



**ELEKTRONİK SOĞUTMA İHTİYACI OLAN PROFESYONEL TELSİZ  
CİHAZININ İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLEN ISI BORUSUNUN DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**Murat ÇAM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2024**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat ÇAM

22/07/2024

# ELEKTRONİK SOĞUTMA İHTİYACI OLAN PROFESYONEL TELSİZ CİHAZININ İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLEN ISI BORUSUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ÇAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

## ÖZET

Isı boruları ile ısı transferi işleminin gerçekleştirilmesi, termal yönetim için en hızlı ve en verimli yöntemlerden biridir. Oldukça iletken bir ısı transfer cihazı olan ısı boruları, elektronik cihazlardan oluşan yüksek ısı yüklerini etkin bir şekilde uzaklaştırabilir. Bu sayede, cihazların aşırı ısınmasını engelleyerek performanslarını artırır ve ömürlerini uzatır. Ayrıca, ısı borularının esnek montaj seçenekleri sayesinde, elektronik cihazların iç yapısına uygun şekilde konumlandırılabilmesi sağlanır. Bu özellikleriyle ısı boruları, modern elektronik cihazların termal yönetiminde kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, elektronik soğutma ihtiyacı olan profesyonel telsiz cihazının farklı açılarda ısı borusu performansı deneysel incelenmiştir. Deneyde kullanılan sinterlenmiş ısı borusu, 25 cm uzunluğunda ve 10 mm çapında bakırdan üretilmiştir ve içerisinde iş akışkanı olarak su bulunmaktadır. Sıcaklık ölçümleri için üç adet ısı çifti evaporatör ve kondenser bölgelerindeki noktalara yerleştirilmiştir. Rezistanslı ısıtma sistemi, alüminyum plakalar arasına entegre edilmiş ve farklı yüzeyler arasında termal macun kullanılarak etkin bir iletimle ısı transferi sağlanmıştır. Deneyin ana odak noktası, ısı çiftleri aracılığıyla ısı borusu üzerinde farklı eğim açılarındaki yüzeylerde sıcaklık dağılımının ve ısı transferi hızının belirlenmesidir. Bu sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hızını belirleme, düz zemin ile başlayarak 15°, 30°, 45°, 60° ve 90° eğimli yüzeylerde incelenmiştir. Elde edilen veriler, eğimli yüzeylerdeki ısı transferinin etkinliğini değerlendirmek ve sistem performansını optimize etmek için kullanılmıştır. Deneyin sonuçları, farklı eğim açılarındaki yüzeylerdeki ısı transferinin sistemli bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler, endüstriyel uygulamalarda termal sistemlerin tasarımını iyileştirmek ve optimize etmek için önemli bir rehberlik sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, boru ile yer arasındaki açının ısı transferi üzerindeki etkileri de incelenmiş ve yerleştirme açısının artmasıyla ısı transfer hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, deneyler sonucunda ısı borusunun performansının en iyi şekilde yatay konumda çalıştığı ve açı arttıkça performansın azaldığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91412  
Anahtar Kelimeler : Isı borusu, elektronik soğutma, telsiz, ısı transferi  
Sayfa Adedi : 117  
Danışman : Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT PIPE PLACED IN A PROFESSIONAL RADIO DEVICE THAT NEEDS ELECTRONIC COOLING

(M. Sc. Thesis)

Murat ÇAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

## ABSTRACT

Heat pipes are one of the fastest and most efficient methods for thermal management, involving the transfer of heat using heat pipes. Highly conductive, these devices effectively remove high heat loads from electronic devices, preventing overheating and enhancing their performance and lifespan. Additionally, the flexible mounting options of heat pipes allow them to be positioned according to the internal structure of electronic devices. With these features, heat pipes play a critical role in the thermal management of modern electronic devices. In this thesis study, the performance of a heat pipe in different orientations has been experimentally investigated for a professional radio device requiring electronic cooling. The sintered heat pipe used in the experiment is made of copper, with a length of 25 cm and a diameter of 10 mm, and contains water as the working fluid. Three thermocouples have been strategically placed at points in the evaporator and condenser regions for temperature measurements. Three thermocouples were strategically placed on the surface of the pipe for temperature measurements: one at the starting point, another at a distance of 20 cm, and the third at the end point 25 cm away. A resistance heating system was integrated between aluminum plates, and thermal paste was used between different surfaces to ensure efficient heat transfer. The main focus of the experiment is to determine the temperature distribution and heat transfer rate on surfaces with different inclination angles on the heat pipe by means of thermocouples. This temperature distribution and heat transfer rate were examined on surfaces with slopes of 0° (flat), 15°, 30°, 45°, 60°, and 90°. The obtained data were used to evaluate the effectiveness of heat transfer on inclined surfaces and to optimize system performance. The results of the experiment contribute to a systematic understanding of heat transfer on surfaces with different slope angles. This information is expected to provide valuable guidance for improving and optimizing thermal systems in industrial applications. Additionally, the effects of the angle between the pipe and the surface were investigated, showing a decrease in heat transfer rate as the placement angle increased. In conclusion, experiments have shown that the heat pipe performs best in the horizontal position and the performance decreases as the angle increases.

Science Code : 91412

Key Words : Heat pipe, electronic cooling, radio, heat transfer

Page Number : 117

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi çalışmamın tamamlanmasında emeği geçen herkese buradan en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Danışman Hocam Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU'na, bana göstermiş olduğu sonsuz ilgi ve destek için minnettarım. Tez çalışmamın her aşamasında bana rehberlik etmesi, yol gösterici tavsiyeleri ve değerli önerileri ile çalışmamın gelişmesine ve olgunlaşmasına büyük katkı sağlamıştır. Kendisi sayesinde, araştırma konuma farklı bakış açıları kazanabildim ve tezimin kalitesini önemli ölçüde artırabildim. Bu vesileyle, hocama göstermiş olduğu sabır ve anlayış için de ayrıca teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kurulmasında desteğini esirgemeyen iş arkadaşlarım Levent AKBULUT, Anıl KARADENİZ, Osman TASALI ve Gökhan HARMANBAŞI'na da teşekkürlerimi sunarım. Onların özverili çalışmaları ve katkıları olmadan bu araştırmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Bana her zaman güvenen, manevi destek olan ve iyi bir eğitim almam için imkanlar sağlayan eşim Nazlı ÖKTEM ÇAM'a, annem Ümmügülsüm ÇAM ve babam Erdoğan ÇAM'a ve bu tezi yazmamda en büyük motivasyonu sağlayan ve tez sürecimi her zaman yakından takip eden sevgili dayım Semih DURMUŞ'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                               | Sayfa |
|-----------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                    | iv    |
| ABSTRACT.....                                 | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                 | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                             | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                     | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                       | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                      | xiv   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                  | xv    |
| 1. GİRİŞ.....                                 | 1     |
| 2. İLGİLİ LİTERATÜR.....                      | 5     |
| 3. ELEKTRONİK SOĞUTMA .....                   | 29    |
| 3.1. Taşınım ile Soğutma .....                | 31    |
| 3.1.1. Doğal taşınım.....                     | 33    |
| 3.1.2. Zorlanmış taşınım .....                | 33    |
| 3.1.3. Aktif ısı kuyusu .....                 | 34    |
| 3.1.4. Piezoelektrik fanları.....             | 35    |
| 3.1.5. Plazma teknolojisi ile soğutma .....   | 36    |
| 3.1.6. Jet hava soğutma.....                  | 36    |
| 3.2. Sıvı Soğutma .....                       | 36    |
| 3.2.1. Doğrudan ve dolaylı sıvı soğutma ..... | 38    |
| 3.2.2. Sprey soğutucu .....                   | 39    |
| 3.2.3. Jet püskürtmeli soğutma .....          | 39    |
| 3.3. Isı Borusu .....                         | 41    |
| 3.4. Termoelektrik Soğutma.....               | 42    |

|                                                                               | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.5. Faz Değişim Malzemesi Esaslı Soğutma .....                               | 43           |
| 3.6. Mini ve Mikro Kanallarla Donatılmış Soğutma Sistemi.....                 | 44           |
| <b>4. ISI BORUSU .....</b>                                                    | <b>47</b>    |
| 4.1. Isı Borusunun Tarihsel Gelişim Süreci .....                              | 47           |
| 4.2. Isı Borusu Teorisi .....                                                 | 49           |
| 4.2.1. Havuz kaynama ısı taşınımı.....                                        | 49           |
| 4.2.2. Havuz kaynama rejimleri.....                                           | 50           |
| 4.2.3. Akış kaynama mekanizmaları (veya zorlanmış taşınım kaynaması).....     | 53           |
| 4.2.4. Yoğuşma ısı taşınımı .....                                             | 54           |
| 4.2.5. Isı borularının çalışma prensipleri .....                              | 55           |
| 4.2.6. İş akışkanı .....                                                      | 56           |
| 4.2.7. Çalışma limitleri .....                                                | 57           |
| 4.3. Isı Borularının Çeşitleri.....                                           | 60           |
| 4.3.1. Fitilli (kılcal yapıya sahip) ısı borusu .....                         | 61           |
| 4.3.2. Dönen ısı boruları .....                                               | 62           |
| 4.3.3. Döngü ısı boruları (LHP'ler) ve Kılcal pompalı döngüler (CPL'ler)..... | 63           |
| 4.3.4. Atımlı (Titreşen) ısı boruları.....                                    | 63           |
| 4.3.5. İki fazlı kapalı termosifon (ifkt) .....                               | 64           |
| 4.4. Matematiksel Modelleme .....                                             | 67           |
| 4.4.1. İş akışkanı seçimi.....                                                | 67           |
| 4.4.2. Kap seçimi .....                                                       | 69           |
| 4.4.3. Fitol veya kılcal yapı seçimi.....                                     | 70           |
| 4.4.4. Analizler .....                                                        | 70           |
| <b>5. DENEYSEL İNCELEME .....</b>                                             | <b>79</b>    |
| 5.1. Kullanılan Cihazlar .....                                                | 79           |
| 5.2. Isılçift Kalibrasyonu.....                                               | 79           |

|                                                | Sayfa |
|------------------------------------------------|-------|
| 5.3. Deney Düzenekinin Oluşturulması .....     | 81    |
| 5.4. Sıcaklık Ölçümleri .....                  | 83    |
| 5.4.1. Deney-1 (0° açı, 50°C Sıcaklık).....    | 83    |
| 5.4.2. Deney-2 (15° açı, 50°C Sıcaklık).....   | 83    |
| 5.4.3. Deney-3 (30° açı, 50°C Sıcaklık).....   | 84    |
| 5.4.4. Deney-4 (45° açı, 50°C Sıcaklık).....   | 85    |
| 5.4.5. Deney-5 (60 ° açı, 50°C Sıcaklık).....  | 86    |
| 5.4.6. Deney-6 (90 ° açı, 50°C Sıcaklık) ..... | 87    |
| 6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....                      | 99    |
| KAYNAKLAR .....                                | 101   |
| EKLER.....                                     | 109   |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                  | 117   |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                    | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Tüm çalışmalar .....                                                          | 25    |
| Çizelge 4.1. 80°C suyun özellikleri.....                                                   | 71    |
| Çizelge 4.2. Çeşitli fitil yapıları için etkin kılcal yarıçap tablosu.....                 | 72    |
| Çizelge 4.3. Çeşitli fitil yapıları için fitil geçirgenliği tablosu .....                  | 73    |
| Çizelge 4.4. Kapiler limit tablosu .....                                                   | 75    |
| Çizelge 4.5. Sıvıya doymuş çeşitli fitil yapıları için etkin ısı iletkenliği tablosu ..... | 76    |
| Çizelge 4.6. Limit tablosu.....                                                            | 77    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                            | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Tarihsel süreçte işlemcilerin kısa tarihi .....                                                                                                                       | 1     |
| Şekil 3.1. Kanatçıklı yapıda hava akışı .....                                                                                                                                    | 29    |
| Şekil 3.2. Zorlanmış ısı taşınımı .....                                                                                                                                          | 34    |
| Şekil 3.3. Fanlı aktif ısı kuyusu. ....                                                                                                                                          | 35    |
| Şekil 3.4. Piezoelektrik fanlar .....                                                                                                                                            | 35    |
| Şekil 3.6. Doğrudan ve Dolaylı sıvı soğutma .....                                                                                                                                | 38    |
| Şekil 3.7. Sprey soğutucu.....                                                                                                                                                   | 39    |
| Şekil 3.8. Farklı jet püskürtme biçimleri. ....                                                                                                                                  | 40    |
| Şekil 3.9. Isı borusu çalışma prensibi. ....                                                                                                                                     | 42    |
| Şekil 3.10. Termoelektrik soğutma.....                                                                                                                                           | 43    |
| Şekil 3.11. Mini ve mikro kanallarla donatılmış soğutma sistemi.....                                                                                                             | 46    |
| Şekil 4.1. Temel perkins tüpü .....                                                                                                                                              | 48    |
| Şekil 4.2. Havuz kaynamasındaki farklı kaynama rejimleri .....                                                                                                                   | 51    |
| Şekil 4.3. 1 atm basınçtaki su için tipik kaynama eğrisi .....                                                                                                                   | 51    |
| Şekil 4.4. Zorlanmış konveksiyon altında bir tüpte kaynayan akışta karşılaşılan farklı akış rejimleri.....                                                                       | 54    |
| Şekil 4.5. Bir buhar, $T_{sat}$ 'ın altındaki bir sıcaklıkta bir yüzeye maruz kaldığında, yüzeyde bir sıvı film veya tek tek damlacıklar şeklinde yoğunlaşma meydana gelir ..... | 55    |
| Şekil 4.6. Tipik bir ısı borusunun çalışma şeması .....                                                                                                                          | 56    |
| Şekil 4.7. Bir ısı borusunda ısı taşınmasına ilişkin sınırlamalar .....                                                                                                          | 58    |
| Şekil 4.8. Tipik ısı borusu fitil konfigürasyonları ve yapıları.....                                                                                                             | 61    |
| Şekil 4.9. Dönen ısı borusu .....                                                                                                                                                | 62    |
| Şekil 4.10. Döngü ısı borusunun çalışma prensibi.....                                                                                                                            | 63    |
| Şekil 4.11. Atımlı ısı borusunun şematik gösterimi.....                                                                                                                          | 64    |
| Şekil 4.12. Termosifonların ve ısı borularının fiziksel çalışma prensipleri .....                                                                                                | 66    |

| <b>Şekil</b>                                                             | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.13. Çeşitli iş akışkanları için çalışma sıcaklık aralıkları..... | 68           |
| Şekil 4.15. Isı borusu kap malzemesi ve iş akışkanı uyumu .....          | 69           |
| Şekil 4.16. Isı borusu bölge uzunlukları yapısı.....                     | 70           |
| Şekil 4.17. Isı borusunun iç ve dış çap gösterimi .....                  | 71           |
| Şekil 5.1. Deney-1 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 83           |
| Şekil 5.2. Deney-2 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 84           |
| Şekil 5.3. Deney-3 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 85           |
| Şekil 5.4. Deney-4 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 86           |
| Şekil 5.5. Deney-5 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 87           |
| Şekil 5.6. Deney-6 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği .....         | 88           |
| Şekil 5.7. 0° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....      | 88           |
| Şekil 5.8. 0° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....      | 89           |
| Şekil 5.9. 0° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....      | 89           |
| Şekil 5.10. 15° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 90           |
| Şekil 5.11. 15° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 90           |
| Şekil 5.12. 15° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 91           |
| Şekil 5.13. 30° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 91           |
| Şekil 5.14. 30° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 92           |
| Şekil 5.15. 30° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 92           |
| Şekil 5.16. 45° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 93           |
| Şekil 5.17. 45° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 93           |
| Şekil 5.18. 45° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 94           |
| Şekil 5.19. 60° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 94           |
| Şekil 5.20. 60° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 95           |
| Şekil 5.21. 60° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 95           |
| Şekil 5.22. 90° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 96           |

| Şekil                                                                     | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.23. 90 ° aç ı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiğ i ..... | 96    |
| Şekil 5.24. 90° aç ı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiğ i .....  | 97    |



**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                               | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.1. Hava soğutuculu sistem .....                    | 33           |
| Resim 3.2. Faz değişim malzemesi soğutma sistemi .....     | 44           |
| Resim 5.1. Isılçiftlerin kaynayan su sıcaklık ölçümü ..... | 80           |
| Resim 5.2. Termal macun kullanılan yüzey.....              | 81           |
| Resim 5.3. Deney düzeneği şeması.....                      | 82           |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler               | Açıklamalar                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>A</b>               | Yüzey alanı ( $m^2$ )                             |
| <b>C</b>               | Isı kapasitesi, ( $kJ/kg.K$ )                     |
| <b>D<sub>h</sub></b>   | Akış kanalının hidrolik çapı (m)                  |
| <b>F<sub>app</sub></b> | Görünür sürtünme faktörü                          |
| <b>h</b>               | Isı taşınım katsayısı $W/(m^2.K)$                 |
| <b>k<sub>f</sub></b>   | Akışkanın termal iletkenlik katsayısı ( $W/m.K$ ) |
| <b>L</b>               | Kanat uzunluğu (m)                                |
| <b>L</b>               | Uzunluk, (m)                                      |
| <b>m</b>               | Kütle, (kg)                                       |
| <b>Nu</b>              | Nusselt sayısı                                    |
| <b>P</b>               | Basınç (kPa)                                      |
| <b>Pr</b>              | Prandtl sayısı                                    |
| <b>R</b>               | Termal direnç ( $m^2K/W$ )                        |
| <b>Re</b>              | Reynolds sayısı                                   |
| <b>T</b>               | Sıcaklık (K)                                      |
| <b>u,v,w</b>           | Akışkan hızı (m/s)                                |
| <b>Λ</b>               | Hava akış kanallarının en-boy oranı               |
| <b>μ</b>               | Dinamik vizkosite (Pa.s)                          |
| <b>ρ</b>               | Yoğunluk, ( $kg/m^3$ )                            |
| <b>C<sub>p</sub></b>   | Akışkanın özgül ısısı ( $J/kg.K$ )                |
| <b><i>m</i></b>        | Sıvının kütleli debisi(kg/s)                      |

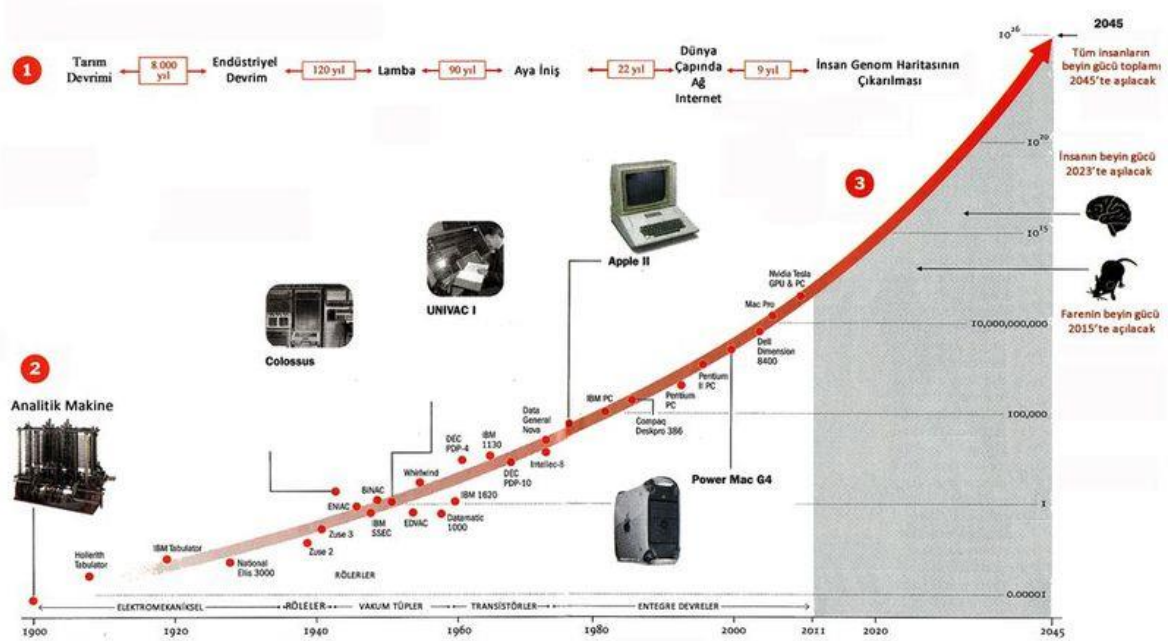
**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|             |                                          |
|-------------|------------------------------------------|
| <b>CNT</b>  | Su Nanoakışkanı                          |
| <b>COP</b>  | Soğutma Performansı                      |
| <b>CPL</b>  | Kılcal Pompalı Döngüler                  |
| <b>DI</b>   | İyonize su                               |
| <b>ESM</b>  | Faz değişim malzemesi ve nanokompozitler |
| <b>EST</b>  | Enerji depolama tankı                    |
| <b>FDM</b>  | Faz değişim malzemesi                    |
| <b>FHP</b>  | Düz plakalı ısı borusu                   |
| <b>GAHP</b> | Yerçekimi destekli ısı borusu            |
| <b>İFKT</b> | İki fazlı kapalı termosifon              |
| <b>LED</b>  | Işık yayan diyot                         |
| <b>LHP</b>  | Döngü ısı borusu                         |
| <b>NFDM</b> | Nanokompozit faz değişim malzemesi       |
| <b>NPCM</b> | Nanokompozit faz değişim malzemesi       |
| <b>SHP</b>  | Sorpsiyon ısı borusu                     |
| <b>TEC</b>  | Termoelektrik soğutma sistemi            |

## 1. GİRİŞ

Elektronik cihazların boyutları gün geçtikçe küçülmekte ve yer sınırlaması son yıllarda önemli bir sorun haline gelmiştir. Kapasiteleri artırılan ve kısa sürede daha fazla işlem yapabilen bu cihazların güç yoğunlukları da birim hacim olarak artmaktadır. Bu da soğuma problemlerini beraberinde getirerek elektronik cihazların performansını düşürür. Elektronik sistemlerin çalışabilmesi için verimli bir soğutma sistemine ihtiyaç vardır.

Elektronik cihazlar, günümüzün hızla gelişen teknolojik dünyasında vazgeçilmez bir yere sahiptir. Bu cihazların performansı ve güvenilirliği, çoğu zaman uygun soğutma tekniklerine bağlıdır. Elektronik cihazların küçük boyutlarda daha fazla güç ve performans sunması gerekliliği, soğutma sistemlerinde yenilikçi çözümler arayışını da beraberinde getirmiştir. Bu noktada, Moore Yasası'nın önemini vurgulamak gerekmektedir. Moore Yasası, 1965 yılında Gordon Moore tarafından ortaya atılmıştır ve entegre devrelerdeki transistör sayısının yaklaşık her iki yılda bir iki katına çıkacağını öngörmektedir. Bu yasa, yarı iletken endüstrisinde büyük bir rehber olmuştur ve teknolojik ilerlemelerin hızını belirlemiştir (Moore, 1965). Tarihsel süreçte işlemcilerin kısa tarihi Şekil 1.1 verilmiştir.



Şekil 1.1. Tarihsel süreçte işlemcilerin kısa tarihi (Mete, 2016)

Pasif soğutma sistemleri, mikro kanallı ısı eşanjörleri, ısı boruları, havuz kaynatma gibi birçok mevcut soğutucu akışkan çevrimi vardır. Küçük boyutlu ve soğutma ihtiyacı yüksek olan elektronik cihazların soğutulması için kompakt ısı eşanjörleri ve yenilikçi yöntemler gerekmektedir (Mousavi vd, 2018).

Farklı çalışma koşullarında optimum çözüme ulaşmak için küçük boyutlarda kompakt bir tasarım yöntemi çok önemlidir. Performans güvenilirliği açısından literatürdeki en yaygın yöntemlerden biri ısı borusu kullanımıdır (Lasance ve Simons, 2005).

Isı boruları, elektronik cihazlarda oluşan fazla ısıyı etkili bir şekilde uzaklaştırarak cihazların performansını artırmakta ve ömürlerini uzatmaktadır. Isı boruları, yüksek ısı iletkenliği sayesinde elektronik cihazların iç yapısına uygun şekilde monte edilebilir ve bu da cihazların soğutulmasını daha verimli hale getirir. Ancak, ısı borularının farklı açılardaki performansı üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır ve bu da araştırmamızın temel problemidir. Khandekar ve arkadaşlarının çalışmasında, ısı borularının farklı açılardaki performansının araştırılması gerektiği vurgulanmıştır (Khandekar vd, 2002).

Elektronik cihazların aşırı ısınması, performans düşüklüğüne ve donanım arızalarına yol açabilir. Bu nedenle, etkili bir soğutma sistemi geliştirmek, cihazların güvenilirliği ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Isı borularının farklı açılardaki performanslarının incelenmesi, bu cihazların soğutma sistemlerinin optimize edilmesine ve daha verimli hale getirilmesine yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışması, farklı çalışma koşullarında kullanılan ve elektronik soğutma ihtiyacı olan profesyonel telsiz cihazlarında ısı borusu performansını deneysel olarak incelemektedir. Isı borularının kullanımıyla profesyonel telsizlerin çalışma güvenilirliğini artırmak ve yüksek sıcaklık performansı problemlerine çözüm bulmaktır. Farklı açılarda ısı borularının soğutma performansı test edilmiştir. Bu bulgular profesyonel telsizlerin termal tasarımı ve performansı için önemli bir katkı sağlayacaktır.

Deneyler sırasında ortam koşullarının (sıcaklık, nem, basınç) sabit ve kontrol altında olduğu kabul edilmiştir. Isı borularının performansını etkileyebilecek diğer dış etkenlerin (örneğin, hava akımı) minimum düzeyde olduğu varsayılmıştır.

Araştırmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. İlk olarak, deneyler sadece belirli açılarda ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) gerçekleştirilmiştir. Bu açılar, ısı borularının tüm olası yerleştirme pozisyonlarını kapsamamakta, ancak en yaygın kullanılan açılar olarak seçilmiştir. İkinci olarak, kullanılan ısı boruları ve iş akışkanlarının termofiziksel özellikleri sabit olarak ele alınmıştır.





## 2. İLGİLİ LİTERATÜR

Elektronik sistemlerden ısı geçişi sistemlerin sorunsuz çalışmasını sağlamak adına özellikle savunma sanayisinde büyük önem taşımaktadır. Elektronik sistemlerin ısınmasına bağlı olabilecek arıza risklerinin minimize edilmesi ve her koşulda kesintisiz iletişimin sağlanması bu sistemlerdeki elektronik bileşenlerin soğutulmasını zorunlu kılmaktadır. Isı geçişinin sağlanması tamamen bir tasarım problemidir ve tüm tasarım departmanlarının aktif işbirliği ile tasarım olgunlaştırılabilir ya da değiştirilebilir. Bu alışma her ne kadar ısı borusu sistemlerine odaklanmış olsa da literatürde ısı geçişi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur.

Khandekar, Charoensawan, Groll ve Terdtoon (2002) düz-plakalı, kapalı devre, hidrolik çapı yaklaşık 2 mm olan dikdörtgen ve dairesel kesit alanlı atımlı ısı borusu üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Akışı görüntülemek amacı ile cam borular kullanmışlardır. Deneysel çalışmada iş akışkanını, dolum oranını, uygulanan ısıl yükü ve eğim açısını değiştirerek akışı görüntülemişler ve buharlaşma/yoğuşma işlemlerini ve bağımsız sıvı-buhar yapısının karakteristiğini incelemişlerdir. İş akışkanı olarak su ve etanol kullanılmıştır. Ölçülen ısıl direncin eğim açısına, dolum oranına ve kesit alanı geometrisine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. En iyi performansı, dikdörtgen kesit alanlı düşey konumdaki atımlı ısı borusu için elde etmişlerdir. Dairesel kesit alanlı ısı borusunda ise en düşük ısı aktarımı elde edilmiştir. Optimum dolum oranı %70 olarak belirlenmiştir. Yatay durumda ısı borusunun iyi çalışmadığı tespit edilmiştir.

Khandekar, Dollinger ve Groll (2003) tasarladıkları 2 mm çaplı kılcal bakır borulu atımlı ısı borusunun ısı performansını farklı iş akışkanı kullanarak deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanı olarak su, etanol ve R-123 (freon) kullanılmıştır. Deneysel alışmalar, ısı borusunun dikey ve yatay konumları için iş akışkanının farklı dolum oranlarında yapılmıştır. %20 ve %70 arası dolum oranında düşey ısı borusunun atımlı hareketi yaparak çalıştığını ve maksimum performansın su için %15-30 arasındaki dolum oranında, etanol ve R-123 için ise %25-55 arasındaki dolum oranında olduğunu belirtmişlerdir. Maksimum ısı aktarımını %35-60 dolum oranında R-123 iş akışkanı için elde etmişlerdir. Yatay konumda ise, ısı borusunun herhangi bir iş akışkanıyla çalışmadığını ve kısmen mikro düzeyli kabarcık hareketi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kim ve diğerkleri, (2003) yaptıkları çalışmada kapalı ve açık döngülü atımlı kılcal ısı borusundaki iki faz akış desenlerini incelemişlerdir. Akış görüntülemeye yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Döngü sayısı, iş akışkanı ve ısı akısı değiştirilmiştir değişken tutulan parametrelerdir. Deneysel çalışmalardan, evaporatör bölümündeki akış deseni, kabarcıklı kaynama ile kabarcıkların oluşumu ve büyümesiyle oluşan sıvı ve buhar bileşenlerinin (liquid slug/vapor plug) salınım hareketi oluşturduğu görülmüştür. Sıvı ve buhar bileşenlerinin salınım hareketinin artmasıyla, akış yapısının kapiler akıştan, halkasal akışa yakın görünümdeki sanki slug akışa doğru değiştiği ifade edilmiştir. Kondenser kısmında ise, sıvı ve buhar bileşenlerinde salınım hareketi olmakta ve iş akışkanının sirkülasyonu gerçekleşmektedir. Kapalı döngülü tip ısı borusundaki salınımlı akışın açık döngülü ısı borusuna göre daha aktif olduğu görülmüştür. Isı borusunun döngü sayısı arttığında, iş akışkanının salınım ve dolaşımının daha aktif hale geldiği ve aynı zamanda uzun sıvı ve buhar bileşenlerinde salınım dalgalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. R-142b akışkanı kullanıldığında salınımlı akışın etanola kıyasla daha aktif olduğu ve R- 142b akışkanıyla doldurulan ısı borusunun ısı taşınım performansının daha iyi olduğu tespit etmiştir.

Charoensawan, Khandekar, Groll ve Terdtoon (2003) kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansına etki eden parametreleri dikkate alarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler boru çapı, döngü sayısı, iş akışkanı ve eğim açısını değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Atımlı ısı borusu, iç çapı 2 mm ve 1 mm olan bakır borulardan yapılmıştır. İş akışkanı olarak su, etanol ve R-123 kullanılmıştır. İş akışkanının, yerçekiminin ve döngü sayısının performans üzerinde kuvvetli etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Hem döngü sayısı hem de boru iç çapının artması ile ısı performansın arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, 2 mm çaplı ve iş akışkanı su olan düşey konumdaki ısı borusunun performansının, R-123 ve etanol akışkanlarıyla doldurulan ısı borularına kıyasla daha yüksek olduğunu, fakat 1 mm çaplı ısı borusunda bu durumun tam tersi olduğunu belirtmişlerdir.

Rittidech ve diğerkleri, (2003) kapalı uçlu titreşimli ısı borusunda boyutsuz parametrelerin ısı taşınım karakteristiğine olan etkilerini inceleyerek, deneysel çalışma yapmıştır. Bond sayısı, Froude sayısı, Weber sayısı, Prandtl sayısı ve Kutateladze sayısı gibi boyutsuz parametreler dikkate alınmıştır. Üç farklı boru çapı için deneyler yapılmıştır. %50 dolum oranında R123, etanol ve su olmak üzere üç farklı iş akışkanı olarak kullanılmıştır. R123 kullanıldığında, iç çapın artması ile ısı akısının arttığı görülmüştür. Etanol kullanılan durumda ise iç çap

attığında ısı akısının azaldığı görülmüştür. Döngü sayısı azaldığında ise ısı akısının yükseldiği belirtilmiştir.

Zhang (2004) bir ısı kaynağı ile bütünleşik olarak evaporatör, adyabatik ve kondenser bölgelerinden meydana gelen atımlı ısı borusu üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Isı borusu, iç çapı 1,18 mm olan 0,14 mm et kalınlığında kapiler boru formundadır. Deneyler doğal taşınım koşulları altında, 5-60 W ısı girişlerinde ve %60-90 doluluk oranlarında, üç farklı akışkan (FC-72, etanol, ve deiyonize su) kullanılarak yapılmıştır. Boru cidarındaki ısısalınımlar kaydedilmiş olup, genliklerinin etanol ve suya kıyasla yüzey geriliminin küçük olmasından dolayı FC-72’de daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir. Bu duruma neden olan etki FC-12’ nin daha küçük buharlaşma gizli ısısına sahip olması olarak belirtilmiştir. Her bir akışkan için optimum dolum oranı aynı olup %70 olarak tespit edilmiştir. Isıl yükün yüksek değerlerinde su ile doldurulan ısı borusunun, görece düşük değerlerinde ise FC-72 ile doldurulan ısı borusunun daha iyi ısı performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Katpradit, Wongratanaphisan, Terdtoon ve Kamonpet (2005) atımlı bir ısı borusu için kritik hal durumunda ısı taşınım karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Değişken parametreler, evaporatör ve kondenser bölge uzunlukları, boru iç çapı ve iş akışkanıdır. İş akışkanı olarak, %50 dolum oranında R123, etanol ve su kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, yaklaşık 60°C çalışma sıcaklığında ısı borusunun düşey ve yatay konumları için yapılmış olup, evaporatör ve kondenser uzunlukları eşit tasarlanmıştır. Evaporatör ve kondenser bölgelerinin uzunluğunun artmasıyla ısı akısının azaldığını; iş akışkanının gizli ısısının artması ile de ısı akısında bir artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Maksimum ısı akısı, gizli ısısı en büyük olan su için elde edilmiştir. Yaptıkları çalışmada ayrıca, ısı borusunun yatay ve düşey konumu için, kritik ısı akısına yönelik korelasyonlar elde etmişlerdir.

Xu ve diğerleri, (2006) atımlı ısı borusunun ısı taşınım karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. İki farklı ısı borusu ve HFC-134a ve bütan olmak üzere iki farklı iş akışkanı kullanmışlardır. Her iki ısı borusu da alüminyum borulardan yapılmış olup, aynı genişlikte ve kalınlıktadır. Deneylerde ısı akısının, ısı borusunun açısız yerleşimi, soğutma bölümünün uzunluğunun, ısıtma yüzey alanının, soğutma türünün (havaya doğal taşınım ve sıvıya zorlanmış taşınım) ve iş akışkanının etkisini incelemişlerdir. HFC-134a kullanılan ısı borusunda 100 W güç girişinde ısı direnci 0,05°C/W olacak şekilde yüksek ısı performans tespit edilmiştir. Soğutma sıcaklığı ve soğutma yüzey alanının ısı borusunun performansına

etkisinin oldukça az olduğunu, bunun yanında, ısı borusunun açılma konumu, ısıtma alanı ve iş akışkanının performans etkisinin büyük olduğu tespit edilmiştir. Bütan'a göre HFC-134a'nın daha yüksek ısı performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Borgmayer ve Ma (2007) yaptıkları deneysel çalışmada düz plakalı atımlı ısı borusunda sıvı ve buhar kabarcık hareketi üzerinde iş akışkanı türünün, ısı gücün ve eğim açısının etkisini incelemişlerdir. İş akışkanı olarak su, etanol, Flutec PP2 (perfluorometilsikloheksan) ve Fluorinert (florocarbon esaslı bir akışkan) kullanmışlardır. Deneysel çalışmada, yüksek hızlı kamara ile sıvı-buhar ara yüzünün konumu izlenerek analiz yapılmıştır. İncelenen atımlı ısı borusunda, sıvı ve buhar kabarcıklarının makro-hareketinin ve salınım hareketinin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Daha fazla ısı gücü uygulandığında, salınım genliğinin ve akış hızının arttığını gözlemlemişlerdir. Isı borusunun %50 doluluk oranında su ile yatay konumda çalışmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, ısı borusu etanol ile doldurulduğunda en yüksek genlik ve hıza sahip olduğu görülmüştür. Sıvı ve buhar kabarcıklarının salınım ve makro hareketinin eğim açısına oldukça bağlı olduğu ve eğim açısının artırılmasıyla salınım genliklerinde artış gerçekleştiği belirtilmiştir.

Rittidech, Pipatpaiboon ve Terdtoon (2007) çek valf içeren kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı taşınım karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanı olarak %50 doluluk oranında su, etanol ve R123 kullanılmıştır. Çekvalf oranı, belirli bir sistemdeki çekvalf sayısına bölünmüş dönüş sayısını ifade eder. Genellikle bir sistemdeki her bir çekvalf için gereken dönüş sayısını çekvalf sayısına bölerek hesaplanır. Bu oran, çekvalflerin ne kadar hızlı veya yavaş hareket ettiğini gösterir. Örneğin, daha az dönüşle çalışan çekvalfler daha hızlı açılıp kapanabilir, böylece sıvı veya gaz akışını daha hızlı şekilde kontrol etme imkanı sağlar. Çek valf oranının artması ile ısı akısında artış olduğu, boy/çap oranının artması ile de ısı akısında azalma olduğu ifade edilmiştir. Isı akısının, aynı zamanda iç çap değerinin artması ile de arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, düşey konumda ısı borusundaki ısı taşınım hızının belirlenmesi için bir korelasyon önerilmiştir.

Lin ve diğerleri, (2009) polidimetilsiloksan malzemeli atımlı ısı borusunu imal ederek, ısı performansını deneysel olarak analiz etmiştir. Yaklaşık %60 sabit doluluk oranında ve 3-8 W arası güç girişinde yapılan deneylerde iş akışkanı olarak metanol ve etanol kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan, düşey konumda metanol'un en iyi ısı performans gösterdiği belirlenmiştir. Isıtma gücü artırıldığında, her iki akışkanında ısı direncinin düştüğü tespit

edilmiştir. Metanoldeki ısı direnç etanole göre daha düşüktür. 3 W ısı gücü altında ısı direnç  $4.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  değerine düşmektedir ve bu değer etanol için elde edilen değer altındadır. 4 W ısıtma gücünde ise evaporatörde ortalama sıcaklık  $15^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmektedir. Ayrıca, yerçekiminin atımlı ısı borusu performansına büyük bir etkisi görülmüş, düşey konumun yatay konuma göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Uddin ve Feroz (2009) bir masaüstü bilgisayar işlemcisinin soğutulması amacı ile minyatür bir ısı borusu sisteminin ısı taşınım performansını deneysel olarak incelemiştir. Isı borusu altı paralel minyatür ısı borusundan oluşturulmuştur. Aseton ve etanol iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Isı borusunda iş akışkanı olarak aseton kullanıldığında, işlemcinin maksimum sıcaklığının ve kararlı rejim sıcaklığının, etanol kullanılan ısı borusuna ve geleneksel fanlı kanatlı alüminyum soğutucu elemana kıyasla düştüğü görülmüştür. Ayrıca, her iki akışkanda da ek olarak fan kullanıldığında daha düşük işlemci sıcaklığı elde edilmiştir.

Lips ve diğerleri, (2010) atımlı ısı borularında farklı ısı taşınım rejimlerinin deneysel doğrulaması ve iki fazlı akışın salınım hareketinin görselleştirilmesine yönelik çalışma yapmıştır. Düşük ısı akılarında, çalışma eğrisi düzensiz olup, atımlı ısı borusunun performansının eğim açısına duyarlı olduğu görülmüştür. Yüksek ısı akılarında ise çalışma eğrisi düzgün olup performansın, ısı borusunun açılal konumuna bağlı olmadığı belirlenmiştir.

Thompson, Cheng ve Ma (2011) kaydırılmış düzenli kanallara sahip üç-boyutlu düz-plakalı salınımlı bir ısı borusunun ısı performansını, ısıtma alanını, soğutma sıcaklığını ve konumu değiştirerek deneysel olarak incelemiştir. Aynı ısı gücü için ısıtma alanı artırıldığında, ısı borusu açılal konuma çok bağımlı değildir. Isıtma alanı küçüldüğünde ise lokal ısıtma koşulları ve daha yüksek ısı akısı oluşmakta ve bu durumda evaporatör bölümünde ısı direnç ve sıcaklık salınımlarının genliği artmaktadır. İş akışkanı olarak su kullanılmıştır.

Qu ve diğerleri, (2012) trapez kesitli silikon malzemeden üretilmiş atımlı mikro ısı borusunun ısı taşınım ve akış karakteristiklerini akış görüntüleme destekli olarak incelemiştir. Trapez kesitinin hidrolik çapı sırasıyla 251  $\mu\text{m}$ , 352  $\mu\text{m}$ , 394  $\mu\text{m}$  alınmıştır. Deneyler farklı dolum oranlarında, eğim açılarında ve ısı yüklerinde farklı akışkanlar kullanılarak yapılmıştır. Isı borusunun, R113 veya FC-72 akışkanları ile doldurulduğunda 200 s içerisinde çalıştığı, fakat su ve etanol ile doldurulduğunda tüm eğim açılarında

çalışmaya başlamadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak su veya etanolün düşük  $(dP/dT)_{sat}$  değerine sahip olması ve aynı sıcaklıkta yüksek viskozite, yüksek gizli ısı ve yüksek yüzey gerilimine sahip olması gösterilmiştir. Düşük ısı girişlerinde, R123 akışkanlı ısı borusu FC-72'ye göre daha iyi ısı performans sunmuştur. Aynı iş akışkanı için düşey pozisyonda, en iyi ısı performans, hidrolik çapın artması ile sırasıyla, %52, 55 ve 47 dolum oranlarında elde edilmiştir. Yatay pozisyonda ise ısı performans düşmektedir.

Saha, Feroz, Ahmed ve Mujib (2012) yaptıkları deneysel çalışmada, 0,9 mm iç çapında açık döngülü atımlı ısı borusu kullanarak dört farklı iş akışkanı için ısı borusunun yatay ve düşey konumlarında ısı performansını incelemiştir. İş akışkanı olarak %50 dolum oranında su, metanol, 2-propanol ve aseton kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, yerçekimi ve akışkanların termo-fiziksel özelliklerinin ısı borusunun performansına kuvvetli etkisi olduğu belirlenmiştir. Düşey konumunda suyun, yatay konumda ise metanolün en iyi ısı performansı sunduğu belirtilmiştir. Asetonun düşük ısı yüklerinde daha iyi olduğu ifade edilmiştir.

Jahan, Ali ve Islam (2013) kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı taşınım karakteristiklerini farklı eğim açıları ve iş akışkanları için deneysel olarak analiz etmiştir. Performans incelemesi  $0^\circ$  (yatay),  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  (dik) eğim açılarında, su ve etanol olmak üzere iki farklı iş akışkanı için gerçekleştirilmiştir. Isı borusu, iç ve dış çapı sırasıyla 2 mm ve 3 mm olan 148 cm uzunluğunda kılcal boru kullanılarak oluşturulmuştur. %70 dolum oranında en iyi performans elde edilmiştir. Deneylerde suyun etanole göre daha iyi ısı performans gösterdiği belirlenmiştir. Su kullanılması durumunda evaporatör kısmındaki sıcaklığın etanole göre daha çok yükseldiği, ısıl direncin ısı yük ile ters orantılı olarak değiştiği ve  $60^\circ$ - $70^\circ$  eğim açılarında ısı borusunun optimum performans sunduğunu belirtmişlerdir.

Wong ve Chen (2013) yaptıkları deneysel çalışmada, U tipi oluklu fitil içeren düz-plakalı ısı borusunda, su, metanol ve asetonun buharlaşma karakteristiklerini incelemişlerdir. Su doldurulan ısı borusunun maksimum ısı yük altında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Üç akışkanda da oluk tipi fitil içinde kaynama görülmemiştir. Ayrıca, su içeren ısı borusunda damlacıklı yoğuşma, metanol ve asetonlu ısı borularında ise film yoğuşması olduğu gözlemlenmiştir. Isıl olarak kararlı çalışma şartlarında, çoğu olukta bağımsız uzunlamasına salınımlar olduğu ve su kullanılan ısı borusunda daha zayıf salınım hareketi

ve daha kısa salınım mesafesi olduğu gözlemlenmiştir. Oluklu fitil içinde suyun buharlaşma performansının metanol ve asetona göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Cui, Zhu, Li ve Shun (2014) yaptıkları deneysel çalışmada, kapalı döngülü atımlı ısı borusunda dört farklı iş akışkanı kullanarak, ısı borusunun çalışma karakteristiğini ve ısı taşınım mekanizmasını incelemiştir. İş akışkanı olarak de-iyonize su, metanol, etanol ve aseton kullanmışlardır. 5-100 W arasında farklı ısı yüklerinde ve %20-95 arasında dolum oranlarında çalışmışlardır. De-iyonize suyun salınım hareketinin ve ısı taşınım mekanizmasının diğer iş akışkanları ile benzer olduğu ifade edilmiştir. De-iyonize suyun %62 dolum oranında ısı borusunun iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Isı girişinin artması ile ısı direncin azaldığı, 5-10 W arası ısı girişinde salınım hareketi olmadığı ve sıcaklık değişiminin fark edilemez olduğu gözlemlenmiştir. Isı girişi 20 W değerine yükseldiğinde, yüksek genlik ve düşük frekansla ifade edilebilecek sıcaklık salınımları olmuştur. 35 W ve 50 W arası ısı yüklerinde ise, yüksek genlikle ifade edilebilecek normal düzeyde sıcaklık salınımları gözlenmiştir. 65-100 W arası ısı girişlerinde de sıcaklık salınımlarının küçük genlikte ve yüksek frekansta olduğu belirtilmiştir. 65 W ve üzeri ısı girişlerinde dolum oranı ve iş akışkanına bağlı olmaksızın bir ısı taşınım performans sınırı olduğu ifade edilmiştir.

Han, Cui, Zhu ve Sun (2014) iç çapı 2 mm olan kapalı döngülü bir ısı borusu kullanarak, farklı iş akışkanlarının salınım karakteristikleri ve ısı taşınım performansını deneysel olarak incelemiştir. Farklı ısı yükleri (5-100 W) ve dolum oranlarında (%20-%95) çalışmışlardır. İş akışkanı olarak, de-iyonize su, metanol, etanol ve aseton kullanmışlardır. Düşük ısı yükleri altında viskozitenin etkisinin belirleyici olduğu, buna karşın yüksek ısı yüklerinde enerji taşıma yeteneğinin göstergesi olan sıvı özgül ısı değeri ile buharlaşma gizli ısı değerinin ısı performans üzerinde belirleyici termo-fiziksel özellikler olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı dolum oranları için, daha düşük kaynama noktasına ve daha düşük gizli ısı değerine sahip akışkanın daha erken kurumaya yol açtığını belirtmişlerdir.

Pachghar ve Mahalle (2014) farklı iş akışkanları kullanarak kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansını belirleyebilmek için deneyler yapmıştır. İş akışkanı olarak, su, etanol, metanol ve aseton'un yanı sıra 1:1 hacim oranında su-etanol, su-metanol ve su-aseton ikili karışımlarını kullanmışlardır. Deneyler %50 dolum oranında ve düşey konumda yapılmıştır. Ayrıca, deneysel sonuçları doğrulamak için CFD analizi yapılmıştır. Elde edilen

sonuçlara göre, 40 W ısı girişinde kadar ısı direncin yavaş olarak düştüğü, daha sonra sabit kaldığı tespit edilmiştir. İkili karışımların ısı performansının daha iyi olduğu, su-aseton ikili karışımın da diğer akışkanlara göre en iyi ısı performansı sunduğu belirlenmiştir.

Tseng ve diğerleri, (2014) üniform ve üniform olmayan boru çaplarına sahip kapalı döngülü atımlı ısı borusunun performansını farklı iş akışkanları kullanarak incelemiştir. İş akışkanı olarak su, metanol ve HFE-7100 kullanılmıştır. Deneyler, ısı borusunun yatay ve düşey konumu için yapılmıştır. Yatay pozisyonda yapılan deneylerde, üniform olmayan bir başka ifade ile değişken kanal çaplı döngülerden oluşan tasarımın üniform tasarıma göre düşük ısı girişlerinde daha erken çalışmaya başladığı ve daha küçük ısı dirence sahip olduğu görülmüştür. Isıl direncin ısı girişinin yükselmesi ile düştüğü tespit edilmiştir. Düşey konumda ise, ısı direnci yatay pozisyona göre daha düşüktür. Yatay konumdan farklı olarak, ısı girişi ile birlikte ısı direnci sürekli bir azalma tespit edilmiştir. Düşük ısı güçlerinde, HFE-7100 yüklü ısı borusu en düşük ısı direnci göstermiştir. 60 W üstündeki ısı güçlerinde ise de-iyonize su kullanılan ısı borusunda en küçük ısı direnci elde edilmiştir.

Rahman ve diğerleri, (2015) açık döngülü atımlı ısı borusu kullanarak yapmış oldukları deneysel çalışmada, iki farklı iş akışkanı kullanarak değişken eğim açılarında ısı borusunun ısı performans karakteristiklerini gözlemlemiştir. Isı borusunun kondenser kısmına 1 mm çaplı bakır telden kanatlar eklenmiştir. Deneyler %50 dolum oranında metanol ve etanol kullanılarak yapılmıştır. Kanat eklenen ısı borusunun kanatsız ısı borusuna kıyasla daha yüksek performans karakteristiği gösterdiği belirlenmiştir. Metanol için elde edilen sonuçlar etanole kıyasla daha iyidir. Isıl direncin ısıtma gücünün artması ile azaldığı belirtilmiş, farklı ısı girişlerinin boru içerisinde farklı akış şekilleri oluşmasına neden olduğu vurgulanmıştır.

Wang (2015) atımlı ısı borusunun çalışma karakteristiğini daha iyi anlamak için deneysel çalışma yapmıştır. Etanol ve aseton akışkanları kullanılarak yapılan deneylerde, 2 mm çapında 5 döngüden oluşan kılcal bakır boru kullanmıştır. Kararlı çalışma koşulları altında, daha düşük dolum oranı daha yüksek ısı taşıma performansına sebep olmaktadır. Dolum oranının ve ısı yükünün ısı taşıma performansını ve ısı borusunun çalışma sınırlarını belirleyen önemli faktörler olduğu görülmüştür. Yüksek ısı yükleri altında düşük dolum oranlı ısı borusunda kuruma meydana geldiğini ve ısı taşınımının kötüleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, düşük buharlaşma gizli ısıya değerine sahip aseton gibi akışkanların kararlı çalışma şartlarında daha düşük ısı direnci gösterdiği görülmüştür.

Yang, Cheng, Liu ve Shyu (2015), farklı genişlikte mikrokanallar içeren (bir döngü içindeki iki kanalın birbirinden farklı genişlikte olması) atımlı ısı borusu üzerinde çalışmıştır. İş akışkanlarının termo-fiziksel özelliklerinin ısı performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Isı borusu dikdörtgen kanallı 64 paralel kanaldan meydana gelmektedir. Birbirine komşu her iki kana iki farklı genişlikte, 0,5 mm ve 0,3 mm olup, derinlikleri 0,25 mm'dir. İş akışkanı olarak de-iyonize su ve metanol kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan, su ile doldurulmuş ısı borusunun her zaman salınımlı iki fazlı akış oluşturmada başarısız olduğu ve bu yüzden daha yüksek ısı direnç meydana geldiği, bunun yanında metanol ile %80 dolum oranında doldurulmuş düşey konumdaki ısı borusunda 6 W üstü ısı yüklerde salınımlı iki fazlı akış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Rao, Gupta ve Narasimha (2016), 2 mm çaplı pirinçten yapılmış kapalı tek döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansı üzerinde parametrik karakterizasyon için deneysel bir çalışma yapmıştır. Parametrik karakterizasyon, ısı borusu iç çap, dolum oranı, iş akışkanı ve eğim açısı değiştirilerek yapılmıştır. Deneylerde aseton, metanol, etanol ve propanol akışkanları %50-80 arasındaki dolum oranlarında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan atımlı ısı borusunun ısı performansının, dolum oranına, eğim açısına ve ısı yüküne önemli derecede bağlı olduğu görülmüştür. Aseton ile doldurulan ısı borusunun diğer akışkanlara kıyasla tüm açısal konumlarda daha iyi ısı taşıma performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Shi ve diğerleri. (2016), farklı akışkanlar kullanarak, paralel kanallı kapalı döngülü plakalı atımlı bir ısı borusunun çalışma karakteristiklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda, iş akışkanı olarak, etanol ve aseton, %50, %70 ve %80 dolum oranlarında kullanılmıştır. Kararlı rejimde, ısı borusunun çalışması esnasında, kanallar içerisinde uzun kabarcıklı akış (plug flow) ve halkasal akıştan oluşan karışık akış desenleri gözlemlenmiştir. Salınım süresince, kondenser bölümünde, akışkanda denge pozisyonu olduğu ve denge konumu civarında aşırı ve yukarı periyodik salınımlar olduğu görülmüştür. Isıl yükün artması ile artan buhar basıncından dolayı denge pozisyonu yavaş olarak yükselmektedir.

Günümüzde bilgisayar çiplerinin gücü arttıkça, ürettikleri aşırı ısı, elektronik bileşenlere zarar verebilmektedir. Bu sorunu çözmek için, Behi ve diğerleri (2017), faz değişim malzemesi (FDM) destekli bir ısı borusu sisteminin elektronik soğutma üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney düzeneği güç kaynağı, soğutma suyu döngüsü, ısı borusu, iç çapı 46 mm ve uzunluğu 115 mm olan şeffaf cam silindir, veri kaydedici ve T tipi

ısılıçiftlerden oluşmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, evaporatör bölgesinde en yüksek duvar yüzey sıcaklığı gözlemlenmiş ve bu sıcaklık kondenser bölgesine doğru azalmıştır. 50-80 W güç aralığında çalışan FDM destekli ısı borusu, soğutma yükünün %86,7'sini sağlamış ve FDM'nin katkısının %11,7 olduğu tespit edilmiştir. Bu sistem, elektronik cihazların soğutulmasında ısı dağılımını engelleyerek verimliliği artırmada etkili bir çözüm sunmaktadır.

Kammuang-Lue, Sakulchangsattajai, On-Ai ve Terdtoon (2017) yapmış oldukları deneysel çalışmada, dönen ve kapalı döngülü atımlı bir ısı borusunun ısıl direnci üzerinde iş akışkanlarının ve iç çapın etkisini incelemiştir. 11 döngülü atımlı ısı borusunda, 1.50 mm ve 1,78 mm çaplı bakır borular kullanılmıştır. Evaporatör, boru demetinin dış kısmı olarak düşünülmüştür. İş akışkanı olarak R123, etanol ve su kullanılmıştır. Isı borusu yerçekimi ivmesinin 0,5, 1, 3, 5, 10 ve 20 katı olacak şekilde bir merkezkaç ivmesi ile döndürülmüştür. Buharlaşma gizli ısı arttıkça, evaporatör ve kondenser arasındaki basınç farkının azaldığını ve ısıl direncin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kanal iç çapı arttıkça sürücü kuvvet artmakta ve sürtünme kuvveti azalmaktadır.

Kim ve diğerleri (2017), farklı iş akışkanları kullanarak tek, paralel bağlı ve iki döngülü atımlı ısı borularının ısıl performansını bir dizi deney yaparak belirlemeye çalışmıştır. İç ve dış çapı sırasıyla 2,2 mm ve 3.2 mm olarak bakır kılcal boru kullanmışlardır. Atımlı ısı borusunda %50 doluluk oranında etanol ve de-iyonize su kullanmışlardır. Paralel bağlı atımlı ısı borusunun teoriksel ısıl direncini tek döngülü ısı borusunun deneysel sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. De-iyonize su kullanılan ısı borusunda buharlaşmanın başlaması için etanole göre daha fazla ısıl güç uygulanması gerektiği belirtilmiş, bunun sebebinin ise de-iyonize suyun etanole göre kaynama noktasının ve özgül ısısının daha büyük olması olarak ifade edilmiştir. Düşük ısı akılarında, de-iyonize su dolu atımlı ısı borusunun bir termosifon olarak çalıştığı, sıcaklık salınımları olmadığı belirtilmiştir. Fakat düşük ısı akılarında, etanol kullanılan ısı borusunda sıcaklık salınımlarının olduğu, sıvı-buhar bileşenlerinin olduğu görülmüştür. Paralel bağlantılı ısı borusunun iki döngülü ısı borusuna göre 42-50 W arası güçlerde her iki akışkan için daha iyi ısıl performans gösterdiği belirtilmiştir.

Pradeep ve Narasimha (2017) dikey olarak yönlendirilmiş kapalı devre atımlı ısı borusunun ısıl performansını hem deneysel hem de boyutsuz sayılar kullanarak incelemişlerdir. İş

akışkanı olarak aseton, etanol, metanol ve heptan kullanmışlardır. Deneyler %60 dolum oranında, 80 W sabit ısı gücü altında yapılmıştır. Deneysel sonuçlardan, asetonun diğer akışkanlara göre düşük ısı direnç ve yüksek ısı taşınım katsayısından dolayı daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Heptanın ise diğer akışkanlara göre en düşük ısı performansına sahip olduğu belirtilmiştir. Etanol ve metanol orta derecede bir performans göstermiştir. Ayrıca, Kutateladze sayısı, Prandtl sayısı, Karman sayısı, Bond sayısı ve Jacob sayısı kullanılarak boyut analizi yapılmıştır. Bond, Karman ve Jacob sayılarına göre asetonun en iyi ısı performansına sahip olduğu ifade edilmiştir. Heptan ise tüm boyutsuz sayılara göre orta düzeyli ısı performans göstermiştir. Sonuç olarak asetonun hem deneysel hem de boyut analizine bağlı olarak en iyi ısı performansına sahip olduğu belirtilmiştir.

Chougule (2018), ısı borularının performansını çeşitli çalışma koşullarında incelemiştir. Çalışmada, farklı çalışma akışkanları olarak su ve nanoakışkanlar ile farklı enerji saklama malzemeleri (ESM) olan FDM ve nanokompozitler kullanılmıştır. Deneylerde, enerji depolama tankındaki (EST) dolum hacmi 90 cc olarak sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda FDM'deki sıcaklık dağılımları kaydedilmiştir. Çalışmada, saf su ve CNT-su nanoakışkanı (ağırlıkça %2) gibi çeşitli akışkanlar kullanılarak ısı borusunun geçici sıcaklık dağılımları analiz edilmiştir. Bulgular, nanokompozitlerin 20°C'den 80°C'ye ulaşmak için saf FDM'den daha kısa sürede ısındığını göstermiştir. Saf su dolu ısı borusu soğutma modülü yaklaşık 980-1000 saniye gerektirirken, ESM olarak FDM, NFDM (ağırlıkça %1), NFDM (ağırlıkça %2) ve NFDM (ağırlıkça %3) kullanıldığında bu süre 900-940 saniye arasında değişmiştir. CNT-su nanoakışkanı kullanılarak hazırlanan ısı borusu soğutma modülü ise 720-780 saniyeye ihtiyaç duymuştur. Nanokompozitlerin enerji depolama kapasitesi saf FDM'den daha yüksek bulunmuş ve CNT nanoparçacıklarının konsantrasyonunun artmasıyla enerji depolama kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Sun ve diğerleri (2017), elektronik cihazların soğutulmasında ısı borusu ile entegre edilmiş bir termoelektrik soğutma sisteminin etkinliğini değerlendirmiştir. Sistemin performansını artırmak amacıyla, termoelektrik soğutma modülünün sıcak tarafına yerçekimi destekli bir ısı borusu (GAHP) eklenmiştir. Bu entegre sistemin performansı, hava soğutmalı bir TEC sistemi ile karşılaştırılarak bir iklim odasında test edilmiştir. Sonuç olarak, aynı miktarda soğutma enerjisi üretmek için sistemin soğutma kapasitesinde %73,54 oranında bir iyileşme ve elektrik tüketiminde %42,20 oranında bir azalma kaydedilmiştir.

Weng (2011) ise, elektronik soğutma için faz değıştiren malzemelerle (FDM) donatılmış bir ısı borusunun termal performansını incelemiştir. Deney düzeneğinde, ısı borusunun adyabatik bölümü faz değıştiren malzemelerle kaplanmıştır ve bu malzemeler, evaporatörün ısıtma gücüne ve fan hızına bağılı olarak termal enerjiyi depolayıp serbest bırakabilmektedir. Çalışma kapsamında, trikozan, laurik asit ve palmitik asit gibi farklı FDM'lerin sıcaklık değışimleri çeşitli ısıtma güçleri altında değerlendirilmiştir. Örneğin, trikozan 20 W'lık ısıtma gücünde 60°C'ye 973 saniyede ulaşırken, laurik asit 1041 saniye ve palmitik asit 582 saniyede ulaşmıştır. Daha yüksek ısıtma güçlerinde, trikozan 60°C'ye daha hızlı ulaşmış; 30 W'da 477 saniye ve 40 W'da 307 saniye sürmüştür. Laurik asit ve palmitik asit için bu süreler daha düşük kalmıştır. Trikozan, gizli ısı kapasitesinde en yüksek değeri göstermiştir. Genel sonuçlara göre, trikozan kullanımı diğer FDM'lerden daha üstün performans sergilemiş ve soğutma modülünde fan güç tüketiminde %46 oranında tasarruf sağlanmıştır.

Huang ve diğerleri (2018), yüksek yüzey alanı-hacim oranına sahip bir mikro ısı borusunu geleneksel ısı boruları ile karşılaştırmıştır. Isı borusunda iş akışkanı olarak, aseton, siklopentan ve n-hexan kullanılmıştır. Aseton kullanılan ısı borusunun en iyi ısıl performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Isı borusunun en uygun eğim açısının sabit bir değeri olmadığı, iş akışkanına ve ısıl yüke bağılı değıştiğı ifade edilmiştir.

Nazaria, Ahmadib, Ghasempoura ve Shafiic (2018), iş akışkanı ile ilgili kaynama noktası, buharlaşma gizli ısı, yüzey gerilimi, ısıl iletkenlik ve dinamik viskozite gibi termo-fiziksel parametrelerin, ayrıca akışkanlara eklenen nono-parçacıkların etkisini son yıllarda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalara bağılı olarak belirlemeye çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, nano-akışkanların ısı borularının ısıl performansını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, düşük dinamik viskozite ve yüzey gerilimi ve yüksek ısıl iletkenliğin atımlı ısı borusunun ısıl performansını arttırdığı belirtilmiştir. Düşük ısıl yüklerde ise, düşük kaynama noktasına sahip akışkanla doldurulmuş ısı borularının daha hızlı çalışmaya başlaması yönünden tercih edilebileceğini, bunun yanında yüksek ısıl yüklerde ise içerisinde yeterli sıvı olmadığı durumlarda kuruma gibi bazı problemler meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Patel (2018), yaptığı çalışmada amonyak ve metanol akışkanlarıyla doldurulmuş ısı borusunu incelenmiştir. Isı borusunun optimizasyonu ısıl direncin ve ısı borusu kütesinin minimuma indirilmesi için oluşturulmuş ve ısı taşınım tarama algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmasında, evaporatör ve kondenser uzunluğu, boru cidar kalınlığı, buhar

çekirdek kalınlığı, fitil ağ sayısı, fitilin kalınlığı ve çapı olacak şekilde yedi geometrik parametre incelenmiştir. Çalışmalardan, verilen bir ısı borusu kütlesi için metanol kullanılan ısı borusuna göre amonyak akışkanlı ısı borusunun %82,17-57,16 arasında daha düşük ısı dirence sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bruce ve diğerleri (2019), evaporatör, kondenser ve adyabatik kısımlardan meydana gelen gelecekteki süper-iletken miknatıslar için atımlı bir ısı borusu tasarlamışlar ve iş akışkanı olarak neon kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneylerde, ısı borusunun evaporatör kısmını 27 K sabit sıcaklıkta tutmuşlardır. Isı borusunun evaporatör kısmına ani ısı yük uygulayarak ısı borusunu test etmişlerdir. Deneylerde evaporatör plakaya 40, 60, 80 ve 100 W ısı yük ile birlikte 10, 50 ve 100 kJ' luk anlık ek enerji uygulanmıştır. Yapılan çalışmalardan, neon iş akışkanlı atımlı ısı borusunun evaporatör kısmına uygulanacak ek ısı yüklerine karşı normal bir şekilde çalışabileceğini gözlemlenmiştir.

Fumoto ve diğerleri, (2019) farklı iş akışkanları kullanarak, mikro atımlı ısı borusunun ısı performansını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Mikro atımlı ısı borusu iç çapı 0,8 mm olan kılcal bakır boru formundaki yirmi paralel kanaldan meydana gelmektedir. Isı borusunda, hacimsel olarak %40-70 aralığındaki doluluk oranlarında etanol, de-iyonize su ve 1-butanol sulu çözelti kullanmışlardır. 1-butanol sulu çözeltisi kendiliğinden ısıtılan akışkan olarak bilinmektedir. Kendiliğinden ısıtılan akışkanlarda yüzey gerilimi sıcaklık artışı ile giderek azalır, 60°C civarında minimum bir değere ulaşır ve daha sonra daha yüksek sıcaklıklarda giderek artar. Deneysel çalışmalardan, 1 -butanol çözeltisinin ısı yük rejimindeki kararlı salınım hareketinin suya göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, en yüksek konsantrasyonlu 1-butanol sulu çözeltisine sahip ısı borusunun ısı iletkenliği yüksek ısı yük değerleri altında diğer akışkanlara kıyasla daha yüksektir.

Hao, Ma, H. ve Ma, X. (2019), yaptıkları deneysel çalışmada, politeirafloetilen malzemeden yapılmış 2,41 mm çapındaki kapalı döngülü atımlı ısı borusunda farklı iş akışkanları kullanarak, ısı borusunun çalışmaya başlama mekanizmasını, sıcaklık ve akış salınımlarını ve ısı taşınım performansını incelemişlerdir. İş akışkanı olarak de-iyonize su, etanol ve aseton kullanmışlardır. Asetonla doldurulmuş atımlı ısı borusunun diğer akışkanlara göre en iyi ısı performans sağladığını tespit etmişlerdir. Sıcaklık salınımlarının ortalama genlik değerinin su akışkanlı ısı borusuna göre aseton ve etanol iş akışkanında daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık salınım frekansı, sıvı bileşen genliği ve hızı en fazla

aseton akışkanlı ısı borusunda, en düşük ise su akışkanlı ısı borusunda olduğunu belirtmişlerdir. 60-300 W arasındaki ısı yüklerde etanol ve aseton iş akışkanlarının ısı performansının suya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Liou ve diğerleri, (2019) dönme hareketi yapan atımlı ısı borusunun ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Akışkan olarak %50 dolum oranında su kullanılmıştır. Isı-akışkan davranışında etkisi olan parametreler, kaynama sayısı, boyutsuz merkezkaç ivme, kondenserin ısı direnci olarak seçilmiştir. Buhar-sıvı akış görüntüsü, ısı taşınım hızları ve ısı dirençler 0-500 dev/dak dönme hızı aralığında belirlenmiştir. Isı kararsızlıkların kaynama sayısındaki artış ile arttığı gözlemlenmiştir. Sabit kaynama sayısında, ısı direncin düştüğü durumlarda, buhar bileşenlerinin boyutu ve yoğunluğunun arttığı, ayrıca ısı borusundaki salınımların frekansı ve genliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Dönme hareketinde ise, merkezkaç ivmenin artması ile buhar-sıvı akışı kararlı hale gelmekte, kabarcık yoğunluğu ve buhar boyutu düşmektedir. Isı borusunun durgun halinde toplam ısı direncin, kaynama sayısının artması ile düştüğü, evaporatör ısı direncinin artması ile arttığı gözlemlenmiştir.

Wang ve diğerleri, (2019) yaptıkları deneysel çalışmada, dolum oranı, eğim açısı ve iş akışkanı türünün düz plakalı mikro ısı borusunun performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Dolum oranının ısı performansına büyük etkisi olduğu belirlenmiş, %20 dolum oranında en iyi performans elde edilmiştir. Isı borusunu performansının eğim açısının 0°'den 20°'ye yükseltilmesi ile önemli bir şekilde arttığı, 20°'den 90°'ye artırıldığında ise performansta belirgin bir değişim olmadığı belirtilmiştir. En iyi performans metanol için elde edilmiştir.

Zhao (2021) çalışmasında, elektronik çipler için termal yönetim stratejilerini geliştirmek amacıyla düz plakalı bir ısı borusu (FPHP) ve spreyl soğutmanın birleşiminden oluşan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu strateji, elektronik cihazların ısı dağıtım performansını artırmayı hedeflemektedir. FPHP'nin yoğunlaşma bölümünde spreyl soğutmanın kullanılması, elektronik çiplerin ısı yayma alanını artırmakla kalmayıp aynı zamanda ısı borusu ile çip arasındaki temas direncini azaltarak ısı taşınım verimliliğini artırmaktadır. Bu yöntem, elektronik termal yönetim teknolojilerine yeni bir bakış açısı sunmakta olup, farklı uygulamalara uyum sağlamak için birden fazla soğutma tekniğinin birlikte kullanılabileceğini önermektedir.

Zhou (2019) çalışmasında, yüksek ısı akışlı elektronik cihazların soğutulması amacıyla ultra ince düzleştirilmiş bir ısı borusunun termal performansını artırmak için yenilikçi bir çift gözenekli spiral dokuma fitil geliştirilmiştir. Bu hibrit dokuma fitillerde her bir telde 0,05 ve 0,04 mm çapında bakır teller kullanılmıştır. Deiyonize su ile yapılan kılcıl yükselme hızı deneyi, kızılötesi kamera yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve fitilin kılcıl performansını karakterize etmiştir. Ultra ince düzleştirilmiş ısı borusunun termal performansı deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar, çift gözenekli fitilin, büyük gözeneklerin sağladığı yüksek geçirgenlik ile küçük gözeneklerin sağladığı büyük kılcıl kuvvetin avantajlarını birleştirdiğini göstermiştir. Optimum çift gözenekli fitil, tek gözenekli fitile göre %22 daha az bakır tel içerirken, ultra ince düzleştirilmiş ısı borusunun maksimum ısı taşıma kapasitesi 24 W'a ulaşmıştır. Bu da çift gözenekli fitil kullanılarak hem düşük üretim maliyeti hem de yüksek termal performans taleplerinin karşılanabileceğini göstermektedir. İki farklı boyutta gözenek içeren çift gözenekli S WM fitili, büyük gözenekler sayesinde düşük akış direnci ve küçük gözenekler sayesinde yüksek kılcıl kuvvetlerin kombinasyonu ile termal performansın artmasına katkıda bulunmuştur.

Düz evaporatör döngülü ısı boruları, elektronik cihazlarda yüksek termal performansları ve geniş hacimleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Zhao, Zhang, Zhao ve diğerleri (2021) çalışmalarında, düz disk döngülü ısı borusunun R1233zd(E) sıvısı ile birlikte karasal elektroniklerin soğutulmasındaki etkisini incelemişlerdir. Alüminyumdan tasarlanan düz diskli evaporatör döngü ısı borusu, çevre dostu ve ultra düşük toksisite özellikleri nedeniyle R1233zd(E) sıvısını tercih etmiştir. Bu sistemde, nikel tozundan yapılan sinterlenmiş kılcıl fitil, çalışma sıvısının sirkülasyonunu sağlamıştır. Çalışma sonucunda, 790 mm etkin uzunluğa sahip döngü ısı borusu, 10°C soğutucu sıcaklığı ile 190 W (11,43 W/cm<sup>2</sup>) ısıyı dağıtmıştır. Soğutucu sıcaklığı 30°C olsa bile, ısıtma alanının sıcaklığı 70,4°C olduğunda maksimum ısı yükü 130 W'a (7,82 W/cm<sup>2</sup>) ulaşmıştır. 30°C soğutucu sıcaklığında 10 W (0,60 W/cm<sup>2</sup>) ile 130 W (7,82 W/cm<sup>2</sup>) ısı yükü arasında geniş bir çalışma aralığı gözlenmiştir. Evaporatörün minimum termal direnci ve toplam döngü ısı borusu sırasıyla 0,134°C/W ve 0,197°C/W olarak bulunmuştur.

Siricharoenpanich (2019), kısa ısı borulu soğutma sistemleri ile işlemci soğutma etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada, ısı borusunun eğim açısı, gözenekli ortam kullanımı, farklı çalışma sıvıları ve bilgisayarın çalışma koşullarının işlemci sıcaklığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada R11, R14 ve etanol çalışma akışkanları olarak kullanılmıştır.

Eğim açısı olmayan ve 30°, 60°, 90° eğimli düzeneklerde R14 akışkanı, 60° eğim açısında en iyi performansı göstermiştir. Gözenekli ortama sahip ısı borusunun, işlemci sıcaklığını gözeneksiz ortamdan daha fazla düşürdüğü bulunmuştur. Sonuçlar, ısı borusunun eğim açısı, kullanılan akışkan türü ve gözenek yapısının soğutma verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Veerasamy (2022), nano soğutucu akışkanların soğutma sistemlerindeki performansını incelemiştir. Bu çalışmada, bakırdan imal edilmiş dairesel ısı borusu kullanılmış ve grafen nanoplateletler ile R-410A soğutucu akışkan karıştırılarak çalışma sıvısı oluşturulmuştur. 80 W giriş gücü ve 90° eğim açısı ile yapılan deneyler, nano soğutucu akışkanın ısıl iletkenliğinin R-410A'dan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Nano soğutucu akışkan, ısı borusunun performansını artırmış ve optimize edilmiş sonuçlar, nano soğutucu akışkanların ısıl verimliliği artırırken, ısıl direnci azalttığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, nano soğutucu akışkanların elektronik cihazların soğutulmasında oldukça etkili olabileceğini göstermektedir.

Elektronik cihazlar küçüldükçe ve esnek hale geldikçe, ısı yönetimi daha da zorlayıcı hale gelmektedir. Katlanabilir ve giyilebilir cihazlar gibi yeni nesil elektronik ürünlerde, geleneksel soğutma yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu noktada, ultra ince esnek ısı boruları devreye girmektedir. Gibbons ve diğerleri (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, katlanabilir elektronik cihazlar için ısı borusu teknolojileri incelenmiştir. Ultra ince esnek ısı boruları, makro sert, ultra ince sert ve makro esnek ısı borularının ortak tasarım bileşenlerini kullanmaktadır. Fakat katlanabilir cihazların özel gereksinimlerini karşılamak için bazı önemli geliştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Başlıca zorluklardan biri, uygun esneklik, termal iletkenlik, geçirimsizlik ve termal bağlantı kapasitesine sahip bir kabuk malzemesinin geliştirilmesidir. Bu kabuk malzemesi, cihazın katlanma ve bükülme hareketlerine dayanıklı olmalı ve aynı zamanda ısıyı etkin bir şekilde uzaklaştırmalıdır. Bir diğer zorluk ise yüksek kılcal basınç, geçirgenlik ve esneme sağlayan çok ölçekli esnek gözenekli fitil yapısının tasarlanmasıdır. Bu fitil yapısı, ısı borusunun içindeki sıvı-buhar faz değişimini kolaylaştırmalı ve ısıyı eşit şekilde dağıtmalıdır. Son olarak, esnek ısı borusunda verimli iki fazlı akışa izin veren sıvı-buhar alanı tasarımının optimizasyonu da önemlidir. Bu tasarım, ısı borusunun tüm uzunluğu boyunca ısı taşınımını en üst düzeye çıkarmalıdır. Ultra ince esnek ısı boruları, Gibbons ve diğerleri (2021) tarafından da vurgulandığı gibi, katlanabilir elektronik cihazlar için umut vadeden bir termal yönetim çözümü sunmaktadır. Bu

teknolojinin geliştirilmesi, daha kompakt, daha hafif ve daha esnek elektronik cihazların önünü açacaktır.

Bakır metal köpüklerin düz plakalı ısı borularında (FHP) fitil malzemesi olarak kullanımı yaygın olmasa da Brahim ve Jemni (2021) çalışmalarında bu malzemenin potansiyelini araştırmıştır. COMSOL Multiphysics kullanılarak sayısal olarak incelenen çoklu ısı kaynaklarına sahip üç boyutlu bir FHP modelinde, bakır metal köpüğün kılcal tahrikli faz değişimi ısı taşınımı performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bakır metal köpüğün FHP'ler için alternatif bir fitil malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Wang ve diğerleri (2022), elektronik cihazların soğutulması için düz kapalı döngü ısı borusu (FCLHP) tasarımı ve performansını incelemiştir. Çalışmada, mikro kanallı evaporatörlerin "kuruma" sorununu ele almak ve cihazların termal yönetim gereksinimlerini karşılamak için yeni bir düzenek önerilmiştir. Bu düzenekte, iç akış tek yönde sınırlandırılmış ve balon açık alanda serbestçe genişleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede ısıtılmış yüzeyin düzenli olarak yeniden ıslanması sağlanmıştır. Çalışmada en verimli çalışma koşullarının soğutma suyu sıcaklığı  $23^{\circ}\text{C}$  ve akış hızı 135 mL/dakika olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda, sıcaklık dalgalanması %10'a kadar düşürülmüş ve minimum termal direnç 0,12 K/W olarak ölçülmüştür. Sıcaklık dalgalanmalarının aralıklı kaynama ile ilişkili olduğu ve ısı yükünün artmasıyla aralıklı kaynama süresinin azaldığı ve ardından sabitlendiği gözlemlenmiştir. FCLHP'nin geleneksel çok kanallı kapalı döngü ısı borusu (MCFLHP) ile karşılaştırıldığında, daha düşük ısı yüklerinde bile başarılı bir şekilde çalışabildiği ve sıcaklık dalgalanmalarını  $1^{\circ}\text{C}$ 'nin altına indirilerek termal direnci %29 oranında azaltabildiği gösterilmiştir.

Zeghari (2019), düz gözenekli ısı borusunun TV kutusu elektronik çiplerini soğutmadaki etkinliğini deneysel olarak araştırmıştır. Yatay konumda incelenen gözenekli fitilli bakır yassı ısı borusunda, ısı akışının artması durumunda buhar sıcaklıklarının daha düşük olduğu ve 5 W giriş yükünde 840 saniye daha fazla gecikme olduğu gözlemlenmiştir. %25'lik sıvı doluluk oranı optimum olarak belirlenmiş ve maksimum etkili termal iletkenlik 7 W giriş yükünde yaklaşık 891 W/m.K olarak hesaplanmıştır. Deneyler, npentan'ın diğer akışkanlara kıyasla en uygun çalışma akışkanı olduğunu göstermiştir. Çalışılan ısı borusu, fanlar kullanan geleneksel soğutma çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ısı borusunun tüm elektronik bileşenleri soğutmada etkili bir pasif soğutma cihazı olduğunu göstermektedir.

Xiao (2017) araştırmasında, yüksek güçlü LED'ler için otomatik bir ısı borusu ile soğutma sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde mikro denetleyici, ısı boruları ve fan entegre edilmiştir. Deney sonuçları, bu cihazın LED'lerin alt tabaka sıcaklığını etkin bir şekilde kontrol edebildiğini ve bu sıcaklığı düşük seviyelerde tutarak LED'lerin korunmasını sağladığını göstermiştir. Bu durum, LED'lerin performansını ve ömrünü iyileştirmektedir. Termal direnç değerleri  $R_{sa}$  (soğutucudan ortama) ve  $R_{ja}$  (LED çipinden ortama) 12 W'ta sırasıyla 0,373 °C/W ve 5,953 °C/W olarak kaydedilmiştir. Toplam enerji tüketimi 1,58 W'tan az olan bu sistem, yüksek güçlü LED'lerin ısı yönetimi için etkili bir çözümdür. Sonuç olarak, bu yenilikçi soğutma sistemi PWM fanı ve otomatik kontrolle donatılmış olup, yüksek güçlü LED'lerin verimli ve güvenli bir şekilde soğutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, soğutma kapasitesini artırmak ve konvektif ısı taşınımının ısı direncini azaltmak amacıyla, ısı boruları ve soğutma kanatçıkları optimize edilmiştir.

Krishna (2017) araştırmasında, nano katkılı faz değişim malzemelerinin (FDM) elektronik soğutma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyde, FDM, ısı borusunun adyabatik bölgesine yerleştirilmiştir ve evaporatördeki güç girişlerine ve fan hızlarına göre ısının emildiği ve salındığı gözlenmiştir. Çalışmada enerji depolama malzemesi olarak su, Trikozan ve nano katkılı Trikozan kullanılmıştır.  $Al_2O_3$  nanoparçacıkları, %0,5, %1 ve %2 oranlarında Trikozan ile karıştırılarak nano geliştirilmiş FDM elde edilmiştir. Nano geliştirilmiş FDM'nin termal iletkenliği, saf Trikozana göre %32 oranında artırılmıştır. Deney sonuçları, nano geliştirilmiş FDM'ye sahip ısı borusunun, evaporatör sıcaklığını yaklaşık %25,75 oranında düşürdüğünü ve bu durumun geleneksel bir ısı borusuna kıyasla fan gücünde %53 tasarruf sağladığını göstermiştir. Ayrıca, nano geliştirilmiş FDM'nin evaporatörde sağlanan enerjinin yaklaşık %30'unu depolayabildiği ve bu durumun fan güç tüketiminde azalma sağladığı belirlenmiştir.

Wang ve diğerleri (2022) çalışmasında, veri merkezlerini soğutmak için kullanılan ısı borusu teknolojisini incelemişlerdir. İncelemede, R134a ile R22 soğutucu akışkanlarının ısı borularında yaygın ve optimum çalışma sıvıları olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar, ısı borularının PUE değerlerinin 1,58'den düşük olduğunu; COP ile EER değerlerinin ise daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bulgular, ısı borusunun veri merkezlerinde önemli enerji verimliliği sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, termal yönetim için çip seviyesinde soğutmanın, oda ve raf seviyesinde soğutmaya göre daha iyi enerji verimliliği sağladığı ve çip soğutmanın enerji verimliliği etkilerinin %46'dan daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Shi ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, titreşimli ısı borusunun (PHP) farklı eğim açıları ve soğutma suyu akış hızlarında başlangıç ve ısı transfer performansı incelenmiştir. Araştırmada, PHP'nin 90°, 60° ve 30° eğim açıları ve 6.7 g/s, 9.7 g/s ve 13.9 g/s soğutma suyu akış hızlarındaki performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, soğutma suyu akış hızının PHP'nin başlangıç modu üzerinde belirgin bir etkisi olmamakla birlikte, ısı transfer performansı eğim açılarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle düşük eğim açıları (30° ve 60°), soğutma suyu akış hızının artması ısı transfer direncini düşürmüş ve PHP'nin performansını iyileştirmiştir. Ancak, 90° eğim açısında farklı akış hızları arasında belirgin bir performans farkı gözlemlenmemiştir. Bu çalışma, PHP'nin ısı transfer performansını optimize etmek ve temel teorisini geliştirmek için önemli veriler sağlamaktadır.

Xu ve arkadaşları (2023), sodyumun çalışma akışkanı ve metal fiber keçenin kapiler fitil olarak kullanıldığı yenilikçi bir yüksek sıcaklık düz ısı borusu (HTFHP) tasarladılar. 200 × 100 × 30 mm boyutlarındaki bu HTFHP, çeşitli ısıtma güçleri ve eğim açılarındaki mükemmel termal performans ve sıcaklık düzgünlüğü sergiledi. Deneysel sonuçlar, HTFHP'nin 600 W ısı girişiyle 498.702 W/m<sup>2</sup>K'ye kadar bir ısı transfer katsayısına sahip olduğunu ve hızla kararlı bir duruma ulaştığını gösterdi. Merkez ile kenarlar arasındaki sıcaklık farkının 80°C'den 50°C'ye önemli ölçüde azalması, cihazın etkili ısı dağılımını ortaya koydu. Özellikle, eğim açısının sıcaklık dağılımı üzerinde minimal etkisi olup, en iyi performansın 15° açıyla gözlemlendiği belirtildi. Bu çalışma, HTFHP'lerin yüksek ısı akışı ortamlarında, özellikle uzay aracı termal kontrolünde uygulanmasına yönelik değerli veriler sağlamaktadır.

Wang ve Wan (2023) tarafından yapılan çalışmada, sinterlenmiş paslanmaz çelik fiber fitilli bir ısı borusunun ısı transfer performansı incelenmiştir. Çalışmada, çekilmiş ve döndürülmüş fiber fitillerin ısı transfer performansı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Çekilmiş fiber fitillerin daha yüksek termal direnç sergilediği, buna karşın döndürülmüş fiber fitillerin mikro ölçekli yapısı sayesinde daha düşük termal direnç sunduğu tespit edilmiştir. Paslanmaz çelik fitilin suya karşı hidrofobik olması nedeniyle, su-etanol çözeltisinin çalışma sıvısı olarak kullanılması önerilmiştir. En uygun su-etanol konsantrasyon oranının 9:1 ile 13:1 arasında olduğu belirlenmiştir. Bu çözümle, döndürülmüş fiber fitilli ısı borusunun, özel soğutma gereksinimleri olan uygulamalarda, özellikle nükleer santrallerdeki kullanılmış yakıt havuzlarının soğutulmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Mishkhas ve arkadaşları (2024), farklı eğim açılarında ve uniform olmayan ısı transfer koşullarında oluklu alüminyum-amonyak ısı borusunun termal davranışını inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma, eğim ve ısı dağılımının çevresel sıcaklık dağılımı ve ısı transfer katsayıları (HTC) üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Sonuçlar, buharlaştırıcıdaki HTC'nin azalan ısı modunda artan ısı moduna göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu, 77W ve 165W'da sırasıyla %72 ve %35'lik bir artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca, buharlaştırıcıdaki HTC'nin eğimden nispeten bağımsız olduğu, ancak kondansatördeki HTC'nin eğimli konfigürasyonda yatay konfigürasyona göre iki kattan fazla olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, havacılık uygulamalarında yaygın olan düzensiz ısı girişi ve değişen yönelimlerde oluklu ısı borularının performansı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Sun ve arkadaşlarının (2024) yaptığı çalışmada, konsantrik halka biçimli ısı borularının (CAHP) ısı transfer performansı üzerinde fitil yapıları ve montaj açıları incelenmiştir. Çalışmada, çevresel düzgün fitil (CUW) ve çevresel ızgara fitil (CGW) olmak üzere iki farklı fitil yapısı tasarlanmış ve test edilmiştir. Sonuçlar, CGW'nin daha hızlı bir başlangıç süresine ve daha düşük termal dirence sahip olduğunu, ancak kritik ısı akışının daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CUW'nin evaporatör çevresinde daha eşit bir sıcaklık dağılımı sağladığı belirlenmiştir. Montaj açısının da ısı borusunun termal direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve özellikle evaporatörün kondensere göre daha altta olduğu durumlarda termal direncin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, CAHP'nin ısı transfer performansını ve yapısal tasarımını iyileştirmek için önemli bilgiler sunmaktadır.

Jang ve Ahn (2024) çalışmalarında test açısı ( $\theta$ )  $0^\circ$  (dikey)'den  $90^\circ$ 'ye (yatay) arttıkça ısı taşınım kapasitesinde bir artış olduğunu göstermiştir. Bu artış, yerçekimi kuvvetinin sağladığı gelişmiş termal dağılımın yanı sıra, daha geniş soğutma ve ısıtma yüzeylerine sahip olmanın getirdiği artan ısı taşınım yüzey alanına bağlamıştır. Ayrıca, test açısı  $90^\circ$ 'ye ulaştığında, kılcal kuvvet ve yer çekimi arasında hizalanma gerçekleştiğini ve bu da sıvı çalışma akışkanının artan hareketini sağladığını belirtmiştir. Ancak, test açısı  $0^\circ$ 'ye (dikey) yaklaştıkça, kılcal kuvvet ve yer çekiminin göreceli hizalanmasının azaldığını ve bu da çalışma akışkanının evaporatöre geri dönme hızında bir azalmaya yol açtığını belirtmiştir. Yatay yönlendirme durumunda ise yerçekimi kuvvetinin etkisiz hale geldiğini göstermiştir.

Tüm çalışmaları gösterir tablo Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tüm çalışmalar

| Araştırmacı(lar)              | Yıl  | Çalışma                                                                                          |
|-------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Khandekar vd.                 | 2002 | Farklı akışkanlar ve açılarla ısı borusu performansını incelediler.                              |
| Khandekar, Dollinger ve Groll | 2003 | Farklı iş akışkanları kullanarak 2 mm çaplı kılcal ısı borusunun performansını incelediler.      |
| Kim vd.                       | 2003 | Atımlı kılcal ısı borusunda iki faz akış desenlerini yüksek hızlı kamera ile incelediler.        |
| Charoensawan vd.              | 2003 | Kapalı döngülü atımlı ısı borusunun performansına etki eden parametreleri araştırdılar.          |
| Rittidech vd.                 | 2003 | Boyutsuz parametrelerin ısı taşınım karakteristiğine etkilerini incelediler.                     |
| Zhang                         | 2004 | Evaporatör, adyabatik ve kondenser bölgelerinden oluşan atımlı ısı borusunu inceledi.            |
| Katpradit vd.                 | 2005 | Atımlı ısı borusu için kritik ısı taşınım karakteristiğini araştırdılar.                         |
| Xu vd.                        | 2006 | HFC-134a ve bütan kullanarak atımlı ısı borusunun ısı taşınım karakteristiklerini incelediler.   |
| Borgmayer ve Ma               | 2007 | Farklı iş akışkanları ve eğim açılarıyla düz plakalı atımlı ısı borusunu incelediler.            |
| Rittidech vd.                 | 2007 | Çek valf içeren kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı taşınım karakteristiklerini incelediler. |
| Lin vd.                       | 2009 | Polidimetilsiloksan malzemeli atımlı ısı borusunun performansını araştırdılar.                   |
| Uddin ve Feroz                | 2009 | Minyatür ısı borusu sisteminin ısı taşınım performansını incelediler.                            |
| Lips vd.                      | 2010 | Farklı ısı taşınım rejimlerinin deneysel doğrulamasını yaptılar.                                 |
| Thompson vd.                  | 2011 | Kaydırılmış düzenli kanallara sahip düz-plakalı ısı borusunu incelediler.                        |

Çizelge 2.1. (devam) Tüm çalışmalar

|                      |      |                                                                                                                      |
|----------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Qu vd.               | 2012 | Trapez kesitli silikon malzemeden üretilmiş atımlı mikro ısı borusunu incelediler.                                   |
| Saha vd.             | 2012 | Dört farklı iş akışkanı kullanarak açık döngülü atımlı ısı borusunu incelediler.                                     |
| Jahan vd.            | 2013 | Kapalı döngülü atımlı ısı borusunun farklı eğim açıları ve iş akışkanları ile performansını incelediler.             |
| Wong ve Chen         | 2013 | U tipi oluklu fitil içeren düz-plakalı ısı borusunda iş akışkanlarının buharlaşma karakteristiklerini incelediler.   |
| Cui vd.              | 2014 | Kapalı döngülü atımlı ısı borusunda dört farklı iş akışkanı ile çalışma karakteristiğini incelediler.                |
| Han vd.              | 2014 | Kapalı döngülü ısı borusunda farklı iş akışkanlarının salınım karakteristikleri ve performansını incelediler.        |
| Pachghar ve Mahalle  | 2014 | Farklı iş akışkanları kullanarak kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısıl performansını incelediler.                 |
| Tseng vd.            | 2014 | Üniform ve üniform olmayan boru çaplarına sahip kapalı döngülü atımlı ısı borusunu incelediler.                      |
| Rahman vd.           | 2015 | Açık döngülü atımlı ısı borusunun performansını farklı iş akışkanları ve eğim açılarında incelediler.                |
| Wang                 | 2015 | Atımlı ısı borusunun çalışma karakteristiğini daha iyi anlamak için deneysel çalışma yaptı.                          |
| Yang vd.             | 2015 | Farklı genişlikte mikrokannalar içeren atımlı ısı borusunu incelediler.                                              |
| Rao vd.              | 2016 | Parametrik karakterizasyon için kapalı tek döngülü atımlı ısı borusunu incelediler.                                  |
| Shi vd.              | 2016 | Paralel kanallı kapalı döngülü plakalı atımlı ısı borusunun çalışma karakteristiklerini incelediler.                 |
| Behi vd.             | 2017 | Faz değişim malzemesi destekli ısı borusu sisteminin elektronik soğutmadaki etkilerini incelediler.                  |
| Kammuang-Lue vd.     | 2017 | Dönen ve kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısıl direnci üzerinde iş akışkanları ve iç çapın etkisini incelediler.  |
| Kim vd.              | 2017 | Farklı iş akışkanları kullanarak tek, paralel bağlı ve iki döngülü atımlı ısı borularının performansını incelediler. |
| Pradeep ve Narasimha | 2017 | Kapalı devre atımlı ısı borusunun ısıl performansını deneysel ve boyutsuz sayılar kullanarak incelediler.            |
| Chougule             | 2018 | Farklı akışkanlar ve enerji saklama malzemeleri kullanarak ısı borularının performansını inceledi.                   |
| Hao vd.              | 2019 | Politetrafloroetilen malzemeden yapılmış kapalı döngülü ısı borusunda farklı iş akışkanlarını incelediler.           |
| Liou vd.             | 2019 | Dönme hareketi yapan atımlı ısı borusunun performansını incelediler.                                                 |
| Wang vd.             | 2019 | Düz plakalı mikro ısı borusunun performansını farklı dolum oranları, eğim açıları ve iş akışkanları ile incelediler. |
| Zhao                 | 2021 | Termal yönetim stratejilerini geliştirmek için düz plakalı ısı borusu ve spreyci soğutma kombinasyonu inceledi.      |

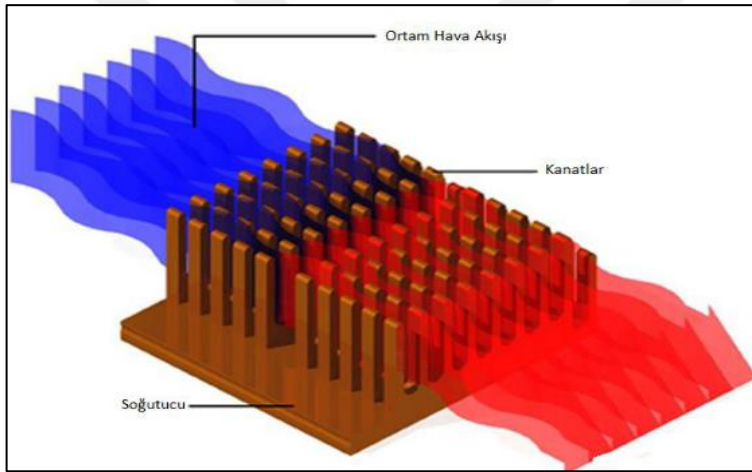
Çizelge 2.1. (devam) Tüm çalışmalar

|                   |      |                                                                                                                     |
|-------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhou              | 2019 | Yüksek ısı akışlı elektronik cihazlar için ultra ince düzleştirilmiş ısı borusunu inceledi.                         |
| Zhao vd.          | 2021 | Düz disk döngülü ısı borusunun elektronik soğutmadaki etkisini incelediler.                                         |
| Siricharoenpanich | 2019 | Kısa ısı borulu soğutma sistemleri ile işlemci soğutma etkilerini araştırdı.                                        |
| Veerasamy         | 2022 | Nano soğutucu akışkanların soğutma sistemlerindeki performansını inceledi.                                          |
| Gibbons vd.       | 2021 | Katlanabilir elektronik cihazlar için ultra ince esnek ısı borusu teknolojilerini inceledi.                         |
| Brahim ve Jemni   | 2021 | Bakır metal köpüklerin düz plakalı ısı borularında fitil malzemesi olarak kullanımını inceledi.                     |
| Wang vd.          | 2022 | Düz kapalı döngü ısı borusunun veri merkezleri için performansını inceledi.                                         |
| Zeghari           | 2019 | Düz gözenekli ısı borusunun TV kutusu elektronik çiplerini soğutmadaki etkinliğini inceledi.                        |
| Xiao              | 2017 | Yüksek güçlü LED'ler için otomatik ısı borulu soğutma cihazı geliştirdi.                                            |
| Krishna           | 2017 | Nano katkılı faz değişim malzemelerinin elektronik soğutma üzerindeki etkilerini inceledi.                          |
| Wang vd.          | 2022 | Veri merkezlerini soğutmak için kullanılan ısı borusu teknolojilerini inceledi.                                     |
| Shi vd.           | 2023 | Titreşimli ısı borusunun farklı eğim açılarında ve soğutma suyu akış hızlarındaki performansını inceledi.           |
| Xu vd.            | 2023 | Sodyum çalışma akışkanlı ve metal fiber keçeli yüksek sıcaklık düz ısı borusunun tasarım ve performansını inceledi. |
| Wang ve Wan       | 2023 | Sinterlenmiş paslanmaz çelik fiber fitilli ısı borusunun ısı transfer performansını karşılaştırdı.                  |
| Mishkhas vd.      | 2024 | Oluklu alüminyum-amonyak ısı borusunun farklı eğim açılarında termal davranışını inceledi.                          |
| Sun vd.           | 2024 | Konsantrik halka biçimli ısı borularının fitil yapıları ve montaj açıları üzerindeki etkilerini inceledi.           |
| Jang ve Ahn       | 2024 | Test açısı ve ısı taşınım kapasitesi arasındaki ilişkiyi inceledi.                                                  |

Isı borusu sistemleri, elektronik bileşenlerin soğutulmasında kritik bir rol oynar ve bu alandaki çalışmalar, farklı geometriler, dolum oranları, iş akışkanları ve eğim açıları gibi parametrelerin ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Düz-plakalı, kılcal borulu, kapalı döngülü ve titreşimli ısı borularında akışkan türlerinin ve dolum oranlarının etkileri incelenmiş; akış desenleri analiz edilmiştir. Kapalı döngülü ve titreşimli ısı borularının performans parametreleri araştırılmış, farklı iş akışkanlarının ısı performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalar genel olarak su, etanol, R-123, FC-72, R-134a, metanol, bütan, asetat, deiyonize su, amonyak ve nanoakışkanlar gibi iş akışkanlarının dolum oranları ve eğim açılarıyla birlikte ısı transfer performansını belirlemede etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle suyun yüksek ısı kapasitesi ve düşük ısı direnç sağlaması nedeniyle tercih edildiği ortaya konulmuştur. Ayrıca, ısı borularının performansını optimize etmek için eğim açısı, dolum oranı ve iş akışkanı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Isı borusu teknolojisi, elektronik soğutma uygulamalarında etkin bir çözüm sunmakta olup, bu alandaki araştırmalar, sistemlerin daha verimli ve güvenilir çalışmasını sağlamak adına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu derleme, farklı tasarım ve çalışma koşullarının ısı borusu performansı üzerindeki etkilerini anlamada kapsamlı bir bilgi sunmaktadır.

### 3. ELEKTRONİK SOĞUTMA

Bir devredeki her elektronik parça, devre bir güç kaynağı kullanılarak çalıştırıldığında ısı üretir. Tipik olarak, güç transistörleri gibi yüksek güçlü cihazlar ve ışık yayan diyotlar ve yarı iletken lazerler gibi optoelektronikler önemli miktarda ısı üretir. Bu bileşenler, ısı dağıtma kapasiteleri çok daha düşük olduğundan devredeki ısıyı dağıtamazlar. Elektronik bileşenlerin aşırı ısınması, birçok olumsuz sonuca yol açabilen ciddi bir problemdir ve tüm devrenin veya sistemin performansını etkileyerek arızalanmasına sebep olabilir. Bu yüzden, bu sorunları ortadan kaldırmak için ısıyı absorbe eden kanaçıklı yapılar kullanılır. Kanaçıklı yapıda ısı akışı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kanaçıklı yapıda hava akışı (Sunpower Electronics Ltd. UK)

Kanaçıklar (soğutucular), diğer devre bileşenlerinden çevreye ısı veren ve performansları ile güvenilirliklerini artırmak için onları soğutan ve bileşen arızasını önleyen bir elektronik bileşen veya devre cihazıdır. Genel olarak çeşitli şekillerdeki metal bloklardan oluşan soğutucuların ısı performansları, yüzey alanları ve sıvı miktarları artırılarak daha da geliştirilebilir. Doğal konveksiyonda, soğutucuakışkanlar herhangi bir dış destek kullanmaz ve soğutma işlemi, metal iletkenlerin termal difüzyonuyla gerçekleştirilir. Bu tür soğutucular, pasif soğutucular olarak adlandırılır. (Mousavi vd., 2018). Soğutucuların yüzey alanını artırmak termal performans açısından avantaj gibi görünse de metal bloklar çalışma frekansının dalga boyu ile karşılaştırılabilir bir boyuta ulaştığında soğutucular anten görevi görür. Özellikle soğutuculara eklenen dikey ısı taşınım elemanları monopollü anten davranışı sergilediği çeşitli araştırmalarda gösterilmiştir (He ve Hubing 2012).

Soğutucuların devrelerin veya güç elemanlarının yakınına yerleştirilmesi, elektromanyetik parazit (EMI) ve elektromanyetik girişim (EMG) problemlerine yol açabilir. Bu problemler, devrenin optimum çalışmasını bozabilir ve istenmeyen sonuçlara neden olabilir. Böyle bir problem, sadece soğutucuların ısı parametrelerinin incelenmesini değil, aynı zamanda neden olabilecekleri elektromanyetik parazitlerin de incelenmesini ve bu parazitleri ortadan kaldıracak çözümlerin bulunmasını gerektirir.

Soğutucu akışkanlardaki elektromanyetik girişim (EMG) problemlerinin ana nedenleri, güç elektroniğinin yüksek anahtarlama hızlarından kaynaklanan voltaj ve akım değişim oranlarıdır. Soğutuculardan gelen radyasyon, çevredeki elektronik cihazlara müdahale ederek EMG problemlerine neden olabilir. Soğutucuları topraklamak, bu radyasyonu azaltarak EMG'yi önlemeye yardımcı olur. Fakat topraklama işlemi, soğutucu ile toprak arasındaki kaçak kapasitansları da azaltır. Kaçak kapasitanslar, ortak mod akımlarını filtreleyerek EMG'yi azaltmada önemli rol oynar. Kaçak kapasitansların azalması, ortak mod akımlarındaki artışa neden olur ve bu da EMG problemlerini artırır.

Soğutucu konfigürasyonlarının EMG problemlerine etkisi çeşitli çalışmalarda incelenmiştir (Karaman, Kocakuşak, Genç ve Helhel, 2019; Doğan ve diğerleri, 2019; Genç, Başyigit ve Doğan, 2020; Başyigit, Genç, Doğan ve Helhel, 2020; Doğan ve diğerleri, 2020; Başyigit, Genç, Doğan, Senel ve Helhel, 2021; Helhel ve diğerleri, 2021; Genç ve diğerleri, 2021a-b). Soğutucu geometrisi dışında soğutuculardan kaynaklanan EMG problemlerini azaltmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. İletken EMG indirgemesi için soğutucu topraklama önde gelen çözüm olsa da istenen EMG indirgemesini elde etmek için topraklama noktaları uygun şekilde seçilmelidir. RF soğurucu, soğutucu ve devreden yayılan EMG sinyallerini emerek ısıya dönüştürür ve bu sayede sistemin EMC uyumluluğunu ve genel gürültü seviyesini optimize eder. (Chikando ve diğerleri, 2010; Ahn ve Oh, 2014).

Soğutucular ile ünite arasına bir ısı yalıtkanı takılması sızıntılara neden olur. Çünkü, bu ısı yalıtkanı, kapasitörde bir dielektrik görevi görür. Ortak mod akımı bu kaçak kapasitanslardan akar. Soğutucuyu topraklamak gücü artıracığından, iletilen EMG ortak mod akımları nedeniyle azalacaktır, fakat topraklama, soğutucunun bir anten gibi davranmasına neden olur. Güç elemanları ile soğutucu arasına bir bakır kalkan yerleştirilerek sızıntı kapasitesi en aza indirilebilir ve radyasyon azaltılabilir. Ancak bu ekranlama işlemi maliyetlidir ve hava sirkülasyonunu engelleyerek termal performansı olumsuz etkiler.

Ayrıca haberleşme kablolarında kullanılan manyetik filtreler, yüksek frekanslı emisyonların azaltılmasına benzer şekilde soğutucularda da kullanılabilir.

### 3.1. Taşınım ile Soğutma

Taşınım ile ısı transferi, bir akışkanın (hava gibi) hareketi yoluyla ısı enerjisinin taşınması işlemidir. Taşınım, doğal ve zorunlu olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Doğal taşınım, sıcak yüzeyler tarafından ısıtılan hava moleküllerinin yoğunluklarının azalması sonucu yukarı doğru hareket etmesi ve yerini daha soğuk hava moleküllerinin almasıyla oluşur. Zorunlu taşınım ise, bir fan veya üfleyici gibi mekanik bir cihaz tarafından hava akışının sağlanmasıyla gerçekleşir.

Soğuk havanın sıcak bir yüzeyi soğutma prensibine dayanan hava soğutma yöntemi, küçük cihazlardan büyük sistemlere kadar geniş bir uygulama alanına sahip olup, basitliği ve etkili termal kontrol sağlama yeteneği ile öne çıkmaktadır. Hava soğutmanın en büyük avantajı, sürekli olarak mevcut olması ve uygulanmasının kolay olmasıdır. 1964 yılından önce, tüm IBM bilgisayarlarında zorunlu hava soğutma yöntemi kullanılmıştır. Düşük güçlü elektronik cihazlarda ısınım ve doğal taşınım yöntemleri tercih edilirken, yüksek güçlü cihazlarda ise fanlar ve üfleyiciler kullanılmaktadır.

Taşınım ile soğutmalı sistemlerin termal analizi, kütle korunumu, momentum korunumu ve enerji korunumu denklemleri kullanılarak yapılmaktadır.

Kanatlar arasındaki hava akışı sırasında oluşan basınç kaybı, fan seçimi için önemli bir faktördür. Bu basınç kaybını hesaplamak için Simons (2003) tarafından sunulan denklem (3.1) kullanılabilir:

$$\Delta P = (K_c + 4f_{app} \frac{L}{D_h} + K_e) \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $L$  kanatların uzunluğunu,  $D_h$  akış kanalının hidrolik çapını,  $f_{app}$  görünür sürtünme faktörünü,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $v$  kanatlar arasındaki ortalama hava akış hızını temsil eder. Ayrıca denklem (3.2) ve (3.3)'te yer alan  $K_c$  ve  $K_e$ , sırasıyla ani daralmadan kaynaklanan basınç kaybı katsayısını ve kanatçıklar arasındaki içeri ve dışarı akışın genişleme katsayısını ifade eder:

$$K_c = 0,42x(1 - \sigma^2) \quad (3.2)$$

$$K_e = (1 - \sigma^2)^2 \quad (3.3)$$

$\sigma$ , akış kanal alanlarının soğutucuya yaklaşan akışa oranı olarak tanımlanır ve denklem (3.4)'teki gibi formüle edilir:

$$\sigma^2 = 1 - \frac{N_{fin} t_f}{w} \quad (3.4)$$

$N_{fin}$  kanat sayısını,  $t_f$  ise kanat kalınlığını temsil eder.  $w$  ise kullanılan kanatların toplam genişliğini ifade eder. Bu parametreler, gelişmekte olan laminar akışta görülen sürtünme faktörü  $f_{app}$  ile tamamen gelişmiş akışta görülen sürtünme faktörü ( $f$ ) ile ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Daha basit ifadeyle, bu denklem, kanat sayısı, kalınlığı ve genişliği gibi faktörlerin, akışkanın kanatlar üzerinde yarattığı sürtünmeyi nasıl etkilediğini gösterir ve denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanır:

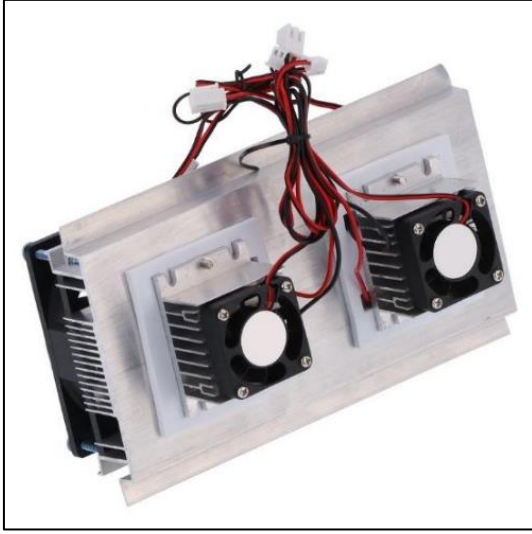
$$f_{app} = \frac{[(\frac{3,44}{\sqrt{L'}})^2 + (fRe)^2]^{1/2}}{Re} \quad (3.5)$$

$$L' = \frac{\frac{L}{D_h}}{Re} \quad (3.6)$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (3.7)$$

$$f = \frac{24 - 32,527\lambda + 46,721\lambda^2 - 40,829\lambda^3 + 22,954\lambda^4 - 6,089\lambda^5}{Re} \quad (3.8)$$

Hava soğutuculu bir devre elemanında  $Re$  Reynolds sayısı,  $\lambda$  hava akış kanallarının en-boy oranı ve  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesidir. Resim 3.1'de hava soğutuculu sistem gösterilmiştir.



Resim 3.1. Hava soğutuculu sistem (Simons, 2003)

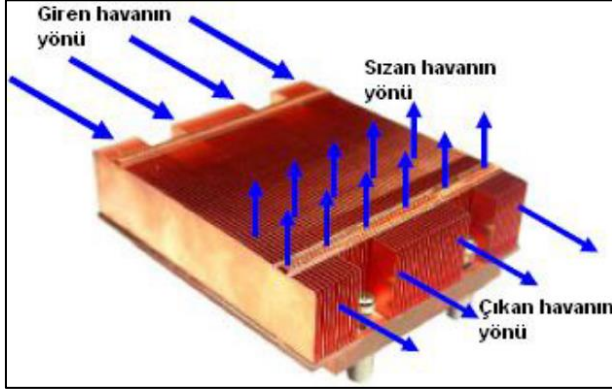
### 3.1.1. Doğal taşınım

Doğal taşınım, bir akışkanın (sıvı veya gaz) ısı etkisiyle kendi kendine yer değiştirmesi sonucu ısının taşınmasıdır ve bu süreç dışarıdan mekanik bir kuvvet uygulanmadan, sadece sıcaklık farklarından kaynaklanan yoğunluk değişiklikleri ile gerçekleşir. Sıcak bir yüzeyle temas eden akışkan ısındıkça yoğunluğu azalır ve yükselir; bu sırada soğuk ve daha yoğun akışkan, yükselen sıcak akışkanın yerini alır. Bu sürekli döngü, ısının sıcak yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Basit ve enerji gereksinimi düşük olan doğal taşınım, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır ve ısı taşınımı, yoğunluk değişimi, yükselme ve yer değiştirme gibi temel mekanizmalarla gerçekleşir. Sıcak elektronik bileşenler, etrafındaki havayı ısıtır ve bu ısınan hava yükselirken yerine soğuk hava gelir, böylece bir döngü oluşur. Bu yöntem, enerji gereksinimi düşük olduğu için sıkça tercih edilir ve etkili soğutma sağlar (Incropera ve De Witt, 2000).

### 3.1.2. Zorlanmış taşınım

Doğal taşınımın yeterli olmadığı durumlarda, fan, pompa veya hava jeti gibi dış güçlerle zorlanmış taşınım kullanılır. Yüksek güçlü elektronik cihazların soğutulmasında fanlar yaygın olarak kullanılır (Cai ve diğerleri, 1994). Basit fanlardan ( $1 \text{ W/cm}^2$  soğutma kapasitesi) özel tasarım fanlara ( $50 \text{ W/cm}^2$  soğutma kapasitesi) kadar çeşitli seçenekler mevcuttur. Bu sistemlerin tasarımında, üst statik basınç ve gerekli hava akışı önemli

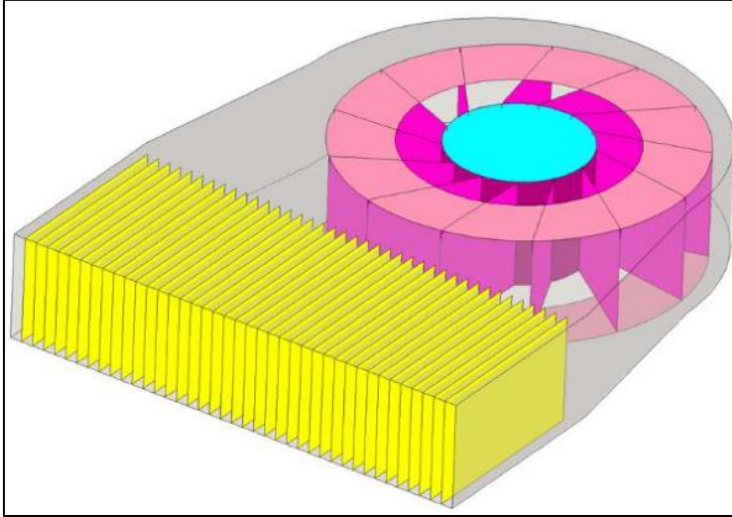
parametrelerdir (Lasance ve Simons, 2005). Zorlanmış ısı taşınımı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Zorlanmış ısı taşınımı (Lasance ve Simons, 2005).

### 3.1.3. Aktif ısı kuyusu

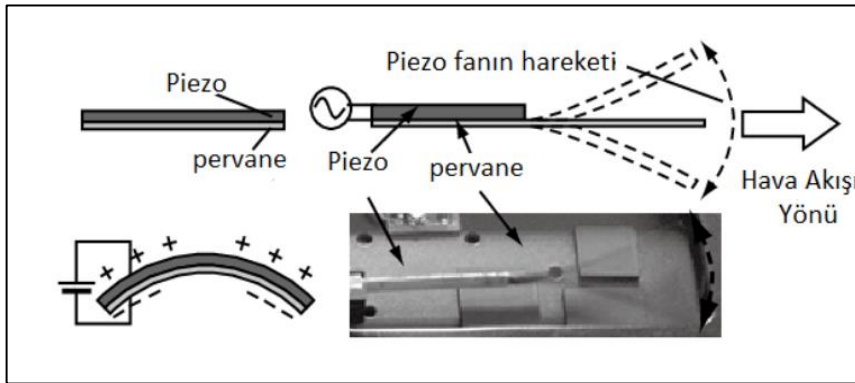
Isıyı bir kaynaktan alarak başka bir ortama aktaran ve genellikle elektronik cihazlarda kullanılan bir soğutma yöntemidir (Mjallal ve diğerleri, 2018). Bu sistem, yüksek ısı yoğunluklarının verimli bir şekilde uzaklaştırılması için kullanılır ve konveksiyon, iletim veya radyasyon yoluyla ısı taşınımını optimize eder. Temel olarak ısı, sıcak yüzeyden alınır ve yüksek ısı iletkenliğine sahip malzemeler (bakır, alüminyum) aracılığıyla taşınarak bir ısı değiştiriciye (kanatçıklar, soğutma levhaları, sıvı soğutma devreleri) iletilir. Bu süreçte fan veya pompa gibi cihazlar kullanılarak ısının ortamdan uzaklaştırılması sağlanır. Aktif ısı kuyusu, yüksek performanslı elektronik cihazlar, bilgisayarlar, sunucular, telekomünikasyon ekipmanları, endüstriyel kontrol sistemleri, otomotiv elektroniği ve havacılık teknolojisi gibi yoğun ısı üreten sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Yüksek verimlilik ve güvenilir soğutma sağladığı için bu tür uygulamalarda tercih edilmektedir. Fanlı aktif ısı kuyusu Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Fanlı aktif ısı kuyusu (Mjallal ve diğerleri, 2018).

#### 3.1.4. Piezoelektrik fanları

Piezo etkisi, bazı malzemelerin mekanik basınç altında elektrik üretme yeteneğini tanımlar. Bu etki, elektronik cihazlarda sensör ve aktüatör olarak kullanılan piezoelektrik malzemelerde yaygın olarak kullanılır. (Sauciuc, 2007). Piezoelektrik fanlar, piezoelektrik malzemelerin mekanik titreşimlerini kullanarak hava akışı oluşturan ve soğutma uygulamalarında kullanılan cihazlardır. Bu fanlar, bir elektrik alanının uygulanmasıyla piezoelektrik malzemenin bükülmesi ve titremesi prensibiyle çalışır. Geleneksel fanlardan farklı olarak, piezoelektrik fanlar, daha düşük güç tüketimi ve sessiz çalışma gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, özellikle elektronik cihazların soğutulmasında ve kompakt soğutma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilirler. Piezoelektrik fanlar Şekil 3.4'te gösterilmiştir. (Lasance ve Simons, 2005).



Şekil 3.4. Piezoelektrik fanlar (Lasance ve Simons, 2005)

### 3.1.5. Plazma teknolojisi ile soğutma

Plazma teknolojisi ile soğutma sistemi, nano ölçekli elektriksel deşarjları kullanarak ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan yenilikçi bir soğutma teknolojisidir. Bu sistem, yüksek elektrik alanları kullanarak nano yapıları malzemeler üzerinde kontrollü ve lokalize plazma oluşturur. Plazmanın oluşturduğu ani ısı yayılımı ve hızlı enerji taşınımı sayesinde, geleneksel soğutma yöntemlerine göre daha hızlı ve etkili bir soğutma sağlanır. Nano yıldırım soğutma sistemi, özellikle mikroelektronik cihazlar ve yüksek yoğunluklu enerji uygulamaları gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Bu sistemin temel avantajları arasında yüksek ısı aktarım verimliliği, hızlı tepki süresi ve düşük enerji tüketimi bulunmaktadır. Ayrıca, bu teknoloji, yüzeylerin aşırı ısınmasını önleyerek cihazların performansını ve ömrünü artırmada önemli bir rol oynar. Nano yıldırım soğutma sistemleri, gelişmiş malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanındaki ilerlemelerle birlikte, geleceğin yüksek performanslı ve sürdürülebilir soğutma çözümleri arasında yer almaktadır. (Lasance ve Simons, 2005).

### 3.1.6. Jet hava soğutma

Jet hava soğutma tekniği, yüksek hızda hava jetlerinin sıcak yüzeylere yönlendirilerek ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu teknik, nozullar aracılığıyla yüksek hızda (10-100 m/s) hava akışının yüzeye çarpmasıyla termal sınır tabakasını kırar ve ısı taşınım katsayısını artırır. Mikroelektronik cihazlar ve yüksek güç yoğunluklu bileşenler için ideal olan jet hava soğutma, termal yönetimde üstün performans sunar. Kompakt ve modüler yapısıyla farklı cihazlara uyum sağlar ve değişken çevre koşullarında stabil soğutma performansı gösterir. Yüksek verimlilik, esneklik ve uyarlanabilirlik sunarak modern termal yönetim uygulamalarında önemli bir rol oynar. (Walko, 2006).

## 3.2. Sıvı Soğutma

Sıvı soğutma, bir ısı kaynağından ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması amacıyla sıvı bir soğutucu kullanılarak gerçekleştirilen bir soğutma yöntemidir. Bu yöntem, yüksek ısı akılarına sahip elektronik bileşenler ve endüstriyel uygulamalar için yaygın olarak kullanılır. Sıvı soğutma sistemleri, genellikle bir pompa, ısı değiştirici, sıvı kanalları ve soğutucu sıvıdan oluşur. Bu sistemlerde soğutucu sıvı, bir ısı kaynağından (örneğin, bir işlemciden)

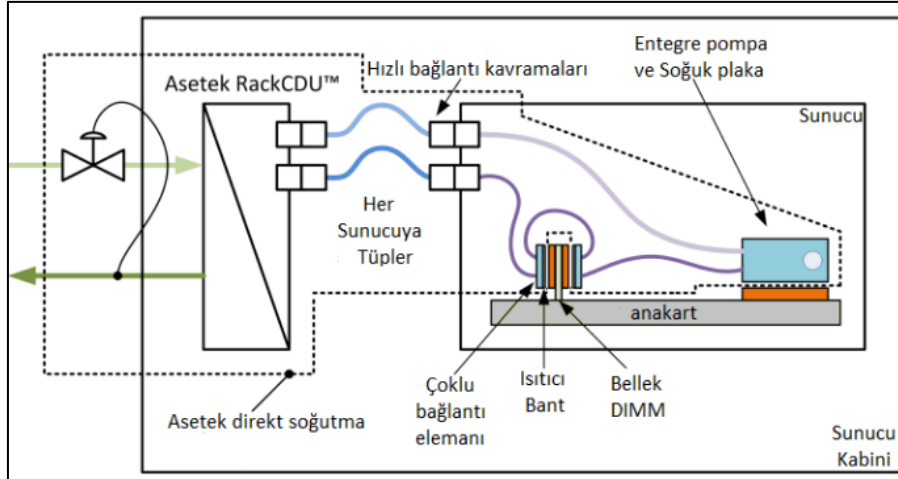
ısıyı alır, daha sonra bu ısıyı bir ısı değıştirci aracılığıyla çevreye veya başka bir ortama transfer eder.

Sıvı ile soğutmanın temel prensibi, ısının sıvı ile taşınması ve ardından sıvının ısı değıştircide soğutulmasıdır. Soğutma sıvısı, genellikle su, alkol, glikol veya özel formüle edilmiş sıvılar gibi yüksek ısı taşıma kapasitesine sahip maddelerden seçilir. Su, yüksek ısı kapasitesi ve düşük viskozitesi nedeniyle en yaygın kullanılan soğutucu sıvılardan biridir, ancak elektrik iletkenliği nedeniyle dikkatli kullanılmalıdır. Bu nedenle, suyun yerine dielektrik sıvılar da kullanılabilir.

Sıvı soğutma, havayla soğutma yöntemlerine göre daha yüksek verimlilik sağlar çünkü sıvılar, havaya göre daha yüksek ısı taşıma kapasitelerine sahiptir ve ısının hızlı ve etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına olanak tanır. Bu yöntem, özellikle yüksek güç yoğunluğuna sahip bileşenlerin soğutulmasında kullanılır ve 100 W/cm<sup>2</sup>'ye kadar olan ısı akılarını yönetebilir.

Sıvı soğutma sistemleri, doğrudan ve dolaylı soğutma olarak iki ana kategoriye ayrılır. Doğrudan sıvı soğutmada, soğutucu sıvı doğrudan ısı kaynağı ile temas ederken, dolaylı sıvı soğutmada ısı, iletken bir malzeme aracılığıyla soğutucu sıvıya aktarılır. Spreyleme soğutma ve jet püskürtmeli soğutma gibi gelişmiş teknikler, sıvı soğutma sistemlerinin verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Bu teknikler, sıvının ince damlacıklar halinde püskürtülmesi veya yüksek hızda sıvı jetlerinin kullanılması ile ısı taşınımını artırır.

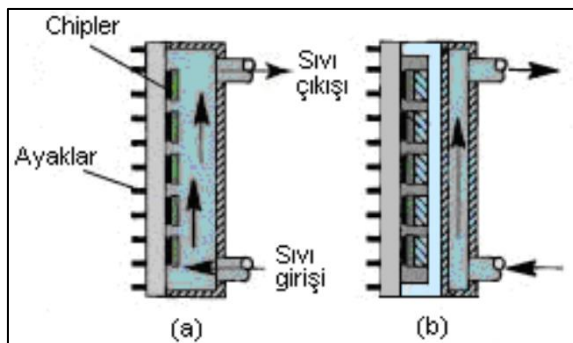
Genel olarak, sıvı ile soğutma, yüksek verimlilik, düşük termal direnç ve geniş uygulama yelpazesi sunarak, özellikle yüksek performanslı ve yoğun ısınan sistemlerin soğutulmasında kritik bir rol oynar (Lasance ve Simons, 2005). Elektronik soğutmada ısı taşınımını sağlamak için kullanılan sıvı soğutma teknikleri Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Bu teknikler arasında doğrudan (direkt) sıvı soğutma, dolaylı (endirekt) sıvı soğutma, spreyleme soğutma ve jet püskürtmeli soğutma yer almaktadır.



Şekil 3.5. Sıvı soğutmalı sistem (Lasance ve Simons, 2005).

### 3.2.1. Doğrudan ve dolaylı sıvı soğutma

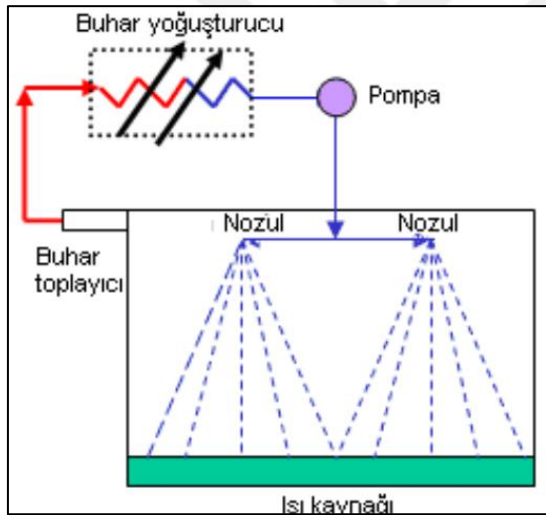
Doğrudan sıvı soğutma, ısı kaynağının direkt bir soğutucu sıvı ile temas ettiği bir yöntemdir ve yüksek ısı akısına sahip mikroelektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu sistemde, soğutucu sıvı doğrudan elektronik bileşenlerin üzerine akıtılır veya daldırılır, böylece ısı hızla uzaklaştırılır ve yüksek verimlilik sağlanır. Endirekt sıvı soğutma ise, ısı kaynağının soğutucu sıvı ile doğrudan temas etmediği, bunun yerine arada yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzemenin bulunduğu bir sistemdir. Bu malzeme, ısıyı elektronik bileşenlerden alır ve soğutucu sıvıya ileterek ısıyı dağıtır. Endirekt soğutma, sıvının elektronik bileşenlerle doğrudan temas etmesi riskini ortadan kaldırarak güvenliği artırır ve sıvı sızıntısı durumunda bileşenlerin zarar görme olasılığını azaltır. Her iki yöntem de yüksek performanslı soğutma sağlar, ancak direkt soğutma daha yüksek verimlilik sunarken, endirekt soğutma daha fazla güvenlik ve koruma sağlar. Şekil 3.6’da doğrudan ve dolaylı sıvı soğutma gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Doğrudan ve Dolaylı sıvı soğutma (Ells Worth ve Simons, 2005).

### 3.2.2. Sprey soğutucu

Sprey soğutucu, ısı yayan yüzeylere ince damlacıklar halinde soğutucu sıvı püskürtterek ısı taşınımını artıran bir soğutma yöntemidir. Bu teknikte, yüksek basınçlı nozullar veya püskürtme sistemleri kullanılarak soğutucu sıvı, yüzeye homojen bir şekilde dağıtılır. Sıvı damlacıkları yüzeyde buharlaşırken, buharlaşma sırasında yüksek miktarda ısı emer ve yüzeyin etkin bir şekilde soğutulmasını sağlar. Sprey soğutma, elektronik bileşenler, güç yoğunluklu cihazlar ve yüksek ısı akısına sahip uygulamalarda kullanılır. Bu yöntem, yüksek ısı taşınım katsayısı ve düşük termal direnç ile öne çıkar, böylece küçük yüzey alanlarında bile etkin soğutma sağlar. Ayrıca, sprej soğutma, yüzey sıcaklıklarının homojen bir şekilde kontrol edilmesine ve aşırı ısınmanın önlenmesine yardımcı olur. Şekil 3.7’de sprej soğutucu çalışma prensibi gösterilmiştir.

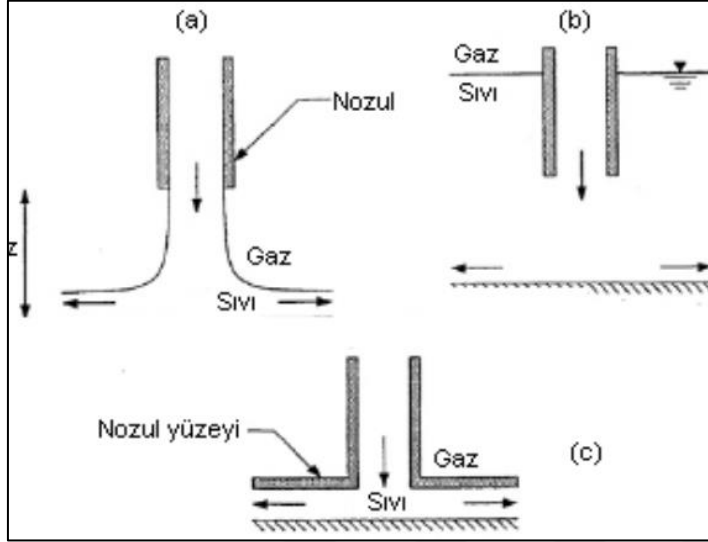


Şekil 3.7. Sprey soğutucu (Ells Worth ve Simons, 2005).

### 3.2.3. Jet püskürtmeli soğutma

Yüksek hızda sıvı jetlerinin sıcak yüzeylere yönlendirilerek ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan bir soğutma yöntemidir. Bu teknik, bir veya daha fazla yüksek hızlı sıvı jetinin nozullar aracılığıyla hedef yüzeye püskürtülmesiyle çalışır. Sıvı jetleri, yüzeydeki termal sınır tabakasını kırarak ısı taşınım katsayısını artırır ve böylece ısının hızla uzaklaştırılmasını sağlar. Jet püskürtmeli soğutma, özellikle yüksek ısı yoğunluklu elektronik bileşenler ve güç cihazları için uygundur. Bu yöntemin avantajları arasında yüksek ısı taşınım verimliliği, hızlı tepki süresi ve yüzey sıcaklıklarının homojen bir şekilde

kontrol edilmesi bulunur. Ayrıca, jet püskürtmeli soğutma, kompakt ve esnek yapısı sayesinde çeşitli uygulamalarda kullanılabilir ve soğutma performansını optimize etmek için farklı jet konfigürasyonlarıyla uyarlanabilir. Şekil 3.8’de farklı jet püskürtme biçimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı jet püskürtme biçimleri (Ells Worth ve Simons, 2005).

#### Etki püskürtme jetleri

Yüksek hızda sıvı jetlerinin doğrudan bir yüzeye çarparak ısı taşınımını artıran bir soğutma yöntemidir. Bu teknikte, nozullar aracılığıyla yüksek hızda püskürtülen sıvı jetleri, yüzeye çarptığında termal sınır tabakasını inceltirerek veya tamamen ortadan kaldırarak etkin bir ısı taşınımı sağlar. Bu çarpma sonucu, sıvının kinetik enerjisi, ısıyı yüzeyden hızla uzaklaştıracak şekilde termal enerjiye dönüşür. Etki püskürtme jetleri, özellikle yüksek ısı yoğunluğuna sahip yüzeylerde, küçük alanlarda yüksek verimli soğutma gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemin avantajları arasında yüksek yerel ısı transfer katsayısı, yüzey sıcaklığının etkin kontrolü ve düşük termal direnç bulunmaktadır. Etki püskürtme jetleri, mikroelektronik, güç elektroniği ve endüstriyel soğutma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilir.

#### Çapraz akış etki püskürtme

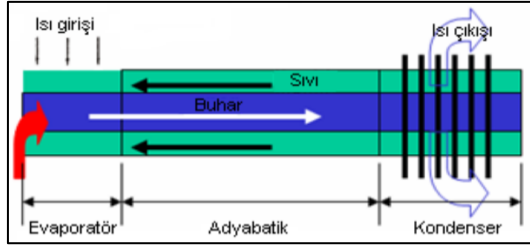
Çapraz akış etki püskürtme jetleri, yüksek hızda püskürtülen sıvı jetlerinin bir yüzeye çarpması ve ardından bu yüzeyden çapraz bir akış oluşturması yoluyla ısı taşınımını artıran

bir soğutma yöntemidir. Bu teknikte, birden fazla jet, farklı açılardan veya yönlerden yüzeye püskürtülür ve bu jetler, çarpma noktasında birleşerek kompleks bir akış modeli oluşturur. Çapraz akış, yüzeydeki termal sınır tabakasını etkin bir şekilde kırar veya inceltir, böylece ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırır. Bu yöntem, yüzeyde homojen bir soğutma sağlar ve aşırı ısınmayı önler. Çapraz akış etki püskürtme jetleri, yüksek ısı yoğunluğuna sahip elektronik bileşenler, güç modülleri ve endüstriyel soğutma uygulamaları için idealdir. Bu sistem, jetlerin yönü ve hızının optimize edilmesiyle farklı yüzeylerde yüksek performanslı soğutma sağlayabilir (Şahin, 2008).

### 3.3. Isı Borusu

Isı boruları, vakumlu kapalı bir sistem olarak çalışan ve genellikle tüp formunda tasarlanan, ancak çeşitli geometrik şekillerde de bulunabilen etkili ısı taşınım cihazlarıdır. Bu borular, iki fazlı ısı taşınım prensibine dayanır ve içlerindeki çalışma sıvısı ile dolu vakumlu bir ortamda faaliyet gösterirler. Isı borusu üç ana bölümden oluşur: evaporatör bölgesi, adyabatik bölge ve kondenser bölgesi. Isı, evaporatör bölgesinde sıvının buharlaşmasına neden olur ve bu buhar adyabatik bölgeden geçerek kondenser bölgesine ulaşır. Kondenser bölgesinde, düşük sıcaklıkta buhar yoğunlaşarak sıvıya dönüşür ve bu sıvı, kılcal kuvvetler, yerçekimi ve diğer fiziksel kuvvetler aracılığıyla yeniden evaporatöre geri döner, böylece sürekli bir ısı taşınım döngüsü oluşturur. Isı boruları geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir; örneğin, kriyojenik uygulamalarda titanyum alaşımlı nitrojen ısı boruları  $-243^{\circ}\text{C}$ 'nin altında kullanılırken, yüksek sıcaklık uygulamalarında tungsten/gümüş ısı boruları  $2000^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar dayanabilir. Elektronik soğutma uygulamalarında yaygın olarak bakır/su ısı boruları  $125-150^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında tercih edilirken,  $0^{\circ}\text{C}$  altındaki soğutma için bakır ve metanol ısı boruları kullanılır. Bu sistemler, buharlaşma ve yoğunlaşma süreçleriyle büyük miktarda ısı taşınım eder ve buhar odaları, döngü ısı boruları ve termosifonlar gibi çeşitli termal yönetim cihazlarının temel çalışma prensiplerini oluşturur (Lasance ve Simons, 2005).

Şekil 3.9'da Isı borusu çalışma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Isı borusu çalışma prensibi (Lasance ve Simons, 2005).

### 3.4. Termoelektrik Soğutma

Termoelektrik soğutma, Peltier etkisi prensibine dayanarak çalışan bir soğutma yöntemidir. Peltier etkisi, farklı iki metalden meydana gelen bir devreden doğru akım geçirildiğinde sıcaklık farklarının meydana gelmesini ifade eder. Termoelektrik soğutucular, yarı iletken metal çiftlerinden oluşan modüllerden doğru akım geçmesiyle çalışır. Modüllerde, X tipi ve Y tipi yarı iletkenler elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanır. Doğru akım X tipi yarı iletken Y tipi yarı iletkenine geçtiğinde, yüksek enerji seviyesine ulaşan akım, çevreden ısı çekerek soğutma sağlar. Bu soğutucular, birim yüzey alanına 3 ila 6 W/cm<sup>2</sup>'ye arasında ısı aktarabilir. Termoelektrik soğutucular, hassas sıcaklık kontrolü, sessiz çalışma, güvenilirlik ve kompakt boyutları ile optik elektronik cihazlar, gece görüş cihazları, yarı iletken lazerler ve düşük sıcaklık gerektiren dedektörler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Termoelektrik soğutma, bu avantajları sayesinde modern elektronik sistemlerde verimli bir soğutma çözümü sunar (Riffat ve Ma, 2003).

Sırasıyla termoelektrik ısıtma ile chiller soğutma kapasiteleri denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak hesaplanabilir:

$$Q_h = S_m I T_h + \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m (T_h - T_c) \quad (3.9)$$

$$Q_c = S_m I T_c + \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m (T_h - T_c) \quad (3.10)$$

Termoelektrik soğutma (TEC) modülünden geçen akım miktarını gösterir. Denklemlerdeki  $T_h$  ve  $T_c$  değerleri deneysel olarak ölçülebilir.  $S_m$ ,  $R_m$  ve  $K_m$  sırasıyla TEC modülünün Seebeck katsayısı, elektrik direnci ve termal iletkenliğini ifade eder.

TEC modülünün ısı taşınımını ve performansını etkileyen temel özellikler, üretici tarafından sağlanan bilgiler kullanılarak denklem (3.11), (3.12) ve (3.13) aracılığıyla hesaplanabilir:

$$S_m = \frac{V_{tmax}}{T_{h0}} \quad (3.11)$$

$$R_m = \frac{(T_{h0} - \Delta T_{max}) V_{tmax}}{T_{h0} I_{tmax}} \quad (3.12)$$

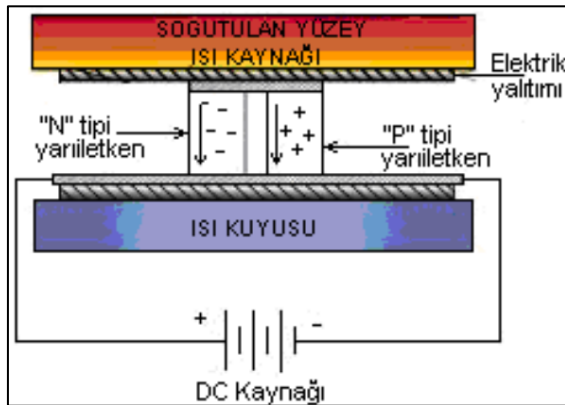
$$K_m = \frac{(T_{h0} - \Delta T_{max}) V_{tmax} I_{tmax}}{2 T_{h0} I_{tmax}} \quad (3.13)$$

Cihazın iki tarafındaki termal dirençler, sıcak tarafın termal direnci toplamını ( $R_{h, toplam}$ ) ve soğuk tarafın termal direnci toplamını ( $R_{c, toplam}$ ) içeren termal direnç modulünde sadeleştirilmiştir. Termoelektrik modülün ısı taşınımı, sabit bir durumda tek bir boyutta ilerleyen ve değişmeyen bir ilişki ile temsil edilebilir. TEC modülü, soğuk plakayı ısı emiciden ayıran bir arakatman görevi görür. Denklem (3.14)'te görüldüğü gibi cihazın ısıtma gücü, ortam sıcaklığı ile cihazın soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır:

$$R_{h, toplam} = \frac{(T_h - T_a)}{Q_h} \quad (3.14)$$

COP, termoelektrik soğutma cihazlarının performansını değerlendirmede kritik bir ölçüttür. Bu indeks, cihazın toplam soğutma kapasitesinin toplam enerji tüketimine olan oranını ifade eder.

Şekil 3.10'da termoelektrik soğutma gösterilmiştir.

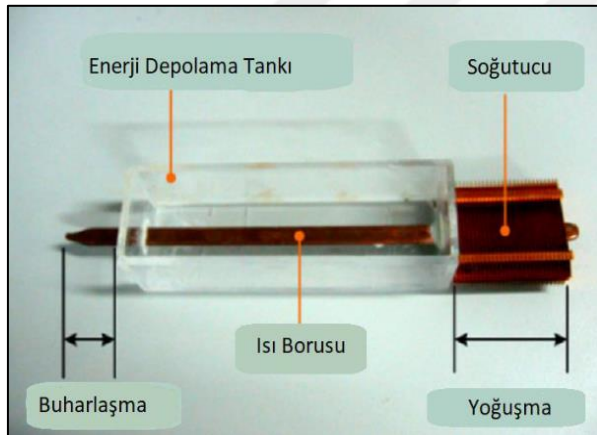


Şekil 3.10. Termoelektrik soğutma (Riffat ve Ma, 2003).

### 3.5. Faz Değişim Malzemesi Esaslı Soğutma

Faz değişim malzemesi (FDM) esaslı soğutma, yüksek performanslı mikroişlemciler ve soğutucular arasında ısı yönetimini optimize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu

malzemeler oda sıcaklığında katı halde bulunur ve ısındıkça termal yapıştırıcı veya gres kıvamına gelir. Isındığında, viskozitesi hızla azalır ve malzeme hava boşluklarına akar. Bu durumda, iki yüzeyin tam olarak temas etmesi için yaklaşık 0,1 bar basınç gereklidir ve en az üç temas noktası oluşana kadar devam eder. En yaygın kullanılan faz değişim malzemeleri arasında n-ekiyosen ve trikozen bulunmaktadır. Ayrıca, kanatlı ve kanatsız yüzeylere sahip n-eikozon malzemesi, cihaz yönetiminden ve güç seviyesinin ısı performansını açısından büyük verimlilik göstermiştir. Gelişen teknolojilerle birlikte, özellikle akıllı telefonlar ve tabletler gibi cihazların soğutulmasında FDM'lerin kullanımı artmıştır. Parafin gibi bazı FDM'ler düşük gecikme sürelerine sahiptir, ancak etkin kullanımları için gerekli boşluklar, cihazların daha ince ve kompakt hale getirilmesine yönelik çalışmaları sınırlayabilir. Bu nedenle, FDM'lerin kullanımı ve optimizasyonu, termal mühendisler ve uzman termal danışmanlar tarafından dikkatle değerlendirilmelidir. Bu malzemeler, gelecekte mobil cihazlar için daha yaygın bir soğutma çözümü haline gelebilir (Wang ve diğerleri, 2007; Yin ve diğerleri, 2008). Resim 3.2'de faz değişim malzemesi soğutma sistemi gösterilmiştir.



Resim 3.2. Faz değişim malzemesi soğutma sistemi (Weng, 2011).

### 3.6. Mini ve Mikro Kanallarla Donatılmış Soğutma Sistemi

Mikron boyutlarında değişen ve büyüyen teknoloji ve işlemci bileşenlerinin küçülmesi, daha küçük alanlarda etkili soğutma sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Elektronik devrelerdeki ısıyı uzaklaştırılması ve bileşenlerin düşük sıcaklıklarda tutulması, bu cihazların performansı ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Moore Yasası'na göre, elektronik devrelerdeki transistör sayısının iki yılda bir ikiye katlanması beklenmektedir ve bu durum, termal yönetim ihtiyacını daha da acil hale getirmektedir. Bu nedenle, yenilikçi ve etkin

soğutma çözümlerinin geliştirilmesi zorunludur. Bu nedenle, su gibi iş akışkanlarının kullanıldığı mikro kanallar, yüksek ısı akışlarını yönetmede yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Moore, 1965).

Hidrolik çaplarına göre, mikro kanallar (1-100  $\mu\text{m}$ ), mezo-kanallar (100  $\mu\text{m}$ -1 mm), sıkıştırılmış kanallar (1-6 mm) ve konvansiyonel kanallar (6 mm'den büyük) olarak sınıflandırılır. Daha spesifik bir sınıflamada ise, hidrolik çapı 3 mm'den büyük olanlar konvansiyonel kanallar, 3 mm-200  $\mu\text{m}$  arası mini kanallar, 200  $\mu\text{m}$ -10  $\mu\text{m}$  arası mikro kanallar, 10-0,1  $\mu\text{m}$  arası geçiş nano kanalları ve 0,1  $\mu\text{m}$ 'den küçük olanlar moleküler nano kanallar olarak adlandırılır. Mikro kanallar, gazların seyreltici etkilerini yönetmekte ve duvar kaymasız süreklilik yaklaşımı ile çalışmaktadır. Bu kanallar, özellikle ısı taşınımını artırmak ve termal yönetim sorunlarını çözmek için idealdir. 10  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki boyutlarda, gaz ve basınç etkileri daha belirgin hale gelir ve moleküler akış bölgesi olarak adlandırılan bir geçiş bölgesi oluşur. Mikro ve mini kanallı soğutucular, elektronik cihazların etkin soğutulmasında ve termal yönetiminde kritik bir rol oynar, bu nedenle gelecekte bu teknolojilerin önemi daha da artacaktır.

Soğuk levhalarda ısı taşınım katsayılarını kullanarak, kanal boyutundan bağımsız olarak ısı performansı değerlendirilir. Isı taşınım katsayılarının kanal boyutuyla ilgisi olmadan soğuk levhanın genel performansını gösterdiği söylenebilir. Bu hesaplamalar için denklem (3.15), (3.16) ve (3.17) kullanılabilir. (Dittus ve Boelter, 1930):

$$Nu = 0,023Re^{4/5}Pr^{0.4} \quad \text{eğer } Re > 10000 \quad (3.15)$$

$$Nu = 1,86 \left( \frac{RePr}{\frac{L}{D_h}} \right)^{1/3} \quad (3.16)$$

başka bir ifadeyle,

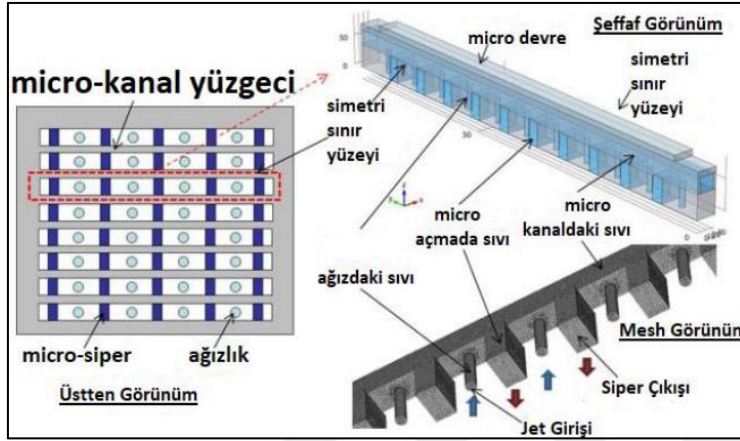
$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3.17)$$

kanallardaki basınç düşüşü şu şekilde hesaplanabilir,

200 $\mu\text{m}$ 'nin üzerindeki kanal çaplarına sahip kanallarda, ister tek fazlı sıvı veya gaz, ister iki fazlı akış olsun, akışın temel özellikleri fazla değişmez. 200 $\mu\text{m}$ 'nin altındaki kanal

çaplarında, üretim tekniklerinin hassasiyeti ve kanalın temizliği kritik önem taşır. Bu boyutlarda, akış özellikleri moleküler etkilerden de etkilenmeye başlar.

Yaklaşık olarak 10 ile 0,1 mikrometre arası kanal çapına sahip nano kanallar, "geçiş nano kanalları" olarak adlandırılır. Şekil 3.11'de mini ve mikro kanallarla donatılmış soğutma sistemi gösterilmiştir.



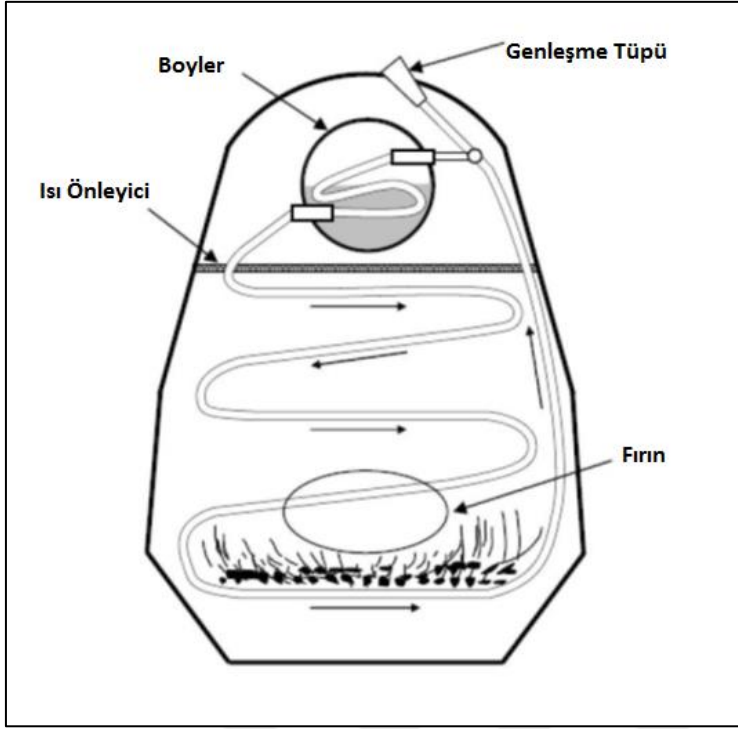
Şekil 3.11. Mini ve mikro kanallarla donatılmış soğutma sistemi

Elektronik bileşenlerin soğutulması için kullanılan çeşitli yöntemler incelenmiştir. Amaç, elektronik cihazların aşırı ısınmasını önlemek, performanslarını artırmak ve güvenilirliklerini sağlamak için etkin soğutma çözümleri sunmaktır. Hedeflenen, yüksek güç yoğunluğuna sahip bileşenlerin ısınısını verimli bir şekilde uzaklaştırmak, elektromanyetik parazit ve elektromanyetik girişim sorunlarını minimize etmek ve cihazların termal yönetimini optimize etmektir. Elde edilen sonuçlar, farklı soğutma yöntemlerinin etkinliğini ortaya koymuştur. Hava ile soğutma yöntemleri, basitliği ve düşük maliyetiyle öne çıkarken, sıvı soğutma teknikleri yüksek ısı akılarına sahip uygulamalarda daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Isı boruları, termoelektrik soğutma ve faz değişim malzemeleri gibi ileri teknolojiler, yüksek performanslı ve güvenilir soğutma çözümleri sunmaktadır. Mini ve mikro kanallarla donatılmış soğutma sistemleri ise, kompakt yapıları ve yüksek ısı transfer kapasiteleri ile özellikle yoğun ısınan sistemlerde etkili olmaktadır.

## 4. ISI BORUSU

### 4.1. Isı Borusunun Tarihsel Gelişim Süreci

İlk orijinal ısı borusuna ait fikir 1944 yılında Gaugler (1944) ve devam eden süreçte 1962 yılında Trefethen tarafından önerilerek ele alınmış olsada ortaya çıkışı 1963 yılında Wyatt (1964) tarafından yapılan patent başvurusu sonucunda gerçekleşmiştir. Ancak George Grove (1964) ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndaki çalışma arkadaşının 1964 yılında aynı konsepti mevcut olan uzay programları ve uygulamaları için yeniden icat ettikleri ana kadar geniş bir çapta düşünülmemiş ve kamuoyuna duyurulmamıştır. Bu, basit ısı iletim cihazına “ısı borusu” adını vererek uygulamalarında gelişime sebep olan kişidir (Zohuri, 2016). Isı boruları ile ilgili yapılan ilk çalışmalar incelendiği zaman ilk uygulama alanlarının uydular olduğu görülür. Bu nedenle ısı borularının içerisinde yer çekimsiz ortamda çalışabilmelerini sağlayan fitil yapıları bulunmaktadır. Isı boruları içerisinde bulunan fitil yapısı yoğunlaşan akışkanı tekrar evaporatöre gönderebilmek için yani buharlaşma ve yoğunlaşma işlemi ile yerçekimine karşı ısıyı taşınım etmek için kılcal bir itici güç sağlamaktadır. Isı borusunun performansı ise kullanılan fitilin ve bu fitilin türü tarafından belirlenir. Ancak birçok uygulama söz konusu bu özellikten bağımsızdır ve bir fitil yapısı içermez. Örneğin ısı borusu halen daha icat edilmeden onlarca yıl önce kurulmuş olan Perkins borusu günümüzde halen kullanılan fitilsiz bir ısı borusudur. Perkins tüpü Perkins ailesi tarafından icat edilmiş ve geliştirilmiştir ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Perkins tüpü, ısıнын bir fırından kazana aktarılması için tek fazlı veya iki fazlı olarak çalışan ve iş akışkanı olarak içerisinde az miktarda su bulunan kapalı bir tüp olarak tasarlanmış bir sistemdir. Bu sistem temel olarak, suyun fırın ile buhar tamburu arasında tüpler içinde (tek fazlı ve yüksek basınçta) sirküle edildiği ve dolaylı bir ısıtma sistemi sağlayan hermetik borulu bir kazandır. Kazan içerisine dolum yapıldığı zaman kazandaki havanın çıkmasına izin vermek için genleşme borusu bir hava tapası ile donatılmıştır. Söz konusu bu sistem ısıнын tüplerin içinde bulunan buharla alevlerden pişirme odasına aktarıldığı pişirme fırınlarında kullanılmıştır. Bununla birlikte ısı boruları üzerine yapılan ilk çalışmalar sırasında NASA tarafından geliştirilen fitilin çıkarıldığı yeni bir ısı borusu türü bir diğer örnek olarak gösterilebilir. Bu dönen ısı borusunda, yoğunlaşan akışkanın kondenserden evaporatöre aktarılması için sartrifüj ivmesi kullanılmıştır ve motorların ile türbin kanadı rotorlarının soğutulması için kullanılabileceği belirtilmiştir (Reay ve diğerleri, 2007).



Şekil 4.1. Temel perkins tüpü (Reay ve diğerleri, 2007)

Isı boruları, çalışma akışkanının sıvıdan buhara ve buhardan sıvıya faz değişim sürecinin, yüksek ve etkili bir termal iletkenliğe sahip evaporatör ve kondenser bölümleri arasında gerçekleştiği iki fazlı akışlı ısı taşınım cihazlarıdır. Aynı zamanda kılcal sirkülasyonlu iki fazlı akışkan aracılığıyla çok yüksek termal enerji iletimi sağlayan, kendi kendine yeten ve iki fazlı bir akış rejimi içinde ısıyı taşınım etmek için bir buharlaşma-yoğuşma cihazı olarak çalışan bir yapı olarak tanımlanır. Isı borularında evaporatör bölümüne eklenen ısı iletim yoluyla kap içerisinde bulunan çalışma akışkanına aktarılır. Bu durum ısı borusunun kılcal yapı yüzeyinde çalışma akışkanının buharlaşmasına neden olur. Böylece evaporatör bölümündeki yerel buhar basıncı artarak buharın kondenser bölümüne doğru akmasına sebep olur. Bu durum gizli buharlaşma ısısının taşınmasını sağlar. Buharlaşma gizli ısı ise ısıyı küçük bir sıcaklık farkına karşılık gelen uzun mesafeler boyunca taşımak için kullanılır. Enerji kondenser bölümünde çekildiğinden dolayı, buhar boşluğu boyunca taşınan buhar ısı borusunun kılcal yapısının yüzeyinde yoğuşur ve gizli ısıyı burada serbest bırakır. Isı boruları içerisinde bulunan çalışma akışkanının kapalı sirkülasyonu, kılcal hareket ve/veya kütle kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Isı boruları geleneksel yöntemlere göre çok daha avantajlıdır. Çünkü kararlı durumda çalıştıklarında çok iyi bir termal iletkenliğe sahip olabilirler. Uygun olan bir çalışma akışkanının seçimi sonucunda ısı boruları geniş bir sıcaklık aralığında çalıştırılabilirler.

Örneğin çalışma akışkanları olarak sıvı metallere sahip olan bir ısı borusu, en iyi katı metalik iletkenlerde, gümüşten veya bakırdan bin hatta on binlerce kat daha iyi bir termal iletkenliğe sahip olabilir. Ancak çalışma akışkanı olarak sıvı metaller seçildiği zaman, çalışma akışkanının olası katı hali ve son derece düşük olan buhar yoğunluğu nedeniyle başlatma zorlukları yaşanabilir. Bununla birlikte bu kullanışlı cihazın bazı çalışma sınırları bulunmaktadır. Bunlar sonik, kılcal, sürüklenme ve kaynama limitidir. (Zohuri, 2016).

#### 4.2. Isı Borusu Teorisi

Isı boruları ile ısı taşınımı işleminin gerçekleştirilmesi, termal yönetim için en hızlı ve en verimli yöntemlerden biridir. Oldukça iletken bir ısı taşınım cihazı olan ısı boruları çok küçük sıcaklık düşüşlerinde verimli ısı taşınımı işlemi için içerisinde bulunan iş akışkanının gizli ısını kullanırlar. 1950'lerin başından beri çok sayıda çalışmanın konusu olmuşlardır ve o günlerden beri önemli derecede araştırma ilgisi çeken umut verici bir teknoloji olmaya devam etmektedir (Zohuri, 2016).

Isı borularının çalışmasını ve ısı borularındaki iki fazlı ısı taşınımı olayının modellenmesini anlayabilmek için kondenser bölümünde meydana gelen yoğunlaşma olayının ve evaporatör bölümünde meydana gelen kaynama olayının arkasındaki fiziği anlamak oldukça önemlidir (Çengel ve Gahjar, 2020).

##### 4.2.1. Havuz kaynama ısı taşınımı

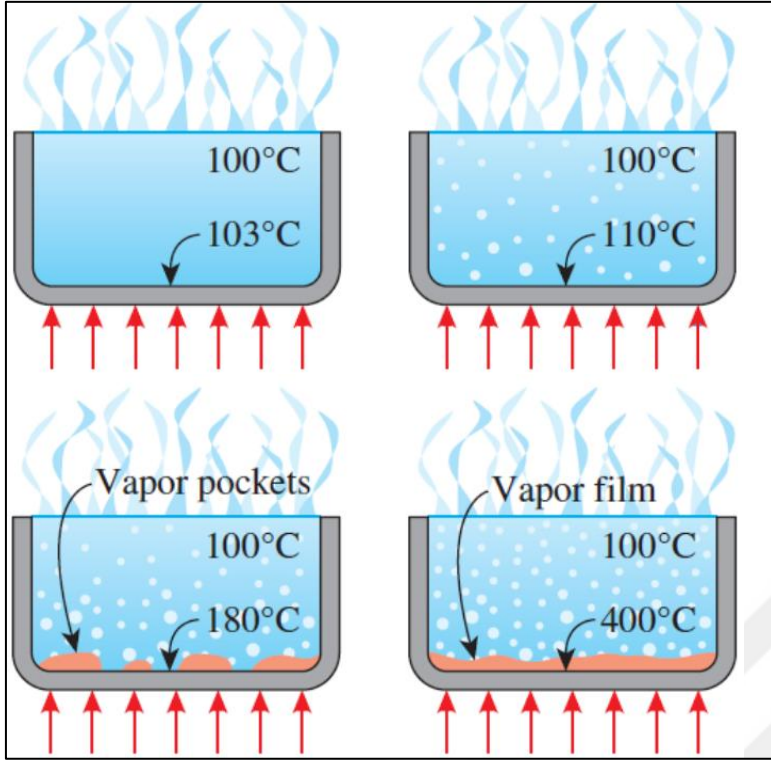
Doymuş havuz kaynaması sıcaklığın aşılma durumuna göre doğal taşınım, çekirdek kaynaması, geçiş rejimi ve buhar film gibi farklı rejimlerde olabilmektedir. Havuz kaynaması olayında havuz içerisinde bulunan çalışma akışkanı pompa gibi bir hareket ettirici alet tarafından akmaya zorlanmaz. Burada akışkanda meydana gelen herhangi bir hareket doğal konveksiyon akımları ile kaldırma kuvvetinin etkisi altında olan kabarcık hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Buradaki asıl amaç çalışma akışkanının bir kısmının veya tamamının sıvı fazdan buhar fazına dönüştürülmesidir. Örneğin çalışma akışkanı olarak su ile doldurulan bir borudaki su başlangıçta atmosfer basıncındaki 100°C doyma sıcaklığından çok düşük olan 15°C'de olacaktır. Boruya dış kaynaktan bir ısı işlemi uygulandığı zaman boru içerisindeki su doymuş bir duruma ısıtılmış olacaktır ve suyun sıcaklığı yükselecektir. Daha sonra sıvı su yığınları doğal taşınım akımları nedeniyle yukarı-

aşğı hareketler yapacaktır ve sonrasında buhar kabarcıkları meydana gelecektir. Oluşan kabarcıklar çalışma akışkanının tepesine doğru yükselerek havuzun tepe noktasında parçalanacaktır. Bu durumda çalışma akışkanının büyük bir bölümü halen doyma sıcaklığının altında olacaktır ve bu durum aşırı soğutulmuş kaynama olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç devam ettikçe çalışma akışkanının genel sıcaklığı zamanla doyma sıcaklığına ulaşacaktır ve böylece kabarcıkların sayısı, yoğunluğu ve boyutu da artmış olacaktır. Bu olay doymuş kaynama olarak adlandırılmaktadır (Çengel ve Gahjar, 2020).

#### **4.2.2. Havuz kaynama rejimleri**

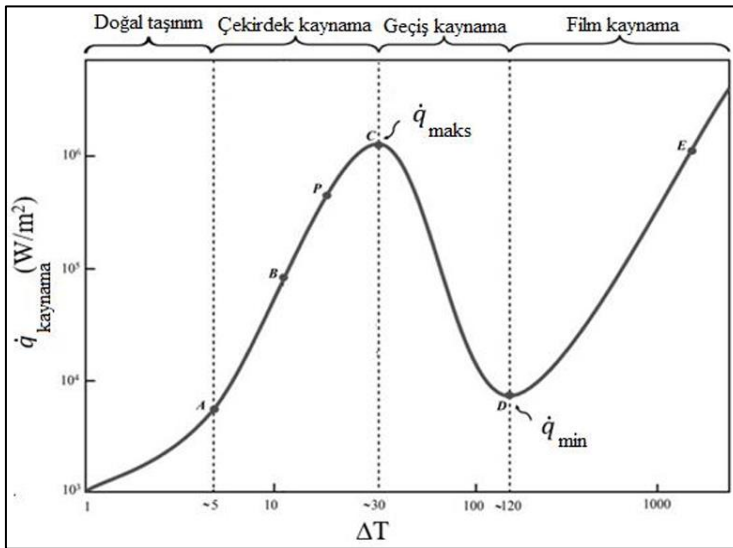
Muhtemelen en iyi bilinen ısı taşınım şekli kaynamadır. Ancak böyle olmasına rağmen yine de en az anlaşılan şeklidir. Günümüze kadar yapılan birçok çalışmaya rağmen kabarcık oluşumu süreci halen daha tam olarak anlaşılamamıştır. Bu nedenle kaynama ısı taşınım oranını tahmin edebilmemiz için halen daha ampirik ve yarı ampirik ilişkilere güvenilmesi gerekmektedir.

Bu konudaki ilk çalışma 1934 yılında Nukiyama tarafından yapılmıştır ve aşırı sıcaklığın değerine bağlı olarak dört farklı kaynama rejimini fark etmiştir. Bunlar doğal taşınım kaynaması, çekirdek kaynaması, geçiş kaynaması ve film kaynamasıdır (Çengel ve Gahjar, 2020). Bu kaynama rejimleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Havuz kaynamasındaki farklı kaynama rejimleri (Çengel ve Gahjar, 2020)

Ayrıca söz konusu bu kaynama rejimleri aşırı sıcaklığa karşı kaynayan ısı akısının bir grafiği ile Şekil 4.3’de gösterilen kaynama eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen kaynama eğrisi atmosferik basınçtaki suya aittir ancak bu eğrinin genel şekli farklı sıvılar için de aynı kalmaktadır (Çengel ve Gahjar, 2020).



Şekil 4.3. 1 atm basınçtaki su için tipik kaynama eğrisi (Çengel ve Gahjar, 2020)

### Doğal taşınım kaynama rejimi

İçerisinde çalışma akışkanı bulunan bir boruya ısı uygulandığı zaman, ısı borunun duvarından doğal taşınım yoluyla aşırı soğutulmuş suya aktarılır. Ancak, su doyma sıcaklığının üzerinde ısıtılmadan ısıtma yüzeyinde bir kabarcık oluşumu görülmez. Bundan dolayı su böyle bir durumda aşırı ısınır (yarı kararlı durum) ve doğal taşınım akımlarıyla üst yüzeye doğru hareket etmeye başlayarak yüzeye yükseldiği zaman buharlaşır. Yani burada doğal taşınım akımlarıyla akışkanın hareketi yönetilir ve ısıtma yüzeyinden akışkana olan ısı taşınımı işlemi doğal taşınım ile gerçekleşir. Şekil 4.3’de doğal taşınım ile kaynama rejimi 0 ile A noktası arasında bulunan kaynama eğrisinden görülebilir (Çengel ve Gahjar, 2020).

### Çekirdek kaynama rejimi

Doğal taşınım kaynamasının takibinde, aşırı sıcaklığın artmasının sonucunda suda ilk kabarcıklar oluşmaya başlar. Şekil 4.3’deki kaynama eğrisinde bu durum A noktasıdır. A noktasına çekirdek kaynama olayının başladığı nokta denilmektedir. Sürekli bir kaynama ile izole buhar kabarcıkları meydana gelir ve A ve B noktaları arasında bulunan kaynama eğrisinde de gösterildiği gibi sıvı havuzunun tepesine yükselir. Bu da ısı akısında bir artışa neden olur.

Ancak burada oluşan kabarcıklar yüzeyden ayrıldıktan kısa bir süre sonra sıvının içerisinde dağılmaya başlar ve baloncukların yükselmesi sonucunda arkalarında bıraktıkları boşluk ısıtıcı yüzey etrafındaki sıvı ile dolar ve bu işlem tekrarlanır.

B-C bölgesinde sıcaklıkta meydana gelen daha fazla artışla birlikte çekirdeklenme bölgesinde daha çok sayıda ve büyük hızlarda kabarcıklar meydana gelir. Bu aşamada izole edilmiş buhar kabarcıkları birleşmeye ve birleşerek sütunları ve buhar sümüklerini oluşturmaya başlar. Daha sonra bu kabarcıklar havuzun üst yüzeyine doğru hareket ederek üst yüzeye ulaştıkları anda içlerindeki buhar içeriğini serbest bırakarak parçalanırlar. Bu durum B-C noktaları arasındaki kaynama eğrisinde gösterilmiştir. Isıtma yüzeyinin yakınında daha fazla miktarda buhar kabarcıklarının meydana gelmesinin sonucunda ısıtma yüzeyinin büyük bir bölümü kabarcıklarla kaplanır ve bu durum sıvının yüzeye ulaşmasını zorlaştırarak taşınım ile ısı taşınımında azalmaya neden olur. Bu durum ise kaynama

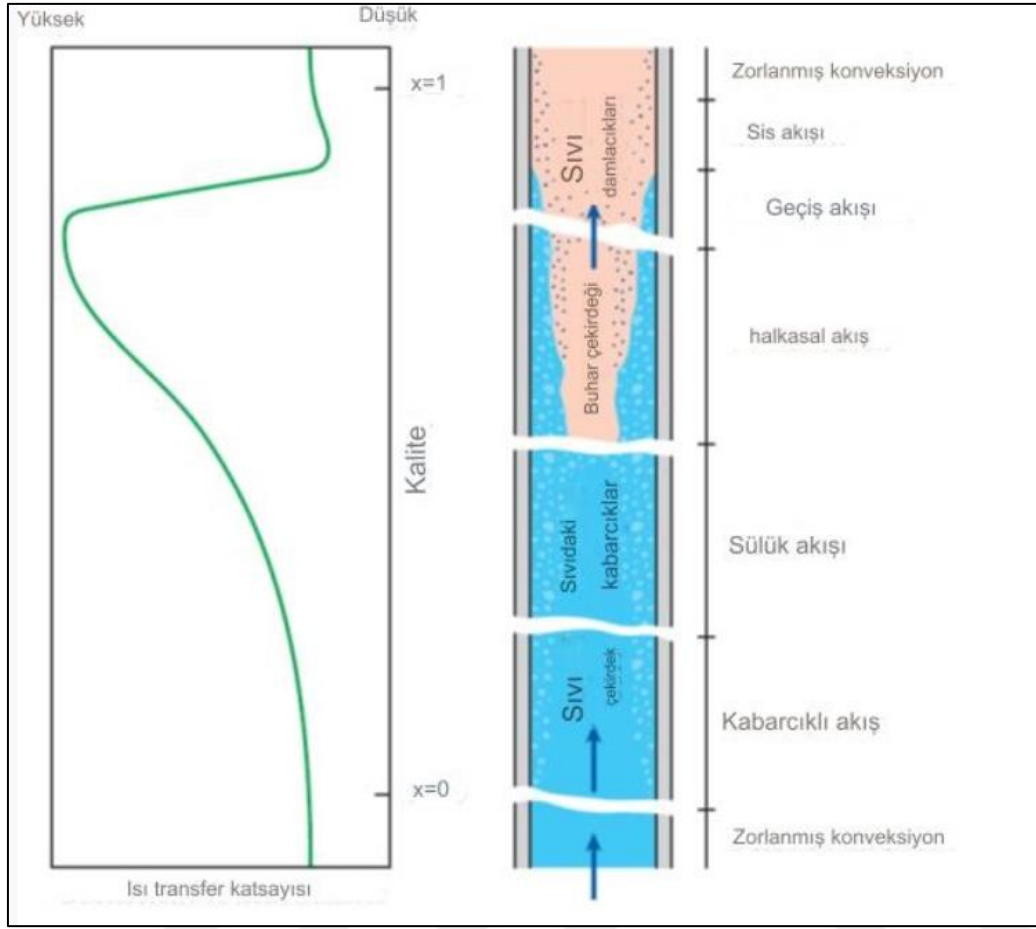
eğrisinde eğimin kademeli bir şekilde düşmesine neden olur. Sonuçta ısı akısının artmasıyla birlikte maksimum değere (C noktası) ulaşana kadar aşırı sıcaklık artar. Bu noktadaki değere kritik ısı akısı denir ve C noktasında gösterilmiştir. Çekirdek kaynama olayı nispeten küçük aşırı sıcaklık değerleri ile yüksek ısı taşınım hızları elde edilebildiği için en çok arzu edilen kaynama rejimidir ve havuz kaynama olayındaki en önemli rejimdir (Çengel ve Gahjar, 2020).

#### Geçiş ve film kaynama rejimi

Aşırı sıcaklığın artmasıyla birlikte yani C noktası geçildikten sonra ısıtma yüzeyinin büyük bir bölümü bir buhar filmi ile kaplanır ve buharın sıvıya göre daha düşük termal iletkenliğe sahip olmasından dolayı bu film tabakası bir yalıtım görevi görerek ısı akısının azalmasına neden olur. Geçiş kaynama rejim olayında kısmen hem çekirdek kaynaması hemde film kaynaması meydana gelir. C noktasındaki çekirdek kaynaması olayı D noktasına ulaşıldığında tamamen film kaynama olayıyla değişmiş olur. Daha sonra buhar film kalınlığında büyür ve ışınlam ile ısı taşınımı nedeniyle ısı akısı tekrar yükselmeye başlar. Bu nedenle pratikte, kararsız film kaynama rejimi olarak da isimlendirilen geçiş kaynama rejimi olayından kaçınılmaktadır (Çengel ve Gahjar, 2020).

#### **4.2.3. Akış kaynama mekanizmaları (veya zorlanmış taşınım kaynaması)**

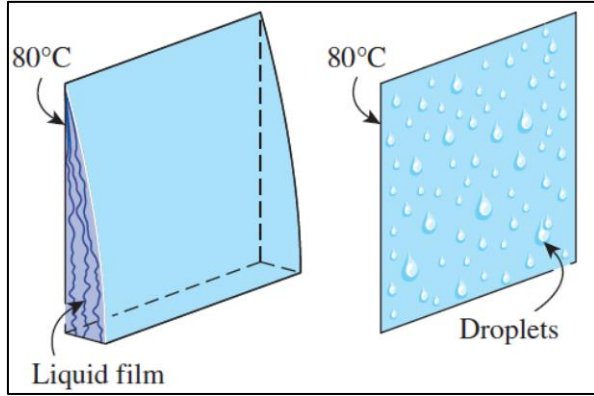
Akış kaynama olayında tüp içerisinde kaynamaya başlayan sıvı bir dış kaynak tarafından akmaya zorlanır, bu durum termosifonda böyle değildir. Söz konusu kaynama rejiminde sıvı ve buhar fazın her ikisi birlikte hareket etmeye zorlanmaktadır. Bundan dolayı buharın kaçabileceği bir serbest yüzey yoktur. Bir tüpte meydana gelen iki fazlı akış olayında sıvı ve buhar fazlarının nispi miktarlarına bağlı olarak farklı akış kaynama rejimleri gözlemlenmiştir. Söz konusu bu farklı rejimler zorlanmış taşınım altındaki bir tüp boyunca ısı transfer katsayısının değişimi ile beraber Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Sonunda, akış buhar fazına doymun hale gelmiş olur (Çengel ve Gahjar, 2020).



Şekil 4.4. Zorlanmış konveksiyon altında bir tüpte kaynayan akışta karşılaşılan farklı akış rejimleri (Çengel ve Gahjar, 2020).

#### 4.2.4. Yoğuşma ısı taşınımı

Yoğuşma olayı, buharın sıcaklığının doyma sıcaklığının altına düşmesi sonucunda meydana gelmektedir. Isı borularında ve/veya termosifonlarda bu işlem, doyma sıcaklığının üzerinde olan buharın, doyma sıcaklığının altında olan katı yüzeyle teması sonucunda gerçekleşir. Yoğuşma olayı film yoğuşma ve damlacık yoğuşma olmak üzere iki farklı biçimde gerçekleşmektedir. Film yoğuşma olayında yoğuşan buhar yüzeyi ıslatır ve yerçekiminin etkisi altında yüzey üzerinde aşağı doğru kayan bir sıvı film oluşturulur. Bu durum ile eş zamanlı olarak yoğuşan buhar miktarının artmasıyla akış yönünde sıvı filmin kalınlığında da artış meydana gelir. Damlacık yoğuşma olayında ise yoğunlaşan buhar yüzey üzerinde damlacıklar meydana getirir ve böylece yüzey değişen çaplara sahip sayısız damlacık ile kaplanmış olur. Hem film hemde damlacık yoğuşma olayı Şekil 4.5'te temsili olarak gösterilmiştir (Çengel ve Gahjar, 2020).



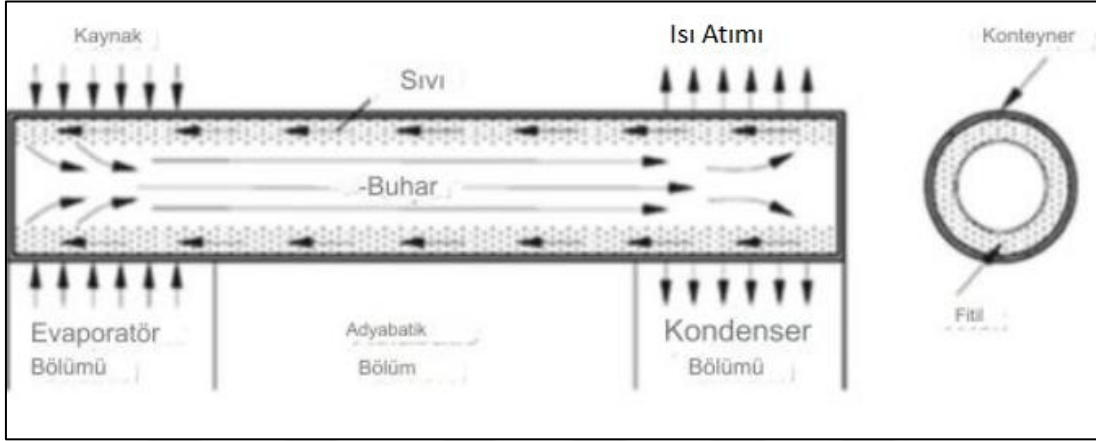
Şekil 4.5. Bir buhar,  $T_{sat}$ 'ın altındaki bir sıcaklıkta bir yüzeye maruz kaldığında, yüzeyde bir sıvı film veya tek tek damlacıklar şeklinde yoğuşma meydana gelir (Çengel ve Gahjar, 2020).

Film yoğuşma olayında yüzeyin artan kalınlıktaki bir sıvı film ile örtülmesi sonucunda katı yüzey ile buhar arasında oluşan bu sıvı duvar ısı taşınımına karşı bir direnç görevi görür. Buharın yoğuşması sırasında ortaya çıkan buharlaşma ısı katı yüzeye ulaşmadan ve diğer tarafta bulunan ortama aktarılmadan önce bu direnci geçmek zorundadır. Ancak, damlacık yoğuşma olayında yoğuşan damlacıklar belirli bir büyüklüğe ulaştıklarında aşağı kayarak yüzeyi temizler ve buhar ile temasını sağlar. Bu gibi bir durumda ısı taşınımına direnmek zorunda olan bir sıvı film tabakası yoktur. Bu nedenle damlacık yoğuşma olayı ile film yoğuşma olayına göre 10 kat daha fazla olan ısı taşınım hızları elde edilebilmektedir. Bundan dolayı ısı taşınım uygulamalarında damlacık yoğuşma olayı tercih edilen yoğuşma türü olmuştur ve uzun süredir araştırmacılar çeşitli buhar katkı maddeleri ve yüzey kaplamaları kullanmak suretiyle damlacık ile yoğuşma olayını elde edebilmeye çalışmışlardır. Buna rağmen, elde edilen damlacık yoğuşma olayının çok uzun sürmemesi ve zamanla film yoğuşma olayına dönüşmesi sonucunda söz konusu girişimler çok başarılı olamamıştır (Çengel ve Gahjar, 2020).

#### 4.2.5. Isı borularının çalışma prensipleri

Isı boruları ile ısı taşınımı işlemi, termal yönetim için en hızlı ve verimli yöntemlerden birisidir ve oldukça yüksek iletkenliğe sahip olan ısı taşınım cihazlarıdır. Isı taşınımı işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için tüp içerisindeki çalışma sıvısının gizli ısını kullanırlar. Isı boruları bilinen en basit şekilleriyle, bir fitil yapısıyla iç duvarları kaplı olan bir kaptan meydana gelir. Öncelikle ısı borusu vakumlanır ve daha sonra uygun olan bir çalışma sıvısı ile doldurulduktan sonra hermetik olarak kapatılır. Bir ısı borusu

genellikle üç bölümden meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla evaporatör, adyabatik ve kondenser bölümleridir. Basit bir ısı borusunun yapısı Şekil 4.6'da gösterilmiştir (Zohuri, 2016).



Şekil 4.6. Tipik bir ısı borusunun çalışma şeması (Zohuri, 2016).

Isı borusunun evaporatör bölümüne ısı verildiği zaman çalışma sıvısı sıvı fazından buhar fazına faz değişimi yoluyla buharlaşır. Burada sıvı halden gaz haline geçilmesi için gerekli olan enerjiye buharlaşma gizli ısı denir. Isıtma işleminin devam etmesiyle buhar basıncı da artar. Artan buhar basıncı, evaporatör bölümünden buharın çıkmasına ve daha sonra adyabatik bölüm boyunca ilerlemesine neden olur. Bu ilerlemenin sonucunda kondenser bölümüne ulaşan buhar, aldığı gizli ısıyı burada serbest bırakarak yoğunlaşır. Yoğuşan sıvı kılcal ve/veya kütle kuvvetlerinin etkisi veya bir kombinasyonu ile tekrar evaporatör bölümüne geri döner. Evaporatör ve kondenser arasındaki sıcaklık farkı korunduğu süre boyunca iki fazlı akış sirkülasyonu devam eder (Zohuri, 2016). Kısacası ısı boruları, bir akışkanın iki fazlı akışı ile ısıyı taşır.

#### 4.2.6. İş akışkanı

İş akışkanı, her bir ısı borusu uygulamasında ısı borusunun çalışmasının gerekli olduğu belirli bir sıcaklık aralığına sahip olmasından dolayı, bir ısı borusunun en önemli parçasından biridir.

Bu nedenle öncelikle amaçlanan sıcaklık aralığının dikkate alınmasıyla iş akışkanının seçilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda ısı borusunun üretildiği malzemenin de seçilen iş akışkanıyla uyumlu olması gerekmektedir. Çünkü iş akışkanı söz konusu malzeme ile

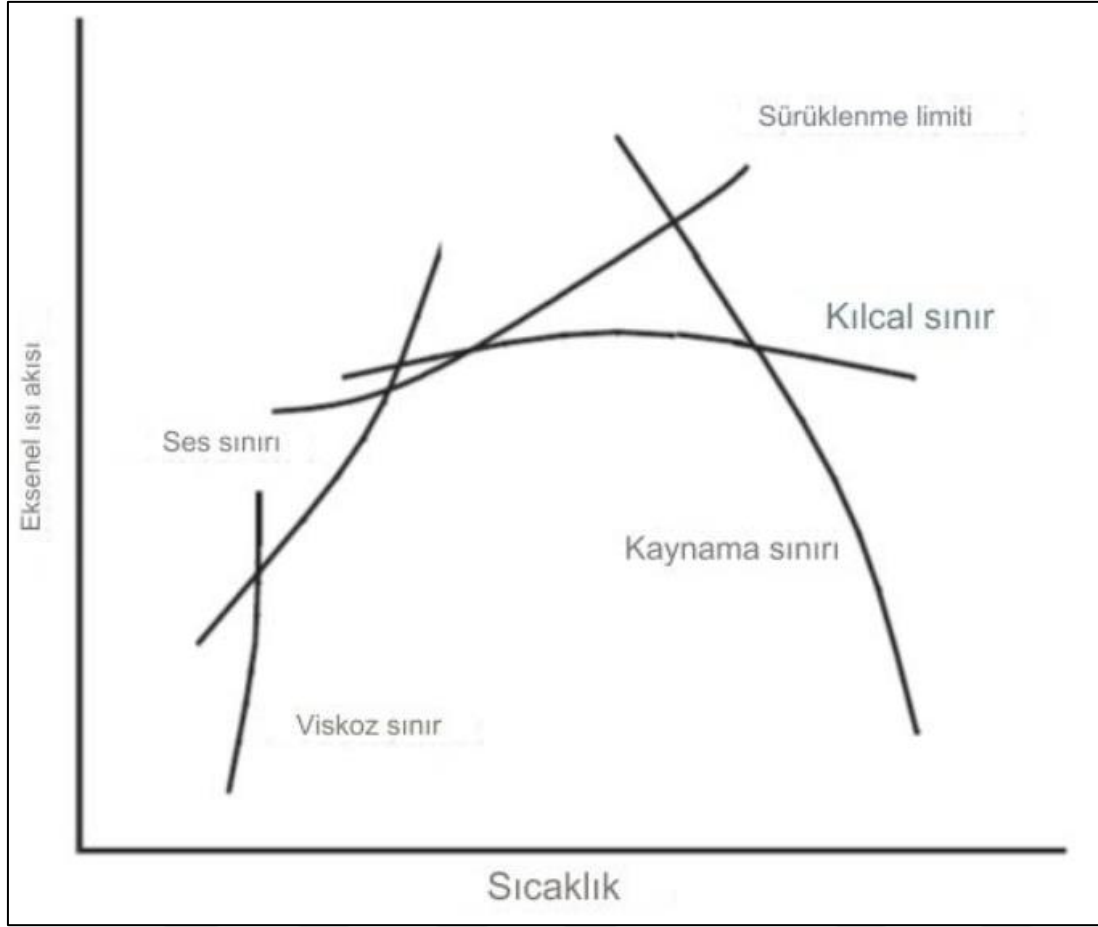
yoğuşmayan gazların üretilmesine neden olacak kimyasal reaksiyonlara girebilir (Faghri, 1995). Bununla birlikte, bu alanda yapılacak çalışmalar için uygun olan çalışma akışkanlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken bazı özellikler bulunmaktadır ve bunlar aşağıda verilmiştir:

- Fital ve duvar malzemeleri ile uyumluluk ve bu malzemelerin ıslanabilirliği
- İyi termal kararlılık
- Çalışma sıcaklığı aralığı içinde buhar basıncının aşırı yüksek veya düşük olmaması
- Yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olması
- Yüksek termal iletkenlik göstermesi
- Düşük sıvı ve buhar viskoziteleri bulunması
- Yüksek yüzey gerilimine sahip olması

Bu maddeler incelenecek olursa yüksek yüzey gerilimi değeri, ısı borusunun yerçekimine karşı çalışmasını sağlamak ve yüksek olan bir kılcal itici güç oluşturmak için arzu edilir. Islanabilirlik için temas açısının sıfır veya çok küçük bir değere sahip olması istenilir. Büyük sıcaklık gradyanlarına ve akış dengesizliklerine neden olan yüksek buhar hızlarından kaçınabilmek için çalışma sıcaklık aralığı üzerindeki buhar basıncı yeterince büyük olmalıdır. Yüksek gizli buharlaşma ısı, minimum düzeyde sıvı akışıyla büyük miktarda ısıyı aktarabilmek ve böylece ısı borusu içerisindeki basınç düşüşlerinin korunması için istenir. Düşük sıvı ve buhar viskozite değerleri ise sıvı akışına karşı direncin en aza indirilebilmesi için istenmektedir (Zohuri, 2016).

#### **4.2.7. Çalışma limitleri**

Isı borularının düzgün bir şekilde çalışabilmeleri ve gerekliliklerini yerine getirebilmeleri için dikkate alınması gereken sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalar Şekil 4.7’de gösterilmektedir ve aşağıda açıklandığı gibidir.



Şekil 4.7. Bir ısı borusunda ısı taşınmasına ilişkin sınırlamalar (Limitler), (Reay ve diğerleri, 2007).

#### Viskoz limit

Uzun olan borular ve düşük sıcaklık değerlerinde buharın basıncı düşük olur ve bu nedenle buharın akışı üzerinde viskoz sürtünmenin etkisi atalet kuvvetlerine baskın hale gelebilir. Çalışma akışkanının sirkülasyonu bu gibi bir durumda sınırlı olur ve bu durum ise borudan ısı taşınımını sınırlar. Yani düşük çalışma sıcaklıklarında evaporatör ve kondenser arasındaki buhar basınç farkı söz konusu viskoz kuvvetlerden daha düşük olduğu zaman buhar kondenser bölümüne akamaz ve boru boyunca ısı taşınım hızı sınırlı kalır (Zohuri, 2016).

#### Sonik limit

Isı boruları ve termosifonlar sonik limit ile ilgili benzer davranışlara sahiptirler. Sonik limit diğer ısı taşınım limitlerinden farklıdır. Sonik limit cihazın kurumasına veya tamamen arızalanmasına neden olmamaktadır. Söz konusu sınır aşıldığı zaman sıcaklık gradyanında

boru boyunca artış meydana gelerek cihazın izotermal özelliği artık algılanmaz. Sonik limit buhar sonik hıza ulaştığı zaman cihazın maksimum ısı taşınım kapasitesinin gerçekleştiğini belirlemektedir (Mantelli, 2021).

Buhar basıncı düşük olduğu zaman evaporatörün çıkışında bulunan buharın hızı ses hızına ulaşabilir ve böyle bir durumda kondenser basıncındaki daha fazla düşüşe evaporatör yanıt veremez. Kısacası buhar akışı, buhar akış hızını sınırlayacak bir şekilde tıkanır. Bu olaya sonik limit denir (Zohuri, 2016).

### Kılcal limit

Bir sıvının belirli bir sınıra kadar olan dolaşımını kılcal bir yapı sağlayabilir. Kılcal sınır, fitil yapısının geçirgenliğine ve çalışma sıvısının sahip olduğu özelliklere bağlıdır (Zohuri, 2016).

Bir ısı borusu kararlı durumda çalıştığı zaman evaporatörden kondensere doğru sürekli bir buhar akışı ve söz konusu fitil aracılığıyla da kondenserden evaporatöre doğru bir sıvı akışı durumu söz konusudur. Bahsedilen bu akışlar ısı borusunun uzunluğu boyunca buhar basınç ve sıvı basınç gradyanları sayesinde mümkün olmaktadır. Sıvı buhar arayüzünde bir kılcal basınç bulunmaktadır ve bu basınç değeri sıvının tekrar evaporatör bölümüne akması için gerekli bir durumdur. Yani ısı borularının çalışması sıvı-buhar arayüzlerinde bulunan kılcal basınç farkı sayesinde yönetilir. Bu durum ısı borusunun çalışma performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Eğer kılcal basınç sıvının evaporatöre dönmesi için yeterli değilse evaporatör ucundaki fitilin kuruması olayına neden olduğu zaman kılcal bir sınırla karşılaşılır. Daha öncede bahsedildiği gibi fitil yapısı ve çalışma sıvısının cinsi de bu durumu etkilemektedir. Sınra ulaşıldığı zaman ise, ısı girişinde meydana gelen herhangi bir artış ısı borusunun ciddi bir hasar almasına neden olabilir (Zohuri, 2016).

Kılcal limit ilk denklemin geçerli olduğu izin verilen maksimum ısı akışını ifade eder. İkinci denklem ile temsil edilen Laplace-Young denklemi bir ısı borusunun fitil yapısı içinde üretilen en yüksek kılcal basıncı ( $\Delta P_c$ ) belirler. Denklem (4.1) ve (4.2)'de görüldüğü gibi sıvının hareket etmesi için gerekli olan basınç düşüşü ( $\Delta P_l$ ) kondenserden tekrar evaporatöre aktarılacak olan buharın evaporatörden kondensere gitmesi için gereken basınç farkı ( $\Delta P_v$ ) ve ısı borusunun eğimine göre değişen yer çekimi yükü basıncı ( $\Delta P_g$ ) ifade eder.

$$\Delta P_{c,max} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (4.1)$$

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma_l}{r_{eff}} \times \cos \theta \quad (4.2)$$

Burada  $\sigma_l$ , çalışma akışkanının serbest yüzey enerjisidir ve  $r_{eff}$ , farklı fitil yapıları için belirlenebilen fitilin etkin gözenek yarıçapına karşılık gelir;  $\theta$  ise akışkan ile fitil arasındaki temas açısıdır. Boru ile yer arasındaki açı arttıkça, kapiler kuvvetin etkisi de azalır. Bu da sıvının borunun üst kısmına ulaşmasını zorlaştırır ve ısı taşınımını yavaşlatır. (Jang, 2024)

### Sürüklenme limiti

Isı borusunda buhar akış yönünün tersine doğru akan fitildeki sıvıya buhar akışı tarafından bir kesme kuvveti uygulanmaktadır. Buradaki kesme kuvvetinin değeri sıvının dirençli yüzey gerilimini aştığında, buhar akışı tarafından küçük sıvı damlacıkları sürüklenir ve kondenser bölümüne taşınır (Kelvin-Helmholtz kararsızlıkları). Bu durum sıvı sirkülasyonunda bir artışa sebep olsada borudan ısı taşınımını arttırmaz. Eğer artan akış kılcal kuvvet tarafından karşılanamazsa bu durumda evaporatörde fitil kuruma olayı meydana gelebilir (Zohuri, 2016).

### **4.3. Isı Borularının Çeşitleri**

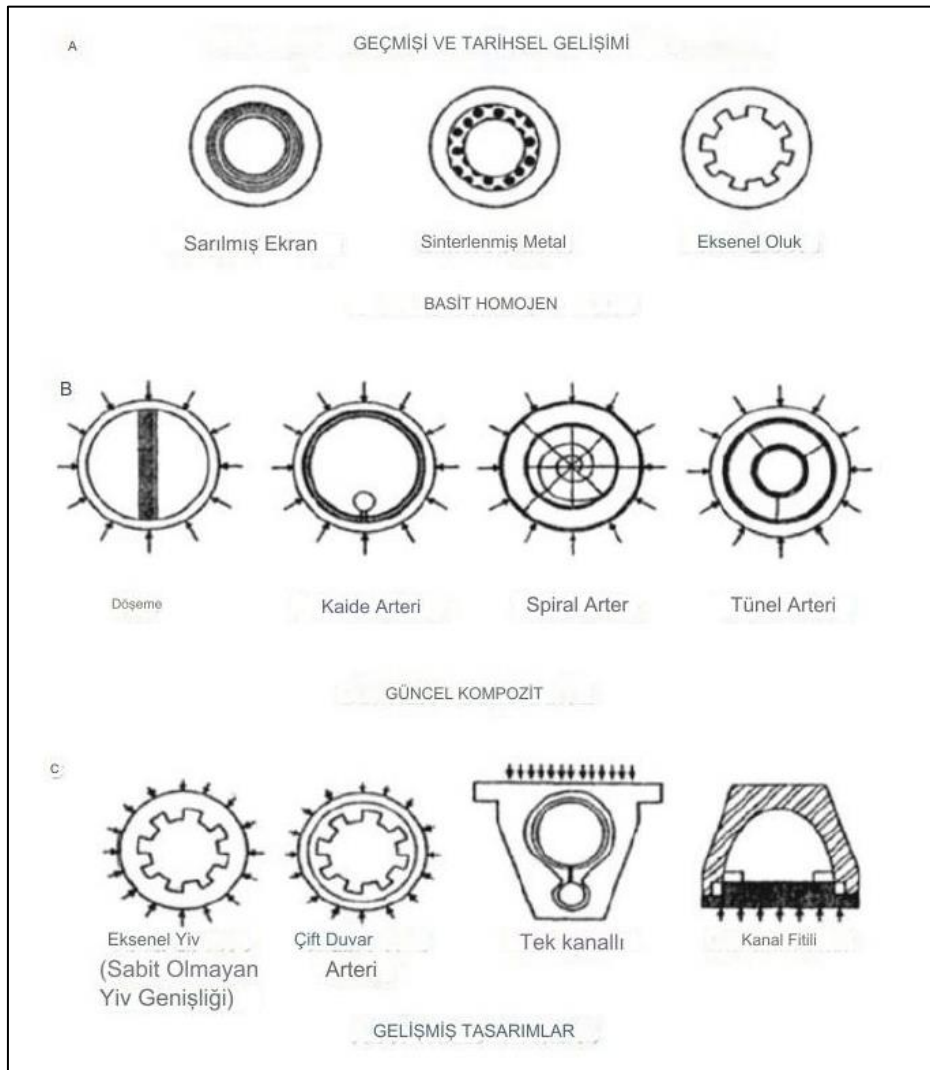
Kapalı bir kap içerisinde çalışma akışkanının buharlaşması ve yoğunlaşması ile ısının taşınımının farklı boyut ve şekile sahip birçok ısı borusu bulunmaktadır. Bu bölümde aşağıda gösterildiği gibi söz konusu ısı borusu çeşitlerinden bazıları verilmiştir ve bunlardan sadece birkaçı açıklanacaktır (Zohuri, 2016):

- Değişken iletkenlik ısı boruları
- Termal diyetler
- Titreşen (salınan) ısı boruları
- Döngü Isı Boruları (LHP'ler) ve Kılcal Pompalı Döngüler (CPL'ler)
- Mikro ısı boruları
- Elektrokinetik kuvvetlerin kullanımı
- Dönen ısı boruları

- Çeşitli tipler—Sorpsiyon Isı Borusu (SHP) ve manyetik sıvı ısı boruları

#### 4.3.1. Fitilli (kılcal yapıya sahip) ısı borusu

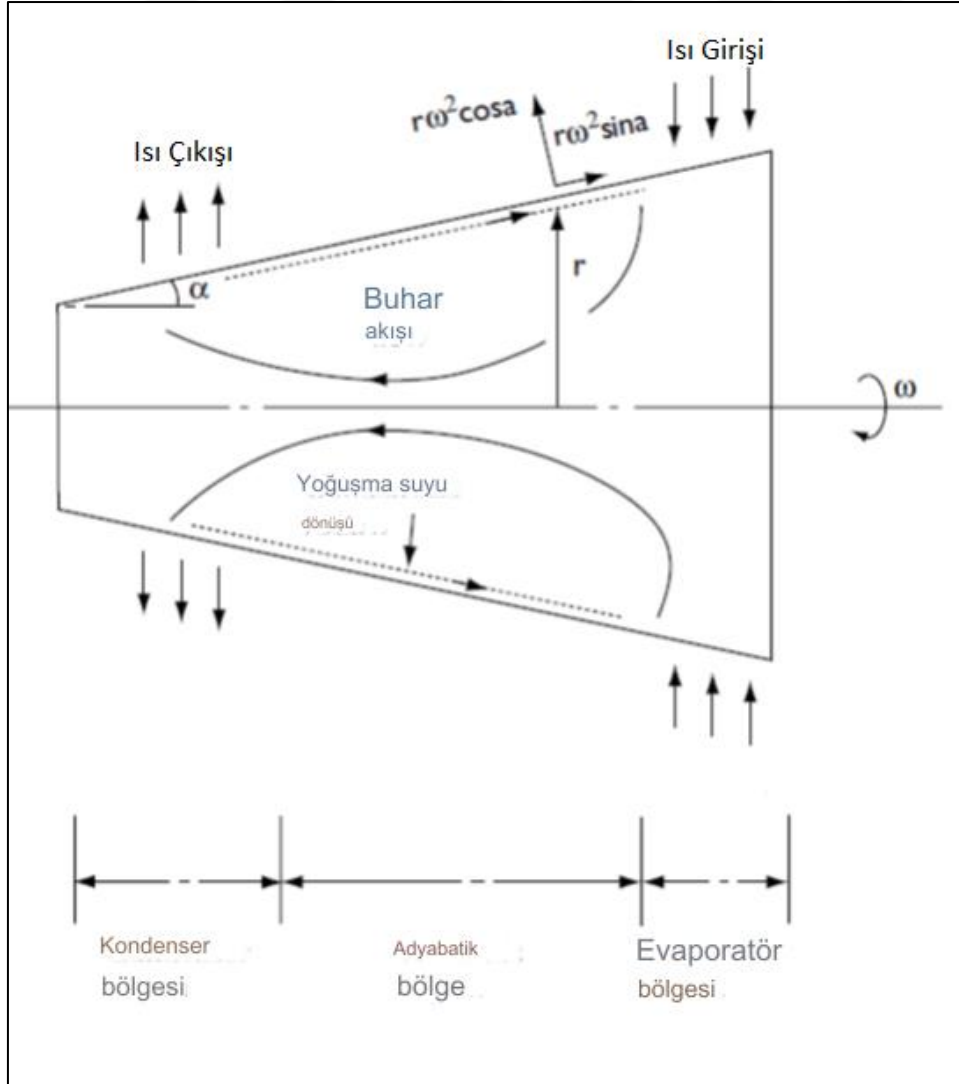
Çalışma akışkanının fitilin içerisinde kılcal ve yerçekimi kuvvetleriyle hareket ettiği ısı borularıdır. Bu tip ısı borularının en büyük avantajı yer çekimsiz ortamda çalışabilmeleridir. Şekil 4.8’de tipik ısı borularındaki çeşitli fitil yapıları gösterilmiştir. Daha öncede ifade edildiği gibi ısı borularındaki fitil yapılarının amacı, yoğunlaşan akışkanın evaporatöre geri dönmesi işlemini gerçekleştirmektir.



Şekil 4.8. Tipik ısı borusu fitil konfigürasyonları ve yapıları (Zohuri, 2016).

#### 4.3.2. Dönen ısı boruları

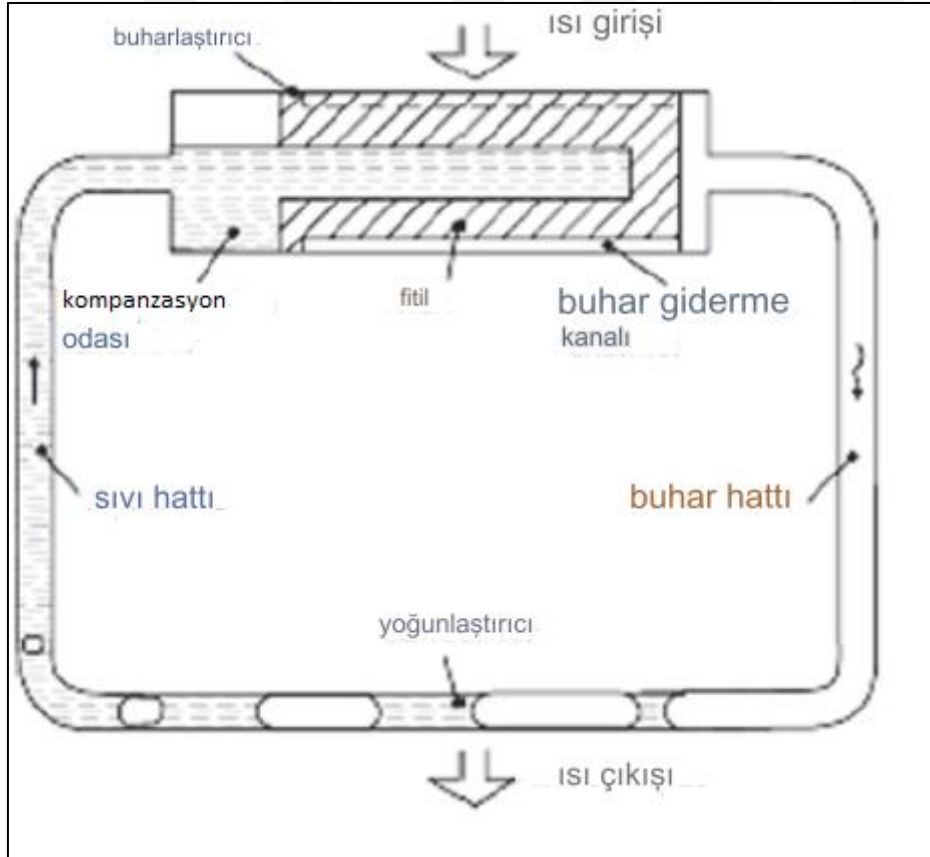
Bu tip ısı borularında yoğunlaşan akışkanın evaporatör bölümüne geri dönmesi işlemi bir merkezkaç kuvveti vasıtasıyla gerçekleştirilir. Dönen bir ısı borusu genellikle aksenal uzunluğu boyunca hafif bir iç konikliğe sahip olan ve belirli bir miktarda çalışma akışkanı içeren sızdırmaz ve içi boş olan bir şafttan meydana gelir. Dönen bir ısı borusuna ait şematik gösterim Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu tip ısı borularında evaporatör, adyabatik ve kondenser olmak üzere üç bölümden meydana gelir. Bununla birlikte, eksen etrafındaki dönüş, borunun duvarı boyunca bir  $\omega^2 r \sin \alpha$  bileşeni ile bir merkezkaç ivmesine ( $\omega^2 r$ ) neden olacaktır. Karşılık gelen kuvvet, yoğunlaştırılmış çalışma sıvısının duvar boyunca tekrar evaporatör bölgesine akmasına neden olacaktır (Reay ve diğerleri, 2007).



Şekil 4.9. Dönen ısı borusu (Reay ve diğerleri, 2007)

#### 4.3.3. Döngü ısı boruları (LHP'ler) ve Kılcal pompalı döngüler (CPL'ler)

Döngü ısı boruları pasif, bükülebilir, esnek ve yönlendirilebilir olan tamamen pasif iki fazlı ısı taşınım cihazlarıdır. Bu tip ısı boruları ısı sızıntısının geriye doğru gerçekleşmesini önleyebilmek için termal diyotlar gibi de çalıştırılabilmektedirler. Döngü ısı boruları, tamamen pasif olma (yani harici bir enerji gerektirmeme), ısıнын 23 metreye kadar taşıyabilme, yüksek sıcaklık uygulamaları için geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olma, esnek ve esnek yorulma dirençleri, yerçekimi yüklerine, şoka, titreşime, donmaya ve çözölmeye karşı dayanıklı olma ve çok yönlü ısı yükü kapasitesine sahip olma gibi birçok avantaja sahiptirler. Basit bir döngü ısı borusunu Şekil 4.10a'da gösterilmiştir. (Zohuri, 2016).

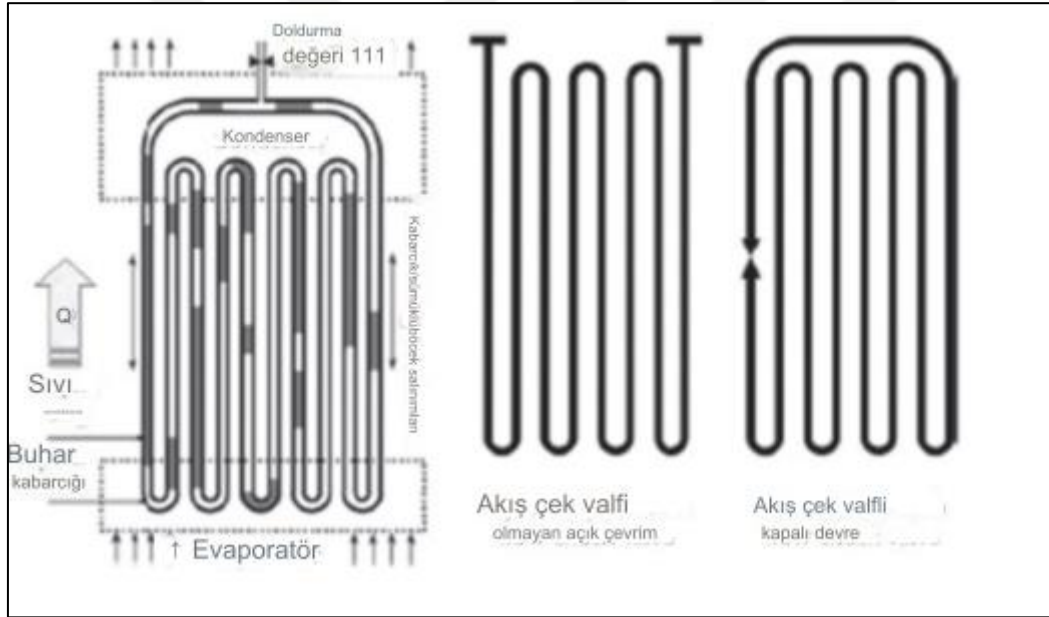


Şekil 4.10. Döngü ısı borusunun çalışma prensibi (Maydanik, 2005).

#### 4.3.4. Atımlı (Titreşen) ısı boruları

Atımlı (titreşimli) ısı boruları ısı borularından farklı olarak içerilerinde bir fitil yapısı bulundurmazlar. Günümüzde halen geliştirilmeleri için birçok çaba harcanan atımlı ısı

boruları, vakumlanmış, içinde belirli ve kontrollü miktarda çalışma akışkanı bulunduran ve serpantin şeklinde kıvrımlı küçük çapa sahip borulardan yapılmaktadır. Diğer iki fazlı ısı taşınım cihazları gibi atımlı ısı boruları da evaporatör, adyabatik ve kondenser olmak üzere üç bölümden meydana gelmektedirler. Evaporatör bölümündeki çalışma akışkanının ısıtılması sonucunda ısı alınır ve böylece buharlaşma meydana gelir. Buharlaşma işlemi sonucunda büyüyen buhar kabarcıkları oluşur ve söz konusu kabarcıklar borunun hacmini önemli bir oranda kaplar veya kaplayabilir. Artan buhar basıncıyla birlikte kondensere doğru hareket başlar ve kondenserle temas eden buhar kabarcıkları daha sonra yoğuşur. Buhar kabarcıklarında meydana gelen büyüme ve yoğuşma olayı boru içerisinde salınımlı (pulsating) bir hareketin oluşmasına neden olur (Reay ve diğerleri, 2007). Atımlı ısı borularının konfigürasyonları Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Atımlı ısı borusunun şematik gösterimi (Charoensawan ve diğerleri, 2003).

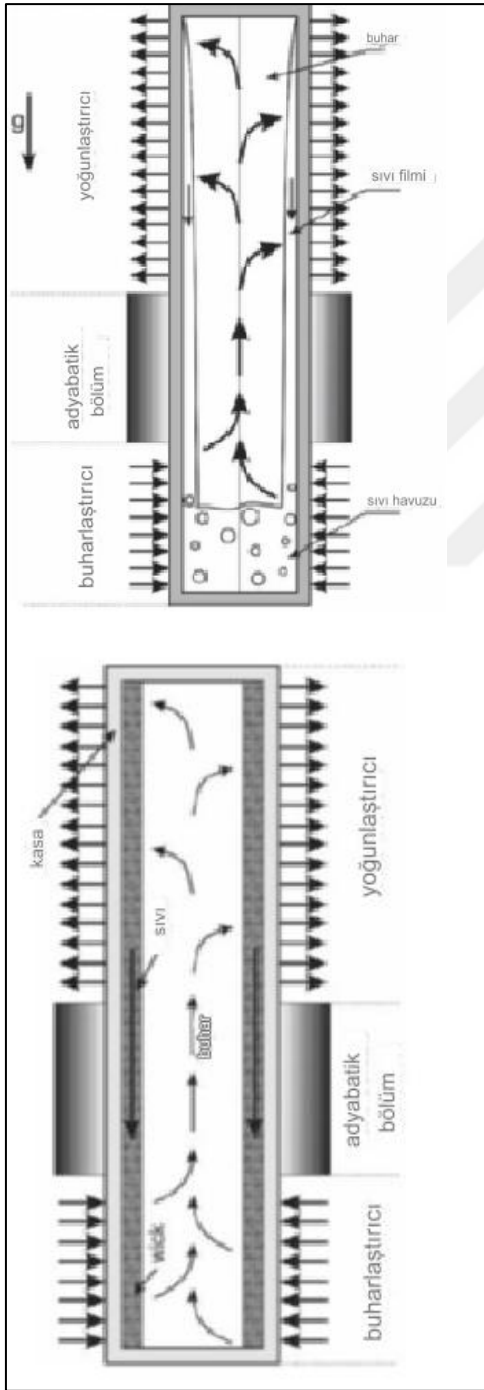
#### 4.3.5. İki fazlı kapalı termosifon (ifkt)

Isı boruları kapalı bir kabın içerisinde iki fazlı çalışma prensibiyle çalışma akışkanının gizli ısılarından faydalanarak, herhangi bir hareketli parça kullanmadan, (Zhang ve diğerleri, 2008) eş zamanlı olacak şekilde buharlaşma- yoğuşma yoluyla enerjiyi bir bölümden başka bir bölüme aktarmak için kullanılan ve ısı taşınımını oldukça verimli bir şekilde gerçekleştirmeyi amaçlayan yüksek termal iletkenliğe sahip pasif ısı geri kazanım cihazlarıdır. Isı boruları temelde 3 ana bölümden meydana gelmektedir. Bunlar çalışma

akışkanına ısının verildiği evaporatör, yalıtılmış kısım adyabatik ve buharın yoğunlaştırılarak tekrar evaporatöre gönderilmesini sağlayan yoğunlaştırıcı bölümleridir (Fadhl ve diğerleri, 2013). Isı boruları ve termosifonlar yapısal olarak birbirlerinden farklıdırlar. Isı borularının içerisinde bir fitil yapısı bulunmaktadır. Bu fitil yapısı yerçekimsiz ortamda çalışma imkânı sunmaktadır. Bundan dolayı ısı borularında evaporatörün alt bölüme yerleştirilme zorunluluğu bulunmamaktadır. Bu fitil yapısı, kılcal kuvvetlerle yerçekimsiz ortamda yoğunlaşan çalışma akışkanının evaporatöre geri döndürülmesini sağlamaktadır. Ancak termosifon ısı boruları yerçekiminin etkin olduğu ortamlarda çalıştırılmaktadır. Bu nedenle bir fitil yapısı ihtiyacı bulunmamaktadır. Böylece termosifonlarda yoğunlaşan çalışma akışkanının evaporatöre geri döndürülmesi işlemi ısı borularından farklı olarak yer çekiminin etkisiyle gerçekleştirilmektedir (Legierski ve diğerleri, 2006) ve bu nedenle termosifonlarda evaporatör bölümü alt kısımda olmalıdır. Fitil yapısının bulunması ve bulunmamasından dolayı ısı boruları ve termosifonlar farklı isimler almaktadır.

Fitil yapısına sahip olan ısı boruları fitilli ısı boruları olarak adlandırılırken, termosifonlar fitilsiz ısı boruları olarak adlandırılırlar. Bunun yanı sıra literatürde, kapalı olmaları ve vakumlanmış ortama çalışma sıvısının eklenmesi sonucunda iki fazlı çalışma prensibine sahip oldukları ve iki fazlı bir çevrim gerçekleştirdikleri için İki-Fazlı-Kapalı Termosifon (İFKT) olarak da adlandırılırlar. Isı boruları ve İFKT'ler arasındaki fark Şekil 4.12'de verilen basit bir gösterimle ifade edilebilir. Bununla birlikte ısı boruları ve/veya İFKT'lerin genellikle bakır veya alüminyumdan üretildiği görülmektedir. Bu durum metallerin, ısının bir bölümden başka bir bölüme aktarılması için son derece etkili olmaları ve iyi ısı iletkenlik derecelerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Tipik bir İFKT'de çalışma akışkanı evaporatör bölümünde buharlaşma gizli ısını alarak ısıtılır ve eklenen ısının etkisiyle sıvıdan buhara faz değişimi meydana gelerek ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve basınçtaki buhar, kaldırma kuvvetinin yardımı ve basınç farkının da etkisiyle önce adyabatik daha sonra kondenser bölümüne gönderilir. Çalışma akışkanı evaporatörde aldığı gizli ısıyı, doyma sıcaklığının altında olan kondenser bölümünün iç yüzeyleriyle temas ederek serbest bırakır ve yoğunlaşan akışkan yerçekiminin etkisiyle tekrar evaporatör bölümüne gönderilir (Fadhl ve diğerleri, 2013). İFKT'nin çalışma süresi boyunca bu çevrim devam eder (Fadhl ve diğerleri, 2013). Herhangi bir enerji tüketimine ihtiyaç duymadan çalışmaları, düşük termal dirence sahip olmaları, düşük miktarda çalışma akışkanı kullanmaları (Alammar ve diğerleri, 2016), güvenilirlikleri, verimlilikleri, düşük maliyetlere sahip olmaları, son derece basit olan yapıları (üretim kolaylıkları) ve yüksek ısı taşıyım kapasitelerine sahip olmaları

gibi avantajlarından dolayı İFKT'ler, güneş enerjili su ısıtıcıları, jeotermal sistemler, nükleer reaktör soğutma sistemleri, HVAC sistemlerde, elektrikli soğutma cihazları, enerji dönüşüm sistemleri, toprak kaynaklı ısı pompaları, su ısıtma sistemleri, bina ısıtma ve soğutma, klima atık ısı geri kazanımı, nem kontrolü, gıda endüstrisi, demiryolu taşıma sistemleri, çeltik yığın silolarında çeltik sıcaklığının kontrolü ve reaktörler gibi daha birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.



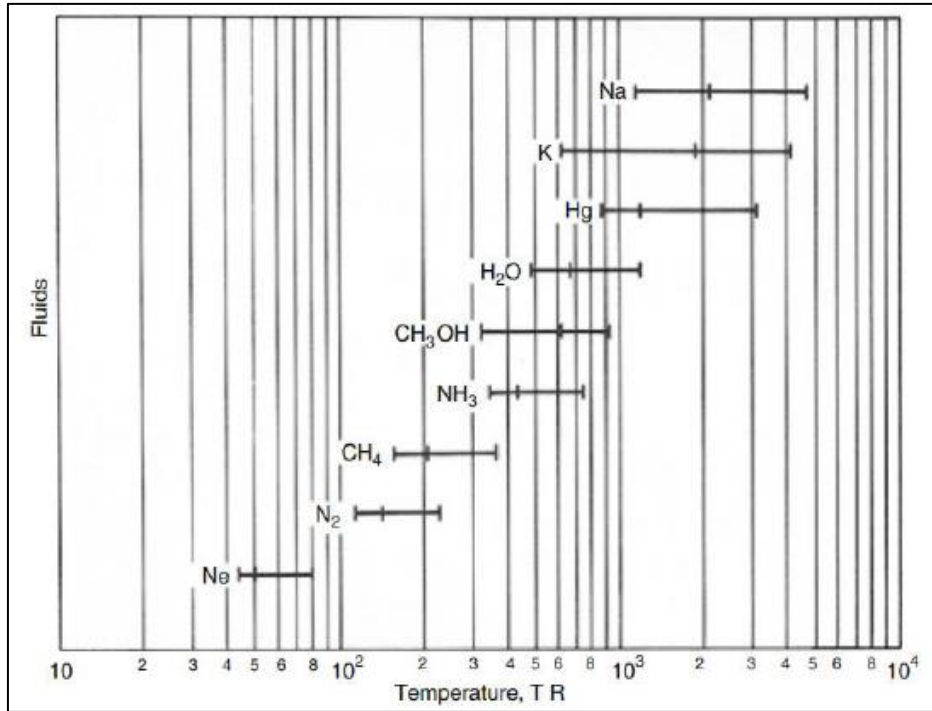
Şekil 4.12. Termosifonların ve ısı borularının fiziksel çalışma prensipleri (Mantelli, 2021).

Bununla birlikte bir İFKT'nin çalışmasını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla ısı yükü, evaporatör ile kondenser arasındaki mesafe, eğim açısı, çap, çalışma akışkanı, dolum oranı, yeniden kaplama, ısı giriş bölgesinin uzunluğu, basınç düşüşü, İFKT'nin temel çalışma parametresi olan termosifonun farklı kısımlarındaki termal direnç ve çalışma koşullarıdır (Liu ve diğerleri, 2018). Görüleceği gibi İFKT'lerin iyi bir performans sergilemelerini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Ancak bunlar arasında çalışma sıvısının miktarı yani İFKT'nin dolum oranı oldukça büyük bir öneme sahiptir ve ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

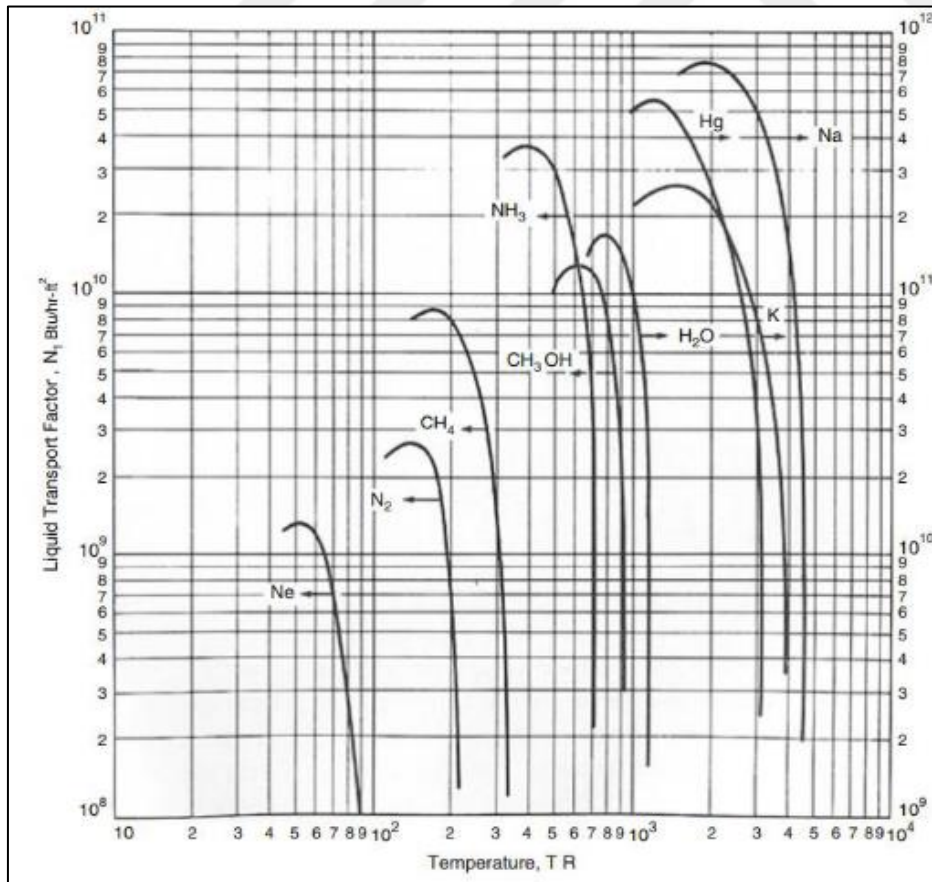
#### **4.4. Matematiksel Modelleme**

##### **4.4.1. İş akışkanı seçimi**

İş akışkanı seçerken birçok etken göz önünde bulundurulmalıdır. İş akışkanı yüksek yüzey gerilimi, yüksek gizli ısı, hem sıvı halde hem buhar halde düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik, uygun sıcaklık aralığında fitille uyum içerisinde çalışma, ıslanabilirlik ve hesaplanan sınırlamalar ile uyum içerisinde olma gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu özelliklerin hepsinin bir arada olması pek mümkün değildir. Bu sebepten ötürü içlerinden istenilen ısı borusuna en uygun iş akışkanı seçilmelidir. Uygun bir iş akışkanı seçimi için öncelikle göz önünde bulundurulması gereken özelliklerin başında iş akışkanı buhar sıcaklık aralığıdır. Bu projede seçilen iş akışkanı çalışma sıcaklığı 50°C ila 80°C'dir. Bu sıcaklığa uygun iş akışkanına karar vermek için şekil 4.13 ve şekil 4.14 detaylıca incelenmelidir.



Şekil 4.13. Çeşitli iş akışkanları için çalışma sıcaklık aralıkları (Zohuri, 2016).



Şekil 4.14. Akışkanların ısı taşıma faktörü (Zohuri, 2016).

Şekil 4.13 ve 4.14 dikkatli bir şekilde incelendiğinde öncelikle uygun sıcaklıkların hangi sıvılarla çalıştığına dikkat edilmelidir. Bu verilen şekiller Rankine birimi üzerinden verilmiştir. Isı borusunun 50-80°C çalışma sıcaklığı 580°R- 635°R değerine eşit olmaktadır. Bu değer şekil üzerinden bakıldığında en uygun iş akışkanı su olmaktadır. Isı borusunda farklı iş akışkanları, farklı sıcaklıklarda ve farklı çalışma durumlarında verilen şekil üzerinden karar verilerek seçilebilir.

#### 4.4.2. Kap seçimi

Isı borularında kap tercihi önemli tasarım aşamasında çok önemli bir yer tutar çünkü kap çalışma sıvısının dış ortam izole edilmesini sağlamaktadır. Seçilen kap yüksek ıslanabilirlik, iyi mukavemet-ağırlık oranı, yüksek termal iletkenlik, iş akışkanı ile uyumlu çalışabilme ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip olmalıdır.

Kap tercihinde yukardaki bahsedilen etmenlerden ön önemli etmen iş akışkanı ile uyumluluğudur. Bunun sebebi ısı borularında iş akışkanının kimyasal reaksiyona girmesi sonucu fitilin korozyonundan ötürü sürekli bir performans düşüşü yaşanabilir. Ayrıca, korozyon sonucu menisküs açısı ve gözenek yapısında değişimlere sebep olabilir. Bu sebeple Şekil 4.15'te verilen kap ve iş akışkanı seçimi uyumluluk tablosu dikkatli bir şekilde incelenmelidir.

|           | Solids         |    |    |    |                     |    |
|-----------|----------------|----|----|----|---------------------|----|
| Fluids    | Al             | Cu | Fe | Ni | SS <sup>a</sup> 304 | Ti |
| Nitrogen  | C <sup>b</sup> | C  | C  | C  | C                   |    |
| Methane   | C              | C  |    |    | C                   |    |
| Ammonia   | C              |    | C  | C  | C                   |    |
| Methanol  | I              | C  | C  | C  | C                   |    |
| Water     | I              | C  |    | C  | C <sup>c</sup>      | C  |
| Potassium |                |    |    | C  |                     | I  |
| Sodium    |                |    |    | C  | C                   | I  |

Şekil 4.15. Isı borusu kap malzemesi ve iş akışkanı uyumu. C: Uyumlu I: Uyumsuz boş kısım: veri yok, (Zohuri, 2016)

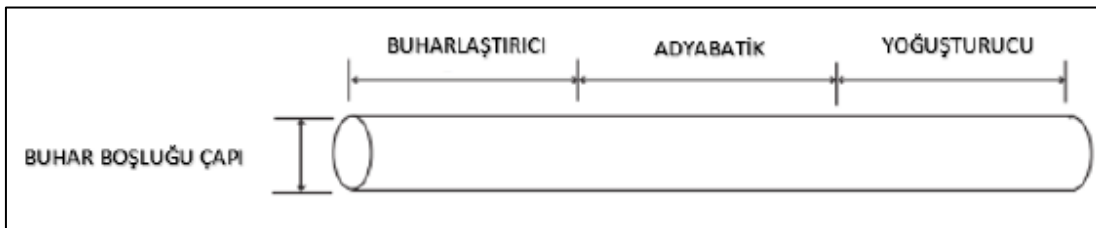
Şekil 4.15 incelendiğinde suyun uyumlu olduğu kap yapıları bakır (Cu),Nikel (Ni) ve Titanyum (Ti) olarak belirlenmiştir. Bu üç malzemenin arasında termal iletkenliği en yüksek olan bakırdır. Ayrıca maliyet açısından da oldukça avantaj sağlayan bakır konteyner malzemesi olarak seçilmiştir. (Zohuri, 2016)

#### 4.4.3. Fitol veya kılcal yapı seçimi

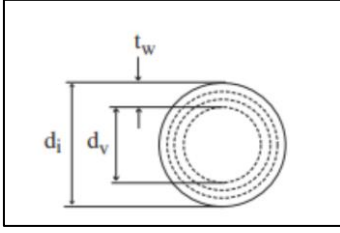
Isı borularına bakıldığı zaman kondenserden çıkan sıvıyı tekrar evaporatöre gönderip bir döngü yaratabilmek amacıyla fitil yapılarına ihtiyaç duyulur. Fitil tercihi yapılırken uygun gözenek yapı tercihinde dikkat edilmelidir. Bu tercih yapılırken minimum kılcal yarıçap, yüksek geçirgenlik ve yüksek termal iletkenlik kriterleri göz önüne alınmıştır. Bu projede sinterlenmiş metal lif fitil yapısı tercih edilmiştir. Bu fitil türü homojen fitil türüne girer ve çok ufak metal parçaların paketlenmesiyle elde edilir. Bu fitil türünün tercih edilme sebebi termal iletkenliğinin oldukça yüksek olmasıdır.

#### 4.4.4. Analizler

Bu kısımda ısı borusunun sınırlamaları sayısal olarak hesaplanacaktır. Bu projede ısı borusunun yapımı sırasında iş akışkanı olarak su kullanılacaktır. İş akışkanı çalışma sıcaklığı olan 50-80°C sıcaklık değerine uygun seçilip seçilmediği daha önceki kısımlarda kontrol edilmiştir. Bu akışkana uygun bir fitil yapısı yine önceki kısımda incelenmiş ve istenilen sinterlenmiş fitil yapısı olarak ele alınmıştır ve kap tercihi olarak da yine bakır kullanılmıştır. Öncelikli olarak ısı borusunun yatay yaptığı açı ve uzunluğu belirlenmiştir. Isı borusunun evaporatör uzunluğu 0,08 m, kondenser uzunluğu 0,08 m ve Şekil 4.16'da ve 4.17'de gösterildiği üzere 0,09 m uzunluğunda bir adyabatik bölge tercih edilmiştir. Bu verilen ifadelerin dışında ısı borusu yatay konumda olup iç boru çapı 3 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Isı borusu bölge uzunlukları yapısı



Şekil 4.17. Isı borusunun iç ve dış çap gösterimi

İş akışkanının maksimum çalışma sıcaklığı olan 80°C suyun özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. 80°C suyun özellikleri

| 80°C<br>SUYUN<br>ÖZELLİKLERİ<br>ve BOYUTLAR | Değer     | Sonuç         | Birim             |
|---------------------------------------------|-----------|---------------|-------------------|
|                                             | $\pi$     | 3,14          | -                 |
|                                             | $P_v$     | 47 000        | Pa                |
|                                             | $h_{fg}$  | 2 309 600,000 | J/kg              |
|                                             | $\rho_l$  | 972           | kg/m <sup>3</sup> |
|                                             | $\rho_v$  | 0,29          | kg/m <sup>3</sup> |
|                                             | $k_l$     | 0,668         | W/m.K             |
|                                             | $\mu_l$   | 0,00036       | kg/m.s            |
|                                             | $\mu_v$   | 0,0000119     | kg/m.s            |
|                                             | $\sigma$  | 0,0626        | N/m               |
|                                             | $k_w$     | 401           | W/m.K             |
|                                             | $L_e$     | 0,08          | m                 |
|                                             | $L_c$     | 0,08          | m                 |
|                                             | $L_a$     | 0,09          | m                 |
|                                             | $L_{eff}$ | 0,17          | m                 |
|                                             | $d_v$     | 0,01          | m                 |
|                                             | $r_v$     | 0,005         | m                 |
|                                             | $A_v$     | 0,0000785     | m <sup>2</sup>    |
|                                             | $d_w$     | 0,00004       | m                 |
|                                             | $t_w$     | 0,00016       | m                 |
|                                             | $d_i$     | 0,01032       | m                 |
|                                             | $r_i$     | 0,00166       | m                 |

Isı borusu yatay olarak çalıştığından dolayı, aksenal hidrostatik basınç düşümü sıfır olacaktır. Faz geçiş basınç gradyanı ve evaporatördeki başlangıç basınç gradyanı ihmal edilir. Kılcal fitilleme yapısı içinde üretilen maksimum kılcal basınç farkı kılcal limit olarak adlandırılır.

Daha önce de belirtildiği gibi kılcal limit belirlemek için gereken denklem (4.3)’te verilmiştir:

$$\Delta P_{c,m} = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_{norm} \quad (4.3)$$

Buradaki kılcal limit hesaplanırken sırasıyla buhar basınç düşüşü, sıvı basınç düşüşü ve normal hidrostatik basınç düşüşü değerleri dikkate alınarak hesap yapılmıştır.

Öncelikle bu kısımda maksimum kılcal basınç farkı ( $\Delta P_{c,m}$ ) hesaplanmadan önce fitil yapısı için etkin kılcal yarıçap değeri belirlenmelidir. Çeşitli fitil yapıları için etkin kılcal yarıçap tablosu Çizelge 4.2'deki gibidir.

Çizelge 4.2. Çeşitli fitil yapıları için etkin kılcal yarıçap tablosu

| Yapı                         | $r_c$                                     | Veri                                                                                                            |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dairesel silindir tipi       | $r$                                       | $r = \text{sıvı akış geçişinin yarıçapı}$                                                                       |
| Dikdörtgensel oluk tipi      | $\omega$                                  | $\omega = \text{oluk genişliği}$                                                                                |
| Üçgensel olup tipi           | $\frac{\omega}{\cos\beta}$                | $\beta = \text{yarı dah il açısı}$<br>$\omega = \text{oluk genişliği}$                                          |
| Paralel tel yapısı           | $\omega$                                  | $\omega = \text{tel aralığı}$                                                                                   |
| Tel ekran yapısı             | $\omega + d_w/2 = 1/2N$                   | $\omega = \text{tel aralığı}$<br>$d_w = \text{tel çapı}$<br>$N = \text{inç başına elekgöz sayısı}$              |
| Paketlenmiş küresel yapı     | $0,41r_s$                                 | $r_s = \text{küre yarıçapı}$                                                                                    |
| Sinterlenmiş metal lifyapısı | $\frac{d}{2(1 - \varepsilon)}$            | $d = \text{lif çapı}$ $\varepsilon = \text{gözeneklilik}$<br>(gözenek hacminin toplam hacime oranı)             |
| Trapez mikro ısı borusu      | $\frac{\omega}{(\cos\alpha)(\cos\theta)}$ | $\omega = \text{oluk genişliği}$<br>$\alpha = \text{yarı dah il açısı}$<br>$\theta = \text{sıvı ıslatma açısı}$ |

Yukarıdaki tablodan sinterlenmiş metal lif yapısı için olan denkelim kullanılarak etkin kılcal yarıçap hesabı yapılır.

$d$ - Lif çapı: 100  $\mu m$  olarak belirlenmiştir.

$\varepsilon$ - Fitil gözenekliliği (Gözenek hacminin tüm hacme oranı): Genelde  $\varepsilon = 0,9$  mm ve  $\varepsilon = 0,3$  mm olarak değerleri kullanımı mevcuttur.  $\varepsilon = 0,9$  mm değeri hesaplarda kullanılmıştır.

Kılcal basınç hesapları için gerekli denklemler (4.4), (4.5), (4.6) ve (4.7)'de verilmiştir.

Hesaplanan değerler göz önüne alınarak Maksimum Kılcal Basınç ( $\Delta P_{c,m}$ ):

$$\Delta P_{c,m} = \frac{2\sigma}{r_{c,e}} \quad (4.4)$$

Buhar basınç düşüşü ( $\Delta P_v$ ) hesaplanırken uygulanacak denklem:

$$\Delta P_v = \frac{C(f_v Re_v)\mu_v}{2r_v^2 A_v \rho_v h_{fg}} L_{eff} q \quad (4.5)$$

Sıvı basınç düşüşü ( $\Delta P_l$ ) hesaplanırken uygulanacak denklem:

$$\Delta P_l = \frac{\mu}{K A_w \rho_l h_{fg}} L_{eff} q \quad (4.6)$$

$A_w$ -Fitilin kesit alanıdır ve şu denklemle elde edilir:

$$A_w = \frac{\pi(d_i^2 - d_v^2)}{4} \quad (4.7)$$

$d_i$  ve  $d_v$  sırasıyla ısı borusunun iç çapı ve ısı borusunun buhar yolu çapıdır ve tabloda uygun şekilde gösterilmiştir. K çeşitli fitil yapıları için geçirgenliği ifade eder. Çeşitli fitil yapıları için fitil geçirgenliği Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çeşitli fitil yapıları için fitil geçirgenliği tablosu

| YAPI                                       | K                                          | VERİ                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dairesel silindir (arter veya tünel fitil) | $\frac{r^2}{8}$                            | $r = \text{sıvı akış geçiş yarıçapı}$                                                                                                                                                                 |
| Açık dikdörtgensel oluk tipi fitil         | $\frac{2\varepsilon(r_{h,l}^2)}{f_l Re_l}$ | $\varepsilon = \text{fitil gözenekliliği}$<br>$\omega = \text{oluk genişliği}$<br>$s = \text{oluk aralığı}$<br>$\delta = \text{oluk derinliği}$<br>$r_{h,l} = \frac{2\omega\delta}{\omega + 2\delta}$ |
| dairesel anüler fitil                      | $\frac{2(r_{h,l}^2)}{f_l Re_l}$            | $r_{h,l} = r_1 - r_2$                                                                                                                                                                                 |

Çizelge 4.3. (devam) Çeşitli fitil yapıları için fitil geçirgenliği tablosu

|                                   |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| sarı ekran fitili                 | $\frac{d_w^2 \varepsilon^3}{122(1 - \varepsilon)^2}$                                                                                                                       | $d_w = \text{tel çapı}$<br>$\varepsilon = 1 - \frac{\pi N d_w}{4}$<br>$N = \text{inç başına ağ sayısı}$<br>$\varepsilon = \text{gözeneklilik (gözenek hacminin toplam hacme oranı)}$ |
| paketlenmiş küre tipi fitil       | $\frac{r_s^2 \varepsilon^3}{37,5(1 - \varepsilon)^2}$                                                                                                                      | $r_s = \text{küre yarıçapı}$<br>$s = \text{gözeneklilik}$                                                                                                                            |
| sinterlenmiş metal lif tipi fitil | $C_1 \frac{y^2 - 1}{y^2 + 1}$ $y = 1 + \frac{C_2 d^2 \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}$ $C_1 = 6,0 \times 10^{10} \text{ m}^2$<br>$C_2 = 3,3 \times 10^3 \text{ m}^{-2}$ | $d = \text{lif çapı}$<br>$s = \text{gözeneklilik (gözenek hacminin toplam hacme oranı)}$                                                                                             |
| Trapez mikro ısı borusu           | $\frac{2\varepsilon(r_{h,l}^2)}{f_l Re_l}$                                                                                                                                 | $r_{h,l} = r_1 - r_2$                                                                                                                                                                |
| Dikdörtgensel arter fitil tipi    | $\frac{2(r_{h,l}^2)}{f_l Re_l}$                                                                                                                                            | $\omega = \text{arter genişliği}$<br>$\delta = \text{arter derinliği}$<br>$N = \text{arter sayısı}$<br>$f_l Re_l = 16 \text{ for laminar}$                                           |

Sinterlenmiş metal lif tipi formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılır.

Normal hidrostatik basınç düşüşü ( $\Delta P_{norm}$ ) bulunurken uygulanacak denklem (4.8):

$$\Delta P_{norm} = \rho_l g d_v \cos \psi \quad (4.8)$$

Çizelge 4.4'te kapiler limit değerleri tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. Kapiler limit tablosu

| 80°C İÇİN DEĞERLER   |                   |               |                  |
|----------------------|-------------------|---------------|------------------|
| <i>KAPİLER LİMİT</i> | Değer             | Sonuç         | Birim            |
|                      | $\Delta P_{c,m}$  | 250,4         | Pa               |
|                      | $\Delta P_v$      | 0,01          | Pa               |
|                      | d                 | 0,1           | mm               |
|                      | $\varepsilon$     | 0,9           |                  |
|                      | $r_{c,e}$         | 0,5           | mm               |
|                      | $f_v, Re_v$       | 16            | -                |
|                      | C                 | 1             |                  |
|                      | $A_w$             | 0,00000510438 | m <sup>2</sup>   |
|                      | $C_1$             | 600000000000  | m <sup>2</sup>   |
|                      | $C_2$             | 3300          | 1/m <sup>2</sup> |
|                      | $\gamma$          | 1,000002406   | -                |
|                      | K                 | 144341,8264   | -                |
|                      | $\Delta P_l$      | 2,40595E-15   | Pa               |
|                      | $\Delta P_{norm}$ | 95,35320      | Pa               |
|                      | q                 | 12592,77291   | W                |
|                      | $Re_v$            | 58367,08213   | -                |

Sürüklenme limitini bulunurken kullanılacak denklem (4.9):

$$q_{e,max} = A_v h_{fg} \left( \frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,w}} \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

$r_{h,w}$  Hidrolik yarıçap değeridir. Bu değeri kullanabilmemiz için gerekli olan denklem (4.10) ve (4.11):

$$D_{h,w} = \frac{4A_w}{\pi(d_i + d_v)} \quad (4.10)$$

$$r_{h,w} = \frac{D_{h,w}}{2} \quad (4.11)$$

Kaynama limitini bulunurken kullanılacak denklem (4.12):

$$q_{b,max} = \frac{4\pi L_e k_{eff} T_v \sigma}{h_{fg} \rho_v \ln \frac{r_i}{r_v}} \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{c,e}} \right) \quad (4.12)$$

Yukarıda verilen denklemdeki  $k_{eff}$  fitillerin etkin ısı iletkenliğini belirtir. Çeşitli fitiller için etkin ısı iletkenliği tablosu Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Sıvıya doymuş çeşitli fitil yapıları için etkin ısı iletkenliği tablosu

| Fitil yapıları                    | $k_{eff}$                                                                                                   |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Seri olan sıvı ve fitil yapısı    | $\frac{k_l k_w}{\varepsilon k_w + k_l (1 - \varepsilon)}$                                                   |
| Paralellikte sıvı ve fitil yapısı | $\varepsilon k_w + k_l (1 - \varepsilon)$                                                                   |
| Sargılı ekran fitili              | $\frac{k_l [(k_l + k_w) - (1 - \varepsilon)(k_l + k_w)]}{(k_l + k_w) + (1 - \varepsilon)(k_l + k_w)}$       |
| Paketlenmiş küre şeklinde fitil   | $\frac{k_l [(2k_l + k_w) - 2(1 - \varepsilon)(k_l - k_w)]}{(2k_l + k_w) + (1 - \varepsilon)(k_l + k_w)}$    |
| Dikdörtgen oluk şeklinde fitil    | $\frac{(w_f k_l k_w \delta) + (w k_l (0,185 w_f k_w + \delta k_l))}{(w + w_f)(0,185 w_f k_w + \delta k_l)}$ |
| Sinterlenmiş metal lifler         | $\varepsilon^2 k_l + (1 - \varepsilon)^2 k_w + \frac{4\varepsilon(1 - \varepsilon)k_l k_w}{k_l + k_s}$      |

$k_{eff}$  bulabilmek için sinterlenmiş metal lifler formülü kullanılır.

Sonik limit hesaplanırken iki farklı türden hesaplanabilir. Bunlar Levy denklemi ve Busse denklemlerine göre.

Denklem (4.13)'teki Levy denklemine göre:

$$Q_s = A_v \rho_0 \lambda \left( \frac{\gamma_0 R_v T_v}{2(\gamma_0 + 1)} \right)^{1/2} \quad (4.13)$$

Denklem (4.14)'teki Busse denklemine göre:

$$q_{s,max} = 0,474 h_{fg} (A_v \rho_v P_v)^{1/2} \quad (4.14)$$

Viskoz limit hesaplanırken denklem (4.15) kullanılır:

$$Q_{vapor,max} = \frac{\pi r_v^4 h_{fg} \rho_v P_v}{12 \mu_v L_{eff}} \quad (4.15)$$

Çizelge 4.6'da limitler bir arada görülebilir.

Çizelge 4.6. Limit tablosu

| 80°C İÇİN DEĞERLER |                 |                 |       |
|--------------------|-----------------|-----------------|-------|
|                    | Değer           | Sonuç           | Birim |
| SÜRÜKLEME LİMİTİ   | $q_{e,max}$     | 1365,58144      | W     |
|                    | $D_{h,w}$       | 0,00032         | m     |
|                    | $r_{h,w}$       | 0,00016         | m     |
| KAYNAMA LİMİTİ     | $q_{b,max}$     | 567,11959       | W     |
|                    | $k_{eff}$       | 4,79116         | -     |
|                    | $k_l$           | 0,66800         | W/m.K |
|                    | $k_w$           | 401,00000       | W/m.K |
| SONİK LİMİT-1      | $q_{s,max}$     | 10 033,04355    | W     |
| SONİK LİMİT-2      | $Q_s$           | 11 342,09806    | W     |
|                    | $\gamma_0$      | 1,33000         | -     |
|                    | $T_0$           | 353,00000       | K     |
|                    | $R_v$           | 462             | -     |
|                    | $R$             | 8 314,00000     | -     |
| VİSKOZ LİMİT       | $Q_{vapor,max}$ | 2 544 867,42874 | W     |



## 5. DENEYSEL İNCELEME

Bu deneysel çalışmada, elektronik soğutma ihtiyacı olan profesyonel telsizlerde ısı borusu performansının farklı açılarda nasıl değiştiği incelenmiştir. Deneyde bakırdan imal edilmiş, su ile %50 doldurulmuş sinterli bir ısı borusu kullanılmıştır. Isı borusunun üç farklı noktasına yerleştirilen ısılıçiftler aracılığıyla sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Alüminyum plakalar kullanılarak ısıtma işlemi gerçekleştirilmiş ve farklı eğim açılarında (düz zemin, 15°, 30°, 45°, 60° ve 90° (dik konum)) sıcaklık dağılımı ve ısı taşınımı hızı incelenmiştir. Deneyin amacı, farklı eğim açılarındaki yüzeylerde ısı borusu performansını karşılaştırmak ve en etkili ısı borusu açısını belirlemektir. Elde edilen bulgular, profesyonel telsizlerin termal tasarımı ve performansı için kullanılabilir.

Bu çalışma, eğimli yüzeylerde ısı borusu performansının sistematik bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayarak, endüstriyel uygulamalarda termal sistemlerin tasarımını iyileştirmek ve optimize etmek için değerli bir rehberlik sunmaktadır.

### 5.1. Kullanılan Cihazlar

25 cm uzunluk 10 mm çapında sinterlenmiş ısı borusu, 3 adet k tipi ısılıçift, 3 adet veri toplayıcı, termal macun, rezistanslı ısıtma sistemi, sıcaklık kontrol cihazı, açı ayarlanabilir tripod.

### 5.2. Isılıçift Kalibrasyonu

Isılıçift kalibrasyonu oldukça önemli bir adımdır çünkü doğru sıcaklık ölçümleri alabilmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek için gerekli olan bir süreçtir.

Öncelikle, ısılıçift kalibrasyonu ile ölçü aletinin aldığı değerlerin tutarlılığının sağlanması hedeflenir. Bu, ölçümün gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu belirlemek açısından önemlidir. Ayrıca, ölçü aletinin doğruluğunu tespit etmek de kritiktir. Eğer ölçüm cihazı doğru değerleri vermiyorsa, elde edilen veriler güvenilir olmayabilir.

Isılçift kalibrasyonu aynı zamanda ölçüm güvenilirliğini sağlamak için yapılır. Bu, ısılçiftin uzun vadeli ve güvenilir bir şekilde doğru ölçümler yapabilmesini sağlar. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, sürekli ve doğru ölçümler önemlidir.

Isılçiftlerde, referans bağlantı ucu kompanzasyonu önemli bir rol oynar. Bu, ortam sıcaklığından kaynaklanan sapmaların otomatik olarak düzeltilmesini sağlar. Bu da ölçüm doğruluğunu artırır ve güvenilir veriler elde etmeye yardımcı olur.

Kaynayan su kullanarak termometre performansını kontrol etmek ve kayıt altına almak da kalibrasyon sürecinin önemli bir parçasıdır. Bu, ölçü aletinin belirlenen sıcaklık değerlerinde doğru ölçümler yapabildiğini doğrulamak için yapılır.

Resim 5.1’de kaynayan suya yerleştirilen ve sıcaklık ölçümü yapan ısılçiftler gösterilmektedir.



Resim 5.1. Isılçiftlerin kaynayan su sıcaklık ölçümü

Antoine Düzlem Formülü, çeşitli sıvıların kaynama sıcaklıklarını hesaplamak için yaygın olarak kullanılır. Mapcarta’nın paylaştığı 2024 verilerine göre deniz seviyesinden yüksekliği 1200 m olan Çankaya Oran’da deneyin yapıldığı gün ölçülen atmosferik basınç değeri 1006 mb’dir. Su için denklem (5.1) Antoine Düzlem Formülü kullanılır.

$$T_{\text{kaynama}} = 100^{\circ}\text{C} - (0,00312 * h) + (0,00002 * p) \quad (5.1)$$

Burada  $h$  yüksekliği,  $p$  ise atmosferik basıncı göstermektedir. Bu hesaplamada kabın etkisi yok sayılmıştır.  $T_{\text{kaynama}}$  96,46°C olarak bulunur. Isılçiftler kaynayan suyun sıcaklığını 96,5°C, 96,7°C ve 96,5°C göstermektedir. Fark oldukça yakın olduğu için sonuçların direkt olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

### 5.3. Deney Düzenekinin Oluşturulması

Deneyde kullanılan sinterli ısı borusu, 25 cm uzunluğunda ve 10 mm çapında bakırdan imal edilmiştir. Bu ısı borusu, içerisinde su bulunan bir akışkanı barındırmaktadır. Sıcaklık ölçümleri için ise üç adet ısılçift, borunun yüzeyine kritik noktalara yerleştirilmiştir. Bu ısılçiftler, sırasıyla başlangıç noktasına yani diğer adıyla evaporatör bölgeye, 20 cm uzaklıktaki ikinci bir noktaya ve 25 cm uzaklıktaki uç noktaya yani kondenser bölgesine konumlandırılmıştır.

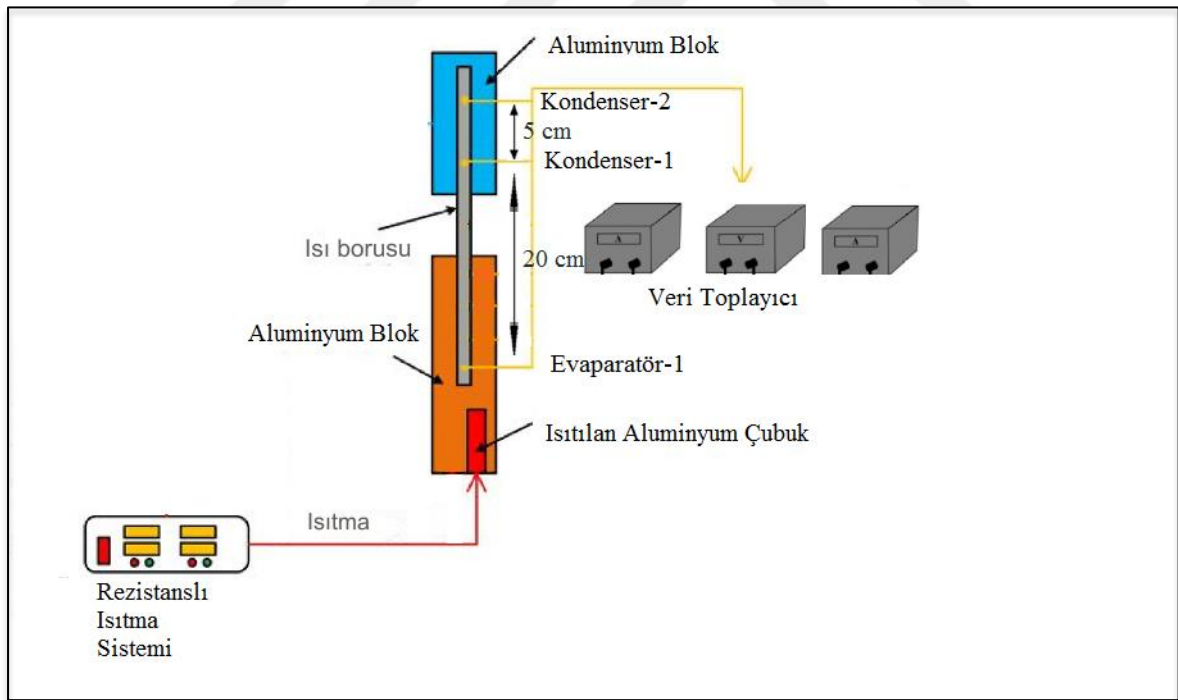
Rezistanslı ısıtma sistemi, alüminyum plakalar arasına entegre edilerek, alüminyum plakanın belirli sıcaklıklara ısıtılmasını sağlamaktadır. Alüminyum plakanın ısıtılması, telsiz cihazındaki işlemcinin 50°C ila 70°C arasında değişen sıcaklık seviyelerine ulaşmasını sağlayacak bir senaryo oluşturulmaktadır. Bu süreç, alüminyum plakanın kontrollü bir şekilde ısıtılmasıyla gerçekleşecek olup, işlemcinin optimum performansını sağlamak adına hassas bir termal yönetim gerektirecektir. Isı taşınımının etkin bir şekilde gerçekleşebilmesi için, farklı yüzeyler arasında termal macun kullanılmıştır. Termal macun kullanılan yüzey Resim 5.2’de gösterilmiştir.



Resim 5.2. Termal macun kullanılan yüzey

Deneyin temel odak noktasını, ısı borusu üzerine yerleştirilen ısılıçiftler aracılığıyla sıcaklık dağılımının ve ısı iletimi hızının belirlenmesi oluşturmaktır. Bu sıcaklık dağılımı, farklı eğim açılarındaki yüzeylerde nasıl değişiklik gösterdiğini anlamak amacıyla incelenmiştir. Elde edilen veriler, özellikle düz zemin,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  (dik konum) eğimli yüzeylerde gerçekleştirilen ölçümlerle birlikte, ısı taşınımının eğimli yüzeylerdeki etkinliğini değerlendirmek ve sistem performansını optimize etmek için kullanılmıştır.

Özellikle, sinterli ısı borusu üzerinde yapılan ölçümler sayesinde farklı eğim açılarındaki yüzeylerde ısı taşınımının nasıl değiştiği sistemli bir şekilde anlaşılabilir. Bu bilgiler, endüstriyel uygulamalarda termal sistemlerin tasarımını iyileştirmek ve optimize etmek için değerli bir rehberlik sunabilir. Farklı açılarda eğimli yüzeylerde elde edilen veriler, bu sistemlerin belirli eğimlere göre nasıl tepki verdiğini açıkça göstererek, tasarım kararlarını destekleyebilmektedir.. Bu nedenle, deneyin sonuçları, mühendislik uygulamalarında termal verimliliği artırmak ve endüstriyel süreçleri optimize etmek isteyen profesyoneller için önemli bir kaynak olacaktır. Resim 5.3'te deney düzeneği gösterilmiştir.

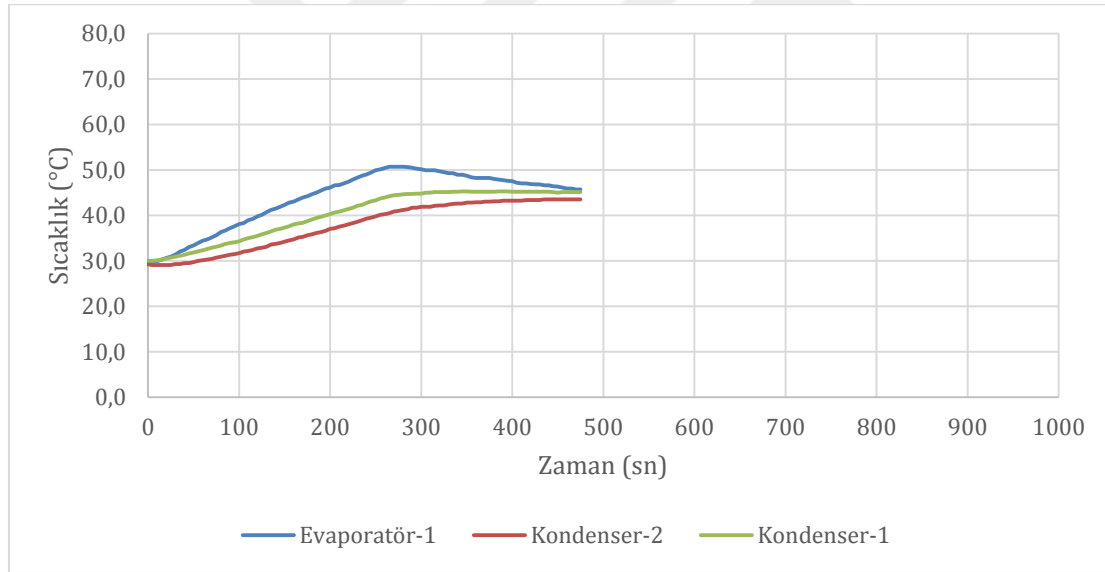


Resim 5.3. Deney düzeneği şeması

## 5.4. Sıcaklık Ölçümleri

### 5.4.1. Deney-1 (0° açı, 50°C Sıcaklık)

Isı borusuna düz zemin üzerinde (0° açı) ısılıçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak 30°C olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen sıcaklık olan 50°C'ye, 255 saniye içinde ulaşılmıştır. 475 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 400-450 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa 50°C'ye ulaştığında evaporatör-1 ve kondenser-1 ısılıçifti arasındaki sıcaklık farkı 10°C'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılıçiftlerindeki sıcaklık farkı 3,6°C'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 200-250 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deneylere ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri Ek-1'de yer almaktadır. Deney-1 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

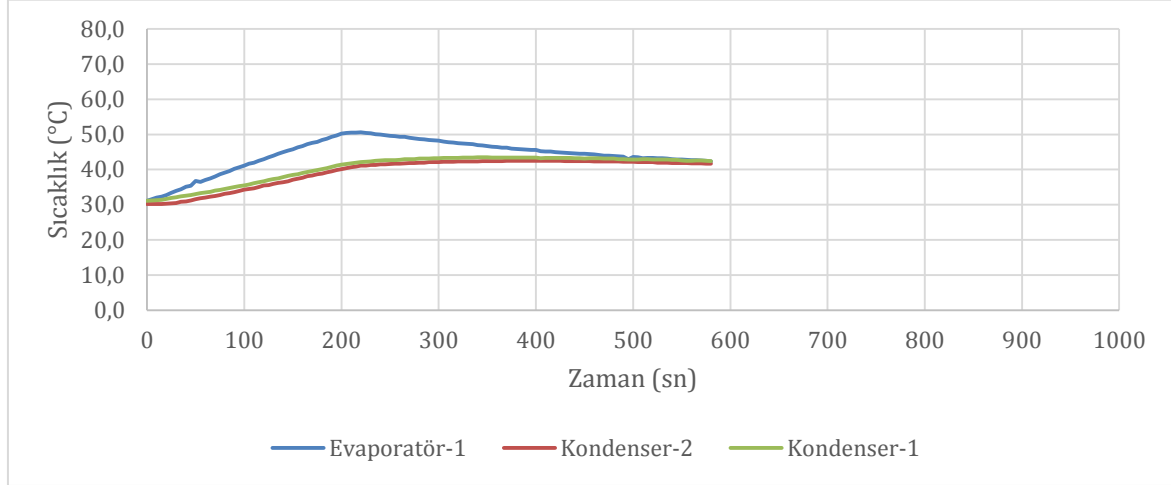


Şekil 5.1. Deney-1 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

### 5.4.2. Deney-2 (15° açı, 50°C Sıcaklık)

Isı borusuna tripod üzerinde zemin ile 15° açı verilerek ısılıçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak 30°C olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen maksimum sıcaklık olan 50°C'ye, 200 saniye içinde ulaşılmıştır. 580 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 400-450 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa 50°C'ye ulaştığında evaporatör-

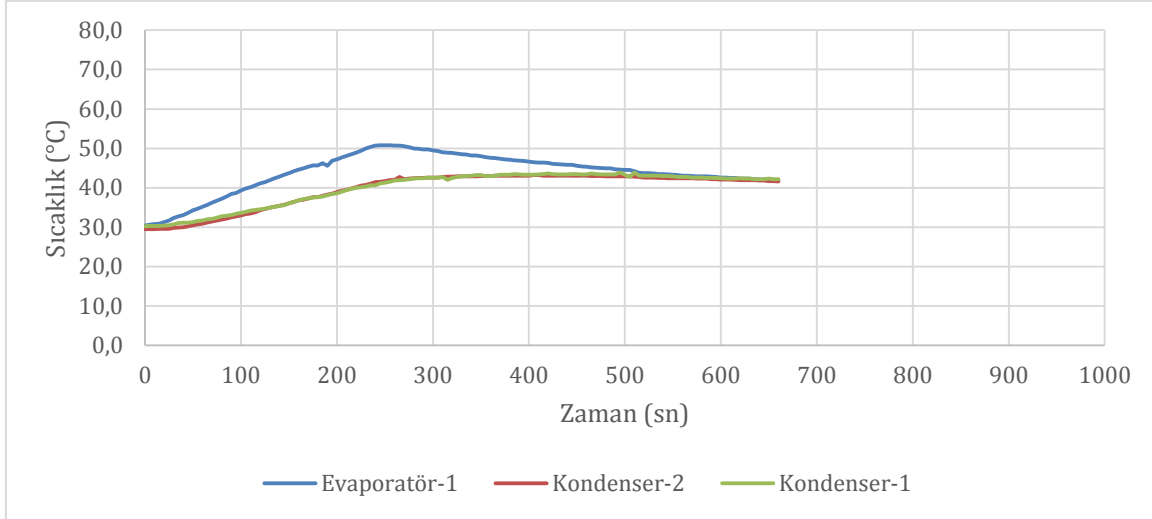
1 ve kondenser-1 ısılçift arasındaki sıcaklık farkı  $10^{\circ}\text{C}$ 'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılçiftlerdeki sıcaklık farkı  $1,3^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 250-300 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deney-2 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Deney-2 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

#### 5.4.3. Deney-3 ( $30^{\circ}$ açı, $50^{\circ}\text{C}$ Sıcaklık)

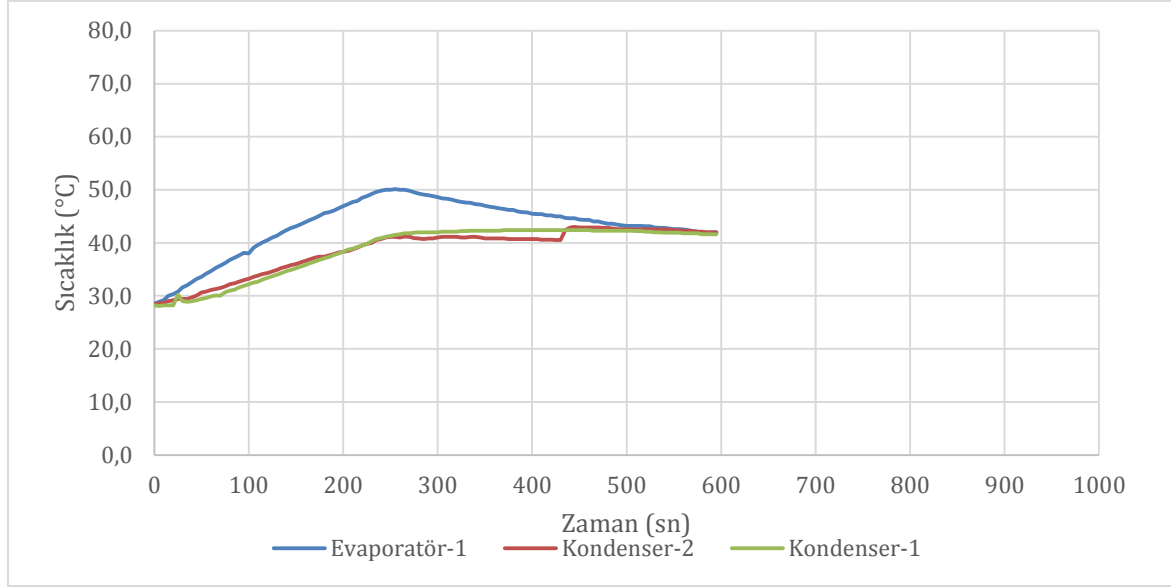
Isı borusuna tripod üzerinde zemin ile  $30^{\circ}$  açı verilerek ısılçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak  $30^{\circ}\text{C}$  olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen sıcaklık olan  $50^{\circ}\text{C}$ 'ye, 230 saniye içinde ulaşılmıştır. 660 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 500-550 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa  $50^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığında evaporatör-1 ve kondenser-1 ısılçift arasındaki sıcaklık farkı  $10^{\circ}\text{C}$ 'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılçiftlerdeki sıcaklık farkı  $0,4^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 300-350 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deney-3 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Deney-3 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

#### 5.4.4. Deney-4 (45° açı, 50°C Sıcaklık)

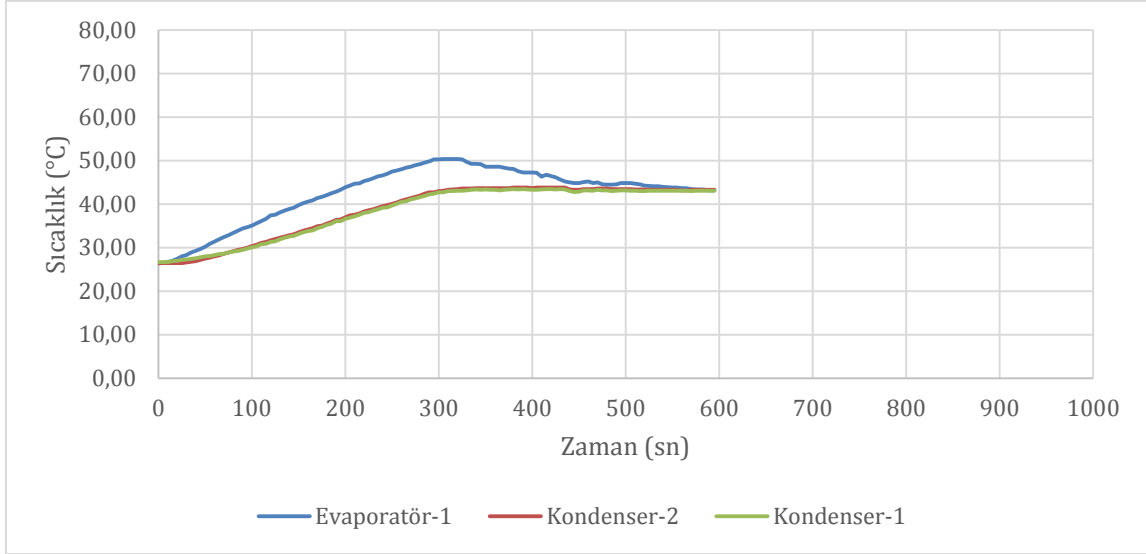
Isı borusuna tripod üzerinde zemin ile 45° açı verilerek ısılıçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak 28,5°C olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen sıcaklık olan 50°C'ye, 245 saniye içinde ulaşılmıştır. 595 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 500-550 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa 50°C'ye ulaştığında evaporatör-1 ve kondenser-1 ısılıçift arasındaki sıcaklık farkı 9°C'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılıçiftlerdeki sıcaklık farkı 0,1°C'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 255-305 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deney-4 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Deney-4 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

#### 5.4.5. Deney-5 (60 ° açı, 50°C Sıcaklık)

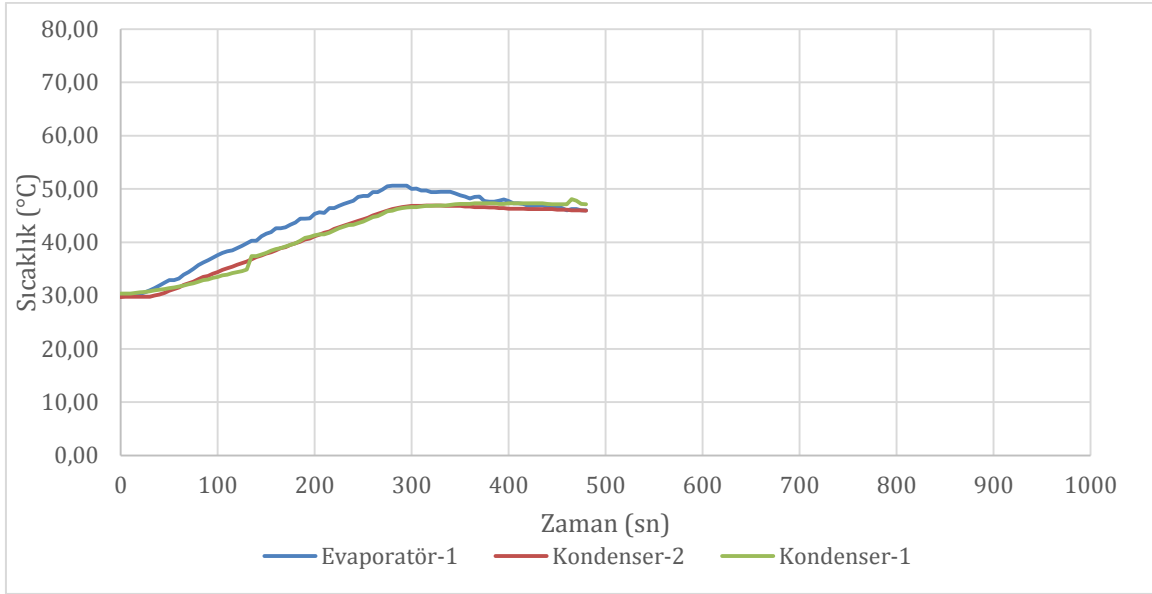
Isı borusuna tripod üzerinde zemin ile 60° açı verilerek ısılıçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak 26,5°C olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen sıcaklık olan 50°C'ye, 295 saniye içinde ulaşılmıştır. 595 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 550-595 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa 50°C'ye ulaştığında evaporatör-1 ve kondenser-1 ısılıçift arasındaki sıcaklık farkı 7,6°C'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılıçiftlerdeki sıcaklık farkı 0,3°C'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 255-305 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deney-5 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Deney-5 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

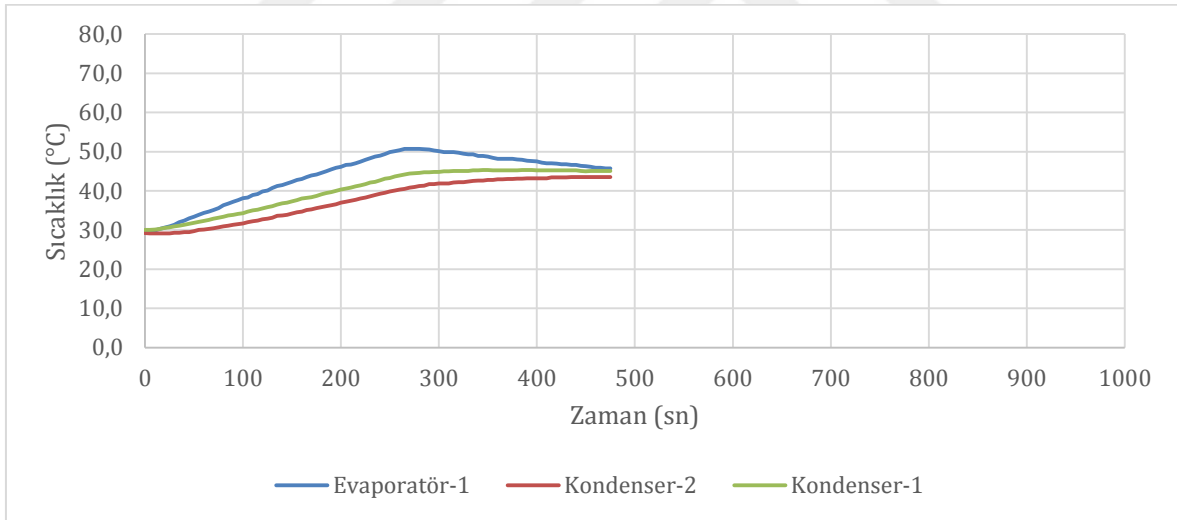
#### 5.4.6. Deney-6 (90 ° açılı, 50°C Sıcaklık)

Isı borusuna tripod üzerinde zemin ile 90° açılı verilerek ısılıçiftlerin yerleştirilmesiyle başlangıç sıcaklığı, yaklaşık olarak 30°C olarak tespit edilmiştir. Önceden belirlenen sıcaklık olan 50°C'ye, 270 saniye içinde ulaşılmıştır. 480 saniyelik deneysel ölçüm sonuçlarına göre, sistem denge sıcaklığına yaklaşık 450-500 saniye gibi bir sürede ulaşmaktadır. Sistem önceden belirlenen en yüksek sıcaklığa 50°C'ye ulaştığında evaporatör-1 ve kondenser-1 ısılıçift arasındaki sıcaklık farkı 5°C'dir, kondenser-1 ve kondenser-2 ısılıçiftlerindeki sıcaklık farkı 0,3°C'dir. Sistem, maksimum sıcaklığa ulaştıktan sonra 180-230 saniye gibi bir sürede dengeye gelmiştir. Deney-6 verilerine ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

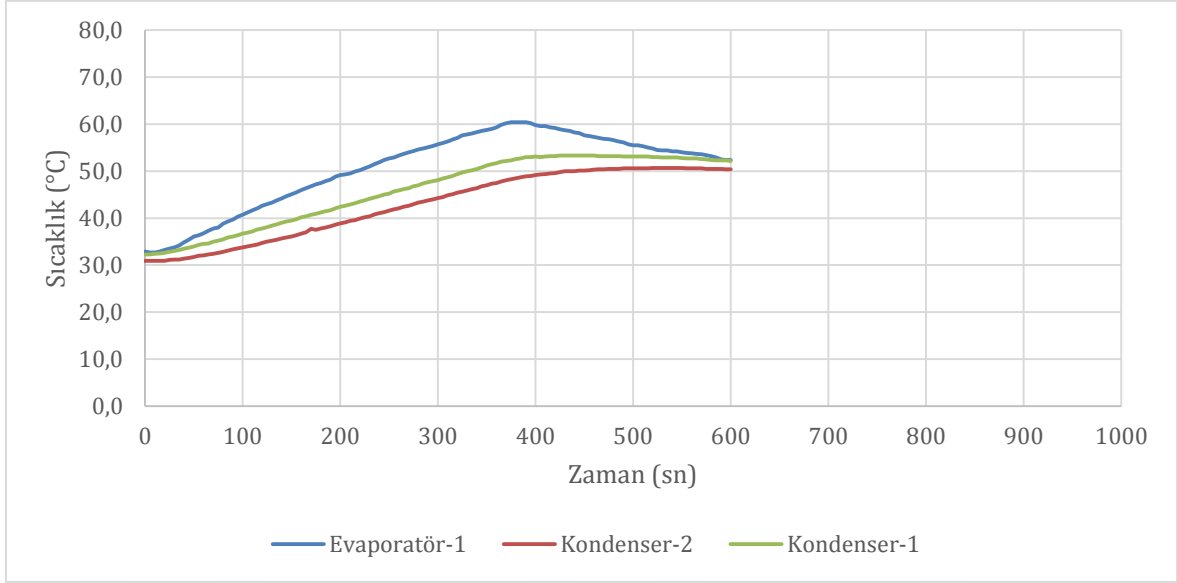


Şekil 5.6. Deney-6 verilerine ait sıcaklık - zaman grafiği

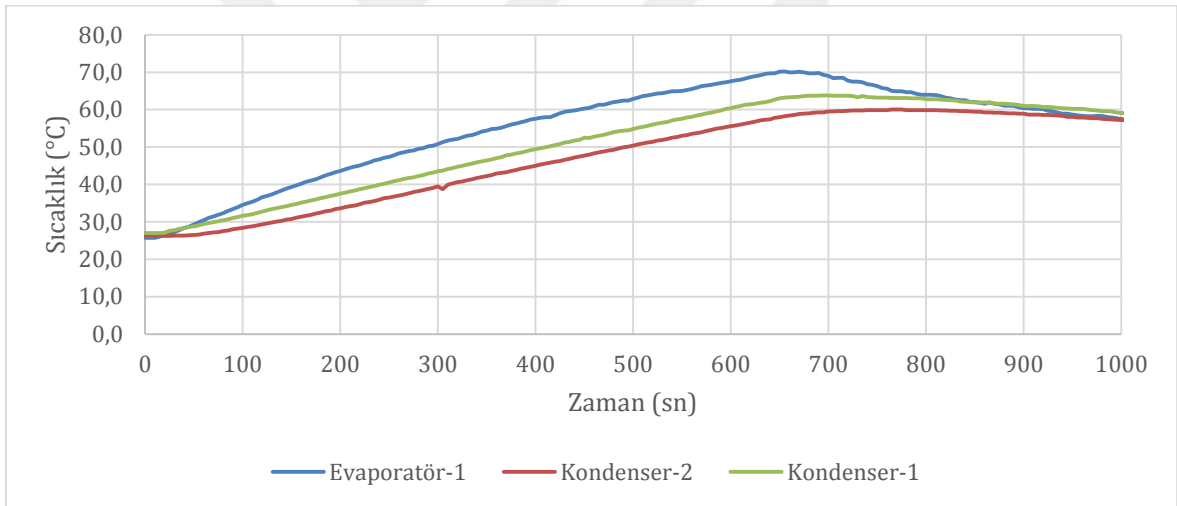
Tüm deney grafikleri Şekil 5.7 ile 5.24'e kadar görülebilir..



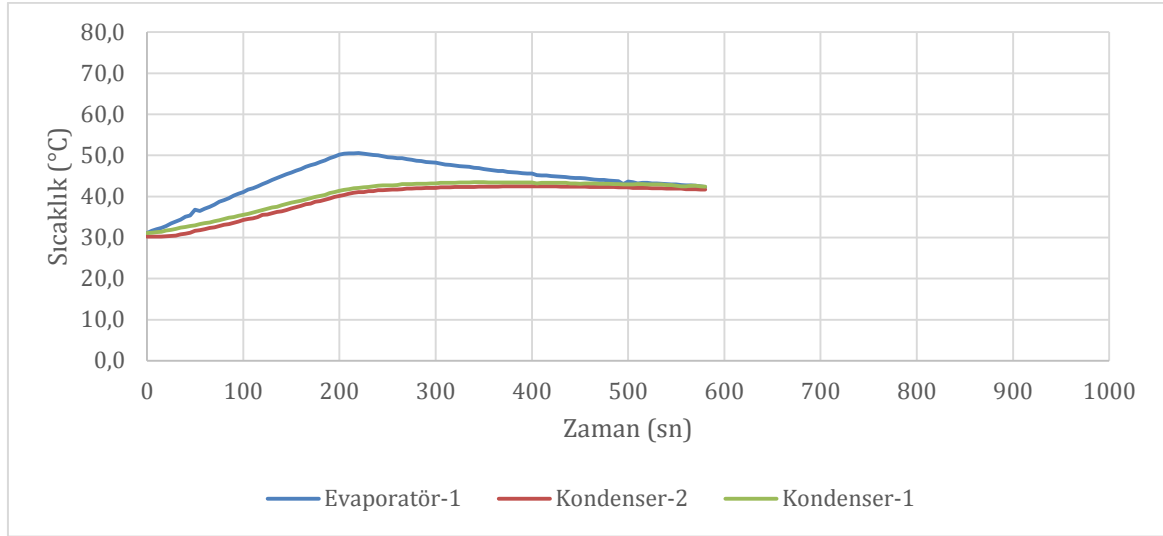
Şekil 5.7. 0° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



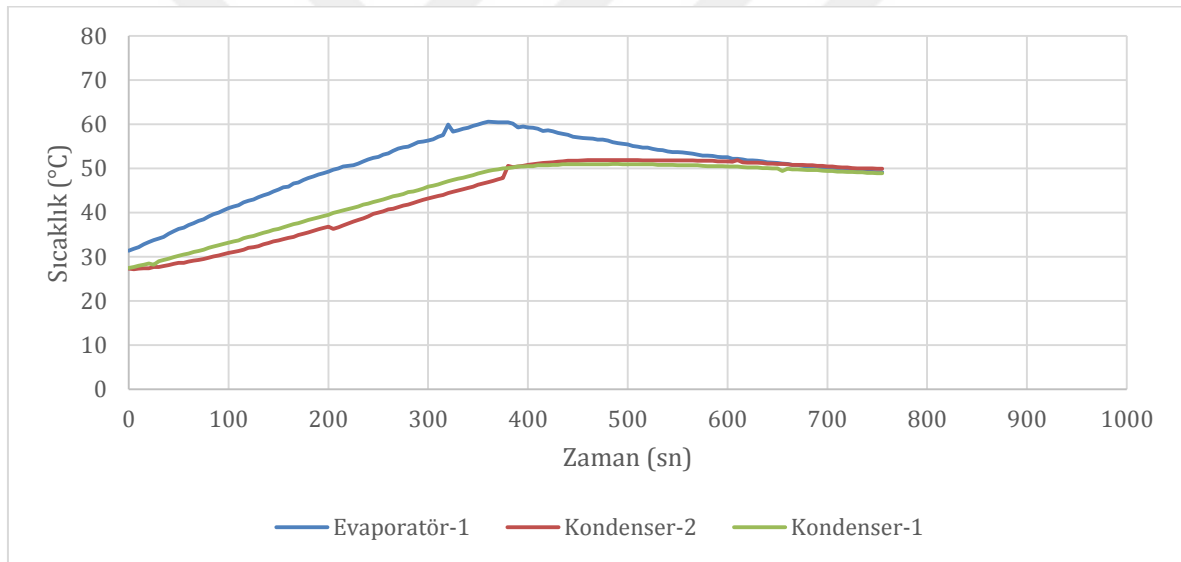
Şekil 5.8. 0° açı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



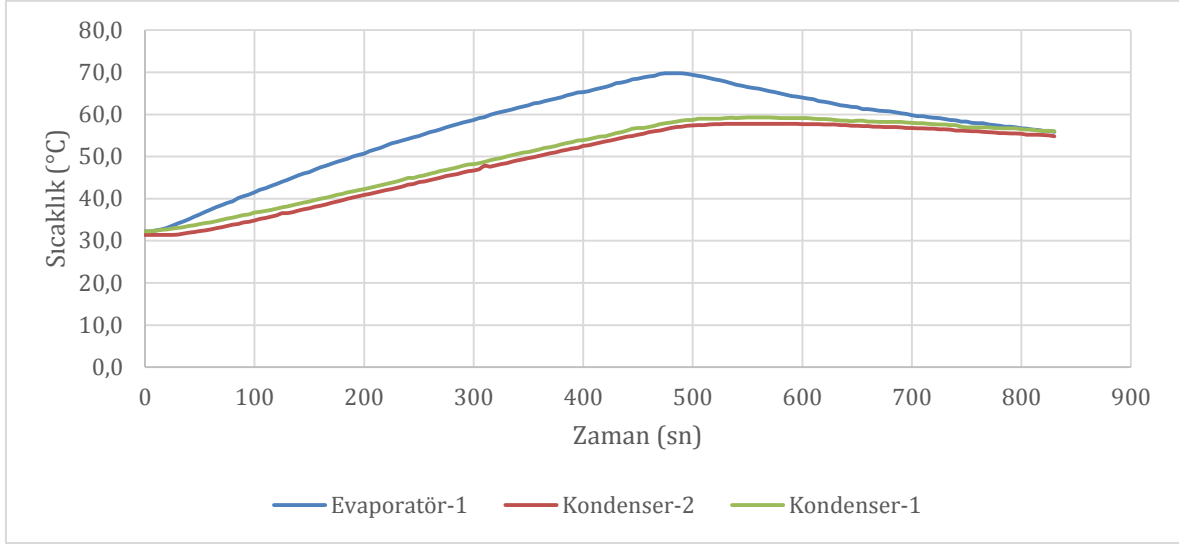
Şekil 5.9. 0° açı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



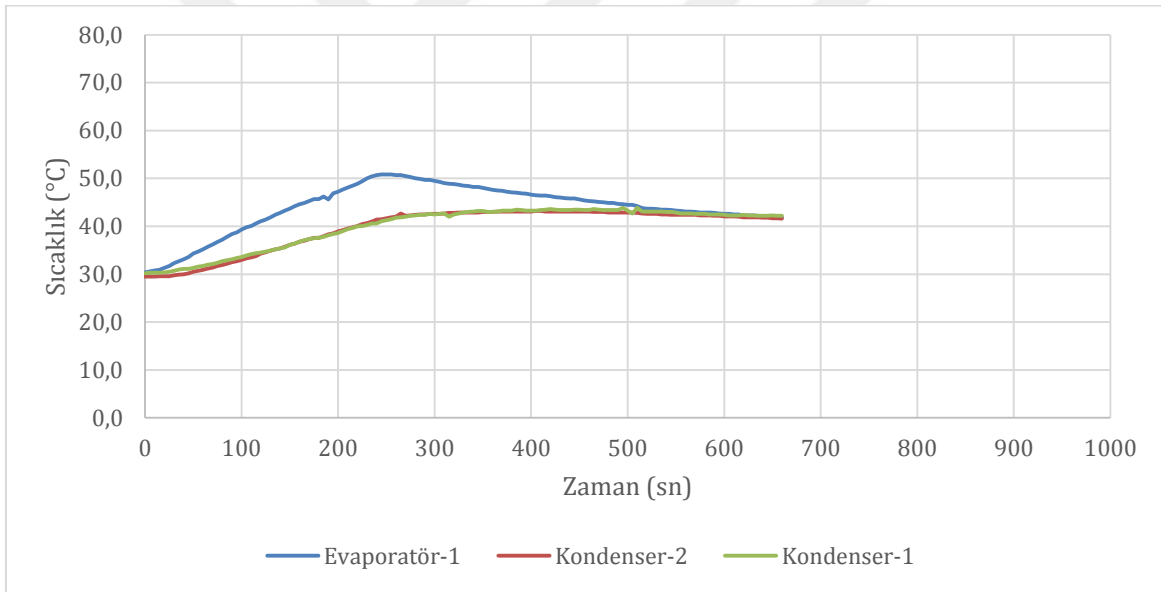
Şekil 5.10. 15° açı ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



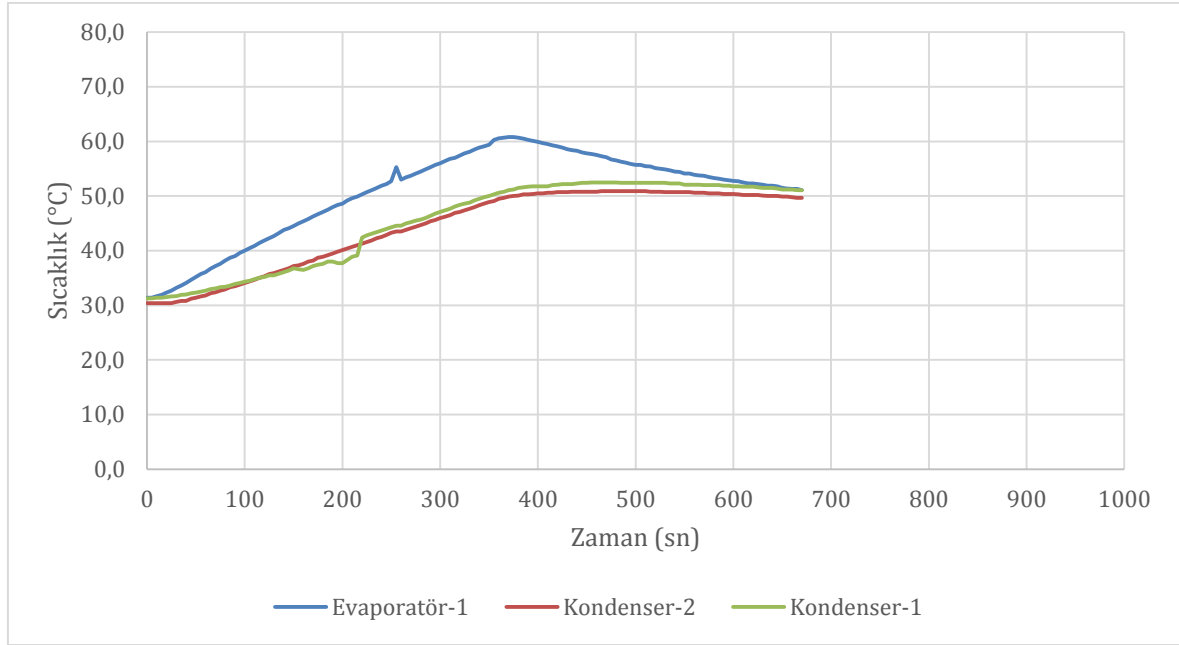
Şekil 5.11. 15° açı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



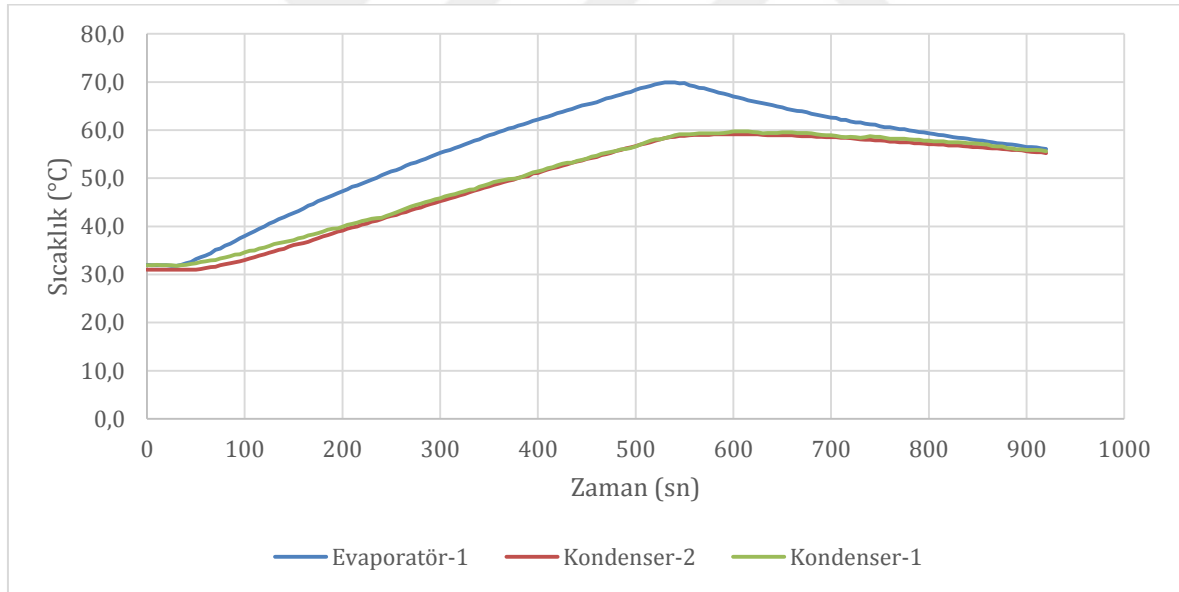
Şekil 5.12. 15° açı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



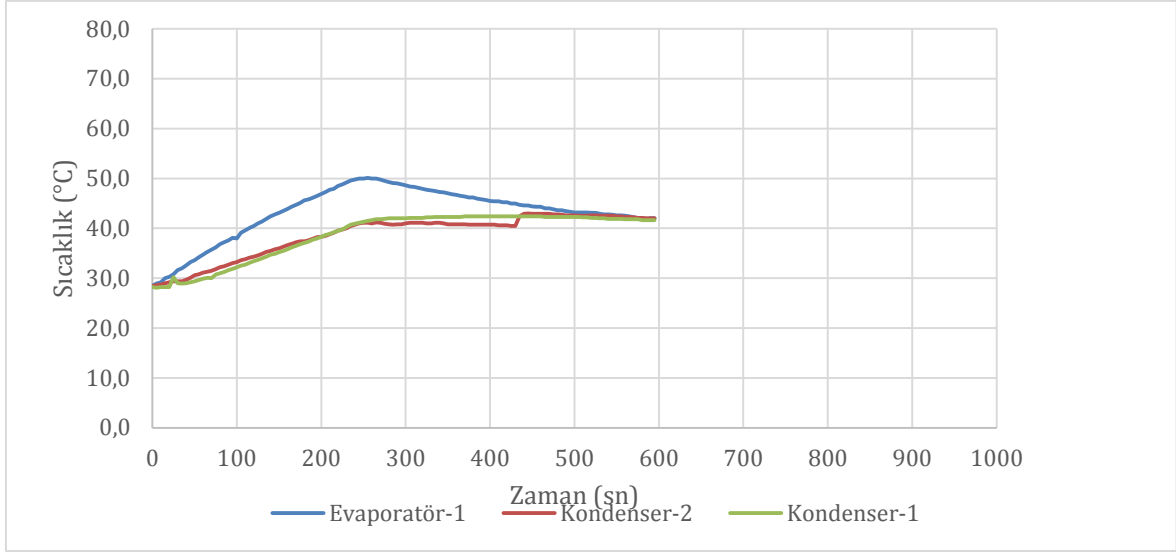
Şekil 5.13. 30° açı ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



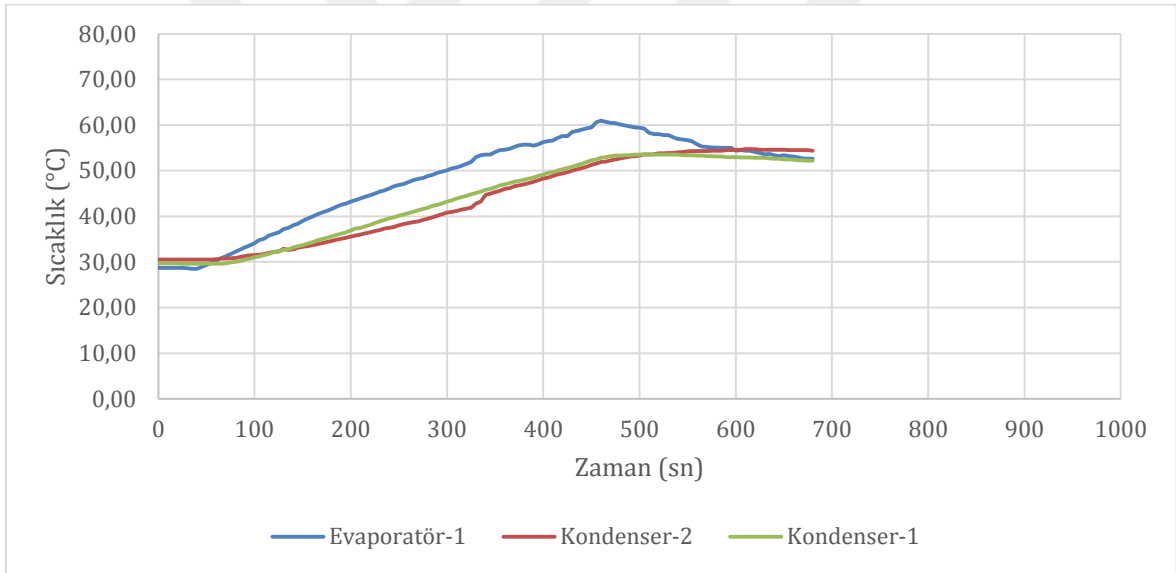
Şekil 5.14. 30° açı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



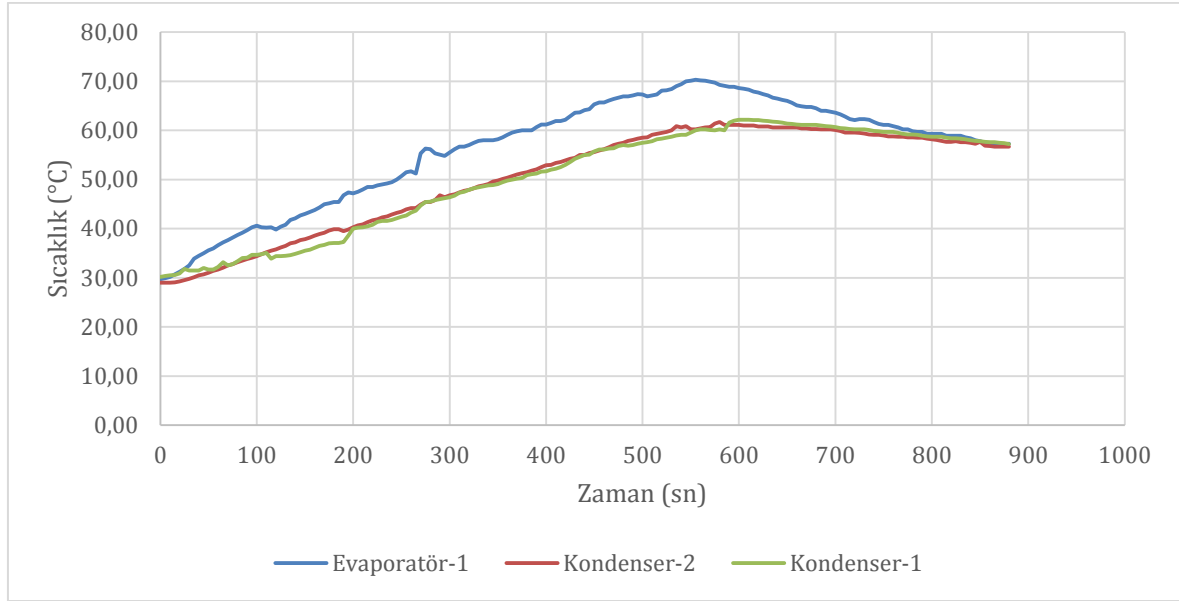
Şekil 5.15. 30° açı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



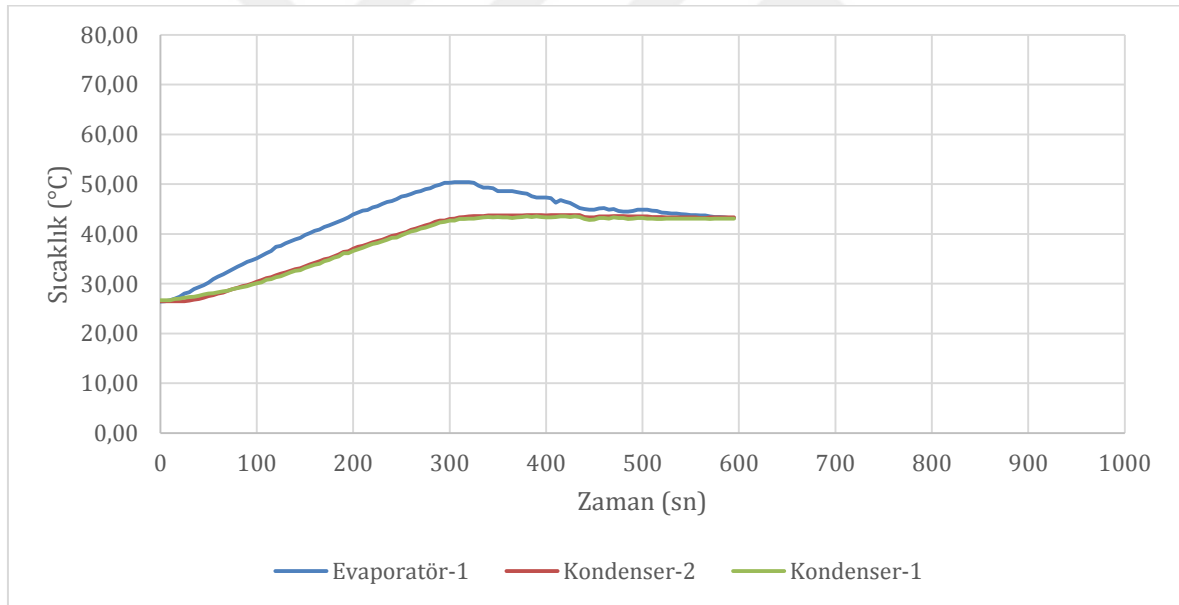
Şekil 5.16. 45° açı ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



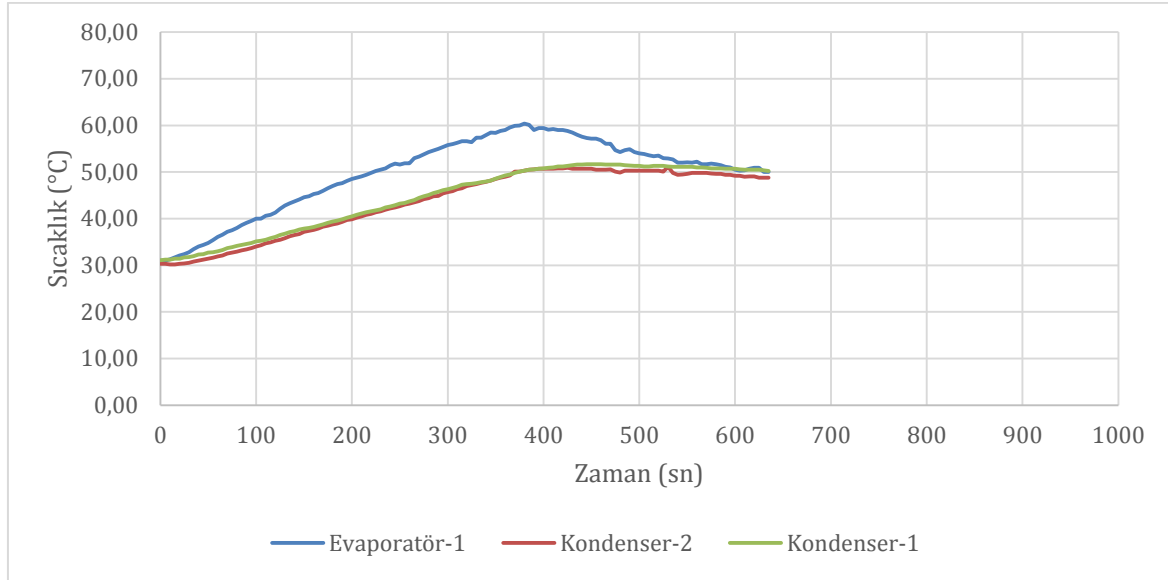
Şekil 5.17. 45° açı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



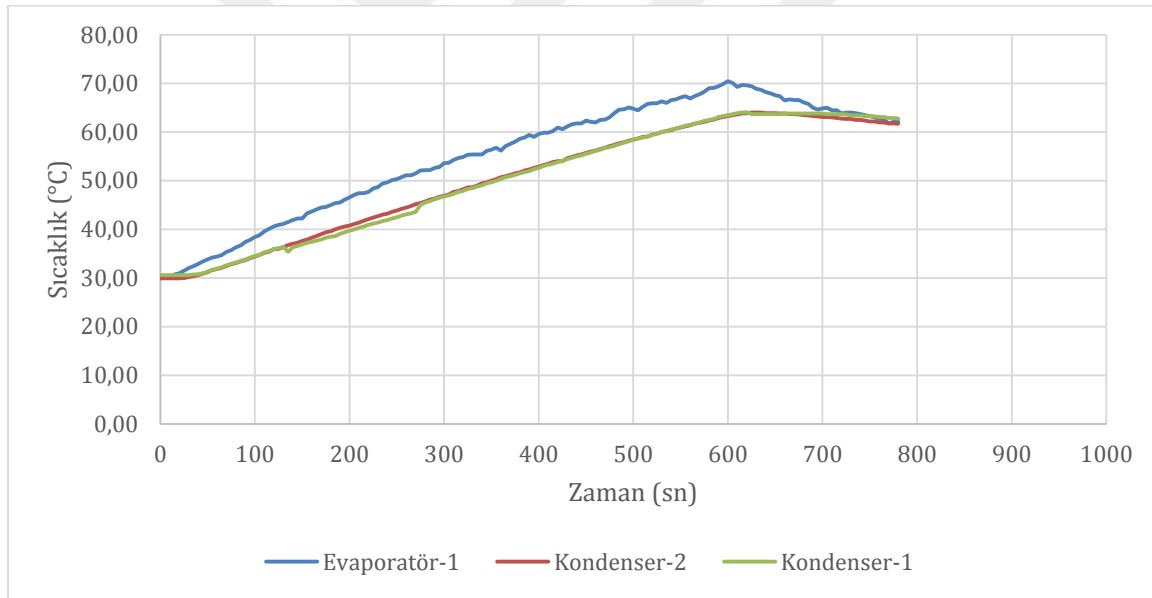
Şekil 5.18. 45° açı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 5.19. 60° açı ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



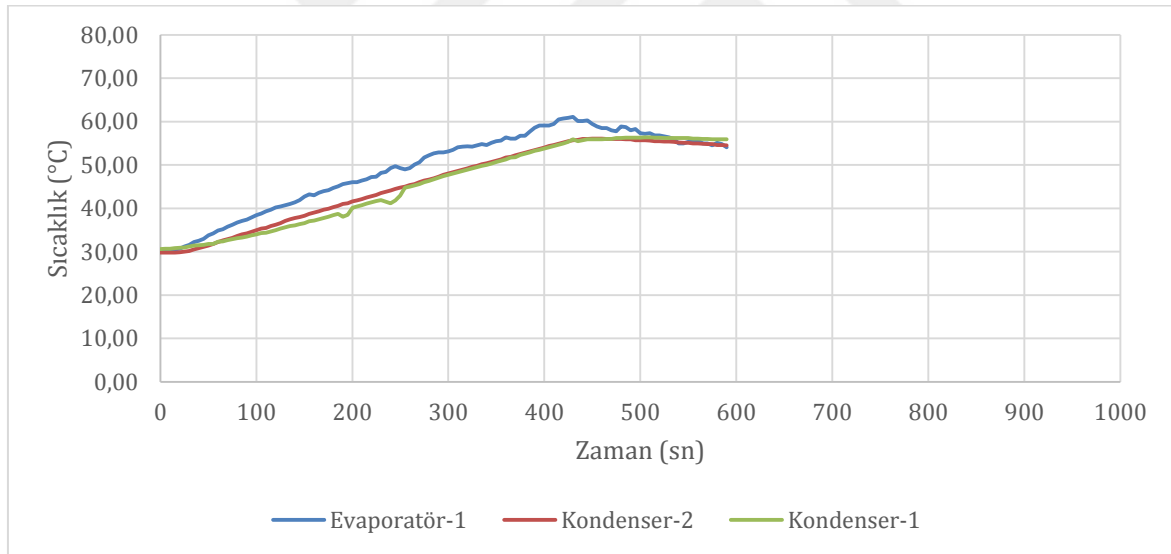
Şekil 5.20. 60° açı ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



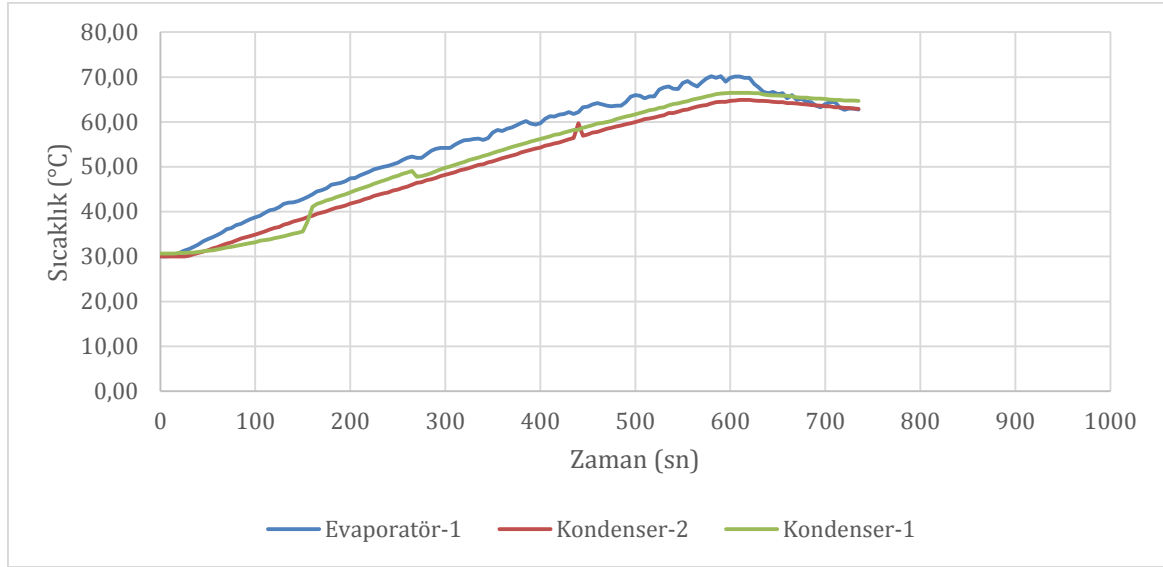
Şekil 5.21. 60° açı ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 5.22. 90 ° aç ve 50°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 5.23. 90 ° aç ve 60°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 5.24. 90° aç ve 70°C sıcaklık için sıcaklık-zaman grafiği

Başlangıçta oda sıcaklığında olan ısı borusu; sırasıyla 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklara çıkarılarak 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 90°'lik farklı açılarda sıcaklık dağılımı ve ısı geçiş hızı gözlemlenmiştir. Deney grafiklerine bakıldığında, sistem önceden belirlenen sıcaklığa ulaştığında ve dengeye gelirken kondenser-1 ile kondenser-2 arasındaki sıcaklık farkı aç arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir.. Isı taşınım hızının azalması yerçekimi ve kapiler etki ile açıklanabilir. Bu durum, tartışma ve sonuç bölümünde daha ayrıntılı ele alınmıştır.



## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Profesyonel telsiz cihazları soğutmak için daha çok fan ile soğutma sistemi kullanılır. Fan ile soğutma sistemleri, genellikle elektronik cihazlarda ve bilgisayar donanımlarında yaygın olarak kullanılan, hava akımı yaratarak ısıнын uzaklaştırılmasını sağlayan mekanizmalardır. Avantajları arasında, düşük maliyetli olmaları, kolay montaj edilebilmeleri ve geniş bir sıcaklık aralığında etkili olmaları sayılabilir. Ancak, fanların dezavantajları arasında yüksek enerji tüketimi, gürültü üretimi ve mekanik bileşenlerin zamanla aşınarak arızalanma riski bulunmaktadır. Isı boruları ise, ısıнын daha verimli ve sessiz bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan kapalı sistemlerdir. Isı boruları, pasif soğutma yöntemleri arasında yer aldığından enerji tüketmezler ve hareketli parça içermedikleri için daha güvenilir ve uzun ömürlüdürler. Isı boruları, farklı tiplerde üretilir; fitilli ısı boruları, döngü ısı boruları, ve sinterlenmiş ısı boruları gibi çeşitleri mevcuttur. Sinterlenmiş ısı boruları, yüksek termal iletkenlik ve esneklik sunarak çeşitli uygulamalarda etkin bir çözüm sağlar.

Profesyonel telsiz cihazlarının içerisine yerleştirilen ısı boruları, cihaz tasarımına bağlı olarak farklı açılarda monte edilebilir ya da cihazlar farklı operasyon sahalarında çalışırken çeşitli açılarda konumlandırılabilir. Bu durum, ısıl performans üzerinde önemli etkilere sahiptir. Deneysel incelemede, sinterli ısı borusunda yer ile yapılan açı arttıkça ısı taşınım hızının yavaşladığı gözlemlenmiştir. Zemin ile  $0^{\circ}$  açıdan  $30^{\circ}$  açığa kadar yapılan deneylerde ısı taşınım hızının giderek azaldığı  $45^{\circ}$  açıdan  $90^{\circ}$  açığa kadar olan deneyler de ısı taşınımının farklılık olmadan birbirine benzer bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Jang'ın 2024 yılında yayınlanan çalışmasında olduğu gibi eğim açıları yataydan dikeye artıkça ısı taşınım performansında azalma görülmüştür. Jang'ın da belirttiği gibi açı dikeyden yataya yükseldikçe ısı taşınım kabiliyetinde bir artış olduğunu göstermiştir. Bu durum, yerçekimi kuvveti ile gelişen termal dağılımın artmasına ve ısı taşınım yüzey alanının artmasına bağlanabilir, bu da daha yüksek soğutma ve ısıtma yeteneklerine yol açar. Yatay konumlandırma durumunda, yerçekimi kuvveti geçersiz kılınarak çalışma sıvısının evaporatöre doğru kontrollü akışı sağlanır. Isı borularında ısı taşınım, borunun yer ile yaptığı açıya bağlıdır. Eğim açısının artması, kılcal kuvvetin etkisini azaltarak ısı taşınımını yavaşlatır. Bu nedenle, ısı borularının maksimum ısı taşınım kabiliyeti için mümkün olduğunca yatay konumlandırılması tercih edilir.

Bu çalışmanın Jang'ın çalışmasından farkı: Jang'ın çalışmasında yalnızca 0°, 45° ve 90° açılarda ölçümler yapılmışken, bu çalışmada 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 90° açılarda daha detaylı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ara açılarda sıcaklık değişimlerini daha ayrıntılı bir şekilde ele alarak, ısı taşınım performansının her açıda nasıl değiştiğini kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu, ısı borularının farklı açılardaki davranışlarını daha iyi anlamamıza ve termal sistemlerin optimizasyonu için daha fazla veri sağlamamıza olanak tanımaktadır.

Yerçekimi, sıvı haldeki ısı taşıyıcının borunun alt kısmına doğru çekilmesine neden olduğu görülmüştür. Boru ile yer arasındaki açı arttıkça, yerçekiminin sıvı üzerindeki etkisinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu da sıvının borunun üst kısmına ulaşmasını zorlaştırmış ve ısı taşınımını yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Isı borularında ısı taşınımı, sıvı haldeki ısı taşıyıcının buharlaşması ve yoğuşması ile gerçekleşir. Boru ile yer arasındaki açı arttıkça, buharlaşma ve yoğuşma işlemleri daha az verimli hale gelir. Bu da ısı taşınım hızının düşmesine neden olduğu görülmüştür.

Kapilerlik, sıvıların dar kanallarda kendiliğinden yukarı doğru hareket etme eğilimidir. Boru ile yer arasındaki açı arttıkça, kapiler kuvvetin etkisi de azalır. Bunun da da sıvının borunun üst kısmına ulaşmasını zorlaştırdığı ve ısı taşınımını yavaşlattığı görülmüştür..

Sonuç olarak, sinterli ısı borusunda yer ile yapılan açı arttıkça ısı taşınım hızının yavaşladığı yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır. Profesyonel telsiz cihazlarında 0° ile 30° açılar arasında yerleştirilecek ısı borularının kullanılması, etkin bir soğutma sağlayarak cihazın performansını artırabilir. Ancak, bu yaklaşımın ticari rekabet bağlamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Isı boruları genellikle diğer soğutma yöntemlerine göre daha maliyetlidir. Bununla birlikte, performansı ve uzun vadeli tasarrufları göz önünde bulundurularak maliyetin rekabet avantajıyla dengelenmesi mümkündür. Diğer elektronik soğutma yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak en uygun seçenek belirlenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Ahn, C. H., Oh, J. H. (2014). Resistive grounding technique of heat sink for reducing radiation noise. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 9, 1724-1728.
- Alammar, A. A., Al-Dadah, R. K., Mahmoud, S. M. (2016). Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1055-1065.
- Başığit, İ. B., Genç, A., Doğan, H. and Helhel, S. (2020). The effect of fin types of the heat sinks on radiated emission on the printed circuit board at C band. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(8), 1-8.
- Başığit, İ. B., Genç, A., Doğan, H., Senel, F. A. and Helhel, S. (2021). Deep learning for both broadband prediction of the radiated emission from heat sinks and heat sink optimization. *Engineering Science and Technology*, 24(3), 706-714.
- Behi, H. G. (2017). Investigation of FDM-assisted heat pipe for electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1132-1142.
- Borgmeyer, B., Ma, H. B. (2007). Experimental investigation of oscillating motions in a flat plate pulsating heat pipe. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 21(2), 405-409.
- Brahim, T. (2021). CFD analysis of hotspots copper metal foam flat heat pipe for electronic cooling applications. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106583.
- Bruce, R., Barba, M., Bouchet, F., Bonelli, A. and Baudouy, B. (2019). Transient thermal behavior of a neon pulsating heat pipe (PHP). *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 45-52.
- Cai, B., Zhang, J., Wu, H. (2019). Experimental investigation on thermal performance of loop heat pipe using microencapsulated phase change materials as working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113981.
- Cai, Y., Mei, S. J., Liu, D., Zhao, F. Y. and Wang, H. Q. (2018). Thermoelectric heat recovery units applied in the energy harvest built ventilation: Parametric investigation and performance optimization. *Energy Conversion and Management*, 171(3), 1163-1176.
- Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M. and Terdtoon, P. (2003). Closed loop pulsating heat pipes Part A: Parametric experimental investigations. *Applied Thermal Engineering*, 23, 2009-2020.
- Chikando, E., Connor, S., Archambeault, B. (2010). *Reduction of heat sink emissions by application of lossy materials*. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 239-243.
- Chougule, S. S. (2018). Application of paraffin based nanocomposite in heat pipe module for electronic equipment cooling. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 23333-23338.

- Cui, X., Zhu, Y., Li, Z. and Shun, S. (2014). Combination study of operation characteristics and heat transfer mechanism for pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 65, 394-402.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: fundamentals & applications* (6th ed.). New York: McGraw-Hill Education, 85-93.
- Doğan, H., Başığit, İ. B., Genç, A. (2019). *Variation of radiated emission from heat sinks on PCB according to fin types*. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies. Ankara, 145-152.
- Doğan, H., Başığit, İ. B., Genç, A. and Helhel, S. (2020). Parametric study of the radiated emission from the plate-fin CPU heat sink at 2-8 GHz. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(6), 2401-2410.
- Fadhl, B., Wrobel, L. C., Jouhara, H. (2013). Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 60(1-2), 122-131.
- Faghri, A. (1995). *Heat pipe science and technology*. New York: Taylor & Francis, 85-93.
- Fumoto, K., Sasa, M., Okabe, T., Savino, R., Inamura, T. and Shirota, M. (2019). Research on heat transfer performance of the open-loop micro pulsating heat pipe with self-wetting fluids. *Microgravity Science and Technology*, 31, 261-268.
- Genç, A., Başığit, İ. B., Doğan, H. (2020). Elektronik devrelerdeki silindirik soğutuculardan kaynaklanan elektromanyetik girişimlerinin 0-10 GHz bandında araştırılması. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 502-510.
- Genç, A., Doğan, H., Başığit, İ. B. and Helhel, S. (2021). A review of the EMI effect on natural convection heat sinks. *IETE Journal of Research*, 13(2), 502-510.
- Genç, A., Doğan, H., Başığit, İ. B. and Helhel, S. (2021). Heat sink pre-selection chart to minimize radiated emission in broadband on the PCB. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(2), 419-426.
- Genç, A., Helhel, S. (2019). *The comparison of EM characteristics of the heat sinks with equal base area depending on the various geometries*. In Proceedings of the 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems, Sakarya, 979-985.
- Gibbons, M. J. (2021). A review of heat pipe technology for foldable electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117087.
- Grover, G. M., Cotter, T. P., Erickson, G. F. (1964). Structures of very high thermal conductance. *Journal of Applied Physics*, 35(6), 1990-1991.
- Han, H., Cui, X., Zhu, Y. and Sun, S. (2014). A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP). *International Journal of Thermal Sciences*, 82, 138-147.

- Hao, T., Ma, H., Ma, X. (2019). Heat transfer performance of polytetrafluoroethylene oscillating heat pipe with water, ethanol, and acetone as working fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 109-120.
- He, X., Hubing, T. H. (2012). A closed-form expression for estimating the maximum radiated emissions from a heat sink on a printed circuit board. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(1), 205-211.
- Helhel, S., Karaman, A. B., Kocakuşak, A. (2021). Heat sinks as quasi-antennas and frog forming frequency and feeding point effect. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(16), 2153-2162.
- Huang, G., Tang, Y., Wang, P., Lu, L. and Yuan, W. (2018). Thermal characterisation of micro flat aluminium heat pipe arrays by varying working fluid and inclination angle. *Applied Sciences*, 8, 1052, 1-21.
- İnternet: Mete, S. (2016). Moore Kanunu, Web: <https://e-bergi.com/y/moore-kanunu/>, Son Erişim Tarihi: 17/03/2024.
- Jahan, S. A., Ali, M., Islam, M. Q. (2013). Effect of inclination angles on heat transfer characteristics of a closed loop pulsating heat pipe (CLPHP). *Procedia Engineering*, 56, 82-87.
- Jang, I.-N., Ahn, Y.-S. (2024). Sintered wick heat pipes with excellent heat transfer capabilities—Case study. *Energies*, 17(5), 1113.
- Kammuang-Lue, N., Sakulchangsatjatai, P., On-Ai, K. and Terdtoon, P. (2017). Thermal resistance of rotating closed-loop pulsating heat pipes: Effects of working fluids and internal diameters. *Thermal Science*, 21(6B), 2993-3000.
- Karaman, A. B., Kocakuşak, A., Genç, A. and Helhel, S. (2019). *The effect of feeding point on electromagnetic emission due to heat sink*. In Proceedings of the PIERS Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome, 54-62.
- Katpradit, T., Wongratanaphisan, T., Terdtoon, P. and Kamonpet, P. (2005). Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe at critical state. *Applied Thermal Engineering*, 25, 2138-2151.
- Khandekar, S., Charoensawan, P., Groll, M. and Terdtoon, P. (2003). Closed loop pulsating heat pipes Part B: Visualization and semi-empirical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 23, 2021-2033.
- Khandekar, S., Dollinger, N. and Groll, M. (2003). Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 23, 707-719.
- Kim, B., Li, L., Kim, J. and Kim, D. (2017). A study on thermal performance of parallel connected pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1063-1068.
- Kim, J. S., Bui, N. H., Kim, J. W., Kim, J. H. and Jung, H. S. (2003). Flow visualization of oscillation characteristics of liquid and vapor flow in the oscillating capillary tube heat pipe. *KSME International Journal*, 17(10), 1507-1519.

- Krishna, J. K. (2017). Heat pipe with nano enhanced-FDM for electronic cooling application. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81, 84-92.
- Legierski, J., Wiğcek, B., de Mey, G. (2006). Measurements and simulations of transient characteristics of heat pipes. *Microelectronics Reliability*, 46(1), 109-115.
- Lin, Y. H., Kang, S. W., Wu, T. Y. (2009). Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 29, 573-580.
- Liou, T. M., Chang, S. W., Cai, W. L. and Lan, I. A. (2019). Thermal fluid characteristics of pulsating heat pipe in radially rotating thin pad. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 273-290.
- Lips, S., Bensalem, A., Bertin, Y., Ayel, V., Romestant, C. and Bonjour, J. (2010). Experimental evidences of distinct heat transfer regimes in pulsating heat pipes (PHP). *Applied Thermal Engineering*, 30, 900-907.
- Liu, Y., Li, Z., Li, Y., Kim, S. and Jiang, Y. (2018). Experimental investigation of geyser boiling in a two-phase closed loop thermosyphon with high filling ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 857-869.
- Mantelli, M. B. H. (2021). *Thermosyphons and heat pipes: theory and applications*. New York: Springer International Publishing, 112-115.
- Maydanik, Yu. F. (2005). Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 25(5-6), 635-657.
- Mishkhas, S., Chen, M.-H., Yu, T.-H., Chen, Y.-T., Wu, J.-S., Wang, C.-C. (2024). An Experimental Study of a Grooved Aluminum-Ammonia Heat Pipe: The Effect of Tilting and Non-uniform Heat Transfer on Thermal Behavior. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123714.
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82-85.
- Mousavi, H., Darzi, A. A. R., Farhadi, M. and Omid, M. (2018). A novel heat sink design with interrupted, staggered and capped fins. *International Journal of Thermal Sciences*, 127, 312-320.
- Nazaria, M. A., Ahmadib, M. H., Ghasempoura, R. and Shafiic, M. B. (2018). How to improve the thermal performance of pulsating heat pipes: A review on working fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 630-638.
- Pachghar, P. R., Mahalle, A. M. (2014). Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipe: An experimental study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(8), 3387-3394.
- Patel, V. K. (2018). An efficient optimization and comparative analysis of ammonia and methanol heat pipe for satellite application. *Energy Conversion and Management*, 165, 382-395.

- Pradeep, G. V., Narasimha, K. R. (2017). Thermal performance of a vertical closed loop pulsating heat pipe and analysis using dimensionless numbers. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 11(4), 3240-3255.
- Qu, J., Wu, H., Cheng, P. (2012). Start-up, heat transfer and flow characteristics of silicon-based micro pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6109-6120.
- Rahman, M. L., Mir, F., Nawrin, S., Sultan, R. A. and Ali, M. (2015). Effect of fin and insert on the performance characteristics of open loop pulsating heat pipe (OLPHP). *Procedia Engineering*, 105, 105-112.
- Rao, C. S., Gupta, A. and Narasimha, K. R. (2016). Parametric characterization on the thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(2), 615-624.
- Reay, D. A., Kew, P. A. (2007). *Heat pipes: Theory, design and applications* (5th ed.). Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 46-48.
- Richard, S. G. (1944). *Heat transfer device*. Dayton: Patent Office, 348-350.
- Rittidech, S., Pipatpaiboon, N. and Terdtoon, P. (2007). Heat-transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves. *Applied Energy*, 84, 565-577.
- Rittidech, S., Terdtoon, P., Murakami, M., Kamonpet, P. and Jompakdee, W. (2003). Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition. *Applied Thermal Engineering*, 23, 497-510.
- Saha, M., Feroz, C. M., Ahmed, F. and Mujib, T. (2012). Thermal performance of an open loop closed end pulsating heat pipe. *Heat Mass Transfer*, 48, 259-265.
- Shi, S., Cui, X., Han, H., Weng, J. and Li, Z. (2016). A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1219-1227.
- Shi, W., Liu, X., Su, X., Chen, H., Pan, L. (2023). Influence of Cooling Water Flow Rate on Start and Heat Transfer Performance of Pulsating Heat Pipe at Different Inclination Angles. *Sustainability*, 15(3), 1921.
- Siricharoenpanich, A. W. (2019). Thermal management system of CPU cooling with a novel short heat pipe cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100545.
- Sun, X. Y. (2017). Experimental research of a thermoelectric cooling system integrated with gravity assistant heat pipe for cooling electronic devices. *Energy Procedia*, 105, 4909-4914.
- Sun, J., Yang, L., Zhou, J. (2024). Effects of wick structure and installation angles on the heat transfer characteristics of concentric annular heat pipes: Experimental investigation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 59, 104590.

- Thompson, S. M., Cheng, P. and Ma, H. B. (2011). An experimental investigation of a three-dimensional flat-plate oscillating heat pipe with staggered microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 3951-3959.
- Tseng, C. Y., Yang, K. S., Chien, K. H., Jeng, M. S. and Wang, C. C. (2014). Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 85-92.
- Uddin, A. I., Feroz, C. (2009). Effect of working fluid on the performance of a miniature heat pipe system for cooling desktop processor. *Heat and Mass Transfer*, 46, 113-118.
- Veerasamy, A. B. (2022). Performance of heat pipe with nanorefrigerant in electronic cooling applications. *Materials Today: Proceedings*, 65, 375-379.
- Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y. and Wang, H. (2019). Performance of a flat-plate micro heat pipe at different filling ratios and working fluids. *Applied Thermal Engineering*, 146, 459-468.
- Wang, X. Y. (2022). Visualization study of a flat confined loop heat pipe for electronic devices cooling. *Applied Energy*, 322, 119451.
- Wang, X., , Wan, Z. (2023). Heat transfer performance of a heat pipe with sintered stainless-steel fiber wick. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 103016.
- Wang, Y. (2015). Experimental investigations on operating characteristics of a closed loop pulsating heat pipe. *Frontiers in Energy*, 9(2), 134-141.
- Wang, Z., Wu, X., Cui, W. (2019). Thermal performance of a heat pipe using nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 468-481.
- Weng, Y. C. (2011). Heat pipe with FDM for electronic cooling. *Applied Energy*, 88(5), 1825-1833.
- Wong, S. C., Chen, C. W. (2013). Visualization experiments for groove-wicked flat plate heat pipes with various working fluids and powder-groove evaporator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 396-403.
- Wyatt, T. (1964). *Satellite temperature stabilization system*. Washington: Midwest Research Institute, 152-774.
- Xiao, C. L. (2017). A novel automated heat-pipe cooling device for high-power LEDs. *Energy Procedia*, 111, 1320-1329.
- Xu, G., Liang, S., Vogel, M. and Katoh, T. (2006). *Thermal characterization of pulsating heat pipes*. In Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, IThERM 2006, San Diego, CA, 552-556.
- Xu, H., Yang, Y., Gan, K., Zhang, H., Gao, Y., Li, R., Jiang, Y., Qian, J., Wei, Z., Zheng, Y., Ding, Q. (2023). Heat transfer performance of novel high temperature flat heat pipe (HTFHP) with heating power and inclination angles. *Applied Thermal Engineering*, 220, 119679.

- Yang, K. S., Cheng, Y. C., Liu, M. C. and Shyu, J. C. (2015). Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths. *Applied Thermal Engineering*, 83, 131-138.
- Zeghari, K. L. (2019). Experimental investigation of flat porous heat pipe for cooling TV box electronic chips. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114267.
- Zhang, M., Liu, Z., Ma, G. (2008). The experimental investigation on thermal performance of a flat two-phase thermosyphon. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(9), 1195-1203.
- Zhang, X. M. (2004). Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and water as working fluids. *Experimental Heat Transfer*, 17(1), 47-67.
- Zhao, J. D. (2021). Thermal management strategy for electronic chips based on combination of a flat-plate heat pipe and spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 181, 121894.
- Zhou, W. L. (2019). A novel ultra-thin flattened heat pipe with biporous spiral woven mesh wick for cooling electronic devices. *Energy Conversion and Management*, 180, 769-783.
- Zohuri, B. (2016). *Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management*. New York: Springer International Publishing, Cham, 32-38.





**EKLER**

EK-1. Deney-1'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Deney-1'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 29,9                | 29,2                | 30,0                | 240           | 49,0                | 39,3                | 42,7                |
| 5             | 29,8                | 29,1                | 30,0                | 245           | 49,4                | 39,5                | 43,1                |
| 10            | 29,9                | 29,1                | 30,1                | 250           | 49,9                | 39,8                | 43,3                |
| 15            | 30,3                | 29,1                | 30,3                | 255           | 50,1                | 40,1                | 43,7                |
| 20            | 30,6                | 29,1                | 30,5                | 260           | 50,4                | 40,3                | 43,9                |
| 25            | 30,9                | 29,1                | 30,7                | 265           | 50,7                | 40,5                | 44,2                |
| 30            | 31,3                | 29,3                | 30,9                | 270           | 50,7                | 40,8                | 44,4                |
| 35            | 32,0                | 29,3                | 31,1                | 275           | 50,7                | 41,0                | 44,5                |
| 40            | 32,4                | 29,5                | 31,3                | 280           | 50,7                | 41,2                | 44,6                |
| 45            | 33,0                | 29,5                | 31,6                | 285           | 50,6                | 41,3                | 44,7                |
| 50            | 33,4                | 29,7                | 31,8                | 290           | 50,5                | 41,7                | 44,7                |
| 55            | 33,9                | 30,0                | 32,1                | 295           | 50,3                | 41,7                | 44,8                |
| 60            | 34,4                | 30,1                | 32,3                | 300           | 50,1                | 41,9                | 44,8                |
| 65            | 34,7                | 30,3                | 32,6                | 305           | 49,9                | 41,9                | 45,0                |
| 70            | 35,1                | 30,4                | 32,9                | 310           | 49,9                | 41,9                | 45,0                |
| 75            | 35,6                | 30,7                | 33,1                | 315           | 49,9                | 42,1                | 45,1                |
| 80            | 36,3                | 30,9                | 33,4                | 320           | 49,7                | 42,2                | 45,1                |
| 85            | 36,7                | 31,1                | 33,7                | 325           | 49,5                | 42,2                | 45,1                |
| 90            | 37,2                | 31,3                | 33,9                | 330           | 49,3                | 42,4                | 45,1                |
| 95            | 37,6                | 31,5                | 34,1                | 335           | 49,3                | 42,5                | 45,2                |
| 100           | 38,1                | 31,7                | 34,3                | 340           | 48,9                | 42,6                | 45,2                |
| 105           | 38,3                | 32,0                | 34,7                | 345           | 48,9                | 42,6                | 45,3                |
| 110           | 38,9                | 32,2                | 35,0                | 350           | 48,7                | 42,8                | 45,3                |
| 115           | 39,2                | 32,4                | 35,2                | 355           | 48,4                | 42,8                | 45,2                |
| 120           | 39,8                | 32,7                | 35,5                | 360           | 48,2                | 42,9                | 45,2                |
| 125           | 40,1                | 32,9                | 35,8                | 365           | 48,2                | 42,9                | 45,2                |
| 130           | 40,7                | 33,1                | 36,1                | 370           | 48,2                | 43,0                | 45,2                |
| 135           | 41,2                | 33,6                | 36,5                | 375           | 48,2                | 43,0                | 45,2                |
| 140           | 41,5                | 33,7                | 36,8                | 380           | 48,0                | 43,1                | 45,2                |
| 145           | 41,9                | 33,9                | 37,0                | 385           | 47,9                | 43,1                | 45,3                |
| 150           | 42,3                | 34,2                | 37,3                | 390           | 47,7                | 43,2                | 45,3                |
| 155           | 42,8                | 34,5                | 37,6                | 395           | 47,6                | 43,2                | 45,3                |
| 160           | 43,0                | 34,7                | 38,0                | 400           | 47,5                | 43,2                | 45,2                |
| 165           | 43,5                | 35,1                | 38,2                | 405           | 47,2                | 43,2                | 45,2                |
| 170           | 43,9                | 35,3                | 38,4                | 410           | 47,0                | 43,2                | 45,2                |
| 175           | 44,2                | 35,6                | 38,7                | 415           | 47,0                | 43,4                | 45,2                |
| 180           | 44,6                | 35,8                | 39,1                | 420           | 46,9                | 43,4                | 45,2                |
| 185           | 45,0                | 36,1                | 39,4                | 425           | 46,8                | 43,4                | 45,2                |
| 190           | 45,5                | 36,3                | 39,7                | 430           | 46,8                | 43,4                | 45,2                |
| 195           | 45,9                | 36,6                | 40,0                | 435           | 46,6                | 43,5                | 45,2                |
| 200           | 46,1                | 37,0                | 40,3                | 440           | 46,6                | 43,5                | 45,2                |
| 205           | 46,6                | 37,2                | 40,6                | 445           | 46,4                | 43,5                | 45,1                |
| 210           | 46,7                | 37,5                | 40,8                | 450           | 46,3                | 43,5                | 45,0                |
| 215           | 47,0                | 37,7                | 41,1                | 455           | 46,1                | 43,5                | 45,1                |
| 220           | 47,4                | 38,0                | 41,4                | 460           | 45,9                | 43,5                | 45,1                |
| 225           | 47,9                | 38,3                | 41,7                | 465           | 45,9                | 43,5                | 45,1                |
| 230           | 48,3                | 38,6                | 42,1                | 470           | 45,7                | 43,5                | 45,1                |
| 235           | 48,7                | 38,9                | 42,3                | 475           | 45,7                | 43,5                | 45,1                |

EK-2. Deney-2'ye ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Deney-2'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 31,1                | 30,2                | 31,1                | 290           | 48,4                | 42,1                | 43,1                |
| 5             | 31,6                | 30,2                | 31,2                | 295           | 48,3                | 42,1                | 43,2                |
| 10            | 32,0                | 30,2                | 31,3                | 300           | 48,2                | 42,1                | 43,2                |
| 15            | 32,3                | 30,2                | 31,4                | 305           | 48                  | 42,2                | 43,3                |
| 20            | 32,8                | 30,3                | 31,7                | 310           | 47,8                | 42,2                | 43,3                |
| 25            | 33,4                | 30,4                | 31,9                | 315           | 47,7                | 42,2                | 43,3                |
| 30            | 33,9                | 30,5                | 32,1                | 320           | 47,5                | 42,3                | 43,3                |
| 35            | 34,4                | 30,8                | 32,4                | 325           | 47,4                | 42,3                | 43,4                |
| 40            | 35,1                | 30,9                | 32,6                | 330           | 47,3                | 42,3                | 43,4                |
| 45            | 35,4                | 31,2                | 32,8                | 335           | 47,2                | 42,3                | 43,4                |
| 50            | 36,8                | 31,6                | 33,0                | 340           | 47                  | 42,3                | 43,5                |
| 55            | 36,5                | 31,8                | 33,3                | 345           | 46,9                | 42,4                | 43,5                |
| 60            | 37,0                | 32,0                | 33,5                | 350           | 46,7                | 42,4                | 43,5                |
| 65            | 37,5                | 32,3                | 33,7                | 355           | 46,5                | 42,4                | 43,4                |
| 70            | 38,0                | 32,5                | 34,0                | 360           | 46,4                | 42,4                | 43,4                |
| 75            | 38,7                | 32,8                | 34,2                | 365           | 46,2                | 42,4                | 43,4                |
| 80            | 39,1                | 33,1                | 34,5                | 370           | 46,2                | 42,5                | 43,4                |
| 85            | 39,6                | 33,3                | 34,8                | 375           | 46                  | 42,5                | 43,4                |
| 90            | 40,2                | 33,6                | 35,0                | 380           | 45,9                | 42,5                | 43,4                |
| 95            | 40,7                | 33,9                | 35,3                | 385           | 45,8                | 42,5                | 43,4                |
| 100           | 41,1                | 34,3                | 35,5                | 390           | 45,7                | 42,5                | 43,4                |
| 105           | 41,7                | 34,5                | 35,8                | 395           | 45,6                | 42,5                | 43,4                |
| 110           | 42,0                | 34,7                | 36,1                | 400           | 45,6                | 42,5                | 43,4                |
| 115           | 42,5                | 35,0                | 36,4                | 405           | 45,2                | 42,5                | 43,2                |
| 120           | 43,0                | 35,5                | 36,7                | 410           | 45,1                | 42,5                | 43,3                |
| 125           | 43,5                | 35,6                | 37,0                | 415           | 45,1                | 42,5                | 43,3                |
| 130           | 44,0                | 35,9                | 37,3                | 420           | 45                  | 42,5                | 43,3                |
| 135           | 44,5                | 36,2                | 37,5                | 425           | 44,9                | 42,5                | 43,3                |
| 140           | 45,0                | 36,4                | 37,9                | 430           | 44,8                | 42,4                | 43,3                |
| 145           | 45,4                | 36,7                | 38,2                | 435           | 44,7                | 42,4                | 43,3                |
| 150           | 45,8                | 37,1                | 38,5                | 440           | 44,6                | 42,4                | 43,2                |
| 155           | 46,3                | 37,4                | 38,7                | 445           | 44,5                | 42,4                | 43,2                |
| 160           | 46,7                | 37,7                | 39,0                | 450           | 44,5                | 42,4                | 43,1                |
| 165           | 47,2                | 38,1                | 39,3                | 455           | 44,4                | 42,4                | 43,2                |
| 170           | 47,6                | 38,3                | 39,6                | 460           | 44,3                | 42,3                | 43,2                |
| 175           | 47,9                | 38,7                | 39,9                | 465           | 44,1                | 42,3                | 43,2                |
| 180           | 48,4                | 38,9                | 40,1                | 470           | 44                  | 42,3                | 43,1                |
| 185           | 48,8                | 39,2                | 40,4                | 475           | 44                  | 42,3                | 43,1                |
| 190           | 49,3                | 39,5                | 40,8                | 480           | 43,9                | 42,3                | 43,1                |
| 195           | 49,7                | 39,9                | 41,1                | 485           | 43,8                | 42,3                | 43                  |
| 200           | 50,2                | 40,1                | 41,4                | 490           | 43,7                | 42,2                | 43                  |
| 205           | 50,4                | 40,4                | 41,6                | 495           | 43                  | 42,2                | 42,9                |
| 210           | 50,5                | 40,7                | 41,8                | 500           | 43,6                | 42,2                | 42,9                |
| 215           | 50,5                | 40,9                | 42,0                | 505           | 43,5                | 42,1                | 42,9                |
| 220           | 50,6                | 41,1                | 42,1                | 510           | 43,2                | 42,1                | 43                  |
| 225           | 50,4                | 41,1                | 42,2                | 515           | 43,3                | 42,1                | 43                  |
| 230           | 50,3                | 41,3                | 42,3                | 520           | 43,3                | 42,1                | 42,9                |
| 235           | 50,1                | 41,3                | 42,5                | 525           | 43,2                | 42                  | 42,9                |
| 240           | 50,0                | 41,5                | 42,6                | 530           | 43,2                | 42                  | 42,9                |
| 245           | 49,8                | 41,5                | 42,7                | 535           | 43,1                | 42                  | 42,9                |
| 250           | 49,6                | 41,6                | 42,7                | 540           | 43                  | 41,9                | 42,8                |
| 255           | 49,5                | 41,7                | 42,7                | 545           | 42,9                | 41,9                | 42,8                |
| 260           | 49,3                | 41,7                | 42,8                | 550           | 42,9                | 41,9                | 42,6                |
| 265           | 49,3                | 41,8                | 43,0                | 555           | 42,8                | 41,9                | 42,5                |
| 270           | 49,1                | 41,9                | 43,0                | 560           | 42,7                | 41,8                | 42,5                |
| 275           | 48,9                | 41,9                | 43,0                | 565           | 42,7                | 41,8                | 42,6                |
| 280           | 48,7                | 42,0                | 43,1                | 570           | 42,6                | 41,8                | 42,6                |
| 285           | 48,6                | 42,0                | 43,1                | 575           | 42,5                | 41,7                | 42,5                |
| 290           | 48,4                | 42,1                | 43,1                | 580           | 42,3                | 41,7                | 42,4                |

EK-3. Deney-3'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Deney-3'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 30,4                | 29,5                | 30,2                | 330           | 48,5                | 42,9                | 42,9                |
| 5             | 30,6                | 29,5                | 30,3                | 335           | 48,4                | 42,9                | 43                  |
| 10            | 30,8                | 29,5                | 30,3                | 340           | 48,2                | 42,9                | 43,1                |
| 15            | 30,9                | 29,6                | 30,3                | 345           | 48,2                | 42,9                | 43,2                |
| 20            | 31,3                | 29,6                | 30,4                | 350           | 48                  | 43                  | 43,2                |
| 25            | 31,7                | 29,6                | 30,5                | 355           | 47,8                | 43                  | 43                  |
| 30            | 32,3                | 29,8                | 30,7                | 360           | 47,6                | 43                  | 43                  |
| 35            | 32,7                | 29,9                | 31,0                | 365           | 47,5                | 43,1                | 43,1                |
| 40            | 33,1                | 30,0                | 31,1                | 370           | 47,4                | 43,1                | 43,3                |
| 45            | 33,6                | 30,2                | 31,1                | 375           | 47,2                | 43,1                | 43,3                |
| 50            | 34,3                | 30,5                | 31,3                | 380           | 47,1                | 43,1                | 43,3                |
| 55            | 34,7                | 30,7                | 31,6                | 385           | 47                  | 43,1                | 43,5                |
| 60            | 35,2                | 30,9                | 31,7                | 390           | 46,9                | 43,1                | 43,4                |
| 65            | 35,7                | 31,2                | 32,0                | 395           | 46,8                | 43,1                | 43,3                |
| 70            | 36,2                | 31,4                | 32,1                | 400           | 46,6                | 43,1                | 43,3                |
| 75            | 36,7                | 31,7                | 32,4                | 405           | 46,5                | 43,2                | 43,3                |
| 80            | 37,2                | 31,9                | 32,7                | 410           | 46,4                | 43,2                | 43,4                |
| 85            | 37,8                | 32,2                | 32,9                | 415           | 46,4                | 43,1                | 43,5                |
| 90            | 38,4                | 32,5                | 33,1                | 420           | 46,3                | 43,1                | 43,6                |
| 95            | 38,7                | 32,7                | 33,4                | 425           | 46,1                | 43,1                | 43,5                |
| 100           | 39,3                | 33,0                | 33,6                | 430           | 46                  | 43,1                | 43,4                |
| 105           | 39,8                | 33,3                | 33,9                | 435           | 45,9                | 43,1                | 43,4                |
| 110           | 40,1                | 33,5                | 34,2                | 440           | 45,8                | 43,1                | 43,4                |
| 115           | 40,6                | 33,8                | 34,4                | 445           | 45,8                | 43,1                | 43,5                |
| 120           | 41,1                | 34,3                | 34,5                | 450           | 45,6                | 43,1                | 43,5                |
| 125           | 41,4                | 34,6                | 34,7                | 455           | 45,4                | 43,1                | 43,4                |
| 130           | 41,9                | 34,9                | 34,9                | 460           | 45,3                | 43,1                | 43,4                |
| 135           | 42,4                | 35,2                | 35,2                | 465           | 45,2                | 43                  | 43,6                |
| 140           | 42,8                | 35,4                | 35,4                | 470           | 45,1                | 43                  | 43,5                |
| 145           | 43,3                | 35,7                | 35,6                | 475           | 45                  | 43                  | 43,4                |
| 150           | 43,7                | 36,1                | 36,1                | 480           | 44,9                | 42,9                | 43,4                |
| 155           | 44,2                | 36,4                | 36,4                | 485           | 44,9                | 42,9                | 43,4                |
| 160           | 44,6                | 36,8                | 36,8                | 490           | 44,7                | 42,9                | 43,4                |
| 165           | 44,9                | 37,0                | 37,1                | 495           | 44,6                | 42,9                | 43,9                |
| 170           | 45,3                | 37,3                | 37,3                | 500           | 44,5                | 42,9                | 43,3                |
| 175           | 45,7                | 37,6                | 37,5                | 505           | 44,5                | 42,9                | 42,7                |
| 180           | 45,7                | 37,6                | 37,6                | 510           | 44,2                | 42,8                | 43,9                |
| 185           | 46,2                | 37,9                | 37,8                | 515           | 43,8                | 42,7                | 43,1                |
| 190           | 45,6                | 38,3                | 38,1                | 520           | 43,7                | 42,6                | 43,1                |
| 195           | 46,9                | 38,5                | 38,4                | 525           | 43,7                | 42,6                | 43,1                |
| 200           | 47,2                | 38,9                | 38,6                | 530           | 43,6                | 42,6                | 43,1                |
| 205           | 47,7                | 39,2                | 39,0                | 535           | 43,5                | 42,5                | 43,1                |
| 210           | 48,1                | 39,5                | 39,4                | 540           | 43,5                | 42,5                | 43                  |

EK-3. (devam) Deney-3'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.1. (devam) Deney-3'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

|     |      |      |      |     |      |      |      |
|-----|------|------|------|-----|------|------|------|
| 215 | 48,5 | 39,8 | 39,7 | 545 | 43,4 | 42,4 | 43   |
| 220 | 48,9 | 40,1 | 40,0 | 550 | 43,3 | 42,4 | 42,9 |
| 225 | 49,4 | 40,5 | 40,1 | 555 | 43,2 | 42,4 | 42,7 |
| 230 | 50,0 | 40,7 | 40,3 | 560 | 43,1 | 42,4 | 42,7 |
| 235 | 50,4 | 41,0 | 40,6 | 565 | 43,1 | 42,4 | 42,7 |
| 240 | 50,7 | 41,4 | 40,6 | 570 | 43   | 42,4 | 42,6 |
| 245 | 50,8 | 41,5 | 41,1 | 575 | 42,9 | 42,3 | 42,6 |
| 250 | 50,8 | 41,7 | 41,3 | 580 | 42,9 | 42,3 | 42,6 |
| 255 | 50,8 | 41,9 | 41,5 | 585 | 42,9 | 42,3 | 42,5 |
| 260 | 50,7 | 42,0 | 41,8 | 590 | 42,8 | 42,2 | 42,5 |
| 265 | 50,7 | 42,7 | 41,9 | 595 | 42,7 | 42,2 | 42,5 |
| 270 | 50,5 | 42,2 | 42,0 | 600 | 42,6 | 42,1 | 42,4 |
| 275 | 50,3 | 42,3 | 42,2 | 605 | 42,6 | 42,1 | 42,3 |
| 280 | 50,0 | 42,4 | 42,3 | 610 | 42,5 | 42,1 | 42,3 |
| 285 | 49,9 | 42,5 | 42,4 | 615 | 42,5 | 42   | 42,3 |
| 290 | 49,7 | 42,5 | 42,4 | 620 | 42,3 | 41,9 | 42,4 |
| 295 | 49,7 | 42,6 | 42,6 | 625 | 42,3 | 41,9 | 42,3 |
| 300 | 49,5 | 42,6 | 42,5 | 630 | 42,3 | 41,9 | 42,3 |
| 305 | 49,3 | 42,6 | 42,6 | 635 | 42,2 | 41,9 | 42,2 |
| 310 | 49,0 | 42,7 | 42,7 | 640 | 42,1 | 41,8 | 42,2 |
| 315 | 48,9 | 42,8 | 42,0 | 645 | 42,1 | 41,8 | 42,2 |
| 320 | 48,8 | 42,8 | 42,5 | 650 | 42,1 | 41,7 | 42,3 |
| 325 | 48,7 | 42,9 | 42,7 | 655 | 42   | 41,7 | 42,2 |
| 330 | 48,5 | 42,9 | 42,9 | 660 | 41,9 | 41,6 | 42,2 |

EK-4. Deney-4'ye ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Deney-4'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 28,5                | 28,2                | 28,4                | 295           | 48,8                | 42                  | 40,8                |
| 5             | 28,9                | 28,1                | 28,6                | 300           | 48,6                | 42                  | 41                  |
| 10            | 29,2                | 28,2                | 28,7                | 305           | 48,4                | 42,1                | 41,1                |
| 15            | 30,0                | 28,2                | 29,0                | 310           | 48,3                | 42,1                | 41,1                |
| 20            | 30,3                | 28,2                | 29,2                | 315           | 48,1                | 42,1                | 41,1                |
| 25            | 30,8                | 30,2                | 29,4                | 320           | 47,9                | 42,1                | 41,1                |
| 30            | 31,6                | 29,0                | 29,4                | 325           | 47,7                | 42,2                | 41                  |
| 35            | 32,0                | 28,9                | 29,4                | 330           | 47,6                | 42,2                | 41                  |
| 40            | 32,6                | 29,0                | 29,7                | 335           | 47,5                | 42,3                | 41,1                |
| 45            | 33,2                | 29,2                | 30,1                | 340           | 47,3                | 42,3                | 41,1                |
| 50            | 33,6                | 29,4                | 30,6                | 345           | 47,2                | 42,3                | 41                  |
| 55            | 34,2                | 29,6                | 30,8                | 350           | 47                  | 42,3                | 40,8                |
| 60            | 34,7                | 29,9                | 31,1                | 355           | 46,8                | 42,3                | 40,8                |
| 65            | 35,3                | 30,1                | 31,3                | 360           | 46,7                | 42,3                | 40,8                |
| 70            | 35,7                | 30,0                | 31,5                | 365           | 46,5                | 42,3                | 40,8                |
| 75            | 36,2                | 30,7                | 31,8                | 370           | 46,4                | 42,4                | 40,8                |
| 80            | 36,8                | 31,0                | 32,2                | 375           | 46,2                | 42,4                | 40,7                |
| 85            | 37,2                | 31,2                | 32,4                | 380           | 46,2                | 42,4                | 40,7                |
| 90            | 37,6                | 31,6                | 32,7                | 385           | 45,9                | 42,4                | 40,7                |
| 95            | 38,1                | 31,9                | 33,0                | 390           | 45,8                | 42,4                | 40,7                |
| 100           | 38,0                | 32,2                | 33,2                | 395           | 45,7                | 42,4                | 40,7                |
| 105           | 39,1                | 32,5                | 33,6                | 400           | 45,5                | 42,4                | 40,7                |
| 110           | 39,6                | 32,7                | 33,8                | 405           | 45,4                | 42,4                | 40,7                |
| 115           | 40,1                | 33,1                | 34,1                | 410           | 45,4                | 42,4                | 40,6                |
| 120           | 40,5                | 33,4                | 34,3                | 415           | 45,2                | 42,4                | 40,6                |
| 125           | 41,0                | 33,7                | 34,6                | 420           | 45,2                | 42,4                | 40,6                |
| 130           | 41,4                | 34,0                | 34,9                | 425           | 45                  | 42,4                | 40,5                |
| 135           | 41,9                | 34,3                | 35,3                | 430           | 45                  | 42,4                | 40,5                |
| 140           | 42,4                | 34,7                | 35,5                | 435           | 44,7                | 42,4                | 42,4                |
| 145           | 42,8                | 34,9                | 35,8                | 440           | 44,6                | 42,4                | 42,9                |
| 150           | 43,1                | 35,2                | 36,0                | 445           | 44,6                | 42,4                | 43                  |
| 155           | 43,5                | 35,5                | 36,3                | 450           | 44,4                | 42,4                | 42,9                |
| 160           | 43,9                | 35,8                | 36,6                | 455           | 44,3                | 42,4                | 42,9                |
| 165           | 44,3                | 36,2                | 36,9                | 460           | 44,3                | 42,4                | 42,9                |
| 170           | 44,7                | 36,5                | 37,2                | 465           | 44                  | 42,3                | 42,9                |
| 175           | 45,1                | 36,8                | 37,4                | 470           | 44                  | 42,3                | 42,9                |
| 180           | 45,6                | 37,1                | 37,4                | 475           | 43,8                | 42,3                | 42,8                |
| 185           | 45,8                | 37,3                | 37,6                | 480           | 43,6                | 42,3                | 42,8                |
| 190           | 46,1                | 37,7                | 37,9                | 485           | 43,6                | 42,3                | 42,7                |
| 195           | 46,5                | 38,0                | 38,2                | 490           | 43,4                | 42,3                | 42,6                |
| 200           | 46,9                | 38,3                | 38,3                | 495           | 43,3                | 42,3                | 42,6                |
| 205           | 47,3                | 38,7                | 38,5                | 500           | 43,2                | 42,3                | 42,6                |
| 210           | 47,7                | 38,9                | 38,8                | 505           | 43,2                | 42,3                | 42,5                |
| 215           | 47,9                | 39,2                | 39,1                | 510           | 43,2                | 42,2                | 42,5                |
| 220           | 48,5                | 39,5                | 39,5                | 515           | 43,2                | 42,2                | 42,5                |
| 225           | 48,8                | 39,8                | 39,8                | 520           | 43,1                | 42,1                | 42,6                |
| 230           | 49,2                | 40,3                | 40,0                | 525           | 43,1                | 42,1                | 42,6                |
| 235           | 49,6                | 40,7                | 40,5                | 530           | 42,9                | 42                  | 42,5                |
| 240           | 49,8                | 40,9                | 40,7                | 535           | 42,8                | 42                  | 42,5                |
| 245           | 50,0                | 41,1                | 41,0                | 540           | 42,8                | 41,9                | 42,5                |
| 250           | 50,0                | 41,3                | 41,1                | 545           | 42,7                | 41,9                | 42,5                |
| 255           | 50,1                | 41,5                | 41,1                | 550           | 42,6                | 41,9                | 42,4                |
| 260           | 50,0                | 41,6                | 41,0                | 555           | 42,6                | 41,9                | 42,4                |
| 265           | 50,0                | 41,8                | 41,2                | 560           | 42,5                | 41,8                | 42,3                |
| 270           | 49,8                | 41,8                | 41,1                | 565           | 42,4                | 41,8                | 42,3                |
| 275           | 49,5                | 41,9                | 40,9                | 570           | 42,2                | 41,8                | 42,2                |
| 280           | 49,3                | 42,0                | 40,8                | 575           | 42,1                | 41,8                | 42,1                |
| 285           | 49,1                | 42,0                | 40,7                | 580           | 42                  | 41,6                | 42,1                |
| 290           | 49,0                | 42,0                | 40,8                | 585           | 41,9                | 41,6                | 42                  |
| 295           | 48,8                | 42,0                | 40,8                | 590           | 42                  | 41,6                | 42                  |
| 300           | 48,6                | 42,0                | 41,0                | 595           | 42                  | 41,6                | 42                  |

EK-5. Deney-5'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Deney-5'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 26,40               | 26,50               | 26,70               | 300           | 50,30               | 43,00               | 42,70               |
| 5             | 26,50               | 26,50               | 26,70               | 305           | 50,40               | 43,10               | 42,70               |
| 10            | 26,70               | 26,50               | 26,70               | 310           | 50,40               | 43,30               | 43,00               |
| 15            | 27,00               | 26,50               | 26,90               | 315           | 50,40               | 43,40               | 43,00               |
| 20            | 27,40               | 26,50               | 27,00               | 320           | 50,40               | 43,50               | 43,10               |
| 25            | 28,00               | 26,50               | 27,20               | 325           | 50,30               | 43,60               | 43,10               |
| 30            | 28,30               | 26,60               | 27,30               | 330           | 49,70               | 43,60               | 43,20               |
| 35            | 28,90               | 26,80               | 27,40               | 335           | 49,30               | 43,60               | 43,30               |
| 40            | 29,30               | 26,90               | 27,60               | 340           | 49,30               | 43,70               | 43,40               |
| 45            | 29,70               | 27,20               | 27,80               | 345           | 49,20               | 43,70               | 43,30               |
| 50            | 30,20               | 27,50               | 28,00               | 350           | 48,60               | 43,70               | 43,40               |
| 55            | 30,90               | 27,70               | 28,10               | 355           | 48,60               | 43,70               | 43,30               |
| 60            | 31,40               | 28,00               | 28,30               | 360           | 48,60               | 43,70               | 43,30               |
| 65            | 31,90               | 28,20               | 28,50               | 365           | 48,60               | 43,70               | 43,20               |
| 70            | 32,40               | 28,60               | 28,60               | 370           | 48,40               | 43,70               | 43,30               |
| 75            | 32,90               | 28,90               | 28,90               | 375           | 48,20               | 43,70               | 43,40               |
| 80            | 33,40               | 29,20               | 29,10               | 380           | 48,10               | 43,80               | 43,50               |
| 85            | 33,90               | 29,50               | 29,30               | 385           | 47,60               | 43,80               | 43,40               |
| 90            | 34,40               | 29,70               | 29,50               | 390           | 47,30               | 43,80               | 43,50               |
| 95            | 34,70               | 30,00               | 29,80               | 395           | 47,30               | 43,80               | 43,40               |
| 100           | 35,10               | 30,40               | 30,10               | 400           | 47,30               | 43,70               | 43,30               |
| 105           | 35,60               | 30,70               | 30,30               | 405           | 47,20               | 43,80               | 43,30               |
| 110           | 36,10               | 31,10               | 30,80               | 410           | 46,30               | 43,80               | 43,40               |
| 115           | 36,60               | 31,30               | 30,90               | 415           | 46,80               | 43,80               | 43,50               |
| 120           | 37,40               | 31,70               | 31,30               | 420           | 46,50               | 43,80               | 43,50               |
| 125           | 37,60               | 32,00               | 31,50               | 425           | 46,20               | 43,80               | 43,40               |
| 130           | 38,10               | 32,30               | 31,90               | 430           | 45,70               | 43,80               | 43,50               |
| 135           | 38,50               | 32,60               | 32,30               | 435           | 45,20               | 43,80               | 43,40               |
| 140           | 38,90               | 32,90               | 32,60               | 440           | 45,00               | 43,40               | 43,00               |
| 145           | 39,20               | 33,10               | 32,70               | 445           | 44,90               | 43,30               | 42,80               |
| 150           | 39,80               | 33,50               | 33,20               | 450           | 44,90               | 43,30               | 42,90               |
| 155           | 40,20               | 33,90               | 33,50               | 455           | 45,10               | 43,50               | 43,20               |
| 160           | 40,60               | 34,20               | 33,80               | 460           | 45,20               | 43,50               | 43,20               |
| 165           | 40,90               | 34,50               | 34,00               | 465           | 44,90               | 43,50               | 43,10               |
| 170           | 41,40               | 34,90               | 34,50               | 470           | 45,00               | 43,60               | 43,30               |
| 175           | 41,70               | 35,10               | 34,80               | 475           | 44,60               | 43,60               | 43,20               |
| 180           | 42,10               | 35,50               | 35,20               | 480           | 44,50               | 43,60               | 43,20               |
| 185           | 42,50               | 35,90               | 35,50               | 485           | 44,50               | 43,50               | 43,00               |
| 190           | 42,90               | 36,40               | 36,10               | 490           | 44,60               | 43,50               | 43,10               |
| 195           | 43,30               | 36,50               | 36,10               | 495           | 44,90               | 43,50               | 43,20               |
| 200           | 43,90               | 37,00               | 36,60               | 500           | 44,90               | 43,50               | 43,20               |
| 205           | 44,30               | 37,40               | 36,90               | 505           | 44,90               | 43,50               | 43,10               |
| 210           | 44,70               | 37,60               | 37,20               | 510           | 44,70               | 43,40               | 43,10               |
| 215           | 44,80               | 37,90               | 37,60               | 515           | 44,60               | 43,40               | 43,00               |
| 220           | 45,30               | 38,30               | 38,00               | 520           | 44,30               | 43,40               | 43,00               |
| 225           | 45,60               | 38,60               | 38,20               | 525           | 44,20               | 43,30               | 43,10               |
| 230           | 46,00               | 38,80               | 38,50               | 530           | 44,10               | 43,30               | 43,10               |
| 235           | 46,40               | 39,20               | 38,80               | 535           | 44,10               | 43,30               | 43,10               |
| 240           | 46,60               | 39,60               | 39,20               | 540           | 44,00               | 43,30               | 43,10               |
| 245           | 47,00               | 39,80               | 39,30               | 545           | 43,90               | 43,30               | 43,10               |
| 250           | 47,50               | 40,10               | 39,70               | 550           | 43,80               | 43,30               | 43,10               |
| 255           | 47,70               | 40,40               | 40,10               | 555           | 43,80               | 43,30               | 43,10               |
| 260           | 48,00               | 40,80               | 40,50               | 560           | 43,70               | 43,20               | 43,10               |
| 265           | 48,40               | 41,10               | 40,70               | 565           | 43,70               | 43,20               | 43,10               |
| 270           | 48,60               | 41,40               | 41,10               | 570           | 43,50               | 43,30               | 43,00               |
| 275           | 49,00               | 41,70               | 41,30               | 575           | 43,40               | 43,30               | 43,10               |
| 280           | 49,20               | 42,00               | 41,60               | 580           | 43,40               | 43,30               | 43,10               |
| 285           | 49,60               | 42,40               | 41,90               | 585           | 43,30               | 43,30               | 43,10               |
| 290           | 49,90               | 42,70               | 42,30               | 590           | 43,20               | 43,30               | 43,10               |
| 295           | 50,30               | 42,70               | 42,40               | 595           | 43,20               | 43,30               | 43,10               |

EK-6. Deney-6'ya ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Deney-6'e ait ölçüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri

| Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) | Zaman<br>(sn) | Termokupl-1<br>(°C) | Termokupl-2<br>(°C) | Termokupl-3<br>(°C) |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0             | 30,10               | 29,70               | 30,40               | 240           | 47,80               | 43,70               | 43,30               |
| 5             | 30,10               | 29,80               | 30,40               | 245           | 48,50               | 44,00               | 43,60               |
| 10            | 30,00               | 29,80               | 30,40               | 250           | 48,70               | 44,30               | 43,90               |
| 15            | 30,10               | 29,80               | 30,50               | 255           | 48,70               | 44,60               | 44,30               |
| 20            | 30,30               | 29,80               | 30,60               | 260           | 49,40               | 45,00               | 44,70               |
| 25            | 30,60               | 29,80               | 30,70               | 265           | 49,40               | 45,30               | 44,90               |
| 30            | 31,00               | 29,80               | 30,80               | 270           | 49,90               | 45,60               | 45,30               |
| 35            | 31,40               | 30,00               | 31,00               | 275           | 50,50               | 45,90               | 45,80               |
| 40            | 31,90               | 30,20               | 31,10               | 280           | 50,60               | 46,20               | 45,90               |
| 45            | 32,40               | 30,50               | 31,20               | 285           | 50,60               | 46,40               | 46,20               |
| 50            | 32,90               | 30,90               | 31,40               | 290           | 50,60               | 46,60               | 46,40               |
| 55            | 32,90               | 31,20               | 31,50               | 295           | 50,60               | 46,70               | 46,50               |
| 60            | 33,20               | 31,50               | 31,70               | 300           | 50,00               | 46,80               | 46,60               |
| 65            | 33,90               | 32,00               | 31,90               | 305           | 50,10               | 46,80               | 46,60               |
| 70            | 34,40               | 32,30               | 32,10               | 310           | 49,70               | 46,80               | 46,70               |
| 75            | 35,00               | 32,60               | 32,30               | 315           | 49,70               | 46,90               | 46,80               |
| 80            | 35,70               | 33,10               | 32,60               | 320           | 49,40               | 46,90               | 46,80               |
| 85            | 36,20               | 33,50               | 32,90               | 325           | 49,40               | 46,90               | 46,90               |
| 90            | 36,60               | 33,70               | 33,00               | 330           | 49,50               | 46,90               | 46,90               |
| 95            | 37,10               | 34,10               | 33,30               | 335           | 49,50               | 46,80               | 46,90               |
| 100           | 37,60               | 34,40               | 33,50               | 340           | 49,50               | 46,80               | 47,00               |
| 105           | 38,00               | 34,80               | 33,80               | 345           | 49,20               | 46,80               | 47,10               |
| 110           | 38,30               | 35,10               | 33,90               | 350           | 48,80               | 46,80               | 47,20               |
| 115           | 38,50               | 35,40               | 34,20               | 355           | 48,60               | 46,70               | 47,20               |
| 120           | 38,90               | 35,80               | 34,40               | 360           | 48,20               | 46,70               | 47,20               |
| 125           | 39,30               | 36,10               | 34,60               | 365           | 48,50               | 46,60               | 47,30               |
| 130           | 39,80               | 36,40               | 34,90               | 370           | 48,60               | 46,60               | 47,30               |
| 135           | 40,30               | 36,80               | 37,40               | 375           | 47,70               | 46,60               | 47,30               |
| 140           | 40,30               | 37,20               | 37,40               | 380           | 47,60               | 46,50               | 47,30               |
| 145           | 41,10               | 37,50               | 37,70               | 385           | 47,60               | 46,50               | 47,30               |
| 150           | 41,60               | 37,90               | 38,00               | 390           | 47,80               | 46,40               | 47,20               |
| 155           | 41,90               | 38,10               | 38,40               | 395           | 48,00               | 46,40               | 47,20               |
| 160           | 42,60               | 38,50               | 38,70               | 400           | 47,70               | 46,30               | 47,30               |
| 165           | 42,60               | 38,90               | 38,90               | 405           | 47,30               | 46,30               | 47,30               |
| 170           | 42,80               | 39,10               | 39,20               | 410           | 47,30               | 46,30               | 47,30               |
| 175           | 43,30               | 39,50               | 39,50               | 415           | 47,20               | 46,30               | 47,30               |
| 180           | 43,70               | 39,80               | 39,80               | 420           | 46,80               | 46,20               | 47,30               |
| 185           | 44,40               | 40,10               | 40,30               | 425           | 46,80               | 46,20               | 47,30               |
| 190           | 44,40               | 40,50               | 40,80               | 430           | 46,90               | 46,20               | 47,30               |
| 195           | 44,50               | 40,70               | 41,00               | 435           | 47,00               | 46,20               | 47,30               |
| 200           | 45,30               | 41,10               | 41,30               | 440           | 46,50               | 46,20               | 47,20               |
| 205           | 45,60               | 41,40               | 41,50               | 445           | 46,70               | 46,20               | 47,10               |
| 210           | 45,50               | 41,80               | 41,50               | 450           | 46,70               | 46,10               | 47,10               |
| 215           | 46,40               | 42,00               | 41,80               | 455           | 46,40               | 46,10               | 47,10               |
| 220           | 46,40               | 42,50               | 42,20               | 460           | 46,00               | 46,10               | 47,10               |
| 225           | 46,80               | 42,80               | 42,60               | 465           | 46,20               | 46,00               | 48,10               |
| 230           | 47,20               | 43,10               | 42,90               | 470           | 46,20               | 46,00               | 47,80               |
| 235           | 47,50               | 43,40               | 43,20               | 475           | 46,00               | 46,00               | 47,20               |
| 240           | 47,80               | 43,70               | 43,30               | 480           | 46,00               | 45,90               | 47,10               |



*Gazili olmak ayrıcalıktır...*