

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULARIN PERFORMANSINA DOĞRUDAN  
TEMASLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN ETKİLERİNİN DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat Ferhat DOĞDU**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN**

**HAZİRAN 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULARIN PERFORMANSINA DOĞRUDAN  
TEMASLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN ETKİLERİNİN DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat Ferhat Doğdu  
301111018**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN**

**HAZİRAN 2013**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301111018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Murat Ferhat DOĞDU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TERMOELEKTRİK SOĞUTUCULARIN PERFORMANSINA DOĞRUDAN TEMASLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Yrd. Doç. Dr. Z. Fatih ÖZTÜRK**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR**      .....

                                 Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi**            : **03 Mayıs 2013**  
**Savunma Tarihi**        : **04 Haziran 2013**



*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda bana EDAG (Endüstri Destekli Araştırma Görevlisi) modeli kapsamında destek olan ve araştırma projemizi destekleyen Drotel Telekomünikasyon LTD.'ye, tez sürecimin her aşamasında, bilgi, destek ve değerli zamanını benden esirgemeyen NETRG (Yeni Enerji Teknolojileri Araştırma Grubu) araştırma grubumuzun kurucusu ve yöneticisi, danışmanım Prof. Dr. Altuğ Şişman'a, grup üyelerimiz Yrd. Doç. Dr. Fatih Öztürk'e, Arş. Gör. Sevan Karabetoğlu'na ve Türker Şahin'e, İstanbul'a geldiğimden andan itibaren desteğini hiç esirgemeyen Arş. Gör. Neslihan Yuca'ya ve diğer Enerji Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, her türlü imkanı sağlayarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın termoelektrik soğutucuların performanlarının artması ve yaygınlaşmasına yardımcı olmasını diliyorum.

Mayıs 2013

Murat Ferhat Doğdu  
Makina Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	3
1.3 Tezde Elde Edilen Temel Sonuçlar .....	5
<b>2. TEMEL BİLGİLER.....</b>	<b>7</b>
2.1 Termoelektrik Etkiler .....	7
2.1.1 Seebeck Etkisi .....	8
2.1.2 Peltier Etkisi .....	10
2.1.3 Thomson Etkisi .....	11
2.1.4 Kelvin Eşitlikleri .....	12
2.2 Tersinmezlikler.....	12
2.2.1 Joule Isısı .....	12
2.2.2 Fourier Yasası .....	13
2.3 Peltier Modüller için Temel Denklemler .....	14
2.4 Termoelektrik Modülün Yapısı.....	20
2.5 Çalışma Prensipleri.....	22
2.6 Termoelektriklerin Uygulama Alanı .....	24
2.7 Termoelektrik Modüllerin Avantajları .....	26
2.8 Termoelektrik Modüllerin Dezavantajları .....	27
2.9 Deneylerde Kullanılan Termoelektrik Soğutucuların Modellenmesi .....	27
<b>3. DOĞRUDAN TEMASLI SIVI SOĞUTMALI ISI DEĞİŞTİRİCİ</b>	
<b>TASARIMI VE DENEYSEL PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ .....</b>	<b>35</b>
3.1 Doğrudan Temaslı Sıvı Soğutmalı Isı Değişirici Tasarımı.....	37
3.2 Deney Düzeninin Tanıtımı ve İncelenen Durumlar.....	38
3.3 Kullanılan Pompanın Farklı Akımlarda Debisinin Ölçümü .....	43
3.4 Farklı Isı Değişiricileri İçin Modülün Akım-Sıcaklık Değişimleri.....	44
3.5 Farklı Yüklerde 60 lt'lik Hacimde Soğutma ve COP Ölçümleri .....	49
3.6 Kalorimetrik Ölçüm Yöntemiyle Soğutma Gücü ve COP Değerlerinin Elde Edilmesi .....	61
3.7 Isı Değişiricilerin Isı Taşınım Katsayılarının Bulunması .....	63
3.8 Kalorimetrik Ölçüm Yöntemiyle Yapılan Deney Sonuçları.....	65
3.9 Deneylerin Yorumlanması.....	74
3.9.1 Kütleli soğutmalı ısı değiştirici .....	74

3.9.2 İnce film soğutmalı ısı değiştirici .....	75
3.9.3 Kalorimetrik deney sonuçları .....	77
3.10 Eysel Buzdolabı için Deneysel Bir Çalışma .....	78
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>81</b>
4.1 Kütlesel Soğutmalı Isı Değiştirici .....	81
4.2 İnce Film Soğutmalı Isı Değiştirici .....	81
4.3 Isı Değiştiricilerin Karşılaştırılması .....	81
4.4 Çalışmanın Uygulama Alanları ve Öneriler .....	82
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>

## **KISALTMALAR**

<b>TE</b>	: Termoelektrik
<b>TEC</b>	: Termoelektrik Soğutucu
<b>TEG</b>	: Termoelektrik Jeneratör
<b>KÜSID</b>	: Kütleli Soğutmalı Isı Değiştirici
<b>İFSID</b>	: İnce Film Soğutmalı Isı Değiştirici
<b>HEX</b>	: Isı değiştirici



## SEMBOL LİSTESİ

$A$	: Kesit alan
$COP$	: Performans katsayısı
$h$	: Isı taşınım katsayısı
$I$	: Akım
$\vec{J}$	: Akım yoğunluğu vektörü
$K$	: Toplam ısı iletim katsayısı
$k$	: Isı iletim katsayısı
$l$	: Uzunluk
$N$	: Bir modüldeki p-n çiftlerinin sayısı
$\dot{Q}$	: Isıl güç
$P$	: Güç
$R$	: Direnç
$R_i$	: Toplam iç direnç
$T$	: Sıcaklık
$\bar{T}$	: Ortalama sıcaklık
$U$	: Isı değiştircileri için toplam ısı geçiş katsayısı
$V$	: Gerilim
$\dot{W}$	: Elektriksel güç
$x$	: Konum
$\alpha$	: Toplam Seebeck katsayısı
$\alpha_{np}$	: Tek bir p-n çiftinin Seebeck katsayısı
$\rho$	: Özdirenç
$\Pi$	: Peltier katsayısı
$\tau$	: Thomson Katsayısı
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı
$\vec{J}$	: Akım yoğunluğu vektörü

## İndisler

$AB$	: A ve B metal çifti
$B$	: dip
$c$	: Soğuk ortam
$COP_{max}$	: Maksimum performans katsayısı durumu
$f$	: Son
$f_i$	: Akışkan giriş
$f_o$	: Akışkan çıkış
$H$	: Termoelektrik modülün sıcak yüzeyi veya sıcak tarafı
$i$	: İlk
$L$	: Termoelektrik modülün soğuk yüzeyi ya da soğuk tarafı
$Lo$	: Kaçak ya da kayıp
$max$	: Maksimum
$m$	: Ortalama
$n$	: n-tipi yarıiletken
$np$	: p-n yarıiletken çift
$p$	: p-tipi yarıiletken
$Pelt$	: Peltier
$po$	: Pompa
$R$	: soğutma
$sis$	: sistem
$tot$	: toplam
$w$	: Sıcak ortam
$\dot{Q}_{C,max}$	: Maksimum soğutma gücü
$1,2$	: Bileşen belirtme; 1. yüzey, 2. yüzey
$\infty$	: Dış ortam sıcaklığı
$\Delta T_{max}$	: Maksimum sıcaklık farkı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1	: Platinyuma göre bazı maddelerin Seebeck Katsayıları ( $U_{r1-1}$ ) .....	9
Çizelge 2.2	: Thermionic firmasına ait Peltier modülün performans özellikleri.....	28
Çizelge 3.1	: Ölçümde kullanılan cihazlar, yazılımlar ve özellikleri .....	39
Çizelge 3.2	: Oda sıcaklığında, ısı yük olmadığı durumda KÜSID sonuçları .....	74
Çizelge 3.3	: 35°C dış ortam koşullarında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçları ....	74
Çizelge 3.4	: Oda sıcaklığında 25W yük altında KÜSID sonuçları .....	75
Çizelge 3.5	: 35°C dış ortam koşullarında, 25W yük altında KÜSID sonuçları .....	75
Çizelge 3.6	: Oda sıcaklığında, ısı yük olmadığı durumda İFSID sonuçları .....	75
Çizelge 3.7	: 35°C dış ortam koşullarında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçları .....	76
Çizelge 3.8	: Oda sıcaklığında 25W yük altında İFSID sonuçları .....	76
Çizelge 3.9	: 35°C dış ortam koşullarında, 25W yük altında İFSID sonuçları .....	76
Çizelge 3.10	: Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçları, $I_{po}=2A$ .....	77
Çizelge 3.11	: Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçları, $I_{po}=2A$ .....	77
Çizelge 3.12	: Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçları, $I_{po}=3A$ .....	77
Çizelge 3.13	: Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçları, $I_{po}=3A$ .....	77
Çizelge 3.14	: Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde KÜSID sonuçları, $I_{po}=2A$ .....	78
Çizelge 3.15	: Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde İFSID sonuçları, $I_{po}=2A$ .....	78
Çizelge 3.16	: Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde KÜSID sonuçları, $I_{po}=3A$ .....	78
Çizelge 3.17	: Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde İFSID sonuçları, $I_{po}=3A$ .....	78
Çizelge 3.18	: Ev tipi buzdolapları için deney sonuçları .....	79
Çizelge 4.1	: $T_L$ Sıcaklıklarının Karşılaştırılması .....	82



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Şematik basit bir termokupl (Rowe,2006) .....	8
Şekil 2.2 : Potansiyel altında oluşan Peltier etkisi. (Url-2).....	10
Şekil 2.3 : Thomson etkisi .....	11
Şekil 2.4 : TEC'ın bileşenlerinin ve Peltier etkisinin gösterimi (Url-3).....	14
Şekil 2.5 : Basit bir soğutucu (ısı pompası) (Goldsmid, 2009).....	15
Şekil 2.6 : Bir TEC için soğutma gücünün akıma göre değişimi. (Goldsmid, 2009) 17	
Şekil 2.7 : Maksimum sıcaklığın ZTm'ye göre değişimi(Goldsmid, 2009).....	19
Şekil 2.8 : ZTm'ye göre Optimum COP değişim grafiği (Goldsmid, 2009).....	20
Şekil 2.9 : TE modülün genel görünümü .....	20
Şekil 2.10 : Seebeck, Peltier, TE Bileşen (Url-4) .....	21
Şekil 2.11 : TE modülün yapısı.....	21
Şekil 2.12 : TE modülün p-n çiftlerinin görünümü (Url-5) .....	23
Şekil 2.13 : TEC'lerin genel çalışma prensibi (Url-6) .....	24
Şekil 2.14 : Sıvı Dondurucu.....	25
Şekil 2.15 : Mini Buzdolabı.....	26
Şekil 2.16 : Firmaya ait bir Bi2Te3 modülün boyutları (Url-9).....	28
Şekil 2.17 : $\Delta T$ 'ye göre TH=27°C'de soğutma gücünün grafiği (Url-9).....	30
Şekil 2.18 : $\Delta T$ 'ye göre TH=50°C'de soğutma gücünün grafiği (Url-9).....	30
Şekil 2.19 : $\Delta T$ 'ye göre TH=27°C'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-9) .....	31
Şekil 2.20 : $\Delta T$ 'ye göre TH=50°C'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-9) .....	31
Şekil 2.21 : $\Delta T$ 'ye göre TH=27°C'de Qc ve gerilim grafiği (Url-9).....	32
Şekil 2.22 : $\Delta T$ 'ye göre TH=50°C'de Qc ve gerilim grafiği (Url-9).....	32
Şekil 2.23 : TEC sıcaklık diyagramı.....	33
Şekil 3.1 : Hava-hava soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi .....	35
Şekil 3.2 : Hava-su soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi için ısı değiştirici .....	36
Şekil 3.3 : Hava-su soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi.....	36
Şekil 3.4 : Doğrudan temaslı ince film akışlı ısı değiştirici. ....	37
Şekil 3.5 : Doğrudan temaslı bulk (kütlesel) akışlı ısı değiştirici. ....	37
Şekil 3.6 : TEC modül ve diğer aksamaların montaj resmi. ....	38
Şekil 3.7 : Deneysel kullanılan ekipmanlar .....	40
Şekil 3.8 : TEC modülün yüzeyinden doğrudan sıcaklık ölçümü.....	42
Şekil 3.9 : TEC modülün üzerine yerleştirilmiş pin-fin üzerinden sıcaklık ölçümü ..	42
Şekil 3.10 : Modülün üzerine fan eklendikten sonra sıcaklık ölçü yapılması .....	43
Şekil 3.11 : Pompanın farklı akımlarda debisinin ölçülmesi .....	44
Şekil 3.12 : TEC yüzey sıcaklığı ölçümü için oluşturulan deney düzeneği .....	45
Şekil 3.13 : 21°C ortam sıcaklığı için TEC modülün yüzey sıcaklık değerleri .....	45
Şekil 3.14 : Deney düzeneği .....	46
Şekil 3.15 : Deney düzeneği .....	47
Şekil 3.16 : Deney düzeneği çalışırken .....	47
Şekil 3.17 : $T_{\infty}=21^{\circ}\text{C}$ HEX'e montaj edilmiş pin-finin sıcaklık akım grafiği.....	48

Şekil 3.18 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de fanlı ısı değiştiricilerin sıcaklık akım grafiği.....	49
Şekil 3.19 : Termal oda deney düzeneği .....	50
Şekil 3.20 : Kale Termos firmasına ait hacim .....	50
Şekil 3.21 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de HEXlerin yüksüz hacimdeki sıcaklık-akım grafikleri .....	51
Şekil 3.22 : $24^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında soğutma gücü-akım grafiği .....	52
Şekil 3.23 : $24^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında COP-akım grafiği .....	53
Şekil 3.24 : $24^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında COP- $Q_c$ grafiği.....	53
Şekil 3.25 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 25W ısıl yük altında dolap sıcaklığının akıma göre değişimi	54
Şekil 3.26 : $22^{\circ}\text{C}$ dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında $Q_c$ -akım grafiği.....	55
Şekil 3.27 : $22^{\circ}\text{C}$ dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında COP-akım grafiği.....	56
Şekil 3.28 : $22^{\circ}\text{C}$ dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında COP- $Q_c$ grafiği .....	56
Şekil 3.29 : $T_{\infty}=35^{\circ}\text{C}$ 'de dolap içinde ısı kaynağı yokken $Q_c$ -akım grafiği .....	57
Şekil 3.30 : $35^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında ısıl yüksüz, COP-akım grafiği.....	58
Şekil 3.31 : $35^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında, ısıl yüksüz COP- $Q_c$ grafiği .....	58
Şekil 3.32 : 25W yük ve $35^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında Soğutma gücü-akım grafiği..	59
Şekil 3.33 : 25W yük ve $35^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında COP-akım grafiği.....	60
Şekil 3.34 : 25W yük ve $35^{\circ}\text{C}$ dış ortam koşullarında $Q_c$ -akım grafiği.....	60
Şekil 3.35 : $U_{Lo}$ değerinin belirlendiği deney düzeneği .....	62
Şekil 3.36 : Isı taşınım katsayılarının bulunması için kurulan deney düzeneği .....	63
Şekil 3.37 : Isı taşınım katsayısı deneyinden elde edilen sıcaklık zaman grafiği.....	64
Şekil 3.38 : Kümülatif deney düzeneği .....	66
Şekil 3.39 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, soğutma gücü-akım grafiği, $I_{po}=2$ A .....	67
Şekil 3.40 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, COP-akım grafiği, $I_{po}=2$ A.....	67
Şekil 3.41 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, soğutma gücü-COP grafiği, $I_{po}=2$ A .....	68
Şekil 3.42 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, soğutma gücü-akım grafiği, $I_{po}=3$ A .....	69
Şekil 3.43 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, COP-akım grafiği, $I_{po}=3$ A.....	69
Şekil 3.44 : $22^{\circ}\text{C}$ oda sıcaklığında, soğutma gücü-COP grafiği, $I_{po}=3$ A .....	70
Şekil 3.45 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısıl yükte, soğutma gücü-akım grafiği, $I_{po}=2$ A .....	71
Şekil 3.46 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de ve 25W ısıl yük altında, COP-akım grafiği, $I_{po}=2$ A.....	71
Şekil 3.47 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısıl yükde, soğutma gücü-COP grafiği, $I_{po}=2$ A.....	72
Şekil 3.48 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de 25W ısıl yük için, soğutma gücü-akım grafiği, $I_{po}=3$ A ....	72
Şekil 3.49 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de ve 25W ısıl yük altında, COP-akım grafiği, $I_{po}=3$ A.....	73
Şekil 3.50 : $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısıl yükde, soğutma gücü-COP grafiği, $I_{po}=3$ A.....	73

# TERMoeLEKTRİK SOĞUTUCULARIN PERFORMANSINA DOĞRUDAN TEMASLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

## ÖZET

Termoelektrik modüller yarıiletken malzemelerden oluşup, elektrik kullanarak ısıtma veya soğutma yapabilirler. Bunun tersi olarak da, sıcaklık farkını kullanarak elektrik üretebilirler. Her modülde n ve p tipi yarıiletkenler kullanılır. Bir termoelektrik modülde herbir n ve p bir çift oluşturacak şekilde dizilirler ve herbir çifte termokupl denir. Termoelektrik modüller elektriksel olarak seri, termal olaraksa paralel bağlıdır.

Termoelektrik modüller çalışma prensiplerine göre termoelektrik jeneratör ve termoelektrik soğutucu olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Termoelektrik jeneratörler sıcaklık farkından yararlanarak elektrik üretirler, ancak verimleri çok düşüktür. Termoelektrik soğutucu modüller ise ısıyı bir yüzeylerinden emip, diğer yüzeylerine taşırlar, yani pompalarlar. Bu yüzden ısı pompası olarakta adlandırılırlar. Termoelektrik modüle, elektriksel potansiyel uygulanırsa, modülün bir tarafından ısı emilirken diğer tarafından ısı atımı gerçekleşir.

Termoelektrik soğutucular, ömürlerinin uzun olması, hareketli parçalarının olmaması, buna bağlı olarak aşınma olmaması dolayısıyla bakım gerektirmemeleri ve hızlı cevap vermesi gibi önemli avantajlara sahiptirler. Küçük olmaları ve konvansiyonel sistemlerin kullanılmadıkları yerlerde çalışabilmelerinden dolayı soğutma alanında önemli bir yere sahip olmuşlardır. Fakat enerji verimliliği açısından incelendiğinde konvansiyonel soğutuculara göre geride kalmış olup, enerji verimliliği açısından gelişimine devam etmektedir.

Termoelektrik soğutucular yeni bir teknoloji değildirler ve konvansiyonel sistemlerin soğutma yapamadığı hemen her yerde kullanılmaktadırlar. Günümüzde, askeri ve uzay araştırmalarından, tıbbi cihazların soğutulmasına, küçük elektronik bileşenlerin soğutulmasından, ev aletlerine kadar kendine birçok kullanım alanı bulmuştur.

Termoelektrik soğutucu sistemler, modül, elektriksel ve termal yalıtkanlar, ısı kuyuları, bağlantı elamanları gibi birçok elamanın birleşmesiyle oluşur ve tüm bu kullanılan malzemeler soğutma sisteminin, sıcaklık, basınç, termal dirençler gibi sebeplerle verimini sınırlamaktadır. Bu noktada termoelektriklerin temel problemleri ortaya çıkmaktadır.

Tasarlanacak bir TEC sisteminde kullanılacak Peltier modülünün sayısı; soğutulacak hacmin ısı yüküne ve her bir Peltier modülünden elde edilebilecek maksimum soğutma gücüne göre seçilmelidir. Bir modülün maksimum soğutma gücü ise modülün katalog (etiket) değeri olmayıp, atılan ısıyı uzaklaştırılma etkinliğine şiddetle bağlıdır. Bu nedenle bir Peltier modülün üzerinde yazan maksimum soğutma gücünün çok altında değerlerle pratikte karşılaşılabilir. Bu yüzden ki termoelektrik soğutucuların en temel problemlerinden biri yüksek yoğunlukta atılan

ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması problemidir. Bu durum bu tez çalışmasının da konusunu oluşturan atılan ısının etkin uzaklaştırılması yöntemini çok önemli bir noktaya taşımaktadır. Isının etkin uzaklaştırılması, sistemde kullanılacak ve en büyük maliyeti oluşturan Peliter modül sayısını da azaltmaktadır.

Isının termoelektrik modülün sıcak yüzeyinden uzaklaştırılması için kanatçıklı yüzeyler ve fanlar kullanılmaktadır. Isı, termoelektrik modülün yüzey alanı çok küçük olduğundan pompalandığı taraf olan sıcak yüzeyde birikir ve yüzey belli bir ısı yoğunluğa ulaştığında, Fourier ters ısı transferi ile termoelektrik modülün soğuk yüzeyine ısı kaçmaya başlar ve modülün soğuk tarafında sıcaklık artar. Bunun yanı sıra ohmik kayıplar sebebiyle modül üzerinden akan akımın bir kısmı atık ısı olarak termoelektrik modülün soğuk yüzeyine geçer. Bu sebeplerden dolayı termoelektrik modül belli akım değerlerinin üzerine çıkamaz.

Bu problemin üstesinden gelebilmek için çeşitli denemeler yapılmış ve sıvı soğutmalı sistemler geliştirilmiştir. Sıvı soğutmalı sistemlerde, termoelektrik modülün pompaladığı ısı, bir ısı değiştirici yardımıyla, soğutucu akışkana veriliyor ve böylece modülün performansı artırılmaya çalışılıyordu. Ancak temas noktalarındaki termal dirençler sebebiyle, istenilen değerlere bir türlü ulaşamamış, sıvı soğutmalı sistemlerde yalnızca kısmi bir çözüm olabilmişlerdir.

Genel olarak sıvı soğutmalı ısı değiştiriciler arasında en etkin olanları yeni nesil doğrudan temaslı ısı değiştiricilerdir. Bu tez kapsamında termoelektrik modüllerin tersinmez etkilerinin soğutma performansını etkilememesi için iki farklı dizaynda doğrudan temaslı sıvı soğutmalı ısı değiştirici geliştirildi.

Yapılan dizaynlardan biri kütleli soğutmalı ısı değiştirici, diğeri ise ince film soğutmalı ısı değiştiricidir. Yapılan dizaynda modülün sıcak yüzeyine geliştirilen ısı değiştiriciler, soğuk yüzeye ise pin-finler montaj edilerek, TE modülün performansı incelenmiştir.

Yapılan deneyler 4 farklı durumun yanı sıra termoelektrik modülün yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi deneyi olarak gerçekleşmiştir. İncelenen durumlardaki, oda sıcaklarında 60lt'lik belirli bir hacmin ısı yük uygulanmadan soğutulması durumu, ikincisi aynı hacmin 25W ısı yük altında soğutulması, üçüncüsü 35 °C sıcaklığında, termal laboratuarda oluşturulmuş şartlarda 60lt'lik hacmin soğutulması ve son olarak yine 35 °C sıcaklığında 60lt'lik hacmin 25W ısı yük altında soğutulması olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra kümülatif yöntemle deneyler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde, dizayn edilen soğutucu modülün sıcaklıkları, soğutma güçleriyle ve COP değerleri belirlenmiştir. Her modelde, akım-sıcaklık, akım-soğutma gücü, akım-COP ve soğutma gücü-COP ilişkisi incelenmiştir. İncelemelerin sonucuna göre, yeni dizayn edilen ısı değiştiriciler termoelektrik modülün performansını, daha önce kullanılan ısı uzaklaştırma yöntemlerine göre artırmıştır. Hem soğutma yükünde artış, hemde soğuk yüzey (pin fin dip sıcaklıkları) sıcaklıklarında düşme meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak COP artmıştır. Bunun en temel sebeplerinden birisinin kontakt dirençlerinin doğrudan temaslı sıvı soğutmalı ısı değiştirici sayesinde minimize edilmesidir. Böylelikle termoelektrik modülün pompaladığı ısı doğrudan soğutucu akışkana geçerek, termoelektrik modülün yüzeyinde ters yönde ısı kaçakları olması engellenmiştir. Bu tez çalışması çerçevesinde tasarlanan ve deneysel olarak TEC modüllerin performansı üzerindeki sonuçları ölçülen ısı değiştiriciler aynı zamanda modülün akımla soğutma gücünün değişimini de etkilemektedir. Bu şekilde, ısı uzaklaştırma etkinliğinin iyileştirilmesiyle COP değerleri ve soğutma güçleri de iyi

yönde etkilenmektedir. Bu sebeple, dizayn edilecek bir termoelektrik soğutucunun daha efektif bir soğutma yapabilmesine ve termoelektrik soğutucuların yaygınlaşmasına katkı sağlanmıştır.





# **EXPERIMENTAL EXAMINATION OF DIRECT CONTACT HEAT EXCHANGERS' EFFECTS ON THE THERMOELECTRIC COOLERS**

## **SUMMARY**

Thermoelectric modules consist of semi-conductors and can produce heating or cooling effects by using electricity. Conversely, using the temperature gradient, they can produce electricity. In each module, n and p type semi-conductors are used and every n and p are arranged as couples which are named as thermocouples in a thermoelectric module. These couples are connected electrically in series and thermally in parallel in the array of module.

Thermoelectric modules can be divided in two groups, which are thermoelectric generators and thermoelectric coolers, according to their working principles. Thermoelectric generators use temperature gradient to produce electricity, however, their efficiency is typically as low as 4-7%. On the other hand, thermoelectric cooler modules, which transfer heat from one side of the device to the other side, is also called as thermoelectric heat pumps. If electric current is applied to thermoelectric module, according to the way of current, one side of the thermoelectric cooler becomes cold and the other becomes hot, that is, heat is absorbed from the cold side and dissipated from the hot side.

Thermoelectric cooling modules have many advantages; such as long lifetime, no moving parts, in other words no wear, so they are maintenance free, works acoustically silent, highly precise temperature control. As a result of smallness and lightweightness, they can be used in every cooling case where conventional cooling system are not applicable. However, when it is examined by means of energy efficiency, conventional systems have higher efficiency and development of thermoelectrics continue for energy efficiency.

Thermoelectric are not a new technology and can be implement to any cooling application. Today, thermoelectrics are using in many different field such as military and space research, to cool medical devices and small electronic components.

Thermoelectric systems are comprised by modules, electrical and thermal insulators, heat sinks, connectors and interface thermal transfer materials. Each of these items puts limits on efficiency of the cooling systems because of temperature, pressure, structural stress and thermal resistance. At this point, basic problems of thermoelectric coolers show up.

One of the basic problems of thermoelectric modules is to remove the high dense rejected heat from the hot side of the module. To remove heat from the module surface, fin and fan system are used. However, surface of thermoelectric module is small so, heat accumulate the hot side of thermoelectric and fin which is using to cool hot side of thermoelectric, starts to saturate. When it saturated, in the reverse direction Fourier heat transfer starts and cold surface temperature of thermoelectric module starts to increase. Besides this, because of ohmic losses, a portion of electrical

energy is converted to waste heat and about the half of it passes to the cold surface. Therefore, thermoelectric module efficiency and cooling power decreases and current values, which are applied to thermoelectric module, cannot reach high values.

To overcome this problem, various tests are done and liquid cooling systems are developed. In liquid cooling systems, the heat transferred by thermoelectric module is passed to the cooling fluid with the help of heat exchanger. Thus, module performance is tried to increase. However, because of thermal resistance at the contact areas, preventing the Fourier effect was a limited application. So liquid cooling system has become a partial solution only.

Generally, among the liquid cooling heat exchanger, the most effective one is new generation direct fluid contact heat exchangers. In the scope of this thesis, to prevent the irreversible effects of thermoelectric modules on the cooling performance, two different direct contact fluid heat exchangers are developed and manufactured.

One of the manufactured designs is a direct fluid contact bulk flow heat exchanger and the other one is (direct fluid contact) thin film flow heat exchanger. In the constructed design, for the hot side of thermoelectric cooler a heat exchanger is used and for the cold side of thermoelectric cooler a pin-fin is used to improve the heat transfer area. According to this assembly, cooling system performance is tested.

In the experiments, four different cases are observed and besides cold side of the thermoelectric cooler module are determined with respect to current for both heat exchangers.

In the first case, a 60 liter volume without any heat load is cooled by applying different current to thermoelectric cooling module.

In the second case, the same volume which is under 25 W thermal load is cooled at different current values.

In the third case experiment has been done in the thermal room at 35°C ambient temperature without any thermal load.

The last case was also in the thermal room at 35°C ambient temperature and under 25 W thermal load. In the experiments, for the cooling unit, cooled ambient temperatures, cooling power and COP values are determined.

Besides these, by using cumulative method, cooling power and COP values are checked for some specific current values.

In every model, current- temperature, current-cooling power, current-COP values and cooling power- COP values relations are observed. From the results of experiments, new designed direct liquid contact heat exchangers increased the performance of thermoelectric module, compared to the old heat removal techniques such as fin and fan system and liquid base heat exchangers. New exchangers increased both cooling power and COP values. Besides cold side pin-fin temperatures are decreased as well.

One of the basic reasons of this is annihilated contact thermal resistants by help of direct fluid contact heat exchangers.

In this way, the pumped heat by thermoelectric module transferred directly to the cooling liquid and thus irreversible effects are prevented. When two direct contact fluid heat exchangers are compared, bulk flow heat exchanger has higher cooling power and COP values for the same current than film flow heat exchanger. Even the

surface temperatures of the bulk flow heat exchanger are lower than thin film flow heat exchanger.

As a result, to design effective TEC-systems and to extend usage are of thermoelectric cooling systems, new designed direct contact fluid flow heat exchangers are expected to be useful.



## 1. GİRİŞ

Termoelektrik soğutucu (TEC) modüller olarak da bilinen Peltier elemanları, ısı pompası gibi görev yapan, hareketli parçaları olmayan ve soğutma için sıvı ya da gaz kullanmayan yarıiletken esaslı küçük cihazlardır. TEC modüller çok çeşitli büyüklükte ve şekilde olabilirler. Tipik bir TEC modülün alanı birkaç  $\text{mm}^2$  ile birkaç  $10 \text{ cm}^2$  değerleri arasında değişir. Peltier eleman, iki tane seramik yüzey arasına bir dizi yarı iletken çiftin yerleştirilmesiyle oluşturulur. Çalışma sırasında, DC akım TEC modül üzerinden akarken, Peltier etkisi ile ısı transferi gerçekleşir ve seramik yüzeyler arasında sıcaklık farkı meydana gelir. Böylece TEC modülün bir yüzü ortam sıcaklığının altına inerken diğer yüzü ise ortam sıcaklığının üzerine çıkar.

TEC modüller n-tipi ve p-tipi yarı iletkenlerin birbirlerine seri olarak bağlanmaları ile oluşturulurlar. Soğuk eklemde (jonksiyon), elektron ve deşiklerin (hole) oluşumu sırasında ortamdaki emilen ısı, sıcak eklemde elektron ve deşiklerin birleşimiyle ortama serbest bırakılır. Bu şekilde ısı soğuk eklemde sıcak eklem dışarıdan sağlanan elektriksel güçle pompalanmış olur. Elektriksel güç kaynağı, elektron ve deşiklerin sistem içerisinde hareket etmesi için gerekli olan enerjiyi sağlar.

TEC modüller özellikle elektronik donanımların soğutulması, portatif soğutucular gibi küçük ölçekli soğutma uygulamaları için çok uygun cihazlardır. TEC modüller aktif soğutma ihtiyacı olan yerler için ideal olup modül başına 600 W soğutma gücü elde edilebilmektedir. TEC modüller çok verimli cihazlar olmamakla birlikte, hareketsiz parçalar, soğutucu akışkana gerek duyulmaması, sessiz ve titreşimsiz çalışma, küçük boyutlar, uzun ömür ve hassas sıcaklık kontrolü gibi avantajlara sahiptirler.

TEC modüller; gıda, tıp, telekom, fotonik ve endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan yoğun ve hassas kontrollü ısı atımı işlemi için kullanılırlar.

## 1.1 Tezin Amacı

TEC modüller, kullanılmaya başlandığından beri birçok tasarım ve soğutucu sistem geliştirilmiştir. Ancak TEC modüllerin en temel problemlerinden biri olan atılan ısının sıcak yüzeyden etkin bir şekilde uzaklaştırılamaması problemine nihai bir çözüm henüz bulunamamıştır. Geleneksel TEC soğutucu dizaynlarında kanatçık ve fan yapıları kullanılmaktadır. Ancak soğuk yüzeyden sıcak yüzeye çok küçük bir alanda yüksek yoğunlukta ısı transferi (pompalandığı) gerçekleştiği için bu ısının sıcak yüzeyden uzaklaştırılması güçleşmektedir. Buna bağlı olarak Fourier ısı kaçakları gibi ters yönlü ısı transferi ve Joule ısınması sebebiyle, soğutma performansı olumsuz etkilenmekte ve TEC modüllerde bir yandan Peltier etkisiyle soğuk yüzeyden sıcak yüzeye ısı transfer edilirken diğer yandan da sıcak yüzeyden soğuk yüzeye iletimle ısı transferi olmaktadır (ısı kaçakları). Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı çok büyüdüğünden ise iletimle olan ısı transferi Peltier etkisi ile olan ısı transferine eşit hale gelmekte ve soğuk yüzeyden sıcak yüzeye net ısı transferi sıfır olmaktadır. Hatta bu noktadan sonra Joule ısınması nedeniyle modül soğutma işlevini tamamen kaybederek bir çeşit ısıtıcı gibi davranmaya başlamaktadır. Bu nedenle Peltier etkisi ile sıcak yüzeye aktarılan ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması çok büyük önem arz etmektedir. Sıvı soğutmalı sistemler bu noktada kanatçıklı yüzey ve fan sistemine bir alternatif oluşturmuş ve daha etkin bir soğutma sağlamıştır. Ancak ısı kontak dirençleri sebebiyle yeterli miktarda ısı atımı yapılamamaktadır. Bu tez çalışmasında; bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak amacıyla sıcak yüzeyden ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için doğrudan temaslı sıvı soğutmalı ve doğrudan temaslı film soğutmalı ısı değiştiricilerinin (HEX) TEC modüllerin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu tez kapsamında TEC modüllerin yüksüz durumda oluşturabildikleri maksimum sıcaklık farkı, belirli bir soğutma yükü değerindeki COP değerleri belirlenmiş olup, bunların TEC modüle uygulanan akım değerlerine ve birbirlerine göre değişimleri incelenmiştir. İnce film ve kütleli soğutmalı ısı değiştiricilerin TEC modüllerinin performansı üzerindeki etkileri incelenerek elde edilen iyileşmeler sonuç grafikleri üzerinde tartışılmıştır.

## 1.2 Literatür Araştırması

TEC modüller literatürde uzun yıllardan beri araştırılan bir konudur. TEC modüllerin araştırma alanları ise genellikle modüllerin karakterizasyonu, modellemesi ve malzeme yapısının iyileştirilmesi için yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. TEC modüllerin performanslarının iyileştirilmesi için sistemin çeşitli dizayn parametreleri değiştirilmiş ve bunun sonucunda da soğutma yükü ve performans katsayısı gibi değerler karşılaştırılarak değişim incelenmiştir. Termoelektrik modüllerin performanslarını iyileştirmenin yollarından biri de modülün sıcak yüzeyinde ısı birikmesini engelleyerek, hem soğutma performansını hem de soğutma yükünün artırılması olarak belirtilebilir. Literatürde termoelektriklerin performansının artırılması için ısı değiştiricilerin geliştirilmesi, termal dirençlerin soğuma performansını üzerine etkisi, ısı değiştiricilerin malzeme yapıları ve soğutucu akışkanların özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve bunların geliştirilmesi için teorik ve deneysel bir çok çalışma yapılmıştır. Ancak termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyinden ısının uzaklaştırılması için doğrudan temaslı ısı değiştiricileri üzerine literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte konu ile ilgili literatürdeki bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Shan, Wu ve Tian (2010) çalışmalarında sabit sıcaklık uygulamalarının birçok alanda önemli olduğunu vurgulamışlardır. TEC'lerin hareketli parçalarının olmaması, küçük boyutlu olması ve hem ısıtma hem de soğutma yeteneği olması gibi avantajlarından dolayı bu alanda önemli olduklarını söylemişlerdir. Bu yüzden de TEC'ler ile hassas sıcaklık kontrolünün sadece TEC'lerin akımını ayarlayarak kolaylıkla yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Ciylan ve Yılmaz (2006) TE modüllerin askeriyeden uzaya, termal kameralardan tıba kadar birçok alanda geniş bir uygulama bulunduğunu ifade etmişler ve bir universal mikrokontrol test sistemi ile TE modüllerin dinamik parametrelerini belirlemeye çalışmışlar. Bu test sistemi ile, TE modülün dinamik parametreleri olan sıcak taraf sıcaklığı, modül çalışma voltajı, modül akımı ve TE modülün performansı ölçülmüştür.

Huang ve Duang (2000) çalışmalarında TE soğutucuların sistem dinamiği modeli ve sıcaklık kontrolünü incelemişlerdir. Bu çalışmada TE soğutucuların kullanıldıkları elektronik cihazların soğutulmasında değişken dış ortam ve değişken sıcak taraf

şartlarında bile, soğutulan kısımdaki sıcaklığın sabit ve dengeli olması gerektiğine vurgu yapılmıştır. Bunun için ise dinamik sistemin tanımlanması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında kısa-sinyal lineerleştirme metoduyla sistemin dinamik yapısını belirlemişlerdir. Buradan yola çıkarak TEC modüllerin soğuk tarafı için analog bir kontrol sistemi tasarlamışlar ve böylece sıcaklığı kontrol altına almaya çalışmışlardır.

Sofrata (1995) termoelektrik soğutucularda alternatif ısı uzaklaştırılması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın ana amacı termoelektrik soğutucuların performansını artırmak için, modülün sıcak yüzeyinden daha efektif bir ısı atım metodu geliştirmektir. Bunun için tekli ve çiftli fan sisteminin yanında doğal taşınımlı baca sistemini test etmiştir. Böylece termoelektrik modülün soğuk yüzeyinde  $-3^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa düşülmüştür. Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı doğal soğutmada  $26^{\circ}\text{C}$ , tek fanlı sistemde  $22^{\circ}\text{C}$ , iki fanlı sistemde ise  $14^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Sıcaklık farkının yanı sıra doğal sistemde elektrik kullanılmadığı için enerji sarfiyatı yapılmadığı ve tasarruf sağlandığı belirtilmiştir.

David, Ramousse ve Luo (2012) termoelektrik modüllerin çalışma koşullarını ve termoelektrik modüllere bağlı ısı değiştiriciyi optimize ederek termoelektrik ısı pompasının performansının artacağını göstermişlerdir. Çalışma iki termoelektrik modül ve içlerinde su akabilen mini kanallı ısı değiştiricilerle yapılmıştır. Optimize edilmesi gereken ilk değerler mini kanalların sayısı, çapları ve akışkanın kütleli debisi olarak belirlenmiştir. Isı transferini artırmak için ısı değişim alanının genişletilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunun yanında kanal sayılarını azaltıp, kanal çaplarının genişlemesi gerektiğini söylenmiş ve ısı transferinin artmasına bağlı olarak basınç düşümünün ve ısı transfer katsayısının artacağı da belirtilmiştir.

Esarte, Min ve Rowe (2001) termoelektrik jeneratörler için ısı değiştiricilerin modellemesini yapmışlardır. Çalışmalarında akışkanın akış hızının, ısı değiştirici geometrisinin, akışkanın özelliklerinin ve giriş sıcaklıklarının termoelektrik jeneratör tarafından üretilen enerjiye etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada geometrideki herhangi bir değişimin ısı değiştiricinin toplam ısı transfer katsayısını değiştireceği belirtilmiştir.

Vian ve Astrian (2008) termoelektrik modüllerin soğuk yüzeyleri için ısı değiştirici isimli çalışmalarında, termosifon prensipleriyle çalışan, faz değişimli ve kapiler



devinimli bir sistem geliştirmişlerdir. Bu cihaz, Peltier elemanla soğutulan ortam arasındaki termal direnci 0.513 K/W (finli yüzey ile), 0.323 K/W değerine düşürmüştür. Analitik hesaplamalar ve termosifon gözenekli ortamın yapılan deneylerle optimizasyonu yapılmış ve bir kaç prototip test edilmiştir. Buna bağlı olarak kendi deney koşullarında termoelektrik soğutucunun performans katsayısında %32lik (0.297den 0.393'e) bir artış görülmüştür.

Astrain, Vian, Martinez ve Rodriguez (2010) yaptıkları çalışmada ısı değiştiricilerin termal dirençlerinin termoelektrik jeneratörler üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu modelde, sonlu elamanlar yöntemi kullanılarak, ısı değiştiricileri, ısı kaynağı ve ısı kuyusu dahil olmak üzere termoelektrik jeneratör sisteminin performansı simüle edilmiştir. Matematiksel modelin doğruluğu, bir test prototipiyle kontrol edilmiştir ve maksimum hata %5ten daha az olarak belirlenmiştir. Bu çalışma termal dizaynın uygulamadaki rolünün çok önemli olduğunu göstermiştir. Termal direncin %10 azaltılması, elektrik üretiminin %8 artmasını sağlamıştır.

### **1.3 Tezde Elde Edilen Temel Sonuçlar**

Bu çalışmada dizayn edilen ısı değiştiricilerin, termoelektrik soğutucu modül üzerindeki etkileri deneysel olarak farklı dış ortam sıcaklıklarında ve ısıl yük değerlerinde incelenmiş ve aşağıdaki temel ilişkiler elde edilmiştir:

- Performans katsayısının, soğutma gücü ile değişimi
- Elde edilebilen en düşük sıcaklık değerlerinin akımla değişimi
- Isı değiştiricilerin sistemin soğutma gücüne olan etkisi
- Isı değiştiricilerin sistemin performansına etkisi
- Farklı ortam koşullarında soğutucu sistemin davranışı



## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1 Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik etkiler günümüzden 150 yıl öncesine dayanır ve bunlar Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri olarak bilinirler. 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından farklı metallerden oluşturulmuş bir devrenin, farklı sıcaklıklardaki eklem yerlerinin bir manyetik pusulayı etkileyebileceğini keşfetmiştir. Başlangıçta Seebeck bu olayı sıcaklık farkından dolayı oluşan manyetik bir indüklenme olduğuna inanmıştır, bu yüzden de bu olayı termomanyetik etki olarak açıklamıştır. Bundan sonra ise Danimarkalı fizikçi Hans Christian Orsted bu hatayı anlamış, bu etkinin Ampere yasasına göre indüklenmiş bir elektrik akımı olduğunun farkına varmıştır ve bu olayı termoelektrik etki olarak adlandırmıştır.

Fransız fizikçi ve saat üreticisi Jean Charles Athanase Peltier, Seebeck'den 13 yıl sonra 1834 yılında, kendi adıyla anılan Peltier etkisini keşfetmiştir. Peltier, birbirine bağlı iki farklı metalden oluşan devreden akım geçirildiğinde, akımın yönüne bağlı olarak, metallerin eklem yerlerinin birinden ısı soğururken, diğerinden ise ısı salınımı olduğunu bulmuştur (Goldsmid, 2009).

Başlangıçta Seebeck ve Peltier etkilerinin birbirlerine bağlı olduğu fark edilmemiştir, fakat bu durum 20 yıl sonra 1855 yılında, daha sonra Lord Kelvin diye anılan William Thomson tarafından fark edilmiştir. W. Thomson, termodinamik teorileri kullanarak, Seebeck ve Peltier etkiler arasında matematiksel bağlantılar oluşturmuştur ve bu matematiksel bağlantılar sayesinde bugün Thomson etkisi olarak bilinen etkiyi tahmin etmiştir ve daha sonra da bu etkiyi ispatlamıştır. Thomson etkisi, sıcaklık gradyanı altındaki bir metal telden akım geçirilmesi sonucu üretilen tersinir ısı akısının oluşumu ile ilişkilidir (Rowe, 2006). Thomson etkisi, termoelektrik cihazlar için birincil öneme sahip olan bir etki olmamakla birlikte, detaylı bir hesaplamada ihmal edilmemelidir (Rowe, 2006).

### 2.1.1 Seebeck Etkisi

Seebeck etkisi, açık bir devrede iki farklı metal ya da yarı iletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkan voltaj üretimi olarak tanımlanır ve bu etki 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiştir.

Bu olayı Şekil 2.1 üzerinden anlatacak olursak;

İki farklı iletken olan a ve b malzemelerinin oluşturduğu devre elektriksel olarak seri, termal olarak ise paralel bağlıdır. Eğer A ve B'nin birleşim noktaları  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarında ve  $T_1 > T_2$  olacak şekilde farklı sıcaklık değerlerinde tutulurlarsa, C ve D noktaları arasında açık bir elektromotor kuvvet (voltaj) değeri oluşur ve bu değer;

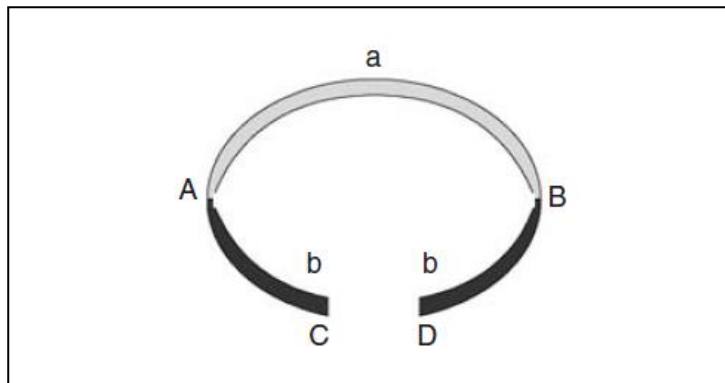
$$V = \alpha(T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

veya,

$$\alpha(T) = \left( \frac{dV}{dT} \right)_{I=0} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir (Rowe,2006). Bu olayda düşük sıcaklıktaki tarafa soğuk taraf, diğerine ise sıcak taraf denilmektedir.

Yukarıdaki denklemden  $\alpha$  Seebeck katsayısıdır, birimi ise V/K ya da  $\mu\text{V/K}$  olarak alınır. Literatürde Seebeck katsayısı için bazen  $\alpha$  yerine S gösterimi de kullanılmaktadır. Denklem (2.2)'de; V Seebeck Voltajı (V),  $\Delta T$  soğuk ve sıcak taraf arasındaki sıcaklık farkını (K) göstermektedir.



Şekil 2.1 : Şematik basit bir termokupl (Rowe,2006)

Çift a ve b farklı malzemelerinden oluştuğu için Seebeck katsayısı,

$$\alpha_{AB} = |\alpha_A| + |\alpha_B| \quad (2.3)$$

Burada  $\alpha_A$ , a malzemesinin Seebeck katsayısını  $\alpha_B$  ise b malzemesinin Seebeck katsayısını temsil etmektedir.

Malzemelerin Seebeck katsayıları genellikle termokuplların ve Peltier elemanlarının performansını belirler. Seebeck katsayısı basitçe elektronların ısı ve elektrik taşıyıcılığıyla ilgilidir. İletken bir telde sıcaklık gradyanı yüzünden elektronlar sıcak taraftan, soğuk tarafa difüze olurlar. Bu yüzden bu harekete ters yönde bir voltaj oluştururlar. Seebeck katsayısı sıcaklık başına voltaj olarak tanımlanır ve tahmin edilebileceği gibi malzemedan malzemeye farklılık gösterir. Aşağıdaki tabloda bazı malzemelerin Seebeck katsayıları verilmiştir.

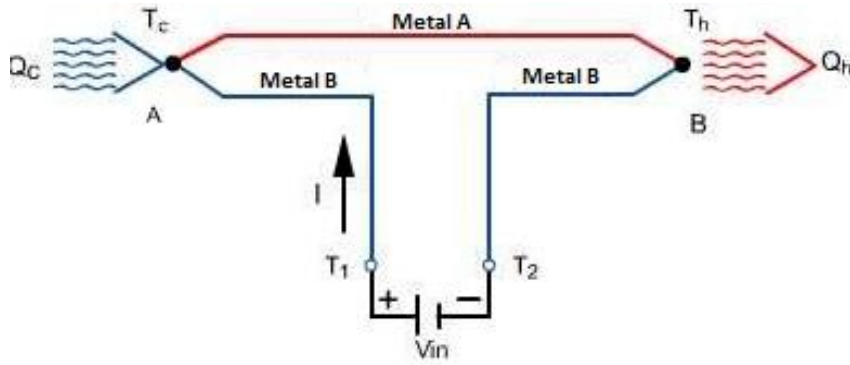
**Çizelge 2.1:** Platinyuma göre bazı maddelerin Seebeck Katsayıları (Url-1)

Malzeme	Seebeck Katsayısı $\mu\text{V/K}$
Antimon	47
Nikrom	25
Molibden	10
Kadmiyum	7.5
Tungsten	7.5
Altın	6.5
Gümüş	6.5
Bakır	6.5
Kurşun	4.0
Alüminyum	3.5
Karbon	3.0
Civa	0.6
Platinyum	0
Sodyum	-2.0
Potasyum	-9.0
Nikel	-15
Konstantan	-35
Bizmut	-72
Selenyum	900
Tellür	500
Germanyum	300
n-tipi $\text{Bi}_2\text{Te}_3$	-230
p-tipi $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300
p-tipi $\text{Sb}_2\text{Te}_3$	185
PbTe	-180

### 2.1.2 Peltier Etkisi

Peltier etkisi 1834 yılında Fransız fizikçi Jean Peltier tarafından keşfedilmiştir. Bu etki Seebeck etkisinin tersidir. Peltier etkisi elektriksel taşıyıcılar (elektronlar ve holeler) tarafından taşınan ısının ölçüsüdür.

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi A ve B gibi iki farklı metalden oluşan bir devreden bir I akımı geçirildiğinde, A noktasındaki soğuk eklemden ısı soğurulurken, B noktasındaki sıcak eklemden ısı atılır. Atılan ısı Peltier ısısı olarak bilinir ve devreden akan akımla orantılıdır, (Denklem 2.4).



Şekil 2.2 : Potansiyel altında oluşan Peltier etkisi. (Url-2)

Atılan ısı Peltier ısısı olarak bilinir ve devreden akan akımla orantılıdır.

$$\dot{Q} \propto I \quad (2.4)$$

Burada, Q Peltier Isısı, I devreden akan akımdır.

Buna bağlı olarak, maddelerin Peltier katsayıları sabit sıcaklıkta devreden geçen akımla, ısı akısı arasındaki oran olarak tanımlanır. Birimi J/C veya V'dur.

$$\pi = \frac{\dot{Q}}{I} \quad (2.5)$$

$\dot{Q}$  ısı akısı (W),  $\pi$  Peltier katsayısını ifade etmektedir.

Eğer devrede yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi iki farklı A ve B malzemesini içerdiği durum incelenirse, I akımı devrenin her tarafında aynıdır, fakat soğurulan ve atılan ısılar arasında bir dengesizlik vardır. Buna göre,

$$\dot{Q} = \pi_{AB}I = (\pi_A - \pi_B)I \quad (2.6)$$

şeklinde olur.

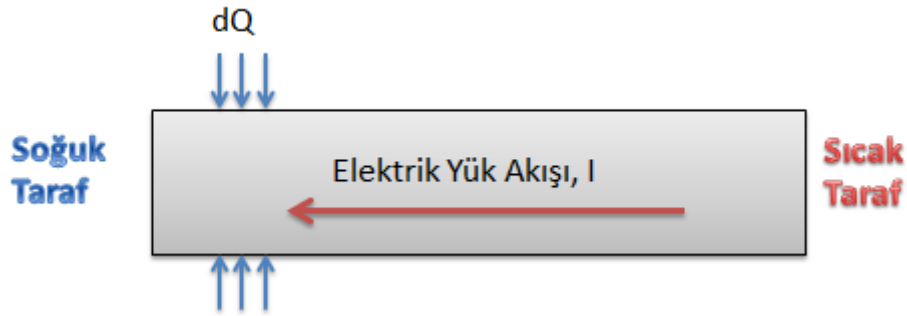
Burada  $\pi_{AB}$ , A ve B noktaları arasındaki eklem Peltier katsayısıdır. Genellikle p-tipi yarı iletkenler pozitif Peltier katsayısına, n-tipi yarı iletkenler ise negatif katsayıya sahiptirler. Seebeck ve Peltier katsayıları doğrudan birbirlerine dönüştürülebilirler.

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB}T \quad (2.7)$$

TE soğutma cihazlarındaki bu Peltier etkisi, TE ısı pompasındaki gibidir. Elektrik akımının yönü değiştirilerek, ısı transferinin yönü değiştirilebilir.

### 2.1.3 Thomson Etkisi

William Thomson 1851 yılında Peltier ısı ve Seebeck potansiyeli arasında bir bağlantı olması gerektiğini düşünmüştür. Daha sonra termodinamik teoriyi bu probleme uygulayarak arada bir bağlantı kurmuştur ancak Thomson'un teorisi üçüncü bir termoelektrik etki olması gerektirdiğini göstermiş bunun sonucunda da bugün Thomson etkisi diye bilinen etki ortaya çıkmıştır. Thomson etkisi uçları arasında bir sıcaklık gradyanı olan bir telden elektrik geçirilmesiyle oluşan ısıtma veya soğutma olayını tanımlar.



Şekil 2.3 : Thomson etkisi

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi bir iletken üzerinden J akım yoğunluğu geçerse, birim zamanda, birim hacimden üretilen net ısı;

$$\dot{q}''' = \rho J^2 - \tau \vec{J} \cdot \vec{\nabla}T \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\dot{q}'''$ ; birim hacim başına üretilen ısı,  $\rho$ ; iletkenin öz direnci, J; Akım yoğunluğu ( $A/m^2$ ),  $dT/dx$ ; Malzemeye uygulanan sıcaklık gradyanı,  $\tau$ ; Thomson katsayısı (V/K)dir.

Thomson katsayısı  $\tau$ ,

$$\frac{dQ}{dx} = \tau I \frac{dT}{dx} \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,  $\frac{dQ}{dx}$ ; uzunluk başına ısı miktarı,  $I$ ; elektrik akımıdır.

Thomson katsayısı  $\tau$  pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Thomson etkisi genellikle Peltier soğutması ya da Joule ısıtması ile kıyaslandığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

#### 2.1.4 Kelvin Eşitlikleri

İlk Kelvin bağıntısı Thomson ve Seebeck katsayıları arasındaki aşağıdaki bağıntıyı verir;

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2.10)$$

Burada  $T$  mutlak sıcaklıktır.

İkinci Kelvin bağıntı ise;

$$\pi = \alpha T \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir ve Seebeck ile Peltier katsayıları arasındaki ilişkiyi verir. Kelvin bağıntıları TE modüllerden güç üretimi ile soğutma arasındaki temel ilişkiyi ortaya koyar.

## 2.2 Tersinmezlikler

### 2.2.1 Joule Isısı

Joule ısısı, elektrik akımının bir iletkenin geçmesiyle ortaya çıkan ısı olarak tanımlanır. İlk olarak 1841 yılında James Prescott Joule tarafından keşfedilmiştir. Joule yaptığı deneylerde, üretilen ısıyı uygulanan akımın karesiyle, telin elektriksel direncinin çarpımına eşit olduğunu bulmuştur.

$$\dot{Q} = I^2 R \quad (2.12)$$



TE modüllerde n ve p elementlerinin dirençleri seri bağlı oldukları için toplam direnç aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$R = \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \quad (2.13)$$

Burada,

$\rho_n, \rho_p$ ; n ve p maddelerinin elektriksel dirençleri,  $L_n, L_p$ ; n ve p uzunlukları  $A_n, A_p$ ; n ve p maddelerinin kesit alanlarını göstermektedir.

### 2.2.2 Fourier Yasası

Bir yüzeyden ısı iletim oranı, yüzey boyunca sıcaklık farkı ve ısı iletimi alanıyla doğru orantılı, fakat yüzeyin kalınlığıyla ters orantılıdır. (Yunus Çengel, 2002)

Bunu denklem 2.14'deki gibi ifade edebiliriz,

$$\text{Isı iletim oranı} \propto \frac{\text{Alan} * \text{Sıcaklık farkı}}{\text{Kalınlık}} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.15'de denklem kullanılan formuyla verilmiştir.

$$\dot{Q}_{ilet} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.15)$$

Burada; k; termal iletkenlik (W/m °C), A; Alan,  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ ; Sıcaklık gradyanı,  $\Delta x \rightarrow 0$  olduğu durumda ise formül aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{Q}_{ilet} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

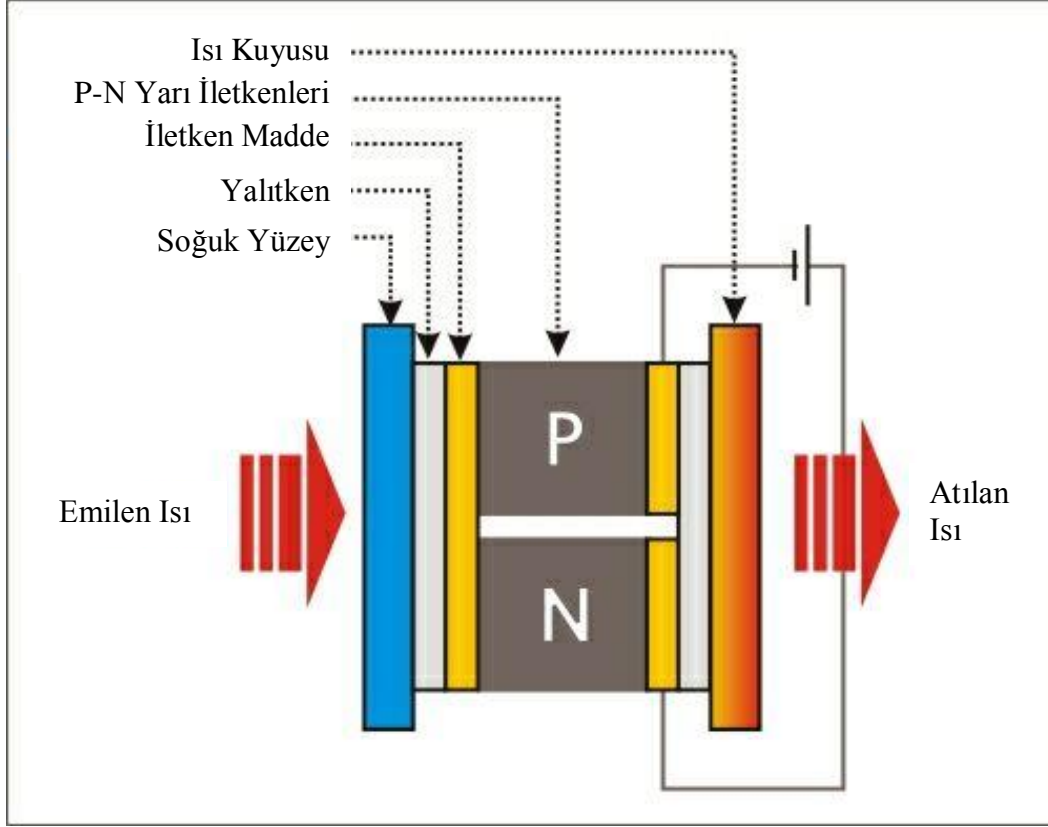
Bu formül Fourier yasası olarak bilinir. Yasa 1822 yılında Fransız fizikçi Jean Baptiste Joseph Fourier tarafından keşfedilmiştir.

Termal olarak paralel bağlı olan ısı çiftlerinde termal iletkenlik

$$K_{tot} = \frac{k_n A_n}{L_n} + \frac{k_p A_p}{L_p} \text{ (W/°C)} \quad (2.17)$$

Burada;  $k_n$ ,  $k_p$ ; n ve p maddelerinin termal iletkenliği (W/m. °C),  $l_n$ ,  $l_p$ ; n ve p maddelerinin uzunlukları (m),  $A_n$ ,  $A_p$ ; n ve p maddelerinin kesit alanlarını ( $m^2$ ) göstermektedir.

### 2.3 Peltier Modüller için Temel Denklemler



Şekil 2.4 : TEC'in bileşenlerinin ve Peltier etkisinin gösterimi (Url-3)

Yukarıdaki şekilde Peltier etkisinin görüldüğü bir şemaya yer verilmiştir. Üretimi yapılan TE modüllerin elektriksel olarak seri, termal olaraksa paralel olarak bağlanmış belli sayıda termokupludan oluştuğunu belirtmiştik. TE modüller için şimdi belirleyeceğimiz denklemler ise tek bir çift için ya da birden fazla çift için kullanılabilir genel denklemlerdir.

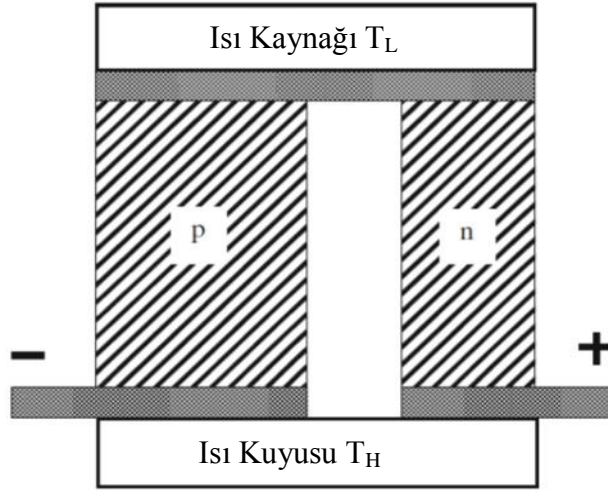
Soğutucular için performans katsayısı diye belirttiğimiz COP önemli bir karşılaştırma büyüklüğüdür. Soğutucuların amacı soğutulan ortamdaki ısıyı atmaktır, bu amacı gerçekleştirmek için ise bir iş girdisine ihtiyaç vardır (Çengel, 2001). Soğutucular için verimliliği ifade eden bu büyüklük aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$COP = \frac{\text{İstenen çıktı}}{\text{Gerekli girdi}} = \frac{Q_L}{W_{net}} \quad (2.18)$$

Eğer termokuplın ısıl iletim ve elektrik direncinden kaynaklanan kayıpları yok ise, COP ideal değeri olan Carnot çevriminin değerine ulaşılabilir (Goldsmith, 2009). Bu ideal COP değeri de;

$$COP = \frac{T_L}{(T_H - T_L)} \quad (2.19)$$

eşitliği ile bulunur. Burada;  $T_L$ ; kaynağın sıcaklığı,  $T_H$ ; ısı kuyusunun sıcaklığıdır.



**Şekil 2.5 :** Basit bir soğutucu (ısı pompası) (Goldsmid, 2009)

Daha önce termoelektrik etkilerde belirtildiği gibi, p-n çiftinden, I akımı geçirildiğinde soğuk eklemdeki  $T_L$  sıcaklığında ki ısı atım oranının  $\pi_{pn}$  I denklemiyle verildiğini göstermiştik. Buradan da Kelvin eşitliğini kullanarak

$$\alpha_{pn} = (\alpha_p - \alpha_n) = (\pi_p - \pi_n)/T_L \quad (2.20)$$

TE modülün Seebeck katsayısı bulunabilir. Yani Peltier soğutmasının etkisiyle kaynakta

$$(\alpha_p - \alpha_n)IT_L \quad (2.21)$$

eşitliğine göre bir soğuma olacaktır. Ancak soğutma etkisine ters yönde

$$(T_H - T_L) \cdot (K_p + K_n) \quad (2.22)$$

oranında bir ısı iletimi söz konusu olmaktadır. Burada  $K_p$  ve  $K_n$ , p-n çiftlerinin termal iletkenlikleridir. Bu ısı iletiminin yanında, Joule ısısından kaynaklanan

$$I^2(R_p + R_n)/2 \quad (2.23)$$

ifadesi uyarınca gelen bir ısı yük daha vardır. Burada  $R_p$  ve  $R_n$ , çiftlerin dirençleridir. Ayrıca Joule ısısının yarısının ısı kuyusuna, diğer yarısının ise kaynağa geçtiği için paydada 2 vardır.

Bu durumların hepsi göz önüne alınıp, soğutma gücü için genel bir denklem yazılırsa;

$$\dot{q}_L = (\alpha_p - \alpha_n)IT_L - (T_H - T_L)(K_p + K_n) - I^2(R_p + R_n)/2 \quad (2.24)$$

olur.

Bu soğutma gücünü sağlayabilmek için harcanması gerekli elektriksel iş ise aşağıdaki gibidir;

$$\dot{w} = (\alpha_p - \alpha_n)I(T_H - T_L) + I^2(R_p + R_n) \quad (2.25)$$

Burada, ilk terim termodinamik voltajı yenmek için gerekli olan enerji, ikinci kısım ise dirençten kaybolan enerjidir.

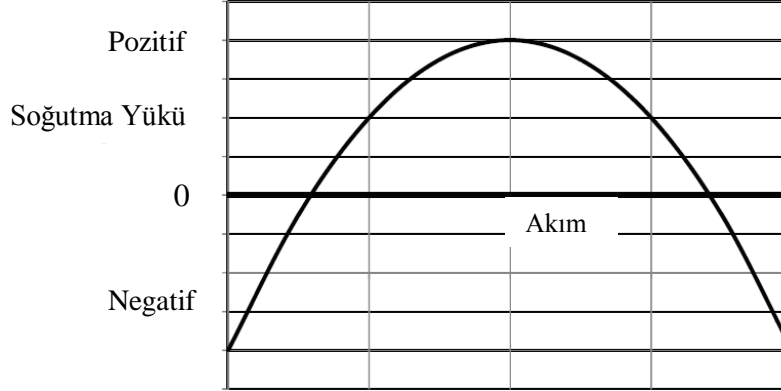
Buna göre COP denkleminde belirtildiğine göre, TE modülün COPsi;

$$COP = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)IT_L - (T_H - T_L)(K_p + K_n) - I^2(R_p + R_n)/2}{(\alpha_p - \alpha_n)I(T_H - T_L) + I^2(R_p + R_n)} \quad (2.26)$$

olur. Buradan da anlaşılacağı üzere COP, soğutma gücüne bağlı olduğu kadar akıma da bağlıdır.

Genel soğutma denkleminde de anlaşılacağı üzere akımın artması sadece lineer olarak Peltier etkisini artırmaz, Joule ısısı da  $I^2$  ye bağlı olarak artar. Bu yüzden aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi bir akım-soğutma grafiği ortaya çıkar. Grafikten de anlaşılacağı üzere akımın belli bir değeri aşmasıyla peltier etkisiyle Joule ısısı arasındaki fark kaybolmaktadır. Soğutma gücü, Peltier etkisi, Joule ısısını ve ısı

iletimini dengeleyinceye kadar negatiftir. Başka bir değişle soğutma yükünün maksimum değerine çıktığı belli bir akım değeri vardır. Genel soğutma denkleminde de anlaşılacağı üzere maksimum değer Peltier etkisinin, soğuk ekleme ulaşan Joule ısısının iki katına eşit olduğu değerdir.



**Şekil 2.6** : Bir TEC için soğutma gücünün akıma göre değişimi. (Goldsmid, 2009)

Bu soğutma uygulamaları için özel olan 3 durum vardır. Bu durumları sıralayacak olursak;

- 1) Maksimum soğutma gücü
- 2) Verilen sıcaklık farkı için maksimum COP
- 3) Maksimum sıcaklık farkı

Birinci durum için  $\frac{dq}{dI} = 0$  işlemi yapıldığında maksimum soğutma gücünü veren akım değeri;

$$I_q = (\alpha_p - \alpha_n)T_L / (R_p + R_n) \quad (2.27)$$

şeklinde bulunur.

Termoelektrik etkileri açıklarken kullanılan malzemelerin TE modülün özelliklerini etkilediğini belirtmiştik. TE modüllerde kullanılan malzemelerin performansı, değer katsayısı diye tabir edilen (figure of merit) aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$Z = \frac{\alpha^2 T}{KR} \quad (2.28)$$

modül için bu performans katsayısı yazılırsa;

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 T}{(K_p + K_n)(R_p + R_n)} \quad (2.29)$$

denklemini elde edilir.

Buna göre maksimum soğutma gücünün elde edildiği  $I_q$  akımındaki COP ise,

$$COP_{qmax} = \frac{\frac{ZT_1^2}{2} - (T_H - T_L)}{ZT_H T_L} \quad (2.30)$$

Şeklinde bulunur.

İkinci özel ilgi alanı optimum, diğer bir değişle maksimum COP. Bu durumu sağlayan akım değeri  $I_{COP}$ ,  $\frac{dCOP}{dI}=0$  işleminin yapılması sonucu denklem 2. 26'dan aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$I_{COPmax} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_2 - T_1)}{(R_p + R_n)[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} - 1]} \quad (2.31)$$

Burada  $T_m$  ortalama sıcaklıktır. Yani  $T_m = (T_L + T_H)/2$  dir. Buradan ise optimum COP

$$COP_{max} = \frac{T_L[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} - (T_L/T_H)]}{(T_L - T_H)[(1 + ZT_m)^{\frac{1}{2}} + 1]} \quad (2.32)$$

olur.

TEC için optimum COP değerini doğrudan almak iyi bir çözüm olmayabilir. Çünkü bu değer altında yapılan soğutma oranı, maksimum değer altında yapılan soğutma oranından küçüktür, özellikle bu durum kaynak ve ısı kuyusu arasındaki sıcaklık farkının düşük olduğu yerlerde olur. Bu yüzden optimum COP durumu elektrik kullanımı açısından ekonomik olabilirken, termoelektrik malzeme açısından ekonomik olmayabilir (Goldsmid, 2009). Bu yüzden seçilecek akım bu iki değer arasında olmalıdır.

Verilen TE malzemeler için performans katsayısı optimize edilebilir. Burada amaç  $(K_p + K_n)(R_p + R_n)$  yi mümkün olduğunca küçültmektir.

Üçüncü önemli karakteristik özellik ise, tek katlı bir TE modülün ulaşabileceği maksimum sıcaklık farkıdır. Bu özellik maksimum soğutma gücünün COP

formülünden bulunabilir. Eğer kaynaktan çekilen ısı  $q=0$  olursa, COP sıfıra düşer bunun sonucunda ise sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki  $(T_H - T_L)$  sıcaklık farkı maksimum değerine yükselir.  $(T_H - T_L)$  değeri ise  $ZT_L^2/2$  ye eşittir. Buna göre;

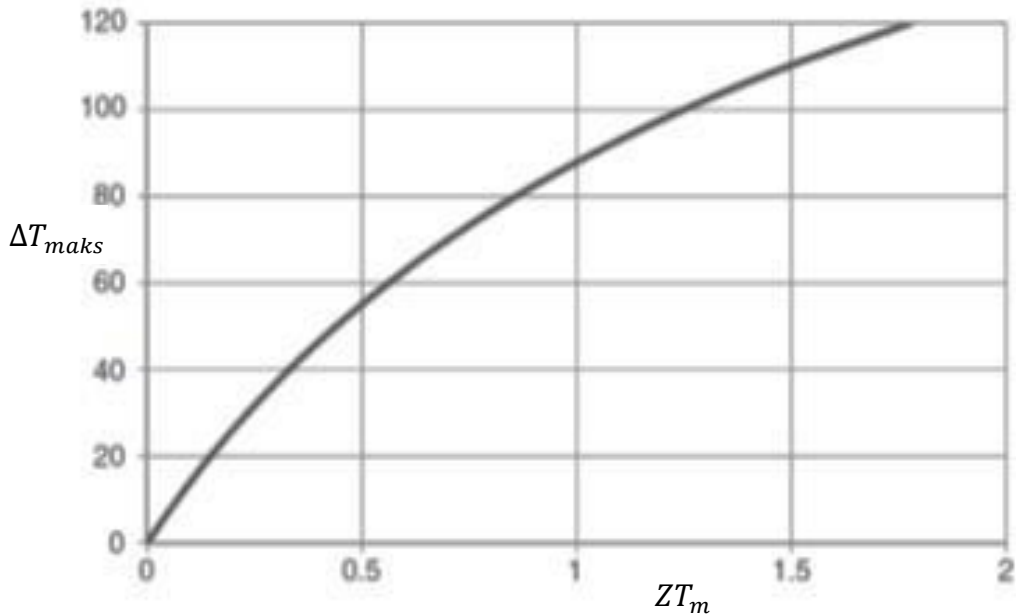
$$\Delta T_{maks} = ZT_L^2/2 \text{ dir.} \quad (2.33)$$

$\Delta T_{maks}$  daki elektrik akımı ise

$$I_{\Delta T_{maks}} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)T_L}{(R_p + R_n)} \quad (2.34)$$

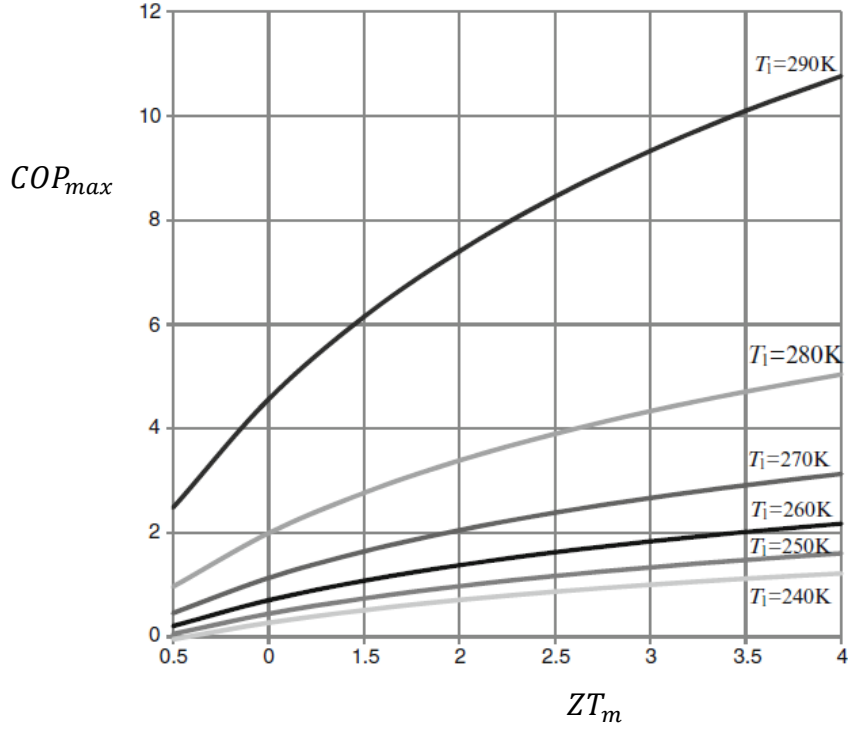
olur.

Şekil 2.7’de gösterildiği gibi  $\Delta T_{maks}$  ile  $ZT_m$ ’nin 300K de tutulan ısı kuyusu ortamındaki durumda değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 2.7 :** Maksimum sıcaklığın  $ZT_m$ ’ye göre değişimi(Goldsmid, 2009)

Şekil 2.8’de optimum COPnin 300K’lik sabit ısı kuyusu ve çeşitli kaynak sıcaklıklarında performans katsayısına göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi TE modülün COP değeri aynı şartlardaki soğutuculardan daha düşüktür. Elbette ki daha düşük elektrik sarfiyatı ve daha düşük kapasiteli ısı kuyuları için, yüksek COP istenmektedir.



Şekil 2.8 : ZT<sub>m</sub>'ye göre Optimum COP değişim grafiği (Goldsmid, 2009)

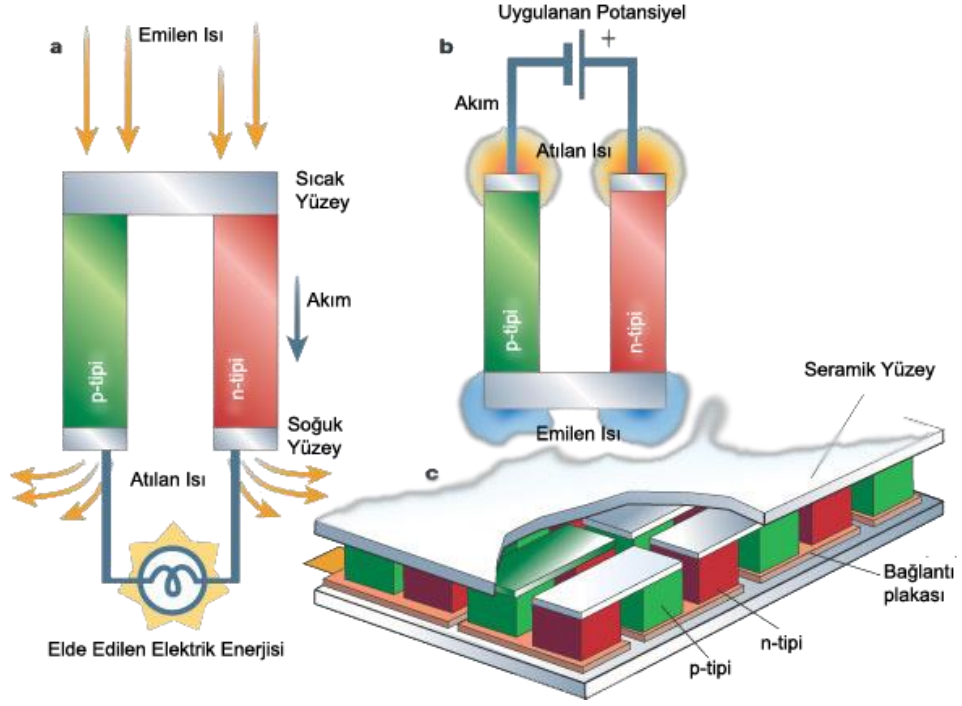
## 2.4 Termoelektrik Modülün Yapısı

TE cihazlar genellikle TEC (soğutucular) ve TEG (jeneratörler) olarak iki kısımda sınıflandırılırlar. Şekil 2.9'da TE modülün genel bir görünümü verilmiştir. Bunun altındaki Şekil 2.10 ise TE etkileri ve modülün yapısını göstermektedir.



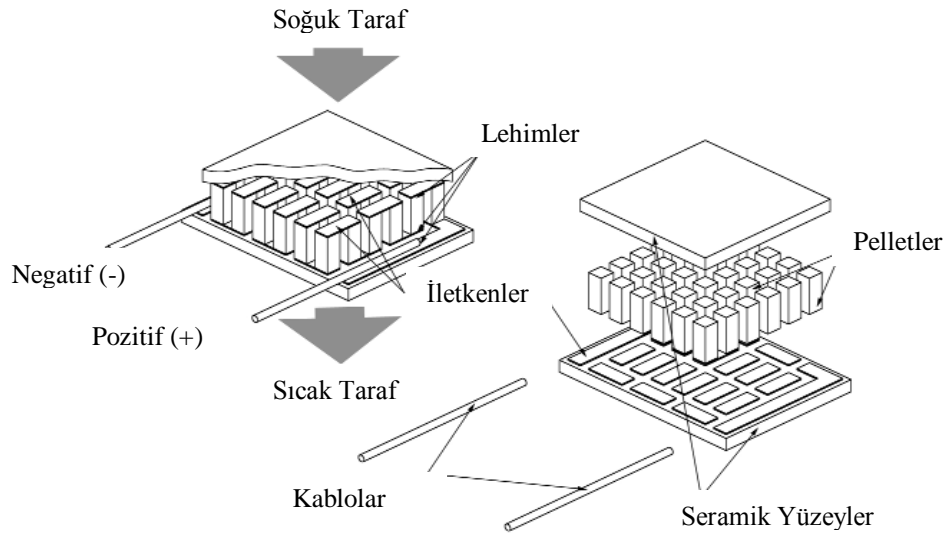
Şekil 2.9 : TE modülün genel görünümü





Şekil 2.10 : Seebeck, Peltier, TE Bileşen (Url-4)

TE modül, iki tane seramik plaka arasında n ve p-tipi yarı iletkenlerden oluşan termal çiftlerin, elektriksel olarak seri, termal olaraksa paralel olarak bağlanıp, lehimlenmesiyle meydana gelmiş cihazlardır. Termoelektriğin yapısı aşağıdaki resimde görülmektedir.



Şekil 2.11 : TE modülün yapısı

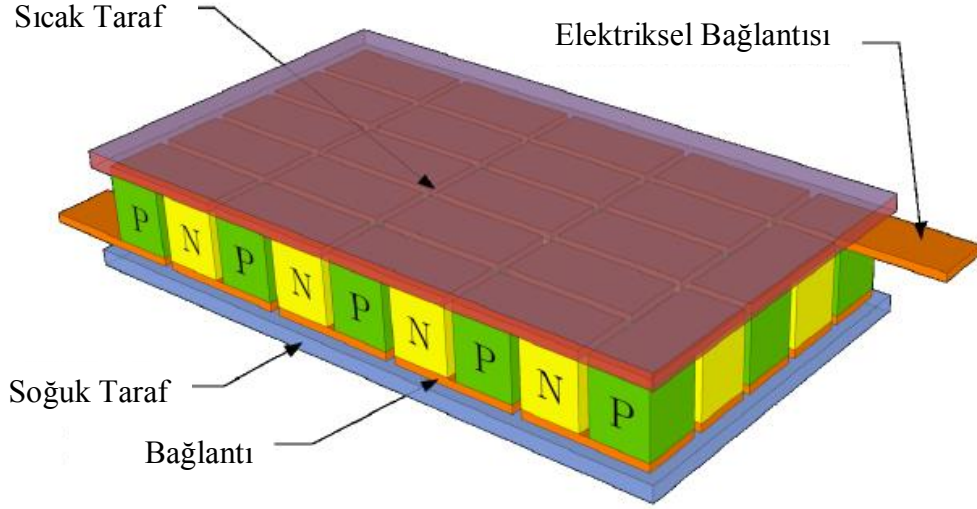
Bir TE modülün içerdiği kısımlar genellikle şöyledir:

- Düzenli bir matriste dizilmiş TE elementler-pelletler. Bu yapıları oluşturmak için genellikle bizmut-telluride, antimon-telluride veya bunların katı çözeltileri kullanılır.
- Seramik plakalar; modülün sıcak ve soğuk yüzeylerini oluşturur. Plakalar, TE modüle mekanik bir bütünlük sağlar. Soğutulacak cisim ve ısı kuyusu arasında güçlü bir elektriksel izolasyon sağlar, bunun yanında iyi bir ısı transferini küçük bir dirençle sağlayabilmek için iyi bir termal iletkenliğe sahip olmalıdır.
- Elektriksel ileticiler, pelletler arasında ki seri elektrik iletimini sağlarlar ve ana kablolarla bağlanırlar. Ana kablolar ise doğru akım kaynağından aldıkları gücü bunlara iletirler.
- Lehimler TE modülün montajını sağlarlar. Lehim genellikle antimon-kalay ve benzeri alaşımlardan oluşur. Lehimin erime sıcaklığı, TE modülün çalışma sıcaklığını sınırlayan faktörlerden biridir. Uzun bir modül ömrü için çalışma sıcaklığı mümkün olduğunca lehimlerin erime sıcaklığından düşük olmalıdır.

TEC ile TEG ler birbirlerinin görevini yapabilirler. Aradaki fark ise elektrik üretimi için jeneratörlerin yüksek sıcaklıklara dayanacak şekilde imal edilmesi ve yüzey iletkenliklerinin artırılarak ortam sıcaklığından maksimum yararlanılmak istenmesidir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardan dolayı daha dayanıklı malzemeden yapılırlar. TEC olduğu gibi TEG için de boyutlar ihtiyaç duyulan gerilime göre ayarlanır. TEGin en tipik örneği termokupllardır. İki farklı yarı iletken malzemenin uçları birleştirilerek oluşturulan termokupllar, farklı sıcaklıktaki bir cisme temas ettirildiğinde, uçları arasındaki  $\Delta T$  sıcaklık farkından dolayı Seebeck etkisine göre sıcaklıklar eşitlenene kadar devreden akım akmaya başlar. (Şahin, 2012)

## 2.5 Çalışma Prensibi

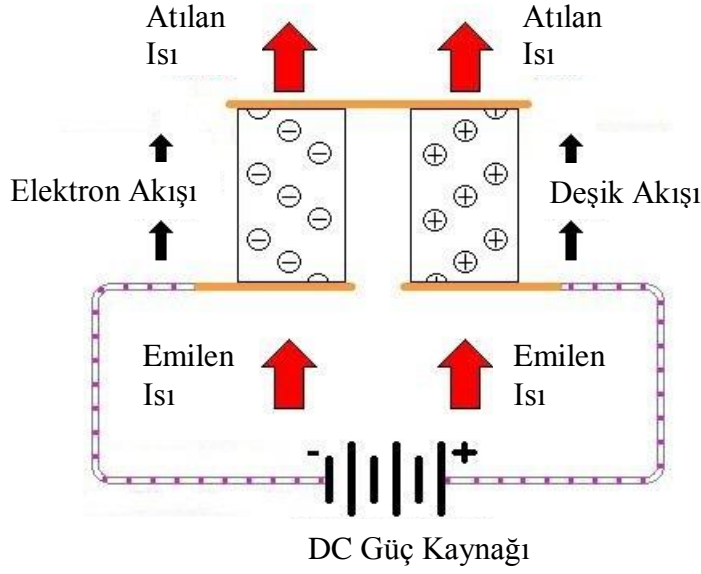
Tipik bir TEC modül Şekil 2.12'de gösterildiği gibi p ve n çiftlerinden oluşur. N-tipi malzemede fazla elektron varken, p-tipi malzemede elektron eksikliği vardır. Bir p ve n şekilde gösterildiği gibi bir çift oluştururlar.



**Şekil 2.12 :** TE modülün p-n çiftlerinin görünümü (Url-5)

TE modülde, elektronlar bakır iletkenler üzerinde kolayca hareket ederler fakat yarı iletkenlerde bu kadar kolay hareket edemezler. Elektronlar bakırları geçer ve sıcak taraftaki p-tipi kısma giriş yaparlar ve p-tipi yarı iletken üzerinde bir tane deşığı dolduracak şekilde hareket ederler. Elektronlar bir deşığe girdiklerinde (deşığı doldurdıklarında), daha düşük bir enerji seviyesine düşerler ve bu süreçte ısı yayarlar. Daha sonra, elektronlar bakırlar üzerinden soğuk tarafa geçerler ve bu sayede daha yüksek enerji seviyesine geri geçerler, bu süreçte ise ısı absorbe ederler. Bundan sonra elektronlar n-tipi yarı iletkene geçerler. Burada ise elektronlar hareket ederlerken, n-tipi yarı iletkenin içinde hareket ettiklerinden daha yüksek enerji seviyelerine itilirler. Bu olay olurken ısı emilimi de olur. Sonunda elektronlar n-tipi yarı iletkenin sonundaki bakırlara serbestçe geçerler ve daha düşük bir enerji seviyesine düşmüş olurlar. Bu süreçte ısı yayarlar. Böylece TE modülün içindeki yük taşıyıcılar, elektronlar ve pozitif deşikler (hole) ısı transferi yaparlar.

Şekil 2.13’de elektron ve deşiklerin hareket yönleriyle emilen ısı ve atılan ısının bu ısı taşıyıcı elemanlara göre taşınım yönleri gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : TEC'lerin genel çalışma prensibi (Url-6)

## 2.6 Termoelektriklerin Uygulama Alanı

TE element kullanan ticari ürünler, günümüzde tüketici pazarından büyük bir pay aldılar. Bunun yanı sıra termoelektriğin yararları, geleneksel cihazların ve ticari faktörlerin üretiminde ucuzlama ve bunun gibi faktörler bu ürünlerin pazara kolay girmesine yardımcı olmuştur. Böylece bu tip ürünler günden güne artan bir kullanıma sahip olmaktadır.

- TE soğutma, tıpta, eczacılık ekipmanlarında, spektroskopi sistemleri, çeşitli detektörler, elektronik ekipmanlar, portatif soğutucular, donmuş gıda, soğuk içecek dağıtıcıları ve içme suyu soğutucularında kullanılmaktadır.
- Yüksek dayanıklı soğutma cihazlarının istenildiği yerlerde, küçük yerlere kolayca monte edildiğinden entegre devrelerde ve PC'lerde kullanılmaktadır.

TEC modüllerin kullanım alanlarını katagorileyerek sıralarsak aşağıda görüldüğü gibi kullanım alanları ortaya çıkmaktadır.

Askeri ve Uzay Araştırmalarında:

Atalet rehber sistemleri, gece görüş sistemleri, elektronik soğutma ekipmanları, soğutulmuş giysiler, taşınabilir soğutucular

Tketicilernnler:

Dinlenme taşıt soğutucuları, mobil ev soğutucuları portatif piknik soğutucuları, içecek soğutucuları, evsel su soğutucu ve arıtıcıları

Laboratuvar ve Bilimsel Ekipman:

İnfrared detektörler, entegre devre soğutucularında, soğuk odalarda, soğuk plakalarda, çiy noktası nemlerleri, sabit sıcaklık banyoları, termostat kalibre banyoları, lazer yn vericileri

Endüstriyel Ekipmanlar:

Mikro işlemcilerde, otomatik ve nümerik kontrol sistemlerinde, tıbbi cihazlarda, termal battanilerde, sabit ve taşınabilir ilaç soğutmalarında, kan analiz makinalarında, doku hazırlanması ve depolanmasında, restoran ekipmanlarında

Diğer Uygulamalar:

Otel odası buzdolapları, otomobil buzdolapları, otomobil koltuk soğutucuları

Aşağıda ticari olarak piyasada bulunan bazı ürünler grlmektedir.

1) Model No. TLC-700 (Firma – Amerika Termoelektrik Soğutma şirketi) (Url-7)

- İ hacim : .5 L
- Voltaj : 120 volt ; Güç: 500 W



şekil 2.14 : Sıvı Dondurucu

2) Model No. 5642A807 (Firma-Coleman) (Url-8)

- İç hacim: 45.5 L
- Volt : 110 volt



**Şekil 2.15 : Mini Buzdolabı**

Günümüzde bir çok üniversite, ticari kuruluş TE modülleri malzeme ve verimlilik açısından geliştirmeye çalışmaktadır. TE modüllerin en büyük handikabı olan verimlilik oranları artırıldığında modüllerin kullanım alanları atık ısının ve soğutma ihtiyacı olan hemen her yerde, büyük avantajlarından dolayı kullanılmaya başlanacaktır.

## **2.7 Termoelektrik Modüllerin Avantajları**

TEC soğutma sektöründe, kullanım alanı, kompleks yapısı ve kolay kullanımı sayesinde bir çok avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar malzeme biliminin gelişmesiyle artış gösterecektir.

- Hareketli parçaları yoktur, bunun sonucunda titreşimde yok.
- Çevreye zararları yoktur.
- Herhangi bir gaz ya da sıvı kullanmazlar.
- Çalışma sırasında ses ya da elektriksel gürültü yapmazlar.
- Bakım gerektirmez.
- Yer çekimine karşı duyarlı olmadığından herhangi bir konumda kullanılabilir (uzay uygulamaları gibi)
- Göreceli olarak çok küçük boyutlar ve hafif
- Geniş aralıkta soğutma kapasitesi (Tek bir TE modül için miliwattlardan 350W'a kadar)

- Yüksek dayanıklılık, kararlı durumda 300000 saati aşkın çalışma
- Hassas sıcaklık ayarı (uygun bir kontrolörle  $10^{-5}$  K'e kadar hassas ayarlama)
- Soğutulan tarafın yönü güç kaynağının polaritesi değiştirilerek kolayca değiştirilmesi böylece soğutma ve ısıtma arasında kolay geçiş
- Geleneksel soğutma uygulamaları için çok küçük ya da hassas olan uygulamalar için daha güvenilir.
- Taşınan ısı miktarının akımla kolayca kontrol edilebilmesi
- Bölgesel soğutma yeteneği

## 2.8 Termoelektrik Modüllerin Dezavantajları

TECler birçok avantajının yanında kısa vadede çözülemeyen birkaç probleme de sahiptirler. Bunları sıralayacak olursak

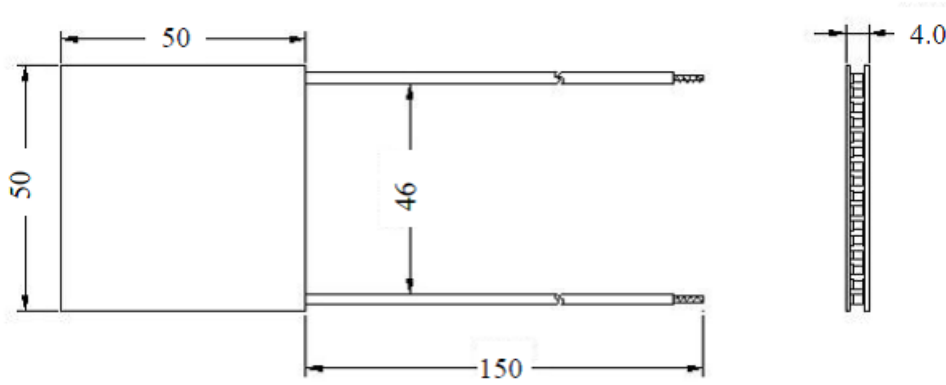
- COP katsayıları genellikle 0.3 ila 1 arasındadır. Klasik soğutucularda ise bu değer daha yüksektir.
- Yüksek soğutma yükleri için uygun değildir. Maksimum soğutma yükleri başta da belirtildiği gibi  $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$  de olmaktadır yani  $\Delta T$  değeri büyüdükçe soğutma yükleri düşer.
- Geleneksel soğutma yöntemlerine göre pahalıdırlar. Watt başına maliyetleri yüksektir.
- DC ile çalıştıklarından çeviriciye ihtiyaç duyarlar.

## 2.9 Deneylerde Kullanılan Termoelektrik Soğutucuların Modellenmesi

Termoelektrik soğutucuların soğutma kapasitelerinin yüzeyler arasında artan sıcaklık farkıyla azaldığı bilinmektedir. Daha önceki çalışmalarda sıcaklık farkını artırmak için kaskad yapılar kullanılmıştır. Bu tasarımlarda kanatçıklı yapılar aracılığıyla soğutulacak hacme olan ısı transferi artırılmış olur.

Bu tezde örnek olarak kullanılan termoelektrik modül Çinli bir üreticiye ait olup  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  yarıiletken malzemesinden üretilmiş ve alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) seramik yüzeylerle paketlenmiştir. Şekil 2.16'da bu modülün boyutları gösterilmektedir. Kullanılan tüm

modüllerin boyutları özdeştir ve kullanılan her modüldeki çift sayısı  $N=263$  olarak belirtilmiştir. Modüllerin bilgileri Çinli firmanın internet sayfasında TEC1-26318T200 koduyla bulunabilir. (Url-9)



Şekil 2.16 : Firmaya ait bir Bi2Te3 modülün boyutları (Url-9)

Kullanılan Peltier modülün performans parametreleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Thermionic firmasına ait Peltier modülün performans özellikleri

Özellik	$T_H=27^\circ\text{C}$	$T_H=50^\circ\text{C}$
$\Delta T_{\max}$ ( $^\circ\text{C}$ )	70	79
$V_{\max}$ (V)	33.1	35.6
$I_{\max}$ (A)	18.8	18.8
$Q_{C\max}$ (W), $\Delta T=0^\circ\text{C}$	390.0	426.2
İç Direnç ( $\Omega$ ), (AC)	1.2~1.5	1.3~1.6
<b>Toplam ısı iletim katsayısı (W/K)</b>	4.08	
<b>Toplam Seebeck katsayısı (V/K)</b>	0.1182	

Burada daha önceden sadece bir p-n çifti için türetilmiş denklemler tekrar verilirse;

$$\dot{q}_L = \alpha_{np}IT_L - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R_{np} \quad (2.35)$$

ve bu denklem N tane çift için tekrar düzenlenirse 2.36’da verilen eşitlik elde edilir.

$$\dot{Q}_L = N \alpha_{np}IT_L - K\Delta T - \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.36)$$

Sonuçta, soğuk taraftan absorblanan toplam ısı miktarı, N tane n-p çiftinin absorpladığı ısının toplamına eşit olur, denklem (2.36). Yine sıcak taraftan atılan ısı miktarı da benzer şekilde hesaplanabilir ve denklem (2.38) elde edilir.



$$\dot{q}_H = \alpha_{np}IT_H - K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R_{np} \quad (2.37)$$

$$\dot{Q}_H = N \alpha_{np}IT_H - K\Delta T + \frac{1}{2}I^2R_i \quad (2.38)$$

Burada;  $\Delta T = T_h - T_L$  dir. Bundan sonra kolaylık olması açısından temel denklemlerde  $\alpha = N\alpha_{np}$  olarak yazılacaktır. Modül tarafından tüketilen güç ise

$$\dot{W} = \alpha\Delta T + I^2R_i \quad (2.39)$$

formülünden bulunur. Daha önce verildiği gibi COP hesabı ise

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{\alpha T_L I - K\Delta T - \frac{I^2 R_i}{2}}{\alpha\Delta T + I^2 R_i} \quad (2.40)$$

şeklinde tanımlanır.

Denklem 2.36'dan görüldüğü gibi soğutma gücü ohmik kayıplar ve termal kayıplar ihmal edildiğinde akımla doğru orantılıdır. Ancak soğutma gücü, akımla doğru orantılı artarken, ohmik kayıplar ise akımın karesiyle artmaktadır. Bu sebeple akımın belli bir değerinden sonra soğutma gücü azalmakta ve akım değeri belli bir değer üzerine çıkarsa soğutma gücü negatif değerler alır. Bunun sonucu olarak COP değeri de belli bir değere kadar artıp sonra azalarak negatif değere gider.

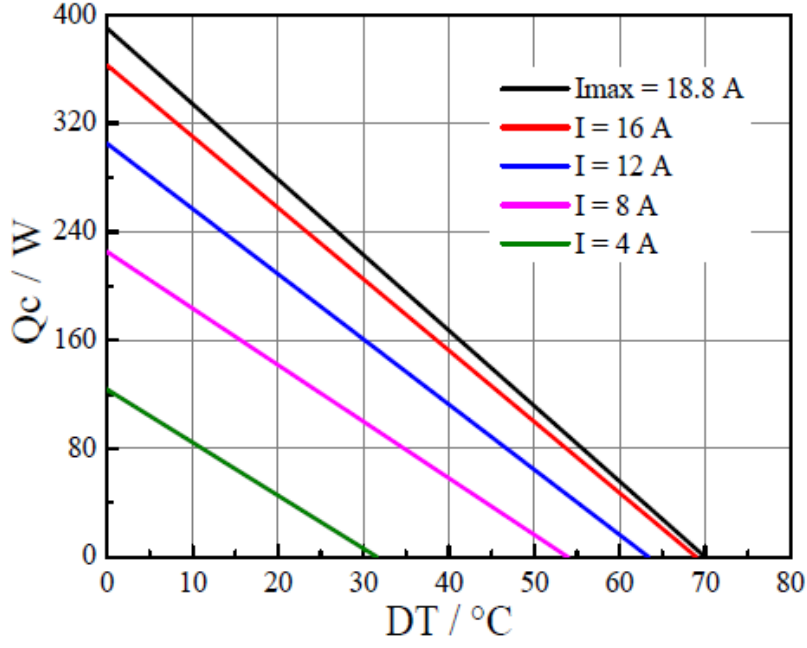
Maksimum soğutma yükünü bulmak için  $\dot{Q}_L$ 'nin akıma göre türevinin alınması yeterlidir. Aşağıdaki verilen denklemler Türker,2012 referansından alınmış olup, türetimler bu tez kapsamında verilmemiş, sadece denklemin son hali verilmiştir.

$$\frac{\partial \dot{Q}_C}{\partial I} = \alpha T_C - IR_i = 0 \quad (2.41)$$

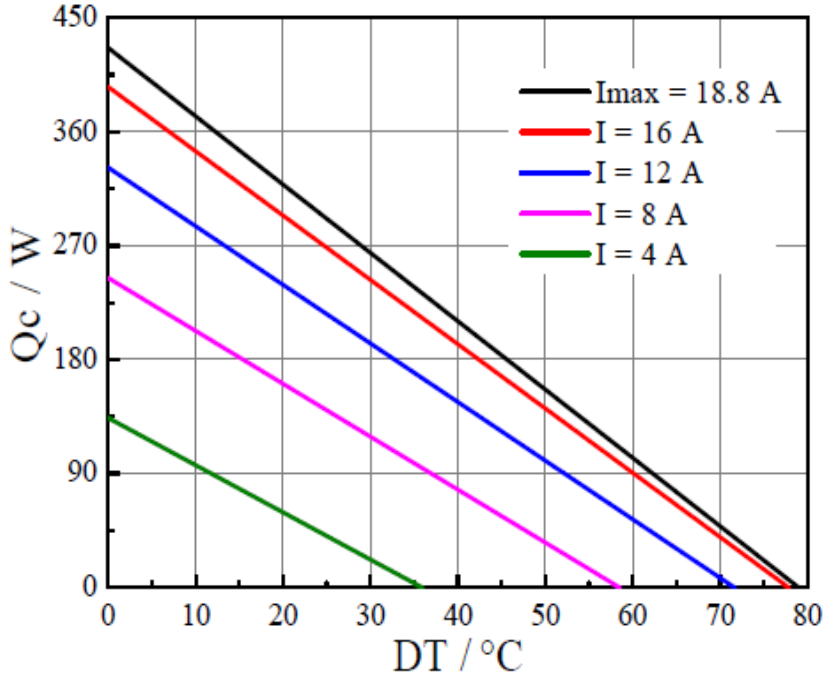
$$I_* = \frac{\alpha T_C}{R_i} \quad (2.42)$$

Şekil 2.16'dan Şekil 2.21'e kadar verilen grafiklerde örnek olarak kullanılan Peltier modülün performans grafikleri verilmektedir.

$Q_c$  soğutma yükünün,  $\Delta T$  sıcaklık farkı altındaki davranışları sırasıyla  $T_H=27^\circ\text{C}$  ve  $T_H=50^\circ\text{C}$  olmak üzere Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



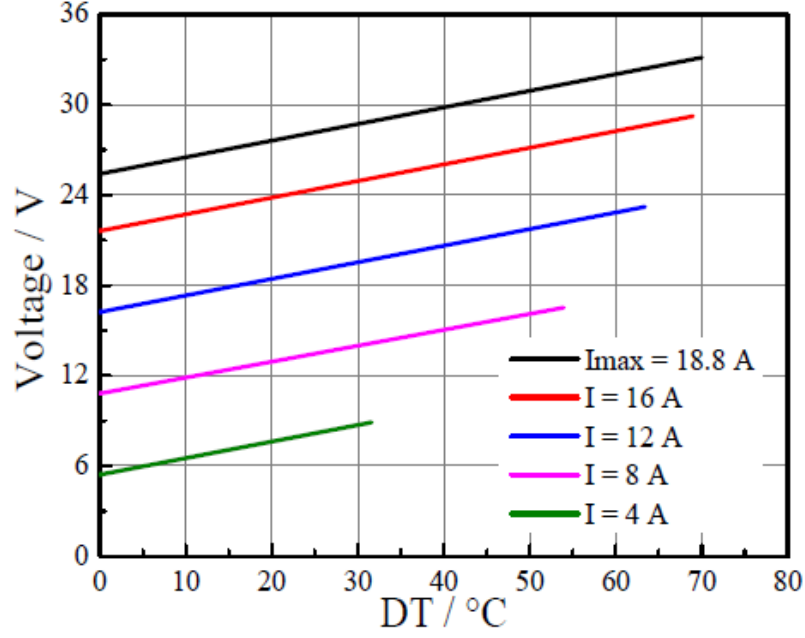
Şekil 2.17 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=27^\circ\text{C}$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-9)



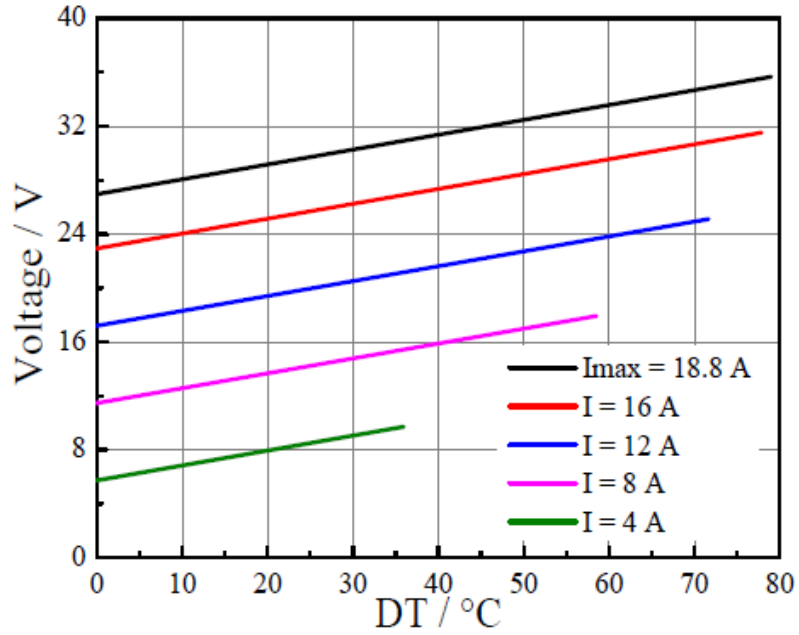
Şekil 2.18 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=50^\circ\text{C}$ 'de soğutma gücünün grafiği (Url-9)

$\Delta T$  sıcaklık farkı arttıkça ters yönde olan Fourier ısı iletimi artmakta ve bu artış ile birlikte soğutma gücü  $Q_c$  azalmaktadır. Akımın artırılmasıyla birlikte ise Joule ısısı artar. Joule ısısının bir kısmı Peltier modülün soğuk kısmına yayılacağı için  $Q_c$  soğutma yükü yine azalacaktır.

Şekil 2.18 ve Şekil 2.19’da ise  $Q_c$  soğutma gücü sabit tutularak farklı akımlar için  $\Delta T$  sıcaklık farkı artırılmak istendiğinde, uygulanacak gerilimin de aynı  $Q_c$  yükünü elde edebilmek için sabit akım altında artmak zorunda olduğunu göstermektedir.

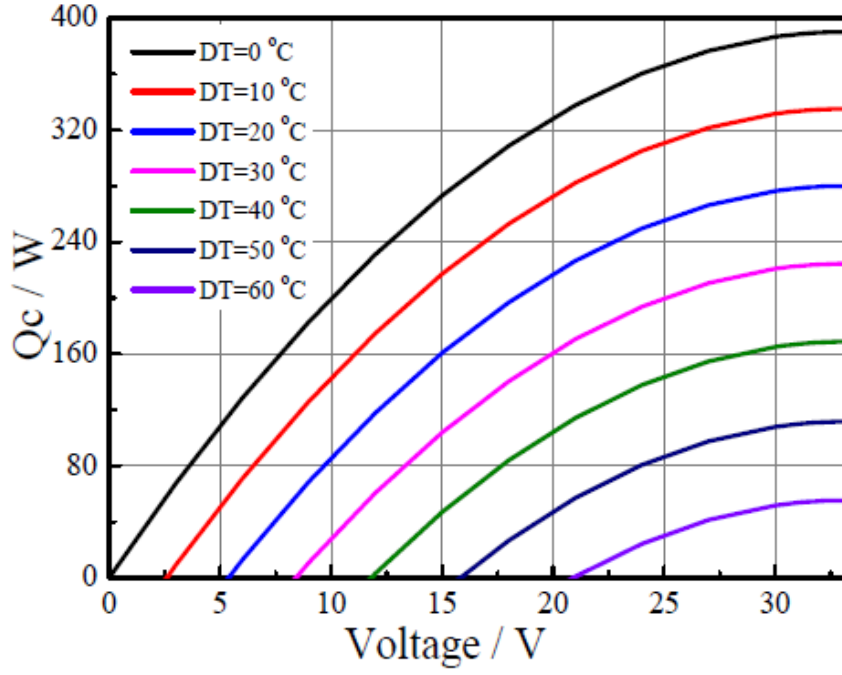


Şekil 2.19 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=27^\circ\text{C}$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-9)

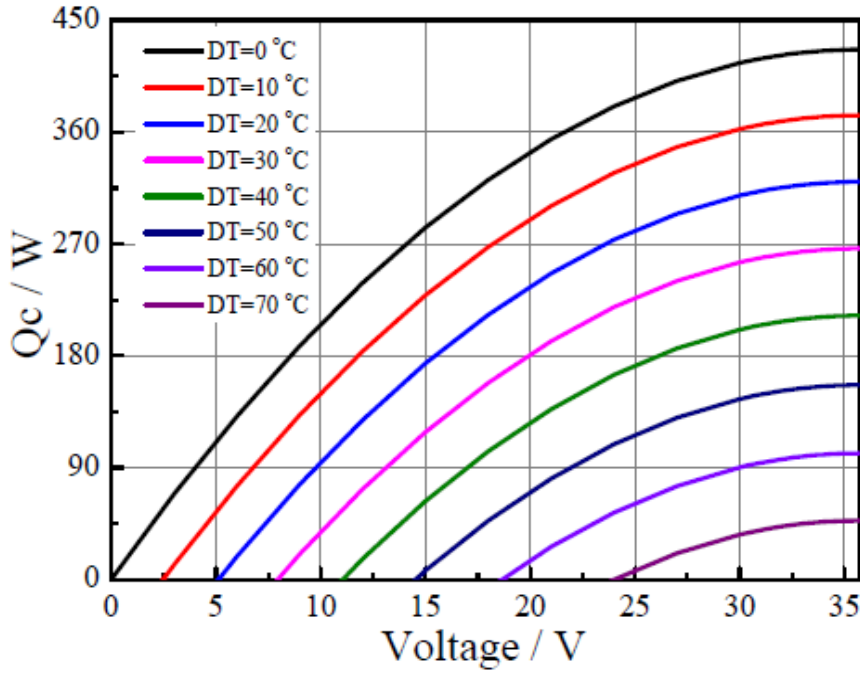


Şekil 2.20 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=50^\circ\text{C}$ 'de farklı akımlarda gerilim grafiği (Url-9)

$Q_c$ ,  $V$  ve  $\Delta T$  arasındaki birbirlerine bağımlı ilişkiler,  $T_H=27^\circ\text{C}$  ve  $T_H=50^\circ\text{C}$  için sırasıyla Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



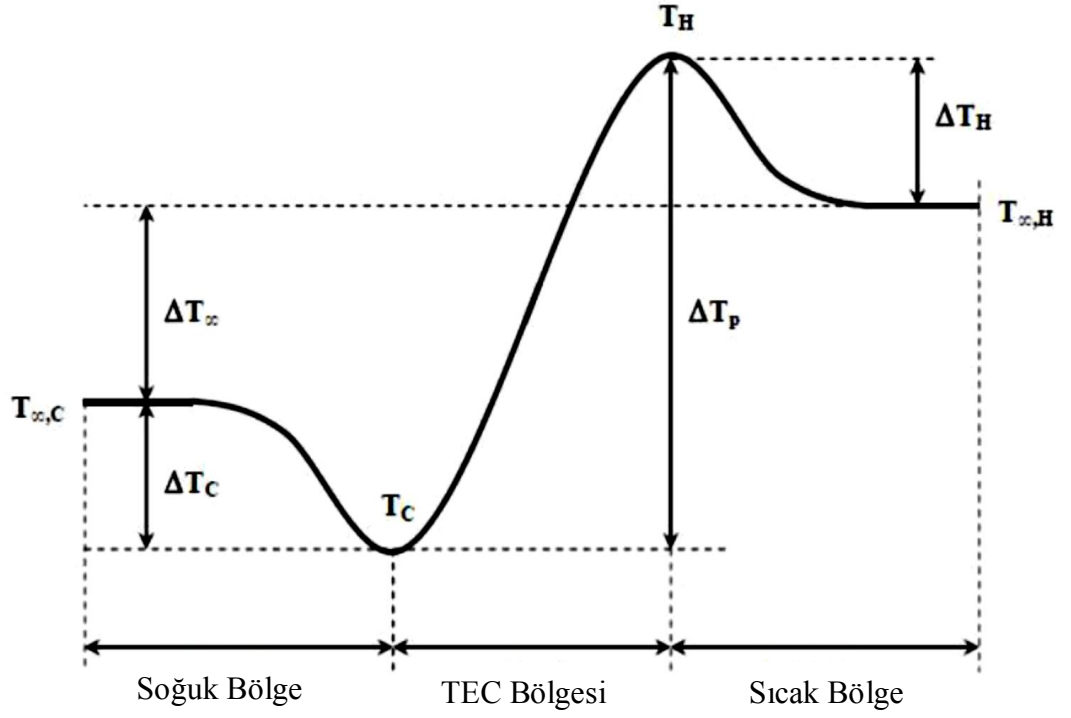
Şekil 2.21 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=27^\circ\text{C}$ 'de  $Q_c$  ve gerilim grafiği (Url-9)



Şekil 2.22 :  $\Delta T$ 'ye göre  $T_H=50^\circ\text{C}$ 'de  $Q_c$  ve gerilim grafiği (Url-9).

Termoelektrik bir soğutucu için genel sıcaklık dağılım diyagramı Şekil 2.22'deki gibidir. Soğuk taraftan ısının emilebilmesi için termoelektrik modülün soğuk yüzeyinde  $T_{\infty,C}$  ortam sıcaklığından daha düşük olan  $T_c$  sıcaklığına inilir. Benzer şekilde, sıcak yüzeyden ısı atılabilmesi için yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığı  $T_{\infty,H}$

sıcaklığından daha yüksek bir değer olan  $T_H$  değerine Peltier süreciyle çıkarılır. Burada  $\Delta T_P$  sıcaklık farkı, Peltier modül tarafından oluşturulmaktadır.

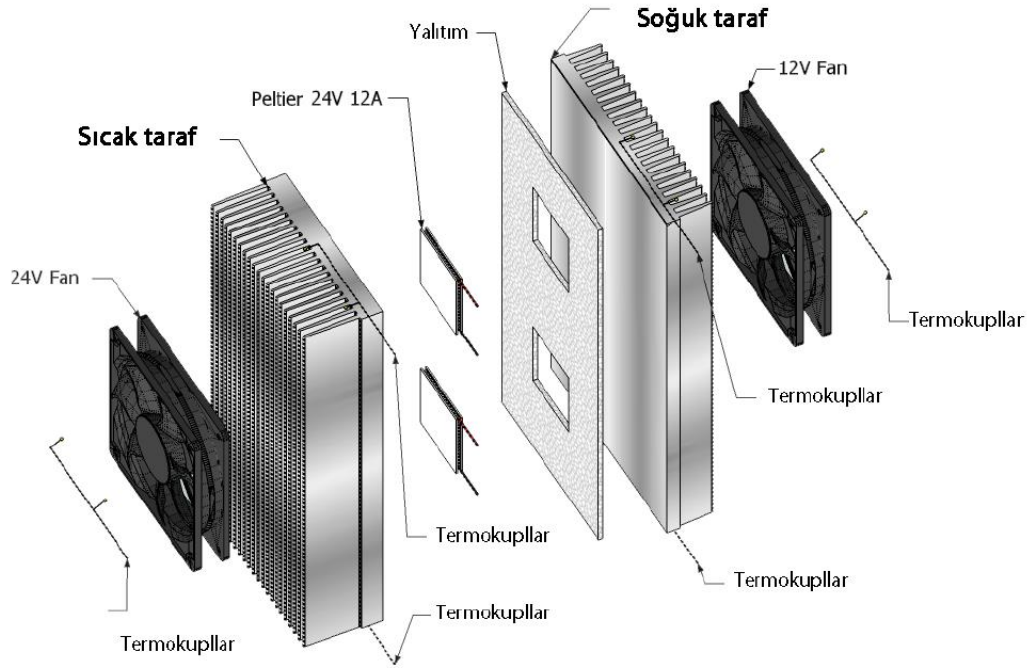


Şekil 2.23 : TEC sıcaklık diyagramı.



### 3. DOĞRUDAN TEMASLI SIVI SOĞUTMALI ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI VE DENEYSEL PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ

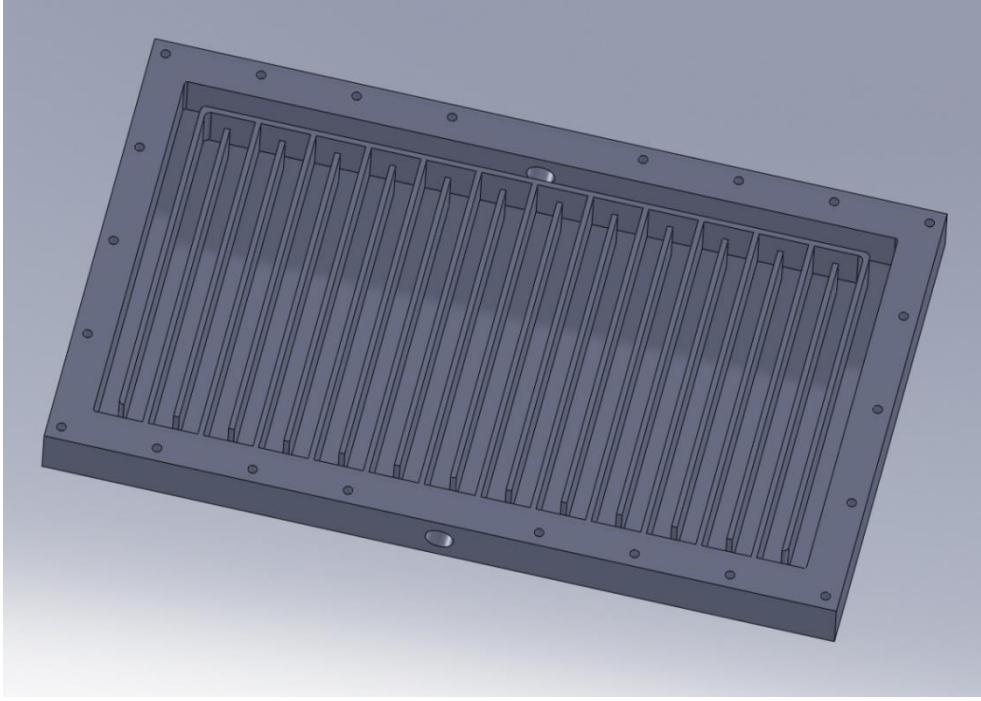
Termoelektrik modüllerin çalışması sırasında sıcak yüzey üzerinde oluşan yüksek ısı yoğunluğu TEC modüllerin sıcak yüzeylerinden bu ısının uzaklaştırılmasını gerektirmektedir. Bunun için öncelikle geleneksel kanatçıklı yüzey ve fan sistemleri kullanılmıştır. Şekil 3.1’de hava-hava soğutmalı bir termoelektrik soğutucu sistem görülmektedir.



**Şekil 3.1** : Hava-hava soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi

Bu tür sistemler kararlı duruma geçtiklerinde yüksek akımlarda Fourier ısı kaçakları ve Joule ısınması sebebiyle etkin çalışmamaktalar ve sadece düşük akımlar için etkinliğini koruduğundan dolayı soğutma kapasiteleri düşüktür. Bunun yanı sıra, termoelektrik boyutlarına göre çok büyük kanatçıklı yüzeyler ve yüksek devirde çalışabilen fan sistemleri gerekli olduğu için TEC modüllerin sıcak yüzeylerinden ısının uzaklaştırılması için farklı sistemler düşünölmeye başlanmıştır. Bunun sonucu olarak ise sıvı soğutmalı sistemler geliştirilmiş ve uygulamaya başlanmıştır. Ancak birbirine temas eden yüzeylerde ortaya çıkan yüksek termal dirençler sebebiyle bu

alanda da kesin olarak bir çözüm üretilememiştir. Şekil 3.2’de daha Drotel firmasının finansal desteğiyle İTÜ Enerji Enstitüsünde yapılan çalışmalarla dizayn edilmiş bir hava-su soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi için geliştirilen bir ısı değiştirici ve yine Şekil 3.3’de bu ısı değiştiricinin kullanıldığı soğutma modülünün montaj edilmiş hali görölmektedir.



**Şekil 3.2 :** Hava-su soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi için ısı değiştirici

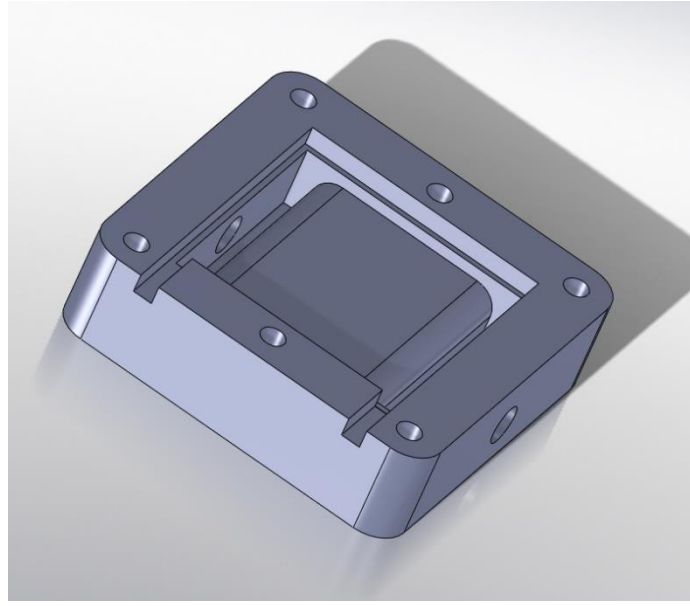


**Şekil 3.3 :** Hava-su soğutmalı termoelektrik soğutma sistemi

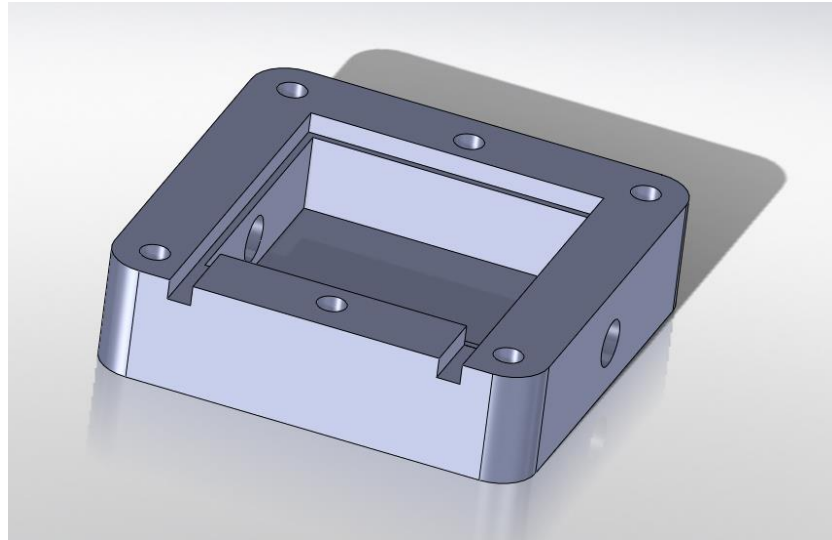


### 3.1 Doğrudan Temaslı Sıvı Soğutmalı Isı Değiştirici Tasarımı

Termoelektrik modülün yüzeyine uygun ve pompalanan ısıyı doğrudan uzaklaştırmak için farklı bir dizayn yapılmıştır. Buradaki önemli nokta mümkün olan en düşük termal dirençle ısınmın uzaklaştırılabilmesidir aksi takdirde termal dirençler sebebiyle, uzaklaştırılmak istenen ısı TEC'in yüzeyinde birikmektedir ve ters Fourier ısı transferi ile TEC'in soğuk tarafına geçmektedir. Bunun için soğutucu akışkan TEC modülün yüzeyine temas ettirilerek zorlanmış bir taşınım ile ısı uzaklaştırılması yapabilecek iki farklı modelde ısı değiştirici geliştirildi. Bu dizaynlar Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmektedir.

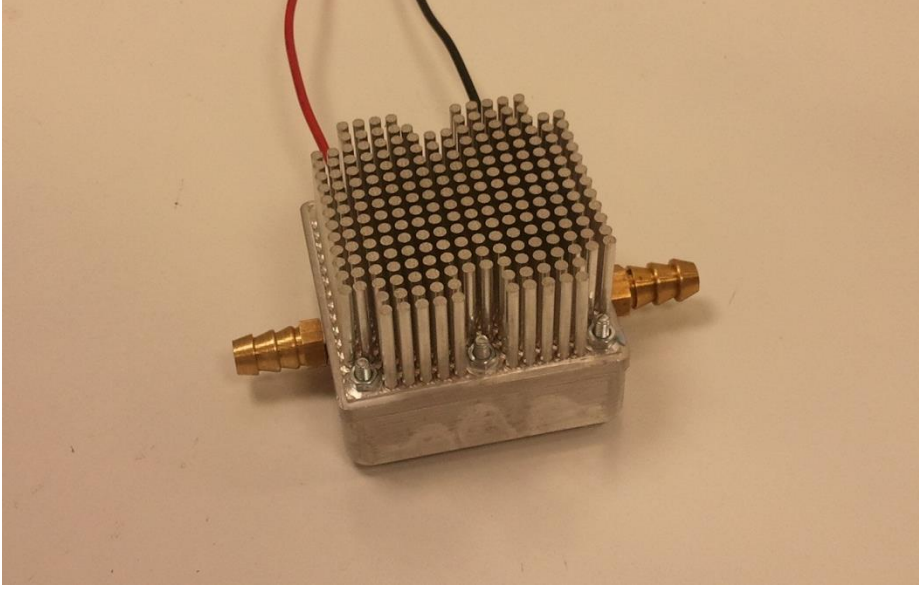


Şekil 3.4 : Doğrudan temaslı ince film akışlı ısı değiştirici.



Şekil 3.5 : Doğrudan temaslı bulk (kütlesel) akışlı ısı değiştirici.

Tasarlanan ısı değiştiricilerde akışkanın termoelektrik modülün yüzeyine temas etmesine özen gösterilmiştir. Bunun yanı sıra film şeklinde bir akışla, bulk (kütlesel) akış arasındaki fark incelenmiştir. Dizayn edilen ısı değiştiriciler üzerine pin-fin (iğne yapılı kanatçıklı yüzeyler) yerleştirilmiştir. şekil 3.6'de yapılan montajın resmi görölmektedir.



**şekil 3.6 :** TEC modül ve diğer aksamların montaj resmi.

Burada olabildiğince kontak dirençleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Deneyle sırasında ısı değiştirici bir köpük yardımıyla izole edilerek hava ile olan ısı transferi azaltılmaya çalışılmıştır. Ayrıca pin finle, ısı değiştirici arasına ısı transferini azaltmak için silikon ve yalıtım malzemesi uygulanmıştır. Pin finle, termoelektrik modülün soğuk yüzeyi arasında ise ısı pastası sıkılarak termal dirençler minimize edilmeye çalışılmış ve sistem optimum montaj uygulamasına yaklaştırılmaya çalışılmıştır.

### **3.2 Deneyle Düzeneiğinin Tanıtımı ve İncelenen Durumlar**

Deneyle sırasında şekil 3.7'de gösterilen cihazlar kullanılmıştır. Akım ve voltaj değerlerinin kontrolü için ampermetre ve voltmetre kullanılmıştır. Sıcaklıklar, termal odada veri kayıt sistemiyle alınırken, oda koşullarında yapılan deneylelerde termometreler aracılığıyla sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Çizelge 3.1'de kullanılan ölçüm cihazlarının ve yazılımların özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3. 1 : Ölçümde kullanılan cihazlar, yazılımlar ve özellikleri**

<b>Cihaz Adı</b>	<b>Marka ve Modeli</b>	<b>Ölçüm Birimi</b>	<b>Ölçüm Aralığı</b>	<b>Ölçüm Çözünürlüğü</b>	<b>Ölçüm Belirsizliği</b>
Dijital Voltmetre	Brymen BM867	Volt	0-60V	100 $\mu$ V	$\pm(0.03\%+2d)$
Dijital Ampermetre	Brymen BM867	Amper	0-20A	10 $\mu$ A	$\pm(0.15\%+30d)$
Pt100 Termometre	Lutron	$^{\circ}$ C	(-100)-1370 $^{\circ}$ C	0.1	$\pm(0.15\%+0.5^{\circ}$ C)
Dijital Termometre	Fluke 54 II	$^{\circ}$ C	(-200)-1372 $^{\circ}$ C	0.1	$\pm(0.05\%+0.3^{\circ}$ C)
Dijital Termometre	Lutron	$^{\circ}$ C	(-100)-1300 $^{\circ}$ C	0.1	$\pm(0.05\%+0.3^{\circ}$ C)
<b>Cihaz Adı</b>	<b>Marka ve Modeli</b>	<b>Çalışma Aralığı</b>		<b>Ölçüm Çözünürlüğü</b>	<b>Ölçüm Belirsizliği</b>
DC Güç Kaynağı	GW	Volt: 0-60V		20mV	$\pm (0.05\% + 4d)$
	Instek	Amper:0-3.5A		2mA	$\pm( 0.1\%+5d)$
DC Güç Kaynağı	GW	Volt: 0-60V		20mV	$\pm(0.5\%+ 2 d)$
	Instek	Amper:0-3A		2mA	$\pm (0.5\%+ 2 d)$
DC Güç Kaynağı	GW	Volt: 0-30V		0.1V	$\pm (0.1\% + 2d )$
	Instek	Amper:0-10A		0.1A	$\pm (0.1\% + 2d)$
DC Güç Kaynağı	TT-T-ECHNI-C	Volt: 0-30V		0.01V	$\pm (0.01\% + 2d )$
		Amper:0-20A		0.01A	$\pm (0.01\% + 2d)$
<b>Yazılımın Adı</b>	<b>Ölçülen Büyüklük</b>	<b>Veri toplama periyodu</b>		<b>Çözünürlük</b>	<b>Ölçüm Belirsizliği</b>
Tracer DAQ	$^{\circ}$ C	$\approx$ 30 saniye		0.0001 $^{\circ}$ C	$\pm (0.01\% + 4d)$



PC bağlantılı Dijital Ampemetre



PC bağlantılı Dijital Voltmetre



DC Güç Kaynağı



DC Güç Kaynağı



DC Güç Kaynağı



DC Güç Kaynağı



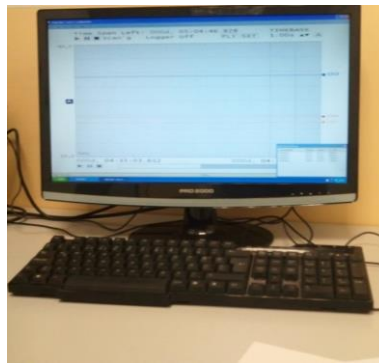
Dijital Sıcaklık Ölçer



Dijital Sıcaklık Ölçer



Termal Oda Kontrol Ünitesi



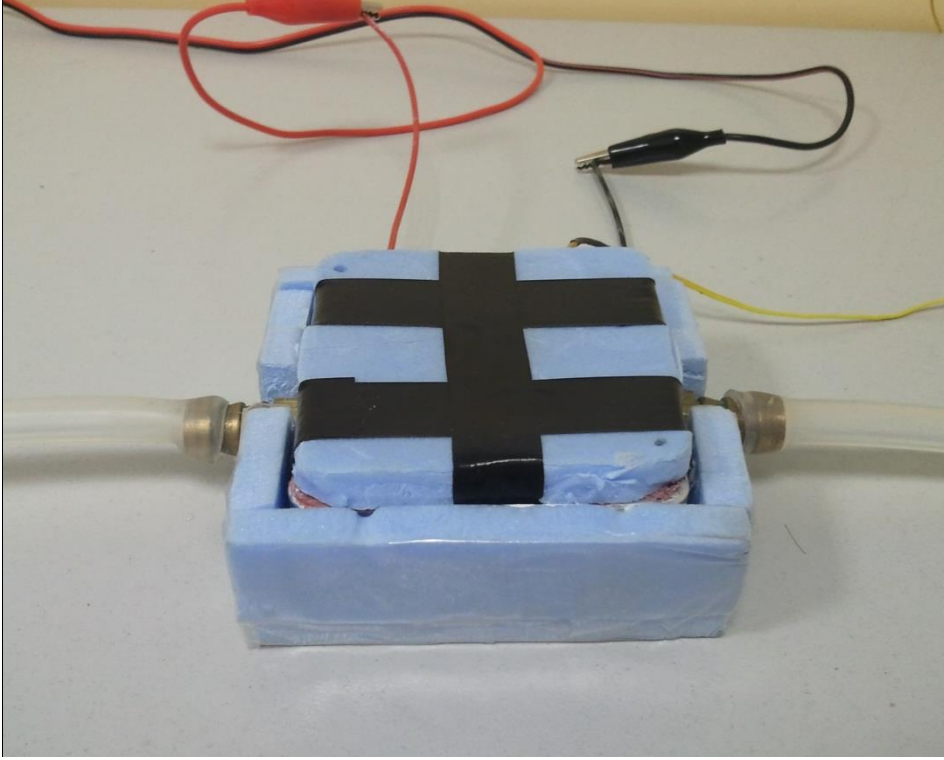
PC ve Veri Toplama Yazılımı

Şekil 3.7 : Deneilerde kullanılan ekipmanlar

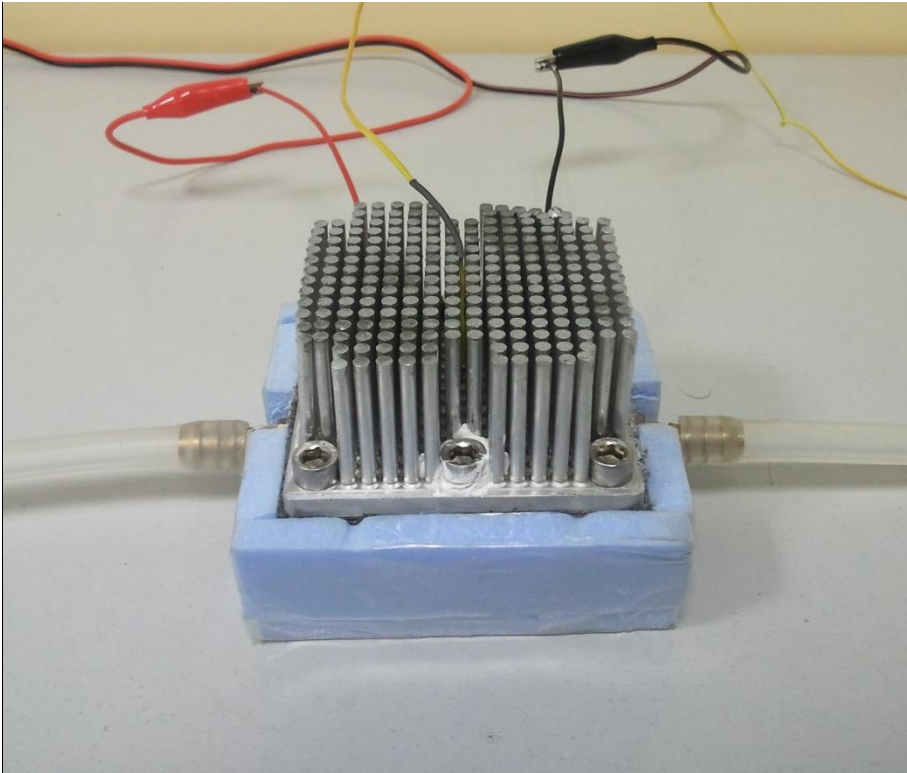
Deneyleerde iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk deneyleer, dinamik ölçüm yöntemiyle, sistemde radyatör kullanılarak yapılmış olup belli zaman aralıklarında alınan ölçümler doğrultusunda soğutma yükü ve COP değerleri belirlenmiştir. İkinci yöntem ise kalorimetrik ölçüm yöntemidir. Burada radyatör sistemden çıkartılmış ve sistemde kullanılan soğutucu akışkanın ilk referans sıcaklığı ve termoelektrik soğutucudan pompalanan ısıyı alması sonucunda elde edilen son sıcaklık değeri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan Deneyleer;

- Sistemde kullanılan pompanın radyatörsüz sistem ve radyatör kullanılan sistem için farklı akımlarda kütlelel debisinin belirlenmesi
- TEC, ısı değiştiriciyle montajlıyken, modüllerin yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi, Şekil 3.8
- TEC'in yüzeyine pin-fin montajı yapıldıktan sonra, pin-fin dip sıcaklıklarının ölçülmesi, Şekil 3.9
- Soğutucu modülün yüzeyine bir fan eklendikten sonra sıcaklık ölçümü, Şekil 3.10
- Oda sıcaklıklarında ve 35°C sıcaklığında soğutulan ortamın sıcaklık ölçümü, soğutucu modülün soğutma gücü ve COP'nin dinamik olarak ölçülmesi V=60lt
- 60lt'lik bir hacimde, oda sıcaklıklarında ve 35°C sıcaklığında 25W ısıl yük altında soğutulan ortamın sıcaklık ölçümü ve modülün soğutma gücü ile COP'nin dinamik yöntemle ölçümleri
- Oda sıcaklığında, soğutucu modülün belirli akım ve voltaj değerlerinde çalıştırılarak, soğutma gücü ve COP değerlerinin kalorimetrik yöntemle ölçülmesi V=60lt
- 25W'lık ısıl yük altında ve oda sıcaklıklarında soğutucu modül farklı akım ve voltajlarda çalıştırılarak soğutma gücü ve COP değerlerinin kalorimetrik yöntemle belirlenmesi V=60lt
- Kullanılan ısı değiştiricilerin ısı taşınım katsayısının belirlenmesi

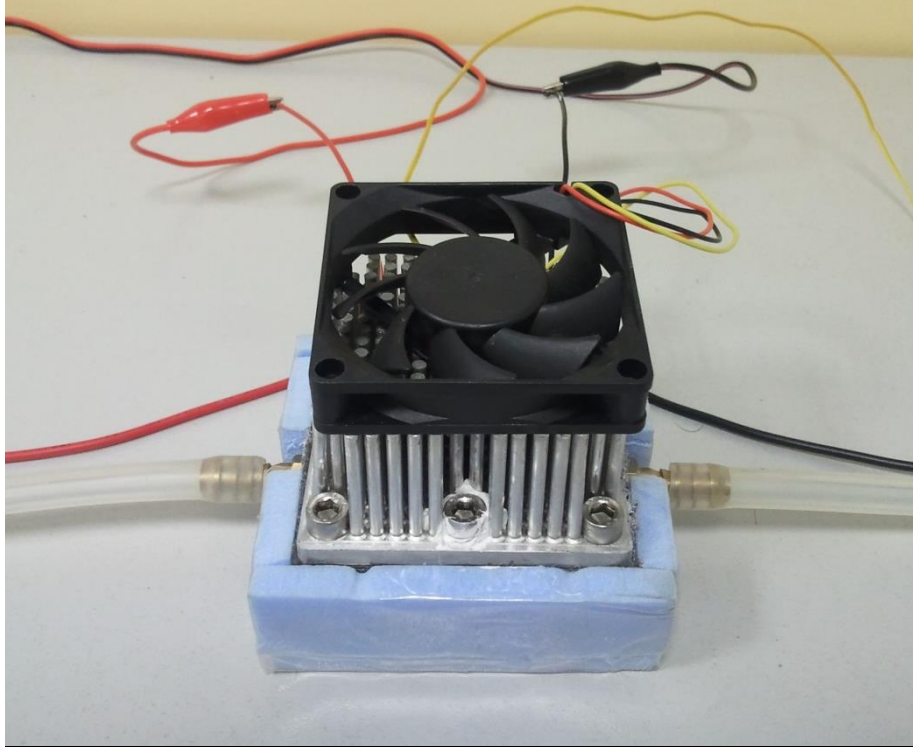


**Şekil 3.8 :** TEC modülün yüzeyinden doğrudan sıcaklık ölçümü



**Şekil 3.9 :** TEC modülün üzerine yerleştirilmiş pin-fin üzerinden sıcaklık ölçümü



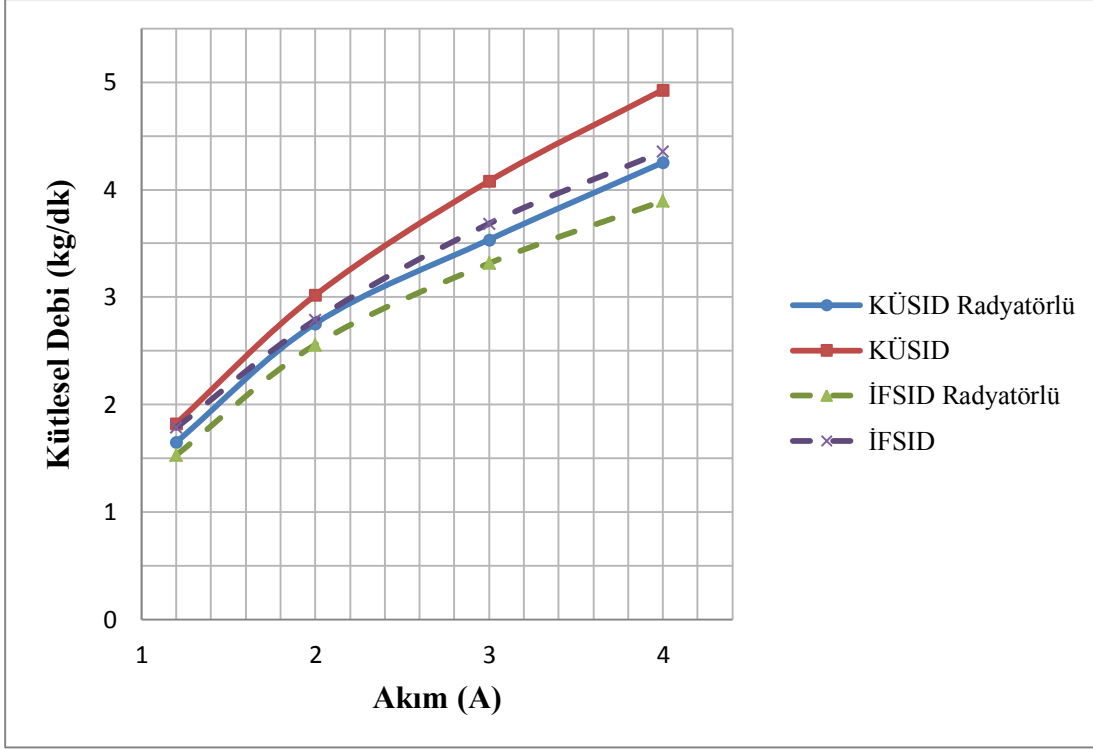


**Şekil 3.10** : Modülün üzerine fan eklendikten sonra sıcaklık ölçü yapılması

### **3.3 Kullanılan Pompanın Farklı Akımlarda Debisinin Ölçümü**

Deneylere başlanmadan önce sistemde kullanılacak pompanın debisi farklı akım değerlerinde denenerek kütleli debi ölçümü yapıldı. Farklı akımlar için kütleli debinin belirlenmesi, sistemde soğutma gücü için önemlidir ve soğutma gücünün doğru hesaplanabilmesi için gereklidir. Sistemde COP hesabı için yapılan hesaplamalarda, emilen ısının ve harcanan enerjinin tamamının suya geçtiği varsayılarak yapılmıştır. (Kayıp-kaçak hesabı yapıldıktan sonra bu varsayım yapılmıştır.) Bu yaklaşıma göre hesaplamalar için debi ölçümü çok fazla önem arz etmektedir. Deneyler pompanın belirlenen akımlarda soğutucu akışkanı pompalama süresi ölçülerek yapılmıştır. Daha sonra bu süre içinde pompalanan soğutucu akışkanın kütlesi bir terazi yardımıyla belirlenmiştir.

Yapılan ölçümler soğutucu sistemde radyatör varken ve sistemden radyatör çıkarıldıktan sonra olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Radyatörsüz yapılan deneylerde beklenildiği gibi debi daha yüksek çıkmıştır.



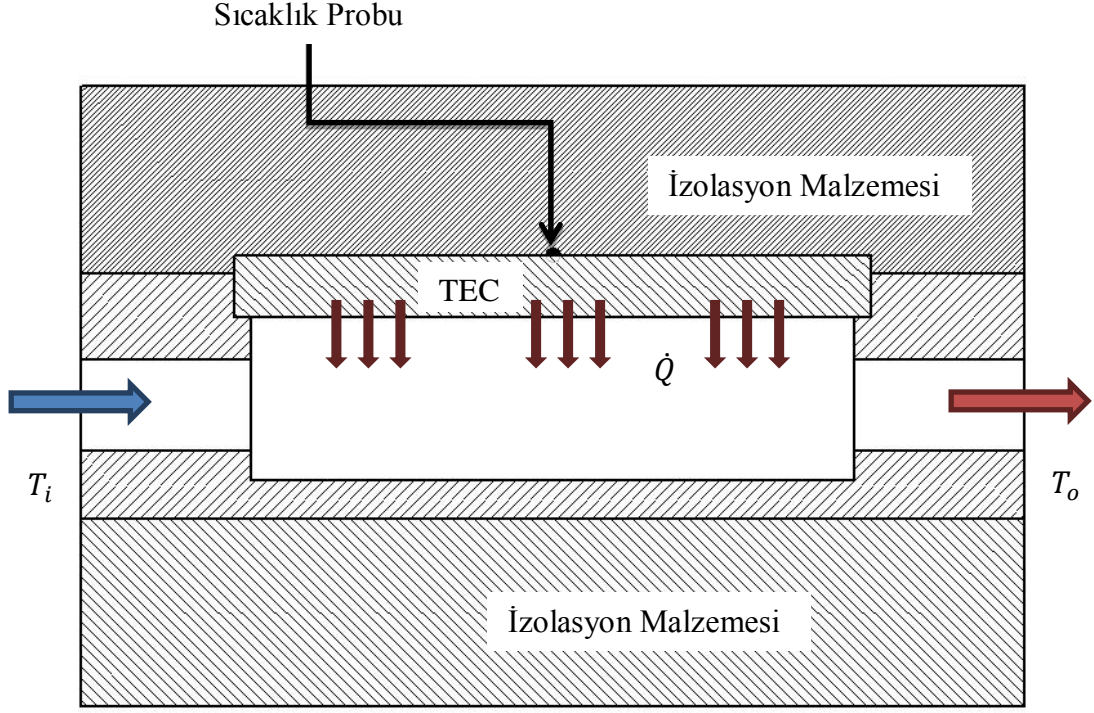
**Şekil 3.11** : Pompanın farklı akımlarda debisinin ölçülmesi

Şekil 3.11’de kütleli debi ölçümleri gösterilmektedir. Pompa 1.2 A değerinde çalışırken radyatörlü ve radyatörsüz debi değerleri arasındaki fark görece olarak fazla çıkmıştır. Ayrıca akım değerleri arttıkça debiler arasındaki farkta artmış ve bu değer 4 A değerinde maksimum değerini almıştır. Deneyler sırasında 1.2 A, 2A ve 3A değerleri kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde kütleli soğutmalı ısı değiştirici (KÜSID) için debiler radyatörlü deneye göre %6-%11 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar ince film soğutmalı ısı değiştirici (İFSID) için ise %9-%15 arasındadır. Bunun yanı sıra İFSID değerleri az bir miktar KÜSID sonuçlarından daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ise basınç düşümleridir. Burada akışkan dar bir kanaldan akışa zorlanmaktadır. İFSID kullanılan sistemde pompa soğutucu akışkanı hareket ettirmek için daha fazla güç kullanmaktadır. Voltaj değerleri akım sabitken KÜSIDli sistemin voltajından daha büyük değerler almaktadır.

### 3.4 Farklı Isı Değiştiricileri İçin Modülün Akım-Sıcaklık Değişimleri

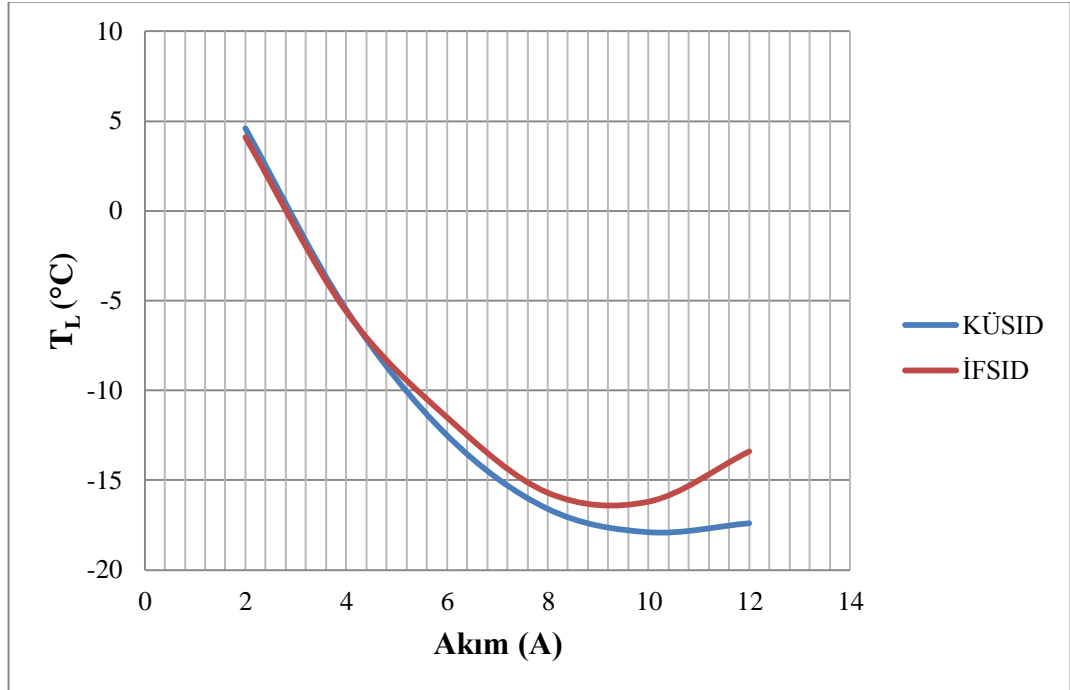
Isı değiştiricilerin üzerine pin-fin montajı yapılmadan önce TEC modülün soğuk yüzeyinin inebildiği en düşük sıcaklık değeri farklı akım değerleri için belirlendi. Bu deney yapılırken Şekil3.12’deki deney düzeneği kuruldu.





**Şekil 3.12 :** TEC yüzey sıcaklığı ölçümü için oluşturulan deney düzeneği

Bu ölçümler ince film soğutmalı ısı değiştirici (İFSID) ve kütsel soğutmalı ısı değiştiriciler (KÜSID) için ayrı ayrı yapıldı. Yapılan ölçümler Şekil 3.13'de gösterilmektedir.



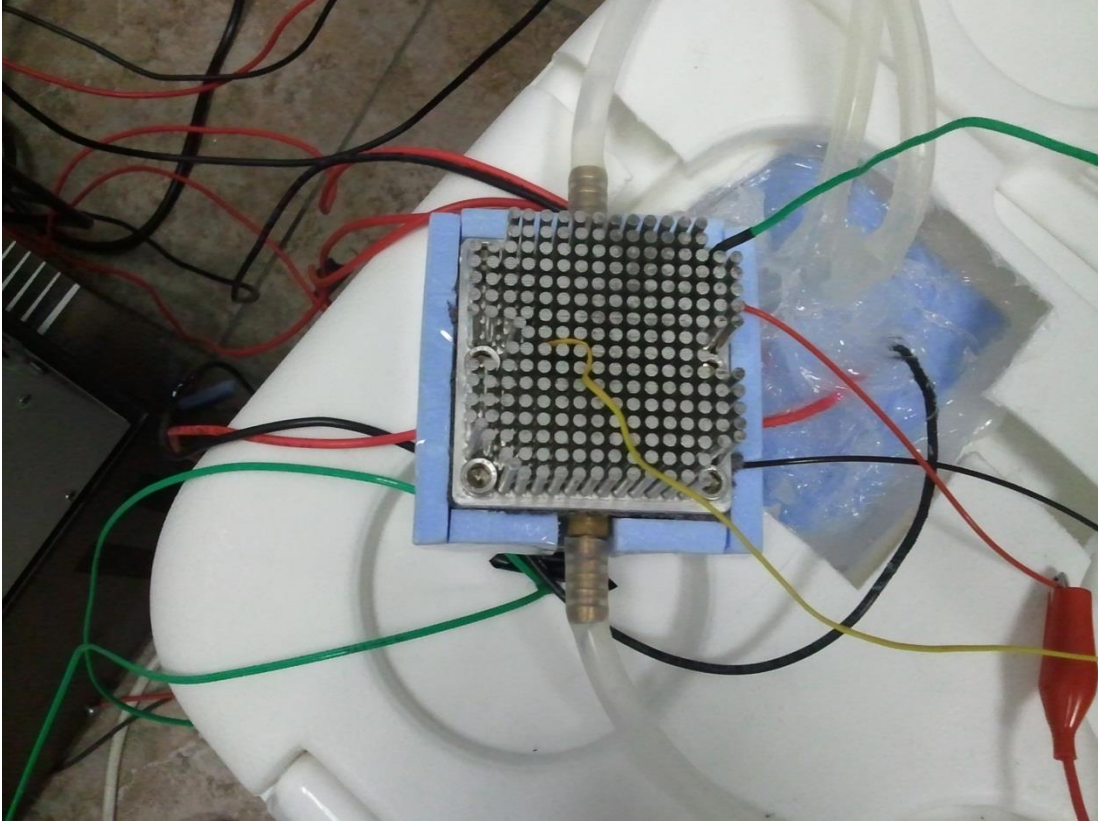
**Şekil 3.13 :** 21°C ortam sıcaklığı için TEC modülün yüzey sıcaklık değerleri

Grafiklerden de görüldüğü gibi kararlı duruma geçildikten sonra yüzey sıcaklıkları sıfırın altındaki değerlerini korumuş ve Fourier ısı kaçakları engellenerek soğuk yüzeyde olası sıcaklık artışları yaklaşık olarak 12 amper değerlerine kadar engellenmiştir. Kütleli soğutma da Fourier ısı kaçakları ve Joule ısınması 12 amper değerine kadar soğutma gücüne göre düşüktür, ancak bu değerden sonra tersinmezliklerden kaynaklanan ısı kaçakları TEC modülün soğuk yüzeyindeki sıcaklık değerini artırmaya başlamıştır. Film soğutmada ise 10 amper değerine kadar tersinmez etkiler karşılanabilmiş bu değerden sonrasında soğuk yüzeye ısı kaçaklar başlamış ve TEC soğuk yüzey sıcaklığı artmaya başlamıştır.

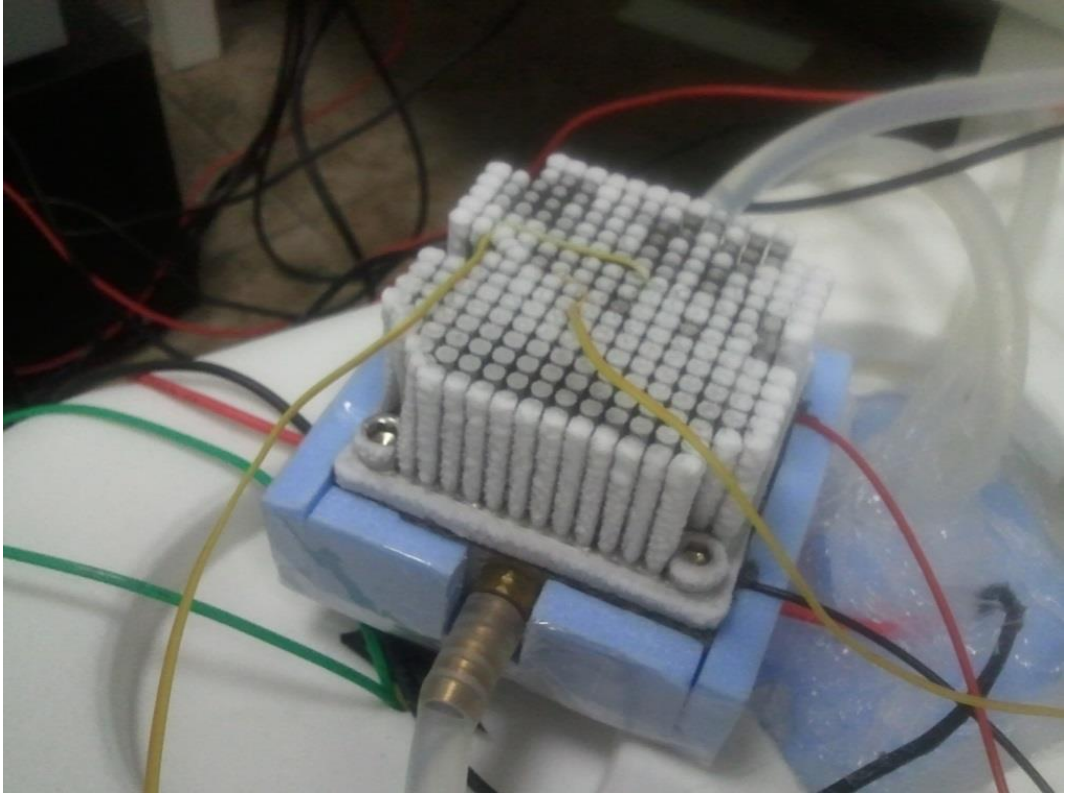
Bu aşamadan sonra montajı yapılan ısı değiştiriciler ve pin-finler Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gösterildiği gibi açık ortamda, farklı akım değerlerinde inebildikleri en düşük sıcaklık seviyeleri kontrol edilmiştir. Burada amaç daha önceden belirlenen TEC modülün soğuk yüzeyinde inilebilen sıcaklıklara hangi ölçüde yaklaşıldığını bularak temas yüzeylerinin etkinliğini belirlemektir.



**Şekil 3.14 : Deney düzeneği**



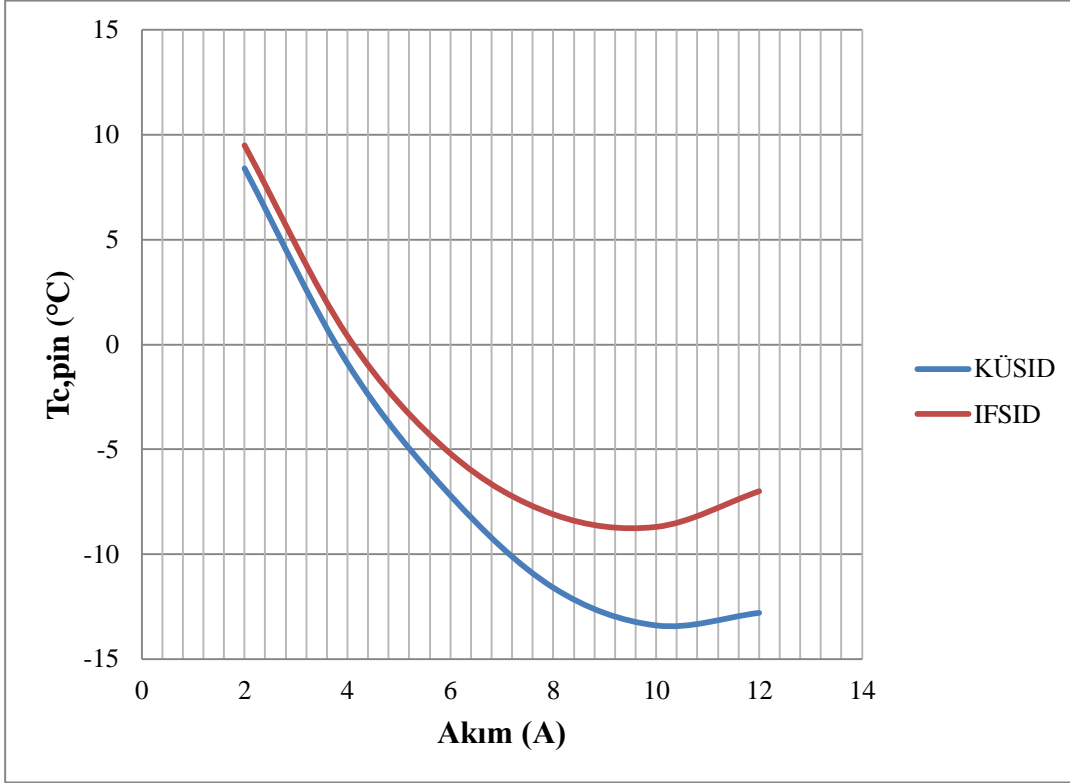
Şekil 3.15 : Deneş düzeneği



Şekil 3.16 : Deneş düzeneği çalışırken



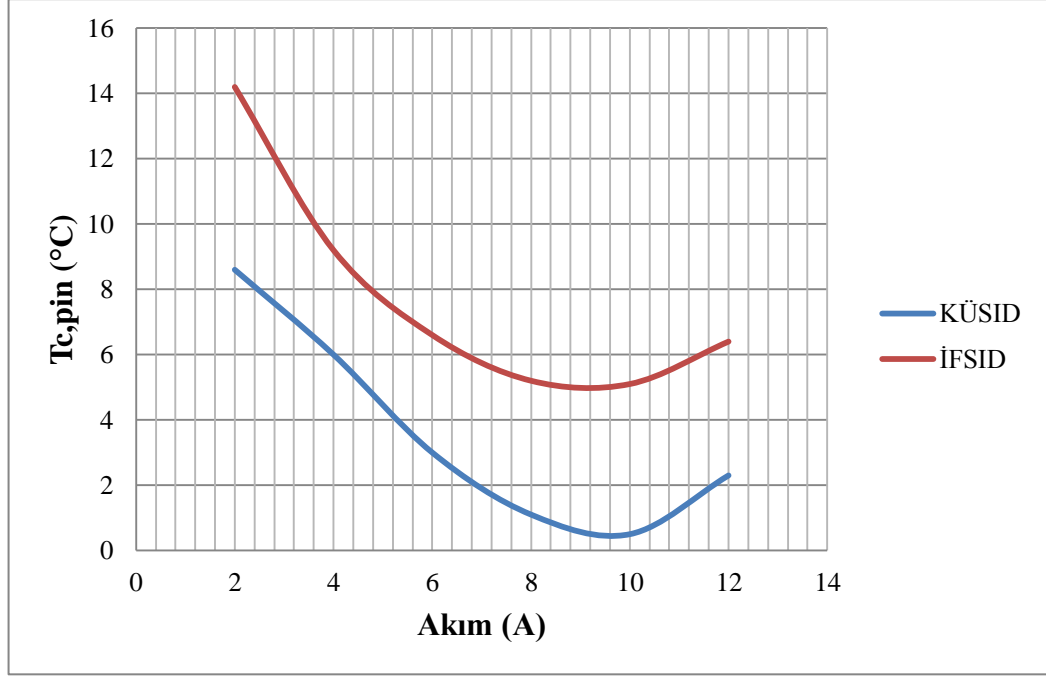
Bu doğrultuda, tekrar deney sonuçlarına göre aşağıdaki grafikler çıkartılmıştır. Şekil 3.17’de sırasıyla kütesel ve ince film için elde edilmiş veriler görülmektedir.



Şekil 3.17 :  $T_{\infty}=21^{\circ}\text{C}$  HEX’e montaj edilmiş pin-finin sıcaklık akım grafiği

Şekil 3.17’den de görüldüğü gibi, pin-fin yüzeyindeki sıcaklık aynı akım ve akışkan debisi için KÜSID’de, İFSID’e göre daha düşük sıcaklıklara ulaşılmıştır. İki ısı değiştiricide de 10 amper değerine kadar Fourier ve Joule ısınması etkin olamamıştır. KÜSID’de  $-13,4^{\circ}\text{C}$ ’ye İFSID’de ise  $-8,7^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar inilebilmiştir. Literatüre de uygun olarak akım değeri arttıkça pin-finlerin yüzey sıcaklıkları düşüren Peltier etkisi artmıştır.

Bunun yanı sıra pinfinlerin üzerine küçük bir fan koyularak pin-finlerin yüzeyinden daha etkin bir ısı tansferi yapılması sağlanmış bu durumda ise pin-fin yüzlerinde inilebilen en düşük sıcaklık değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece pin-finlerin etkinliğide göreceli olarak belirlenmiştir.



**Şekil 3.18 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de fanlı ısı değıştiricilerin sıcaklık akım grafiği

Sistemin üzerine fan montaj edildikten sonra sıcaklık değeri tekrar ölçüldükten sonra Şekil 3.18'de görülen grafik ortaya çıkmıştır. Bu aynı zamanda finlerin etkinliğini de göstermektedir. Her iki durumda da , fin sıcaklığı beklendiği gibi yükselmiştir. Hem KÜSID, hemde İFSID'de fansız ve fanlı sistem arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık olarak  $\Delta T \approx 14^{\circ}\text{C}$  olmuştur. KÜSID için inilebilen en düşük sıcaklık  $0,6^{\circ}\text{C}$  iken İFSID için bu değeri  $4,9^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklık değeri göre KÜSID, İFSID'e göre daha etkin çalışmaktadır. Burada da modül beklenildiği gibi davranmış ve 10 A değeri kadar sıcaklığı düşürmüş, bu değeri sonra ise sıcaklık artmaya başlamıştır.

### 3.5 Farklı Yüklerde 60 lt'lik Hacimde Soğutma ve COP Ölçümleri

Dizayn edilen ısı değıştiriciler, farklı termal yükler uygulanmış olan 60 litrelik bir hacim için, soğutma yükü ve soğutma performansı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla aşağıdaki Şekil 3.19'de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Deney koşulları ve ölçüm oda sıcaklığındaki şartlarda ve termal test odasında  $35^{\circ}\text{C}$  set değeri için yapılmıştır.



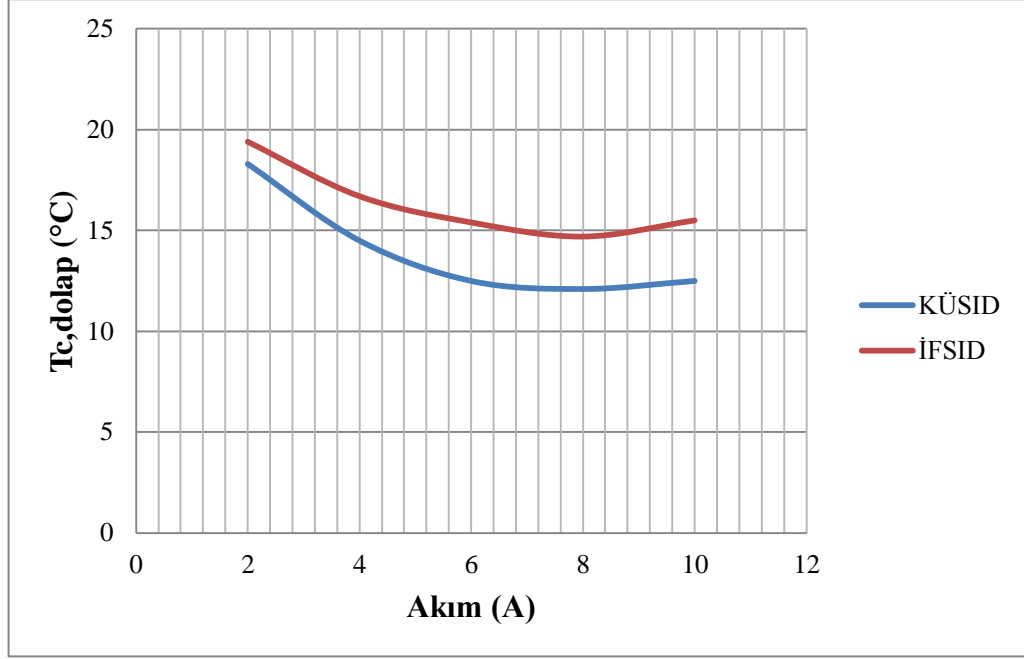
**Şekil 3.19 :** Termal oda deney düzeneği



**Şekil 3.20 :** Kale Termos firmasına ait hacim

Deney düzeneği, Şekil 3.20’da gösterilen, Kale Termos firmasına ait 60 litrelik hazır alınmış bir termostan, TEC soğutucu sistemden ve bir adet rezistanstan oluşmaktadır. Burada öncelikle TEC sistemi termal olarak yüksüz (ısı kaynağı yok) hacim koşullarında denenmiştir. Bu denemelerden sonra rezistans dolap içinde toplamda 25 Watt ısı yük oluşturacak voltaj ve akım değerlerinde çalıştırılarak, TEC sisteminin soğutma yükü, COP gibi sistem etkinliğini belirleyen parametreleri incelenmiştir.

Oluşturulan deney koşullarına göre oda sıcaklığında (21-23 °C değerinde) yapılan testlere göre Şekil 3.21’de gösterilen akım-sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Yapılan deneylere Fourier ters ısı kaçakları ve Joule ısınmasının, soğutma (ısı pompalama) etkisinden daha büyük olup dolap içerisini ısıtmaya başladığı akım değerlerine kadar devam edilmiştir.

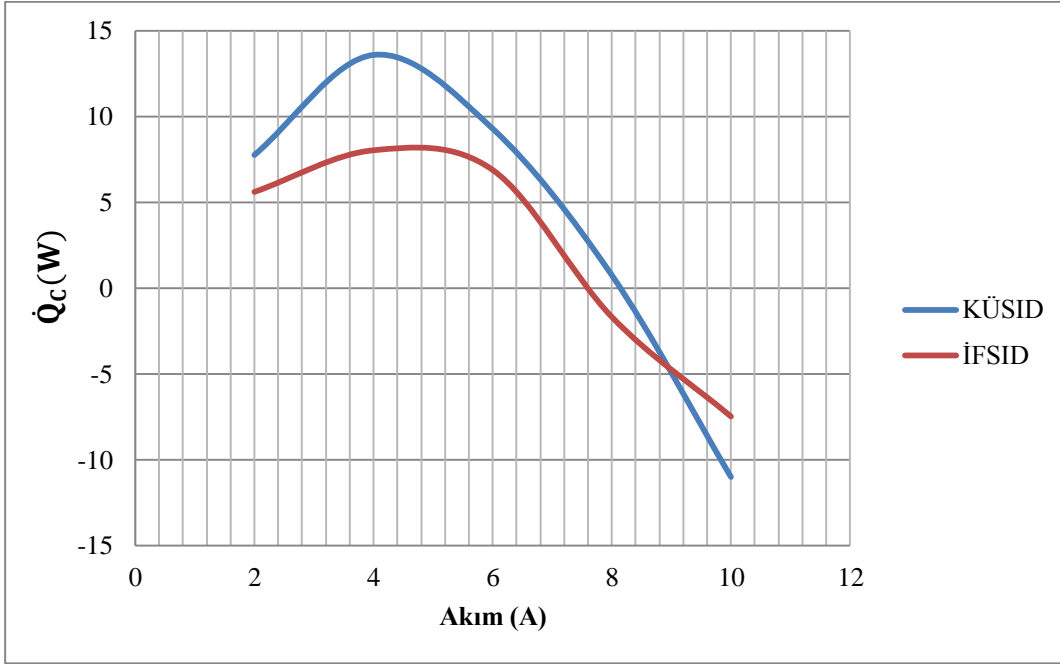


Şekil 3.21 :  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de HEXlerin yüksüz hacimdeki sıcaklık-akım grafikleri

Şekil 3.21’den de görüldüğü gibi kütleli soğutmalı ısı değiştirici (KÜSID), ince film soğutmalı ısı değiştiriciye (İFSID) göre dolap içerisini daha düşük sıcaklıklara çekebilmiştir. Bunun yanı sıra kütleli soğutmalı ısı değiştirici 10 amper değerine kadar etkin bir soğutma yapabilmıştır. Bu noktadan sonra Fourier etkisi ve Joule ısınması dolap içeriğini ısıtmaya başlamıştır. Ancak ince film soğutmalı ısı değiştiricisi ise 8 amper değerine kadar etkin soğutma yapabilmıştır. Kütleli soğutmalı ısı değiştiricinin kullanıldığı dolapta dış ortamla dolap arasında  $10^{\circ}\text{C}$ lik bir sıcaklık farkı elde edilmiştir, ince film soğutmalı ısı değiştiricinin kullanıldığı dolapta ise maksimum  $7^{\circ}\text{C}$ lik bir fark elde edilebilmiştir. Başka bir deyişle kütleli soğutmalı ısı değiştiricili sistem minimum  $12^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar inebilirken, ince film soğutmalı ısı değiştiricili sistemde minimum  $15^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar inilebilmiştir.

Aşağıda yapılan deneylerden elde edilen diğer sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Isıl yük olmayan deney koşullarında soğutma yükü- akım, COP-akım ve COP-soğutma yükü grafikleri çizdirilmiştir. Böylece yüksüz ortam koşulları için soğutucuda ihtiyaç duyulan soğutma gücü, COP değeri gibi performans değerleri

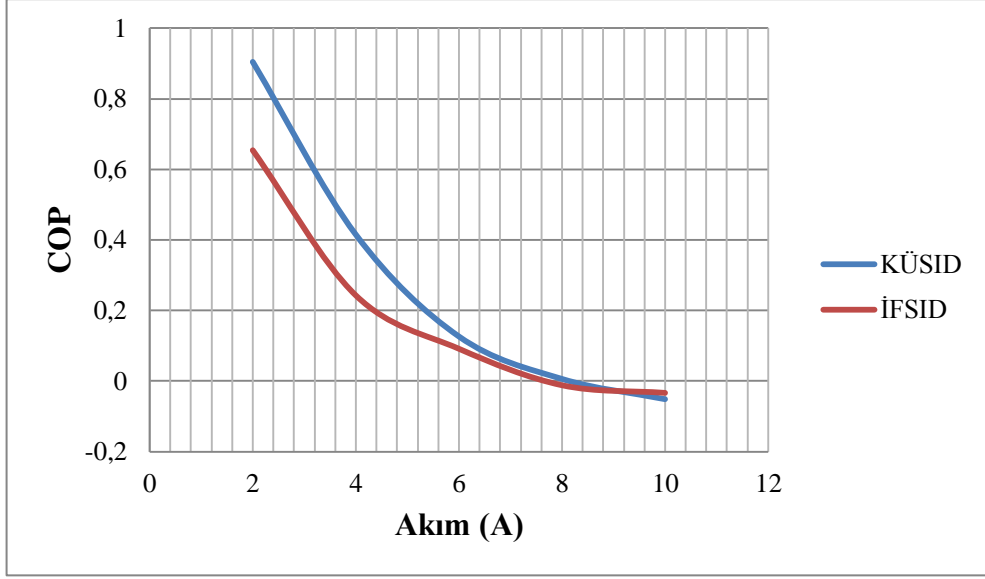
bulunmuş ve soğutucunun karakteristiği ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24’de sırasıyla, soğutma yükü-akım grafikleri, COP-akım grafikleri ve COP-soğutma yükü grafikleri oda sıcaklığında yapılan deneyler için verilmiştir.



**Şekil 3.22 :** 24°C dış ortam koşullarında soğutma gücü-akım grafiği

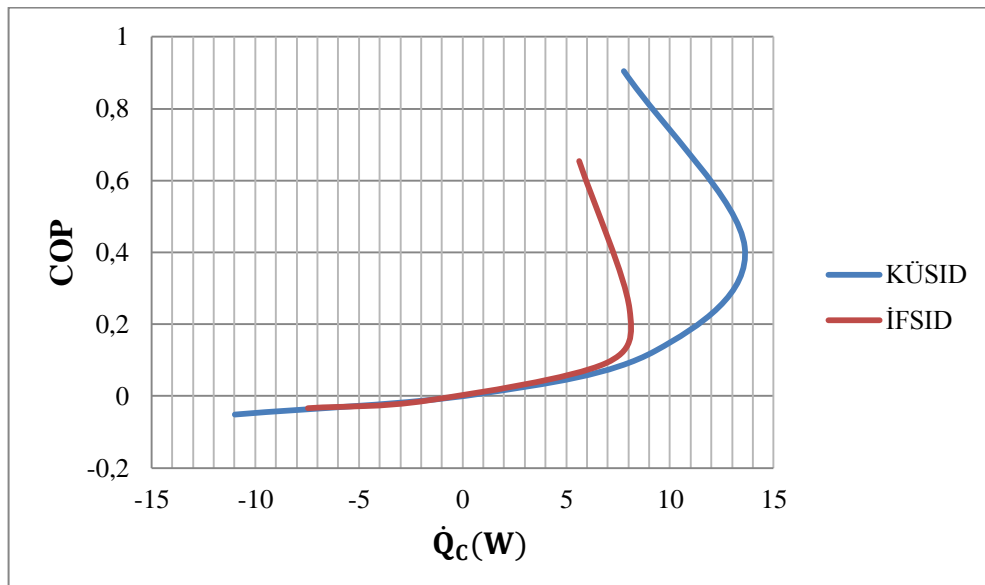
Şekil 3.22’den görüldüğü gibi her iki sistemde düşük amper değerlerinde Fourier ters ısı kaçaqları ve Joule ısınmasından kaynaklanan tersinmezlikler soğutma gücü üzerinde etkili olamamıştır. Fakat 5 amper civarında tersinmezlikler soğutma gücünü olumsuz etkilemeye başlamışlar ve beklendiği gibi daha yüksek akımlara çıktığında TEC bu tersinmez etkilerden dolayı soğutma gücünü kaybederek, 8 A değerinden sonra bir ısıtıcı gibi çalışmaya başlamıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi KÜSID için soğutma gücünün negatif olduğu değer yaklaşık olarak 8 A civarıdır fakat İFSID için bu değer 8 A’dan hemen öncedir. Bunun anlamı ise İFSID kullanılan sistemde TEC’in sıcak yüzeyinden uzaklaştırılan ısı, aynı şartlardaki KÜSID kullanılan sisteme göre daha düşüktür. Yani KÜSID diğer ısı değiştiriciye göre daha etkin bir çözüm olmuştur.





**Şekil 3.23** : 24°C dış ortam koşullarında COP-akım grafiği

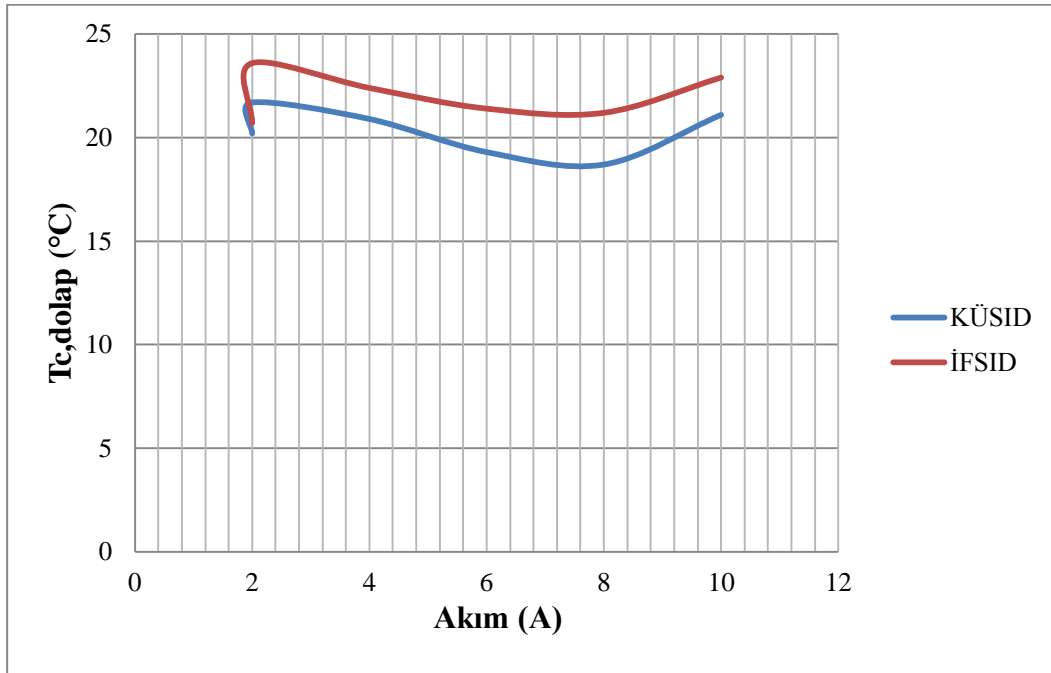
Dolap içinde herhangi bir ısı kaynağı olmadığı durumda ölçülen COP-akım grafiği Şekil 3.23'de görülmektedir. Burada tahmin edildiği gibi düşük amperlerde yüksek COP değerleri elde edilmiştir. Yine soğutma gücüne bağlı olarak yüksek akım değerlerinde COP değerleri küçülmüş ve tersinmezliklerin soğutma gücünden daha yüksek olduğu durumlarda ise negatif değerler elde edilmiştir. Yine soğutma gücü-akım grafiğinden de anlaşıldığı gibi burada da kütleli soğutmalı ısı değiştiricili sistemin COP değeri ince film soğutmalı ısı değiştiricili sistemden daha iyidir. Fakat akım değeri yükseldikçe COPler birbirlerine yaklaşmış hatta 8 A değerinden sonra İFSID sisteminin COP değeri KÜSID sisteminin COP değerini geçmiştir.



**Şekil 3.24** : 24°C dış ortam koşullarında COP-Ḡc grafiği

Soğutucuların en önemli karakteristiklerinden olan COP-Soğutma gücü grafiği Şekil 3.24’de verilmiştir. KÜSID kullanılan sistemde daha büyük COP-soğutma gücü eşleşmesi vardır. Bu soğutucular için çok önemli bir özelliktir. İFSIDli sistemin COP değeri, soğutma gücünün az artmasına karşın çok düşmüştür bu da etkinliğini çabuk kaybetmesine sebep olmuştur.

Yapılan bir diğer çalışma 25 Watt ısı yük altında gerçekleştirilmiş ve deney sonucunda akım-sıcaklık grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan grafikler Şekil 3.25’de görülmektedir.

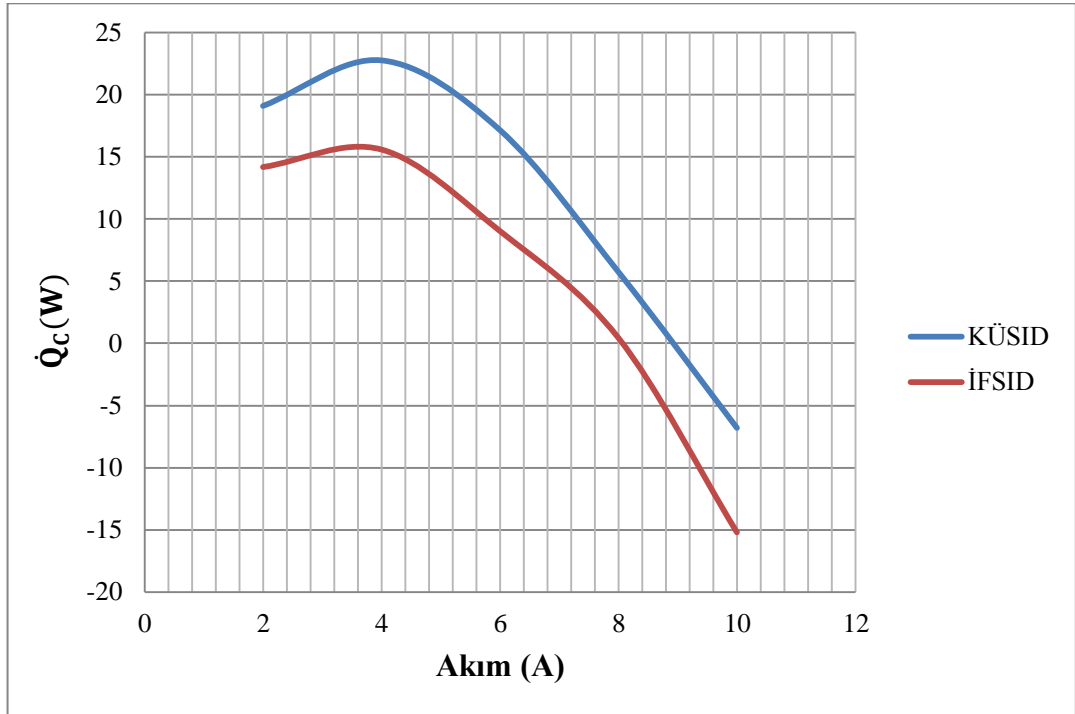


**Şekil 3.25 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$  25W ısı yük altında dolap sıcaklığının akıma göre değişimi

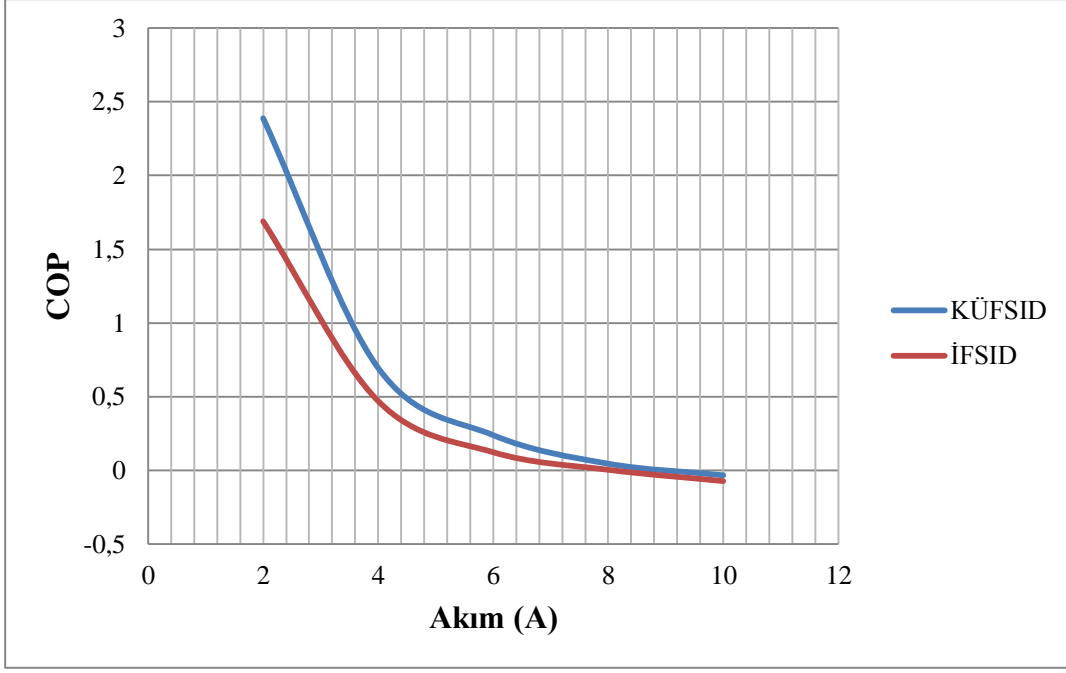
Yukardaki grafiklerden de görüldüğü gibi 25 W ısı yük için hem KÜSID hemde İFSID için 2 amper değeri yeterli soğutmayı yapamamaktadır. Ancak bunun üstündeki akım değerlerinde ise iki sistemde 8 amper değerine kadar yeterli soğutma yapabilmişler ve dolabı oda sıcaklığının altında tutmayı başarmışlardır. 8 A'den sonraki akım değerlerinde ise Fourier ters ısı kaçakları ve Joule ısınması sebebiyle dolap içerisinde sıcaklık artışı başlamıştır. Yine İFSID ve KÜSID arasındaki temel fark kabin içiyle çevreleri arasında yarattıkları sıcaklık farkıdır. KÜSID’de sıcaklık farkı ısı yük 25W iken  $\Delta T_{\max} \approx 3^{\circ}\text{C}$ , İFSID’de ise bu değer yine 25W için  $\Delta T_{\max} \approx 1^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür.

Yukarıda elde edilen akım-sıcaklık grafiklerinin yanı sıra aşağıda gösterilen grafikler elde edilmiştir. Yine akım-sıcaklık grafiğinin yanı sıra soğutma gücü-akım grafiği (Şekil 3.26), COP-akım grafiği (Şekil 3.27) ve son olarakta en önemli karakteristik özellik olan COP- soğutma gücü grafiği (Şekil 3.28) verilmiştir.

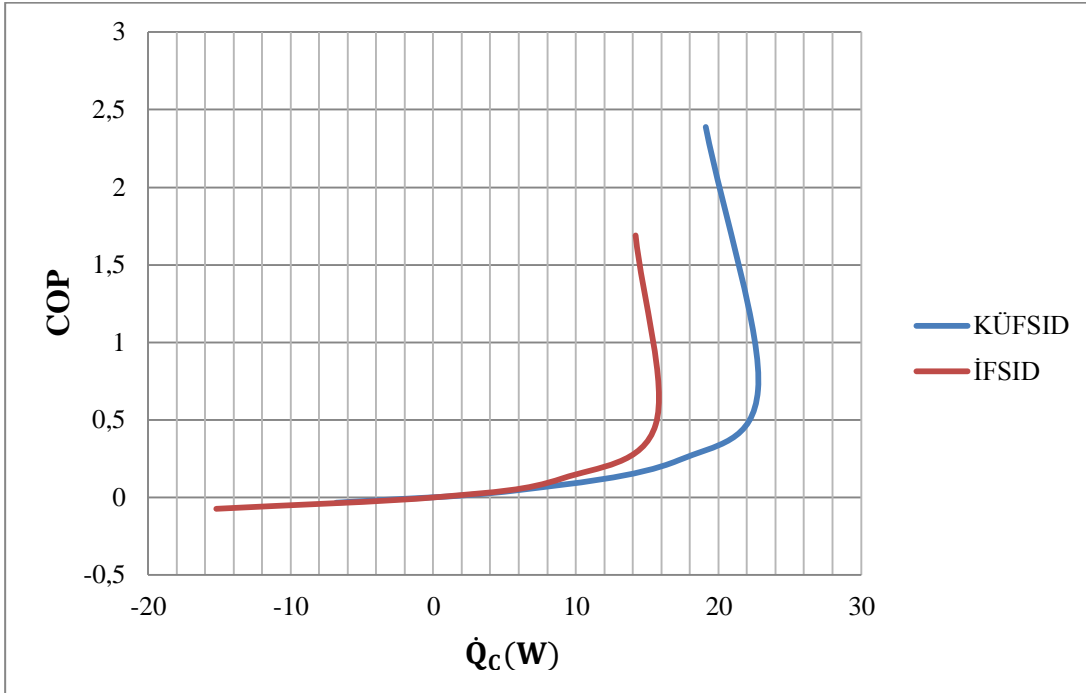
Şekil 3.26'de gösterilen deney 22°C dış ortam koşullarında yapılmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi her iki durumda da soğutma gücü 4 amper değeri için en yüksek seviyesine çıkmıştır. Daha sonrasında ise azalmaya başlamış ve İFSID kullanılan sistemde 8 amperden sonra soğutma yapılamamış ve soğutma gücü negatif değer almıştır. KÜSID kullanılan sistemde ise 9 amper değerinde soğutma gücü sıfıra inmiş ve bu değerden sonrası için soğutma yapılamamıştır.



Şekil 3.26 : 22°C dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında  $\dot{Q}_c$ -akım grafiği



**Şekil 3.27 :** 22°C dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında COP-akım grafiği

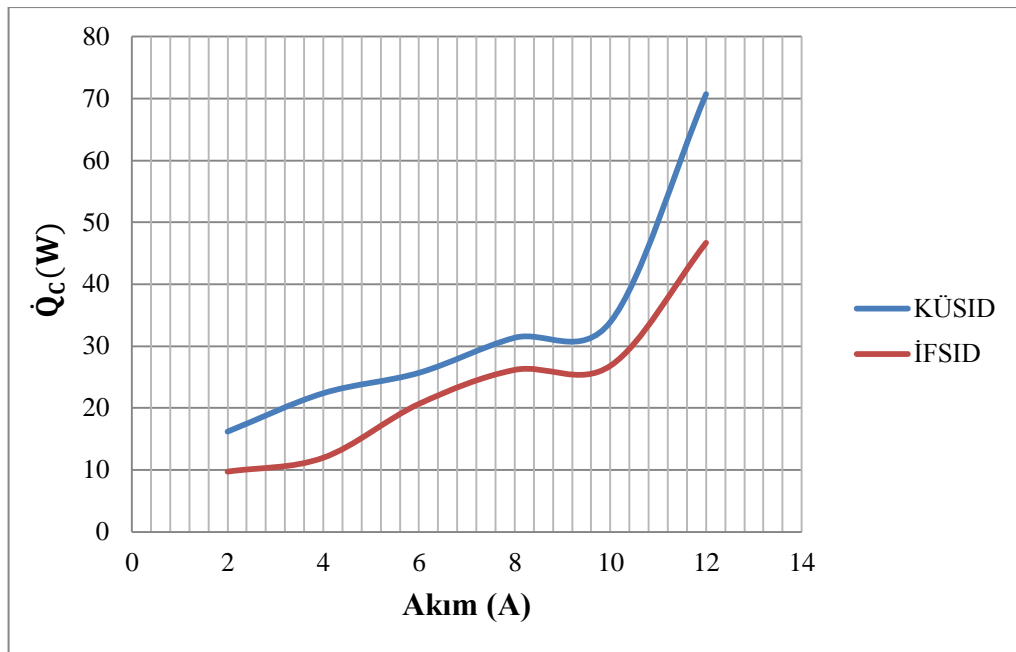


**Şekil 3.28 :** 22°C dış ortam ve 25 W termal yük koşullarında COP- $\dot{Q}_c$  grafiği

Bunun yanı sıra termal odada ortam sıcaklığı 35°C'ye ayarlanarak yüksüz ve 25 Watt yüklü koşullarda iki ayrı durum incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda cihazın iki önemli özelliği olan soğutma yükü ve COP değerleri belirlenmiştir. Deney verileri, termal oda çalıştırılıp, ortam koşulları kararlı duruma geldikten sonra değerlendirilmeye alınmıştır. Veriler otomatik olarak bilgisayar tarafından 30

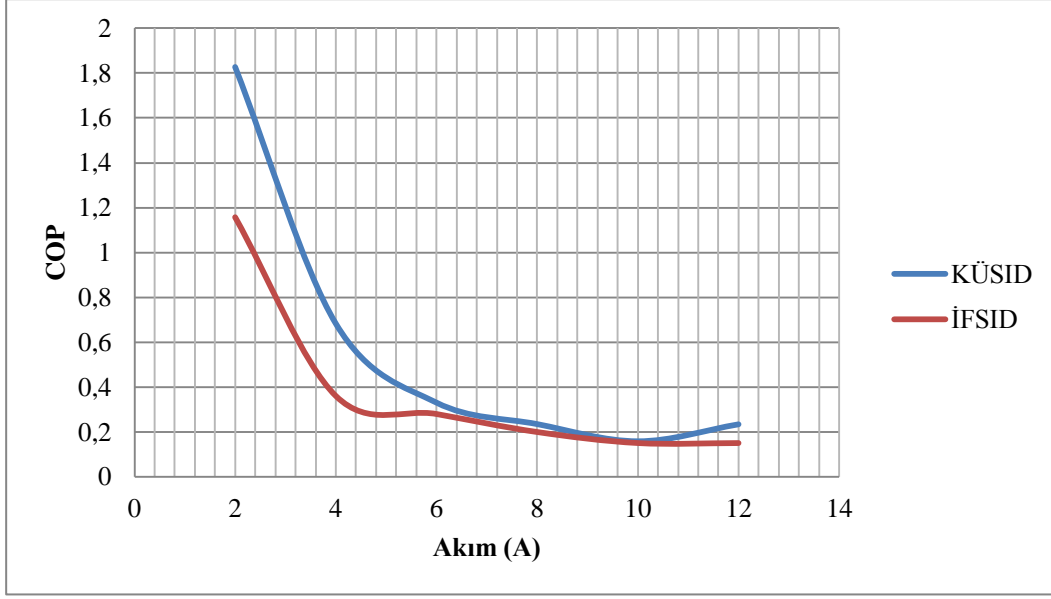
saniyelik zaman aralıklarında alınmıştır. Termal oda çalışmaya başladıktan sonra her bir akım değeri için kararlı durumda 30 dakikalık veriler toplanmış ve bu veriler neticesinde aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 3.29'da soğutma gücü-akım grafiği görülmektedir. Burada 35°C dış ortam değeri için akım değeri artıkça soğutma gücünde beklenildiği gibi artmıştır. Burada TEC modülün yüzeyinden pompalanan ısının etkin olarak uzaklaştırılmasının önemi büyüktür çünkü modülde Fourier ters ısı kaçakları önlenmiş bu sayede başarılı bir soğutma yapılabilmektedir. 2 A değerinde 10-15 W soğutma yapılabılırken akım değeri 10 A değerini aştığında 50-70 W arasında soğutma yapılabilmektedir.



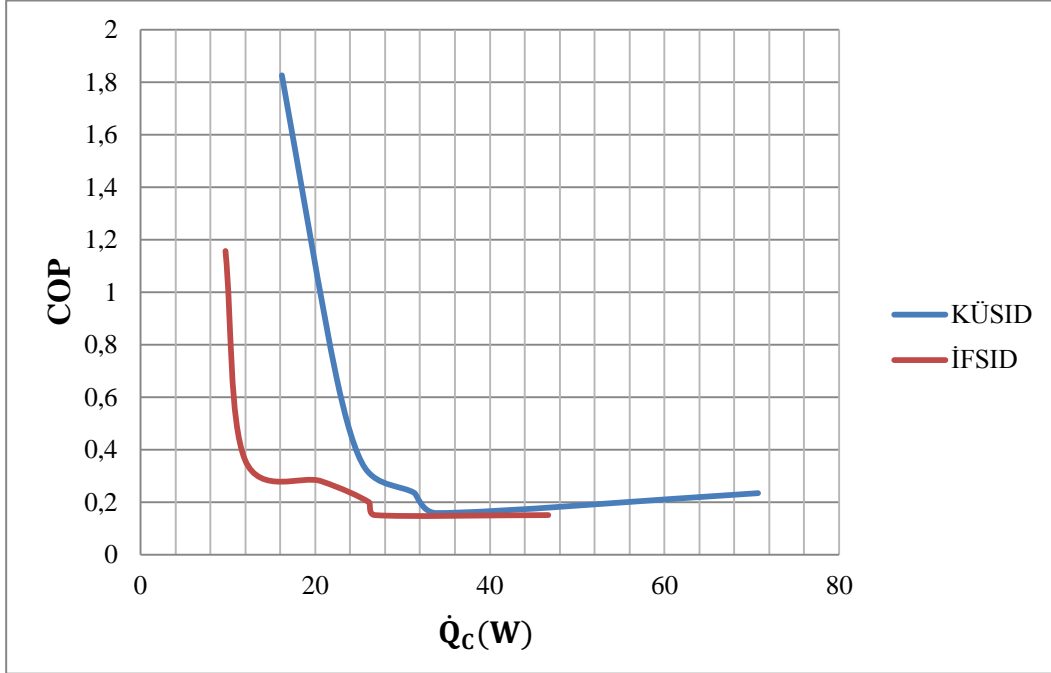
Şekil 3.29 :  $T_{\infty}=35^{\circ}\text{C}$ 'de dolap içinde ısı kaynağı yokken  $\dot{Q}_c$ -akım grafiği

Şekil 3.30'da ise COP-akım grafiği görülmektedir. Bu grafikte yine tahmin edilebileceği gibi akım değeri artıkça COP küçülmüştür ve 8 A'den sonra 0.2 değerinin altına inmiştir. 5 A değerine kadar KÜSID ve İFSID kullanılan modüller arasında ki COP farkı önemli ölçüde büyük olmasına rağmen 6 A değerinden sonrası için COP değerleri hemen hemen birbirlerine eşit değerler almışlardır.



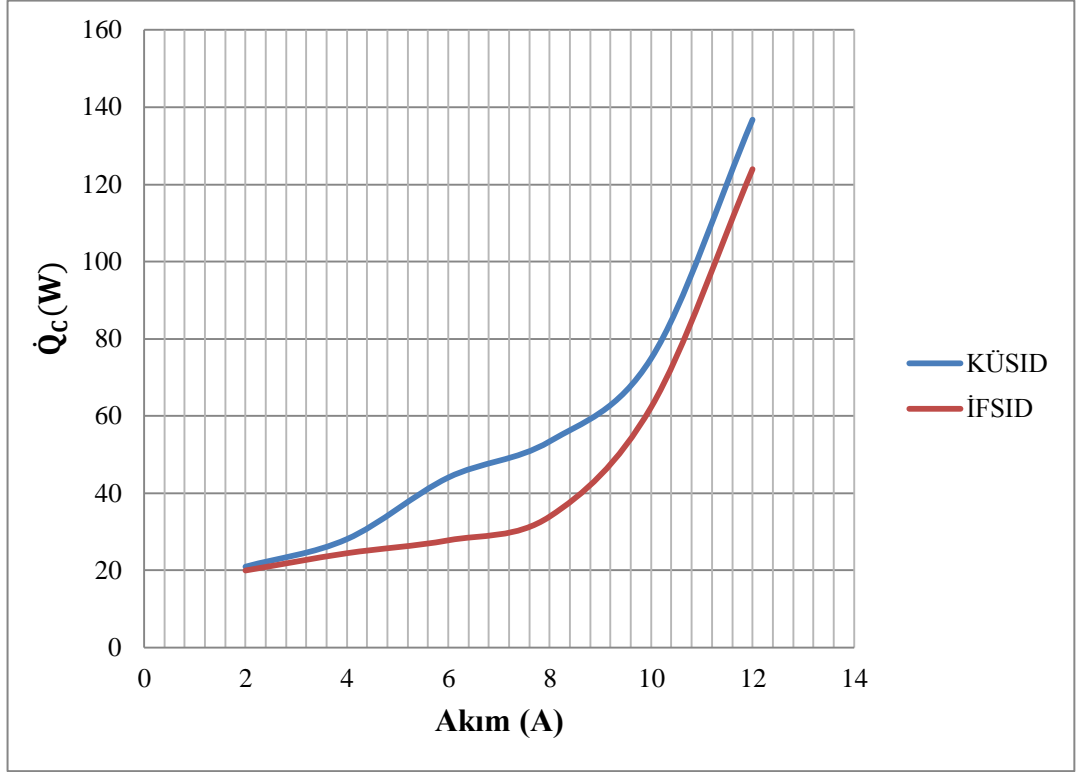
**Şekil 3.30** : 35°C dış ortam koşullarında ısı yükü olmayan, COP-akım grafiği

35°C dış ortam koşullarında yapılan deneyde elde edilen COP-soğutma gücü değerleri ise Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Buradan da açıkça görülmektedir ki düşük akım değerleri için KÜSID kullanılan soğutucu modülün COP değeri İFSID kullanılan modülden çok daha yüksektir. Aynı şekilde bu soğutma gücüne de yansımıştır ve 5 amperin altındaki değerler için KÜSID kullanılan sistemin soğutma gücü, ince film soğutma yapılan sisteme göre yaklaşık iki kat daha fazla olmuştur.



**Şekil 3.31** : 35°C dış ortam koşullarında, ısı yükü olmayan COP-Ḡc grafiği

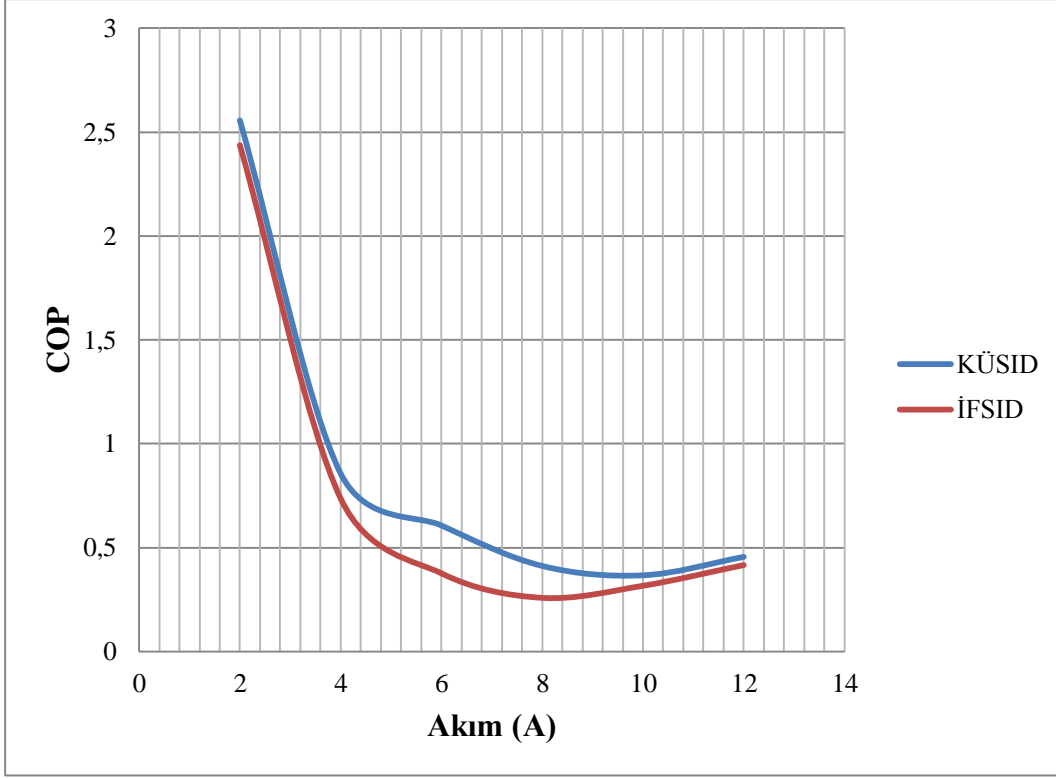
35°C’de termal odada yapılan bir başla deney ise dolap içerisine 25W’lık ısıtıcıyı yerleştirerek yapıldı. Bu durum için elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.



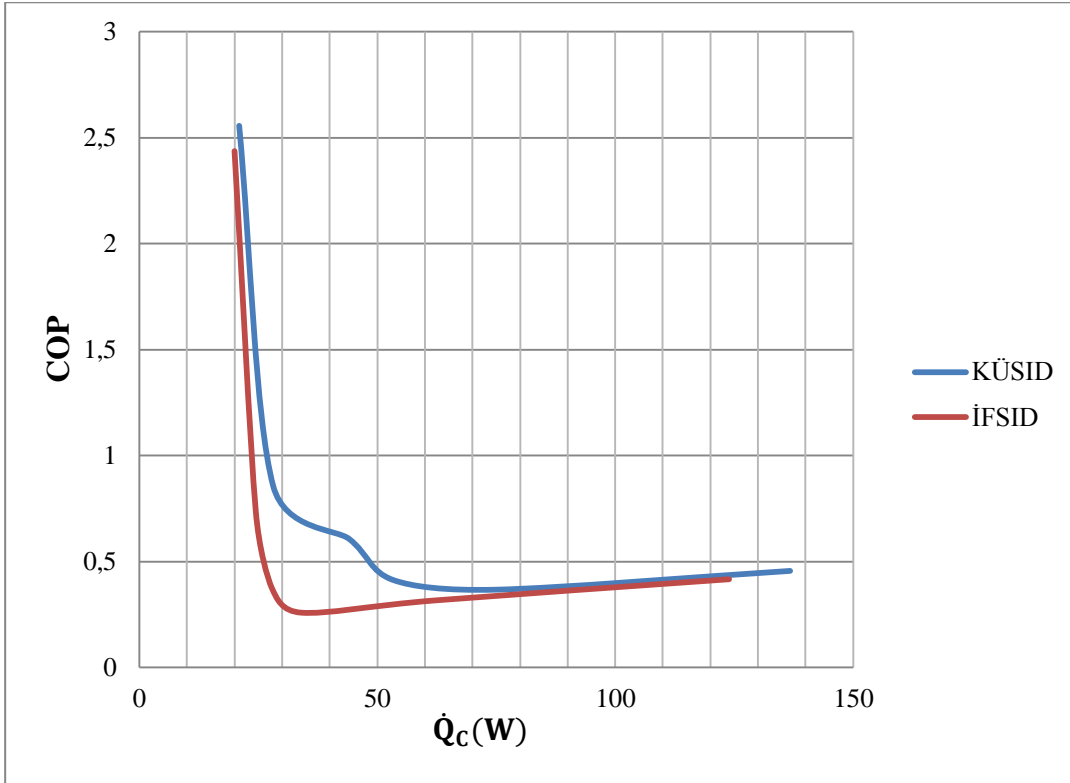
**Şekil 3.32 :** 25W yük ve 35°C dış ortam koşullarında Soğutma gücü-akım grafiği

Termal odada 25W ısı yükte yapılan deneyin soğutma yükü-akım grafiği Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Buda dolap içerisine dışarıdan olan ısı kaçağının yanı sıra içeride bulunan ısı yük sebebiyle, ortamla soğutucu modülün yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı artmış, dolayısıyla modülün pompaladığı ısı miktarı artmıştır. Düşük akımlarda KÜSID ve İFSID kullanılan modüller arasında soğutma yükünde önemli bir fark yokken bu fark 5 A ile 8 A arasında artmıştır.

25W yük, 35°C ortam sıcaklığında elde edilen akıma karşı COP değerleri Şekil 3.33’de gösterilmektedir. Soğutma yükleri yüksek olduğu için düşük akımlara karşılık gelen COP değerleri 2.5 değeriyle başlamış ve akım değerleri arttıkça azalmıştır. COP değerleri arasında görece çok fark yoktur.



Şekil 3.33 : 25W yük ve 35°C dış ortam koşullarında COP-akım grafiği



Şekil 3.34 : 25W yük ve 35°C dış ortam koşullarında  $\dot{Q}_c$ -akım grafiği



Soğutucunun 25W ve 35°C'deki karakteristiğini özetleyen COP-soğutma gücü grafiği Şekil 3.34'de verilmiştir. Burada beklendiği gibi yüksek COP değerlerinde düşük soğutma yüküne karşın, yüksek soğutma yüklerinde düşük COP'ler elde edilmiştir.

Grafiklerden elde edilen sonuçların tamamında KÜSID kullanılan sistemin soğutma gücü, COP değeri İFSID kullanılan sisteme göre biraz daha yüksek değerler almış ve inebildiği sıcaklık değerleride daha düşük olmuştur.

### 3.6 Kalorimetrik Ölçüm Yöntemiyle Soğutma Gücü ve COP Değerlerinin Elde Edilmesi

Yapılan deneyler kümülatif yöntemle belirli akım ve voltaj değeri için kontrol edilmiştir. TEC modül 4, 6 ve 8 A değerlerinde çalıştırılırken, soğutma gücü, COP değerleri belirlenmiştir. Deneylerin doğruluğunu artırmak için ısı kaçaklarının bulunması gerekmektedir. Bunun için kaçak ısı formülünden;

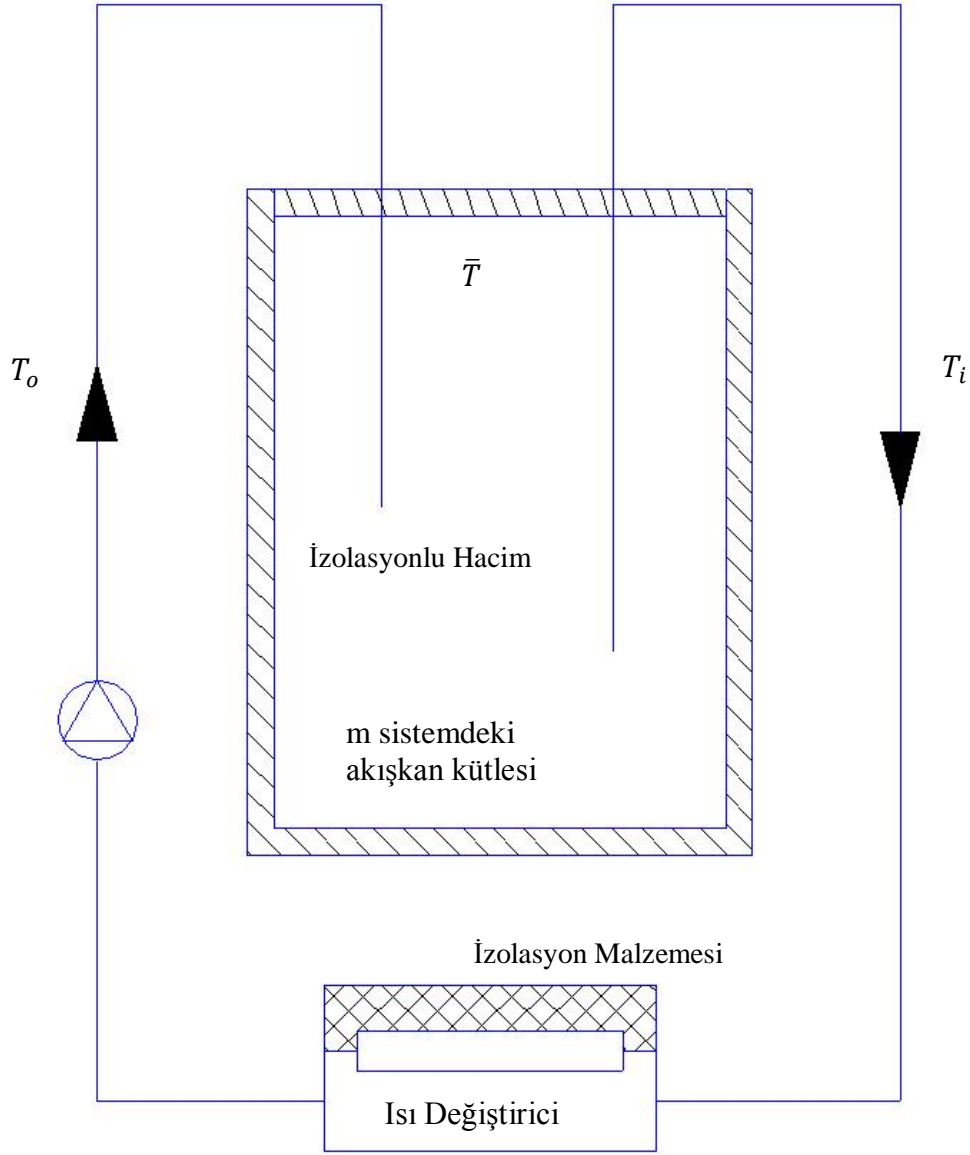
$$\dot{Q}_{Lo} = U_{Lo}(\bar{T} - T_{\infty}) \quad (3.1)$$

yararlanılmıştır. Burada  $U_L$  ısı transfer katsayısı (W/°C),  $\bar{T} = \frac{T_i + T_f}{2}$  sistemde dolaşan suyun ortalama sıcaklığı ve  $T_{\infty}$  dış ortamdaki havanın sıcaklığını belirtir. Burada  $U_L$  sistem için sabittir. Bunu belirlemek için formül 3.1'de sıcaklık farkı kısmı  $\dot{Q}_{Lo}$ 'a bölüm olarak geçerse;

$$U_{Lo} = \frac{m c_p (\bar{T}_f - \bar{T}_i)}{\left[ \frac{T_i + T_f}{2} - T_{\infty} \right] (t_f - t_i)} \quad (3.2)$$

formülü elde edilir.

Burada oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.35'de gösterilmektedir. Deney düzeneğinde izolasyonu çok iyi olan bir termos kullanılmıştır. Termosun içindeki akışkan kütlesi sabittir ve tüm ısı akışkana verilerek sistem ısıl olarak dengeye geldiği anda deneye başlanmıştır.



**Şekil 3.35 :**  $U_{Lo}$  değerinin belirlendiği deney düzeneği

Deney yapılırken sistem içerisinde dolaşan soğutucu akışkanın sıcaklığı  $65^{\circ}\text{C}$  değerine kadar getirilmiş sonrasında ise akışkanın sıcaklığının  $50^{\circ}\text{C}$  oluncaya kadar beklenmiş ve denklem 3.2'den  $U_{Lo}$  değeri hesaplanarak  $1,036 \text{ (W/^{\circ}\text{C})}$  değeri elde edilmiştir. Daha sonra yapılan deneylerde dış ortam ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı göz önünde bulundurularak kayıp ısı hesaplanarak, ölçümlere eklenmiştir. Böylece daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Bu amaçla önce ısı değiştiricilerin ısı taşınım katsayıları bulunmaya çalışılmıştır.



formülüyle bulunur. Burada  $h$  taşınım katsayısı,  $A$  akışkanın geçtiği yüzey alanı ve  $\Delta T_B$ 'de yüzeyle akışkan arasındaki sıcaklık farkıdır.

Yapılan deneyde su tankının çevresi köpükle izole edilmiştir ve tankın içindeki su resistans yardımıyla belli bir sıcaklığa getirilmiş ve sistemin dengeye gelmesi sağlanmıştır. Burada su tankı içindeki suya transfer edilen enerji miktarı;

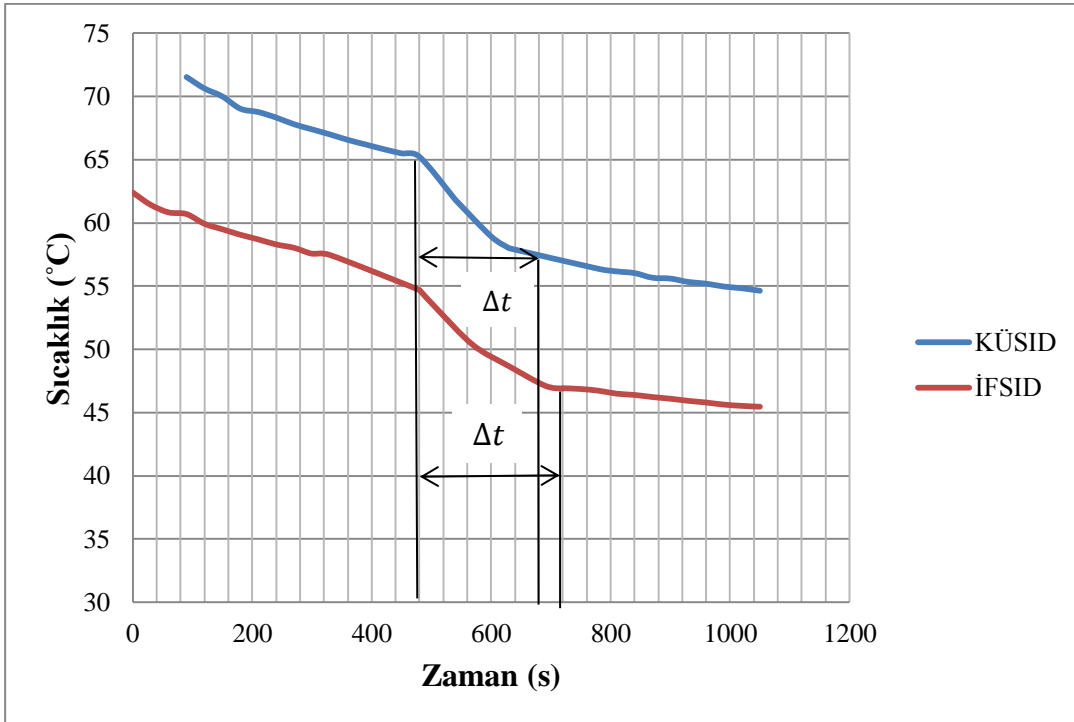
$$E = mc_p \Delta T \text{ (J)} \quad (3.4)$$

formülüyle bulunur. Burada  $m$  akışkanın kütlesi,  $c_p$  ısı kapasitesidir.

$\Delta T$  ise  $\bar{T}_i - \bar{T}_f$  şeklinde hesaplanır ve su tankı içerisine yerleştirilmiş problarla ölçülmüştür. Buradan akışkanın ilk sıcaklığından son sıcaklığına düşünceye kadar geçen süre hesaplanarak denklem 3.4'e eşitlenirse, ısı taşınım katsayısı;

$$\bar{h} = \frac{E}{\Delta T_B A (t_f - t_i)} = \frac{mc_p (\bar{T}_i - \bar{T}_f)}{(T_d - \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2}) A (t_f - t_i)} \quad (3.5)$$

formülüyle hesaplanır. Formülde kullanılan  $(t_f - t_i)$  deneyin başlamasıyla bitişi arasında geçen süredir ve  $\frac{T_{fi} + T_{fo}}{2}$  ifadesi ise ısı değiştiriciye gelen akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalamasıdır.



Şekil 3.37 : Isı taşınım katsayısı deneyinden elde edilen sıcaklık zaman grafiği

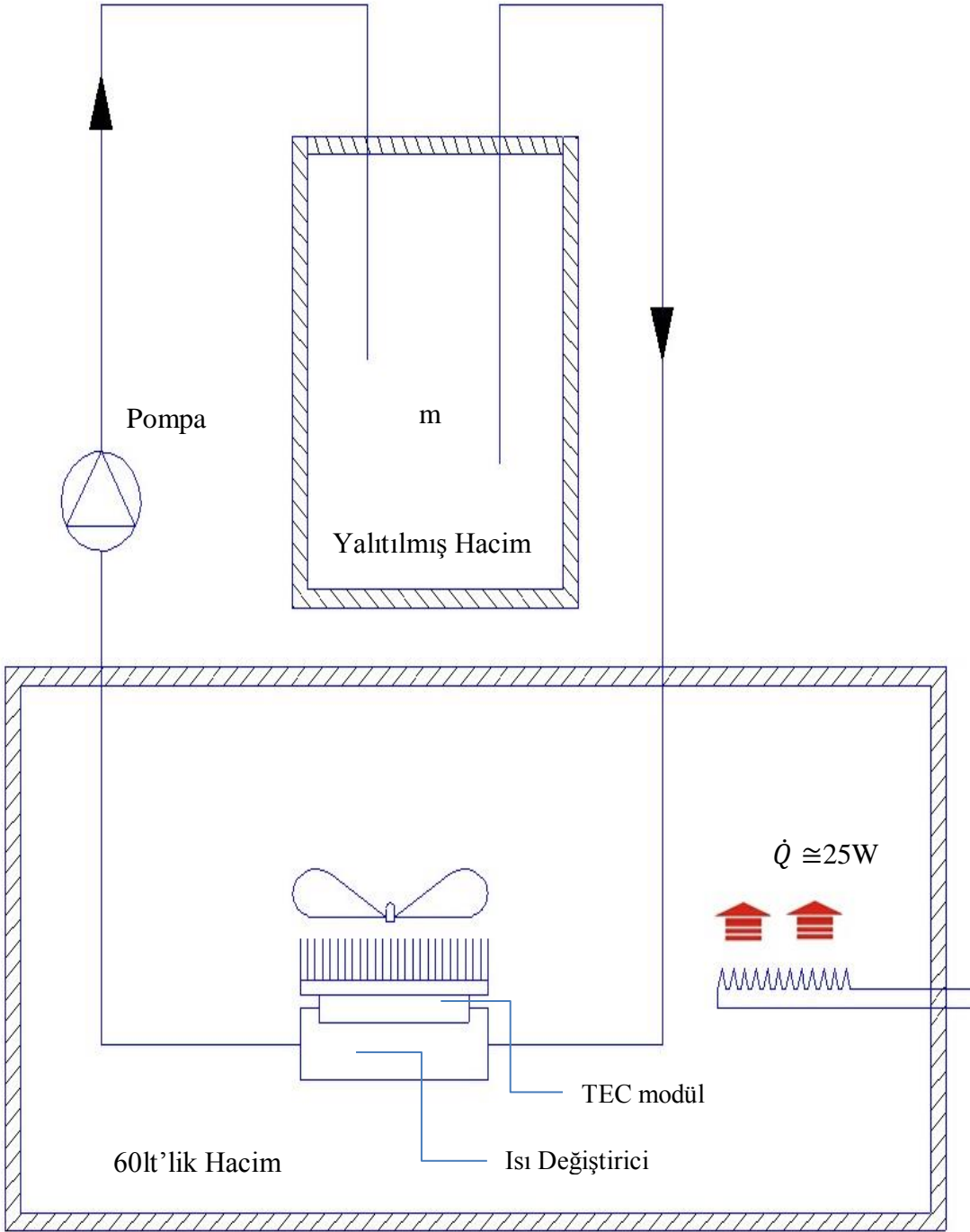
Yapılan deney pompa 2 A değerinde çalışırken yapılmıştır. Şekil 3.37'de deney süresi ve sıcaklık değerleri görünmektedir. Oklarla işaretlenmiş bölgeler deneyin en önemli bölgesini oluşturmaktadır. Buradaki eğim taşınım katsayısını belirler. Elde edilen verilere göre formüller yardımıyla hesap yapıldığında İFSID için elde edilen ısı transfer katsayısı; 44 gr /s debide  $\bar{h} = 586,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve KÜSID için; 42gr/s debide  $\bar{h} = 664,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  elde edilir.

Elde edilen değerler düşük sıcaklık farkları için oldukça yüksek ve başarılıdır. Buradaki en önemli faktör soğutulan yüzeyle, soğutucu akışkanın birbirlerine doğrudan temas etmesi ve hiçbir termal direncin ısı transferini kötü etkilememesidir.

### **3.8 Kalorimetrik Ölçüm Yöntemiyle Yapılan Deney Sonuçları**

Radyatör kullanılan sistemdeki soğutma gücü ve COP değerleri, ölçüm sisteminde bulunan olası hatalar sebebiyle sapmaya uğrayabileceğini düşünerek, yapılan deneylerin kalorimetrik yöntemle 4, 6 ve 8 A akımları için tekrarlanması öngörülerek Şekil 3.38'da görülen deney düzeneği oluşturulmuştur.

Deneyde akışkan sıcaklığı, deney başlangıcındaki sıcaklığının 10°C üzerine çıktığı anda bitirilmiştir. Akışkanın sıcaklığı genellikle çevreyle dengede iken deneylere başlanmıştır.

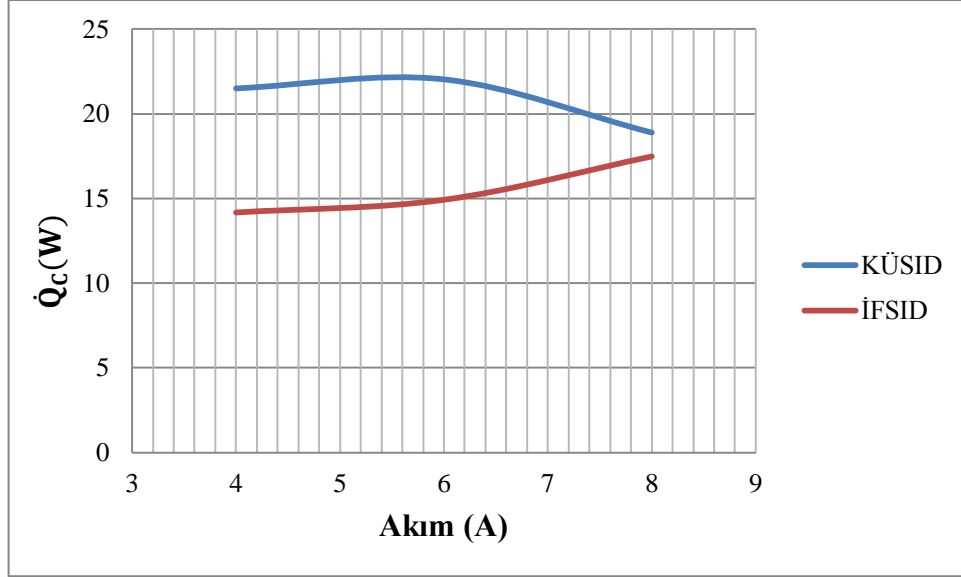


**Şekil 3.38 :** Kümülatif deney düzeneği

Kümülatif deneylerin hepsi oda sıcaklığındaki ortam koşullarında yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen verilere göre, her akım ve voltaj değeri için akım-soğutma gücü, akım-COP ve soğutma gücü-COP grafikleri çizilmiştir. Deneyler ayrıca pompanın farklı akım değerleri olan 2 Amper ve 3 Amper değerleri için

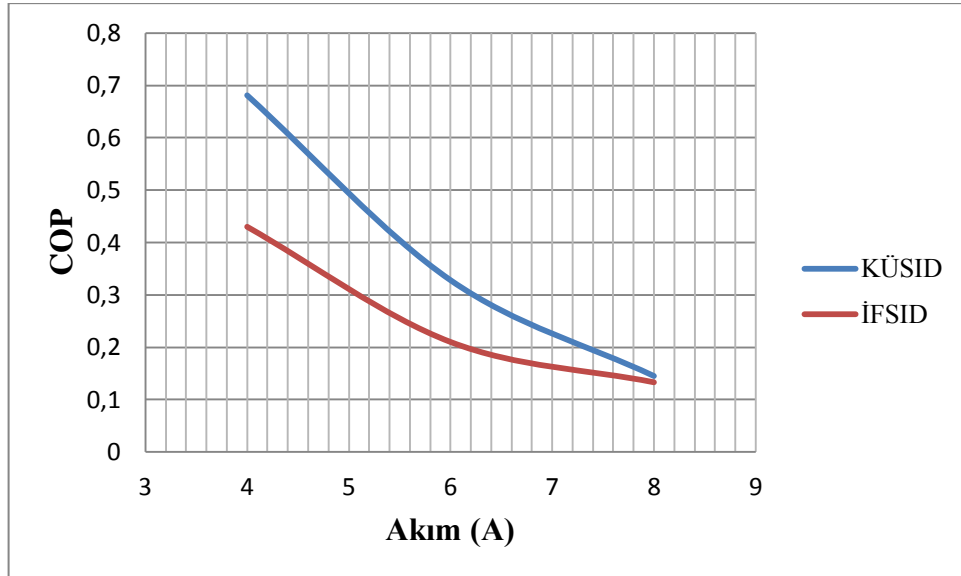
yapılmıştır. Böylece debideki artışın soğutma gücü ve COP değerine olan etkisi de incelenebilmiştir.

İlk deneyler pompa 2 Amper akım değerinde çalışırken yapılmıştır. 4 amper değeri için çizilen grafikler Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’da gösterilmektedir.



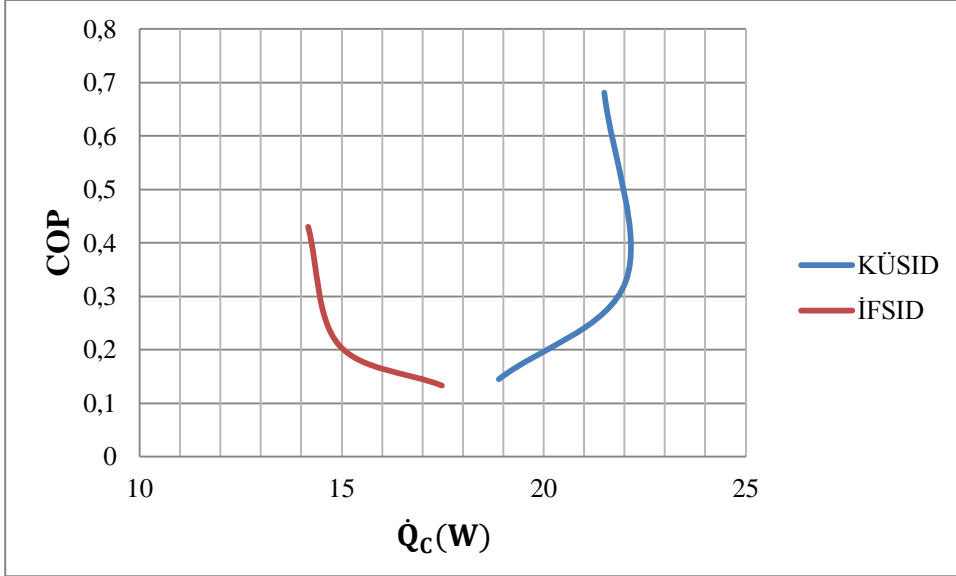
Şekil 3.39 : 22°C oda sıcaklığında, soğutma gücü-akım grafiği,  $I_{po}=2$  A

Şekil 3.39’da görüldüğü gibi KÜSID için akım 4 Amperden 6 Ampere arttığında soğutma gücünde artmış fakat bu değerden sonra ise hafif bir azalma olmuştur. İFSID içinse soğutma gücü değeri akım arttıkça artmıştır.



Şekil 3.40 : 22°C oda sıcaklığında, COP-akım grafiği,  $I_{po}=2$  A

Yüksüz hacimde yapılan ölçümde elde edilen verilere göre çizilmiş akıma karşı COP grafiği Şekil 3.40'da gösterilmiştir. Burada daha önceki grafiklerde olduğu gibi KÜSID ve İFSID arasındaki COP farkı düşük akımlarda yüksektir ve akım değeri arttıkça fark azalmaktadır.



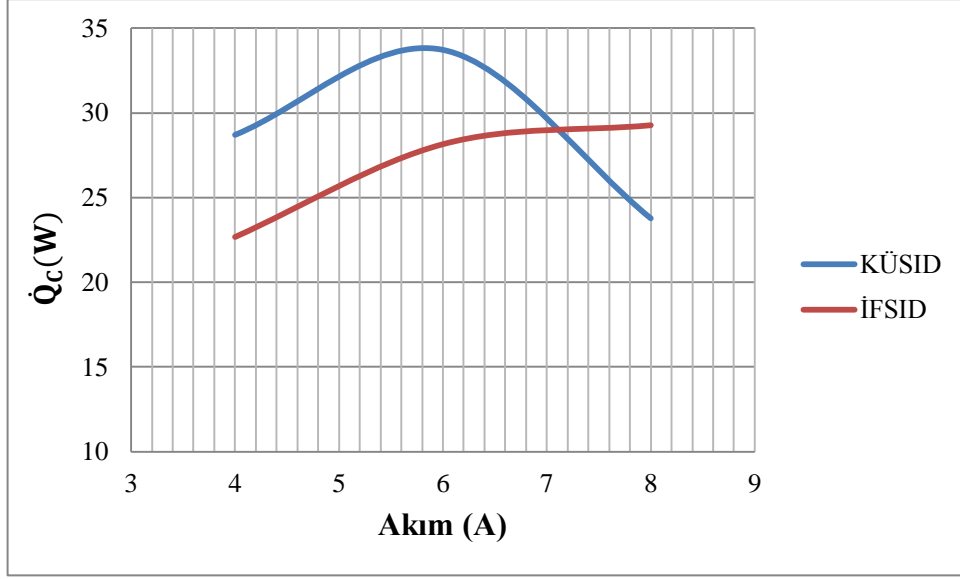
**Şekil 3.41** : 22°C oda sıcaklığında, soğutma gücü-COP grafiği,  $I_{po}=2$  A

Şekil 3.41'de ise soğutma gücü-COP grafiği görülmektedir. İFSID için soğutma yükü arttıkça COP değeri düşmüştür fakat KÜSID için belli bir değerden sonra Fourier ters ısı kaçakları sebebiyle soğutma yükünde de azalma olmuştur.

Daha sonra aynı deney koşullarında fakat sistemde soğutucu akışkanın devrede sirkülasyonunu sağlayan pompanın 3 Amper değerinde çalıştırılmasıyla yapılan deneyler tekrarlanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 3.42, Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'de gösterilmiştir.

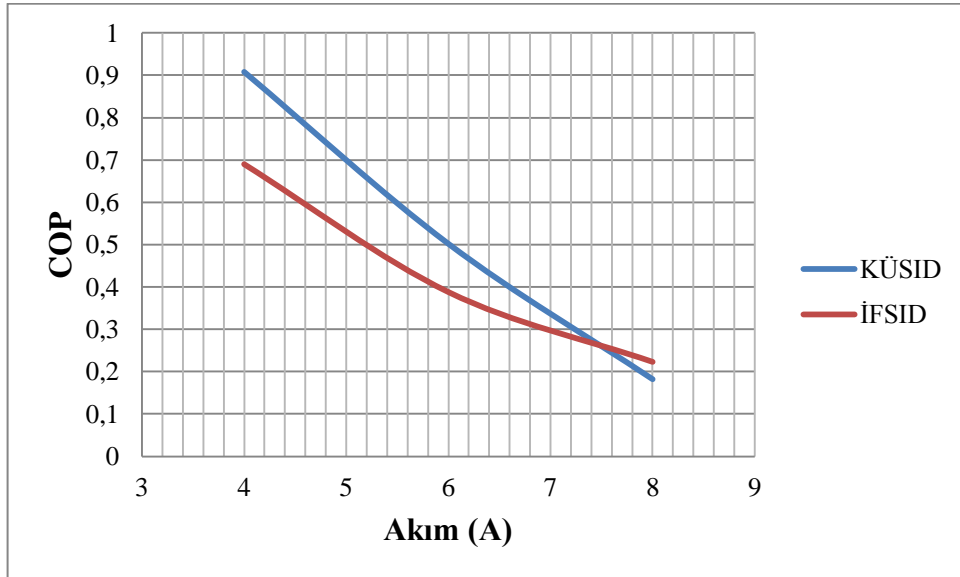
Grafiklerden de görüldüğü gibi akışkanın debisinin artması soğutma gücünü artırmıştır ve buna bağlı olarak da COP değeri artmıştır.





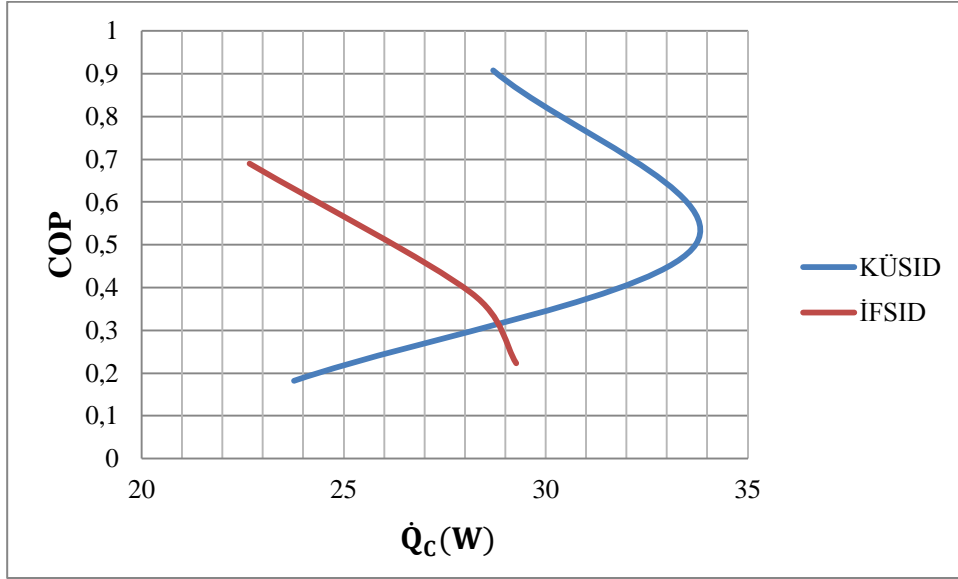
Şekil 3.42 : 22°C oda sıcaklığında, soğutma gücü-akım grafiği,  $I_{po}=3$  A

Şekil 3.42’de gösterildiği gibi KÜSID kullanılan soğutucu modülün performansı 6 A değerine kadar artmış fakat bu değerden sonra ters ısı kaçakları sebebiyle soğutma gücünde azalma olmuştur. İFSID kullanılan soğutucu modülün performansı ise akımla artmıştır. Ancak soğutma yükü 7 A değerine kadar KÜSID kullanılan sisteme göre düşük kalmıştır.



Şekil 3.43 : 22°C oda sıcaklığında, COP-akım grafiği,  $I_{po}=3$  A

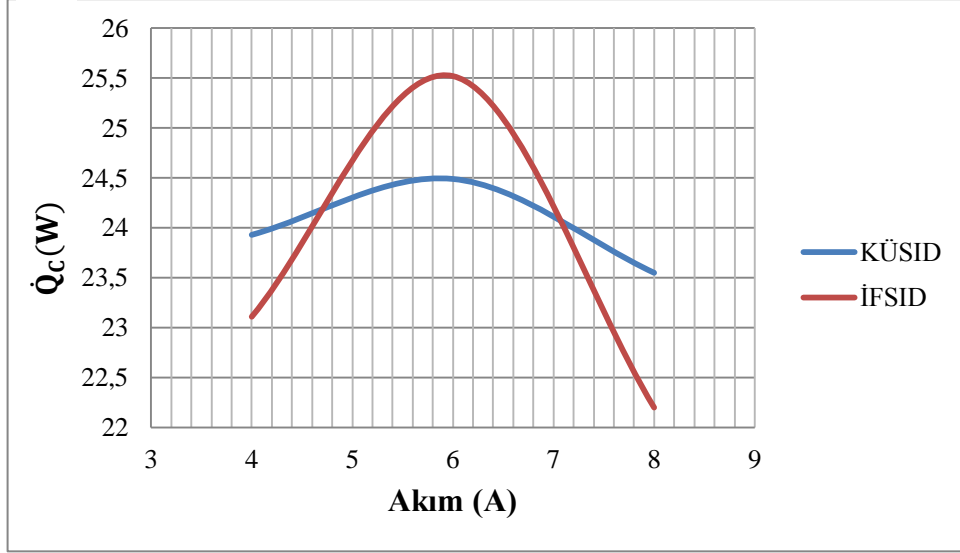
Şekil 3.43’de akım-COP grafiği görülmektedir. Bu grafikte de önceki sonuçlara benzer olarak KÜSID kullanılan sistemin COP değeri, İFSID kullanılan sistemin COP değerinden 7 Amper değerine kadar yüksek çıkmıştır.



Şekil 3.44 : 22°C oda sıcaklığında, soğutma gücü-COP grafiği,  $I_{po}=3$  A

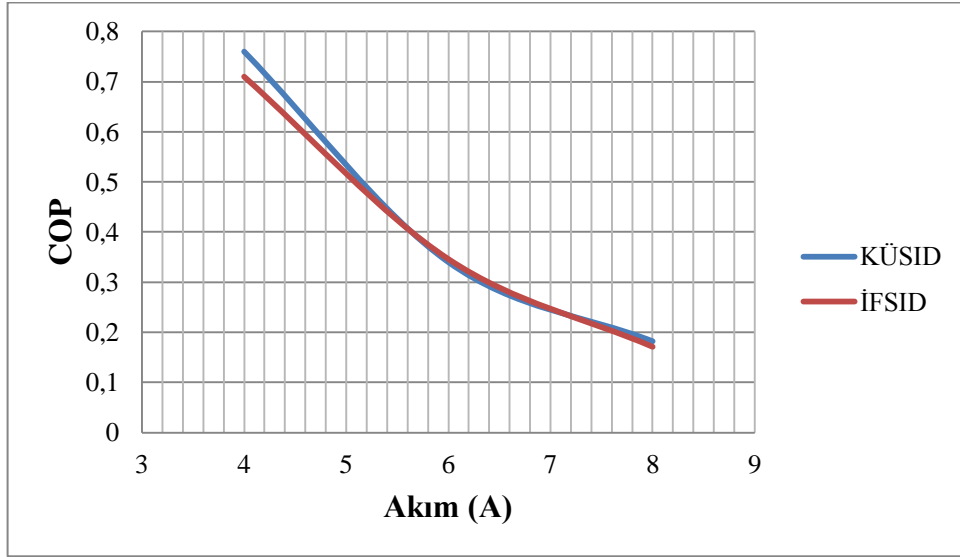
Soğutma yükü-COP grafiğine bakıldığında ise KÜSID kullanılan sistemin 0.5 COP değerinden sonra ters ısı kaçakları yüzünden soğutma gücünün önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Buna karşın İFSID kullanılan soğutma modülünde 6 Amperden yani 0.4 COP değerinden sonra soğutma gücünde çok az da olsa bir artış görülmüştür. Ancak genel itibariyle KÜSID kullanılan sistemin soğutma gücü ve COP değerleri İFSID kullanılan modülden daha iyidir.

Daha sonra soğutulan hacim içerisine yaklaşık 25 W ısı yük verecek şekilde bir rezistans yerleştirilmiştir. Yine burda da pompanın 2 ve 3 A değeri için ayrı deneyler yapılmıştır. Elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.



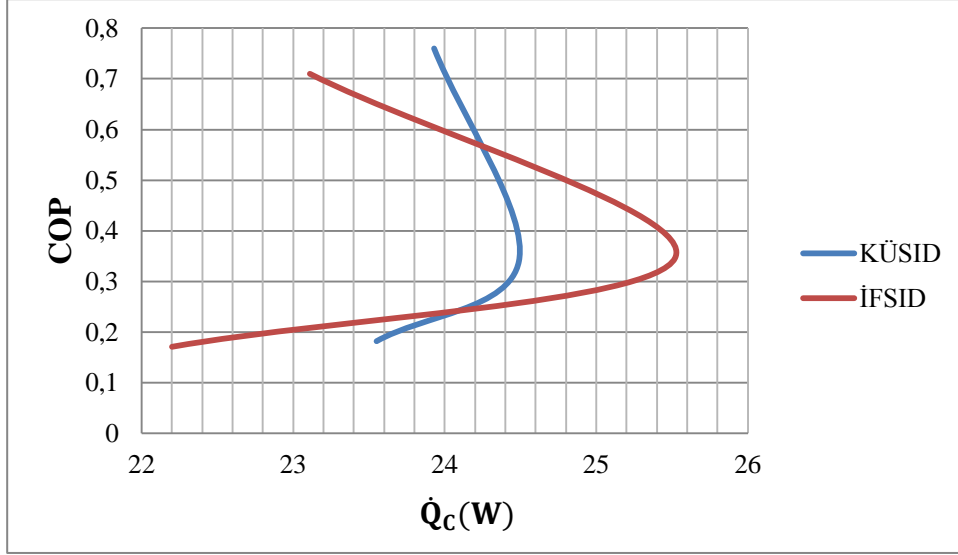
**Şekil 3.45 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısı yükünde, soğutma gücü-akım grafiği,  $I_{p0}=2$  A

Soğutulan hacmin içine 25 W'lık bir ısı yük konulduğunda oluşan soğutma gücü-akım grafiği yukarıda görüldüğü gibi elde edilmiştir. KÜSID ve İFSID'in soğutma yükleri burada hemen hemen aynıdır. Soğutma yükleri 25W civarında salınım göstermiştir.



**Şekil 3.46 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de ve 25W ısı yük altında, COP-akım grafiği,  $I_{p0}=2$  A

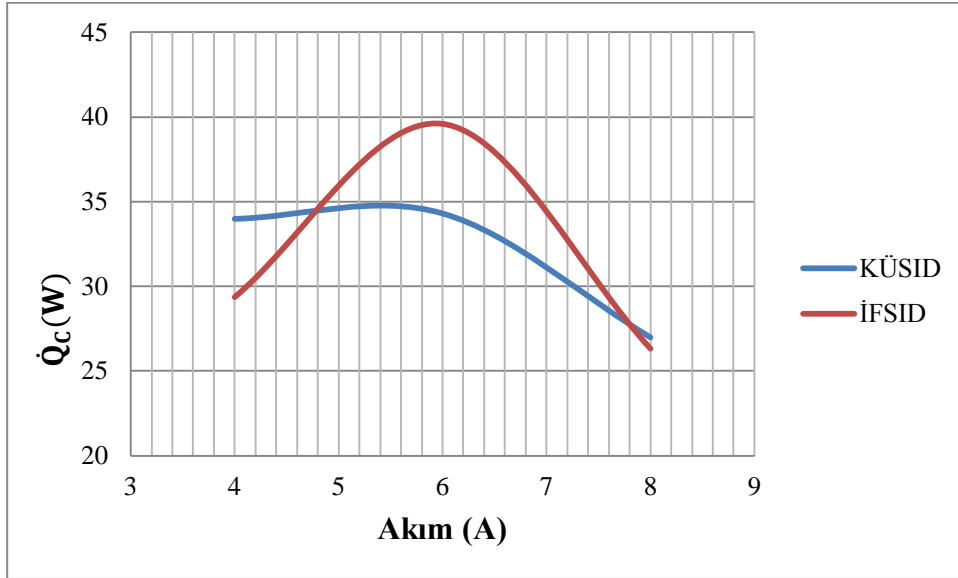
Deneyle sonuçunda oluşan COP değerleri ise Şekil 3.46'de görülmektedir. İki ısı değiştiricinin de COP değerleri hemen hemen her akım değeri çakışmışlardır. 25 W ısı yük altında KÜSID ve İFSID'in performansı yaklaşık olarak eşit çıkmıştır.



**Şekil 3.47 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısı yükünde, soğutma gücü-COP grafiği,  $I_{po}=2$  A

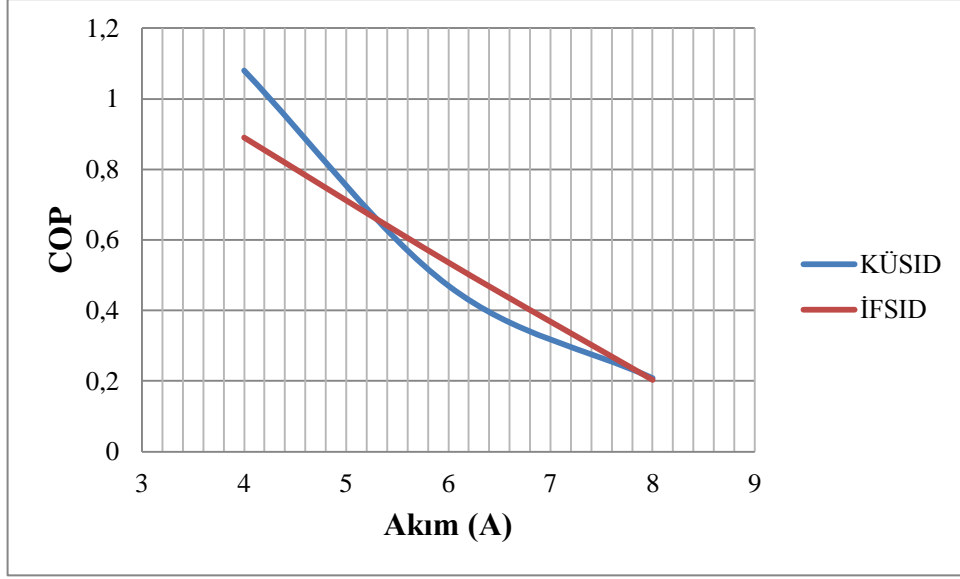
25 W ısı yük altında soğutucu sistemlerin soğutma gücü COP değerleri Şekil 3.47'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi ters ısı kaçakları arttıkça soğutma güçleri azalmış, buna bağlı olarakta COP değerlerinde düşme meydana gelmiştir.

Bu aşamadan sonra aynı deneyler pompa 3 A değerinde çalışırken tekrarlanmıştır.



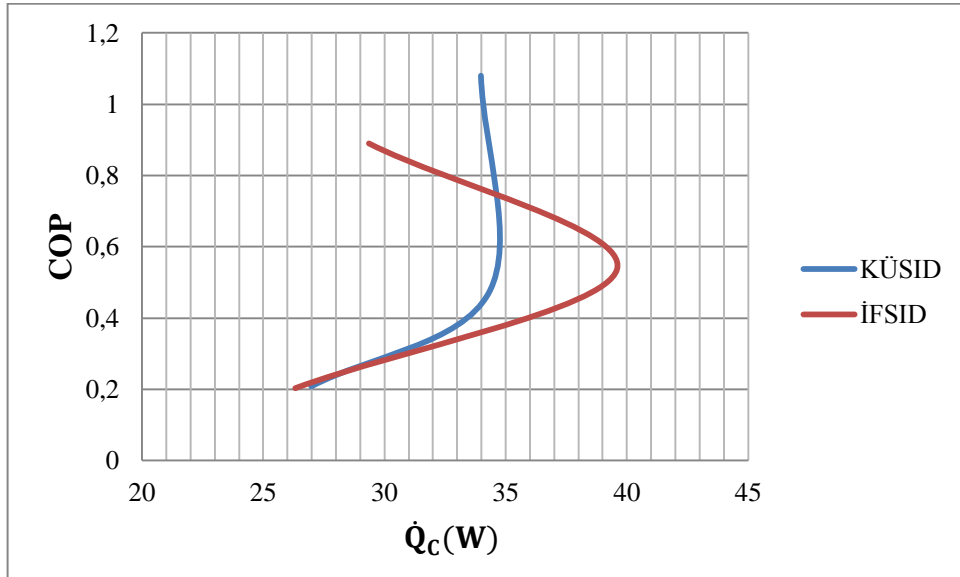
**Şekil 3.48 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de 25W ısı yük için, soğutma gücü-akım grafiği,  $I_{po}=3$  A

Şekil 3.48'de görüldüğü gibi iki sistem içinde soğutma yükleri 6 A değerine kadar artmıştır, fakat bu değerden sonra ters ısı kaçakları ve Joule ısınması sebebiyle soğutma gücünde küçük bir azalma meydana gelmiştir.



**Şekil 3.49 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de ve 25W ısı yük altında, COP-akım grafiği,  $I_{p0}=3$  A

Şekil 3.49'daki akım-COP grafiğine bakıldığında ise tekrar hem KÜSID, hemde İFSID için yaklaşık COP değerlerini görmek mümkündür. COP KÜSID'de maksimum 4 Amperde 1.1 değerini almış ve 8 Amperde 0.2 değerine düşmüştür. İFSID'de ise COP 0.9 değerini 4 Amperde alırken 8 Amper değerine geldiğinde KÜSID gibi 0.2 değerine düşmüştür.



**Şekil 3.50 :**  $T_{\infty}=22^{\circ}\text{C}$ 'de, 25W ısı yükde, soğutma gücü-COP grafiği,  $I_{p0}=3$  A

Pompa 3 Amper değerinde çalışırken 25W ısı yük altında elde edilen COP- soğutma gücü grafiği Şekil 3.50'de gösterilmiştir. Teorik olarak beklenildiği gibi düşük akımlarda, düşük soğutma yüküne karşılık yüksek COP değeri çıkmış ve akım artıkça, soğutma gücü artmasına karşın COP beklendiği gibi azalmıştır. Fakat

sistemde 6 Amper değerinden sonra ters ısı kaçakları ve Joule ısınmasına engel olunamadığı için bu değerden sonra soğutma yüküde düşmeye başlamıştır.

### 3.9 Deneylerin Yorumlanması

#### 3.9.1 Kütleli soğutmalı ısı değiştirici

Yapılan deneylerden ilki kütleli soğutmalı ısı değiştiriciyle yapılmıştır. KÜSID ile yapılan deneylerde termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyi başarıyla soğutulmuştur ve eski kullanılan hava-hava veya temassız ısı değiştiricilere göre termoelektrik modüllerin performansını artırmışlardır. Eski kullanılan yöntemlerle termoelektrik modüllerin COP değeri genellikle 1'in altında oluyor ve yüksek akım değerlerine ulaşamıyordu.

Elde edilen veriler aşağıdaki çizelgelerde özet olarak verilmiştir.

**Çizelge 3.2** Oda sıcaklığında, ısıl yük olmadığı durumda KÜSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
2 Amper	8 W	0.9
4 Amper	14 W	0.4
6 Amper	9 W	0.1
8 Amper	$\approx 1$ W	$\approx 0$
10 Amper	-11 W	$\approx -0.1$

Oda sıcaklığında ısıl yük olmadığı yapılan deneyde, 2 amper değeri için COP maksimum seviyede yani 1.6 olmuştur. Akım değeri arttıkça COP değeride azalmıştır.

**Çizelge 3.3** 35°C dış ortam koşullarında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
2 Amper	16 W	1.8
4 Amper	22W	0.7
6 Amper	26 W	0.3
8 Amper	31 W	0.2
10 Amper	34 W	0.2

Isıl odada yapılan deneylerde ise yine 2 amper için COP değeri 1.8 olmuş ve bu akım değeri için 16 Wlık bir soğutma yapılabilmektedir. Yine grafikten beklendiği gibi akım değerleri artarken COP değerleri düşmüş ve soğutma güçleri artmıştır.

**Çizelge 3.4** Oda sıcaklığında 25W yük altında KÜSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
2 Amper	19 W	2.4
4 Amper	22W	0.7
6 Amper	17W	0.2
8 Amper	6 W	0.1
10 Amper	-7 W	-0.1

Yine yapılan başka bir deney için kütleli soğutmalı ısı değiştirici modül soğutma sistemi 25 W ısı yük altında denenmiştir. Bu sistemde soğutulan hacim içinde bir ısı yükü olduğu için ısı değiştirici cep daha etkin çalışmıştır ve 10 amper değerine kadar Fourier ısı kaçaklarını dengelemiştir.

**Çizelge 3.5** 35°C dış ortam koşullarında, 25W yük altında KÜSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
2 Amper	21 W	2.6
4 Amper	28 W	0.9
6 Amper	44 W	0.6
8 Amper	53 W	0.4
10 Amper	75 W	0.4

Çizelge 3.5’de ısı test laboratuvarı koşullarında 25 W yük altında denenmiştir. Burdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi 21 Watt soğutma yükünde COP 2.6 civarlarındadır.

### 3.9.2 İnce film soğutmalı ısı değiştirici

Deneyi yapılan soğutucu modüllerden ikincisi ise ince film soğutmalı ısı değiştiricili sistemdir. Yine bu sistemde eski kullanılan yöntemlere göre daha başarılı bir yöntem olmuştur. İnce film soğutmalı ısı değiştiricili sistemin verileri aşağıdaki çizelgelerde özetlenmiştir.

**Çizelge 3.6** Oda sıcaklığında, ısı yük olmadığı durumda İFSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
2 Amper	6 W	0.7
4 Amper	8 W	≈0.3
6 Amper	6.9 W	0.1
8 Amper	-2 W	≈0
10 Amper	-7 W	≈-0.1

Çizelge 3.6’de gösterilen sonuçlar, oda sıcaklığında ısı yük olmadığı yapılmıştır ve 2 amper değeri için COP maksimum seviyede yani 1.2 olmuştur. Akım değeri

artıkça COP değeri de azalmıştır. 6 amperden sonra Fourier ısı kaçaqları ve Joule ısınması nedeniyle, soğutma yapılamamıştır.

**Çizelge 3.7** 35°C dış ortam koşullarında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
2 Amper	10 W	1.2
4 Amper	12W	0.4
6 Amper	21W	0.3
8 Amper	26W	0.2
10 Amper	27 W	0.2

Isıl odada yapılan deneylerde ise yine 2 amper için COP değeri 1.2 olmuş ve bu akım değeri için 10 W'lık bir soğutma yapılabilmektedir. Yine grafikten beklendiği gibi akım değerleri artarken COP değerleri düşmüş ve soğutma güçleri artmıştır.

**Çizelge 3.8** Oda sıcaklığında 25W yük altında İFSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
2 Amper	14 W	1.7
4 Amper	16 W	0.5
6 Amper	9 W	0.1
8 Amper	0.4 W	0
10 Amper	-15 W	-0.1

Çizelge 4.7'de 25 W ısı yük değeri için ince film soğutmalı ısı değiştiricili sistem denenmiştir. 4 ampere kadar tersinmezlikler olmamış ama bu değerden sonra tersinmezlikler nedeniyle soğutma yükü ve COP azalmıştır.

**Çizelge 3.9** 35°C dış ortam koşullarında, 25W yük altında İFSID sonuçları

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
2 Amper	20 W	2.4
4 Amper	24 W	0.7
6 Amper	28 W	0.4
8 Amper	34 W	0.3
10 Amper	62 W	0.3

Çizelge 3.9'de ısı test laboratuvarı koşullarında 25 W yük altında denenmiştir. Burdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi 20 watt soğutma yükünde COP 2.4 civarlarındadır. Akım artıkça soğutma gücü artmış ve COP değeri beklendiği gibi azalmıştır.



### 3.9.3 Kalorimetrik deney sonuçları

Oda sıcaklığında, soğutulan hacimde ısı yük yokken yapılan ve akışkanın sistemde çevrimini sağlayan pompa 2 A değerinde çalışırken elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de verilmiştir.

**Çizelge 3.10** Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçları,  $I_{po}=2A$

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
4 Amper	22	0.7
6 Amper	22	0.3
8 Amper	19	0.2

**Çizelge 3.11** Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçlar,  $I_{po}=2A$

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
4 Amper	14	0.4
6 Amper	15	0.2
8 Amper	18	0.1

Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’den görüldüğü gibi pompa 2 A değerinde çalışırken kütesel soğutmalı ısı değiştirici kullanılan sistemin COP değeri, ince film soğutmalı ısı değiştirici kullanılan sistemle 4 A değeri dışında yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’de aynı deney koşulları fakat pompanın 3 A değerinde çalışması sonucu elde edilmiş sonuçlar verilmiştir.

**Çizelge 3.12** Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda KÜSID sonuçlar,  $I_{po}=3A$

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
4 Amper	29	0.9
6 Amper	34	0.5
8 Amper	24	0.2

**Çizelge 3.13** Oda sıcaklığında, yüksüz koşullarda İFSID sonuçlar,  $I_{po}=3A$

Akım	$\dot{Q}_c$	COP
4 Amper	23	0.7
6 Amper	28	0.4
8 Amper	29	0.2

Yine 3 amper değeri için iki sisteminde soğutma güçleri ve COP değerleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Ancak değerler pompanın 2 A değerinde çalışmasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Soğutma güçleri artmış ve buda COP değerlerinde genel olarak 0.2 lik bir artış sağlamıştır.

Daha sonrasında ise soğutulan hacmin içine 25 W ısı yükü koyulmasıyla sistem tekrar test edilmiştir.

**Çizelge 3.14** Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde KÜSID sonuçları,  $I_{po}=2A$

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
4 Amper	24	0.8
6 Amper	25	0.3
8 Amper	24	0.2

**Çizelge 3.15** Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde İFSID sonuçları,  $I_{po}=2A$

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
4 Amper	23	0.7
6 Amper	26	0.3
8 Amper	22	0.2

Elde edilen sonuçlara göre her iki sistem içinde yaklaşık olarak aynı soğutma yükleri elde edilmiştir. 6 A değerinden sonra soğutma gücü düşmüştür. COP değerleri ise KÜSID için 0.8'den 0.2'ye doğru akım arttıkça azalmıştır. Aynı durum İFSID içinde geçerli olmuş ve COP değerleri 0.7'den 0.2'ye doğru azalmıştır.

Son olarak ise yine pompa 3 A değerinde çalışırken, 25 W ısı yükünde sistem tekrar test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.16 ve 3.17'de özetlenmiştir.

**Çizelge 3.16** Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde KÜSID sonuçları,  $I_{po}=3A$

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
4 Amper	34	1.1
6 Amper	34	0.5
8 Amper	27	0.2

**Çizelge 3.17** Oda sıcaklığında, 25 W ısı yükünde İFSID sonuçları,  $I_{po}=3A$

Akım	$\dot{Q}_C$	COP
4 Amper	29	0.9
6 Amper	40	0.5
8 Amper	26	0.2

Çizelge 3.16'den görüldüğü gibi KÜSID için en yüksek COP değeri 4 A'de elde edilmiş ve 1.1 çıkmıştır. Bu akım değeri için İFSID sisteminde COP değeri 0.9 çıkmıştır.

### 3.10 Evsel Buzdolabı için Deneysel Bir Çalışma

Soğutma teknolojisi bugünkü insanların günlük yaşamlarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu sektör evlerimizde gıda ve medikal malzemelerimizin saklanması

için önem taşımaktadır. Bugün kullandığımız dolapların çoğu 20. Yüzyılın başlarında ticarileşmeye başlamış olan buhar çevrimli dolaplardır. Bugün evlerimizde yaygın olarak kullandığımız dolaplar 180-300lt hacme ve 150-250W'lık soğutma yüklerine sahiptirler. COP'leri ise 2.75 civarında bulunmaktadır.

Termoelektrik soğutucuların ev tipi buzdolaplarına potansiyel bir uygulaması için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 4 tane doğrudan temaslı ısı değiştiricili termoelektrik modül kullanılmıştır. Yapılan deneyde 30 lt hacme sahip bir strafor kutu kullanılmıştır. Kullanılan kutunun ölçüleri 40Ex50Bx26Y cm ve kalınlığı 2.5 cm dir. Kutunun ısı iletim katsayısı 0.033 W/mK, yoğunluğu 0.05g/cm<sup>3</sup> ve ısı kapasitesi ise 1.3 kJ /kgK dir.

Testi yapılan sistemin ölçümlerinde dinamik yöntem kullanılmış olup, 2 farklı ısı yük durumu incelenmiştir. Bunlardan ilki düşük ısı yük koşulu, ikincisi ise yüksek ısı yük durumudur. Isıl yük kutu içerisine bir direnç koyularak oluşturulmuştur ve fanlar yardımıyla kutuya homojen olarak ısının dağıtılması sağlanmıştır. Deneyde TEC modüller 4 ve 6 A değerinde çalıştırılarak tüketilen enerji, soğutma yükü ve COP değerleri belirlenmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar çizelge 3.18'de verilmiştir.

**Çizelge 3.18** Ev tipi buzdolapları için deney sonuçları

Akım	P <sub>TEC</sub>	P <sub>tot</sub>	$\dot{Q}_C$	T <sub>L</sub>	COP <sub>R,P</sub>	COP <sub>R, sis</sub>
4 Amper	136 W	200 W	111 W	12.5°C	0.82	0.56
	136 W	200 W	160 W	22°C	1.17	0.80
6 Amper	305 W	369 W	140 W	10.9°C	0.46	0.38
	305 W	369 W	240 W	23.9°C	0.79	0.65

Deneyler sonucunda evsel bir dolabın soğutma yükü değeri elde edilmiştir. Soğutma aralığı Çizelge 3.18'den de görüldüğü gibi 110-240 W aralığında olmuştur. Bunun yanı sıra COP değerleri şuan için evsel buzdolaplarına göre düşüktür, ancak termoelektrik sistemlerin bazı avantajlarından dolayı (sessiz çalışması, gaz kullanmaması, bakım gerektirmemesi vb.) otel gibi yerlerde tercih edilmektedir. Denemelerde elde edilen COP değeri hava-hava tipi uygulamaların COP değerlerinden oldukça yüksektir. Fiyat- performans maliyeti her geçen gün daha iyiye giden termoelektrik sistemler yakın zamanda evsel buzdolaplarında da konvansiyonel sistemlere iddialı bir rakip olarak piyasayda yerini alacaktır.



## **4. SONUÇ VE ÖNERİLER**

Termoelektrik modüller tasarlanan iki farklı ısı değiştirici kullanılarak test edildi. Montajı yapılan soğutucu modül farklı sıcaklıklarda ve yüklü ve yüksüz ortamlarda test edilerek, soğutma güçleri, COP değerleri ve minimum inilebilen sıcak değerleri belirlendi.

### **4.1 Kütlesel Soğutmalı Isı Değiştirici**

Kütlesel soğutmalı ısı değiştiriciyle yapılan deneylerde eski kullanılan ısı değiştiricilere göre önemli bir başarı elde edilmiştir. Burada kararlı durumda TEC modülün yüzey sıcaklığı daha düşük sıcaklıklara çekilmiştir ve Fourier ters ısı kaçakları ve Joule ısınmasından kaynaklanan tersinmez etkilerin soğutma gücüne etkisi görece olarak azaltılmıştır. Bunun sonucunda daha yüksek COP değerleri elde edilmiş ve daha etkin bir soğutma yapılmıştır.

### **4.2 İnce Film Soğutmalı Isı Değiştirici**

İnce film soğutmalı ısı değiştirici kullanılan konvensiyonel yöntemlere göre iyi sonuçlar vermiştir. Ancak geometrik farklılık ve buna bağlı olarak akışın karakterinin laminar akış olması sebebiyle kütlesel soğutmalı ısı değiştiriciden görece olarak değerleri düşük çıkmıştır. Yine bu ısı değiştiricide de doğrudan TEC modülün yüzeyinden ısı, soğutucu akışkana transfer edilerek taşındığı için etkinliği yüksektir. Buna bağlı olarak soğutma gücü ve COP değeri konvensiyonel ısı değiştiricilere göre yüksektir.

### **4.3 Isı Değiştiricilerin Karşılaştırılması**

Kullanılan iki farklı ısı değiştiricide inilebilen en düşük yüzey sıcaklığında ve soğutma gücünde ve dolayısıyla COP değerinde farklılık görüldü. Termoelektrik modülün yüzeyinde inilen en düşük sıcaklık değerleri Çizelge 4.17’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1** T<sub>L</sub> Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

Akım	KÜSID T <sub>L</sub> (°C)	İFSID T <sub>L</sub> (°C)
2 Amper	4,6	4.1
4 Amper	-5.5	-5.6
6 Amper	-12.5	-11.5
8 Amper	-16.6	-15.7
10 Amper	-17.9	-16.2

Elde edilen verilere göre KÜSID kullanılan sistemin soğutma gücü, aynı akım değerinde İFSID kullanılan sisteme göre daha yüksektir. Soğutma gücünde COP'yi doğrudan etkilediği için KÜSID sisteminin COP değeri, İFSID sistemine göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca taşınım katsayıları incelendiğinde

$\bar{h}_{İFSID} = 586,7 \text{ W/m}^2\text{K} @ 42\text{gr/s} < \bar{h}_{KÜSID} = 664,9 \text{ W/m}^2\text{K} @ 44\text{gr/s}$  olduğu görülmekte elde edilir. Buradan da anlaşılacağı üzere KÜSID ile çalışan sistem az da olsa İFSID'le çalışan sistemden daha iyidir.

#### 4.4 Çalışmanın Uygulama Alanları ve Öneriler

Yapılan deneysel çalışmalardan kullanılan yeni ısı değiştirici sistemin, eski yöntemlere göre daha etkin bir sistem olduğu görülmüştür. Tasarlanan ısı değiştiriciler, TE modüllerin soğutma için kullanıldığı akü soğutma dolapları, mini buz dolapları, organ taşıma üniteleri gibi konvansiyonel sistemlerin kullanılmadığı ya da küçüklüğün, hafifliğin ve arıza riskinin az olmasının önemli olduğu tüm uygulamalarda kullanılabilir.

Termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyinden ısının atılması ve soğuk yüzeyden de ısının emilebilmesi için toplam ısı transfer katsayısının (U) olabildiğince iyi olması gerekir. Aksi takdirde pompalanan ısı yük termoelektrik modülün sıcak yüzeyinde birikmekte ve Fourier ters ısı kaçaqları ve Joule ısınması sebebiyle soğuk yüzeyin sıcaklığında artışa neden olup, bir süre sonra termoelektrik modülün bir resistans gibi çalışmasına yol açmaktadır. Bunun engellenmesi için hem sıcak ve soğuk yüzeylerde ısı transfer katsayıları çok yüksek malzemeler kullanılmalı hem ısı transfer alanı genişletilmeli, hem de temas dirençleri azaltılmalıdır. Ancak pratikte bu sınırlı ölçekte gerçekleşmektedir. Bunun yerine doğrudan temaslı sıvı soğutmalı ısı değiştiricileriyle, termoelektrik yüzeyden ihtiyaç duyulan oranda geçirilen debi miktarıyla Fourier ters ısı kaçaqlarının ısı birikimi sonucu artışı engellenebilir. Böylece termoelektrik modülden daha etkin bir şekilde yararlanılmış olur.

Modüller seçilirken dikkat edilmesi gereken husus, verilen grafiklerin çok özel koşullarda elde edildiği ve uygulama sırasında firmanın modül için grafiklerle sağladığı verilerin uyuşmadığı görülmüştür, bunun yanı sıra Çinli firmaların katalog değerlerinin Amerikalı firmalardan da daha yüksek olduğu görülmüş fakat uygulamada bu rakamlara kesinlikle ulaşamamıştır. Tasarlanacak bir TEC sisteminde kullanılacak Peltier modülünün sayısı; soğutulacak hacmin ısı yüküne ve her bir Peltier modülünden elde edilebilecek maksimum soğutma gücüne göre seçilmelidir. Bir modülün maksimum soğutma gücü ise modülün katalog (etiket) değeri olmayıp, atılan ısının uzaklaştırılma etkinliğine şiddetle bağlıdır. Bu nedenle bir Peltier modülün üzerinde yazan maksimum soğutma gücünün çok altında değerlerle pratikte karşılaşılabilmektedir. Bu durum bu tez çalışmasının da konusunu oluşturan atılan ısının etkin uzaklaştırılması yöntemini çok önemli bir noktaya taşımaktadır. Isının etkin uzaklaştırılması, sistemde kullanılacak ve en büyük maliyeti oluşturan Peliter modül sayısını da azaltmaktadır. Bu tez çalışması çerçevesinde tasarlanan ve deneysel olarak TEC modüllerin performansı üzerindeki sonuçları ölçülen ısı değiştiriciler aynı zamanda modülün akımla soğutma gücünün değişimi de etkilemektedir. Böylece optimum akım değerleri ve COP değerleri de iyileşen ısı uzaklaştırma etkinliği ile iyi yönde etkilenmektedir. Optimal akım değeri ilk yatırım maliyeti ile işletme maliyetlerinin de optimizasyonuna dayanmakta olup, verilen bir sistemde akım yükseldikçe COP değeri düşmekte ve verimli bir soğutma yapılamamakta ancak buna karşılık tek bir Peltier modülünden elde edilen soğutma gücü de arttığından ihtiyaç duyulan modül sayısı azalmaktadır. Böylece ilk yatırım ve işletme maliyetlerinden hangisinin minimize edileceğine ya da toplamının mı minimize edileceğine bağlı olarak optimal akım ve dolayısıyla çalışma noktası değişmektedir.

Son olarak, deneylerin sonunda geliştirilen sistemin buzdolabı olarak kullanılması için bir ön çalışma yapılmış ve bu çalışma sonucunda bu sistemin soğutma yükü konvansiyonel sistemle aynı olabileceği ve COP değeri ise bu sistemlerden biraz düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak termoelektrik modüllerin önceki bölümlerde belirtilen birçok ek özelliğinden dolayı konvansiyonel sistemlere göre bir adım öne çıkma olasılığı yüksektir.





## KAYNAKLAR

- Astrain, D., Vian, J. G., Martínez, A., Rodríguez, A.** (2010). Study of the Influence of Heat Exchangers' Thermal Resistances on a Thermoelectric Generation System. *Energy*, 35, 2, 602-610.
- Huang, B.J., Duang, C.L.** (2000). System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler, *International Journal of Refrigeration*, 23, 197-207.
- Ciylan B., Yılmaz S.** (2007). Design of a thermoelectric module test system using a novel test method, *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 717-725.
- Benjamin, D., Julien, R., Lingai, L.** (2012). Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design, *Energy Conversion and Management*, 60,125-133.
- Esarte, J., Gao, Min and Rowe, D. M.** (2001). Modelling heat exchangers for thermoelectric generators. *Journal of Power Sources*, 93, 72-76.
- Goldsmid H. J.** ed. 2009. *Introduction to Thermoelectricity*, Berlin: Springer Series in Materials Science.
- Sofrata H.** (1995). Heat Rejection Alternatives For Thermoelectric Refrigerators, *Energy Convers. Mgmt*, 37, 269-280.
- Rowe, D.M.** ed. 2006. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. New York: CRC/Taylor & Francis.
- Clifton, W.E.** 1992. Thermoelectric cooler design. Master thesis, University of California.
- SHAN J., WU G., TIAN X.** (2010). Study on large time-delay constant temperature control system based on TEC, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*,
- Türker ŞAHİN,** (2012). Termoelektrik Soğutucuların Modellenmesi Ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- Vian, J. G. & Astrain, D.** (2008). Development of a Heat Exchanger for the Cold Side of a Thermoelectric Module. *Applied Thermal Engineering*, Vol.28, No.11-12, (August 2008), pp. 1514-1521, ISSN 1359-4311
- Yunus A. Cengel and Michael A. Boles.** (2001). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- Yunus A. Cengel** (2002), *Heat Transfer: A Practical Approach*, New York: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.

- Url-1** <<http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>>, alındığı tarih: 18.07.12.
- Url-2** <<http://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef01/>>, alındığı tarih: 19.07.12.
- Url-3** <<http://www.activecool.com/technotes/thermoelectric.html>>, alındığı tarih: 03.08.12.
- Url-4** <[www.nature.com/nature/journal/v413/n6856/images/413577aa.2.jpg](http://www.nature.com/nature/journal/v413/n6856/images/413577aa.2.jpg)>, alındığı tarih: 09.08.2012.
- Url-5** <<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File%3APeltierelement.png>>, alındığı tarih: 05.08.2012.
- Url-6** <<http://www.peltier-info.com/>>, alındığı tarih: 27.07.2012.
- Url-7** < <http://www.thermoelectric.com/2010/pr/lc/benchtop.htm> >, alındığı tarih: 23.01.2013.
- Url-8** <<http://www.coleman.com/Products/8570/thermoelectric-coolers>>, alındığı tarih: 29.10.2012.
- Url-9** <<http://www.thermonamic.com/TEC1-24116T200-English.pdf>>, alındığı tarih 04.04.2013

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Murat Ferhat DOĞDU

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Çerkeş 15/08/1988

**Adres:** İTÜ Enerji Enstitüsü No:209

**E-Posta:** muratferhatdogdu@gmail.com

**Lisans:** Makine Mühendisliği