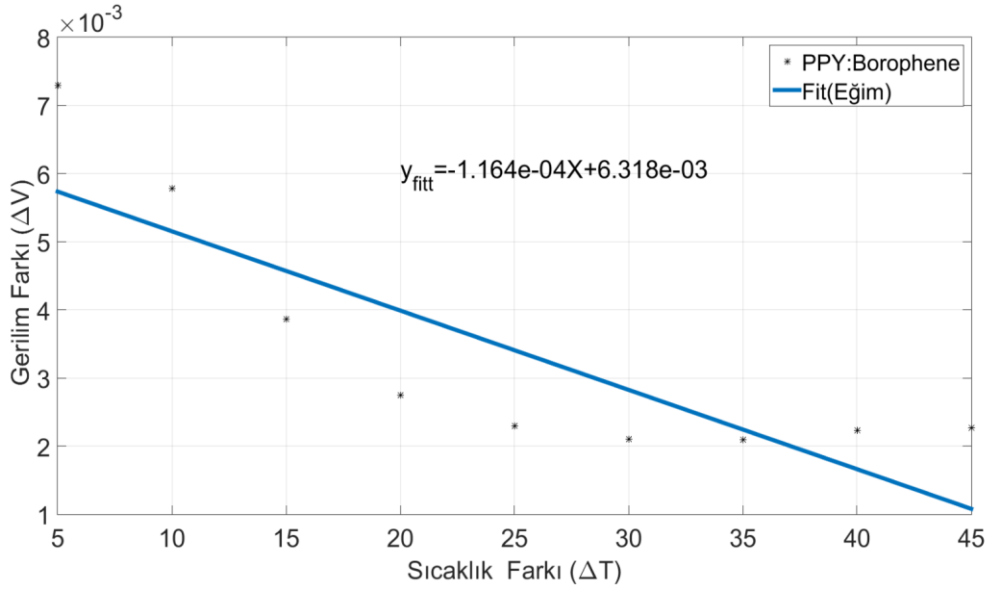
Gerekli ayarlar yapıldıktan sonra PR-59'u başlatmak için “Gönder” düğmesine ve ardından “Başlat” düğmesine basarak parametreler PR-59'a gönderilir. Parametreleri denetleyicide kalıcı olarak saklamak için FLASH belleğe kaydedilmelidir. "Regülatör > Flash 'a kaydet ’e yapılır. Aksi durumda, Kontrol ünitesinin güç beslemesi kesildiğinde parametreler sıfırlanmış olacaktır [71].

5.4 Hazırlanan TEG'lerin Termoelektrik Performansı

Ölçümlerde PPy ve PPy nanokompozitlerin ölçülen termovoltajları veya Seebeck katsayıları (S) ΔV-ΔT grafiği ile hesaplanmıştır Şekil 50. Elektriksel iletkenlikler (σ) sırasıyla PPy ve PPy: Borofen nanokompozit için $3x10^{-9}$ $S.cm^{-1}$ ve $4x10^{-9}$ $S.cm^{-1}$ ölçülmüştür. Şekil 47'de gösterildiği gibi, hazırlanan hem PPy hem de PPy: Borofen nanokompozit bazlı TEG'lerin voltaj değerleri artan sıcaklığın fonksiyonu olarak negatif yönde kademeli olarak arttırılmıştır. Özellikle, sıcaklık (ΔT)farkındaki voltaj, PPy: Borofen nanokompozit bazlı TEG için PPy bazlı TEG'den daha yüksekti. Bu sonuç, PPy: Borophene nanokompozit bazlı TEG'nin performansının, Borophene ilavesi ile önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir. Termoelektrik (TE) ölçümlerinde Seebeck katsayıları(S) PPy ve PPy borofen nanokompozit için sırasıyla $-8.26x10^{-6}$ μV/K ve $-116x10^{-6}$ μV/K hesaplanmıştır. Güç faktörleri (PF), PPy ve PPy borofen nanokompozit için sırasıyla $-205x10^{-21}$ (μWcm^{-1}).mK^2 ve $-54x10^{-21}$ (μWcm^{-1}).mK^2 olarak hesaplanmıştır.Borofen nanolevhaları PPy'nin elektrik iletkenliğini arttırdığından, hazırlanan ITO/PPy: Borofen nanokompozit bazlı TEG, enerji hasadı uygulamaları için 4 kat daha yüksek güç faktörüne sahiptir.



(a)



(b)

Şekil 50. *Voltaj değişimine karşı sıcaklık değişimi; (a) ıto/ppy tabanlı teg ve (b) ıto/ppy: borofen nanokompozit bazlı teg*

BÖLÜM 6. SONUÇ

Bu çalışmada ultrasonikasyon yöntemi ile borofen nanolevhası hazırlanmıştır. Daha sonra ultrasonikasyon ile PPy: Borofen nanokompoziti hazırlanmıştır. Güç faktörleri (PF), PPy ve PPy borofen nanokompozit için sırasıyla $-205x10^{-21}$ (μWcm^{-1}).mK^2 ve $-54x10^{-21}$ (μWcm^{-1}).mK^2 olarak hesaplanmıştır. Borofen nanolevhaları PPy'nin elektrik iletkenliğini arttırdığından, hazırlanan ITO/PPy: Borofen nanokompozit bazlı TEG, enerji hasadı uygulamaları için 4 kat daha yüksek güç faktörüne sahiptir. TEG uygulama çalışmaları seri bağlantıda daha fazla hücre dizini oluşturarak çıkış gerilimi artırılıp böylece çıkış voltajı artırılarak yaygınlaştırılacak ve otomotiv endüstrisinden tekstil endüstrisine, savunma endüstrisinden giyilebilir elektroniğe kadar bir çok alanda uygulama imkanı bulacaktır. Artan enerji talebini karşılamak için endüstriyel sektörlerden, otomobil egzozlarından ve binaların pencerelerinin güneş enerjisiyle ısıtılmasından kaynaklanan atık ısıyı geri kazanarak elektrik enerjisi üretebilecek. TEG'lerin fabrikalara, otomobillere ve bina pencerelerine uygulanması CO2 emisyonlarını azaltacak , günlük aktif ihtiyaçlar için ısıtma-soğutma ve elektrik üretimi sağlayacaktır. Borophene, şimdiye kadar literatürde herhangi bir deneysel TEG çalışmasına konu olmadığı için bu çalışmanın sonuçları oldukça oldukça dikkat çekicidir. TE malzemelerinin düşük maliyetli ve çözümden işlenebilen basit bir işlemle üretilmesinin, sürdürülebilir enerji üretimi açısından önemli bir soruna çözüm getirerek enerji maliyetini düşüreceği ve refahı artıracağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Jiin-Yuh Jang, Ying-Chi Tsai, "*Optimization of thermoelectric generator module spacing and spreader thickness used in a waste heat recovery system*, " *Elsevier,* no. 51, pp. 677-689, 2012.

[2] Laia Miró, Jaume Gasia, Luisa F. Cabeza, "*Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery:A review*," *Elsevier,* p. 285, 2016.

[3] Tongcai Wang, Weiling Luan ⇑, Wei Wang, Shan-Tung Tu, "*Waste heat recovery through plate heat exchanger based thermoelectric generator system*," *Elsevier,* p. 860, 2014.

[4] Cynthia Haddad, Christelle Périlhon, Amélie Danlos, Maurice-Xavier François,Georges Descombes, "*Some efficient solutions to recover low and medium waste heat:competitiveness of the thermoacoustic technology*," in The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Tmrees14,pp.1057, Paris, 2014.

[5] S. Spoelstra, M.E.H. Tijani, "*Thermoacoustic heat pumps for energy savings*," in *Presented at the seminar "Boundary crossing acoustics" of the Acoustical Society of the Netherlands*, pp. 5, Netherlands, 2005.

[6] Fitriani, R.Ovik , B.D.Long , M.C.Barma , M.Riaz , M.F.M.Sabri , S.M.Said ,,"*A reviewonnanostructuresofhigh-temperaturethermoelectric materialsforwasteheatrecovery*," Elsevier, p. 636, 2016.

[7] BCS, Incorporated, "*Waste Heat Recovery:Technology and Opportunities in U.S. Industry*," U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program (ITP), pp.6-7, United state of amarica, 2008.

[8] *"Waste Heat To Power Systems",*pp.1, 2012.

[9] Keiich Sasaki, Daisuke Horikawa,and Koichi Goto, "*Consideration of Thermoelectric Power Generation by Using Hot Spring Thermal Energy or Industrial Waste Heat*," *Journal of Electronic Materials,,* Vols. Vol. 44, No. 1, 2015, p. 391, 2014.

[10] Bitschi, Andreas, "*Modelling of thermoelectric devices for electric power generation*," Eth Zurich: Swiss Federal Institute Of Technology Zurich,pp.11-12, 2009.

[11] Takla, Marit, "*Recovering Industrial Waste Heat by the Means of Thermoelectricity*," Department of Chemistry Norwegian University of Science and Technology, Trondheim,pp.9, 2010.

[12] Shigeyuki Nakamura, Yoshihisa Mori and Ken'ichi Takarabe, "*Mg2Si Thermoelectric Device Fabrication with Reused-silicon*," in *Proc. Int. Conf. and Summer School on Advanced Silicide Technology 2014*, p.145, Okayama, 2014.

[13] Dan Mastbergen, Dr. Bryan Willson,, "*Generating Light from Stoves using a Thermoelectric Generator*," Engines and Energy Conversion Laboratory Department of Mechanical Engineering Colorado State University, USA.

[14] Li, Ling Bing Kong • Tao Li •Huey Hoon Hng • Freddy Boey Tianshu Zhang • Sean, "*Waste Energy Harvesting Mechanical and Thermal Energies*," Springer Heidelberg New York Dordrecht London: p. 98, Springer, 2014.

[15] Ltd., Elsevier Science, "*Thermoelectric Materials: Principles,Structure, Properties, and Applications*," *Elsevier,* pp. 1-11, 2002.

[16] *"https://www3.nd.edu/~sst/teaching/AME60634/lectures/AME60634_F13_thermoelectri c.pdf."* (Erişim tarihi: Ağustos,11,2021)

[17] Bos, Jan-Willem, "*Thermoelectric materials:efficiencies found in nanocomposites*," Bos, JanWillem, p. 35-36, Edinburgh, 2012.

[18] Shams, Rafay Uz Zaman, "*Thermoelectric Properties of Materials Based on Double Filled Type-I Clathrates*," University of Waterloo, Waterloo, Ontario,pp.12 Canada, 2015.

[19] Astronomy, Department of Physics and, [Online] : "*www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/Seebeck%20and%20Peltier%20Effects.pdf*." (Erişim tarihi: Ağustos,15,2021)

[20] Vale, Sónia Cristina Azevedo, "*Thermoelectric generator from space to automotive sectormodel and design for commercial and heavy duty vehicles*," pp. 65-68, 2015.

[21] Diana Enescu, ElenaOtiliaVirjoghe, "*A review on thermoelectric cooling parameters and performance*," *Elsevier,* no. 38, p. 903–916, 2014.

[22] Oliveira, José Rui Camargo and Maria Claudia Costa de, "*Principles of Direct Thermoelectric Conversion*," InTech, University of Taubaté,pp.96-97,2011.

[23] Högblom, Olle, "*Multiscale Simulation Methods for Thermoelectric Generators*," Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden,p.7, 2016.

[24] Dziurdzia, Piotr, "*Modeling and Simulation of Thermoelectric Energy Harvesting Processes*," InTech, Poland,pp.114-115, 2011.

[25] Bitschi, Andreas, "*Modelling of thermoelectric devices for electric power generation*," Technical University of Vienna, Eth Zurich),p.28, 2009.

[26] Chhatrasal Gayner, Kamal K. Kar, "*Recent advances in thermoelectric materials*," *Elsevier,* pp. 331-335, 2016.

[27] Skomedal, Gunstein, "*Thermal durability of novel thermoelectric materials for waste heat recovery*," University of Agder, Kristiansand,p.14 2016.

[28] Alexandre Polozine, Susanna Sirotinskaya, Lírio Schaeffer, "*History of development of thermoelectric materials for electric power generation and criteria of their quality*," *Sept./Oct. 2014*,p.3, 9 September 2014.

[29] Truong, Dao Y Nhi, "*Thermoelectric Properties of Higher Manganese Silicides*," University of Waterloo, Waterloo, Ontario,pp.3-4, 2015.

[30] Skomedal, Gunstein, "*Thermoelectric Materials for Waste Heat Recovery*," University of Agder, Grimstad,Norway, p.599, 2013.

[31] R.Nave.[Online]: "*http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/HBASe/thermo/thercond.html*."(Erişim tarihi: Eylül,15,2021)

[32] Li, Zhongliang Ouyang and Dawen, "*Modelling of segmented high-performance thermoelectric generators with effects of thermal radiation, electrical and thermal contact resistances*.," www.nature.com/scientificreports, Tuscaloosa, AL 35487, United States.,pp.1-3, 2016.

[33] Ahmed, Basel I. Ismail and Wael H., "*Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology*," Recent Patents on Electrical Engineering, Vols. Vol. 2, No. 1 29, pp. 27-39, 2008.

[34] Mikhail I. Fedorov, Vladimir K. Zaitsev, "*Sigma-Aldrich*," Sigma-Aldrich Co. LLC.All Rights Reserved, 2017. [Online]: http://www.sigmaaldrich.com/technicaldocuments/articles/material-matters/thermoelectric-materials.html. (Erişim tarihi: Eylül,21,2021)

[35] Palmqvist, Yi Ma • Richard Heijl • Anders E. C., "*Composite thermoelectric materials with embedded nanoparticles*," *Springer Science+Business Media,* p. 2767–2778, 2012.

[36] v. von, "*Control and Optimization of a DC-DC Converter for Thermoelectric Generators*," der Technischen Universität Berlin, Berlin,p.135 , 2016.

[37] *On Thermoelectric Properties of P-Type Skutterudites*,p.36, March 21, 2012.

[38] Mori, Kunihito Koumoto • Takao, "*Thermoelectric Nanomaterials Materials Design and Applications*," vol. 182, London, 2013, p. 135.

[39] J. Yang, "*Thermoelectric Properties of CoSb3-Based Skutterudites*," copyright by Jian Yang, Boston ,p.135, 2010.

[40] Palmqvist, Yi Ma • Richard Heijl • Anders E. C., "*Composite thermoelectric materials with embedded nanoparticles*," *Springer*, p. 2767–2778, 2012.

[41] Kofstad., Bjørn Pedersen Per K., "*Store norske leksikon*," 16 august 2016. [Online]: "*https://snl.no/silisium*." (Erişim tarihi: Ekim, 25,2021)

[42] Zuo Lei, Fu Gaosheng, YU Liangyao, "*Thermoelectric Materials and Thermal Spray Process for Vehicle Waste Heat Recovery*," *J Automotive Safety and Energy*, vol. Vol. 7 No. 2, pp. 135 150, 2016.

[43] Fedorov, M.I., "Thermoelectric Silicides:Past, Present And Future," *Journal of Thermoelectricity №2,* pp. 51-60, 2009.

[44] Liu, Jian He and Yufei, "*Oxide thermoelectrics: The challenges, progress, and outlook*," Materials Research Society, vol. Vol. 26, pp. 162-1772, Aug 14, 2011.

[45] LeBlanc, Saniya, "*Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications*," *Elsevier*, p. 26–35, 2014.

[46] R. A. Hayati Mamura, "*Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators*," Elsevier Ltd, vol. 97, p. 265–272, 2015.

[47] Aravind Karuppaiah, Ganesh, Dileepan, Jayabharathi, "*Fabrication and Analysis of Thermo Electric Generator For Power Generator*," *Ijirset,* vol. 3, pp. 1508-1513, 2014.

[48] Ssennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying Yan, Bo Li, "*A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement*," *Elsevier*, vol. 65, p. 698–726, 2016.

[49] Karri, Madhav A, "*Thermoelectric Power Generation System Optimization Studies*," Madhav A. Karri,p.3, 2011.

[50] Shammas, Chris Gould and Noel, "*Three Dimensional Tcad Simulation of a Thermoelectric Module Suitable for use in a Thermoelectric Energy Harvesting System*," *InTech*, pp. 31-42, 2012.

[51] Basel I. Ismail, Wael H. Ahmed, "*Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology*," *Bentham Science Publishers Ltd.*, pp. 27-39, 2009.

[52] Govardhan Neeli, Dilip Kumar Behara, Meda Kalyan Kumar, "*State of the Art Review on Thermoelectric Materials*," International Journal of Science and Research, vol. 5, pp. 18331844, 2016.

[53] D.M. Rowe, G.Min, "*Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation*," *IEE*, vol. 143, pp. 351-356, 1996.

[54] Jaluria, Yogesh, "*Design and Optimization of Thermal Systems*," Second Edition, 2007.

[55] "*Pipeflowcalculations*," [Online]: "*http://www.pipeflowcalculations.com/tables/flue-gas.php*." (Erişim tarihi: Ekim, 25,2021)

[56] Vegard Haukaas, "*Waste heat recovery Design, modeling and feasibility of thermoelectric power generation*," University of Agder, Grimstad, 2016.

[57] Ze-Guang Zhou, Dong-Sheng Zhu, Hong-Xia Wu and Hong-Sheng Zhang, "*Modeling, Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Thermoelectric Generator*," *Journal of Thermal Science*, vol. 22, no. 1, p. 48−54, 2013.

[58] Li, Zhongliang Ouyang & Dawen, "*Modelling of segmented high-performance thermoelectric generators with effects of thermal radiation, electrical and thermal contact resistances*," *Scientific Reports*, pp. 1-12, 2016.

[59] Raşit Ahiska, Hayati Mamur, "*A review: Thermoelectric generators in renewable energy*," International Journal Of Renewable Energy Research, vol. 4, pp. 128-136, 2014.

[60] Paul, Douglas, "*Thermoelectric Energy Harvesting*," InTech,p.23, 2014.

[61] Lee, HoSung, "*Thermoelectric Generators*," [Online]: "*homepages.wmich.edu/~leehs/ME539/Thermoelectric%20Contact%20Resistances.pdf*." (Erişim tarihi: Ekim,15,2021)

[62] Fagehi, Hassan, "*Optimal Design Of Automotive Exhaust Thermoelectric Generator*," Hassan Fagehi, Western Michigan University,Vol.1, p. 55, 2016.

[63] C.-I. H. ,. W.-H. C. Chien-Chang Wang, "*Design of heat sink for improving the performance of thermoelectric generator using two-stage optimization*," *Elsevier,* p. 236-245, 2012.

[64] Lee, HoSung, Thermal Design - Heat Sinks, "*Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*," ProQuest Ebook Central, p. 35,2010.

[65] "*http://mechfamilyhu.net/downloads/Heat%20Transfer1&2/books/Heat.And.Mass.Trafer%20 by%20chapter/cen58933_ch09.pdf*." (Erişim tarihi:Ekim,25,2021)

[66] Chien-Chang Wang, Chen-I Hung, Wei-Hsin Chen, "*Design of heat sink for improving the performance of thermoelectric generator using two-stage optimization*," *Elsevier,* vol. 39, no. 1, p. 236–245, 2012.

[67] Lauryn L. Baranowski, G. Jeffrey Snyder, and Eric S. Tober,r, "*Effective thermal conductivity in thermoelectric materials*," Journal Of Applied Physics 113, 204904 (2013), pp. 1-12, 2013.

[68] Saniya Le Blanc, ShannonK.Yee , MatthewL.Scullin , ChrisDames, "*Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics*," *Elsevier,* p. 313–327, 2014.

[69] Güngör, S., Tasaltin, C., Gürol, İ., Baytemir, G., Karakuş, S., Tasaltin N. (2022). "*Copper phthalocyanine-borophene nanocomposite-based non-enzymatic electrochemical urea biosensor.''* Applied Physics A 128:89.

[70] Gürol, I., Ahsen, V., Bekâroglu, Ö. (1994). "*Synthesis of Tetraalkythio-substituted Phthalocyanines and their Complexation with AgI and PdII. J. Chem*."Soc. Dalton Trans., 497-500.

[71] *''https:*//*www.lairdthermal.com/thermal-technical-library/user-manuals/pr-59-and-lt-user-manual*"pp.6-9,13,(Erişim tarihi:Haziran,22,2021)