

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DİZÜSTÜ BİLGİSAYARLARIN ISI BORULARINDA  
KULLANILAN SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN SOĞUTMAYA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Taha Yasin KORKMAZ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemal ERMİŞ**

**Haziran 2025**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİZÜSTÜ BİLGİSAYARLARIN ISI BORULARINDA  
KULLANILAN SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN SOĞUTMAYA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taha Yasin KORKMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

| JÜRİ                       | BAŞARI DURUMU |
|----------------------------|---------------|
| Prof. Dr. Kemal ERMİŞ      | BAŞARILI      |
| Prof. Dr. Ethem TOKLU      | BAŞARILI      |
| Prof. Dr. Murat KARABEKTAŞ | BAŞARILI      |

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Taha Yasin KORKMAZ

16/06/2025

## TEŞEKKÜR

Sevgili Danışmanım, Size bu satırları, yolculuğum boyunca sağladığınız destek, rehberlik ve öğretinin değerini ifade etmek için yazıyorum. Yüksek lisans eğitimim boyunca bana sağladığınız yönlendirme, teşvik ve bilgi birikiminiz için size minnettarım. Profesyonel, bilgi birikiminiz ve insan odaklı yaklaşımınız sayesinde, araştırma sürecinin her aşamasında beni cesaretlendirdiniz ve rehberlik ettiniz. Sizlerin deneyimleri, benim gelişimimde dönüm noktaları oldu. Prof. Dr. Kemal ERMİŞ hocam Sizin katkılarınız olmadan bu başarıyı yakalamak asla mümkün olmazdı. Her birinizin sunduğu öğütler, benim için paha biçilmez bir değer taşıyor. Eğitimim boyunca gösterdiğiniz sabır ve yardımları için çok minnettarım. Sizin rehberliğinizle edindiğim bilgi ve deneyimler, kariyerimdeki ilerleyişim için harika bir temel oluşturuyor. Sizlerin bana kattığı değer için sonsuz teşekkürler. Ayrıca makine mühendisliği öğrencilerinden Muharrem Semih Kısacık, Yusuf Türker ve Kerem Demirci'ye yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Saygılarımla,

# İÇİNDEKİLER

|                       |      |
|-----------------------|------|
| TEŞEKKÜR .....        | i    |
| İÇİNDEKİLER .....     | ii   |
| KISALTMALAR .....     | v    |
| SİMGELER .....        | vi   |
| TABLolar LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | ix   |
| ÖZET .....            | xi   |
| ABSTRACT .....        | xii  |

|                    |          |
|--------------------|----------|
| <b>BÖLÜM 1.</b>    |          |
| <b>GİRİŞ .....</b> | <b>1</b> |

|                                 |          |
|---------------------------------|----------|
| <b>BÖLÜM 2.</b>                 |          |
| <b>LİTERATÜR TARAMASI .....</b> | <b>4</b> |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>BÖLÜM 3.</b>                                           |           |
| <b>ISI BORUSU.....</b>                                    | <b>11</b> |
| 3.1. Isı Borusu Tanımı.....                               | 11        |
| 3.1.1 Isı borusunun tarihsel gelişimi .....               | 12        |
| 3.2. Isı Borusu Elemanları ve İşleyişi .....              | 13        |
| 3.3. Isı Borusunun Uygulama Alanları .....                | 16        |
| 3.4. Isı Borusu Teorisi.....                              | 18        |
| 3.4.1 Isı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi ..... | 22        |

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>BÖLÜM 4.</b>                                              |           |
| <b>MATERYAL VE METOT .....</b>                               | <b>24</b> |
| 4.1. Deney Cihazları.....                                    | 25        |
| 4.1.1. Dizüstü bilgisayar.....                               | 25        |
| 4.1.2. Termokupl-termometre ölçüm cihazı.....                | 26        |
| 4.1.3. FurMark ve Core Temp test programları .....           | 27        |
| 4.1.4. Isı borusu.....                                       | 29        |
| 4.1.5. Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi ..... | 32        |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 4.2. Deney Test Düzenegi .....                      | 33 |
| 4.3. Deneyde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar .....   | 34 |
| 4.3.1. Su-metanol karışımının özellikleri .....     | 35 |
| 4.3.2. R-134a soğutucu akışkanın özellikleri .....  | 37 |
| 4.3.3. R-404a soğutucu akışkanın özellikleri .....  | 37 |
| 4.3.4. R1234ze soğutucu akışkanın özellikleri ..... | 38 |
| 4.4. Sıcaklık Ölçme Metodu .....                    | 39 |

## **BÖLÜM 5.**

### **BULGULAR VE TARTIŞMA .....**

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Su-metanol Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi .....                      | 42 |
| 5.1.1. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....             | 42 |
| 5.1.2. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları ..... | 43 |
| 5.1.3. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları .....          | 44 |
| 5.2. Su-Metanol Isı borusunun Sıcaklık (Termal) Analizi .....                                      | 45 |
| 5.2.1. Su-metanol ısı borusunun rölanti kullanımda çalışma sıcaklık sonuçları .....                | 46 |
| 5.2.2. Su-metanol ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları .....          | 47 |
| 5.2.3. Su-metanol ısı borusunun maksimum yük altında kullanımda çalışma sıcaklık sonuçları .....   | 48 |
| 5.3. R-134a Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi .....                          | 49 |
| 5.3.1. R-134a ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....                 | 49 |
| 5.3.2. R-134a ısı borulu CPU işlemcinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları .....     | 50 |
| 5.3.3. R-134a ısı borulu CPU işlemcinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları .....              | 51 |
| 5.4. R-134a Isı borusunun Termal Analizi .....                                                     | 52 |
| 5.4.1. R-134a ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....                             | 52 |
| 5.4.2. R-134a ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları .....              | 53 |
| 5.4.3. R-134a ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları .....                  | 53 |
| 5.5. R-404a Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi .....                          | 55 |
| 5.5.1. R-404a ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....                 | 56 |
| 5.5.2. R-404a ısı borulu CPU işlemcinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları .....     | 57 |
| 5.5.3. R-404a ısı borulu CPU işlemcinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları .....              | 57 |
| 5.6. R-404a Isı borusunun Sıcaklık (Termal) Analizi .....                                          | 59 |
| 5.6.1. R-404a ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....                             | 59 |
| 5.6.2. R-404a ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları .....              | 60 |
| 5.6.3. R-404a ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları .....                  | 61 |
| 5.7. R-1234ze Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi .....                        | 62 |
| 5.7.1. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları .....               | 62 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.7.2. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları..... | 63 |
| 5.7.3. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları .....         | 64 |
| 5.8. R-1234ze Isı borusunun Termal Analizi .....                                                | 65 |
| 5.8.1. R-1234ze ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları.....                         | 66 |
| 5.8.2. R-1234ze ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları. ....         | 67 |
| 5.8.3. R-1234ze ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları .....             | 68 |

## **BÖLÜM 6.**

### **AKIŞKANLARIN ISI BORUSUNDA SICAKLIK (TERMAL)**

#### **SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI..... 70**

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Isı Borusunda Farklı Akışkanların ve Farklı Çalışma Ortamlarında CPU İşlemcinin Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 70 |
| 6.2. Akışkanların Isı Borusunda Sıcaklık (Termal) Analizlerinin Karşılaştırılması..                                                | 72 |
| 6.2.1 Isı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi değerlerinin karşılaştırılması                                                 | 78 |

## **BÖLÜM 7.**

### **SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 81**

### **KAYNAKLAR ..... 83**

## KISALTMALAR

|            |                                                         |
|------------|---------------------------------------------------------|
| CPU        | : Merkezi işlem birimi, İşlemci                         |
| DVFS       | : Dinamik voltaj ve frekans ölçeklendirme               |
| GHz        | : Saate frekans birimi                                  |
| GPU        | : Grafik işlemci birimi                                 |
| GWP        | : Küresel ısınma potansiyeli                            |
| R1233zd(E) | : 1-Kloro-3,3,3-trifloropropen                          |
| R-1234ze   | : 1,3,3,3-Tetrafloropropen                              |
| R-134a     | : 1,1,1,2-Tetrafloroetan                                |
| R-404a     | : Hidroflorokarbon                                      |
| T1         | : Elektronik devre soğutma plakası üzerindeki termokupl |
| T2         | : Bilgisayarın CPU işlemcisi üzerindeki termokupl       |
| T3         | : Isı borusunun ortasındaki termokupl                   |
| T4         | : Bilgisayar fanının yanındaki termokupl                |

## SİMGELER

|                   |                                           |
|-------------------|-------------------------------------------|
| A                 | : Yüzey alanı                             |
| a                 | : Adyabatik                               |
| b                 | : Buharlaştırıcı                          |
| by                | : Buharlaştırıcı ile yoğuşturucu arasında |
| c                 | : Kondansatör bölge uzunluğu              |
| ç                 | : Çıkış                                   |
| e                 | : Evaporatif bölge uzunluğu               |
| f                 | : Film                                    |
| g                 | : Giriş, yerçekimi ivmesi                 |
| Gr                | : Grashof sayısı                          |
| H                 | : Buharlaşma gizli ısı                    |
| h                 | : Isı taşınım katsayısı                   |
| i                 | : Saf bileşen buhar                       |
| k                 | : Termal iletkenlik katsayısı             |
| l                 | : Isı borusu uzunluğu                     |
| L                 | : karakteristik uzunluk                   |
| L <sub>eff</sub>  | : Efektif boru uzunluğu                   |
| L <sub>etki</sub> | : Toplam etkili uzunluk                   |
| m                 | : Kütleli debi                            |
| M                 | : Merit sayısı                            |
| maks              | : Maksimum                                |
| Nu                | : Nusselt sayısı                          |
| ort               | : Ortam                                   |
| P                 | : Basınç                                  |
| p                 | : Kısmi basınç                            |
| Pr                | : Prandtl sayısı                          |
| Q                 | : Isı transferi                           |
| Q <sub>top</sub>  | : Çekilen ısı miktarı                     |

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| $R$           | : Fitol malzemesinin eğrilik yarıçapı      |
| $R$           | : Isıl direnç                              |
| $r$           | : Yarıçap                                  |
| $R_{1-9}$     | : Isıl direnç                              |
| $R_a$         | : Rayleigh sayısı                          |
| $re$          | : Etkili porozite yarıçapı                 |
| $Re$          | : Reynolds sayısı                          |
| $R_{th}$      | : Teorik toplam ısı direnç                 |
| $s$           | : Sıvı                                     |
| $T$           | : Sıcaklık                                 |
| $v$           | : Buhar                                    |
| $V$           | : Hız                                      |
| $x$           | : Mol kesri                                |
| $y$           | : Yoğuşturucu                              |
| $z$           | : Mesafe                                   |
| $\bar{v}$     | : Akışkanın ortalama hızı                  |
| $\beta$       | : Hacimsel genleşme                        |
| $Pr$          | : Prandtl Sayısı                           |
| $\Delta P$    | : Basınç kaybı                             |
| $\Delta P_K$  | : Kılcal damar basıncı                     |
| $\mu$         | : Dinamik viskozite                        |
| $\rho$        | : Akışkanın yoğunluğu                      |
| $\sigma$      | : Yüzey gerilim katsayısı                  |
| $\phi$        | : Isı borusunun eğim açısı                 |
| $\mathcal{A}$ | : Fitol kesit alanı                        |
| $\mathcal{K}$ | : Fitol malzeme sıvı veya gaz geçirgenliği |
| $\rho$        | : Akışkanın yoğunluğu                      |
| $N$           | : Kinematik vizkozite                      |
| $\beta$       | : Termal Genleşme Katsayısı                |

## TABLolar LİSTESİ

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. Literatürde son zamanlarda değişik akışkanlar ile yapılmış döngü ısı borusu çalışmaları.....                                 | 10 |
| Tablo 4.1. Deneyde kullanılan Lenova marka dizüstü bilgisayarın teknik özellikleri .....                                                | 26 |
| Tablo 4.2. Termokupl-termometre cihazının özellikleri. ....                                                                             | 27 |
| Tablo 4.3. Su-metanol karışımının özellikleri .....                                                                                     | 35 |
| Tablo 4.4. Homojen su-metanol karışımının 40 °C sıcaklıkta metanolün buharlaşmaya başlangıç koşulunun farklı basınç değerleri .....     | 36 |
| Tablo 4.5. R-134a soğutucu gazının teknik özellikleri .....                                                                             | 37 |
| Tablo 4.6. R-404a soğutucu gazının teknik özellikleri .....                                                                             | 38 |
| Tablo 4.7. R-1234ze soğutucu gazının teknik özellikleri .....                                                                           | 39 |
| Tablo 6.1 CPU İşlemcinin dört farklı akışkan ve üç farklı çalışma ortamında sıcaklık karşılaştırılması.....                             | 71 |
| Tablo 6.2 Dizüstü bilgisayarın ısı borusunda dört farklı akışkan ve farklı çalışma ortamlarında sıcaklıklarının karşılaştırılması. .... | 73 |
| Tablo 6.3 Dizüstü bilgisayarın ısı borusunda dört farklı akışkan ve farklı çalışma ortamlarında termal analiz karşılaştırılması. ....   | 79 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1: Bir ısı borusu içinde çalışma akışkanının hareket ve dolaşım gösterimi...                                                           | 11 |
| Şekil 3.2: Isı borusu fitillere göre çeşitleri, a) Metal sinterlenmiş toz fitil tipi b) Yivli fitil tipi c) Metal mesh (keçe) fitil tipi. .... | 14 |
| Şekil 3.3: Isı borusunun ana bileşenleri .....                                                                                                 | 15 |
| Şekil 3.4: Isı borusunun temel yapısında sıcaklık dağılımı ve termal dirençler. ....                                                           | 21 |
| Şekil 4.1: Deney düzeneğinin basit bir görünümü.....                                                                                           | 24 |
| Şekil 4.2: Deneyde kullanılan dizüstü bilgisayarın önden ve ısı borusunun olduğu arka kısım görüntüleri.....                                   | 25 |
| Şekil 4.3: Deneylerde kullanılan termokupl-termometre cihazının fotoğrafı. ....                                                                | 26 |
| Şekil 4.4: Testlerde kullanılan FurMark programının görüntüsü.....                                                                             | 27 |
| Şekil 4.5: Testlerde kullanılan Core Temp programının görüntüsü.....                                                                           | 28 |
| Şekil 4.6: Isı borusunun dizüstü bilgisayarda bağlantı şeklinin görüntüsü.....                                                                 | 29 |
| Şekil 4.7: Dizüstü bilgisayarın ısı borusu bilgisayardan sökülmüş hali.....                                                                    | 30 |
| Şekil 4.8: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun teknik resmi.....                                                                                | 30 |
| Şekil 4.9: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun bağlantı montaj teknik resmi.....                                                                | 31 |
| Şekil 4.10:Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun kesit görüntüsü.....                                                                             | 31 |
| Şekil 4.11: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun fitil yapısının görüntüsü. ....                                                                 | 32 |
| Şekil 4.12: Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi montajlanmış görseli. ....                                                         | 32 |
| Şekil 4.13: Deney düzeneği basit şematik resmi.....                                                                                            | 33 |
| Şekil 4.14: Test düzeneğin dizüstü bilgisayara montajlanmış görüntüsü. ....                                                                    | 34 |
| Şekil 4.15: Dizüstü bilgisayarda ısı borusuna bağlı dijital sıcaklık göstergeli termokupl bağlantısı. ....                                     | 40 |
| Şekil 4.16: Isı borusu sıcaklık testlerinin yapıldığı çeşitli çalışma koşullarının görüntüsü. ....                                             | 41 |
| Şekil 5.1: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği. ....                                             | 43 |
| Şekil 5.2: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği. ....                               | 43 |
| Şekil 5.3: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin maksimum yükte çalışma zaman-sıcaklık grafiği. ....                                      | 44 |
| Şekil 5.4: Su-metanol ısı borusunda rölanti çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.....                                                  | 46 |
| Şekil 5.5: Su-metanol ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği. ....                                          | 47 |
| Şekil 5.6: Su-metanol ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği. ....                                            | 48 |
| Şekil 5.7: R-134a ısı borusunda CPU işlemcinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği.....                                                     | 50 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.8: : R-134a ısı borusunda CPU işlemcinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği .....                               | 50 |
| Şekil 5.9: R-134a ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği .....                                                         | 51 |
| Şekil 5.10: R-134a ısı borusunda rölantı çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                               | 53 |
| Şekil 5.11: R-134a ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                        | 54 |
| Şekil 5.12: R-134a ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                          | 55 |
| Şekil 5.13: R-404a ısı borusunda CPU işlemcinin rölantı çalışma zaman-sıcaklık grafiği.....                                               | 56 |
| Şekil 5.14: R-404a ısı borusunda CPU işlemcinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği .....                                | 57 |
| Şekil 5.15: R-404a ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği ...                                                          | 58 |
| Şekil 5.16: R-404a ısı borusunda rölantı çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                               | 60 |
| Şekil 5.17: R-404a ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                        | 61 |
| Şekil 5.18: R-404a ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                          | 62 |
| Şekil 5.19: R-1234ze ısı borusunda CPU işlemcinin rölantı çalışma zaman-sıcaklık grafiği.....                                             | 63 |
| Şekil 5.20: R-1234ze ısı borusunda CPU işlemcinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği .....                              | 64 |
| Şekil 5.21: R-1234ze ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği.....                                                       | 65 |
| Şekil 5.22: R-1234ze ısı borusunda rölantı çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.....                                              | 66 |
| Şekil 5.23: R-1234ze ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                      | 67 |
| Şekil 5.24: R-1234ze ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği .....                                        | 68 |
| Şekil 6.1: Isı borusunda farklı akışkanların sıcaklıklarının (termal) rölantı çalışma ortamında karşılaştırılması .....                   | 75 |
| Şekil 6.2: Isı borusunda farklı akışkanların sıcaklıklarının (termal) normal (video izleme) çalışma ortamında karşılaştırılması.....      | 76 |
| Şekil 6.3: Isı borusunda farklı akışkanların sıcaklıklarının (termal) maksimum yükte çalışma ortamında karşılaştırılması .....            | 77 |
| Şekil 6.4: Isı borusunun rölantı , video ve maksimum yük çalışma ortamlarında farklı akışkanların boyutsuz Nusselt Sayısı gösterimi ..... | 80 |

# **DİZÜSTÜ BİLGİSAYARLARIN ISI BORULARINDA KULLANILAN SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN SOĞUTMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

## **ÖZET**

Günümüzde üretim, sanayii, iletişim, savunma gibi birçok sektörde, elektronik devrelerin ve bilgisayarların ısı kontrolü için ısı boruları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu borular, küçük boyutları ve hafif yapıları sayesinde etkili ısı transferi sağlamakta, bu nedenle bilgisayarların CPU işlemci biriminin soğutulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Dizüstü bilgisayarların özellikle işlemci ve diğer elektronik devre elemanları, sınırlı bir alanda sürekli ısı üreterek yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Bu aşırı sıcaklıklar ve ısı bilgisayarın elektronik bileşenlerine ciddi zararlar verebilir. Bu nedenle, elektronik sistemlerin ve bileşenlerin sürekli çalışabilirliğini sağlamak için ısı enerjisinin çevreye etkili bir şekilde aktarılması ve sistemlerin güvenli çalışma sıcaklıklarına düşürülmesi önemlidir. Bu amaçla, bilgisayar sistemlerinde soğutma işlemi için ısı boruları tercih edilmektedir. Bu çalışmada, dizüstü bilgisayar ısı borusunun dört farklı bölgesinde termokupl ve dijital sıcaklık göstergesi kullanılarak yirmi dakika zaman aralığında her beş saniyede bir sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu termokupllardan bir tanesi elektronik devre soğutma plakası üzerinde, bir tanesi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde, bir tanesi ısı borusunun ortasında diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında olmak üzere ısı borusu yüzeyine yerleştirilmiştir. Dört farklı soğutucu akışkan; su-metanol, R-134a, R-404a ve R-1234ze ve üç farklı çalışma ortamında; rölanti, normal (video izleme) ve maksimum yükte deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ısı borusunun temasta olduğu CPU işlemcisinin iç sıcaklığı Core Temp paket programı kullanılarak her akışkan ve çalışma ortamı için yirmi dakika zaman aralığında sürekli sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak seçilen her akışkanın dizüstü bilgisayar ısı borusu içerisinde çalışması uyumlu olmuş ve aşırı sıcaklık yüklenmesi ile ilgili deneyler boyunca bilgisayar hiç kapanmamıştır. Orijinal akışkan olan su-metanol ile diğer soğutucu akışkanların karşılaştırılması yapılmış ve su-metanol karışımına en yakın olarak R-1234ze soğutucu akışkanı olarak bulunmuştur. Diğer soğutucu akışkanların sonuçları R-1234ze soğutucu akışkanın sonuçlarına yakındır. Isı borusunun fitil yapısı diğer akışkanlara göre uyumlu yapıldığında, kılcallık olayı tam sağlanabilecek ve soğutucu akışkanların kullanımının yaygın olarak kullanılan su-metanol karışımının yerini alacağı ve daha iyi bir performans gösterebileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Isı borusu, Dizüstü bilgisayar, Soğutma, Soğutucu akışkan, Termal analiz.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COOLANT FLUIDS USED IN HEAT PIPES OF LAPTOP COMPUTERS ON COOLING PERFORMANCE**

## **ABSTRACT**

Today, heat pipes are widely used for thermal control of electronic circuits and computers in many sectors such as production, industry, communication, and defense. These pipes provide effective heat transfer thanks to their small size and lightweight structure, and therefore play a significant role in cooling the CPU processor unit of computers. Especially the processor and other electronic circuit elements of laptops can reach high temperatures by continuously generating heat in a limited area. These excessive temperatures and heat can cause severe damage to the electronic components of the computer. Therefore, it is important to effectively transfer heat energy to the environment and reduce the systems to safe operating temperatures to ensure the continuous operation of electronic systems and components. For this purpose, heat pipes are preferred for cooling in computer systems. In this study, temperature measurements were made every five seconds for a twenty-minute period using thermocouples and digital temperature indicators in four different areas of the laptop heat pipe. One of these thermocouples was placed on the electronic circuit cooling plate, one on the CPU processor of the laptop, one in the middle of the heat pipe and the other next to the computer fan on the heat pipe surface. Four different coolants; water-methanol, R-134a, R-404a and R-1234ze and three different working environments; idle, normal (video monitoring) and maximum load experiments were carried out. In addition, the internal temperature of the CPU processor in contact with the heat pipe was measured continuously for each fluid and working environment at a time interval of twenty minutes using the Core Temp package program. As a result, the operation of each selected fluid in the laptop heat pipe was compatible and the computer did not shut down at all during the experiments related to excessive temperature loading. The original fluid, water-methanol, was compared with other refrigerants and the R-1234ze refrigerant was found to be the closest to the water-methanol mixture. The results of other refrigerants are close to those of R-1234ze refrigerant. This study has shown that when the wick structure of the heat pipe is made compatible with other fluids, the capillarity effect can be fully achieved, and the use of refrigerants can replace the widely used water-methanol mixture and show better performance.

Keywords: Heat pipe, Laptop, Cooling, Coolant fluid, Thermal analysis.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde üretim, sanayii, iletişim, savunma gibi birçok sektörde, elektronik devrelerin ve bilgisayarların ısı kontrolü için ısı boruları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu borular, kompakt boyutları ve hafif yapıları sayesinde etkili ısı transferi sağlamakta, bilgisayarların işlemcisi (CPU) soğutmasında önemli görev üstlenmektedir. Isı transferinde sağladığı önemli performanslarıyla, ısı boruları geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, günümüze kadar gelişen yenilikçi teknolojilerle birçok farklı şekil ve formda üretilerek kullanıma sunulmuştur. Dizüstü bilgisayarların, özellikle işlemcileri ve diğer elektronik devre elemanları, sınırlı bir alanda sürekli ısı üretir ve oldukça yüksek sıcaklıklara ulaşabilir. Bu aşırı sıcaklıklar, bilgisayarın elektronik sistemine ciddi zararlar verebilir. Bu nedenle, elektronik bileşenlerin ve sistemlerin sürekli çalışabilirliğini sağlamak için ısı enerjisinin etkili bir şekilde çevreye aktarılması ve sistemlerin güvenli sıcaklık aralıklarında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla, bilgisayar sistemlerinin soğutulması ve güvenli çalışma sıcaklıklarının korunması için ısı boruları kullanılmaktadır. Dizüstü veya masaüstü bilgisayar işlemcisi (CPU) ve elektronik devrelerin soğutulmasında ısı borusu kullanılmaktadır. Dizüstü bilgisayar incelikleri, ağırlıkları ve boyutları çok az olduğundan, boyuttaki azalma ve bileşen yoğunluğundaki artış, günümüz elektronik ve fotonik cihazları için muazzam ısı akısı değerlerine yol açmaktadır (Habeullah ve diğ, 1997; Güngör 1995; Dube ve diğ, 1996; Lin ve diğ, 2005; Noie ve Majideian, 2000). Elektronik devre elemanları, sınırlı bir alanda sürekli ısı üreterek oldukça yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Bu aşırı sıcaklıklar, elemanların yer aldığı elektronik sistemde ciddi hasarlara yol açabilir. Ayrıca, dizüstü bilgisayar işlemci çipi üzerinde soğutma, çip üzerinde büyük sıcaklık gradyanlarına sahip yerel sıcak noktaların oluşması nedeniyle cihazların düzgün çalışması için en büyük darboğazdır (Perpina ve diğ, 2011; Tavakkoli ve diğ, 2016; Maydanik ve diğ, 2005).

Elektronik bileşenlerin ve sistemlerin sürekli çalışabilirliğinin sağlanabilmesi için, oluşan ısı enerjisinin çevreye etkili bir şekilde iletilmesi ve sistemlerin güvenli sıcaklık seviyelerine düşürülmesi gerekmektedir. Bilgisayar işlemcisinin performans ölçümleri sonucu 10 °C'lik bir sıcaklık düşüşünün devrenin çalışma hızını ortalama %2 oranında arttırdığını göstermiştir (Wadsworth ve diğ, 1990; Schmidt, 2004). Bilgisayar işlemcisi (CPU) ve elektronik devrelerin soğutulması, bilgisayarın dış çerçevesine konulan delikli kanallar ve ısı borusuna tümleşik fan yardımıyla yapılmaktadır. Genellikle işlemci sıcaklığı 40 °C üzerine çıktığında bilgisayarın termal ısı yönetim programıyla soğutma fanı çalışmaktadır. Fan çalışmadığında bile ısı borusu çalışmasına devam eder. Isı boruları kompakt boyutları ve hafif yapıları sayesinde ısı transferinde etkili olduklarından bilgisayar üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelişen yenilikçi teknolojilerle birlikte ısı boruları, birçok farklı şekil ve formda üretilmektedir. Dizüstü bilgisayarlarda etkili bir soğutma sağlamak için belirli koşulların yerine getirilmesi gerekmektedir ve bunlardan bazıları; elektronik parçaların üretici tarafından belirlenen maksimum çalışma sıcaklıklarının altında tutulması, sıcaklık dağılımının düzgün bir profil oluşturmasıyla sıcak bölgelerin oluşumunun engellenmesi, küçük boyutlu bileşenlerle uyumlu olması ve montaj kolaylığı ile uzun ömürlü, güvenilir ve ekonomik olması sayılabilir. Isı borusu çalışma sıcaklık aralığına göre çalışma sıvısı seçilir. Isı borusunun düzgün çalışması için çalışma sıvısının seçimi, kılcallık mekanizmasının oluşturulması için de kritik önem taşır ve çalışma sıvısının sıvı fazı gövde malzemesini ıslatmalıdır (Kaya ve Goldak, 2006). Isı borularında kullanılan çalışma akışkanlarına uygun malzemeler arasında alüminyum, bakır, çelik, seramik ve diğer uygun materyaller yer alabilir. Doğru malzeme seçimi ve iş akışkanlarıyla uyumlu hale getirilmesi gerektiği vurgulamaktadır. Bu durum, sistemin etkinliği ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir (Faghri, 1994).

Bu çalışmada, bir dizüstü bilgisayar ısı borusunun içerisindeki farklı soğutucu akışkanların sıcaklık ve termal davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Isı borularının ısı transfer performansı; ısı borusu konfigürasyonu, geometrik özellikler, çalışma parametreleri, fiziksel boyutlar, kanatçık eklemeleri, tüp malzemesi ve dönüş sayısı gibi farklı fiziksel parametrelerle ilişkilidir. Deneysel çalışmada, dizüstü

bilgisayar ısı borusunun dört farklı bölgesine montajı yapılmış termokupl ve dijital sıcaklık göstergesi kullanılarak yirmi dakika zaman aralığında her beş saniyede bir sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu termokupllar birer adet olmak üzere elektronik devre soğutma plakası üzerinde, dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde, ısı borusunun ortasında ve bilgisayar fanının yanında olmak üzere ısı borusu yüzeyine yerleştirilmiştir. Dört farklı soğutucu akışkan; su-metanol, R-134a, R-404a ve R-1234ze için ve üç farklı çalışma ortamında; rölanti, normal (video izleme) ve maksimum yükte deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ısı borusunun temasta olduğu CPU işlemcisinin iç sıcaklığı Core Temp paket programı kullanılarak her akışkan ve çalışma ortamı için yirmi dakika zaman aralığında sürekli olarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak seçilen her akışkanın dizüstü bilgisayar ısı borusunda çalışması uyumlu olmuş ve aşırı sıcaklık yüklenmesi ile ilgili deneyler boyunca bilgisayar hiç kapanmamıştır. Orijinal akışkan olan su-metanol ile diğer soğutucu akışkanların karşılaştırılması yapılmış ve su-metanol karışımına en yakın olarak R-1234ze soğutucu akışkanı olarak bulunmuştur. Isı borusunun fitil yapısı diğer akışkanlara göre uyumlu yapıldığında, kılcallık olayı tam sağlanabilecek ve soğutucu akışkanların kullanımının yaygın olarak kullanılan su-metanol karışımının yerini alacağı ve daha iyi bir performans gösterebileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

## BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

Elektronik devre elemanları, küçük bir alanda sürekli olarak ısı oluşturarak olağanüstü yüksek sıcaklıklara ulaşma yeteneğine sahiptir. Aşırı sıcaklıklar, bileşenleri içeren elektronik sistemlere önemli zararlar verir. Dizüstü bilgisayar işlemci çipi seviyesindeki soğutma, çip üzerindeki büyük sıcaklık gradyanlarıyla yerel sıcak kesintileri bozduğu için cihazların düzgün çalışması önündeki en büyük engeldir. (Chen ve diğ, 2007; Maydanik ve diğ, 2005; Ali Khan ve diğ, 2017).

Elektronik bileşenlerin ve sistemlerin düzgün çalışmaya devam etmesini garantilemek için, oluşturulan ısı enerjisini ortama etkili bir şekilde aktarmak ve sistemleri kabul edilebilir sıcaklıklara soğutmak kritik öneme sahiptir. Bilgisayar işlemcisinin performans değerlendirmeleri, 10 °C'lik bir sıcaklık düşüşünün devrenin çalışma hızını ortalama %2 oranında artırdığını göstermiştir. (Bahiraei ve Heshmatian, 2017; Wadsworth ve diğ, 1990). Bilgisayar işlemcisi (CPU) ve elektronik devrelerin soğutulması bilgisayarın dış çerçevesine konulan delikli kanallar ve ısı borusuna tümleşik fan yardımıyla yapılmaktadır. Bilgisayar işlemci sıcaklığı 40 °C üzerine çıktığında, bilgisayarın termal ısı yönetim programı kontrolü altında soğutma fanı hızı kontrol edilerek çalışmaya başlamaktadır. Isı boruları soğutma fanı çalışmadığında (genellikle 40 °C altında) bile işlevine devam eder. Küçük boyutları ve hafif yapıları sayesinde ısı transferinde etkili bir performans sergilemektedirler ve bilgisayar imalatında kullanım alanı bulmuştur. Isı boruları birçok farklı malzemelerden, şekillerde ve formlarda üretilmektedir. Dizüstü bilgisayarda iyi bir soğutmanın eldesi için üreticilerin göz önünde bulundukları kriterler; elektronik parçaların hasar görmeyecek çalışma sıcaklıklarının altında tutulması, elektronik devre tasarımlarının düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlayacak özellikle yapılarak belli alanlarda sıcak bölgelerin oluşumunun engellenmesi, küçük boyutlu bileşenlerle birbiriyle uyumlu olması, uzun ömürlü, kolay montaj imkânı olması, ekonomik ve güvenilir olması yer almaktadır. Çalışma sıvısı, ısı borusunun çalışma sıcaklığı aralığına göre seçilir. Isı

borusunun verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için doğru çalışma sıvısı seçilmelidir; ayrıca kılcallık mekanizmasının inşasında hayati bir rol oynar ve çalışma sıvısının sıvı fazı gövde malzemesini nemlendirmelidir (Calame ve diğ, 2007; Kaya ve Goldak, 2006).

Isı borularında kullanılan çalışma akışkanlarına uyum sağlayabilecek malzemelerin alüminyum, bakır, çelik, seramik veya diğer uygun malzemeler olabileceğini belirtmiştir. Doğru malzeme seçimi ve iş akışkanlarıyla uyumlu hale getirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu durum, sistemin verimliliği ve güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir (Balci ve Dağdelen, 2022).

Pentium 4, 3.2 GHz CPU'nun 237 mm<sup>2</sup>'lik bir alanda yaklaşık 36 W/cm<sup>2</sup>'lik bir ısı akısı termal yönetimini sağlayan sistemler geliştirmişler ve optimize ederek, 112 mm<sup>2</sup>'lik bir alanda 2.3 GHz özelliklere sahip CPU'lardan yaklaşık 95 W/cm<sup>2</sup>'lik bir ısı akısını yönetebilen ısı borulu mekanizmalar haline dönüştürdükten sonra dizüstü bilgisayarlara entegre etmişlerdir (Wadsworth ve diğ, 1990).

Literatürde ısı borusu ile ilgili farklı akışkan ve gövdeler üzerinde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; parafin bazlı nano-kompozitin elektronik ısı borusu modülünde uygulanması (Akyürek, 2014), elektroniklerin soğutulması için R1233zd(E) ile düz diskli döngülü ısı borusunun deneysel çalışması (Fukuda ve diğ, 2014), düz disk buharlaştırıcı döngüsü ısı borusu için ısı transfer kapasitesinin deneysel çalışması (Kotcioğlu ve diğ, 2009), kompakt döngülü ısı borusuna uygulanan bakır kimyasal kaplama modifiye edilmiş poliakrilonitril bazlı karbon fiber fitilin incelenmesi (Kaner, 2024), çeşitli çalışma akışkanları ile düz buharlaştırıcı minyatür bir döngü ısı borusu üzerinde deneysel çalışmalardır (Aslantaş ve Demircan, 2021).

Pratik uygulamalarda birçok farklı ısı borusu konfigürasyonu bulunmaktadır. Bu konfigürasyonlar, ısı borularının geometrik özellikleri ve çalışma parametreleri değiştirilerek oluşturulmaktadır. Ayrıca, geleneksel çalışma akışkanları (su, metil alkol, etil alkol vb.) ile geleneksel olmayan akışkanlar (nano-akışkanlar, soğutucu akışkanlar vb.) gibi çeşitli parametreleri de içermektedir. Özellikle son yıllarda, ısı borusuna fitilli bir yapı eklenmesi ve çalışma akışkanı olarak geleneksel olmayan nano-akışkanların kullanımı üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Bu çalışmalar, geleneksel olmayan akışkanların ısı borusunun termal performansını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Günümüzde araştırmacılar, mikro elektronik

teknolojisinin hızlı gelişmesi ve bu mikro elektronik devrelerin ısı kontrolünde dış bir mekanik güç kaynağına ihtiyaç duyulmaması nedeniyle, ısı boruları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Isı boruları, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasında sıcaklık farkı ile çalışan ve bu iki nokta arasında büyük miktarda ısı transferi yapabilen bir ısı transfer cihazıdır. Isı borularındaki ısı transferi mekanizması, buharlaşma ve yoğuşma süreçleri aracılığıyla gerçekleşir. Bu yöntem sayesinde, aynı geometrik boyutlara sahip katı bakır malzemelere kıyasla çok daha yüksek ısıl iletkenlik değerleri elde edilebilir (Aslantaş ve Demircan, 2021).

Hava ile soğutma işleminde, CPU işlemcisi ve GPU'nun ısındığında, soğutucu bloklar bu ısıyı alınmakta ve fanlar aracılığıyla dışarı atılmaktadır. Fanlar, sıcak havayı dışarı atarken serin havayı içeri çeker. Hava soğutma sistemlerinde, ısıyı dağıtmak için genellikle büyük yüzey alanına sahip soğutucu bloklar kullanır. Bu, daha fazla ısıнын daha hızlı bir şekilde dağılmasını sağlar (Barai ve diğ, 2023).

Fan ve hava kanalları zamanla toz birikimi sonucunda dolabilir, bu da hava akışını engeller ve soğutma performansını düşürür. Bu nedenle düzenli temizlik gerektirir. Sıcaklık dalgalanmaları veya yüksek yük altında, fanların hızı artar ve bu durum gürültüye neden olabilir. Ayrıca, fanların aşırı çalışması fan ömrünü kısaltabilir (Balali ve diğ, 2023). Dizüstü bilgisayarın içini düzenli olarak temizlemek, toz birikimini önler ve hava akışını artırır. Bu, genel soğutma performansını iyileştirir. Termal macunun zamanla kuruması nedeniyle, düzenli olarak değiştirilmesi önerilir. Termal macunun zamanla değişimi işlemi ısı transferini artırır. Performans etkisi dizüstü bilgisayar soğutma sistemleri ve genel sistem performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Aşırı ısınma, işlemci ve grafik kartının performansını düşürebilir (Maruyama ve diğ, 2014; O'shaughnessy ve Hemenway, 1994).

Sıvı, havaya göre daha iyi ısı iletkenliğine sahiptir, bu nedenle daha fazla ısıyı daha az gürültü ile dağıtabilir. Sıvı soğutma sistemleri, genellikle daha düşük merkezi işlemci birimi (CPU) ve grafik işlemci birimi (GPU) sıcaklığı sağlar, bu da performansı artırır. Sıvı soğutma sistemleri, genellikle daha karmaşık bir kurulum sürecine sahiptir. Kullanıcıların bu sistemleri kurması zor olabilir. Açık devre sistemleri, sıvı seviyesinin düzenli olarak kontrol edilmesini ve gerektiğinde sıvının eklenmesini gerektirir (Flouris ve Cheung, 2006).

Termal yönetiminde HWMonitor, Core Temp gibi paket yazılımlar, merkezi işlemci birimi (CPU), grafik işlemci birimi (GPU) ve diğer bileşenlerin sıcaklıklarını izler. Kullanıcılar, bu yazılımlar aracılığıyla sıcaklıkları takip edebilir. SpeedFan gibi paket yazılımlar, fan hızlarını elle ayarlama imkânı sunar. Bu, kullanıcıya daha fazla kontrol sağlar. Termal yönetim stratejilerinde dizüstü bilgisayarlar, düşük güç modları ile sıcaklığı kontrol altında tutabilir. Bu modlar, işlemci ve GPU'nun performansını düşürerek enerji tasarrufu sağlar. Dizüstü bilgisayarların temel giriş çıkış sistem ayarlarında, sıcaklık eşiklerine göre fan hızlarının nasıl ayarlanacağı belirlenebilir (Ichimescu ve diğ, 2024).

Evrensel seri veri yolu bağlantısı ile çalışan taşınabilir fanlar, dizüstü bilgisayar altına yerleştirilerek ek hava akışı sağlar. Dizüstü bilgisayar yükseltilerek hava akışını artıran özel yastıklar veya stantlar, soğutma performansını artırabilir. Yeni nesil soğutma sistemlerinde, ısı iletimini artırmak için grafen ve karbon nano-tüpler gibi malzemeler kullanılmaktadır (Thompson, 2022).

Özellikle oyun oynarken veya grafik gibi yoğun uygulamalar kullanırken, soğutma sisteminin etkinliği kritik öneme sahiptir. Yüksek sıcaklıklar, performansı düşürebilir. Dizüstü bilgisayar soğutma teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Yeni nesil cihazlar, daha verimli ve sessiz soğutma çözümleri sunmayı hedeflemektedir (Elnagar ve diğ, 2023).

Soğutma türleri olarak hava ile soğutma en yaygın soğutma yöntemidir. Fanlar, havayı içeri alarak soğutma kanallarından geçirir ve sıcak havayı dışarı atar. Sıvı soğutma daha etkili bir soğutma sağlar, ancak genellikle daha pahalıdır. Sıvı, ısıyı alıp bir radyatöre taşır ve burada havayla soğutulur. Termal geçirgenlik sağlamak için işlemciler ve grafik kartları genellikle termal macun ile soğutucu bloklara bağlanır. Bu, ısının etkin bir şekilde dağılmasına yardımcı olur (Mustafa ve diğ, 2021).

Isı yönetiminde, modern dizüstü bilgisayarların sıcaklıklarını izlemek için termal sensörler kullanılır. Aşırı ısınma durumunda, işlemcinin hızını düşürerek veya fan hızını artırarak önlemler alınır. Dinamik voltaj ve frekans ölçeklendirme (DVFS) teknolojisi, işlemcinin yüküne göre voltaj ve frekansı ayarlayarak enerji tasarrufu yapar ve ısıyı azaltır (Chakraborty ve diğ, 2022).

Soğutma sistemlerinin bileşenlerinden biri olan fanlar soğutma sisteminin en önemli bileşenleridir. Genellikle bir veya daha fazla fan kullanılır. Fanların boyutu, hızı ve

konumu, soğutma verimliliğini etkiler. Bazı dizüstü bilgisayarlar kullanıcıların fan hızını kontrol etmelerine ve sıcaklıkları izlemelerine olanak tanıyan yazılımlar ile gelir. Bu yazılımlar, performansı optimize etmek için kullanılabilir (Chu ve diğ, 2004).

Isı boruları, ısıyı işlemciden uzaklaştırarak soğutucuya taşıma amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle bakırdan yapılır ve ısıyı etkin bir şekilde iletme kapasitesine sahiptir. Genellikle alüminyum veya bakırdan yapılan bu bloklar, ısıyı dağıtarak sıcak havanın dışarı atılmasını sağlar. Soğutma verimliliği hava akışı laptopun tasarımı, hava akışını etkiler. Dizüstü bilgisayarın alt ve yan kısımlarındaki havalandırma delikleri, soğuk havanın içeri girmesini ve sıcak havanın dışarı çıkmasını sağlar.

Peltier Soğutucular elektrik akımı ile soğutma sağlayan cihazlar, bazı yüksek performanslı sistemlerde kullanılabilir. Ancak, genellikle daha fazla enerji tüketir. Dış soğutma çözümleri soğutma petleri dizüstü bilgisayar altına yerleştirilen soğutma petleri, ek fanlar ile hava akışını artırır. Bu, sıcak havanın daha hızlı dışarı atılmasına yardımcı olur. Oda sıcaklığı dizüstü bilgisayarın kullanıldığı ortamın sıcaklığı, soğutma verimliliğini etkiler. Daha serin bir ortam, daha iyi soğutma sağlar. Aşırı ısınma sorunları, performans düşüşü, aşırı ısınma, işlemcinin veya grafik kartının kısıma yapmasına ve işlemci hızının düşmesine neden olabilir. Uzun süreli aşırı ısınma, donanım bileşenlerine zarar verebilir ve donanım hasarına sebep olur veya ömrünü kısaltabilir (Almubarak, 2017).

Gelişen teknolojilerle birlikte, bazı yeni nesil dizüstü bilgisayarlar fan kullanmadan soğutma yapabilen pasif soğutma sistemlerine sahiptir. Bu sistemler, ısı boruları ve özel malzemeler kullanarak ısıyı dağıtır. Nano teknoloji ile gelişmiş malzemeler ve nano teknolojiler, daha etkili soğutma çözümleri sunma potansiyeline sahiptir. Dizüstü bilgisayarlar tasarımında hava girişi ve çıkışı, soğutma verimliliği için kritik öneme sahiptir. Hava akışının optimize edilmesi, sıcak havanın etkili bir şekilde dışarı atılmasını sağlar. Fanların konumu, soğutma performansını etkiler. Genellikle, işlemci ve grafik kartının yakınında yer alması, ısının daha hızlı dağıtılmasına yardımcı olur (Alawadhi ve Amon, 2003).

Dizüstü bilgisayarlarda yer tasarrufu sağlamak için dağıtım teknolojileri olarak boyu kısa ve ince profil soğutucular, genellikle daha az ısı üretir ve daha verimli çalışır. Bazı

modern soğutma sistemlerinde kullanılan faz değiştirme malzemeleri, ısının etkili bir şekilde dağıtılması için kullanır. Bu malzemeler, ısıyı emerek ve serbest bırakarak çalışır (Gulfam ve diğ, 2019).

Soğutma performansını etkileyen faktörlerden olan CPU işlemci ve GPU işlemci gücü yüksek performanslı bileşenler, daha fazla ısı üretir. Bu nedenle, güçlü işlemciler ve grafik kartları, daha etkili soğutma sistemleri gerektirir. Kullanım senaryosu olarak oyun oynama veya grafik tasarım gibi yoğun işlemler, daha fazla ısı üretir ve dolayısıyla daha iyi bir soğutma gerektirir. Modern dizüstü bilgisayarlarda enerji verimliliği için, genellikle yük durumuna göre fan hız kontrolü otomatik olarak ayarlanır. Bu, enerji verimliliğini artırır ve gereksiz gürültüyü azaltır. Düşük güç tüketimi enerji verimliliği sağlayan bileşenler, daha az ısı üreterek soğutma ihtiyacını azaltır (Chang ve diğ, 2024).

Gelişmiş soğutma çözümleri olarak kullanılan hibrid soğutma sistemleri hem hava hem de sıvı soğutma yöntemlerini birleştiren sistemlerdir ve daha yüksek performans sunabilir. Geleneksel termal macun yerine sıvı metal termal macun kullanmak, ısı transferini önemli ölçüde artırabilir. Ancak, uygulama sırasında dikkatli olunması gerekir (Ma ve Liu, 2007).

Dizüstü bilgisayarların altını yükseltmek, hava akışını artırarak soğutma verimliliğini artırabilir. Yazılım güncellemeleri donanım üreticileri, soğutma performansını artırmak için yazılım güncellemeleri sunabilir. Bu güncellemeleri takip etmek önemlidir. Gelecekte akıllı soğutma çözümleri, yapay zekâ ve makine öğrenimi, soğutma sistemlerinin daha akıllı hale gelmesine yardımcı olabilir. Bu sistemler, sıcaklık verilerini analiz ederek fan hızlarını ve diğer parametreleri optimize edebilir. Yeni gelişmiş malzemeler, daha hafif ve daha etkili soğutma çözümleri sunma potansiyeline sahiptir (Habibi Khalaj ve Halgamuge, 2017).

Isı borularının ısı transfer performansı; ısı borusu konfigürasyonu, geometrik özellikler, çalışma parametreleri, fiziksel boyutlar, kanatçık eklemeleri, tüp malzemesi ve dönüş sayısı gibi farklı fiziksel parametrelerle ilişkilidir.

Geleneksel olarak ısı borusu içerisinde soğutucu akışkan olarak geleneksel olarak su, metil alkol, etil alkol vb. kullanılmaktadır. Geleneksel olmayan çalışma akışkanları olan nano-akışkanların kullanımı ile ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Minyatür döngü ısı borulu soğutma mekanizmasında soğutucu olarak amonyak ve su kullanarak

farklı şartlarda deneyler yapılarak sonuçta 100-200W'lık ısı yükünü 300 mm'lik mesafeye ulaştırabilmişlerdir (Maydanik ve diğ, 2005).

Uzay çalışmaları olarak yüksek saflıkta aseton ve amonyaklı soğutkanla çalışan döngü ısı borusu kullanarak her iki akışkanla 80 W'a kadar yaptıkları testlerle seçilen geometri ve ısı taşınımı ile ilgili bulguları paylaşmışlardır (Riehl ve Siqueira, 2006).

Düzlem yüzey buharlaştırıcısı ve hava soğutmalı yoğunlaştırucuya sahip bakır ısı boru sisteminde su akışkanı ile çalışan soğutma ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlar ve 70 W ısı yükünde test emişlerdir. Sonuçta maksimum buharlaşma ısı transfer katsayısı  $22600 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  ve ısı direnci ise  $1,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$  olarak hesaplamışlardır (Singh ve diğ, 2007).

Alüminyum alaşımından yapılmış düz diskli bir buharlaştırıcı döngü ısı borusu deneysel test düzeneğinde R1233zd(E) soğutucu akışkanı kullanılarak 190 W ısı dağıtımı elde etmişler ve toplam sıvı ısı borusu minimum termal direncini  $0,197 \text{ }^\circ\text{C/W}$  olarak bulmuşlardır (Zhao ve diğ, 2021).

Literatürde son zamanlarda değişik akışkanlar ile yapılmış döngü ısı borusu çalışmalarının sonuçları aşağıda bulunmaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Literatürde son zamanlarda değişik akışkanlar ile yapılmış döngü ısı borusu çalışmaları

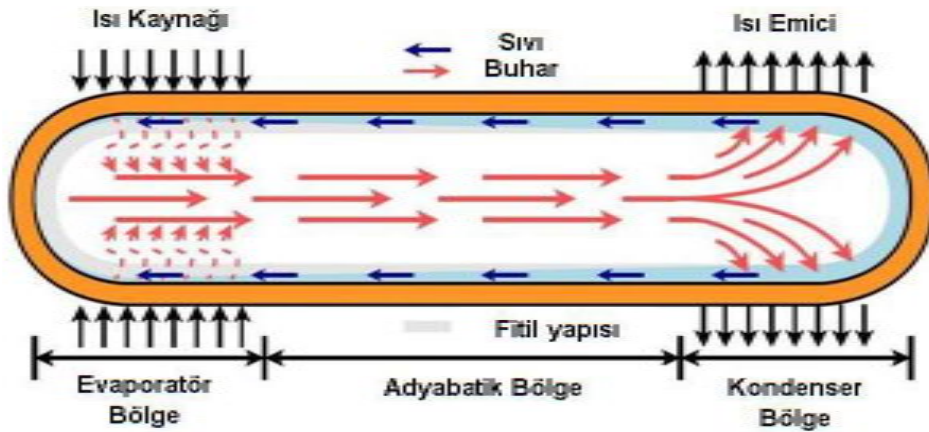
| Buharlaştırıcı<br>Şekli/Malzeme | Çalışma<br>Akışkanı       | Buhar Hattı<br>Uzunluğu | Maks. Isı<br>Yükü | Maks.<br>Sıcaklık     | Kaynak                  |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| Disk / Pirinç                   | Su                        | 140 mm                  | 120 W             | 85 $^\circ\text{C}$   | (Xu ve diğ, 2014)       |
| Disk / Pirinç                   | Metanol                   | 300 mm                  | 160 W             | 85 $^\circ\text{C}$   | (Liu ve diğ, 2012)      |
| Disk / Bakır                    | Metanol                   | 330 mm                  | 160 W             | 90 $^\circ\text{C}$   | (He ve diğ, 2016)       |
| Disk / Bakır                    | Su                        | 140 mm                  | 140 W             | 90 $^\circ\text{C}$   | (Xu ve diğ, 2020)       |
| Dikdörtgen /<br>Paslanmaz Çelik | Aseton                    | 110 mm                  | 280 W             | 100 $^\circ\text{C}$  | (Odagiri ve diğ, 2019)  |
| Dikdörtgen / Bakır              | Su / Metanol /<br>Etanol  | 330 mm                  | 900- 380-<br>320W | 95 $^\circ\text{C}$   | (Maydanik ve diğ, 2020) |
| Dikdörtgen / Bakır              | Su – Bakır<br>nanoakışkan | 350 mm                  | 100 W             | 66.1 $^\circ\text{C}$ | (Li ve diğ, 2021)       |
| Dikdörtgen / Bakır              | Su                        | 215 mm                  | 75 W              | 110 $^\circ\text{C}$  | (Liu ve diğ, 2019)      |
| Dikdörtgen / Bakır              | Su                        | 320 mm                  | 150 W             | 85 $^\circ\text{C}$   | (Li ve diğ, 2021)       |

## BÖLÜM 3. ISI BORUSU

Bu bölümde ısı borusunun tanımı, tarihsel gelişimi, elemanları ve işleyişi, uygulama alanları, teorisi ve alternatif çalışma akışkanı konuları incelenmiştir.

### 3.1. Isı Borusu Tanımı

Isı boruları, ısı kaynağından (buharlaştırıcı) ısı atıcısına (yoğusturucu), çalışma sıvısının buharlaşma gizli ısını uzun mesafeler boyunca aktaran pasif cihazlardır (Markal ve Varol, 2021). Isı borusu, çalışma sıvısını (su, metil alkol, etil alkol vb.) içinde barındıran ve bu çalışma sıvısının buharlaşma ve yoğuşma gizli ısını kullanarak ısı transfer gerçekleştiren ve dışarıdan enerji almadan doğal taşınım yoluyla gerçekleştiren içinde fitiller ihtiva eden içi boş bakır borudan ibarettir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Bir ısı borusu içinde çalışma akışkanının hareket ve dolaşım gösterimi (Aslantaş ve Demircan, 2021)

Isı borusunun içindeki çalışma akışkanı temasta bulunduğu elektronik parçanın ısını alarak buharlaşmaktadır ve ısıyı alıp buharlaşan çalışma sıvısı daha uzaktaki soğuk uca taşınarak (ısı sıcaktan soğuma akması) soğuk kısım olan ısı borusunun yoğusturucu bölgesinden dizüstü bilgisayarlarda fanla havaya taşınır. ısını veren

Çalışma sıvısı yoğunlaşarak sıvı hale gelip tekrar, fitil yapısında oluşan kılcal kuvvetler yardımıyla, sıcak bölgeye doğal yolla taşınır. Böylece alışma sıvısı buharlaştırıcıya geri gönderilir. Isı borularının temel çalışma prensibi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Isı borusunun en önemli özelliklerinden biri, dış bir güce ihtiyaç duymadan ısı transfer akışkanını dolaştırabilme yeteneğidir. Bu sayede, önemli mesafelere ısı taşınabilir. Akış pompası ve güç girdisinin ortadan kaldırılması, ısı taşıma sisteminin güvenilirliğini artırırken, enerji tasarrufu sağlamakta ve toplam ağırlığı da azaltmaktadır.

Isı borusu, doğal konveksiyonla çalışan ısı taşınım sistemleri arasında yer alır. Bu tür sistemlerde, ısı transfer akışkanının dolaşımını sürdürebilmek için gereken kuvvetler, ısı transfer sürecinin kendisinden kaynaklanan doğal bir kuvvet olarak ortaya çıkar. Doğal konveksiyonla ısı transferi, genellikle elde edilen akışkanın sıcaklığının artışı yoluyla yoğunluğun düşmesiyle ilgili bir süreçtir. Bu durum, kaldırma kuvvetlerinin oluşmasına neden olur ve bu kuvvet, ısıyı akışkanın yukarı kaldırılması yoluyla başka bir yere taşır, burada ısı daha sonra çevreye verilebilir.

İki fazlı sistemlerde de doğal konveksiyon olayına benzer bir şekilde işler. Burada, sıvı faza uygulanan ısı, düşük yoğunlukta buhar üretir. Bu buhar, sıvının içinde yükselerek farklı bir noktada yoğunlaşır. Her iki durumda da ısı transfer akışkanının sürekli döngüsü, yerçekimi etkisiyle soğuyan veya yoğunlaşmış akışkanın ısı eklenen bölgeye geri dönmesiyle sağlanır.

### **3.1.1 Isı borusunun tarihsel gelişimi**

Isı borusu, ilk olarak Perkins tarafından geliştirilen ve Perkins Tüpü olarak bilinen sistemle ortaya çıkmıştır. Bu cihaz, 1836 yılında İngiltere’de icat edilmiş olup, fitilsiz ve yerçekimi destekli bir ısı transfer mekanizmasıdır. Isı transferi, bu sistemde faz dönüşümü yoluyla gerçekleştirilmektedir. Isı borusunun temel prensipleri, 1944 yılında Gaugler ve 1962 yılında Trefethen tarafından yapılan araştırmalarla daha da geliştirilmiştir. Isı borusu uygulamaları için patent, Gaugler tarafından 21 Aralık 1942 tarihinde alınmış ve bu patent, U.S Patent numarası olarak 2350348 ile 6 Haziran 1944 tarihinde kaydedilmiştir (Dunn ve Reay, 1982).

Bu çalışmalar, ısı borularının modern mühendislikteki önemini artırmış ve çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasını sağlamıştır.

Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda Grover, Cotter ve Erickson tarafından gerçekleştirilen ısı transfer deneyleri, ısı borusunun tanınmasına büyük katkı sağlamıştır. Bu çalışmalar sonucunda, "Isı Borusu" terimi Grover tarafından ortaya atılmıştır (Dunn ve Reay, 1982). Deneylerde kullanılan her ısı borusu, sızdırmaz bir tüp şeklindeydi ve tüpün iç yüzeyi ince bir tabaka poroz malzeme ile kaplanmıştı. Bu poroz malzeme, içindeki porların sıvı ile doldurulmasıyla işlev görüyordu. Tüpün iç hacminin diğer kısmında ise bu sıvının buharı yer alıyordu. Deneylerde bir ısı borusunda su, diğer ikisinde ise sodyum kullanılmıştır. Isı borusunun bir bölümünden ısı transferi yapılırken, geri kalan kısmından doğal konveksiyon ve/veya radyasyon yoluyla ısı atılmaktaydı. Yüksek ısı akış koşullarında bile, ısı borusunun uzunluğunun neredeyse tamamında sıcaklığın sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan ısı borusunun çapı 0,019 m, boyu ise 0,9 m olup paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Bu boru, 1000 Watt güçle çalışmakta ve yaklaşık 827 °C sıcaklıkta performans göstermekteydi (Dunn ve Reay, 1982). Los Alamos'daki bu ilk ısı borusu deneylerinden sonra, araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişletilmiş, ısı borusu programları diğer devlet kurumları, sanayi ve akademik kuruluşlarda (BM ve yurtdışında) başlatılmıştır. Takip eden yıllarda, ısı boruları ile ilgili literatürde (araştırma ve uygulama) önemli bir artış gözlemlenmiştir.

### **3.2. Isı Borusu Elemanları ve İşleyişi**

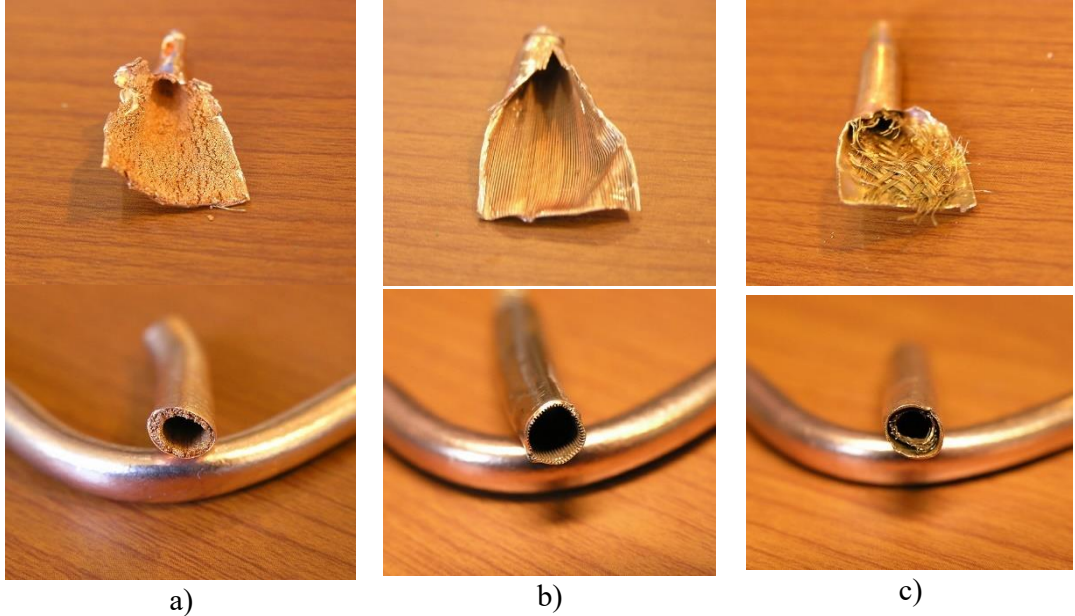
Bir ısı borusunun üç temel elemanı bulunmaktadır, bunlar; gövde, çalışma akışkanı ve fitildir. Gövde bölümü, ısı iletkenliği yüksek malzemelerden olan çoğunlukla bakırdan üretilmiştir. Gövde içerisine, ayarlanmış bir miktar çalışma akışkanı yerleştirilir. Yapıda sızdırmazlık sağlanmaktadır (Aslantaş ve Demircan, 2021).

Bir ısı borusu çalışma bölgeleri olarak incelenirse, üç bölgeden meydana gelir bunlar; buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve adyabatik bölgeleridir. Buharlaştırıcıda, çalışma sıvısı elektronik parçadan aldığı ısıyla buharlaşır. Adyabatik bölümde, ısı borusu duvarındaki yalıtım nedeniyle çalışma sıvısında ısı transferi değişmez. Yoğuşturucuda, ısı yüklü gaz fazındaki çalışma sıvısı, ısı borusunun duvarlarından ısıyı dışarı vererek sıvı faza dönüşür. Oluşan sıvı, ısı borusu içindeki fitil yapısı

aracılığıyla kılcallık etkisiyle tekrar buharlaştırıcıya geri dönerek soğutma döngüsünü tamamlar (Brahim ve Jemni, 2014).

Eğer ısı kaynağı buharlaştırıcı bölümle doğrudan temas halindeyse, ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşir. Buharlaştırıcı bölüm bir ısı eşanjörü şeklinde tasarlandığında ise, ısı transferi taşınım yöntemiyle sağlanır. Her iki durumda da buharlaştırıcı bölüm, kaynaktan ısı almak ve bunu gövde duvarı boyunca çalışma akışkanına iletmek üzere tasarlanmıştır. Buharlaştırıcı bölüm, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, burada bulunan çalışma akışkanı gerçekleşen ısı transferi ile kaynama sıcaklığına ulaşır. Bu durum, çalışma akışkanının buhar basıncında bir artışa yol açar. Basınç artışı, buharın yoğunlaştırıcı bölümüne doğru yüksek hızlı bir akış oluşturmaya neden olur. Yoğunlaştırıcı bölümüne ulaşan buhar, gizli enerjisini kap duvarı boyunca ısı alıcısına vererek yoğunlaşır (Incropera, 1988).

Fitil eleman ise gövde içerisine yerleştirilmiş ve ısı borularının yerçekimine karşı yatay yönde çalışmasını sağlar. Değişik fitil tipleri bulunmaktadır ve en yaygın olanları; metal sinterlenmiş toz fitil tipi, yivli fitil tipi ve metal mesh (keçe) fitil tipidir (Şekil 3.2).

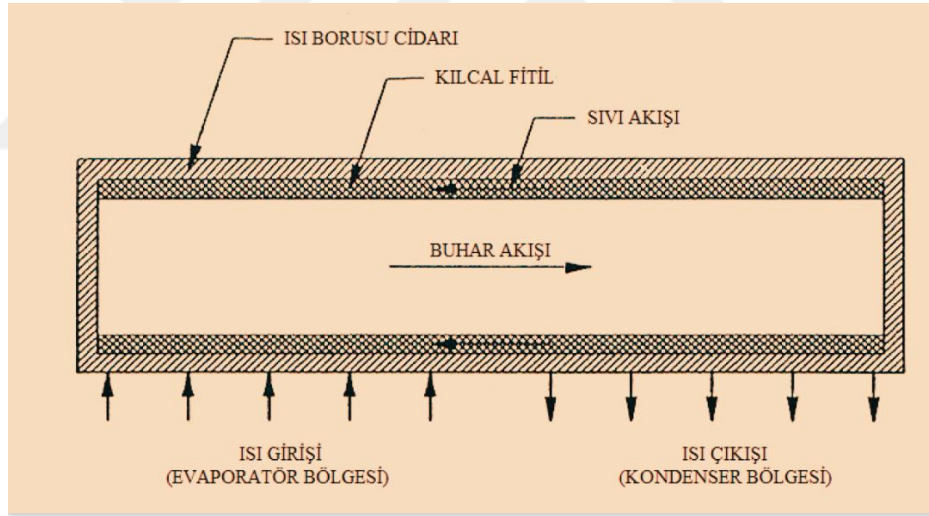


Şekil 3.2: Isı borusu fitillerine göre çeşitleri, a) Metal sinterlenmiş toz fitil tipi b) Yivli fitil tipi c) Metal mesh (keçe) fitil tipi (Chougule ve diğ, 2018).

Isı borularında bulunan fitil yapıları imalatçılara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fitil yapısı bulunmayan ısı boruları da bulunmaktadır ve bunlar termosifon olarak adlandırılmaktadır (Chougule ve diğ, 2018).

Termosifonların ısı borularından farkı yalnızca yerçekimi altında çalışabilmeleridir. Bazen yerçekimi destekli ısı boruları olarak adlandırılan sistemlerde, çalışma akışkanı bir ısı borusu içinde sıvıdan buhara, ardından tekrar sıvıya döngüsel olarak sürekli bir faz değişimine uğrar. Çalışma akışkanının seçimi, ısı borusunun tasarlandığı sistem ve çalışma aralığına bağlı olarak belirlenir. Bir ısı borusunda su kullanıldığında, en verimli çalışma sıcaklık aralığı 300 K ile 600 K arasında gerçekleşir. Genellikle amonyak ve metanol düşük çalışma sıcaklıkları için, sodyum ise yüksek çalışma sıcaklıkları için tercih edilen akışkanlardır (Aytaç, 2021).

Isı borusunun basit bir şekilde ana bileşenleri; Isı borusu gövdesi, Isı girişi (Evaporatör bölgesi), Kılcal fitil, kondenser bölgesi (ısı çıkışı) şeklindedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Isı borusunun ana bileşenleri

Kapalı bir kabın iç yüzeyi, ince poroz malzemeden oluşan bir tabaka ile kaplanmıştır ve bu yapı fitil olarak adlandırılır. Kabın şekli silindirik olabileceği gibi, farklı uygun tasarımlarda üretilebilir. Fitilin gözenekleri, belirli bir uygulama için uygun bir sıvı ile doldurulur ve bu sıvının buharı, kabın geri kalan hacmini kaplar. Sıvı ve buhar dengede bir durumda bulunur. Bu nedenle, kabın içindeki basınç, ısı borusunun sıcaklığına karşılık gelen buhar basıncına eşit olur. Örneğin, su dolu bir ısı borusunda 100 °C'de iç basınç 101.400 N/m<sup>2</sup> olarak ölçülmektedir.

Kabın bir yüzeyine ısı verilmesi, fitildeki sıvının buharlaşmasına neden olurken, diğer bir yüzeyden ısı alınması buharın fitilde yoğunlaşmasına yol açar. Bu durum, bir uçta buhar birikmesi ve diğer uçta buharın tükenmesi ile oluşan basınç gradyanı sayesinde buhar akışını sağlar. Sıvı buharlaşırken, fitil gözeneklerine çekilir. Bu aşamada sıvı yüzeyi kıvrımlı bir hale gelir ve sıvı basıncı, çevresindeki buhar basıncının altına düşer. Isı borusunun yoğunlaşma ucunda, fitil üzerinde sıvı, basınç değişimi olmadan düz bir yüzeyde birikir. Sıvı içindeki basınç gradyanı, sıvının fitil içinden evaporatör ucuna doğru akışını sağlar; akış yönü ise bitişindeki buhar akışının tersidir. Akan buhar ile bitişindeki sıvı arasındaki basınç farkını dengeleyen bir kılcal basınç, fitil gözenekleri içinde oluşur. Isı borusunun dikkat çekici bir özelliği, çok küçük sıcaklık düşüşleri ile akış yönünde ısı taşıma yeteneğidir. Isı borusundaki ısı transferi neredeyse izotermal bir süreç olarak gerçekleşir. Çünkü buhar basıncındaki düşüş genellikle %1 veya daha düşük seviyelerde kalır. Doymuş buharın sıcaklık değişimi de bu nedenle son derece küçüktür.

Isı taşınım yönündeki etkin ısıl iletkenlik, genellikle bakırın ısıl iletkenliğinden 4-5 kat daha fazladır. Sonuç olarak, ısı borusundaki sıcaklık dönüşümü, büyük ölçüde buhar hacmine ve buhar hacminden fitil ile duvara transfer edilen ısıyla ilişkilidir.

Isı borusunun bir diğer ilginç özelliği, yüzey ısı giriş bölgesindeki ısı akışını, ısı çıkış bölgesinde daha yüksek veya daha düşük bir değere dönüştürebilme kapasitesidir. Değiştirilen ısı akısı, yüzey alanları oranına ters bir biçimde değişiklik gösterir. Her iki bölgede de ısı taşınım oranı eşit olduğundan, eğer ısı akışını 10 kat azaltmak gerekiyorsa, ısı çıkış bölgesinin alanı ısı giriş alanının 10 katı olmalıdır. Bu ısı akısı değişim özelliği oldukça değerlidir. Örneğin, enerji çeviricilerde, ısı kaynağı ile ilgili ısı akısı, ısıyı kullanan cihazın kabul edebileceği sınırdan çok yüksek olduğunda, bu uyumsuzluğun üstesinden gelmek için ısı kaynağı ile ısıyı kullanan cihaz arasında uygun şekilde tasarlanmış bir ısı borusu kullanılabilir (Silverstein, 1992).

### **3.3. Isı Borusunun Uygulama Alanları**

Isı borusunun bir diğer ilginç özelliği, yüzey ısı giriş bölgesindeki ısı akışını, ısı çıkış bölgesinde daha yüksek veya daha düşük bir değere dönüştürebilme yeteneğidir. Isı borusu, yüksek potansiyel güvenilirliği, yer çekimsiz ortamlarda çalışma yeteneği ve dış güç gereksinimi olmadan izotermal çalışma kapasitesi sayesinde ilk olarak uzayda

ısı transferi uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Az vakit içinde, ısı borularının benzersiz özellikleriyle, yeryüzünde de önemli faydalar sağlayabileceğini ortaya koymuş ve bu alana ilgi artmıştır.

Isı borularının çeşitli uygulama alanları şunlardır:

- Nükleer güç santralleri: Isı atma işlemlerinde kullanılır.
- Hipersonik araçlar: Durma bölgelerinin soğutulmasında etkilidir.
- Gıda pişirme: Yemeklerin daha homojen ve hızlı pişirilmesine olanak tanır (Silverstein, 1992).
- Radar mikrodalga mazgalları ve lazer aynaları: Soğutma işlemlerinde kullanılır.
- Sondaj kuyuları: Elmas uçların soğutulmasında fayda sağlar.
- Tahıl kurutma: Tarımsal uygulamalarda kullanılır.
- Çelik ocakları ve zift eritme: Endüstriyel süreçlerde yer alır.
- Kalıpların soğutulması: Vakit kaybını hızlı oranda düşürür.
- Boru hattı stabilizasyonu: Enerji iletiminde önemlidir.
- Açık denizlerdeki şamandıraların buzlarının eritilmesi: Deniz uygulamalarında kullanılır.
- Jeotermal enerjinin yeryüzüne nakli: Yenilenebilir enerji uygulamalarında yer alır.
- Güneş enerjisinin mutfakta kullanımı: Enerji verimliliği sağlar.

Isı boruları, kriyojenik sıcaklıklarda çalışabilmekte ve 1649 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda da performans gösterebilmektedir. Isı boruları, çeşitli akışkanlarla çalışabilme yeteneğine sahiptir. Bu akışkanlar arasında sıvı nitrojen, amonyak, su, metanol, alkali sıvı metaller ve ergimiş gümüş gibi geniş bir yelpaze bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, farklı uygulama alanlarının gereksinimlerine göre uygun çözümler sunar. Bu geniş akışkan yelpazesi, ısı borularının çeşitli koşullar ve uygulamalar altında etkili bir şekilde işlev görmesini mümkün kılar. Bu sayede, farklı endüstriyel ihtiyaçlara uygun çözümler sunulabilmektedir.

### 3.4. Isı Borusu Teorisi

Isı boruları ile iki fazlı termosifon sistemleri arasında dikkate değer benzerlikler bulunmaktadır. Bu benzerlikler, bazı durumlarda iki sistemin birbirine karıştırılmasına neden olabilmektedir. İki fazlı termosifonlarda, yoğunlaşan sıvı, yerçekiminin etkisiyle buharlaştırıcıya doğru hareket eder. Buna karşın, ısı borularında bu dönüşüm esas olarak kılcal etkilerle sağlanır. Bu nedenle, iki fazlı termosifonlarda buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının altında bulunması zorunluyken, ısı borusunda buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı herhangi bir konumda yer alabilir.

Isı borusu, ana hatlarıyla üç bileşen içerir; işlem akışkanı, fitil veya kapiller yapı ve akış boşluğudur. Bir ısı borusu tasarlanırken, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgelerinin uzunluğu, kütle akışı için hayati öneme sahiptir. Bu bölgeler için, geometrik uzunluk yerine etkili uzunluk kullanılmalıdır. Eğer birim uzunluk başına kütle değişimi sabit kalırsa, toplam kütle akışı artacak veya azalacaktır. Bu nedenle, akışkanın akışı için toplam etkili uzunluk ( $L_{etki}$ ) şu şekilde ifade edilir;

$$L_{etki} = l_a + \frac{l_b + l_y}{2} \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de; a, b ve y uzunlukları, sırasıyla adyabatik, buharlaşma ve yoğunlaşma bölgelerinin uzunluğunu temsil eder. Isı borusunun maksimum kılcal damar basıncı ( $\Delta P_K$ ), aşağıdaki denklemden elde edilir (Singh ve diğ., 2008).

$$(\Delta P_K)_{maks} \gg \Delta P_s + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de;  $\Delta P_s$  sıvı basınç kaybını,  $\Delta P_v$  buhar basınç kaybını ve  $\Delta P_g$  yerçekimi basınç kaybını temsil eder. Isı borusundaki kılcal damar basıncı önemi kadar kılcal damar basınç gücünün büyüklüğü de önemlidir. Kılcal damar basınç gücünün en düşük seviyeye ulaşabilmesi için, yerçekimi basınç kaybı ve buhar basınç kaybının göz ardı edilmesi gerekmektedir. Bu durumda, sistemin verimliliği artırılabilir. Kılcal damar basınç gücü  $\Delta P_s$ 'yi aşması gerekmektedir. Sıvı basınç kaybı ile kılcal damar basıncı arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurarak, sıvı özelliklerini kullanarak çalışma akışkanı seçimi ve karşılaştırılmasında en uygun yöntemlerden biri olan Merit sayısını (M) belirlemek için, sıvının gizli ısı, yüzey gerilimi ve yoğunluğunun, sıvının dinamik viskozitesine oranı kullanılır. Bu ilişki, aşağıdaki denklemle ifade edilir. (Singh ve diğ., 2007).

$$M = \frac{\rho_s + \sigma_s + H}{\mu_s} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)'te; alt indis s sıvı,  $\rho$  yoğunluk,  $\mu$  dinamik viskozite, H buharlaşma gizli ısı ve  $\sigma$  yüzey gerilim katsayısı yer almaktadır. Merit sayısı sıcaklığa bağlı olarak değişen bir parametredir. Uygulamalarda, boru içindeki soğutucu akışkanlar için tercih edilen sıvılar genellikle yüksek Merit sayısına sahip olanlardır. Isı borularında kullanılan soğutucu akışkanın işlem sıcaklığı arttıkça, Merit sayısı da yükselmektedir. Yüksek sıcaklıklı buharın yoğunluğu ve sıvının buhar basıncı, buhar basıncı kaybının azalmasıyla birlikte artış gösterir. Eşitlik (3.4) ile yüzey gerilimi ve birim uzunluk boyunca yüzeye etki eden toplam kuvvet arasındaki ilişki ise en basit haliyle aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Naibaho ve diğ, 2023) .

$$M = \frac{2\sigma_s}{R} \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4)'de;  $\sigma_s$  Yüzey gerilimi, R fitil malzemesinin eğrilik yarıçapını ifade eder. Bu özellik, akışkanın davranışını ve akışkan dinamiğini etkileyen önemli bir parametredir. Akışkanın ortalama hızı  $\bar{v}$ , laminar akış için aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\bar{v} = \frac{V_{maks}}{2} = \frac{r^2}{8\mu_s} \frac{P_c - P_g}{l} \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)'te;  $V_{maks}$  maksimum hızı, r borunun yarıçapı,  $\mu_s$  sıvının vizkozitesi,  $P_c$  çıkış basıncı,  $P_g$  giriş basıncı ve l ise ısı borusunun uzunluğunu temsil etmektedir. Isı borusundan akan akışkanın kütleli debisi  $\dot{m}$  ise şu şekildedir;

$$\dot{m} = \frac{\pi r^4}{4\mu_s} \frac{P_c - P_g}{l} \quad (3.6)$$

Darcy yaklaşımına göre, sıvı fazındaki basınç kaybı aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\Delta P_s = \frac{\dot{m} \mu_s L_{etki}}{\mathcal{K} \rho_s \mathcal{A}} \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)'de;  $\mathcal{K}$  Fitil malzemesinin geçirgenliği, akışkanın malzeme içinden ne kadar kolay geçebileceğini belirleyen önemli bir özelliktir. Bu özellik, akışkanın hareketini ve etkileşimlerini etkileyen kritik bir faktördür,  $\mathcal{A}$  fitilin kesit alanı, akışkanın akışı üzerinde etkili olan önemli bir parametre olarak dikkate alınmıştır. Bu alan, akışkanın hareketini ve özelliklerini belirleyen faktörlerden biridir.

Isı borusunun üç ayrı bölgesi için basınç kayıplarının toplamı, toplam buhar fazındaki basınç farkına eşit olacaktır. Bu, Reynolds sayısı (Re) tanımına uygun bir ifadedir. Dolayısıyla, buhar fazında eksene dik yönde laminar akış için Reynolds sayısı;

$$Re_r = \frac{\rho_v r_v V}{\mu_v} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.8)'de alt indis v buhar, r buhar yüzeyinin yarıçapını ifade eder. Eksene dik yönde gerçekleşen kütle akışı, buhar fazındaki akışkanın hareketini ifade eder. Bu durum, sistemin dinamiklerini ve ısı transferini etkileyen önemli bir unsurdur;

$$\frac{dm}{dz} = \rho_v r_v V \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte verilen ifadeye göre, eksenel yönde laminar akış için Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{4Re_r z}{r_v} \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.10)'da; z yoğunlaştırıcı veya buharlaştırıcı bölgelerinin sonuna olan mesafeyi ifade eder. Bu mesafe, sistemin performansını ve akışkanın davranışını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.

Boru alt ucunda düşük sıcaklıklarda, viskoz kuvvetler ve buhar akışı önemlidir. Yoğuşturucuda basınç arttıkça maksimum kütle akış oranı ( $\dot{m}_{maks}$ ) bulunurken şu durumlar göz önünde bulundurulmalıdır: Boru içindeki sıvının özellikleri, boru boyunca değişkenlik gösterebilirken, fitil malzemesi boru boyunca homojen bir yapı sergilemektedir. Bu durum, akışkan dinamiği ve ısı transferi üzerinde etkili olabilir. Buhar akışı nedeniyle damla akışı göz ardı edilebilir. Maksimum kütle akış oranı, aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır. Bu değer, sistemin performansını ve verimliliğini etkileyen önemli bir parametredir (Bintoro ve diğ, 2005).

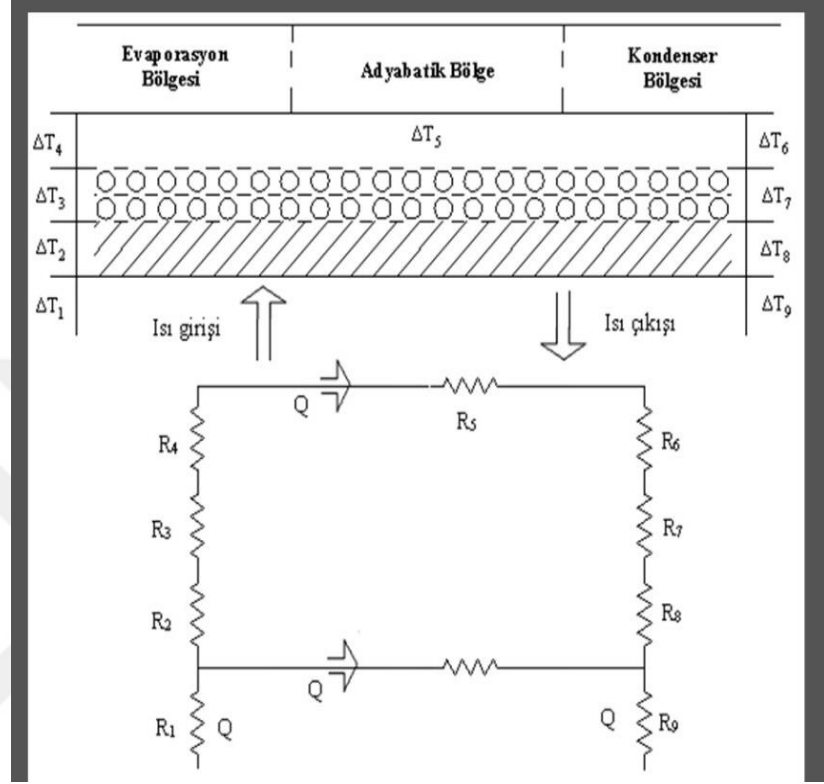
$$\dot{m}_{maks} = \left( \frac{\rho_s \sigma_s}{\mu_s} \right) \left( \frac{\mathcal{K}A}{l} \right) \left( \frac{2}{r_e} - \frac{\rho_s g_s}{\sigma_s} \sin \varphi \right) \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de;  $r_e$  etkili porozite yarıçapıdır. Isı borusunun efektif uzunluğu ve maksimum kütle akış oranı göz önüne alınarak, maksimum ısı transferi aşağıdaki denklemle hesaplanır (Esarte ve Domínguez, 2003).

$$Q_{maks} = \dot{m}_{maks} L_{etki} = \left( \frac{\rho_s \sigma_s}{\mu_s} \right) \left( \frac{\mathcal{K}A}{l} \right) \left( \frac{2}{r_e} - \frac{\rho_s g_s}{\sigma_s} \sin \varphi \right) L_{etki} \quad (3.12)$$

Eşitlik (3.12)'de;  $\varphi$  ısı borusunun eğim açısını ve  $Q_{maks}$  ortama atılan ısı gücü temsil eder. Isı borusunun temel yapısında sıcaklık dağılımı ve termal dirençler Şekil 3.4' teki

ısı borusu direnç devresi göz önünde bulundurulduğunda  $R_1$  ısı direnci, sistemdeki diğer devrelerden geçerek  $R_9$  ısı direnç devresinden,  $T_9$  sıcaklığında ortama atılacak şekilde belirlenir.



Şekil 3.4: Isı borusunun temel yapısında sıcaklık dağılımı ve termal dirençler.

Burada;  $\Delta T_1$  Ortam ile ısı borusunun dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır ve ısı transferinin önemli bir bileşenidir. Bu etkileşim, sistemin genel performansını ve verimliliğini etkileyen kritik bir faktördür.  $\Delta T_2$  Yüzeyle ısı borusu kalınlığı arası sıcaklık farkıdır,  $\Delta T_3$  Boru içi yüzeyi ile fitil dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır ve ısı transferi ve akışkan dinamiği açısından önemli bir faktördür. Bu ilişki, sistemin verimliliğini ve performansını etkileyen kritik unsurlardan biridir.  $\Delta T_4$  Fitil dış yüzeyi ile fitil iç yüzeyi arası sıcaklık,  $\Delta T_5$ : Fitil içi yüzeyinde boru içi kısmına doğru sürüklenen sıcaklık farkı,  $\Delta T_6$ : Fitil dış yüzeyi ile fitil iç yüzeyi arası sıcaklık farkı,  $\Delta T_7$ : Boru içi yüzeyi ile fitil dış yüzeyi arası sıcaklık farkı,  $\Delta T_8$ : Yüzeyle ısı borusu kalınlığı arası sıcaklık farkı,  $\Delta T_9$ : Ortamla ısı borusu dış yüzeyi arası sıcaklık farkı olarak tanımlanmıştır. Bir ısı borusu sisteminde, sıcaklık dağılımından faydalanarak teorik ısı direnç  $R_{th}$ , aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır (Kim ve diğ, 2003).

$$R_{th} = \frac{(T_b - T_y)}{Q_{by}} = R_b + R_y \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'de;  $T_b$  buharlaştırıcı sıcaklığı,  $T_y$  yoğuşturucu sıcaklığı,  $R_b$  buharlaştırıcı ısı direnci,  $R_y$  yoğuşturucu ısı direnci,  $Q_{by}$  buharlaştırıcı ile yoğuşturucu arasındaki ısı transfer miktarıdır. Eşitlik 3.13'te, CPU tarafından uzaklaştırılan ısı, yoğuşturucudan ortama atılan toplam ısı miktarı ve sıcaklık farkı dikkate alınarak toplam ısı direnci aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir. Bu değer, sistemin ısı transferi performansını değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır.

$$R_{th} = (T_{CPU} - T_{ort}) / Q_{top} \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14)'de;  $Q_{top}$ , CPU tarafından çekilen toplam ısı miktarını,  $R_{th}$  ise ısı borusundaki toplam direnci temsil eder.  $T_{cpu}$  ısı kaynağının sıcaklığını,  $T_{ort}$  ise ortam sıcaklığını ifade eder. Buharlaştırıcı  $R_b$  ve yoğuşturucu  $R_y$  ısı dirençleri ise sırasıyla aşağıdaki denklemlerle verilmiştir.

$$R_b = (T_b - T_v) / Q_b \text{ ve } R_y = (T_b - T_y) / Q_y \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.14)'de;  $Q_b$  ve  $Q_y$  sırasıyla buharlaştırıcı ve yoğuşturucu ısı miktarını ifade eder.  $T_b$  buharlaştırıcı bölgesi dış yüzeyinin sıcaklığını,  $T_v$  buharlaştırıcı buhar sıcaklığını ve  $T_y$  yoğuşturucu sıcaklığını ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikte CPU tarafından uzaklaştırılan ısı, yoğuşturucudan ortama atılan toplam ısı miktarı ve sıcaklık farkı dikkate alınarak toplam ısı direnci ifade edilmektedir. Bu değer, sistemin ısı transferi performansını değerlendirmede kritik bir öneme sahiptir.

Akışkanın kritik ısı akısından daha fazla enerji ile ısıtılması durumunda, kaynama geçiş bölgesi kararsız hale gelir ve film kaynama meydana gelir. Film kaynamada, ısıtıcı yüzey sıcaklığı oldukça yüksek olduğundan, ısıtıcıda yanma riski bulunur. Isı borusunda damla sıcaklığının yükselmesiyle ısı transferinin gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu nedenle, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgeleri arasında, damla sıcaklığı ısı borusu yoluyla kondüksiyon ile aktarılır.

### 3.4.1 Isı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi

Isı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi, sıcaklık farkı nedeniyle bir akışkanın yoğunluk farkı oluşturup harekete geçmesiyle gerçekleşen bir ısı taşıma mekanizmasıdır. Bu sistemlerde özellikle dış yüzeyden havaya olan taşınım, genellikle

doğal konveksiyonla sağlanır. Aşağıda bu süreci açıklayan temel denklemler, sembollerin anlamlarıyla birlikte verilmiştir:

$$T_f = \frac{(T_s - T_{ort})}{2} \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.16)'da;  $T_f$  Film sıcaklığı, yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığının ortalamasıdır. Grashof sayısı (Gr) ısıya bağlı olarak ortaya çıkan serbest taşınım kuvvetleri ile akışkanın viskoz direnç kuvvetlerinin oranını gösterir. Bu sayı arttıkça doğal taşınım etkisi kuvvetlenir. Aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Incropera ve diğ, 2007).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{ort})L^3}{\nu^2} \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.17)'de;  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\beta$  hacimsel genleşme katsayısı  $= 1/T$ ,  $T_s$  yüzey sıcaklığı (ısı borusunun dışı),  $T_{ort}$  ortam sıcaklığı (hava),  $L$  karakteristik uzunluk ve  $\nu$  kinematik viskozitedir. Rayleigh sayısı (Ra) doğal taşınımın başlayıp başlamayacağını ve etkinliğini belirler. Belirli bir kritik değeri geçerse taşınım başlar ( $\approx 10^3 - 10^4$  arası geçiş bölgesidir).

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.18)'de;  $Pr$  boyutsuz Prandtl sayısıdır. Churchill–Chu korelasyonu  $Nu$  (Nusselt Sayısı) ısı taşınım katsayısı ( $h$ ) ile ısı iletkenliği ( $k$ ) arasındaki oranı verir. Bu sayı arttıkça konveksiyonla taşınan ısı miktarı artar. Yatay silindir için önerilen ifade aşağıda verilmektedir. (Incropera ve diğ, 2007).

$$Nu = \left[ 0,6 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/7}} \right]^2 \quad (3.19)$$

Isı taşınım katsayısı ( $h$ ) yüzeyden birim alandan birim zamanda ortama aktarılan ısı miktarını gösterir.  $h$  ne kadar büyükse yüzey o kadar etkili soğur.

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.20)'de; ısı iletkenlik katsayısı ve  $h$  ısı taşınım katsayısıdır. Toplam ısı transferi ( $Q$ ) belirli bir yüzey alanından doğal taşınım yoluyla dış ortama aktarılan toplam ısı miktarıdır. Eşitlik (3.21)'de  $A$  yüzey alanıdır (ısı borusu dışı).

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (3.21)$$

## BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOT

Deneyisel çalışma ve deneyde kullanılan cihazlar bu bölümde ele alınmıştır. Dizüstü bilgisayarlarda merkezi işlem birimi (CPU) diğer bir adı bilgisayar işlemcisi, bilgisayarların temel bilgi işlem birimi olan en önemli donanımlarından biridir ve bilgisayar beyni olarak görev yapar. CPU cihazın en önemli parçalarından biridir. CPU sinyalleri işleyen ve bilgi işlem olanağı sağlayan birincil bileşendir. Genellikle dizüstü bilgisayarlarda çoğu işlemlerin bir arada yürütülmesine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu nedenle kullanım ve veriminin en üst düzeye çıkarılması ve geri dönüş süresinin, bekleme süresinin ve yanıt süresinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirirken CPU oldukça ısınır ve bu ısının hızla dışarı atılması gerekmektedir. Bu ısının atılması ısı borusu ve ısı borusunun sonunda entegre olan fan yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmanın basit şeması aşağıda gösterilmektedir (Şekil 4.1). Deney düzeneği, veri kaydedici özellikli termokupl-termometre bütünlüğüne sabit bir ölçüm cihazı yardımıyla, dizüstü bilgisayarın ısı borusu üzerinde dört farklı nokta üzerinde sıcaklıkların ölçülmesini içermektedir. Ayrıca bilgisayarın ana kartının da soğutulmasına ısı borusu yardımcı olur.



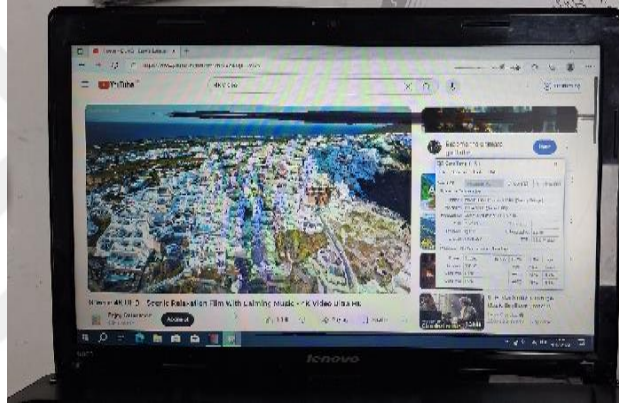
Şekil 4.1: Deney düzeneğinin basit bir görünümü.

## 4.1. Deney Cihazları

Deneylerde kullanılan cihazlar; bir adet dizüstü bilgisayar, 1 adet veri kaydedici özellikli termokupl-termometre, CPU da maksimum çalışma yükü oluşturmak için FurMark2 test programı, CPU sıcaklığını test etmek için Core Temp programı, Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi kullanılmıştır.

### 4.1.1. Dizüstü bilgisayar

Deneylerde kullanılan Lenovo marka dizüstü bilgisayarın önden ve ısı borusunun olduğu arka kısım açık vaziyette görüntüleri aşağıda verilmektedir (Şekil 4.2).



Önden görünüş



Isı borusunun görüldüğü arka kısım

Şekil 4.2: Deneyde kullanılan dizüstü bilgisayarın önden ve ısı borusunun olduğu arka kısım görüntüleri.

Deneyde kullanılan Lenovo marka dizüstü bilgisayarın teknik özellikleri aşağıda bulunmaktadır (Tablo 4.1).

| Tablo 4.1. Deneyde kullanılan Lenovo marka dizüstü bilgisayarın teknik özellikleri. |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Lenovo G570 CORE İ5 Dizüstü bilgisayar                                              |              |
| İşlemci Markası                                                                     | Intel        |
| İşlemci Numarası                                                                    | 2410M        |
| İşlemci Hızı                                                                        | 2.30 GHz     |
| Ekran Kartı Chipseti                                                                | AMD®, HD6370 |
| Ekran Kartı Hafızası                                                                | 1024 MB      |
| Ram Tipi ve hafızası                                                                | DDR3         |
| Disk Kapasitesi                                                                     | 500 GB       |
| Ekran Boyutu                                                                        | 15,6 inç     |
| Ram (Sistem Belleği)                                                                | 4 GB         |

#### 4.1.2. Termokupl-termometre ölçüm cihazı

Deney düzeneğinde sıcaklık ölçümleri veri kaydedici özellikli termokupl-termometre bütünlüğüne sabit dört adet termokupl ucu bulunan Cem marka DT3891G modeli dijital bir ölçme cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.3). Termokupl-termometre cihazı ikişer görünümlü şeklinde dönüşümlü olarak dört adet termokupl ucundan gelen sıcaklık değerlerini göstermektedir. Deneylerde kullanılan termokupl-termometre cihazının özellikleri Tablo 4.2’de verilmektedir.



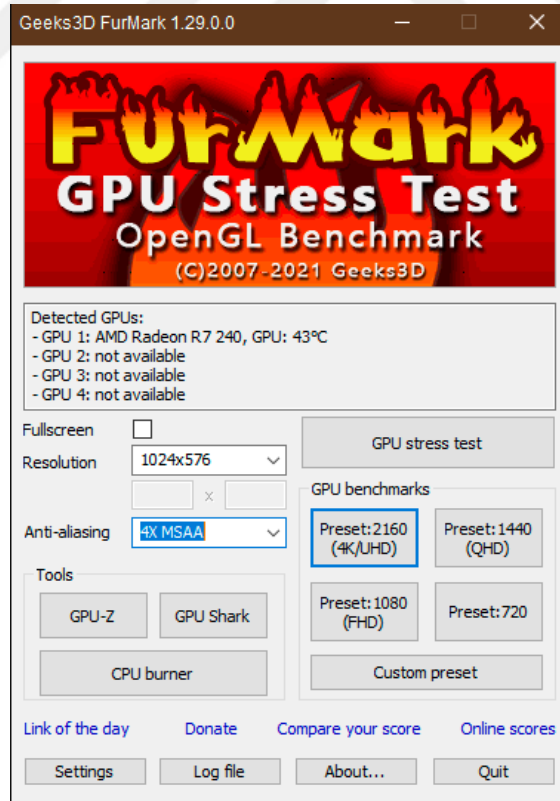
Şekil 4.3: Deneylerde kullanılan termokupl-termometre cihazının fotoğrafı.

Tablo 4.2. Termokupl-termometre cihazının özellikleri.

| Cem Marka Termokupl ve Datalogger Teknik Özellikleri |                                    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Sıcaklık hassasiyeti                                 | $\pm 1$ °C                         |
| Sıcaklık Çözünürlüğü                                 | 0,1 °C                             |
| K Tipi Termokupl Sıcaklık Ölçüm Aralığı              | -200 °C ... +1372 °C               |
| J Tipi Termokupl Sıcaklık Ölçüm Aralığı              | -210 °C ... +1100 °C               |
| Ekran                                                | Arka ışıklı LCD ekran              |
| Sensör Kablo Uzunluğu                                | 98 cm                              |
| Hafıza Kapasitesi                                    | Termokupl girişi başına 18000 adet |
| Maksimum /Minimum Özelliği                           | Var                                |
| °C/°F Birimlerini Değiştirebilme                     | Var                                |
| Saklama Sıcaklığı                                    | -10 °C ... +50 °C                  |
| Çalışma Sıcaklığı                                    | 0 °C ... +50 °C                    |
| Güç Kaynağı                                          | 3 Adet 1,5 V AAA pil               |

#### 4.1.3. FurMark ve Core Temp test programları

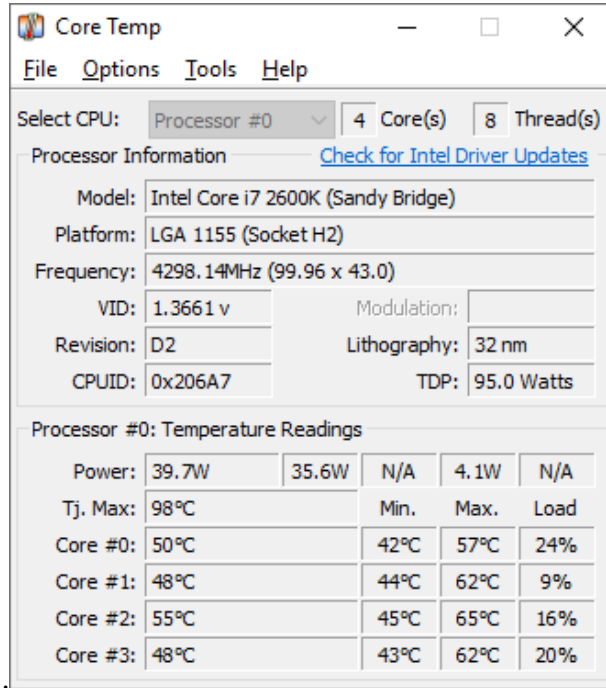
Dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisinde maksimum çalışma yükü oluşturmak için FurMark (v2.4.3 sürümü) test programı kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Testlerde kullanılan FurMark test programının görüntüsü.

FurMark paket programı sayesinde, deneylerde dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi tam kapasite (%100) kullanılarak, maksimum çalışma yükü değerini hem CPU hem de ekran kartı üzerine yüklenmiştir. FurMark testi ile maksimum kapasite ve hızda çalışan dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi ve ekran kartı maksimum sıcaklığa ulaşmaktadır. Deneylerde dizüstü bilgisayarın tam kapasite kullanımıyla elde edilen CPU işlemcisinin maksimum sıcaklıklarının değerlerini ölçmek için Core Temp adlı bir paket program kullanılmıştır. Core Temp programı, CPU işlemci sıcaklığını ve diğer önemli bilgileri izlemek için kompakt, zahmetsiz, küçük boyutlu fakat güçlü bir programdır. Bu program sayesinde sistemdeki CPU işlemcisini her bir çekirdeğinin sıcaklığını görüntülemek mümkündür.

Tüm büyük CPU işlemci üreticileri, ürünlerinin içine bir dijital termal sensör entegre etmişlerdir. Dijital termal sensör, geleneksel yerleşik termal sensörlere göre daha doğru ve yüksek çözünürlüklü sıcaklık okumaları sağlar. Bu özellik, tüm yeni x86 işlemciler tarafından desteklenmektedir. Core Temp programının ara yüzünün kullanılmasının kolay olmasının yanında yüksek düzeyde özelleştirme ve genişletilebilirlik imkânı da sunmaktadır. Aşağıda Core Temp programının bir görüntüsü bulunmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Testlerde kullanılan Core Temp programının görüntüsü.

#### 4.1.4. Isı borusu

Deneylerle Lenovo marka, Intel Core i5 2410M CPU, 2.30 GHz işlemcisi olan bir dizüstü bilgisayarın ısı borusu üzerinde termal analiz gerçekleştirilmiştir. Isı borusu anakartın soğutucu plakası ve CPU plakası üzerine monte edilmiş ve bir ucu fana montajlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Isı borusunun dizüstü bilgisayarda bağlantı şeklinin görüntüsü.

Dizüstü bilgisayarın işlemcisi üzerine ısı borusu, termal macun kullanılarak bağlanması sonucunda, işlemci sıcaklığını ısı borusunun buharlaştırıcı bölgesinden ve ısı borusunun uç kısmında bulunan elektronik dizüstü bilgisayarın ana kartına bağlı soğutma plakası üzerinden ısıyı alarak, yoğunlaştırıcı bölgesindeki dizüstü bilgisayar fanının yardımıyla ısı dışarıya atılmaktadır. Isı borusu U şeklinde bir bakır gövdeli su-metil alkol karışımlı çalışma akışkanı içeren ısı borusunun dizüstü bilgisayardan sökülmüş halinin görüntüsü verilmiştir (Şekil 4.7). Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun teknik resmi bulunmaktadır (Şekil 4.8).

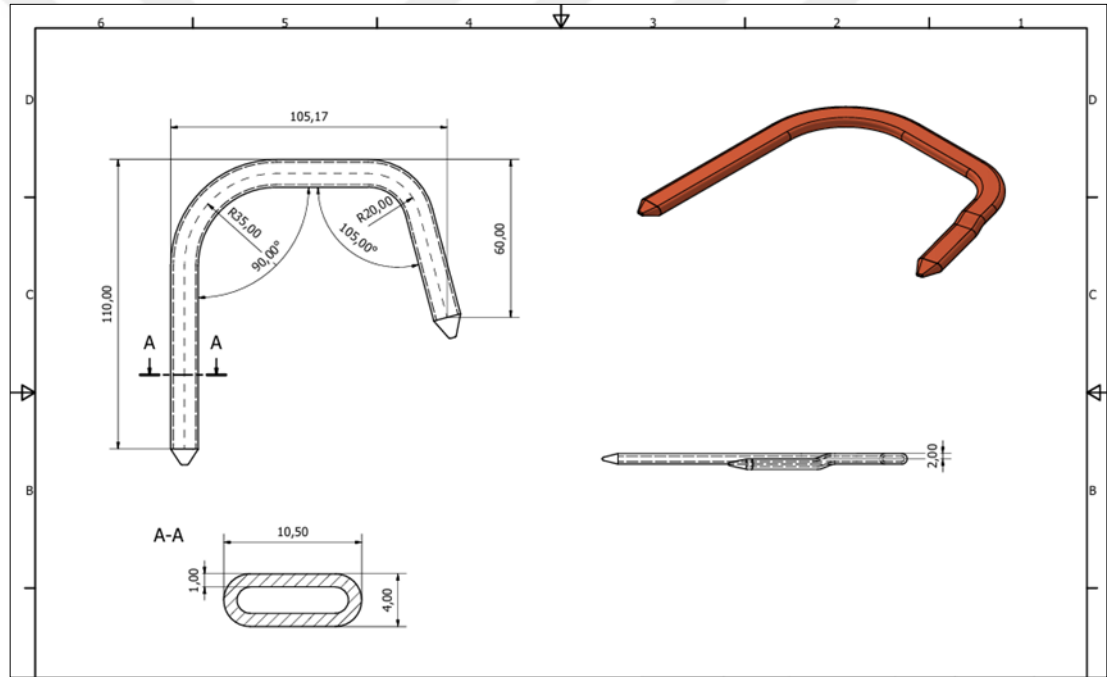
Bilgisayar işlemcisi (CPU)  
bağlantı plakası

Ana kart soğutma plakası



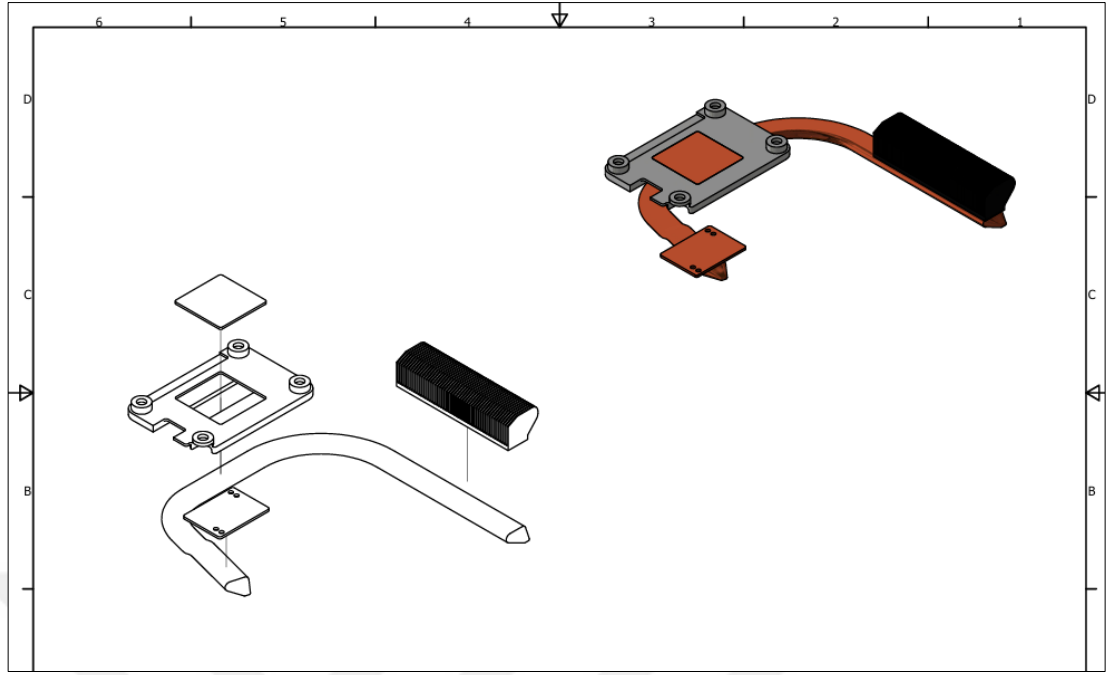
Fan Kanatçıkları

Şekil 4.7: Dizüstü bilgisayarın ısı borusu bilgisayardan sökülmüş hali.



Şekil 4.8: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun teknik resmi.

Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun sökülmüş halinde görülen ek bağlantıların montaj halinden ayrı teknik resmi aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 4.9). Bu bağlantılar; ana kartın soğutma plakası, bilgisayar işlemcisi (CPU) bağlantı plakası ve fan kanatçıkları bağlantısıdır. Isı borusu kesiti Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.9: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun bağlantı montaj teknik resmi.



Şekil 4.10: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun kesit görüntüsü.

Isı borusunun içerisinde gözenekli bir fitil yapısı (Şekil 4.11) bulunmaktadır. Isı borusunun dizüstü bilgisayar soğutma fanındaki ucunda yoğunlaşan soğutucu akışkan bu fitil yapısı ile kılcallık etkisi oluşturarak (kılcallığı arttırmak için ısı borusuna küçük

dereceli bir eğim sağlanmaktadır). Kılcallık olayı kohezyon ve adezyon etkisi ile gerçekleşen bir olaydır.



Şekil 4.11: Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun fitil yapısının görüntüsü.

#### 4.1.5. Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi

Deney seti kurulumunda soğutucu akışkanların ısı borusuna yüklenmeden önce, ısı borusu içindeki havanın alınması işlemi için gerekli olan vakumlama işleminin kontrolü, yüklenen soğutucu akışkanın basıncının ve sıcaklığının kontrolü için Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi kullanılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Techsun marka analog basınç-sıcaklık göstergesi montajlanmış görseli.



Orijinal dizüstü bilgisayarın ısı borusu üzerine kurulan test düzeneği dizüstü bilgisayara monte edilmiştir (Şekil 4.14). Daha sonra test edilen soğutucu akışkanlar ısı borusuna vakum altında yüklenmiştir.



Şekil 4.14: Test düzeneğin dizüstü bilgisayara montajlanmış görüntüsü.

Tüm büyük CPU işlemci üreticileri, ürünlerinin içine bir dijital termal sensör entegre etmişlerdir. Dijital termal sensör, geleneksel yerleşik termal sensörlere göre daha iyi sonuç vermektedir.

#### 4.3. Deneyde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar

Soğutucu akışkanlar olarak; dizüstü bilgisayarın orijinal fabrika çıkışı su-metanol karışımı, R134a soğutucu akışkan, R404a soğutucu akışkan ve R1234ze soğutucu

akışkan kullanılmıştır. Bu akışkanların genel bilgileri ve teknik özellikleri aşağıda verilmektedir.

#### 4.3.1. Su- metanol karışımının özellikleri

Geleneksel olarak dizüstü bilgisayarda kullanılan ısı borusunda soğutucu akışkan olarak su-metanol karışımı (Tablo 4.3) kullanılmaktadır. Bunun nedeni hem ucuz olması hem de ısı borusuna şarj edilmesinin kolaylığındandır.

Tablo 4.3. Su-metanol karışımının özellikleri.

|                                  |                                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Kimyasal Yapı                    | H <sub>2</sub> O (su) + CH <sub>3</sub> OH (metil alkol)        |
| Molekül Ağırlığı                 | Su: 18 g/mol, Metil Alkol: 32 g/mol                             |
| Karışım Tipi                     | Homojen sıvı karışım                                            |
| Kaynama Noktası                  | Saf su: 100 °C, saf metanol: 64,7 °C; karışımda düşer           |
| Gizli Buharlaştırma Isısı        | Su: ~2260 kJ/kg, Metanol: ~1100 kJ/kg                           |
| Yoğunluk (Sıvı)                  | ~0,8-1,0 g/cm <sup>3</sup> (karışım oranına bağlı olarak)       |
| Termal İletkenlik                | Su: ~0,6 W/(m·K), Metanol: ~0,2 W/(m·K)                         |
| Suda Çözünürlük                  | Tam çözünür                                                     |
| Donma Noktası                    | Karışım oranına bağlı olarak -100°C'ye kadar düşebilir          |
| Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP)   | Yok                                                             |
| Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) | Yok (ancak metanol üretimi dolaylı emisyonlara katkı yapabilir) |
| Yanıcılık                        | Metanol yanıcıdır; karışım oranına bağlı olarak değişir         |

Raoult yasasına (Perrot, 1998) göre; ideal bir sıvı karışımının her bir bileşeninin kısmi basıncı, saf bileşenin (sıvı) buhar basıncının karışımdaki mol kesriyle çarpımına eşit olduğu belirtilmektedir. Sonuç olarak, uçucu olmayan çözünen maddenin seyreltik bir çözeltisinin buhar basıncının bağıl düşüşü, çözeltideki çözünen maddenin mol kesrine eşittir. Raoult yasası termodinamikte sonuçları olan fiziksel kimyanın bir ilişkisidir. İdeal bir çözeltideki tek bir bileşen için Raoult yasasının matematiksel ifadesi:

$$p_i = p_i^* x_i \quad (4.1)$$

Burada  $p_i$  gaz karışımındaki (çözeltinin üzerinde)  $i$  bileşeninin kısmi basıncı,  $p_i^*$  saf bileşeninin buhar basıncı,  $x_i$  karışımdaki (çözeltide)  $i$  bileşeninin mol kesridir. Çözeltideki bileşenler dengeye ulaştığında, çözeltinin toplam buhar basıncı, Raoult yasası ile Dalton'un kısmi basınçlar yasası ile birleştirilerek tayin edilebilir.

$$p = p_{su}^* x_{su} + p_{metanol}^* x_{metanol} \quad (4.2)$$

Bir solvent içinde ideal bir çözelti oluşturmak üzere uçucu olmayan bir bileşenin (buhar basıncı sıfırdır, buharlaşmaz) çözünürse, çözeltinin buhar basıncı, solventin buhar basıncından daha düşüktür. Buhar basıncındaki düşüş, çözeltideki bileşenin mol fraksiyonu ile doğru orantılıdır.

$$p = p_{metanol}^* x_{metanol} \quad (4.3)$$

ve eşdeğer denklem yazılırsa;

$$\Delta P = p_{metanol}^* - p = p_{metanol}^* (1 - x_{metanol}) + p_{metanol}^* x_{su} \quad (4.4)$$

elde edilir.

Dizüstü bilgisayarın genellikle 40 °C sıcaklıkta soğutma fanı çalışmaya başlamaktadır. Dolayısıyla ısı borusunda kullanılan homojen olarak karışmış su-metanol karışımında metanol bileşeni bu sıcaklıkta buharlaşmaya başlamaktadır. Bu sıcaklıkta başlaması için ısı borusuna homojen su-metanol karışımı değişik basınçlar altında yüklenebilir. Yukarıdaki formüllerle hesaplamalar yapıldığında homojen su-metanol karışımı 40 °C sıcaklıkta metanolün buharlaşmaya başlaması için farklı basınçlarda su-metanol karışım miktarları hesaplanmıştır. Isı borusunun içindeki su-metanol karışımın basıncına göre sabit 40 °C sıcaklıkta metanolün buharlaşmaya başlaması için farklı basınçlarda karışımında metanolün hacimsel oranı yüzde olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.4).

Tablo 4.4. Homojen su-metanol karışımının 40 °C sıcaklıkta metanolün buharlaşmaya başlangıç koşulunun farklı basınç değerleri.

| Ortam Basıncı (kPa) | Metanol Mol Kesiri | Metanol Hacim Oranı (%) |
|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 50                  | 0.74               | 73                      |
| 75                  | 0.82               | 81                      |
| 100                 | 0.87               | 87                      |
| 101.3 (1 atmosfer)  | 0.88               | 88                      |
| 150                 | 0.93               | 93                      |
| 200                 | 0.95               | 94                      |
| 300                 | 0.97               | 96                      |
| 400                 | 0.98               | 97                      |
| 500                 | 0.985              | 98                      |
| 600                 | 0.99               | 99                      |

#### 4.3.2. R-134a soğutucu akışkanın özellikleri

Moleküler formülü  $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$  şeklinde olan R-134a soğutucularda kullanılan bir renksiz ve belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona girmeyen bir soğutucu gazdır. Tam adı 1,1,1,2-Tetrafloroetan olarak da bilinen R134a, otomotiv iklimlendirme sistemleri, evsel ve ticari soğutma sistemleri, bazı ısı pompası sistemleri ve belirli uygulamalarda aerosol itici gaz uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir soğutucu akışkandır. R134a soğutucu akışkanı bakır, alüminyum, çelik gibi soğutma sistemlerinde kullanılan çoğu malzeme ve neopren ve nitril kauçuk gibi özel elastomerlerle uyumludur. R-134a soğutucu gazının teknik özellikleri aşağıda bulunmaktadır (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. R-134a soğutucu gazının teknik özellikleri

|                                  |                                                                                                 |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kimyasal Yapı                    | $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$                                                               |
| Molekül Ağırlığı                 | 102,03 g/mol                                                                                    |
| Donma Noktası                    | -96,6 °C                                                                                        |
| Kaynama Noktası                  | -26,1°C (1 atmosfer basınçta)                                                                   |
| Buharlaşma Isısı                 | ~215 kJ/kg (-26,1 °C'de)                                                                        |
| Yoğunluk                         | (Sıvı): 25 °C'de 1,207 g/cm <sup>3</sup> , (Gaz): 0 °C'de 5,25 kg/m <sup>3</sup> (1 atmosferde) |
| Termal İletkenlik (Gaz)          | 0,0146 W/(m·K) (25 °C' de)                                                                      |
| Kritik Sıcaklık                  | 101,1°C                                                                                         |
| Kritik Basınç                    | 40,59 bar                                                                                       |
| Özgül Isı Kapasitesi             | (Sıvı): ~1,42 kJ/(kg·K) (25° C' de), (Gaz): ~0,84 kJ/(kg·K) (1 atmosferde)                      |
| Viskozite                        | (Sıvı): 25°C' de 0,207 mPa·s, (Gaz): 25°C' de 12,11 µPa·s                                       |
| Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP)   | Yok                                                                                             |
| Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) | ~1300 (100 yıllık zaman diliminde)                                                              |
| Yanıcılık                        | Normal koşullarda yanıcı değildir                                                               |

#### 4.3.3. R-404a soğutucu akışkanın özellikleri

R-404a, %44 ağırlıkça R-125, %52 ağırlıkça R-143a ve %4 ağırlıkça R-134a' dan oluşan üçlü bir karışım hidroflorokarbon (HFC) soğutucudur. Termodinamik özellikleri, düşük ve orta sıcaklıklarda yeni tesislerde soğutma sektörü için R-502 ve R-22' nin ideal bir ikamesi oluşturmaktadır.

R-404a, dikkate değer bir kimyasal kararlılık ve 0,7 °C' lik düşük kayma sıcaklığı ile karakterize edilir. Ana uygulaması, düşük ve orta sıcaklıklar için soğutma sistemlerinde kullanılır. Özellikleri itibariyle soğutuculu vitrinlerde, soğutmalı araçlarda, buz makinelerinde ve diğer uygulamalarda kullanılmaya uygundur. R-404a soğutucu gazının teknik özellikleri aşağıda bulunmaktadır (Tablo 4.6).

Tablo 4.6. R-404a soğutucu gazının teknik özellikleri

|                                  |                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kimyasal Yapı                    | CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> (R-125, kütlece %44), CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> (R-143A, kütlece %52) ve CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> (R-134a, kütlece %4). |
| Molekül Ağırlığı                 | 97,6 g/mol                                                                                                                                                             |
| Donma Noktası                    | Ortalama: -117,5 °C (1 atmosfer basınçta)                                                                                                                              |
| Kaynama Noktası                  | -46,45 °C (1 atmosfer basınçta)                                                                                                                                        |
| Yoğunluk                         | (Sıvı): 25 °C' de 1,048 g/cm <sup>3</sup> , (Gaz): -15 °C' de 18,20 kg/m <sup>3</sup> (1 atmosferde)                                                                   |
| Termal İletkenlik                | 0,0649 W/(m·K) (sıvı), 0.0180 W/(m·K) (Gaz)                                                                                                                            |
| Kritik Sıcaklık                  | 72,07 °C                                                                                                                                                               |
| Kritik Basınç                    | 37,29 bar                                                                                                                                                              |
| Özgül Isı Kapasitesi             | (Sıvı): ~ 1.5423 kJ/(kg·K) (25° C' de), (Gaz): ~ 1.2214 kJ/(kg·K) (1 atmosferde)                                                                                       |
| Viskozite                        | (Sıvı): 25°C' de 129,3 (mPa·s, (Gaz): 25°C' de 14.41 µPa·s                                                                                                             |
| Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP)   | Yok                                                                                                                                                                    |
| Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) | ~ 3922 (100 yıllık zaman diliminde)                                                                                                                                    |
| Yanıcılık                        | Yanıcı değildir                                                                                                                                                        |

#### 4.3.4. R1234ze soğutucu akışkanın özellikleri

ASHRAE Standardı 34'ün R-1234ze (E)'nin isimlendirmesini atadığı trans-1,3,3,3-tetrafloroprop-1-en'dir. (E) eki, bunun bir izomer olduğunu gösterir. Diğer izomer (ek (Z)) ise cis-1,3,3,3- tetrafloroprop-1-en'dir. (E) ve (Z) izomerlerinin fiziksel özellikleri farklıdır: her ikisi de GWP<1'e sahip ultra düşük GWP molekülleridir, ancak R-1234ze(Z), daha yüksek bir kritik sıcaklıkla (308.66°F) ve R-1234ze (E)'den yaklaşık %50 daha düşük bir hacim kapasitesiyle ilişkili yüksek bir kaynama noktasına (49,6°F) sahiptir. Soğutucu akışkan R1234ze tüm özelliklerin dengesi göz önünde bulundurulduğunda piyasadaki en iyi orta basınçlı, düşük GWP'li soğutucu akışkandır. Farklı orta sıcaklık kullanımlarında geleneksel soğutucu akışkanlara enerji açısından verimli bir alternatiftir ve birkaç kW'tan 20 MW'a kadar kapasite aralığına ve 300 gramdan 13 megatona kadar değişen şarjlara sahip uygulamalar için bir dizi ekipman üreticisi tarafından seçilmiştir. Kullanım alanları; hava soğutmalı ve su soğutmalı

soğutucular, bölge ısıtma ve soğutma, ısı pompaları, buzdolapları, otomatlar, içecek alanları; hava kurutucuları vb. Sektör tarafından çok sayıda ödüle layık görülen R1234ze soğutucu akışkan kullanıcıları için en önemli kriterleri olan performans, maliyet etkinliği, çevresel etki ve güvenlik gibi kriterleri karşılamaktadır. R-1234ze, ASHRAE standardı 34 (ISO 817) uyarınca yanıcı değildir. Ancak, basınçlı hava ile karıştırıldığında ve güçlü tutuşma kaynaklarına maruz kaldığında alev alabilir. Güvenlik sınıflandırması A2L grup L2'dir. R-1234ze soğutucu gazının teknik özellikleri aşağıda bulunmaktadır (Tablo 4.7).

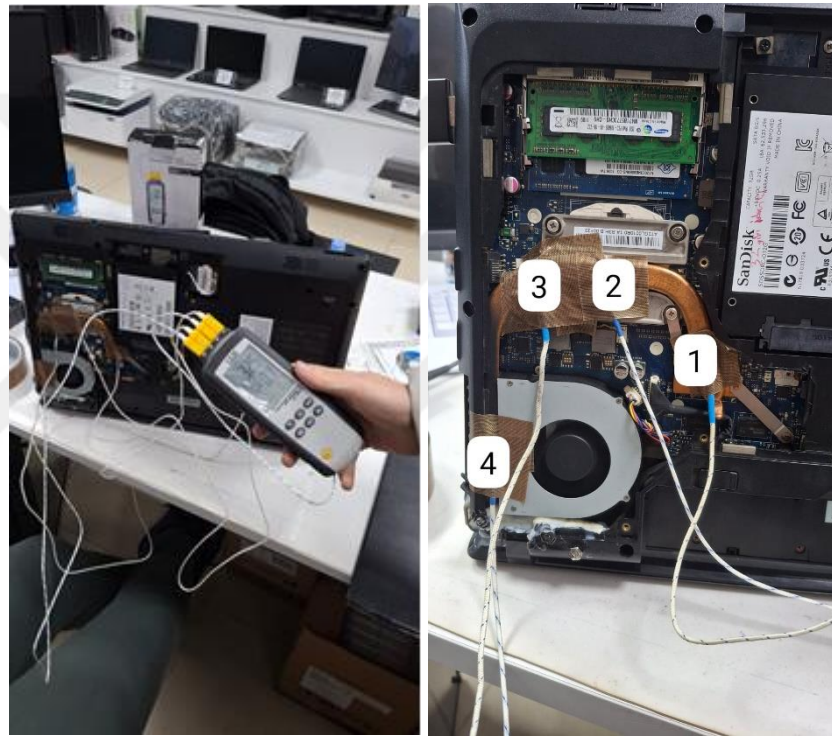
Tablo 4.7. R-1234ze soğutucu gazının teknik özellikleri

|                                  |                                                                            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Kimyasal Yapı                    | $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$                                          |
| Molekül Ağırlığı                 | 114 g/mol                                                                  |
| Donma Noktası                    | -104,53 °C (1 atmosfer basınçta)                                           |
| Kaynama Noktası                  | -19 °C (1 atmosfer basınçta)                                               |
| Buhar basıncı                    | 4,99 bar (25 °C' de), 9,97 bar (50 °C' de)                                 |
| Yoğunluk                         | 5,705 kg/m <sup>3</sup> (doyma noktasında gaz)                             |
| Termal İletkenlik                | 0,0744 W/(m·K) (25 °C' de) (sıvı), 0,014 W/(m·K) (Gaz)                     |
| Kritik Sıcaklık                  | 109,4 °C                                                                   |
| Kritik Basınç                    | 36,36 bar                                                                  |
| Özgül Isı Kapasitesi             | (Sıvı): 1.386 kJ/(kg·K) (25° C' de), (Gaz): 0,889 kJ/(kg·K) (1 atmosferde) |
| Viskozite                        | (Sıvı): 25°C' de 0,199 (mPa·s, (Gaz): 12,3 µPa·s (1 atmosfer basınçta)     |
| Yüzey gerilimi                   | 0,00885 N/m (25° C' de)                                                    |
| Ozon Tüketme Potansiyeli (ODP)   | Yok                                                                        |
| Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) | 7 (100 yıllık zaman diliminde)                                             |
| Yanıcılık                        | Hafif yanıcı (A2L sınıfında)                                               |

#### 4.4. Sıcaklık Ölçme Metodu

Dizüstü bilgisayarın ısı borusunun termal analizi için toplamda 4 adet termokupl kullanılmıştır. Bu düzenek, ısı transferini ve dağılımını etkili bir şekilde izlemek için kritik bir öneme sahiptir. Bu termokupllardan biri, elektronik devre soğutma plakası üzerinde yer almaktadır. (T1), biri dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde (T2), bir tanesi ısı borusunun ortasına (T3) ve diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında (T4) monte edilmiştir. Isı borusuna montaj edilmiş termokupllara bağlı dijital sıcaklık göstergeli termometre vasıtasıyla belirli zaman aralıklarında sıcaklıklar; a) Dizüstü bilgisayar rölantide çalışırken, b) video izleme sırasında (normal kullanım aralığı) c)

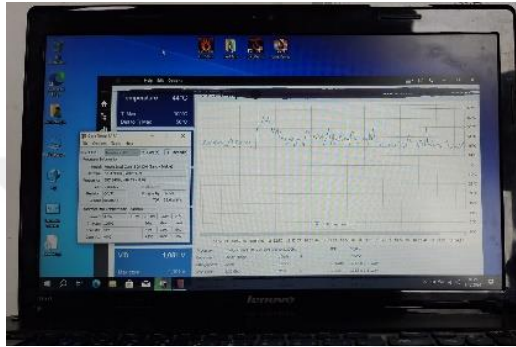
Bilgisayar programı, FurMark testi yardımıyla maksimum yük altında ölçülmüştür. Zamanla sıcaklık değişimini analiz etmek için her 5 saniyede dört termokupl sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Bu testler 20 dakikalık zaman aralığında her bir test için 240 adet sıcaklık verisi elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Her çalışma koşullarında; Rölantide çalışma, normal çalışma durumunda ve maksimum yükte bu testler gerçekleştirilmiştir. Dizüstü bilgisayarda ısı borusuna bağlı dijital sıcaklık göstergeli termokupl bağlantısı görülmektedir (Şekil 4.15).



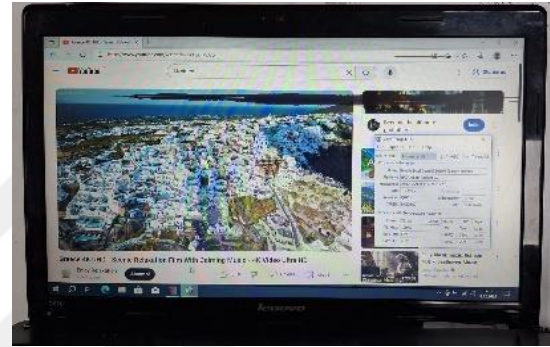
Şekil 4.15: Dizüstü bilgisayarda ısı borusuna bağlı dijital sıcaklık göstergeli termokupl bağlantısı.

Tüm durumlar için ayrıca Core Temp program yardımıyla CPU işlemcisinin sıcaklığı aynı zaman aralığında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dizüstü bilgisayarın işlemci sıcaklıklarının üç çeşitli çalışma durumlarındaki (Rölanti, normal çalışma, Maksimum yükte çalışma) testlerinin görüntüsü verilmiştir. Rölantide çalışma dizüstü bilgisayar açıkken ve gerekli programlar hariç herhangi bir ekstra program çalışmazken ve işlem yapılmazken ısı borusunun sıcaklıklarının ve CPU işlemcisinin sıcaklık ölçümü yapılmasıdır. Normal çalışma dizüstü bilgisayarda video izlerken veya herhangi bir

program kullanılırken ısı borusu üzerinden alınan sıcaklık ölçümü ve CPU işlemcisinin sıcaklık ölçülmesinin gerçekleştirilmesidir. Maksimum yükte çalışma ise FurMark test programı yardımıyla ekran kartı üzerinden CPU işlemcisini %100 kapasite ile çalıştırılmaya zorlanmış durumda ölçülen sıcaklıklar ve CPU işlemcisinin sıcaklık ölçülmesini içermektedir. Isı borusu sıcaklık testlerinin yapıldığı çalışma durumlarının görüntüleri verilmiştir (Şekil 4.16).



Rölantide çalışma



Normal (video izleme) çalışma



Maksimum yükte çalışma

Şekil 4.16: Isı borusu sıcaklık testlerinin yapıldığı çeşitli çalışma koşullarının görüntüsü.

## **BÖLÜM 5. BULGULAR VE TARTIŞMA**

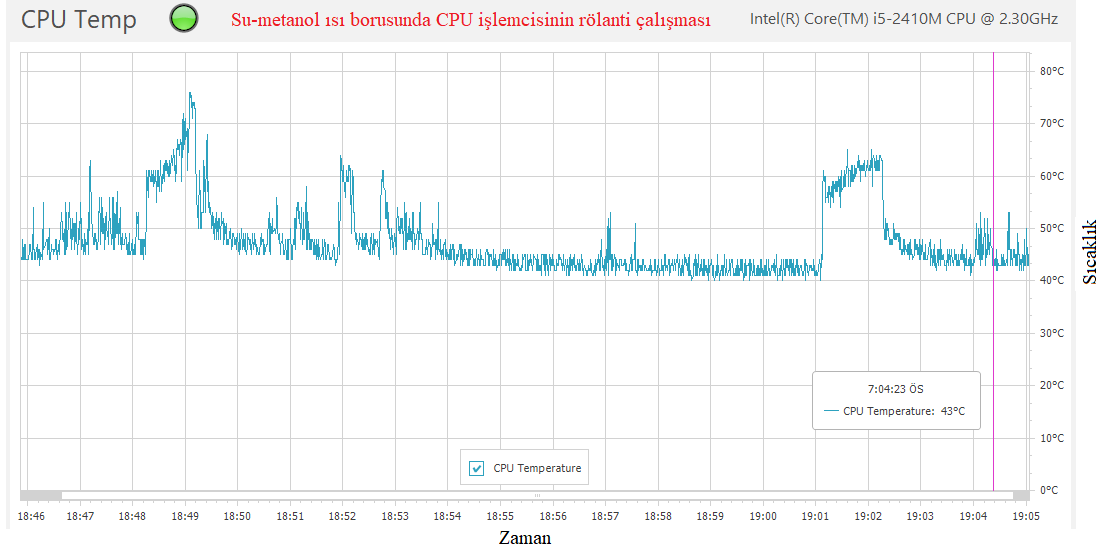
Bu bölümde fabrika orijinal ısı borusu içinde olan soğutucu akışkan su-metanol ile soğutucu gaz olarak kullanılan R-134a, R-404a ve R-1234ze'nin orijinal ısı borusu yapısı değiştirilmeden dizüstü bilgisayarın soğutmaya etkisinin deneysel çalışma sonuçları verilmektedir. Deneysel çalışmalar klimalı odada yapılmış ve çevre sıcaklığı tüm çalışmalarda 20 °C olarak sağlanmıştır.

### **5.1. Su-metanol Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcisinin Sıcaklık Analizi**

Su-metanol akışkanın bulunduğu ısı borusunda, dizüstü bilgisayar işlemcisinin (CPU) sıcaklıkları Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklığı; bilgisayarın rölantide çalışırken, normal kullanım çalışma koşulunda (video izleme sırasında) ve FurMark paket programı yardımıyla bilgisayar maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 çalışma sırasında ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklık ölçüm bilgileri 20 dakika boyunca her 5 saniyede bir alınmıştır ve zaman-sıcaklık grafikleri çizilmiştir.

#### **5.1.1. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcisinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları**

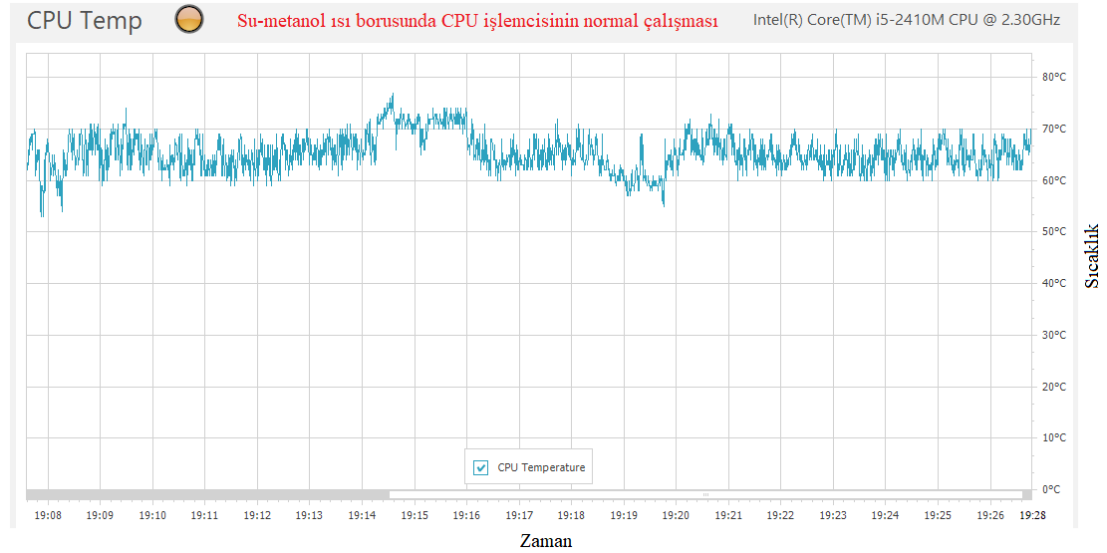
Dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.1). Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 76 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 40 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın sıcaklığı 65 °C sıcaklık üzerinde fanın hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önleniği anlaşılmaktadır. CPU işlemcisinin sıcaklığının yaklaşık ortalama 47 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

### 5.1.2. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları

Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.2).

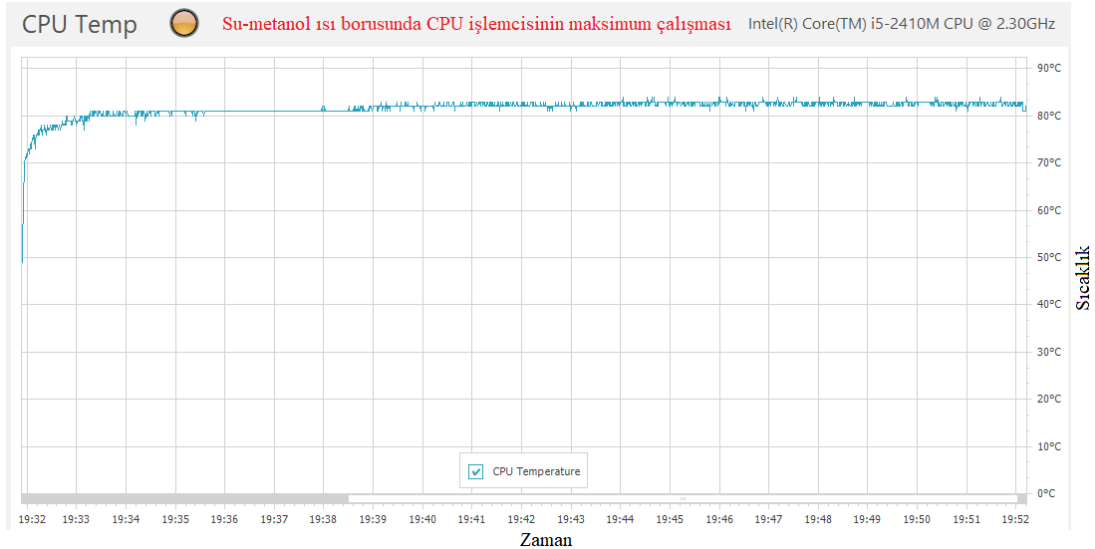


Şekil 5.2: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın normal çalışma (video izleme) sırasında CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sırasında maksimum sıcaklık yaklaşık 77 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında yaklaşık olarak 52 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarda video izleme sırasında CPU sıcaklığının ortalama yaklaşık 65 °C civarında olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın sıcaklığı 65 °C sıcaklık üzerinde fanın hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önlenildiği anlaşılmaktadır.

### 5.1.3. Su-metanol ısı borulu CPU işlemcisinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın FurMark paket programı yardımıyla maksimum yük oluşturulduğunda ve CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalışması sırasında her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Su -metanol ısı borusunda CPU işlemcisinin maksimum yükte çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

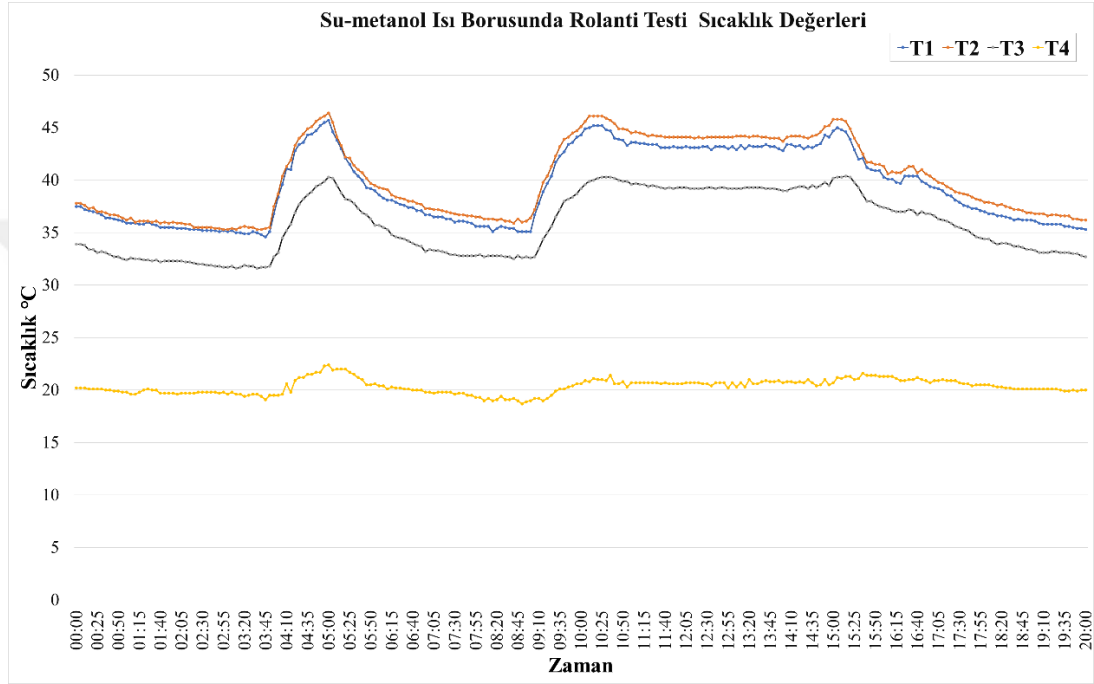
Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalıştığında maksimum sıcaklık yaklaşık 84 °C civarında olduğu minimum sıcaklıkta maksimum yükleme başladığında 50 °C sıcaklığının 1 dakika içerisinde yaklaşık olarak 80 dereceye ulaştığı tespit edilmiştir. Bu yükleme başlangıcıyla birlikte fanın maksimum kapasite çalıştığı ve CPU işlemcisinin sıcaklığının kritik seviyenin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. İlerleyen zaman aralığında 19 dakika boyunca maksimum yükte ortalama yaklaşık 82 °C de sıcaklığını korumakta olduğu görülmektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi dizüstü bilgisayarda maksimum yükleme sırasında bilgisayar içindeki yazılımların, CPU işlemcisinin kritik seviyelerin altında tutmak için ısı borusuna bağlı fanın maksimum devirde çalıştırarak sıcaklığı belli bir seviyede tuttuğu anlaşılmaktadır. Kritik sıcaklık seviyesi aşıldığında, Daha yüksek bir seviyeye ulaştığında bilgisayar iç yazılımı bilgisayar ana kartını ve CPU işlemcisini korumak için bilgisayarın çalışmayı kapattığı bilinen bir durumdur.

## **5.2. Su-Metanol Isı Borusunun Sıcaklık (Termal) Analizi**

Su-metanol karışımı akışkan içeren ısı borusu üzerine monte edilmiş 4 adet termokupl ve bu termokupllara bağlı dijital bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bakır malzemeden yapılmış ısı borusu üzerine montajlanmış termokupllardan bir tanesi elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1), bir tanesi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde (T2), bir tanesi ısı borusunun ortasına (T3) ve diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında (T4) monte edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın üzerinde monte edilmiş termokupllardan dizüstü bilgisayar kullanımında olabilecek üç farklı çalışma durumunda sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu farklı çalışma koşulları; dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken, normal kullanım (video izleme) sırasında ve maksimum yük altında çalışma koşullarıdır. Farklı çalışma koşullarında dizüstü bilgisayarın ısı borusunun sıcaklık (termal) davranışları incelenmiştir.

### 5.2.1. Su-metanol ısı borusunun rölanti kullanımında çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın rölantide çalışma sırasında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.4).



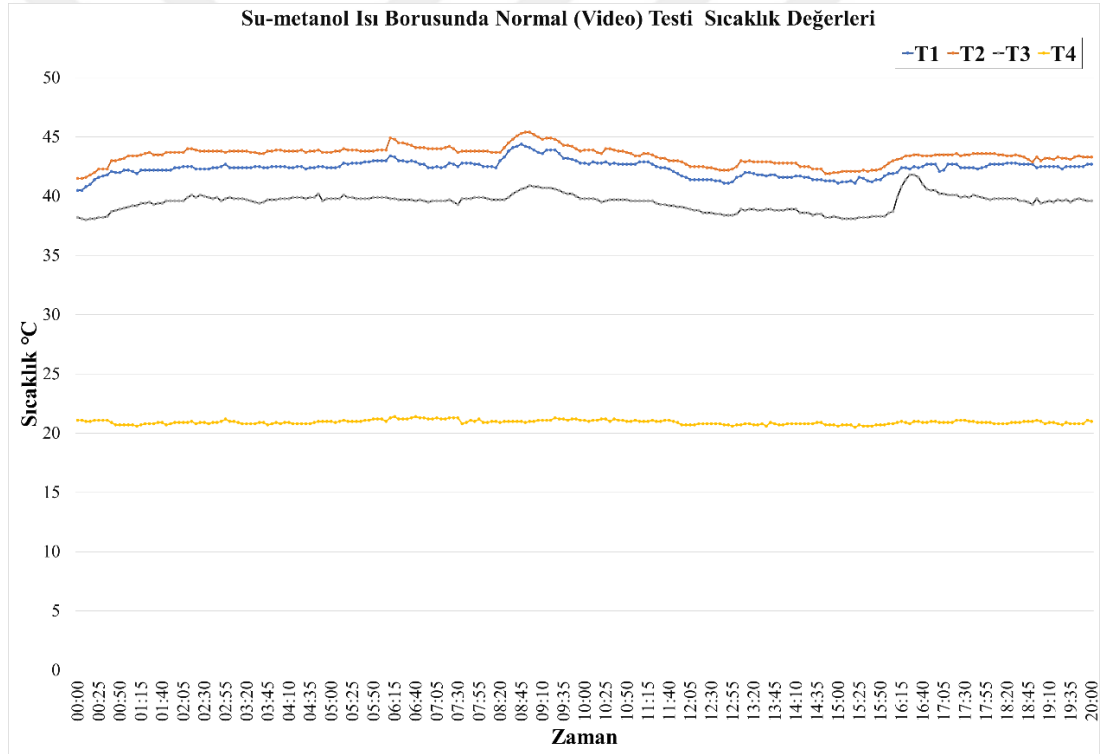
Şekil 5.4: Su-metanol ısı borusunda rölanti çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın rölantide ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 45,7 °C, minimum 34,6 °C ve ortalama 39,38°C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 46,4 °C, minimum 35,3 °C ve ortalama 40,12 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 40,4 °C, minimum 31,6 °C ve ortalama 35,83 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 22,4 °C, minimum 18,7 °C ve ortalama 20,34 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 33,92 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan

kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 0,34 °C üstünde olmaktadır.

### 5.2.2. Su-metanol ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın normal kullanımda (video izleme), 20 dakika boyunca ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.5).



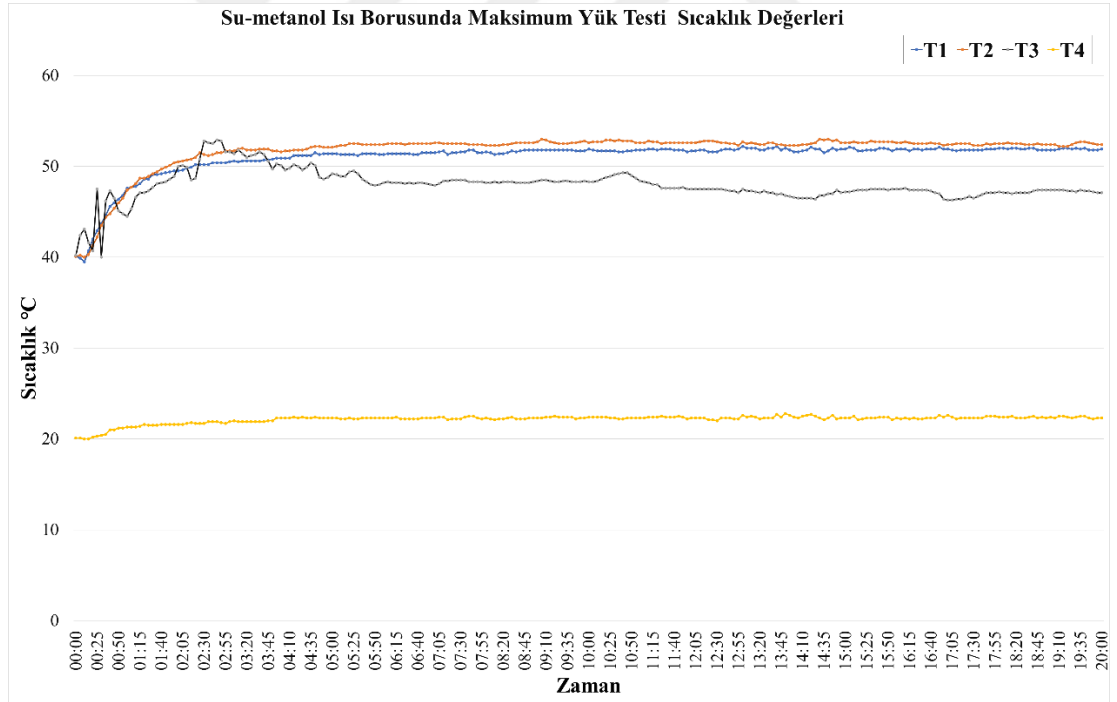
Şekil 5.5: Su-metanol ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 44,4 °C, minimum 40,5 °C ve ortalama 42,37°C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 45,4 °C, minimum 41,5 °C ve ortalama 44,43 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 41,8 °C, minimum 38 °C ve ortalama 39,51 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar

maksimum 21,4 °C, minimum 20,5 °C ve ortalama 20,93 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 36,56 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 0,93 °C üstünde olmaktadır.

### 5.2.3. Su-metanol ısı borusunun maksimum yük altında kullanımda çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın maksimum yük altında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6: Su-metanol ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın maksimum yük ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 52,2 °C, minimum 39,5 °C ve ortalama 51°C olarak ölçülmüştür. T2

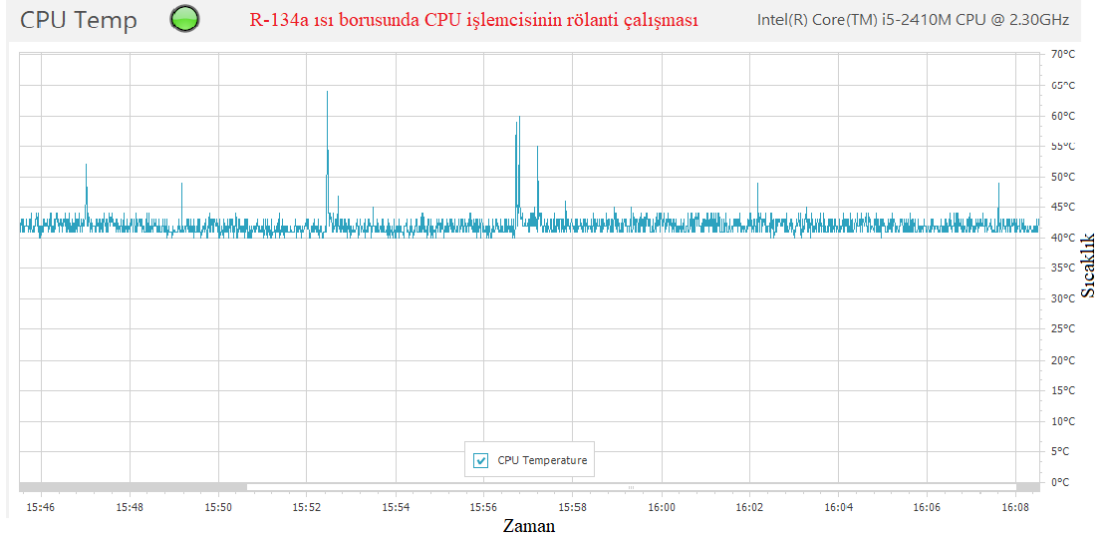
bölgesinde sıcaklıklar maksimum 53 °C, minimum 40 °C ve ortalama 51,75 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 52,9 °C, minimum 40 °C ve ortalama 47,93 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 22,8 °C, minimum 20 °C ve ortalama 22,15 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 36,56 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 0,15 °C üstünde olmaktadır.

### **5.3. R-134a Akışkanlı Isı Borusunun CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi**

R-134a akışkanın bulunduğu ısı borusunda, dizüstü bilgisayar işlemcisinin (CPU) sıcaklıkları Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklığı; bilgisayarın rölantide çalışırken, normal kullanım çalışma koşulunda (video izleme sırasında) ve FurMark paket programı yardımıyla bilgisayar maksimum yük altında yani CPU işlemcinin %100 çalışma sırasında ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklık ölçüm bilgileri 20 dakika boyunca her 5 saniyede bir alınmıştır ve zaman-sıcaklık grafikleri çizilmiştir.

#### **5.3.1. R-134a ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları**

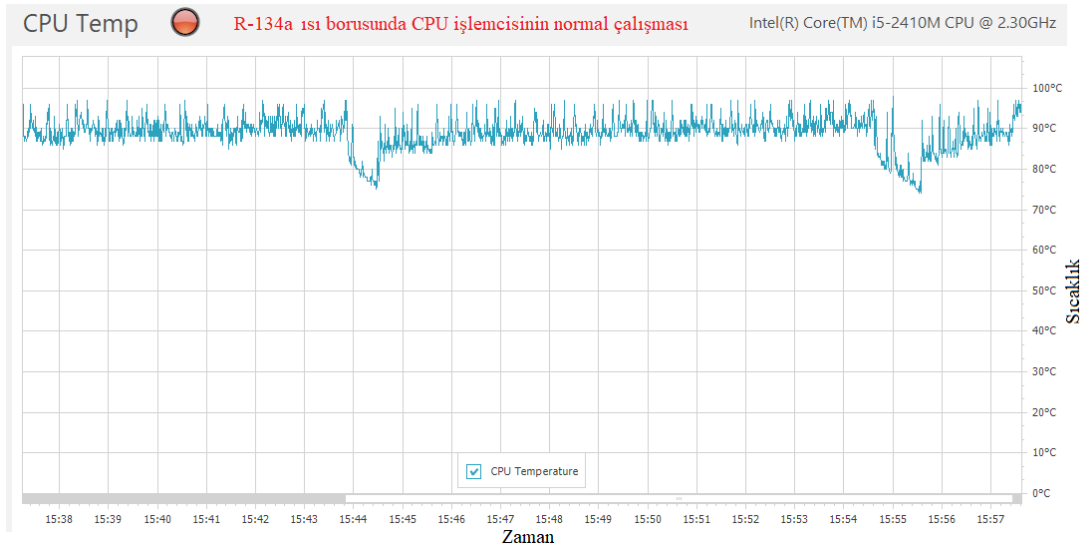
Dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.7). Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 64,2 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 40 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın rölanti çalışma koşullarında CPU işlemcisinin sıcaklığının ortalaması 42,5 °C civarındadır. 65 °C üzerine doğru CPU sıcaklığı arttığında bilgisayar fanının hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önlenildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.7: R-134a ısı borusunda CPU işlemcisinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

### 5.3.2. R-134a ısı borulu CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) çalışma ortamında çalışırken CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.8).

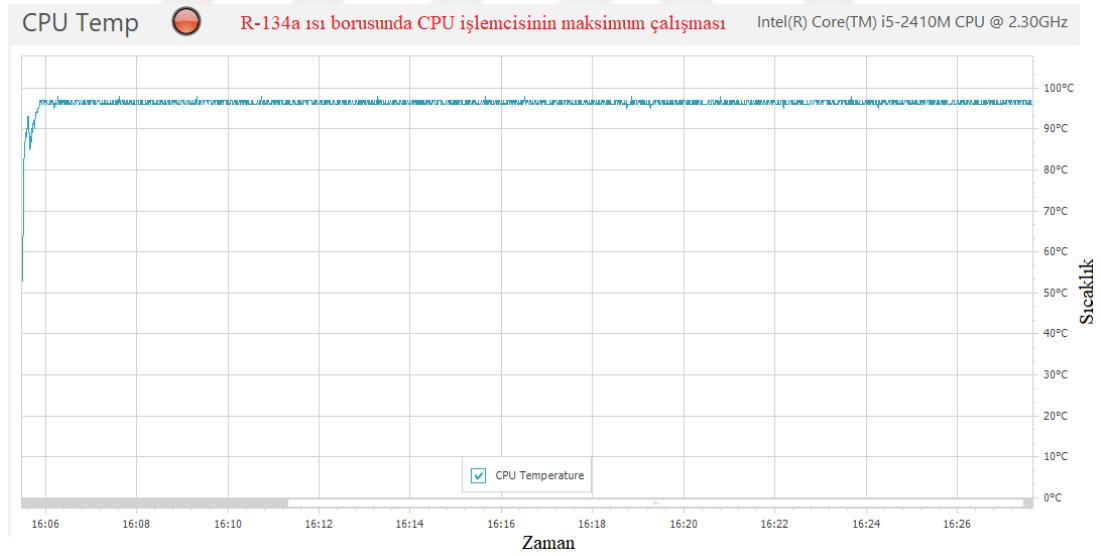


Şekil 5.8: R-134a ısı borusunda CPU işlemcisinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 97.6 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 75 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) çalışma koşullarında CPU işlemcisinin sıcaklığının ortalaması 91 °C civarındadır. 97 °C üzerine doğru CPU sıcaklığı arttığında bilgisayar fanının hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önleniği anlaşılmaktadır.

### 5.3.3. R-134a ısı borulu CPU işlemcisinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın FurMark paket programı yardımıyla maksimum yük oluşturulduğunda ve CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalışması sırasında her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: R-134a ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalıştığında maksimum yaklaşık 97,2 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında yükleme başladığında 53 °C sıcaklığının 40 saniye sonra yaklaşık olarak 96 °C dereceye ulaştığı tespit edilmiştir. Bu yükleme başlangıcıyla

birlikte fanın maksimum kapasite çalıştığı ve CPU işlemcisinin kritik seviyenin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. İlerleyen zaman aralığında 19 dakika boyunca maksimum yükte ortalama yaklaşık 96 °C de sıcaklığını korumakta olduğu görülmektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi dizüstü bilgisayarda maksimum yükleme sırasında bilgisayar içindeki yazılımların CPU işlemcisinin kritik seviyelerin altında tutmak için ısı borusu ve ona bağlı fanın maksimum devirde çalışarak sıcaklığı belli bir seviyede sabitlediği anlaşılmaktadır. Daha yüksek bir seviyeye ulaştığında bilgisayar iç yazılımı bilgisayar ana kartını ve CPU işlemcisini korumak için bilgisayarın çalışmayı kapattığı bilinen bir durumdur.

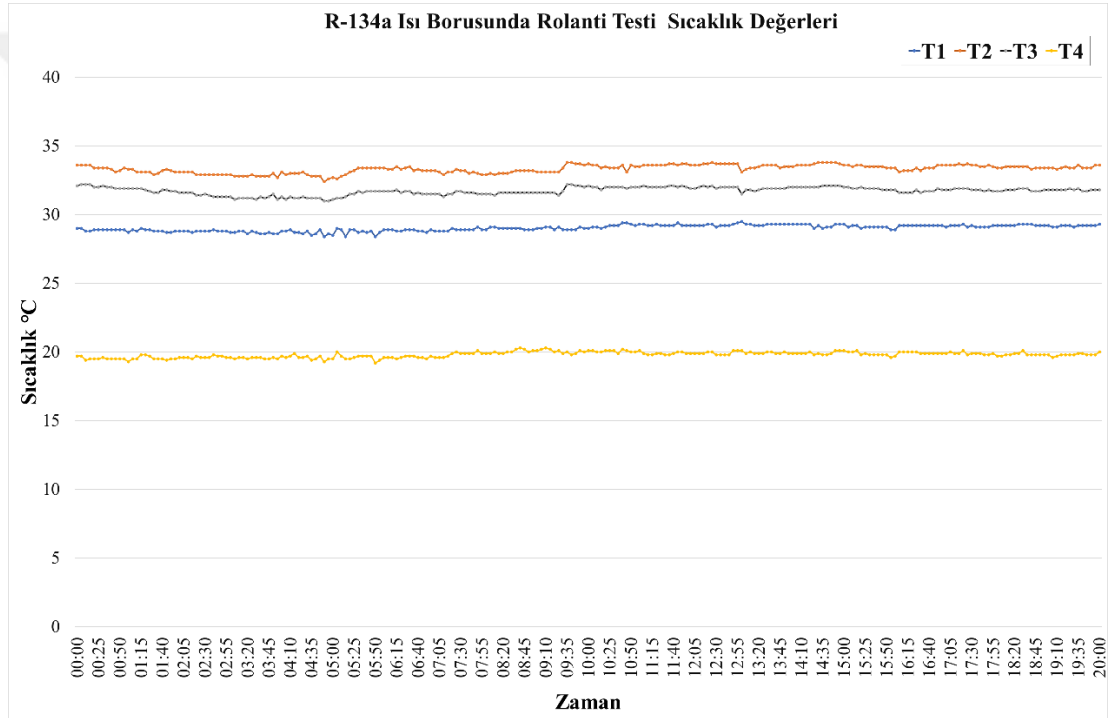
#### **5.4. R-134a Isı borusunun Termal Analizi**

R134-a akışkanı içeren ısı borusu üzerine monte edilmiş 4 adet termokupl ve bu termokupllara bağlı dijital bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bakır malzemeden yapılmış ısı borusu üzerine montajlanmış termokupllardan bir tanesi elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1), biri dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde (T2), bir tanesi ısı borusunun ortasına (T3) ve diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında (T4) monte edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın üzerinde monte edilmiş termokupllardan dizüstü bilgisayar kullanımında olabilecek üç farklı çalışma durumunda sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu farklı çalışmalar; dizüstü bilgisayar rölantide çalışırken, dizüstü bilgisayar normal kullanım (video izleme) sırasında ve dizüstü bilgisayarın maksimum yük altında çalışma koşullarıdır. Farklı çalışma koşullarında dizüstü bilgisayarın ısı borusunun termal davranışları incelenmiştir.

##### **5.4.1. R-134a ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları**

Bilgisayarın rölantide çalışma sırasında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.10). Dizüstü bilgisayarın rölantide ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 29,5 °C, minimum 28,4 °C ve ortalama 29,02 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde

sıcaklıklar maksimum 33,8 °C, minimum 32,4 °C ve ortalama 33,33 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 32,2 °C, minimum 31 °C ve ortalama 31,73 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 20,3 °C, minimum 19,2 °C ve ortalama 19,80 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 28,47 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının -0,2 °C altında olmaktadır.

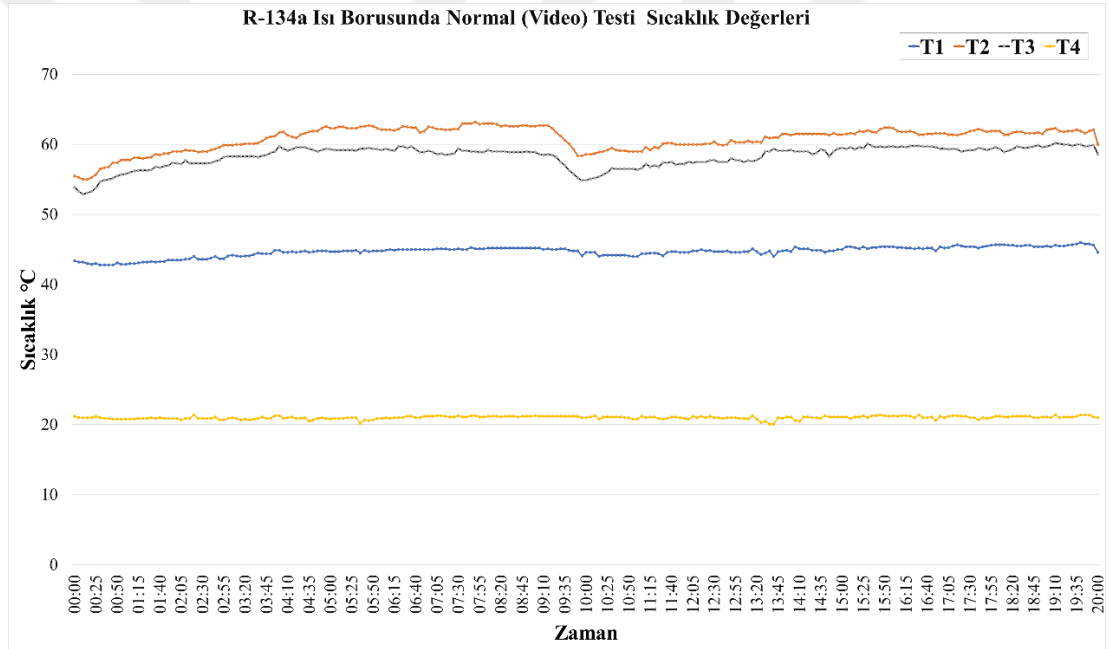


Şekil 5.10: R-134a ısı borusunda rölanti çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

#### 5.4.2. R-134a ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın normal kullanımda (video izleme), 20 dakika boyunca ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.11). Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) ortamında çalışırken, T1 bölgesinde

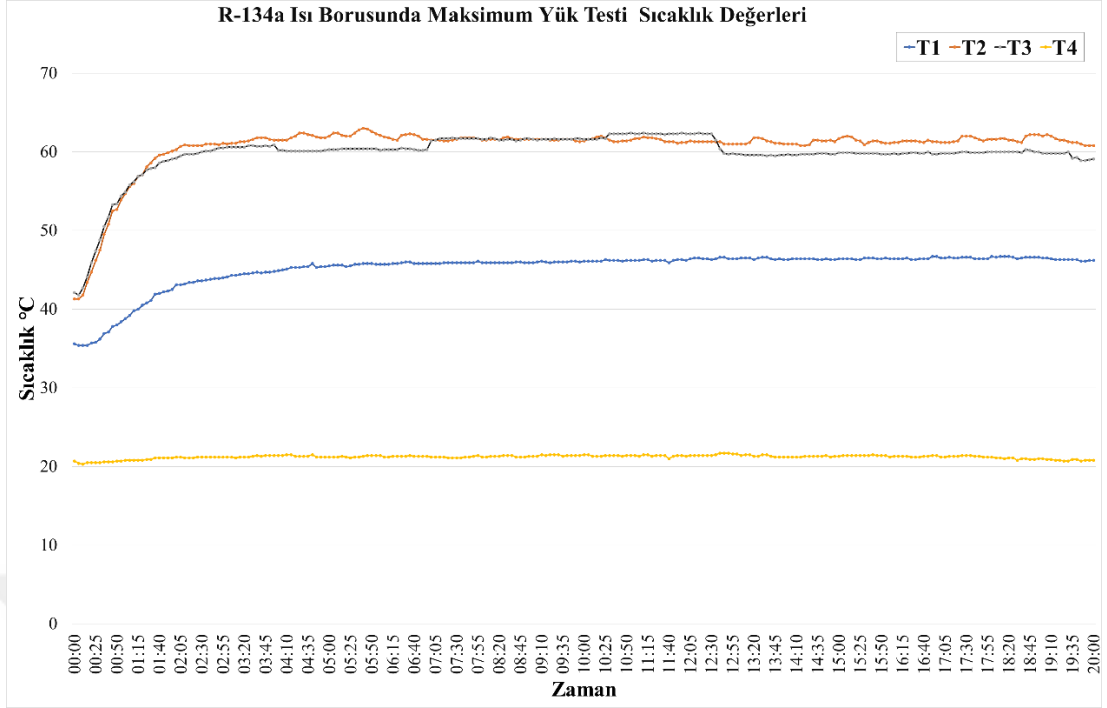
sıcaklıklar maksimum 46 °C, minimum 42,8 °C ve ortalama 44,7 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 63,2 °C, minimum 55 °C ve ortalama 60,83 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 60,2 °C, minimum 52,9 °C ve ortalama 58,29 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 21,4 °C, minimum 20,1 °C ve ortalama 21,02 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 46,21 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 1,02 °C üstünde olmaktadır.



Şekil 5.11: R-134a ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

#### 5.4.3. R-134a ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın maksimum yük altında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12: R-134a ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın maksimum yük ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 46,7 °C, minimum 35,4 °C ve ortalama 45,2 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 63 °C, minimum 41,3 °C ve ortalama 60,63 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 62,4 °C, minimum 41,8 °C ve ortalama 59,79 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 21,7 °C, minimum 20,3 °C ve ortalama 21,22 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 46,71 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 1,22 °C üstünde olmaktadır.

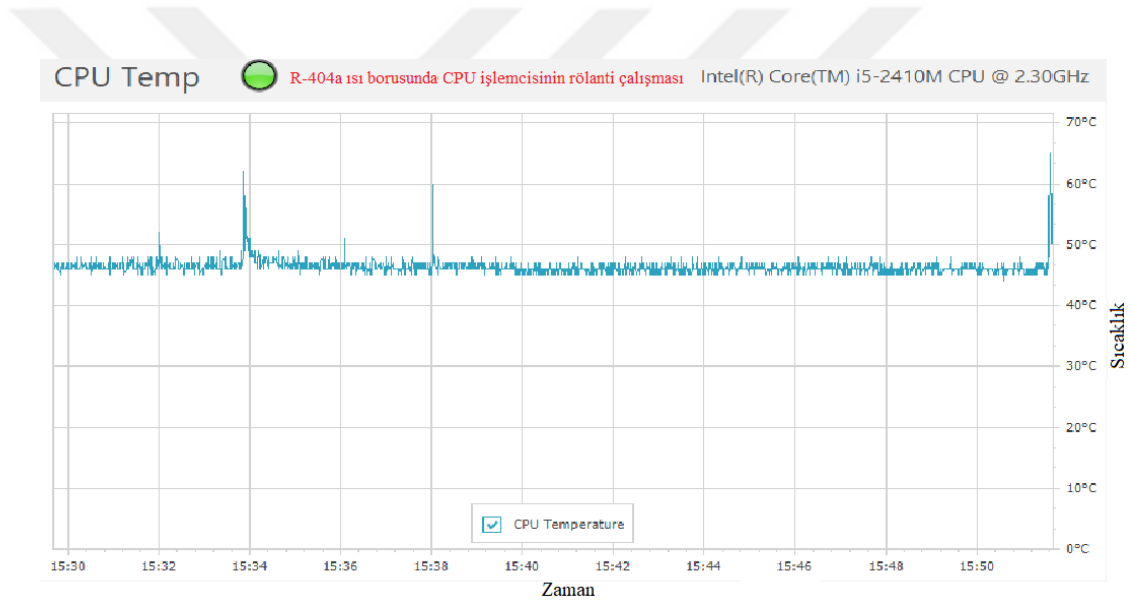
### 5.5. R-404a Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcinin Sıcaklık Analizi

R-404a akışkanın bulunduğu ısı borusunda, dizüstü bilgisayar işlemcisinin (CPU) sıcaklıkları Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklığı; bilgisayarın rölantide çalışırken, normal kullanım çalışma koşulunda (video izleme

sırasında) ve FurMark paket programı yardımıyla bilgisayar maksimum yük altında yani CPU işlemcinin %100 çalışma sırasında ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklık ölçüm bilgileri 20 dakika boyunca her 5 saniyede bir alınmıştır ve zaman-sıcaklık grafikleri çizilmiştir.

#### 5.5.1. R-404a ısı borulu CPU işlemcinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp programı yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.13).

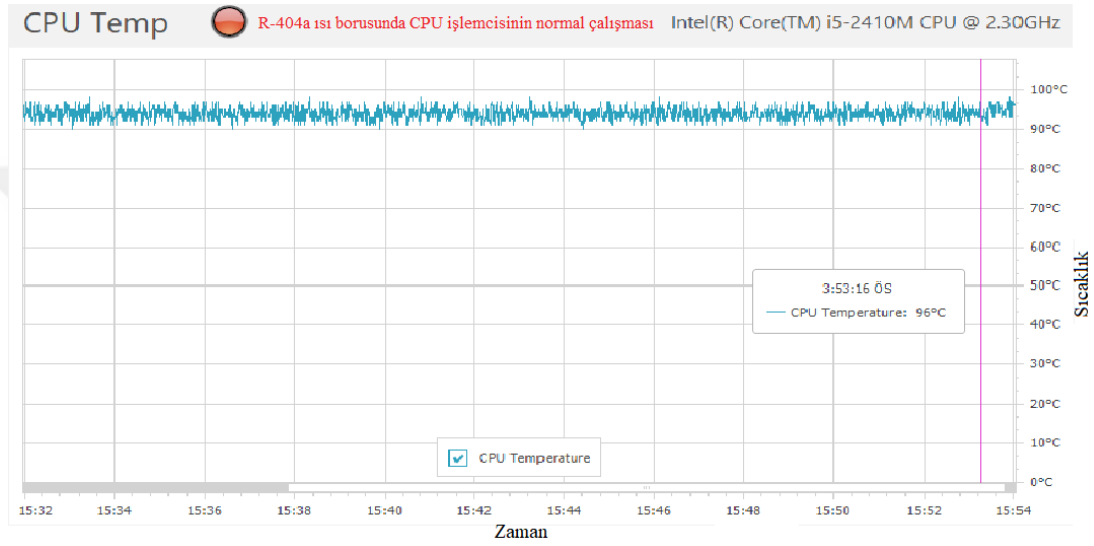


Şekil 5.13: R-404a ısı borusunda CPU işlemcinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 65 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 43,7 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın rölanti çalışma koşullarında CPU işlemcisinin sıcaklığının ortalaması 46,6 °C civarındadır. 65 °C üzerine doğru CPU sıcaklığı arttığında bilgisayar fanının hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önleniği anlaşılmaktadır.

### 5.5.2. R-404a ısı borulu CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın normal çalışma (video izleme) sırasında CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.14).



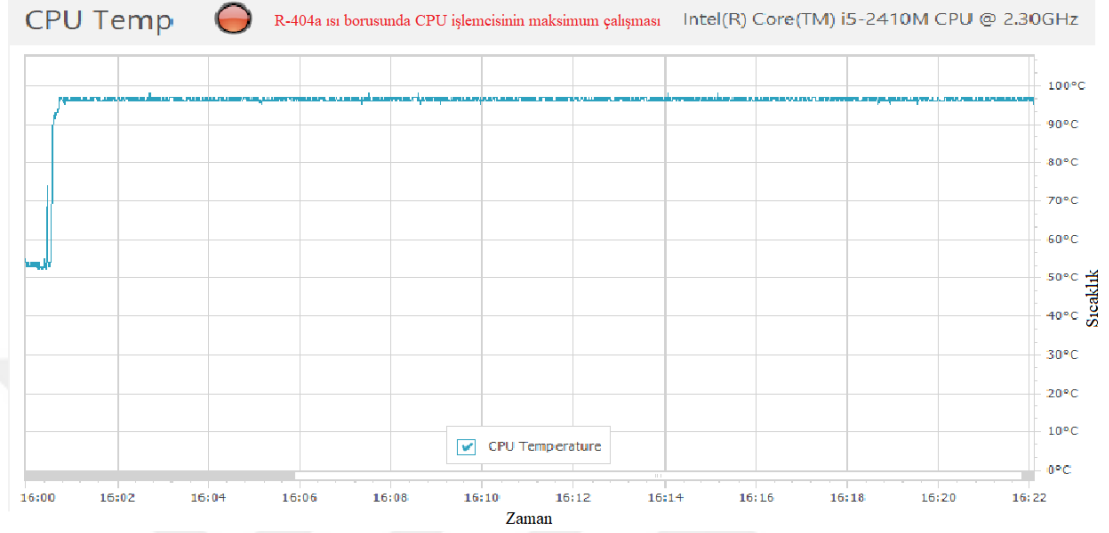
Şekil 5.14: R-404a ısı borusunda CPU işlemcisinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 98.4 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 90 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) çalışma koşullarında CPU işlemcisinin sıcaklığının ortalaması 94,5 °C civarındadır. 98 °C üzerine doğru CPU sıcaklığı arttığında bilgisayar fanının hızı otomatik artarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önleniği anlaşılmaktadır.

### 5.5.3. R-404a ısı borulu CPU işlemcisinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın FurMark paket programı yardımıyla oluşturulan ve CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalışması sırasında maksimum yük oluşturulduğunda

her 5 saniyede bir değer 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçölmüştür. Sıcaklık ölçömlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15: R-404a ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

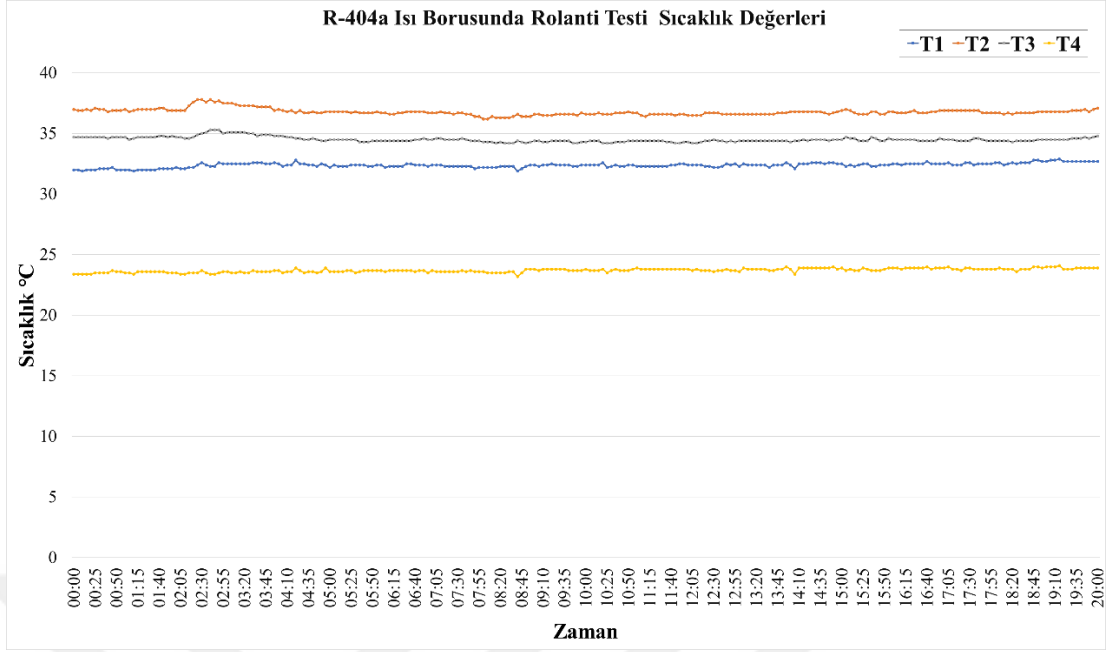
Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalıştığında maksimum yaklaşık 98 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında yükleme başladığında 53,4 °C sıcaklığın 50 saniye içerisinde yaklaşık olarak 96,7 dereceye ulaştığı tespit edilmiştir. Bu yükleme başlangıcıyla birlikte fanın maksimum kapasite çalıştığı ve CPU işlemcisinin kritik seviyenin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. İlerleyen zaman aralığında 19 dakika boyunca maksimum yükte ortalama yaklaşık 96,4 °C de sıcaklığını korumakta olduğu görölmektedir. Grafikten anlaşıldığı gibi dizüstü bilgisayarda maksimum yükleme sırasında bilgisayar içindeki yazılımların CPU işlemcisinin kritik seviyelerin altında tutmak için ısı borusu ve ona bağlı fanın maksimum devirde çalışarak sıcaklığı belli bir seviyede sabitlediği anlaşılmaktadır. Daha yüksek bir seviyeye ulaştığında bilgisayar iç yazılımı bilgisayar ana kartını ve CPU işlemcisini korumak için bilgisayarın çalışmayı kapattığı bilinen bir durumdur.

## 5.6. R-404a Isı borusunun Sıcaklık (Termal) Analizi

R-404a akışkanı içeren ısı borusu üzerine monte edilmiş 4 adet termokupl ve bu termokupllara bağlı dijital bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bakır malzemeden yapılmış ısı borusu üzerine montajlanmış termokupllardan bir tanesi elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1), biri dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde (T2), bir tanesi ısı borusunun ortasına (T3) ve diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında (T4) monte edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın üzerinde monte edilmiş termokupllardan dizüstü bilgisayar kullanımında olabilecek üç farklı çalışma durumunda sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu farklı çalışmalar; dizüstü bilgisayar rölantide çalışırken, dizüstü bilgisayar normal kullanım (video izleme) sırasında ve dizüstü bilgisayarın maksimum yük altında çalışma koşullarıdır. Farklı çalışma koşullarında dizüstü bilgisayarın ısı borusunun termal davranışları incelenmiştir.

### 5.6.1. R-404a ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları

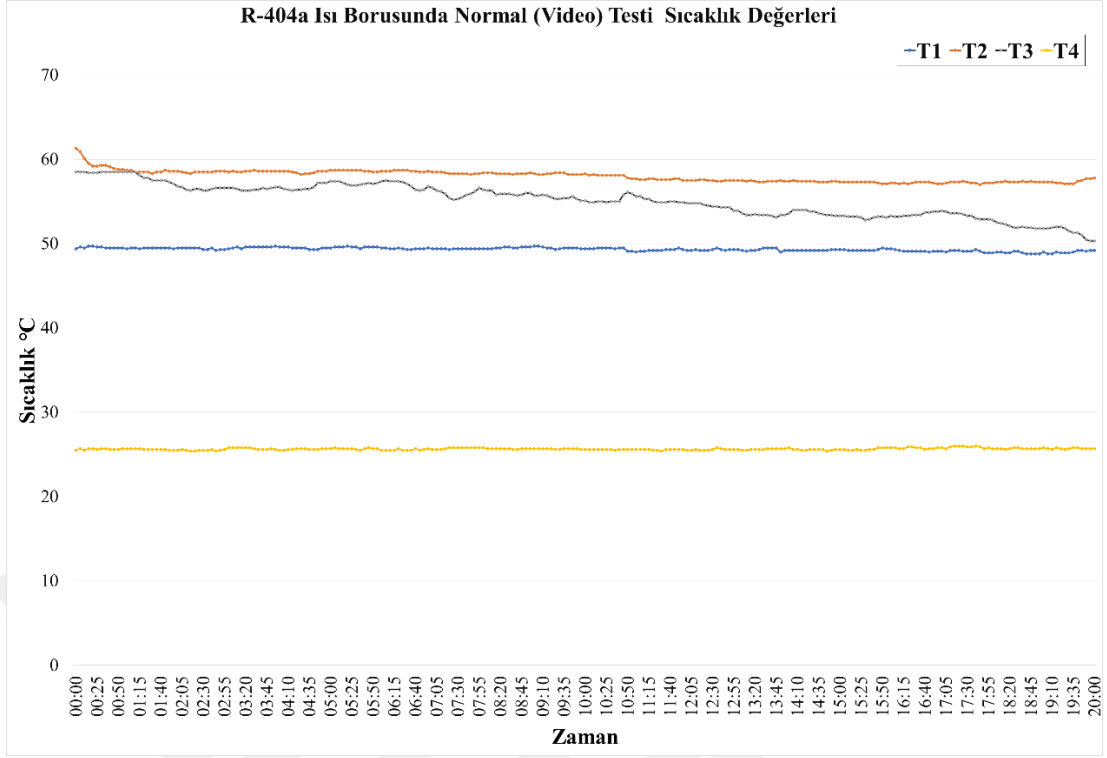
Bilgisayarın rölantide çalışma sırasında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.16). Dizüstü bilgisayarın rölantide ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 32,9 °C, minimum 31,9 °C ve ortalama 32,39 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 37,08 °C, minimum 36,2 °C ve ortalama 36,8 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 35,3 °C, minimum 34,2 °C ve ortalama 34,51 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 24,1 °C, minimum 23,2 °C ve ortalama 23,71 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 31,85 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 3,71 üstünde olmaktadır.



Şekil 5.16: R-404a ısı borusunda rölanti çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

### 5.6.2. R-404a ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın normal kullanımda (video izleme), 20 dakika boyunca ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.17). Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 49,7 °C, minimum 48,8 °C ve ortalama 43,34 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 61,3 °C, minimum 57 °C ve ortalama 58 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 58,5 °C, minimum 50,3 °C ve ortalama 55,13 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 26 °C, minimum 25,4 °C ve ortalama 25,65 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 47,03 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 5,65 °C üstünde olmaktadır.

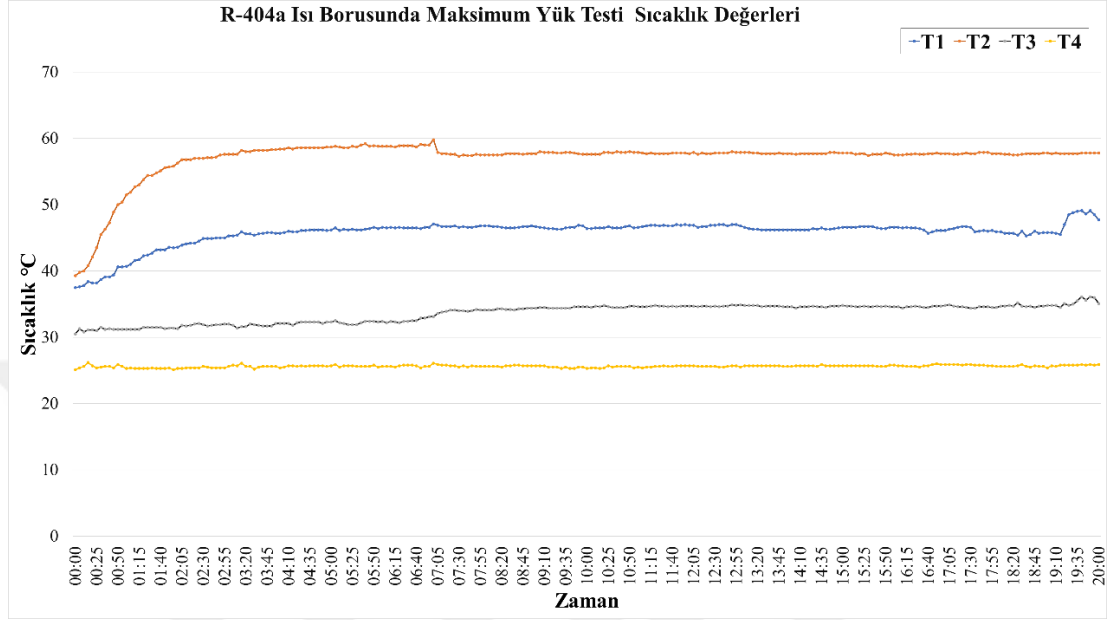


Şekil 5.17: R-404a ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

### 5.6.3. R-404a ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın maksimum yük altında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupullar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.18). Dizüstü bilgisayarın maksimum yük ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 49,1 °C, minimum 37,5 °C ve ortalama 45,78 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 59,8 °C, minimum 39,3 °C ve ortalama 57 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 36,1 °C, minimum 30,5 °C ve ortalama 33,64 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 25,6 °C, minimum 25,1 °C ve ortalama 25,62 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 40,52 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan

kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 5,62 °C üstünde olmaktadır.



Şekil 5.18: R-404a ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

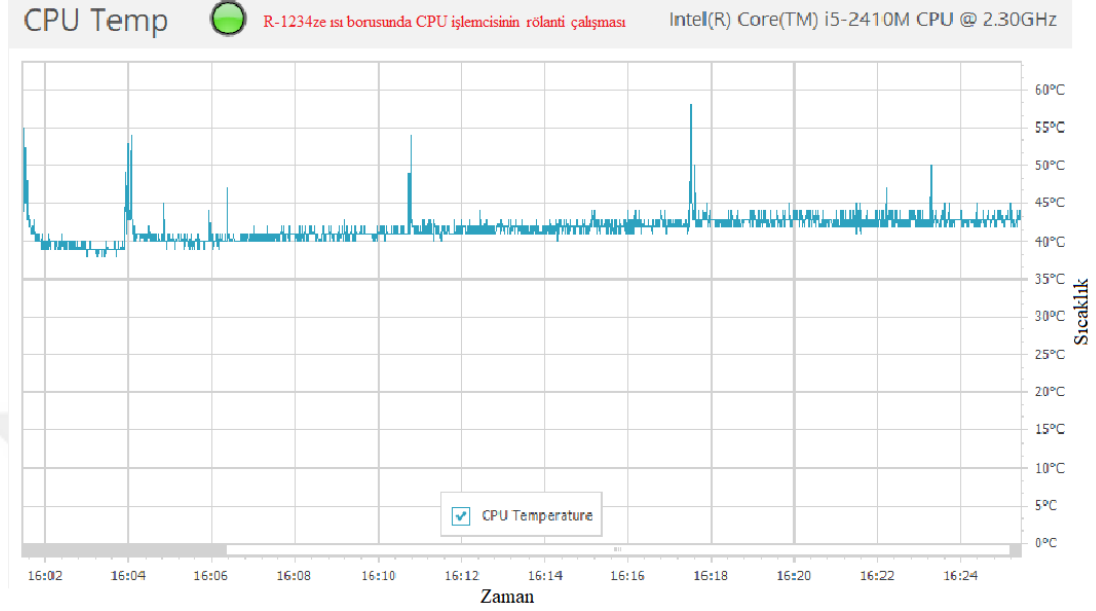
### 5.7. R-1234ze Akışkanlı Isı Borusunda CPU İşlemcisinin Sıcaklık Analizi

R-1134ze akışkanın bulunduğu ısı borusunda, dizüstü bilgisayar işlemcisinin (CPU) sıcaklıkları Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklığı; bilgisayarın rölantide çalışırken, normal kullanım çalışma koşulunda (video izleme sırasında) ve FurMark paket programı yardımıyla bilgisayar maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 çalışma sırasında ölçülmüştür. CPU işlemcisinin sıcaklık ölçüm bilgileri 20 dakika boyunca her 5 saniyede bir alınmıştır ve zaman-sıcaklık grafikleri çizilmiştir.

#### 5.7.1. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcisinin rölantide çalışma sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer alınarak 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür.

Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.19).

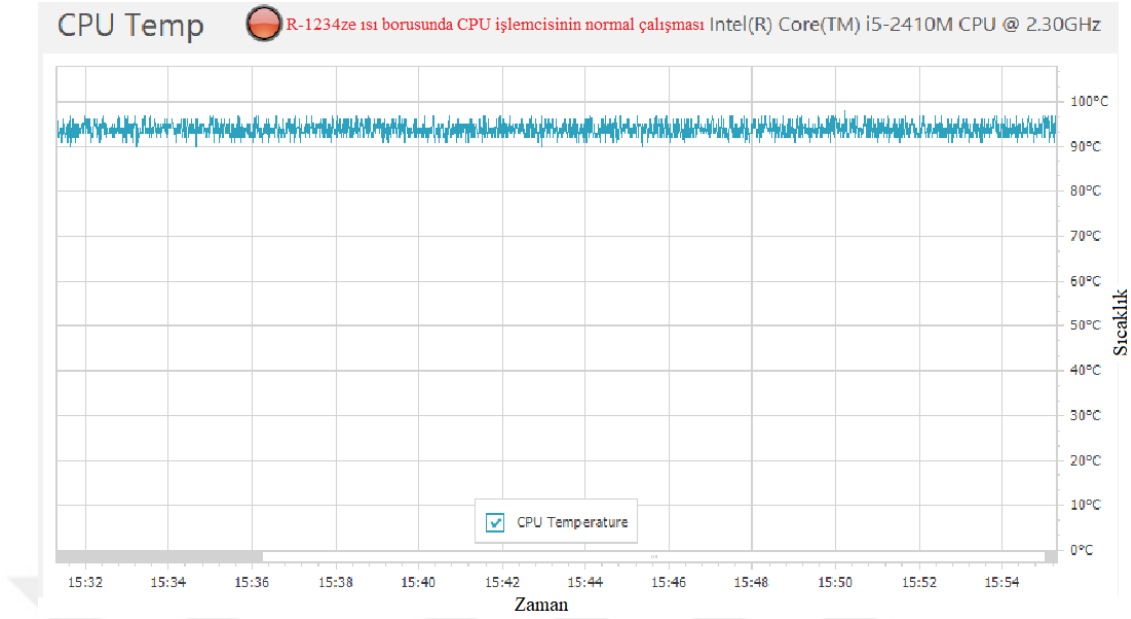


Şekil 5.19: R-1234ze ısı borusunda CPU işlemcisinin rölanti çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin rölantide çalışırken maksimum sıcaklık yaklaşık 58,3 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında 38,2 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın rölanti çalışma koşullarında CPU işlemcisinin sıcaklığının ortalaması 41,5 °C civarındadır.

#### 5.7.2. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın normal çalışma (video izleme) sırasında CPU işlemcisinin sıcaklıkları her 5 saniyede bir değer 20 dakika boyunca Core Temp program yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.20).



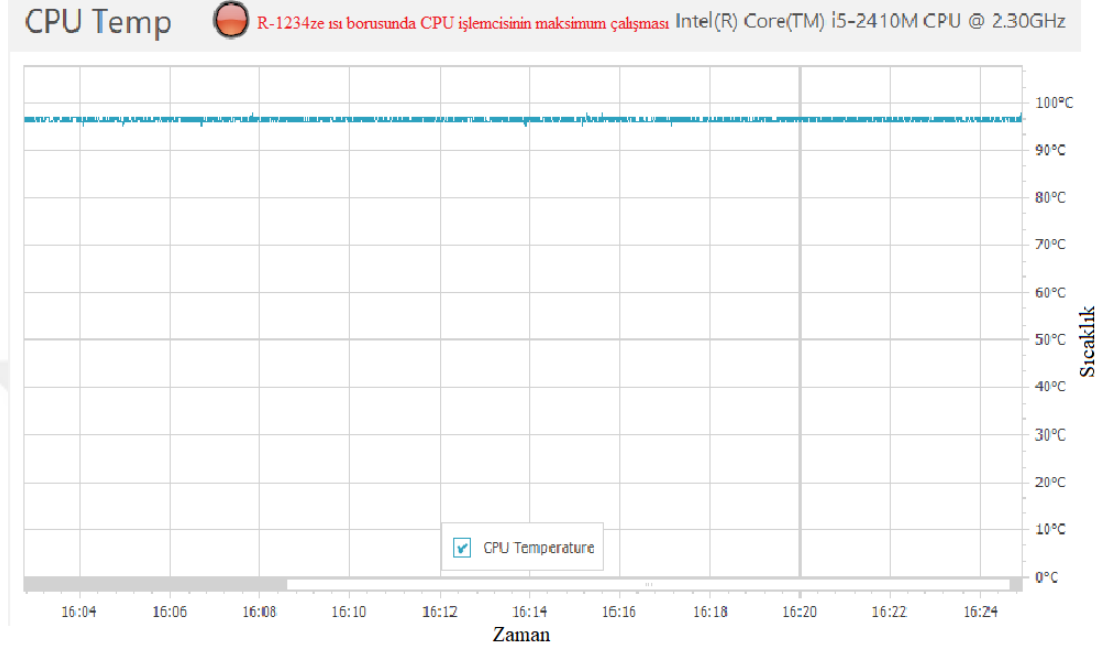
Şekil 5.20: R-1234ze ısı borusunda CPU işlemcisinin normal (video izleme) çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin normal çalışma (video izleme) sırasında maksimum yaklaşık 98,3 °C civarında olduğu minimum sıcaklığında yaklaşık olarak 90 °C olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarda video izleme sırasında CPU sıcaklığının ortalama yaklaşık 94,75 °C civarında olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın sıcaklığı 98 °C sıcaklık üzerinde fanın hızı artırılarak CPU sıcaklığının tehlikeli seviyelere gelmesinin önleniği anlaşılmaktadır.

### 5.7.3. R-1234ze ısı borulu CPU işlemcisinin maksimum yük altında sıcaklık sonuçları

Dizüstü bilgisayarın FurMark paket programı yardımıyla oluşturulan ve CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalışması sırasında maksimum yük oluşturulduğunda her 5 saniyede bir değer 20 dakika boyunca Core Temp programı yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin sonuçları zaman-sıcaklık grafiği olarak verilmektedir (Şekil 5.21). Grafik incelendiğinde, CPU işlemcisinin maksimum yük altında yani CPU işlemcisinin %100 kapasite ile çalıştığı maksimum yaklaşık 97,7 °C civarında minimum sıcaklığında 94,9 °C ve ortalama 96,6 °C olduğu görülmektedir. 20 dakikalık grafikten anlaşıldığı gibi dizüstü bilgisayarda maksimum yüklemeye

sırasında bilgisayar içindeki yazılımların CPU işlemcisinin kritik seviyelerin altında tutmak için ısı borusu ve ona bağlı fanın maksimum devirde çalışarak sıcaklığı belli bir seviyede sabitlediği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.21: R-1234ze ısı borusunda maksimum yük çalışma zaman-sıcaklık grafiği.

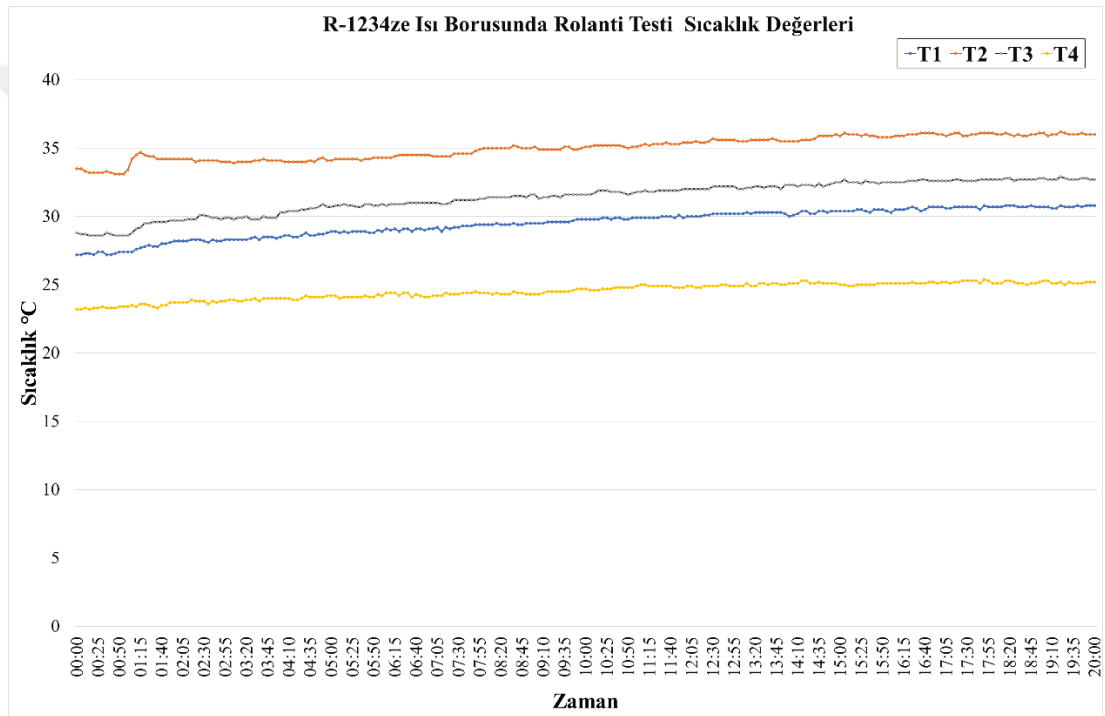
### 5.8. R-1234ze Isı borusunun Termal Analizi

R-1234ze akışkanı içeren ısı borusu üzerine monte edilmiş 4 adet termokupl ve bu termokupllara bağlı dijital bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bakır malzemeden yapılmış ısı borusu üzerine montajlanmış termokupllardan bir tanesi elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1), biri dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde (T2), bir tanesi ısı borusunun ortasına (T3) ve diğer bir tanesi ise bilgisayar fanının yanında (T4) monte edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın üzerinde monte edilmiş termokupllardan dizüstü bilgisayar kullanımında olabilecek üç farklı çalışma durumunda sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu farklı çalışmalar; dizüstü bilgisayar rölantide çalışırken, dizüstü bilgisayar normal kullanım (video izleme) sırasında ve dizüstü bilgisayarın maksimum

yük altında çalışma koşullarıdır. Farklı çalışma koşullarında dizüstü bilgisayarın ısı borusunun termal davranışları incelenmiştir.

### 5.8.1. R-1234ze ısı borusunun rölantide çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın rölantide çalışma sırasında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.22).



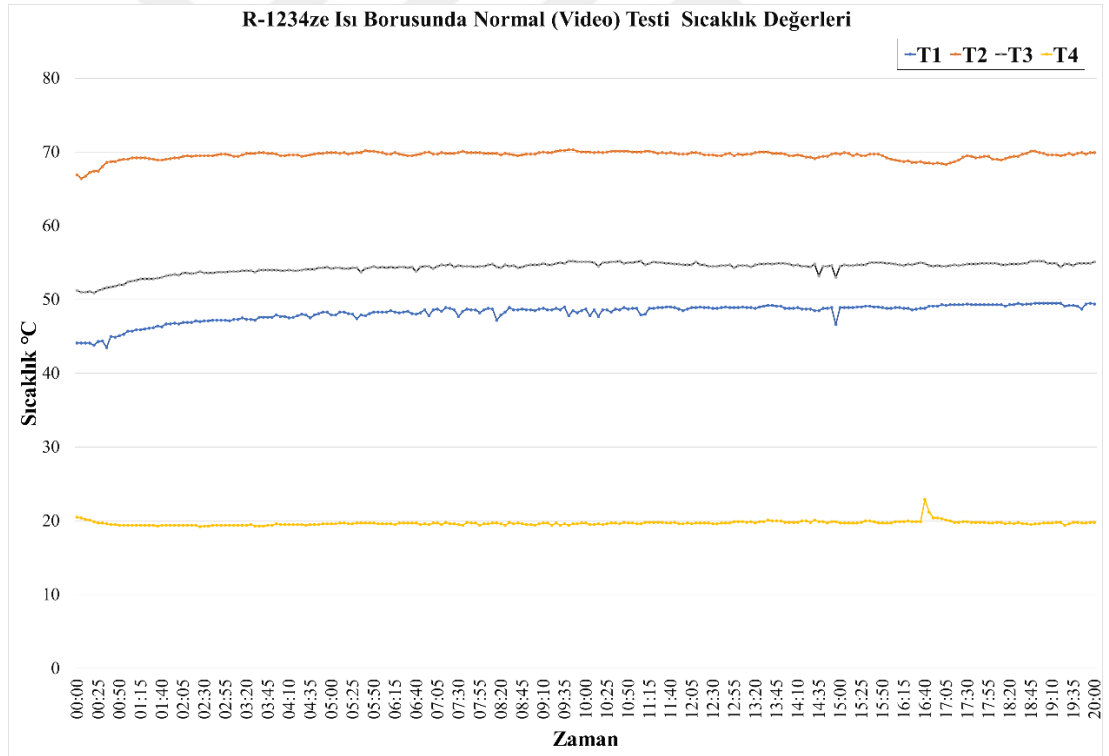
Şekil 5.22: R-1234ze ısı borusunda rölanti çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın rölantide ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 30,8 °C, minimum 27,2 °C ve ortalama 29,51 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 36,2 °C, minimum 33,1 °C ve ortalama 35,01 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 32,9 °C, minimum 28,6 °C ve ortalama 31,38 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 25,4 °C, minimum 23,2 °C ve ortalama 24,53 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 30,11 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık

değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 4,53 °C üstünde olmaktadır.

### 5.8.2. R-1234ze ısı borusunun normal kullanımda (video izleme) sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın normal kullanımda (video izleme), 20 dakika boyunca ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.23).



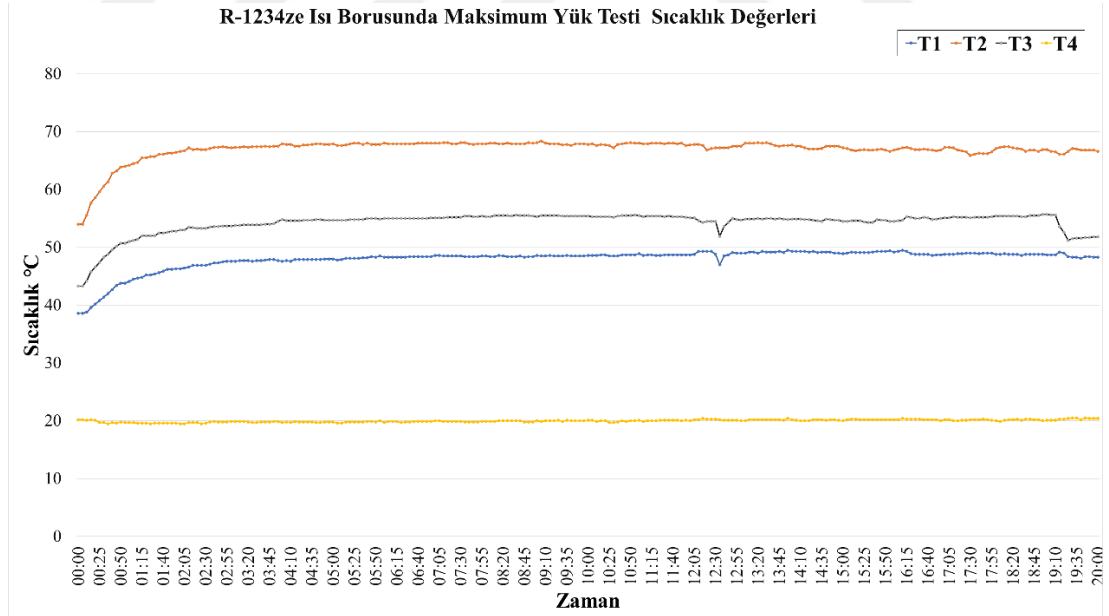
Şekil 5.23: R-1234ze ısı borusunda normal (video) çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın normal (video izleme) ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 49,5 °C, minimum 43,5 °C ve ortalama 48,21 °C olarak

ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 70,3 °C, minimum 66,4 °C ve ortalama 69,52 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 55,2 °C, minimum 50,9 °C ve ortalama 54,31 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 22,9 °C, minimum 19,2 °C ve ortalama 19,69 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 47,93 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının -0,31 °C üstünde olmaktadır.

### 5.8.3. R-1234ze ısı borusunun maksimum yük altında çalışma sıcaklık sonuçları

Bilgisayarın maksimum yük altında 20 dakika boyunca bakır ısı borusunun T1, T2, T3 ve T4 bölgelerine monte edilmiş termokupllar vasıtasıyla her 5 saniyede sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Toplamda elde edilen 240 adet sıcaklık verisi değerlendirilerek zaman-sıcaklık diyagramı çizilerek sonuçlar irdelenmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24: R-1234ze ısı borusunda maksimum yük çalışmada elde edilen zaman-sıcaklık grafiği.

Dizüstü bilgisayarın maksimum yük ortamında çalışırken, T1 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 49,5 °C, minimum 38,6 °C ve ortalama 47,99 °C olarak ölçülmüştür. T2 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 68,4 °C, minimum 54 °C ve ortalama 66,97 °C olarak ölçülmüştür. T3 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 55,7 °C, minimum 43,3 °C ve ortalama 54,25 °C olarak ölçülmüştür. T4 bölgesinde sıcaklıklar maksimum 20,5 °C, minimum 19,5 °C ve ortalama 19,99 °C olarak ölçülmüştür. Tüm ısı borusu boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalaması 47,3 °C olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık beklenildiği gibi dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisi üzerinde olmaktadır. En düşük sıcaklıklar ise ısı borusunun fan kanatçıklarıyla entegre olan fana bağlandığı uç kısmında olduğu görülmektedir. Bu uç kısım ortalama sıcaklığı çevre sıcaklığının 0,01 °C üstünde olmaktadır.

## **BÖLÜM 6. AKIŞKANLARIN ISI BORUSUNDA SICAKLIK (TERMAL) SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Bu bölümde dizüstü bilgisayarlar ısı borusunda su-metanol, R-134a, R-404a ve R-1234ze olarak farklı dört çeşit soğutucu akışkanın deneyinden elde edilen sonuçların bir arada karşılaştırılması yapılmıştır. Dizüstü bilgisayarlar ısı borusu ile temas halinde bulunan CPU İşlemcinin dört farklı akışkan için rölanti, normal (video izlerken) ve maksimum yük çalışma ortamlarında sıcaklık karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca, dizüstü bilgisayarlar ısı borusunda dört farklı akışkan için rölanti, normal (video izlerken) ve maksimum yükte çalışma ortamlarında sıcaklık (termal) analizlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Deneyler klima kontrollü odada sabit 20 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

### **6.1. Isı Borusunda Farklı Akışkanların ve Farklı Çalışma Ortamlarında CPU İşlemcinin Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması**

Isı borusu ile temas halinde bulunan CPU İşlemcinin dört farklı akışkan için her bir çalışma ortamı olan; rölanti, normal (video izlerken) ve maksimum yük için 20 dakikalık ölçümlerin sonuçları olan iç sıcaklıkların karşılaştırılması yapılmıştır (Tablo 6.1). Tablo incelendiğinde rölantide çalışma ortamında CPU iç sıcaklıkların yaklaşık tüm akışkanlar için birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Rölanti ortamında dizüstü bilgisayar çalışırken CPU işlemci içindeki sıcaklıklara göz önüne alındığında, su-metanol akışkanlı ısı borusunda diğer akışkanlara göre CPU iç ortalama sıcaklığı daha yüksek çıkmıştır ve diğer soğutucu akışkanların olduğu ısı borusu CPU iç sıcaklıkları birbirine yakın olarak ölçülmüştür. Rölanti ortamında ısı borusu CPU iç sıcaklığı en düşük olan soğutucu akışkanın R-1234ze olduğu görülmektedir. Rölanti ortamında R-1234ze akışkanının ısı transferi oranının oldukça iyi olduğu ve CPU iç sıcaklığını daha iyi ısı borusuna havaya aktardığı ve CPU işlemci

üzerindeki sıcaklığı azaltmada en hızlı ve etkin olan akışkanın 1234ze olduğu görülmektedir. Rölanti ortamında CPU iç sıcaklık ortalaması göz önüne alındığında, Su-metanol > R-404a > R-134a > R-1234ze şeklinde sıralama olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığı sabit 20 °C tutulduğundan, aynı fabrika orijinal ısı borusu kullanıldığından (ısı iletim katsayıları aynı kalmaktadır) ve sabit haricinde özgül ısılar alındığından (basınç değişiminin etkisi yok) ısı borusu yüzeyinden havaya atılan ısı aktarım oranları R-1234ze > Su-metanol > R-134a > R-404a şeklinde olduğu yaklaşımı yapılabilir.

Tablo 6.1 CPU İşleciminin dört farklı akışkan ve üç farklı çalışma ortamında sıcaklık karşılaştırılması.

| Soğutucu Akışkanlar CPU sıcaklıkları (°C) |          |            |        |        |          |
|-------------------------------------------|----------|------------|--------|--------|----------|
| Çalışma ortamı                            | Durum    | Su-metanol | R-134a | R-404a | R-1234ze |
| Rölanti                                   | En düşük | 40         | 40     | 43,7   | 38,2     |
|                                           | Maksimum | 76         | 64,2   | 65     | 58,3     |
|                                           | Ortalama | 47         | 42,5   | 46,6   | 41,5     |
| Normal (video izleme)                     | En düşük | 52         | 75     | 90     | 90       |
|                                           | Maksimum | 77         | 97,6   | 98,4   | 98,3     |
|                                           | Ortalama | 65         | 91     | 94,5   | 94,75    |
| Maksimum yükte                            | En düşük | 49         | 53     | 53,4   | 94,9     |
|                                           | Maksimum | 84         | 97,2   | 98     | 97,7     |
|                                           | Ortalama | 82         | 96     | 96,4   | 96,6     |

Tablo 6.1’de görüldüğü gibi, yüksek sıcaklıklarda suyun ısı taşınım değerinin sıcaklıklar arttıkça hızla yükselmesiyle normal (video izleme) ve maksimum yükte çalışma ortamında, CPU iç sıcaklıkları karşılaştırıldığında en düşük sıcaklık ortalaması su-metanol akışkanlı ısı borusunda olduğu görülmektedir. En yüksekten düşüğe doğru ölçülen CPU iç sıcaklıkların ortalaması alındığında, R-1234ze > R-134a > R-404a > Su-metanol şeklinde sıralama olduğu görülmektedir. Normal (video izleme) ve maksimum yükte çalışma ortamında CPU iç sıcaklıkları su-metanol akışkan hariç diğer tüm akışkanlarda yüksek olduğu görülmektedir. Dizüstü bilgisayarın CPU işlemcisinde işlemler yoğun olduğunda su-metanol akışkanlı ısı borusu ile temas halinde bulunan CPU işlemcisi iç sıcaklığının düşük olmasından dolayı soğutma işlemini daha iyi yaptığı görülmektedir. Bunun nedeni akışkanların vizkozite,

yoğunluk ve ısı taşınım katsayısının ısı taşınımında çok etkili olduğunu etkinliğini göstermektedir.

## **6.2. Akışkanların Isı Borusunda Sıcaklık (Termal) Analizlerinin Karşılaştırılması**

Dizüstü bilgisayarın bakır ısı borusu dış yüzey üzerindeki farklı yerdeki termokupllardan; elektronik devre soğutma plakası üzerindeki T1, CPU işlemcisi üzerindeki T2, ısı borusunun ortasındaki T3 ve soğutma fanının yanındaki T4 olarak adlandırılarak, dört farklı soğutucu akışkan ve üç farklı çalışma ortamı için sıcaklık değerleri Tablo 6.2'deki verilmektedir. Klima kontrollü 20 °C sabit çevre sıcaklığına sahip odada dizüstü bilgisayarların ısı borusu üzerindeki termokupllardan su-metanol, R-123a, R-404a, R-1234ze olmak üzere dört farklı akışkan ve rölanti, normal (video izlerken) ve maksimum yük ortamlarında 20 dakika boyunca her 5 saniyede bir veri almak suretiyle sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Tablo 6.2'deki veriler karşılaştırıldığında, rölantide çalışma ortamında ısı borusunun dört farklı konumdaki sıcaklık ölçümlerin ortalaması değerlendirildiğinde Su-metanol > R-404a > R-1234ze > R-134a olduğu görülmektedir. Rölanti ortamında ısı borusu yüzey sıcaklıklarının ortalamasının en düşük olan akışkanın R-134a olduğu ve en yüksek ortalama su-metanol akışkanında olduğu görülmektedir. Rölanti ortamında soğutucu R-134a akışkanının ısı transferinin oldukça iyi olduğu ve CPU işlemci üzerindeki sıcaklığı azaltmada en hızlı ve etkin olduğu görülmektedir. En kötü akışkanın su-metanol olduğu görülmektedir. Tablo 6.2'de görüldüğü gibi, normal (video izleme) ortamında, ısı borusunun dört farklı konumdaki sıcaklık ölçümlerin ortalaması karşılaştırıldığında en düşük sıcaklık ortalaması su-metanol akışkanlı ısı borusunda olduğu ve diğer akışkanların kendi aralarında birbirine yakın sıcaklık ortalamalarına sahip oldukları görülmektedir. Normal (video izleme) çalışma ortamında en yüksekten düşüğe doğru ısı borusu yüzeyinden ölçülen sıcaklıkların ortalaması R-1234ze > R-404a > R-134a > Su-metanol şeklinde olduğu görülmektedir. Normal (video izleme) ortamında su-metanol akışkanının ısı transferi oldukça iyi olduğu ve CPU işlemci üzerindeki sıcaklığı azaltmada en hızlı ve etkin olduğu görülmektedir. En kötü akışkanın R-1234ze olduğu görülmektedir. Maksimum yükte çalışma ortamında ısı borusunun dört farklı

konumdaki sıcaklık ölçümlerin ortalaması karşılaştırıldığında en düşük sıcaklık ortalaması R-404a akışkanlı ısı borusunda olduğu ve En kötü akışkanın R-1234ze olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2 Dizüstü bilgisayarın ısı borusunda dört farklı akışkan ve farklı çalışma ortamlarında sıcaklıklarının karşılaştırılması.

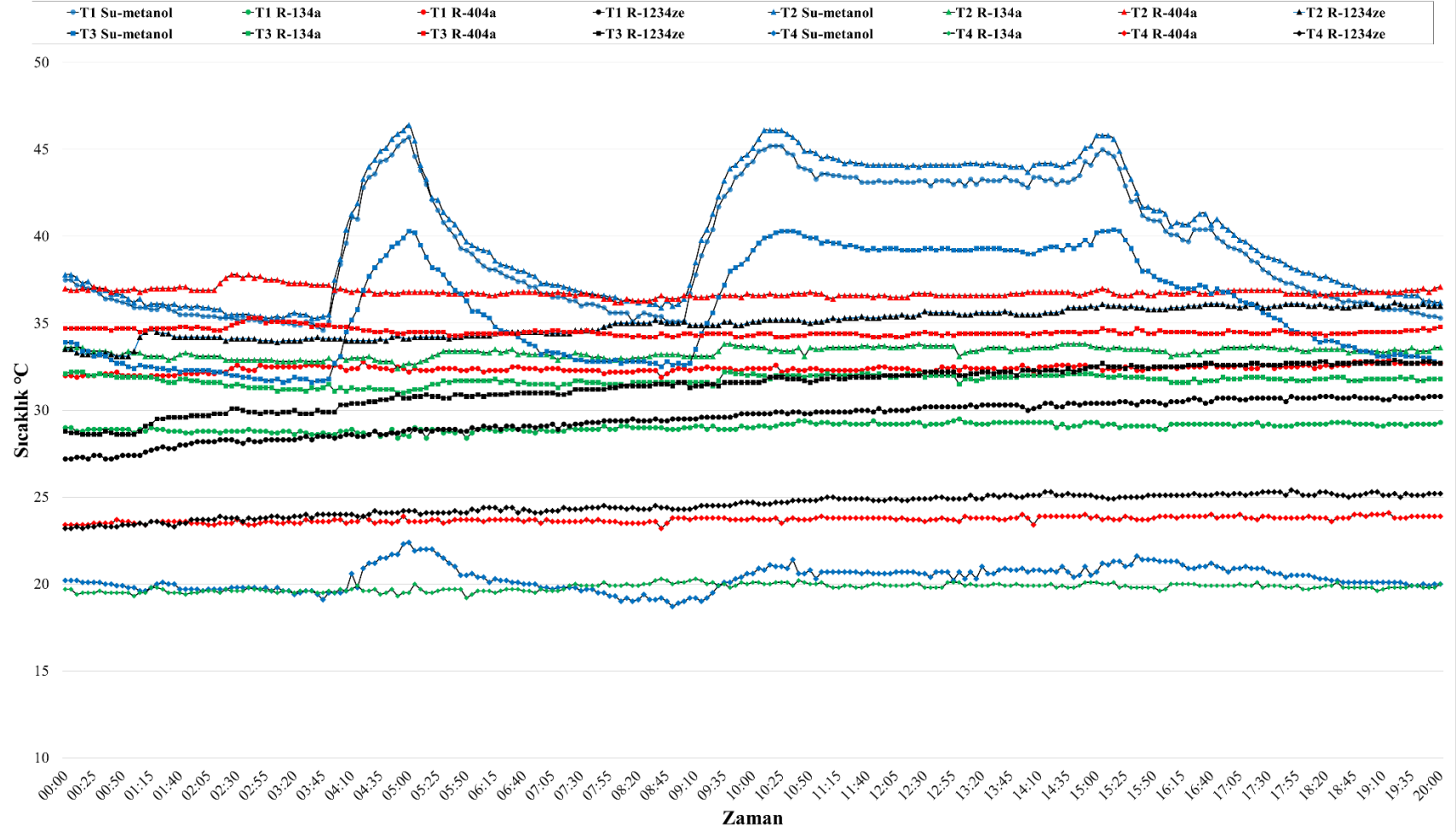
| Çalışma ortamı        | Ölçüm yeri          | Parametre | Soğutucu Akışkanlar sıcaklıkları (°C) |        |        |          |
|-----------------------|---------------------|-----------|---------------------------------------|--------|--------|----------|
|                       |                     |           | Su-metanol                            | R-134a | R-404a | R-1234ze |
| Rölanti               | T1                  | Maksimum  | 45,7                                  | 29,5   | 32,9   | 30,8     |
|                       |                     | Minimum   | 34,6                                  | 28,4   | 31,9   | 27,2     |
|                       |                     | Ortalama  | 39,38                                 | 29,02  | 32,39  | 29,51    |
|                       | T2                  | Maksimum  | 46,4                                  | 33,8   | 37,8   | 36,2     |
|                       |                     | Minimum   | 35,3                                  | 32,4   | 36,2   | 33,1     |
|                       |                     | Ortalama  | 40,12                                 | 33,33  | 36,8   | 35,01    |
|                       | T3                  | Maksimum  | 40,4                                  | 32,2   | 35,3   | 32,9     |
|                       |                     | Minimum   | 31,6                                  | 31     | 34,2   | 28,6     |
|                       |                     | Ortalama  | 35,83                                 | 31,73  | 34,51  | 31,38    |
|                       | T4                  | Maksimum  | 22,4                                  | 20,3   | 24,1   | 25,4     |
|                       |                     | Minimum   | 18,7                                  | 19,2   | 23,2   | 23,2     |
|                       |                     | Ortalama  | 20,34                                 | 19,80  | 23,71  | 24,53    |
|                       | Isı borusu ortalama |           | 33,92                                 | 28,47  | 31,85  | 30,11    |
| Normal (video izleme) | T1                  | Maksimum  | 44,4                                  | 46     | 49,7   | 49,5     |
|                       |                     | Minimum   | 40,5                                  | 42,8   | 48,8   | 43,5     |
|                       |                     | Ortalama  | 42,37                                 | 44,70  | 49,34  | 48,21    |
|                       | T2                  | En düşük  | 45,4                                  | 63,2   | 61,3   | 70,3     |
|                       |                     | Maksimum  | 41,5                                  | 55     | 57,0   | 66,4     |
|                       |                     | Ortalama  | 43,43                                 | 60,83  | 58,0   | 69,52    |
|                       | T3                  | Maksimum  | 41,8                                  | 60,2   | 58,5   | 55,2     |
|                       |                     | Minimum   | 38,0                                  | 52,9   | 50,3   | 50,9     |
|                       |                     | Ortalama  | 39,51                                 | 58,29  | 55,13  | 54,31    |
|                       | T4                  | Maksimum  | 21,4                                  | 21,4   | 26,0   | 22,9     |
|                       |                     | Minimum   | 20,5                                  | 20,1   | 25,4   | 19,2     |
|                       |                     | Ortalama  | 20,93                                 | 21,02  | 25,65  | 19,69    |
|                       | Isı borusu ortalama |           | 36,56                                 | 46,21  | 47,03  | 47,93    |
| Maksimum yükte        | T1                  | Maksimum  | 52,2                                  | 46,7   | 49,1   | 49,5     |
|                       |                     | Minimum   | 39,5                                  | 35,4   | 37,5   | 38,6     |
|                       |                     | Ortalama  | 51,00                                 | 45,20  | 45,78  | 47,99    |
|                       | T2                  | Maksimum  | 53,0                                  | 63     | 59,8   | 68,4     |
|                       |                     | Minimum   | 40,0                                  | 41,3   | 39,3   | 54       |
|                       |                     | Ortalama  | 51,75                                 | 60,63  | 57,02  | 66,97    |
|                       | T3                  | Maksimum  | 52,9                                  | 62,4   | 36,1   | 55,7     |
|                       |                     | Minimum   | 40,0                                  | 41,8   | 30,5   | 43,3     |
|                       |                     | Ortalama  | 47,93                                 | 59,79  | 33,64  | 54,25    |
|                       | T4                  | Maksimum  | 22,8                                  | 21,7   | 26,2   | 20,5     |
|                       |                     | Minimum   | 20,0                                  | 20,3   | 25,1   | 19,5     |
|                       |                     | Ortalama  | 22,15                                 | 21,22  | 25,62  | 19,99    |
|                       | Isı borusu ortalama |           | 43,21                                 | 46,71  | 40,52  | 47,30    |

Şekil 6.1’de dizüstü bilgisayarın ısı borusu dış yüzey üzerindeki farklı yerdeki termokupllardan; elektronik devre soğutma plakası üzerindeki T1, CPU işlemcisi

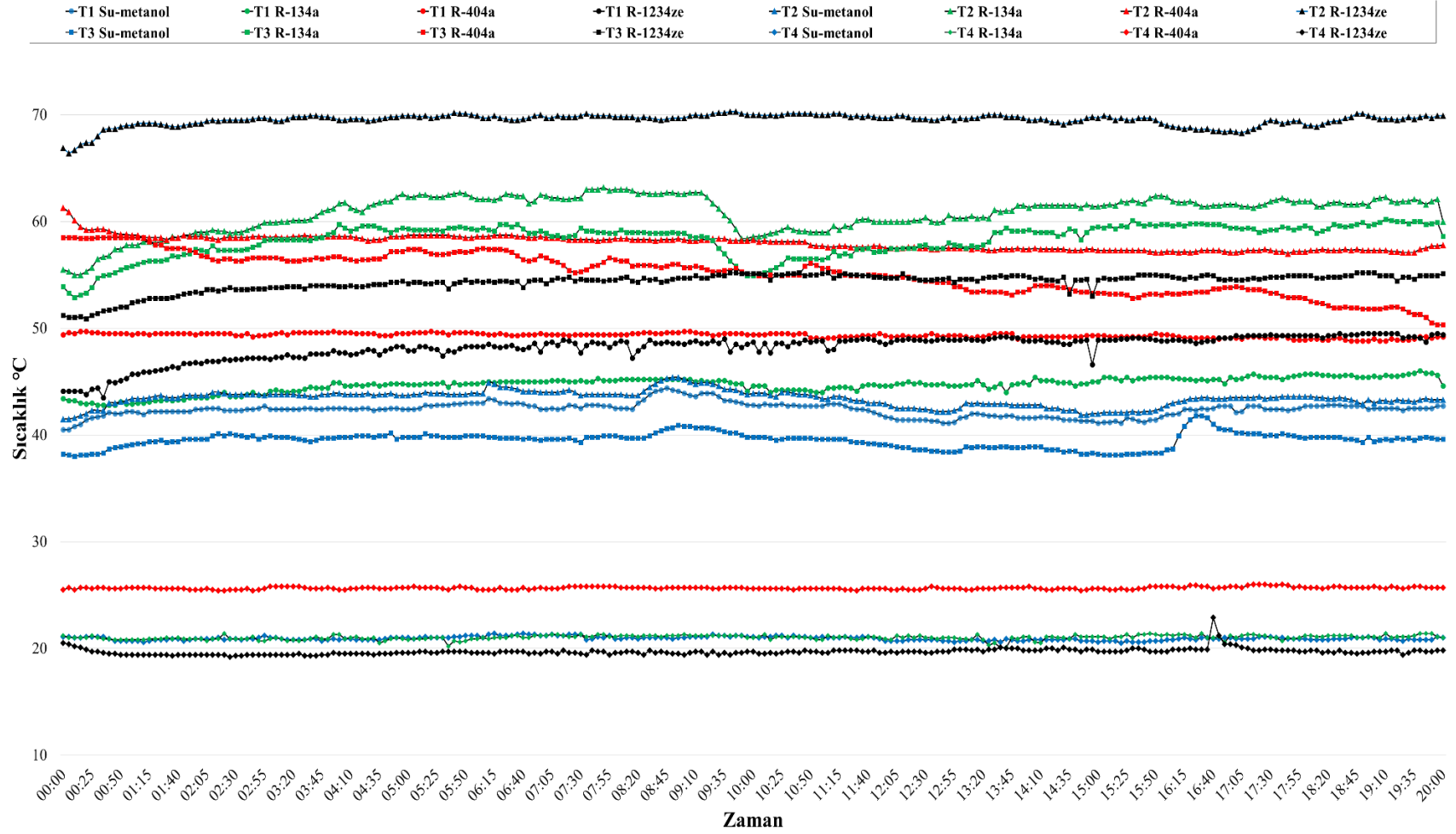
üzerindeki T2, ısı borusunun ortasındaki T3 ve soğutma fanının yanındaki T4 olarak dört farklı soğutucu akışkan için rölanli çalışma ortamı için sıcaklık değeri görölmektedir. Tüm akışkanlar için rölanli ortamında yani bilgisayarda işlem yapılmadığında hem CPU işlemci sıcaklığının hem de ısı borusu dış yüzeyindeki sıcaklıkların normal (video izlerken) ve maksimum yük ortamlarından oldukça düşük olduğu görölmektedir. En yüksek sıcaklıkların CPU işlemcisi üzerindeki T2 noktasında olduğu ve büyük salınımların maksimum yükte çalışma ortamında olduğu görölmektedir.

Şekil 6.2’de dizüstü bilgisayarın ısı borusu dış yüzey üzerindeki farklı yerdeki termokupllar vasıtasıyla alınan T1, T2, T3 ve T4 noktalarından 20 dakika zaman diliminde ölçülen sıcaklık değeri dört farklı soğutucu akışkan için normal (video izlerken) çalışma ortamı için görölmektedir. Bu sıcaklık değeri diğer çalışma koşullarında olduğu gibi en yüksek sıcaklıklar CPU üzerinde (T2), sonraki yüksek değeri elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1) ve sonraki yüksek sıcaklık T1 sıcaklığına yakın fakat daha düşük değerde olan ısı borusunun ortasında (T3) ve en düşük sıcaklık beklendiği gibi sonraki soğutma fanının hemen bitişindeki (T4) olmaktadır. Normal (video izlerken) çalışma ortamında tüm bölgelerdeki sıcaklıklar rölanli ortamdakinden daha yüksek fakat maksimum yükte çalışma sıcaklıklarına çok yakın çoğunlukla biraz düşüktür.

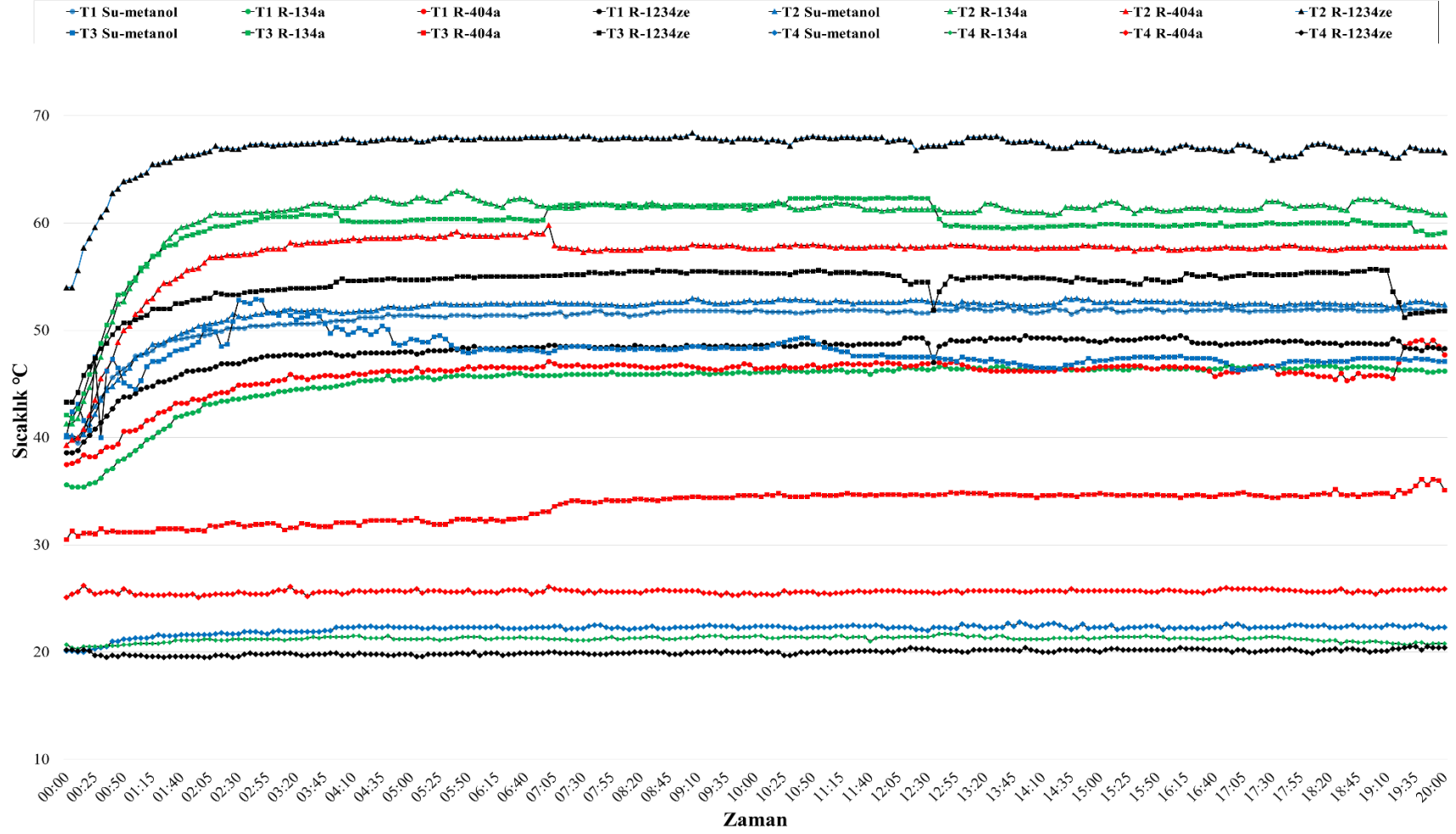
Şekil 6.3’te dizüstü bilgisayarın ısı borusu dış yüzey üzerindeki farklı yerdeki termokupllar vasıtasıyla alınan T1, T2, T3 ve T4 noktalarından 20 dakika zaman diliminde ölçülen sıcaklık değeri dört farklı soğutucu akışkan için maksimum yükte çalışma ortamı için görölmektedir. Bu sıcaklık değeri diğer çalışma koşullarında olduğu gibi en yüksek sıcaklıklar CPU üzerindedir (T2). Elektronik devre soğutma plakası üzerinde (T1) ve ısı borusunun ortasında (T3) sıcaklıklar birbirine yakın görölmektedir. Zaman dilimi için bazen T3 bazen T1 sıcaklığı daha yüksek olmaktadır. En düşük sıcaklıklar beklendiği gibi sonraki soğutma fanının hemen bitişindeki (T4) olmaktadır. Maksimum yükte çalışma ortamında sıcaklıklar rölanli ve normal (video izlerken) çalışma ortamından daha yüksektir.



Şekil 6.1: Isı Borusunda Farklı Akışkanların Sıcaklıklarının (Termal) Rölanti Çalışma Ortamında Karşılaştırılması



Şekil 6.2: Isı Borusunda Farklı Akışkanların Sıcaklıklarının (Termal) Normal (video izleme) Çalışma Ortamında Karşılaştırılması



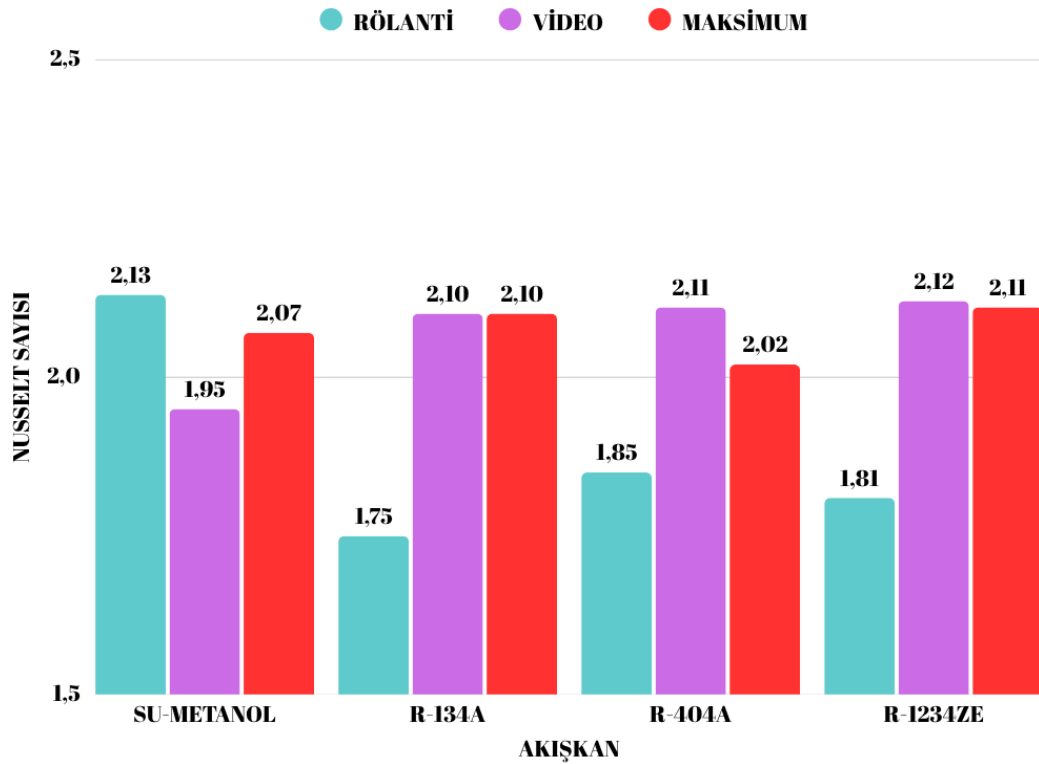
### 6.2.1 Isı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi değerlerinin karşılaştırılması

Dizüstü bilgisayarın ısı borusu dış yüzey üzerindeki farklı yerdeki sıcaklıkların (T1, T2, T3 ve T4) aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmış ısı borusu ortalama sıcaklıkları (Tablo 6.2 de görülmektedir) alınarak ve sabit çevre sıcaklığı 20 °C olduğundan dört farklı soğutucu akışkanlar için rölanti, normal (video izlerken) ve maksimum yük çalışma ortamlarında Denklem 3.15-3.19’da verilen eşitlikler yardımıyla ısı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Tablo 6.3). Isı borusunun geometrik özellikleri: Uzunluk (L): 239,165 mm, Hidrolik çap: 3,348 mm, Et kalınlığı: 1 mm, Eşdeğer dairesel dış çap 5,348 mm ve Yüzey alanı: 40,17 cm<sup>2</sup> dir. Tüm soğutucu akışkanların boyutsuz Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı sonuçları termal analiz (doğal taşınım ile ısı transferi) için en iyi yol gösterici olduğu bilimsel çalışmalarda her zaman ortaya konmuştur. Bu çalışmada bilgisayarın fan ile zorlanmış ısı taşınım yapılmamıştır. Dolayısı ile zorlanmış akıl ile ısı taşınımı hesaplanmamıştır. Tablo 6.3’ de yapılan termal analiz sonuçları değerlendirildiğinde; Rölanti çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak CPU iç sıcaklık analizinde olduğu gibi su-metanol akışkanı olduğu görülmektedir. Isı taşınım katsayısı sonuçları da bunu ayrıca kanıtlamaktadır. Dizüstü bilgisayarın rölanti çalışma ortamında diğer soğutucu akışkanların en iyi olan su-metanol akışkanının ardında R-404a olmaktadır ve onu sıra ile R-1234ze ve R-134a akışkanı takip etmektedir. Bilgisayarın normal (video izleme) çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak az farkla R-1234a akışkanı olduğu görülmektedir. Normal (video izleme) çalışma ortamında diğer soğutucu akışkanların en iyi olan R-1234ze akışkanının ardında çok yakın değerlerle sırasıyla, R-404a, R-134a ve su-metanol akışkanların takip ettiği görülmektedir. Isı taşınım katsayısı sonuçları da bunu ayrıca kanıtlamaktadır. Bilgisayarın maksimum yük çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak az farkla R-1234ze akışkanı olduğu görülmektedir. Diğer soğutucu akışkanların en iyi olan R-1234ze akışkanının ardında en iyi olan sırasıyla R-134a, su-metanol ve R-404a akışkanların takip ettiği görülmektedir. Isı taşınım katsayısı sonuçları da bunu ayrıca kanıtlamaktadır.

Tablo 6.3 Dizüstü bilgisayarın ısı borusunda dört farklı akışkan ve farklı çalışma ortamlarında termal analiz karşılaştırılması.

| Çalışma ortamı           | Parametre                                              | Soğutucu Akışkanlar sıcaklıkları (°C) |                       |                       |                       |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                          |                                                        | Su-metanol                            | R-134a                | R-404a                | R-1234ze              |
| Rölanti                  | Film Sıcaklığı ( $T_f$ ), K                            | 309,025                               | 297,385               | 299,05                | 298,205               |
|                          | Yoğunluk – Hava ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>          | 1,145                                 | 1,177                 | 1,173                 | 1,175                 |
|                          | Termal Genleşme Katsayısı ( $\beta$ ), K <sup>-1</sup> | 0,003259                              | 0,003363              | 0,003344              | 0,003353              |
|                          | Kinematik Viskozite ( $\nu$ ), m <sup>2</sup> /s       | $1,67 \times 10^{-5}$                 | $1,57 \times 10^{-5}$ | $1,59 \times 10^{-5}$ | $1,58 \times 10^{-5}$ |
|                          | Termal İletkenlik ( $k$ ), W/m·K                       | 0,0267                                | 0,0259                | 0,0261                | 0,0260                |
|                          | Prandtl Sayısı (Pr), -                                 | 0,707                                 | 0,709                 | 0,708                 | 0,709                 |
|                          | Rayleigh Sayısı ( $Ra_D$ ), -                          | 390,41                                | 123,04                | 168,04                | 44,27                 |
|                          | Nusselt Sayısı ( $Nu_D$ ), -                           | 2,13                                  | 1,75                  | 1,85                  | 1,81                  |
|                          | Isı Taşınım Katsayısı ( $h$ ), W/m <sup>2</sup> ·K     | 10,64                                 | 8,47                  | 9,03                  | 8,80                  |
|                          | Doğal Taşınım ile Isı Kaybı (Q), W                     | 1,35                                  | 0,288                 | 0,429                 | 0,357                 |
| Normal<br>(video izleme) | Film Sıcaklığı ( $T_f$ ), K                            | 301,43                                | 306,255               | 306,665               | 307,115               |
|                          | Yoğunluk – Hava ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>          | 1,168                                 | 1,154                 | 1,152                 | 1,150                 |
|                          | Termal Genleşme Katsayısı ( $\beta$ ), K <sup>-1</sup> | 0,003317                              | 0,003265              | 0,003261              | 0,003256              |
|                          | Kinematik Viskozite ( $\nu$ ), m <sup>2</sup> /s       | $1,60 \times 10^{-5}$                 | $1,65 \times 10^{-5}$ | $1,66 \times 10^{-5}$ | $1,66 \times 10^{-5}$ |
|                          | Termal İletkenlik ( $k$ ), W/m·K                       | 0,0263                                | 0,0266                | 0,0266                | 0,0267                |
|                          | Prandtl Sayısı (Pr), -                                 | 0,708                                 | 0,707                 | 0,707                 | 0,707                 |
|                          | Rayleigh Sayısı ( $Ra_D$ ), -                          | 227,65                                | 334,61                | 340,06                | 350,99                |
|                          | Nusselt Sayısı ( $Nu_D$ ), -                           | 1,95                                  | 2,10                  | 2,11                  | 2,12                  |
|                          | Isı Taşınım Katsayısı ( $h$ ), W/m <sup>2</sup> ·K     | 9,60                                  | 10,44                 | 10,50                 | 10,58                 |
|                          | Doğal Taşınım ile Isı Kaybı (Q), W                     | 0,638                                 | 1,099                 | 1,141                 | 1,187                 |
| Maksimum                 | Film Sıcaklığı ( $T_f$ ), K                            | 304,755                               | 306,505               | 303,41                | 306,80                |
|                          | Yoğunluk – Hava ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup>          | 1,159                                 | 1,153                 | 1,162                 | 1,151                 |
|                          | Termal Genleşme Katsayısı ( $\beta$ ), K <sup>-1</sup> | 0,003281                              | 0,003263              | 0,003295              | 0,003259              |
|                          | Kinematik Viskozite ( $\nu$ ), m <sup>2</sup> /s       | $1,64 \times 10^{-5}$                 | $1,66 \times 10^{-5}$ | $1,63 \times 10^{-5}$ | $1,66 \times 10^{-5}$ |
|                          | Termal İletkenlik ( $k$ ), W/m·K                       | 0,0265                                | 0,0266                | 0,0264                | 0,0266                |
|                          | Prandtl Sayısı (Pr), -                                 | 0,707                                 | 0,707                 | 0,707                 | 0,707                 |
|                          | Rayleigh Sayısı ( $Ra_D$ ), -                          | 299,78                                | 336,21                | 268,71                | 343,20                |
|                          | Nusselt Sayısı ( $Nu_D$ ), -                           | 2,07                                  | 2,10                  | 2,02                  | 2,11                  |
|                          | Isı Taşınım Katsayısı ( $h$ ), W/m <sup>2</sup> ·K     | 10,25                                 | 10,44                 | 9,97                  | 10,50                 |
|                          | Doğal Taşınım ile Isı Kaybı (Q), W                     | 0,956                                 | 1,121                 | 0,823                 | 1,149                 |

Deneylemlerden elde edilen verilerle akışkanların ısı performansının değerlendirilmesi için Boyutsuz Nusselt Sayısı hesaplanmıştır (Tablo 6:3). Isı borusunun rölanti , video ve maksimum yük çalışma ortamlarında farklı akışkanların Boyutsuz Nusselt Sayısı gösterimi aşağıda verilmektedir (Şekil 6:4). Rölanti çalışma ortamında en iyi performansı su-metanol soğutucu akışkanı göstermiştir ve diğer akışkanlar birbirine yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Video (normal) çalışma ortamında en iyi performansı R-1234ze göstermiştir ve su-metanol akışkanı (en kötü performans) hariç diğer soğutucu akışkanlarda R-1234ze çok yakın iyi performans göstermişlerdir. Maksimum yük çalışma ortamında en iyi performansı R-1234ze göstermiş ve diğer akışkanlar ona çok yakın performans gösterişlerdir.



Şekil 6.4 : Isı borusunun rölanti , video ve maksimum yük çalışma ortamlarında farklı akışkanların Boyutsuz Nusselt Sayısı gösterimi.

Bu sonuçlara göre geleneksel olmayan R-134a, R-404a ve R-1234ze soğutuc akışkanlar su-metanol akışkana göre dizayn edilmiş ısı borusu fitil yapısı rağmen çok iyi performans göstermişlerdir. Fitil yapısı bu akışkanlara göre ayarlandığında geleneksel akışkanların yerini alma potansiyellerinin çok fazla olacağı açıkça görülmektedir.

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Lenovo marka bir dizüstü bilgisayarların fabrika çıkışı su-metanol akışkanlı ısı borusunda, R-134a, R-404a, ve R-404a soğutucu akışkanların soğutmaya etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada; veri kaydetme özeliği bulunan termokupl-termometre ikilisini içeren bir ölçüm cihazı, soğurucu akışkanları yüklemek için vakum pompası, akışkanlara göre sıcaklık-basınç analog ölçü aleti, bilgisayarın CPU işlemcisinin maksimum yükte çalışmasını sağlamak için FurMark programı ve CPU içinde oluşan sıcaklığı ölçmek için Core Temp paket programları kullanılmıştır. Dizüstü bilgisayarın rölanti, normal ve maksimum yükte üç farklı çalışma koşulunda olmak üzere, sistemin soğutma performansı ve sıcaklık ölçümü ve sonrasındaki hesaplamalarla termal analizi yapılmıştır.

Deneysel bulguların değerlendirilmesi sonucu; geleneksel olmayan R-134a, R-404a, ve R-1234ze soğutucu akışkanların fabrika orijinal ısı borusunda değişiklik yapmadan kullanılabileceği tespit edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri hem CPU işlemcisinin iç sıcaklığı hem de ısı borusu üzerinde dört farklı noktalara (Elektronik devre soğutma plakası, CPU işlemcisi, ısı borusunun ortası ve bilgisayar fanının yanına) monte edilen termokupllarla her 5 saniyede bir veriler kaydedilerek 20 dakika boyunca klima kontrollü sabit sıcaklık sağlanmış odada gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler süresince dizüstü bilgisayar farklı çalışma ortamlarında olası yüksek sıcaklık nedeniyle hiç kapanmamıştır ve bu da alternatif akışkanların dizüstü bilgisayarlarda kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarla CPU işlemci iç sıcaklıklarının rölanti çalışma ortamında düşük değerlere, normal (video izleme) çalışma ortamında rölantiden daha yüksek fakat maksimum yük çalışma ortamından daha düşük değerler elde edilmiştir ve en yüksek sıcaklıklar beklenildiği gibi maksimum yük çalışma ortamında olmuştur ve sıcaklıklar temel olarak kritik seviyelere yakındır.

Dizüstü bilgisayarın rölantide çalışırken, fazla sıcaklık yükselmesi görülmemekte ve fanın 45 civarında etkin çalışmaya başladığı tespit edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın normal kullanımda (video izleme) maksimum sıcaklıklar T1 için 44.4 °C, T2 için 45.4 °C, T3 için 41.8 ve T4 için 21.4 °C olarak ölçülmüştür. Dizüstü bilgisayar ısı borusunda doğal taşınım ile ısı transferi değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Tüm soğutucu akışkanların boyutsuz Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı sonuçları termal analizde hesaplanmıştır. Termal analiz sonuçları değerlendirildiğinde; dizüstü bilgisayarın rölanti çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak CPU iç sıcaklık analizinde olduğu gibi su-metanol akışkanı olduğu görülmektedir. Rölanti çalışma ortamında su-metanol akışkanının ardından diğer soğutucu akışkanların doğal taşınım ile ısı transferinin diğerlerine göre iyi olduğu sırasıyla R-404a, R-1234ze ve R-134a akışkanı takip etmektedir. Bilgisayarın normal (video izleme) çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak az farkla R-1234ze akışkanı olduğu görülmektedir. Normal (video izleme) çalışma ortamında R-1234ze akışkanının ardından diğer soğutucu akışkanların doğal taşınım ile ısı transferinin diğerlerine göre iyi olduğu sırasıyla R-404a, ve su-metanol R-134a akışkanı takip etmektedir. Isı taşınım katsayısı sonuçları da bunu ayrıca kanıtlamaktadır. Bilgisayarın maksimum yük çalışma ortamında Nusselt sayısına bakıldığında en iyi soğutucu akışkan olarak az farkla R-1234a akışkanı olduğu görülmektedir. Diğer soğutucu akışkanların en iyi olan R-1234a akışkanının ardında en iyi olan sırasıyla R-134a, su-metanol ve R-404a akışkanların takip ettiği görülmektedir. Isı taşınım katsayılarının sonuçlarında Nusselt sayısı sonuçları gibidir ve aynı sonuçları tekrardan kanıtlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akyürek E.F., (2014), *Nanoakışkanların ve Türbülatorlerin İç İç Borulu Isı Değiştirici Isıl Performansına Etkilerinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alawadhi, E.M. ve Amon, C.H., (2003), PCM thermal control unit for portable electronic devices: Experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 116–125, <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811480>.
- Ali Khan, M. A., Uzgören, E., Muhtaroglu, A., (2017), Investigation of secondary cooling design enhancements in thermally limited compact notebooks. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(2), 1574–1586. <https://doi.org/10.3906/elk-1602-50>.
- Almubarak, A. A. (2017). The effects of heat on electronic components. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 07(05), 52–57, <https://doi.org/10.9790/9622-0705055257>.
- Aslantaş, M.E., Demircan, T., (2021), Bir ısı borusunun akış ve ısı transfer karakteristiklerinin sayısal olarak incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 478–488, <https://doi.org/10.29137/umagd.878818>.
- Aytaç, İ., (2021), CuO/su ve ZnO/su Nanoakışkanların Isı Borusu Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 963–971, <https://doi.org/10.2339/politeknik.755358>.
- Bahiraei, M., Heshmatian, S. (2017). Application of a novel biological nanofluid in a liquid block heat sink for cooling of an electronic processor: Thermal performance and irreversibility considerations. *Energy Conversion and Management*, 149, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.020>.
- Balali, Y., Chong, A., Busch, A., O’Keefe, S., (2023), Energy modelling and control of building heating and cooling systems with data-driven and hybrid models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113496, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113496>.
- Balci, E., Dağdelen, F. (2022). Biyomalzeme türleri ve biyoyumlu metalik elementler. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1179–1195. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1165914>
- Barai, R., Kumar, D., Wankhade, A., (2023), Heat transfer performance of nanofluids in heat exchanger: a review, *Journal of Thermal Engineering*, 9(1), 86–106. <https://doi.org/10.18186/thermal.1243398>.

- Bintoro J.S., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M., (2005), A closed-loop electronics cooling by implementing single phase impinging jet and mini channels heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 25(17–18), 2740–275, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.018>.
- Brahim, T. ve Jemni, A., (2014), Effect of the heat pipe adiabatic region, *Journal of Heat Transfer*, 136(4), <https://doi.org/10.1115/1.4025132>.
- Calame J.P., Myers R.E., Binari S.C., Wood F.N., Garven M., (2007), Experimental investigation of microchannel coolers for the high heat flux thermal management of GaN-on-SiC semiconductor devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23–24), 4767–4779, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.013>.
- Chakraborty, M., Kettle, J., Dahiya, R., (2022), Electronic waste reduction through devices and printed circuit boards designed for circularity. *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 1(1), 4–23. <https://doi.org/10.1109/jflex.2022.3159258>.
- Chang, Y.H., Chu, C.H., Lin, H.W., (2024). Improvement in laptop heat dissipation with taguchi method, *Electronics*, 13(5), 882, <https://doi.org/10.3390/electronics13050882>.
- Chen, Y., Groll, M., Mertz, R., Maydanik, Yu F., Vershinin, S.V., (2006), Steady-state and transient performance of a miniature loop heat pipe, *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 1084–1090, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.02.003>.
- Chougule, S.S., Nirgude, V.V., Shewale, S.P., Pise, A.T., Sahu, S.K., Shah, H., (2018), Application of paraffin based nanocomposite in heat pipe module for electronic equipment cooling. *Materials Today: Proceedings*, 5(11-2), 23333–23338. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.070>.
- Chu, R.C., Simons, R.E., Ellsworth, M.J., Schmidt, R.R., Cozzolino, V., (2004), Review of cooling technologies for computer products. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 4(4), 568–585, <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.840855>.
- Dube, V., Sauciu, I., ve Akbarzadeh, A., (1996), Design construction and testing of a thermosyphon heat exchanger for medium temperature heat recovery, *Proceedings of the 5th. International Heat Pipe Symposium*, Melbourne, Australia, 273–279.
- Dunn, P. ve Reay D.A., (1982), *Heat Pipes*, 3th Edition, Pergoman Press.
- Elnagar, E., Pezzutto, S., Duplessis, B., Fontenaille, T., Lemort, V., (2023), A comprehensive scouting of space cooling technologies in Europe: key characteristics and development trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, 113636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113636>.
- Esarte, J. ve Domínguez, M., (2003), Experimental analysis of a flat heat pipe working against gravity, *Applied Thermal Engineering*, 23(13), 1619–1627, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00111-X).
- Faghri, A., (1994), *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor and Francis.
- Flouris, A.D., Cheung, S.S., (2006), Design and control optimization of microclimate liquid cooling systems underneath protective clothing. *Annals of Biomedical Engineering*, 34(3), 359–372. <https://doi.org/10.1007/s10439-005-9061-9>.
- Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., Koyama, S., (2014), Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. *International*

- Journal of Refrigeration*, 40, 161-173, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.014>.
- Gulfam, R., Zhang, P., Meng, Z., (2019), Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials – A Review, *Applied Energy*, 238, 582–611, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.114>.
- Güngör, A., (1995), İklimlendirmede enerji geri kazanımında ısı borulu ısı değiştiriciler, *II. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 639-655.
- Habebullah, M.H., Akyurt, M., Najjar Y.S.H., (1997), A heat pipe assisted waste heat recovery and utilization system, *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Mechanical Engineering*, 22(2), 55-59.
- Habibi Khalaj, A. ve Halgamuge, S.K., (2017), A review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: from chip to the cooling system. *Applied Energy* 205, 1165–1188, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.037>.
- He, S., Liu, Z.C., Wang, D.D, Zhao, J., Liu W., Yang J.G., (2016), Investigation of the flat disk- shaped LHP with a shared compensation chamber, *Applied Thermal Engineering*, 104 139–145, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.043>.
- Ichimescu, A., Popescu, N., Popovici, E. C., Toma, A., (2024), Energy efficiency for 5G and beyond 5G: potential, limitations, and future directions. *Sensors (Basel)*, 24(22), 7402, <https://doi.org/10.3390/s24227402>.
- Incropera, F.P., (1988), Convection heat transfer in electronic equipment cooling, *ASME Journal of Heat Transfer*, 110(4b), 1097–1111, <https://doi.org/10.1115/1.3250613>.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine A.S., (2007), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons Inc. USA.
- Kaner, S. (2024), Polimer matrisli karbon kompozit malzemelerin SİC takviye oranlarının mekanik ve metalurjik özelliklere etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(2), 605–614. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1407288>.
- Kaya, T., Goldak, J., (2006), Numerical analysis of heat and mass transfer in the capillary structure of a loop heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3211–3220, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.028>.
- Kim, M.H., Lee, S.Y., Mehendale, Webb, R.L., (2003), *Advances in Heat Transfer* Volume 37. J.P. Hartnett (Ed.), *Microchannel heat exchanger design for evaporator and condenser applications*, Elsevier.
- Kotcioğlu İ., Çalışkan S., Manay E., (2009), Farklı Soğutucular Kullanarak CPU’nun Isı Boruları ile Soğutulması, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29, 2, 109-116.
- Li, J., Zhou, G., Tian, T., Li, X., (2021), A new cooling strategy for edge computing servers using compact looped heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 187 116599, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116599>.
- Lin, S., Broadbent, J., McGlen, R., (2005), Numerical study of heat pipe application in heat recovery systems, *Applied Thermal Engineering*, 25, 127-133, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.02.012>

- Liu J., Zhang, Y., Feng, C., Liu, L., Luan T., (2019), Study of copper chemical-plating modified polyacrylonitrile-based carbon fiber wick applied to compact loop heat pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 100 104–113, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.07.008>.
- Liu Z.C., Li, H., Chen, B.B., Yang, J.G., Liu W., (2012), Operational characteristics of flat type loop heat pipe with biporous wick, *International Journal of Thermal Sciences*, 58, 180–185, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.027>.
- Ma, K. ve Liu, J., (2007), Liquid metal cooling in thermal management of computer chips. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 1(4), 384–402. <https://doi.org/10.1007/s11708-007-0057-3>
- Markal, B. ve Varol, R., (2021), Düşük dolum oranında ikili karışımlarla yüklü üniform olmayan atımlı ısı borusunun deneysel incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(4), 1086–1100, <https://doi.org/10.29130/dubited.879662>.
- Maruyama, I., Sasano, H., Nishioka, Y., Igarashi, G., (2014), Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90 °C. *Cement and Concrete Research*, 66, 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.016>
- Maydanik Y., M. Chernysheva, S. Vershinin, (2020), High-capacity loop heat pipe with flat evaporator for efficient cooling systems, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 34, 465–475, <https://doi.org/10.2514/1.T5845>.
- Maydanik, Y.F., Pastukhov, V.G., Chernyshova, M.A., Delil, A.A.M., (2003, 2-5 Şubat), Development and test results of a multi-evaporator-condenser loop heat pipe, *Conference on Thermophysics in Microgravity Space Technology & Applications International Forum (STAIF 2003)*, Albuquerque, NM, USA.
- Mustafa, A.A., Noranai, Z., Imran, A.A., (2021), Solar absorption cooling systems: a review, *Journal of Thermal Engineering*, 7(4), 970-983, <https://doi.org/10.18186/thermal.931165>
- Naibaho, N.M., Fatriasari, W., Kusuma, I.W., Arung, E.T., (2023), Phytochemical screening, antioxidant and antiinflammatory properties of several stingless bee pollens processed using different drying methods. *Uludag Bee Journal*, 23(2), 153–166. <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1286430>.
- Noie-Baghdan, S.H., Majideian, G.R., (2000), Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospital, *Applied Thermal Engineering*, 20, 1271-1282, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00092-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00092-7).
- O'shaughnessy, P. ve T., Hemenway, D.R., (1994). Computer automation of a dry-dust generating system. *Inhalation Toxicology*, 6, 95-113, <https://doi.org/10.3109/08958379409029698>.
- Odagiri, K., Nagano, H., (2019), Heat transfer characteristics of flat evaporator loop heat pipe under high heat flux condition with different orientations, *Applied Thermal Engineering*, 153, 828–836, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.022>.
- Perpina, X., Jorda X., Vellvehi M., Altet J., (2011), Hot spot analysis in integrated circuit substrates by laser mirage effect, *Applied Physics Letters*, 98(16), 164104, <https://doi.org/10.1063/1.3581038>.
- Perrot, P., (1998), *A to Z of thermodynamics*, Oxford University Press, Oxford,

- Riehl, R.R. ve Siqueira, T.C.P.A., (2006), Heat transport capability and compensation chamber influence in loop heat pipes performance, *Applied Thermal Engineering*, 26(11-12), 1158–1168, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>.
- Schmidt, R., (2004), Challenges in electronic cooling-opportunities for thermal management techniques - microprocessor liquid cooled microchannel heat sinks. *Heat Transfer Engineering*, 3-12.
- Silverstein, C., (1992), *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange*, CRC press.
- Singh, R., Akbarzadeh, A., Dixon, C., Mochizuki, M., Riehl, R.R., (2007), Miniature loop heat pipe with flat evaporator for cooling computer CPU, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(1), 42-49, <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2007.892066>
- Singh, R., Akbarzadeh, A., Mochizuki, M., (2008), Operational characteristics of a miniature loop heat pipe with flat evaporator, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1504–1515, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.12.013>.
- Tavakkoli F., Ebrahimi S., Wang S., Vafai K., (2016), Analysis of critical thermal issues in 3D integrated circuits. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 337–352, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.010>.
- Thompson, D.L. (2022), *Recycling of Lithium-ion Batteries*. (Doktora Tezi), University of Leicester, School of Chemistry, İngiltere.
- Wadsworth, D.C., Mudawar, I., (1990), Cooling of a multichip electronic module by means of confined two dimensional jets of dielectric liquid, *Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME*, 112, 891–897, <https://doi.org/10.1115/1.2910496>.
- Xu J., L. Zhang, H. Xu, J. Zhong, J. Xuan, Experimental investigation and visual observation of loop heat pipes with two-layer composite wicks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72 (2014) 378–387, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.016>.
- Xu, J., Wang, D., Hu, Z., Zhang, L., Ye, L., Zhou, Y., (2020), Effect of the working fluid transportation in the copper composite wick on the evaporation efficiency of a flat loop heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 178, 115515, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115515>.
- Zhao R., Zhang Z., Zhao S., Cui H., Liu Z., Liu W., (2021), Experimental study of flat-disk loop heat pipe with R1233zd(E) for cooling terrestrial electronics, *Applied Thermal Engineering*, 197, 117385, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117385>.