



**DOLUM ORANI EĞİM AÇISI VE OLUK ŞEKLİNİN OLUKLU ISI
BORUSU ISIL PERFORMANSINA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Osman Furkan MURATOĞLU

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2019

Osman Furkan MURATOĞLU tarafından hazırlanan “DOLUM ORANI EĞİM AÇISI VE OLUK ŞEKLİNİN OLUKLU ISI BORUSU ISIL PERFORMANSINA OLAN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İlhami HORUZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ATILGAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 26/12/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Osman Furkan MURATOĞLU

26/12/2019

DOLUM ORANI EĞİM AÇISI VE OLUK ŞEKLİNİN OLUKLU ISI BORUSU ISIL PERFORMANSINA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Osman Furkan MURATOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

ÖZET

Bu çalışma ile eksenel oluklara sahip ısı borularında, çalışma akışkanının dolum oranı, ısı borusu eğimi ve oluk şekli parametrelerinin ısı borularının ısı performanslarına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle ısı borularının çalışma akışkanı ile doldurulması ve test enstrümantasyonunun yapılması gibi ısı borusu hazırlık faaliyetleri, sonrasında ise performans testlerinin gerçekleştirebilme amacıyla tasarlanmış test düzeneğinin hazırlık faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Dolum oranı, eğim ve oluk şeklinin ısı performansına olan etkilerinin belirleyebilmek için girintili ve ikizkenar yamuk şeklinde oluklara sahip ısı boruları kullanılmıştır. Girintili oluklara sahip ısı borusu, tam olduğu değer ile bu değerden daha az ve daha fazla değerlerde doldurularak dolum oranının etkileri belirlenmiştir. En yüksek performansın tam dolu olduğu durumda gösterdiği, az dolu olduğu durumlarda ise fazla dolu olduğu durumlara göre performansın daha fazla düştüğü gözlemlenmiştir. Eğimin etkileri girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında araştırılmıştır. Eğimin artmasıyla birlikte yerçekimi kuvvetlerinin olukların oluşturduğu kapiler kuvvetlere zıt yönde etkimesi, ısı borularının performanslarının düşmesine ve buna bağlı olarak da efektif ısıl iletkenlik değerlerinin düşmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca uzay uygulamaların kullanılacak ısı borularının performanslarının belirlenebilmesi için, farklı eğimlerde gerçekleştirilen testlerden, yeryüzü şartlarında çalışma akışkanının çökmesinden kaynaklı hatalı hesaplamalar giderilerek bu ısı borularının uzay şartlarında gösterecekleri performanslar belirlenmiştir. Girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapıları karşılaştırılarak bu oluk yapılarının gösterdikleri ısı taşıma performansları ve efektif ısıl iletkenlikler değerleri karşılaştırılmıştır. Girintili şeklindeki oluk yapısının ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapısına göre oluk başı %18 daha fazla ısı taşıma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. Ancak aynı iç ve dış çapa sahip olan ısı borularında, girintili oluklara göre daha fazla ikizkenar yamuk oluk yerleştirilebildiğinden toplamda ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu daha fazla ısı taşımıştır.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Isı borusu, Uzay performansı, Efektif kapiler yarıçap, Dolum oranı

Sayfa Adedi : 88

Danışman : Prof. Dr. İlhami HORUZ

İkinci Danışman : Dr. Cem ÖMÜR

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FILLING RATIO
INCLINATION ANGEL AND GROOVE SHAPE ON THERMAL PERFORMANCE
OF GROOVED HEAT PIPES

(M. Sc. Thesis)

Osman Furkan MURATOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

In this study, the effects of filling ratio of the working fluid, inclination of the heat pipe and groove shape on the thermal performance heat pipes were investigated experimentally in axially grooved heat pipes. In this respect, firstly, heat pipe preparation activities such as filling of the heat pipes with working fluid and performing test instrumentation and then preparation activities of test set-up designed to perform performance test are performed. Heat pipes with re-entrant and trapezoidal grooves were used to determine the effects of filling ratio, inclination and groove shape on thermal performance. The effects of filling ratio of working fluid were determined by filling the heat pipe with re-entrant grooves at the fully filled value and less and more than this value. It was observed that the highest performance of the heat pipe was shown when fully filled and the heat transport performance decreased more when it was under filled than when it was over filled. The effects of the inclination were investigated in both re-entrant and trapezoidal grooved heat pipes. It was observed that the effects of gravitational forces acting the opposite direction to the capillary forces generated by the grooves increase with the increasing inclination, causing the performance of the heat pipes to decrease and consequently the effective thermal conductivity values of the heat pipes to decrease. In addition, in order to determine the performance of the heat pipes to be used in space applications, the miscalculations caused by puddle effect of working fluid from the test carried out at terrestrial conditions were eliminated and the performances of these heat pipes under space conditions were determined. The re-entrant and trapezoidal grooves were compared in terms of their heat carrying performances and the effective thermal conductivities. It was observed that the re-entrant grooves have 18% higher heat transport capacity then the trapezoidal grooves per one groove. However, in the heat pipes having the same inner and outer diameter, the trapezoidal grooved heat pipe carried more heat since more trapezoidal grooves can be placed than the re-entrant grooves.

Science Code : 91412

Key Words : Heat pipe, Space performance, Effective capillary radius, Filling ratio

Page Number : 88

Supervisor : Prof. Dr. İlhami HORUZ

Co-Supervisor : Dr. Cem ÖMÜR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesi süresince bana yol gösteren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. İlhami HORUZ'a teşekkürü bir borç bilir, saygı ve minnetlerimi sunarım. Bilgi ve tecrübesiyle her türlü konuda bana yol gösteren Dr. Cem ÖMÜR'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmam ve iş hayatım boyunca bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen amirlerim ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca hiçbir konuda maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aile sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. ISI BORULARINDA TEMEL KAVRAMLAR	11
3.1. Isı Borusu Bileşenleri.....	12
3.1.1. Çalışma akışkanı	12
3.1.2. Fıtıl yapısı	14
3.1.3. Boru.....	15
3.1.4. Isı borusu bileşenlerinde uyumluluk.....	16
3.2. Isı Borusu Çeşitleri	17
3.2.1. Sabit iletkenlikli ısı boruları.....	17
3.2.2. Değişken iletkenlikli ısı boruları.....	17
3.2.3. Mikro ve minyatür ısı boruları.....	18
3.2.4. Salımlı ısı boruları	19
3.2.5. Diyet ısı boruları	19
3.3. Isı Borusu Uygulama Alanları.....	20

	Sayfa
3.3.1. Uzay sistemleri.....	21
3.3.2. Elektronik sistemler	21
3.3.3. Solar sistemler.....	22
3.3.4. Donmuş toprak (Permafrost) uygulamaları	23
4. DOLUM ORANI, EĞİM AÇISI VE OLUK ŞEKLİNİN OLUKLU ISI BORUSU ISIL PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	25
4.1. Dolum Oranı	25
4.2. Eğim	26
4.3. Oluk Şekli	27
4.4. Deneysel Yaklaşım ve Hazırlıkları	28
4.4.1. Isı borusun hazırlanması	28
4.4.2. Test düzeneğinin oluşturulması	32
4.5. Test Faaliyetleri	36
4.6. Isı Borusu Performans Parametreleri ve Hesaplamaları.....	37
4.6.1. Isı borusu sıcaklıkları.....	37
4.6.2. Efektif ısı borusu uzunluğu.....	38
4.6.3. Isı taşıma kapasitesi	38
4.6.4. Efektif ısı iletkenlik	39
4.6.5. Kapiler basınç	40
5. TARTIŞMA	43
5.1. Eğimin Isı Borusu Isıl Performansına Olan Etkisi	43
5.1.1. Girintili oluklu ısı borusu için farklı eğimlerde gerçekleştirilen test sonuçları	43

Sayfa

5.1.2. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu için farklı eğimlerde gerçekleştirilen test sonuçları	52
5.1.3. Oluklu ısı borularının 0-g performanslarının belirlenmesi	61
5.2. Oluk Performansının Karşılaştırılması	63
5.3. Farklı Dolum Oranlarının Isı Borusu Performansına Olan Etkisi.....	66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	75
EK-1. Amonyagın termo-dinamik özellikleri	78
EK-2. Girintili oluklu ısı borusu teknik resmi	79
EK-3. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu teknik resmi.....	80
EK-4. Şerit tipi ısıtıcı kataloğu	81
EK-5. İzolasyon malzemesi teknik özellikleri.....	83
EK-6. Farklı akışkanlar için sıvı taşıma faktörünün sıcaklığa göre değişimi.....	84
EK-7. Elde edilen sonuçların belirsizlik analizi	85
EK-8. 19 girintili oluklu ısı borusu buharlaştırıcı bölge sıcaklıkları	87
ÖZGEÇMİŞ	88

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Isı borusu uygulamalarında kullanılan bazı çalışma akışkanları	12
Çizelge 3.2. Yaygın olarak kullanılan çalışma akışkanlarının fitil ve boru malzemeleriyle olan uyumları	16
Çizelge 4.1. Farklı oluk tipleri için efektif kapiler yarıçap kabulleri.....	40
Çizelge 5.1. Girintili oluklu ısı borusu 0 mm testi güç süreleri	44
Çizelge 5.2. Girintili oluklu ısı borusu 2 mm testi güç süreleri	46
Çizelge 5.3. Girintili oluklu ısı borusu 4 mm testi güç süreleri	47
Çizelge 5.4. Girintili oluklu ısı borusu 6 mm testi güç süreleri	48
Çizelge 5.5. Girintili oluklu ısı borusu 8 mm testi güç süreleri	49
Çizelge 5.6. Girintili oluklu ısı borusu her bir eğim için adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları.....	50
Çizelge 5.7. Girintili oluklu ısı borusunun farklı eğimlerdeki ısı taşıma kapasiteleri ve efektif ısı iletkenlik katsayıları.....	51
Çizelge 5.8. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 0 mm testi güç süreleri.....	54
Çizelge 5.9. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 2 mm testi güç süreleri.....	55
Çizelge 5.10. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 4 mm testi güç süreleri.....	56
Çizelge 5.11. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 6 mm testi güç süreleri.....	57
Çizelge 5.12. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 8 mm testi güç süreleri.....	58
Çizelge 5.13. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu her bir eğim için adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları	59
Çizelge 5.14. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunun farklı eğimlerdeki ısı taşıma kapasiteleri ve efektif ısı iletkenlik katsayıları.....	60
Çizelge 5.15. Girintili oluklu ısı borusunda her bir eğim değerinde sıvı taşıma faktörleri	64
Çizelge 5.16. Girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu operasyon sıcaklığındaki sıvı taşıma faktörleri	64

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.17. Girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu operasyon sıcaklığındaki teorik olarak hesaplanmış ısı taşıma kapasiteleri	64
Çizelge 5.18. Girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında her bir eğim seviyesinde oluk başı ısı taşıma performansları.....	65
Çizelge 5.19. Girintili ve ikizkenar oluklu ısı borularının aynı operasyon sıcaklığındaki efektif ısı iletkenlik değerleri.....	66
Çizelge 5.20. Farklı dolum oranlarındaki amonyak miktarları.....	66
Çizelge 5.21. Girintili oluklu ısı borusunun farklı dolum oranlarındaki ısı taşıma performansları	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Isı borusu kısım ve bileşenleri	11
Şekil 3.2. Yaygın kullanılan oluk tipleri.....	15
Şekil 3.3. Değişken iletkenlikli ısı boruları	18
Şekil 3.4. Mikro Isı Boruları	18
Şekil 3.5. Salınlımlı ısı boruları	19
Şekil 3.6. Diyet Isı Boruları a) Sıvı tuzaklı diyet ısı boruları b) Buhar tuzaklı diyet ısı boruları	20
Şekil 3.7. Solar sistemlerde kullanılan ısı boruları	22
Şekil 4.1. Isı borularının tam boş ve tam dolu halleri.....	26
Şekil 4.2. Isı borusunda buharlaştırıcı kısmın yoğunlaştırıcı kısımdan daha yüksekte olduğu negatif eğim durumu	26
Şekil 4.3. Girintili oluk yapısı ve oluk detayları.....	27
Şekil 4.4. İkizkenar yamuk oluk yapısı ve oluk detayları.....	27
Şekil 4.5. İzolasyon üzerine yerleştirilen ısıl-çiftler ve isimlendirilmeleri.....	34
Şekil 4.6. Isı borusu üzerine yapıştırılan ısıl-çiftler ve isimlendirmeleri.....	34
Şekil 4.7. Test düzeneği	35
Şekil 5.1. Girintili oluklu ısı borusu 0 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları.....	44
Şekil 5.2. Girintili oluklu ısı borusu 2 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları.....	45
Şekil 5.3. Girintili oluklu ısı borusu 4 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları.....	47
Şekil 5.4. Girintili oluklu ısı borusu 6 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları.....	48
Şekil 5.5. Girintili oluklu ısı borusu 8 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları.....	49
Şekil 5.6. Girintili oluklara sahip ısı borusunda kuruma noktaları	50
Şekil 5.7. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 0 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları	53

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 2 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları	55
Şekil 5.9. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 4 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları	56
Şekil 5.10. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 6 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları	57
Şekil 5.11. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 8 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları	58
Şekil 5.12. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunda kuruma noktaları	59
Şekil 5.13. Girintili oluklu ısı boru eğim ve ısı taşıma kapasitesi grafiği.....	62
Şekil 5.14. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu eğim ve ısı taşıma kapasitesi grafiği	62
Şekil 5.15. Girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularının her bir eğim seviyesindeki ısı taşıma kapasiteleri	65
Şekil 5.16. Girintili oluklu ısı borusunun farklı dolum oranlarındaki ısı taşıma kapasiteleri	67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Isı borularında kullanılan farklı fitil yapıları	14
Resim 3.2. Uydu panellerinde kullanılan ısı boruları	21
Resim 3.3. Elektronik sistemlerde kullanılan ısı boruları.....	22
Resim 3.4. Donmuş toprak (permafrost) uygulamalarında ısı borusu kullanımı.....	23
Resim 4.1. Isı borusu sonlandırma parçası ve dolum tüpü entegrasyonu.....	29
Resim 4.2. Kaynak işlemleri sonrasında ısı borusuna helyum kaçak testi uygulaması ...	29
Resim 4.3. Isı borusuna gaz salınımı yaptırılması	30
Resim 4.4. Çalışma akışkanın doldurulması için kullanılan düzenek	31
Resim 4.5. Isı borusunun kuru buz ile soğutulması.....	32
Resim 4.6. Şerit tipi ısıtıcılar	33
Resim 4.7. Buharlaştırıcı kısma yerleştirilen ısıtıcılar.....	33
Resim 4.8. Isı borusunun yanal duvarlara yapıştırılan ısıl-çiftler.....	33
Resim 4.9. Buharlaştırıcı ve adyabatik kısımlara uygulanan izolasyon	34
Resim 4.10. Isıyı uzaklaştırmak için kullanılan soğutucu plakalar ve ısıl pedler.....	35
Resim 4.11. Eğim ölçer ile ısı borusu eğiminin ölçülmesi	37

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
B_o	Bond sayısı
d	Çap
d_o	Dış çap
d_w	Tel çapı
g	Yer çekimi sabiti
H_L	Fitil yükseklik faktörü
H_s	Statik fitil yüksekliği
I	Akım
l	Uzunluk
k	Isıl iletkenlik katsayısı
k_{eff}	Efektif ısı iletkenlik katsayısı
l_a	Adyabatik kısım uzunluğu
l_b	Buharlaştırıcı kısım uzunluğu
$l_{dry-out}$	Kuruyan bölge uzunluğu
l_{eff}	Efektif ısı borusu uzunluğu
l_{slug}	Sıvı sıkışması uzunluğu
l_y	Yoğuşturucu kısım uzunluğu
m	Kütle
N	Toplam oluk sayısı
N_l	Sıvı taşıma faktörü
n	Isıl-çift sayısı
P	Basınç
P_{cap}	Kapiler basınç
Q_{loss}	Kaçak ısı miktarı
Q_{max}	Maksimum ısı taşıma kapasitesi
r	Yarıçap

Simgeler**Açıklamalar**

r_s	Toz yarıçapı
R	Direnç
R_{eff}	Efektif kapiler yarıçap
R_{ref}	Referans sıcaklık direnci
s_w	Tel aralığı
T	Sıcaklık
T_a	Adyabatik kısım sıcaklığı
T_b	Buharlaştırıcı kısım sıcaklığı
T_{op}	Çalışma sıcaklığı
T_{ref}	Referans sıcaklık
T_y	Yoğuşturucu kısım sıcaklığı
V	Voltaj
w	Oluk genişliği
W	Güç
α	Sıcaklık dayanım katsayısı
β	Yarı üçgen açısı
δ_i	İzolasyon kalınlığı
ΔT	Sıcaklık farkı
ρ	Yoğunluk
ρ_g	Gaz yoğunluğu
ρ_s	Sıvı yoğunluğu
σ	Yüzey gerilim katsayısı
Ω	Direnç

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Al	Alüminyum
mm	milimetre

1. GİRİŞ

Isı boruları, ısıyı bir noktadan diğer bir noktaya etkin bir şekilde taşımak için kullanılan cihazlardır. Çalışma prensipleri akışkanların hal değişimlerine dayanır ve bu sayede herhangi bir hareketli kısma gerek duymadan pasif olarak çalışabilirler. Bu cihazlar, ısıyı taşıdıkları iki uçları arasında küçük bir sıcaklık farkı ile çalışıyor olmaları, çalışmaları için herhangi bir güç girişi gerekmemesi, farklı boyutlarda tasarlanabilmeleri ve yüksek ısı taşıma performanslarına sahip olmaları gibi özellikleri sayesinde, birçok farklı alanda sıklıkla kullanılan cihazlar haline gelmişlerdir. Ancak, ısı borularının ısı taşıma performansları birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Bu parametrelerden bazılarının ısı borularının performanslarına olan etkileri halen istenildiği kadar anlaşılamamıştır. Bu doğrultuda ısı boruları üzerine, ısı borularının ilk ortaya çıktıkları tarihten günümüze kadar önemli bir literatür oluşmuş olmasına rağmen, yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Araştırmanın amacı

Bu yüksek lisans çalışması ile uzay uygulamaları için yerli imkanlarla geliştirilen ısı borularında, eğim açısının, çalışma akışkanının dolum oranının ve girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapılarının, ısı borularının ısı taşıma performanslarına etkilerinin deneysel bir çalışma ile belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan ve kurulan test düzeneğiyle gerçekleştirilen testlerden elde edilen veriler ışığında uzay şartlarında kullanılacak oluklu fitil yapısına sahip ısı borularının, yeryüzü şartlarında gerçekleştirilen testler ile performansları belirlenmiştir.

Tezin yapısı

Bu tez çalışmasında, giriş kısmı ile konuya genel bir giriş yapılmakta ve bu konu ile ilgili literatürde gerçekleştirilen çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir. Ardından, ısı boruları ile ilgili temel kavramlara ayrıntılı bir şekilde yer verilmektedir. Devam eden bölümlerde ise ısı borularının performans testlerini gerçekleştirebilmek adına tasarlanan test düzeneği ve bu düzende gerçekleştirilen performans testlerinden bahsedilmektedir. Sonrasında testlerden elde edilen veriler tartışılmakta ve son olarak bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Isı borusu konsepti ilk olarak 1940'lı yılların başlarında Gaugler tarafından alınan “Isı Transfer Cihazı” adlı patent ile ortaya çıkmıştır [1]. Daha sonra bu konsept, literatürde ilk defa 1964 yılında Grover [2] tarafından yapılan çalışma ile ısı borusu adı ile anılmaya başlanmıştır.

Literatür incelendiğinde ısı boruları hakkından çok sayıda deneysel çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların, ısı borularının ısı taşıma kapasitelerini tahmin etmek, en uygun ısı borusu ve fitil yapısı geometrilerini belirlemek, ideal çalışma akışkanı ve bu akışkanın ideal dolum oranlarını belirlemek ile ısı borularının çalışma prensiplerinin üzerine oluşturulan matematiksel modellerin doğrulanması amacıyla gerçekleştirildiği görülmektedir. Dahası, ısı borularını farklı üretim yöntemleri kullanarak elde etme ve ısı boruları kullanarak birçok farklı sistemin performanslarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar ile de karşılaşmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar fitil yapısı açısından incelendiğinde, çalışılan fitil yapılarının tel ağılı, sinterlenmiş toz ve oluklu fitil yapıları oldukları görülmektedir. Tel ağılı ve sinterlenmiş toz fitil yapıları üretim zorluklarına karşın meydana getirdikleri yüksek kapiler kuvvetler nedeniyle karasal uygulamalarda tercih edilmektelerdir [3]. Oluklu ısı boruları ise yüksek ısı taşıma kapasiteleri ve yerçekimi etkileri nedeniyle oluşan negatif kuvvetlerin olmamasından dolayı sıklıkla uzay uygulamalarında tercih edilmektelerdir [4]. Bu çalışmada sunulan literatür taraması, yüksek lisans çalışmasının kapsamı doğrultusunda sabit iletkenlikli ısı boruları üzerine yapılan deneysel çalışmalara yoğunlaşmaktadır.

Solomon ve diğerleri [5], çalışma akışkanı olarak su kullanan tel ağılı fitil yapısına sahip bakır ısı borularının ısı performanslarını belirlemek amacıyla farklı ısı yüklerinde performans testleri gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışma ile ısı yükü arttıkça ısı borularında buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kısımlar arasındaki sıcaklık farkının da arttığını ve bunun da ısı transferinin gerçekleşebilmesi için ideal olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak bu farkın çok fazla artmasının ısı borusunun kurumasından kaynaklı olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ısı direncin ısı yükü arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Efektif ısı iletkenlik değerlerinin ise ısı yükü arttıkça arttığını belirlemişler ve bu değerlerin hesaplanması için geliştirdikleri matematiksel modelin de deneysel çalışmaları ile uyumlu sonuçlar

verdiğini belirtmişlerdir. Mahdavi ve diğerleri [6], tel ağılı ısı boruları ile yaptıkları çalışmada, çalışma akışkanının dolum oranının, eğimin ve ısı yükünün, ısı borularının ısı dirençleri üzerine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda, ısı borularında yoğunlaştırıcı kısım sıcaklığı sabit tutularak ısı yükünün arttırılmasının, ısı borularının çalışma sıcaklığını arttırdığını ve böylece ısı borularının performanslarının da arttığını ifade etmişlerdir. Isı borularının daha az dolduruldukları durumlarda, ısı performanslarının düştüğünü ve buna ek olarak düşük ısı yüklerinde ısı dirençlerinde de azalmalar meydana geldiği belirlemişlerdir. Fazla doldurmanın ise ısı direnci arttırdığını ifade etmişlerdir. Bu durumun nedenin ise ısı borusu içerisinde bulunan fazla akışkanın buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kısımda gerçekleşen olayları zorlaştırması olduğunu ifade etmişlerdir. Buharlaştırıcı kısmın yoğunlaştırıcı kısımdan daha alçakta olduğu durumlarda ısı borularının ısı dirençlerine ihmal edilebilecek seviyede bir değişiklik olduğunu, ancak tersi durumlarda ısı borularının performansının eğim arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Gerner ve diğerleri [7], yaptıkları çalışma ile küçük ölçekli uydularda kullanılması amacıyla üretilen ve çalışma akışkanı olarak su kullanan, U şeklinde eksenel oluklara sahip ısı boruları ile sinterlenmiş toz fitil yapısına sahip ısı borularının ısı performanslarının belirlemeye çalışmışlardır. Oluklu ısı borusunda gerçekleştirdikleri testler sonucunda, buharlaştırıcı kısmın ısı direncinin bu bölgenin sıcaklığı arttıkça azaldığını, ancak, ısı borusunun kapiler limiti aşıldığında hızlı bir artış gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Aynı dış ölçülere sahip olan sinterlenmiş toz fitil yapıları ısı borusunun ise oluklu ısı borusuna göre daha az ısı taşıma kapasitesine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumunun nedeninin ise sinterlenmiş toz fitil yapısında sürtünmeden kaynaklı yaşanan basınç kayıpları olduğunu ifade etmişlerdir. Kaya ve Garcia [8], yaptıkları çalışma ile eksenel oluklu ısı borularının ısı performans karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu doğrultuda gerçekleştirdikleri deneysel çalışma ile ısı borularında kapiler limit aşıldığında, çalışma akışkanının ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının sonuna kadar ilerleyemediği ve böylece bu bölgelerin kurduğunu ancak çalışma akışkanının bulunduğu bölgelerde ısı borusunun kısmen çalışmaya devam ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, oluklu ısı borularında ısı direncin sıcaklık arttıkça azaldığını ancak ısı borusu kuruma sıcaklıklarına yaklaştığında, bu değerin hızlı artışlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durumun sebebinin ise ısı borusunun kapiler limitlerine ulaşması olduğunu ifade etmişlerdir. Isı borularının kapiler limitlerinin ise çalışma akışkanının özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma akışkanının temas açısı azaldıkça, ısı borularının kapiler limitlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Atay ve diğerleri [9], çalışmalarında oluklu ve sinterlenmiş toz fitil yapılarına sahip ısı borularının ısı

performanslarını farklı çalışma sıcaklıkları ve eğimlerde karşılaştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, sinterlenmiş toz fitil yapılı ısı borularında kurumanın kademeli bir şekilde, oluklu ısı borularında ise ani bir şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Buharlaştırıcı kısmın yoğunlaştırıcı kısımdan daha yüksekte olduğu farklı eğim durumlarında gerçekleştirdikleri testlerde ise oluklu ısı borularının sinterlenmiş toz fitil yapılı ısı borularına göre daha fazla performans kaybı yaşadıklarını ifade etmişlerdir. Buharlaştırıcı kısmın daha alçakta olduğu eğimlerde yaptıkları testlerde ise, oluklu ısı borularının daha iyi performans gösterdiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, oluklu ısı borularının kuruma sıcaklıklarına ulaştıklarında ısı yükünün azaltılmasının ardından bu ısı borularının eski performanslarını sergileyemediklerini belirtmişlerdir.

Schlitt ve diğerleri [10], fitil yapısı olarak ikizkenar yamuk oluklara sahip ısı borularında çalışma akışkanı olarak oksijen, metanol, eten ve amonyak akışkanlarını kullanarak yaptıkları sayısal ve deneysel çalışmalarda, eğim açısının, çalışma sıcaklığının ve dolum oranının, ısı borularının ısı taşıma kapasitelerine ve ısıl iletkenlik katsayılarına olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, kullandıkları bütün akışkanların ikizkenar yamuk oluklu fitil yapısı ile uyumlu olduğunu, ancak, bu çalışma akışkanlarının çalışma sıcaklıklarına göre farklı performanslar gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. Ek olarak, düşük eğimlerde yapılan testlerde, çalışma akışkanının ısı borusu içerisinde çökmesi nedeniyle ısı borularının ısı taşıma performanslarının olduğundan daha yüksek belirlendiğini belirtmişlerdir. Harwell ve diğerleri [11] yaptıkları çalışmada, girintili (re-entrant veya omega olarak da adlandırılmakta) oluklara sahip ısı borusu ile çalışma akışkanı olarak amonyak kullanarak ısı borularının ısı taşıma performanslarını tahmin etmek amacıyla deneysel bir yol izlemişlerdir. Bu çalışmada, çalışma akışkanının dolum oranının özellikle yoğunlaştırıcı kısımda meydana gelen sıcaklık düşüşlerine önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Yoğunlaştırıcı kısımda meydana gelen bu etki doğrultusunda, çalışma akışkanının oluklara çökerek yoğunlaşma alanını azaltmasından kaynaklı olarak dolum oranı arttıkça sıcaklık düşüşlerinin de arttığı belirtilmiştir. Sabit dolum oranlarında eğim açısını değiştirerek yaptıkları deneyler sonucunda ise eğim arttıkça çalışma akışkanının daha az çöktüğünü, böylece sıcaklık düşüşünde azalmalar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları bu deneysel çalışmanın, oluşturdukları sayısal modelle ile de uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Castle ve diğerler [12], yapıları deneysel çalışma ile helisel oluklara sahip bakır ısı borularında etan olan çalışma akışkanının dolum oranının ısı borularının performansları üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışma akışkanının ısı

borusu içerisindeki miktarı arttıkça, kapiler limitin arttığını, ısı direncin ise önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Dahası, buharlaşma ısı transferi katsayısının, çalışma akışkanının dolum oranının güçlü bir fonksiyonu olduğunu bulmuşlardır. Edelstein ve Kosson [13], yaptıkları çalışmada, kriyojenik uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilen ve girintili oluklara sahip ısı borularının, çalışma akışkanı olarak metanol kullanarak ısı taşıma performanslarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Metanol ile 165 W/m değerinde bir taşıma kapasitesi elde etmişlerdir. Ek olarak ekstrüzyon yöntemi ile elde edilen oluklu fitil yapısına sahip ısı borularının imalat kolaylığı, güvenilir tasarım, bükülebilirlik gibi noktalarda birçok avantaj sağladıkların bahsetmişlerdir. Kullandıkları konfigürasyonun her ne kadar metanol için optimize edilmiş olsa da amonyak gibi diğer kriyojenik sıvılarla da kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Girintili oluk tasarımının ise farklı uygulamalarda, farklı yüklerde ve sıcaklıklarda çalışmak için optimize edilmesi gerekebileceğinden bahsetmişlerdir. Hoa ve diğerleri [14] yaptıkları çalışmada, uzay uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilen ısı borularında, farklı oluk geometrilerinin ısı borularının ısı taşıma kapasitelerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma ile, dikdörtgen oluklara sahip ısı borularını üretmenin daha kolay olduğunu, ancak, ikizkenar yamuk şeklindeki oluklarda oluk tabanı genişliğindeki artış dolayısıyla sıvı akış alanında artış yaşandığını ve böylece ısı taşıma kapasitesinde artış olduğuna değinmişlerdir. Girintili oluk geometrisinin ise henüz diğer oluk tipleri kadar güvenilir ve istikrarlı olmadığını, geliştirilmelerine devam edilmeleri gerektiğini belirtmişlerdir.

Lataoui ve diğerleri [15] ikizkenar yamuk şeklinde oluklara sahip alüminyum (Al) ısı borularını, farklı ısı yükleri, farklı çalışma sıcaklıkları ve farklı eğimlerde test ederek ısı taşıma performanslarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu kapsamda, çalışma sıcaklığının maksimum ısı taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerinin çalışma akışkanının o sıcaklıktaki termo-dinamik özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Düşük eğim açılarında, yerçekiminin etkisiyle çalışma akışkanının çökmesinin ısı taşıma kapasitesi olması gereken daha fazla tahmin edilmesine yol açtığını gözlemlemişlerdir. Ancak eğim açısı arttıkça çökmenin azaldığını ve böylece ısı taşıma performansının daha tutarlı bir şekilde tahmin edildiğini belirtmişlerdir. Mozumder ve diğerleri [16], yaptıkları çalışmada su, metanol ve aseton gibi farklı çalışma akışkanlarının ve bu akışkanların %35, %55, %85 ve %100 dolum oranlarının ısı borularının ısı performanslarına olan etkilerini incelemişlerdir. Toplam ısı transferi katsayısının aseton ve metanol çalışma akışkanları bulunan ısı borularında ısı yükü birlikte arttığını ancak çalışma akışkanı olarak su bulunan ısı borusunda önemli bir değişiklik

göstermediği sonucunu elde etmişlerdir. Çalışma akışkanının dolum oranının, aseton ısı borusunda, su ve metanol ısı borularına göre daha önemli etkiler gösterdiğini belirtmişlerdir. %85'in üzerinde dolum oranlarında, daha yüksek ısı taşınım katsayısı, daha az ısı direnç, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımlar arasında daha az sıcaklık farkı gibi farklı açılardan daha iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Chen ve diğerleri [17], ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında, çalışma sıcaklığının ve oluk yapısı parametrelerinin, ısı borularının ısı taşıma kapasiteleri ve ısı dirençleri üzerine olan etkileri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları bu çalışmada, ısı borularının çalışma sıcaklıklarının ısı taşıma performanslarını etkileyen önemli faktörlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Alüminyum ısı borularında çalışma akışkanı olarak amonyak kullandıkları deneysel çalışmalarında, bu ısı borularının maksimum ısı taşıma kapasitelerini 269 K'de gösterdiği sonucunu elde etmişlerdir. İkizkenar oluk yapısında, oluk yapısının buhar kısmına açılan genişliğini sabit tutarak farklı oluk tabanı uzunlukları yaptıkları deneylerde, oluk tabanının genişliği arttığında ısı taşıma kapasitesinin de arttığını görmüşlerdir. Buhar kısmının çapını arttırmanın ise ısı taşıma performansında önemli etkileri olmadığını belirtmişlerdir. Isı borularının toplam ısı dirençlerinde ise, çalışma sıcaklığının ısı dirence olan etkilerinin önemsiz seviyelerde olduğunu ancak, ısı direncin ısı yüküne bağlı olarak arttığı sonuçlarını elde etmişlerdir. Anand ve diğerleri [18], dikdörtgen oluk yapısına ve etan çalışma akışkanına sahip alüminyum ısı borularında farklı çalışma sıcaklıkları ve farklı eğimlerde gerçekleştirdikleri deneysel çalışma ile bu parametrelerin ısı borularının ısı performanslarına olan etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonunda en yüksek ısı taşıma kapasitesinin 160-220 K arasında elde edildiğini görmüşlerdir. Yatay pozisyon ve 2.5 mm eğim ile gerçekleştirdikleri testlerde ise, eğimin etkisinin çalışma sıcaklığı ile birlikte arttığını ve her sıcaklıkla yatay konumda daha fazla ısı taşıma kapasitesi elde edildiği sonuçlarına ulaşmışlardır. Bertoldo ve diğerleri [19] yaptıkları çalışmada dikdörtgen oluklara sahip Al ısı borularında amonyak ve aseton çalışma akışkanlarının ısı taşıma performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, aseton ile çalışan ısı borusunun, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısım arasında daha küçük bir sıcaklık farkı ile çalıştığını görmüşlerdir. Ancak, çalışma akışkanı olarak asetonun kullanılmasının, amonyak kullanılmasına göre ısı borusunu eğime çok daha duyarlı bir hale getirdiğini belirtmişlerdir.

Wu ve diğerleri [20], yaptıkları çalışmada, ısı borularının oluk sayılarının performanslarına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada oluk sayısının artmasıyla, çalışma akışkanının buharlaştığı yüzeyinde arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışma ile, oluk sayısını arttırmanın

efektif kapiler yarıçap ve ıslatılabilirlik gibi çalışma akışkanına bağlı olan parametreleri etkilemediği sonucuna ulaşmışlardır. 8, 10, 12 ve 14 oluklu ısı borularında gerçekleştirdikleri performans testlerinde, ısı taşıma kapasitesini 350W, 420W, 470 W ve 500 W olarak elde etmişlerdir. Böylece, oluk sayısının artmasıyla ısı taşıma kapasitesinin de arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Shen ve diğerleri [21] yaptıkları çalışma ile üçgen oluklara sahip ısı borularında oluk geometrisinin, eğimin ve çalışma sıcaklığının etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda, üçgen oluklu ısı borularında çalışma sıcaklığının ve buhar kısmının çapını arttırmanın ısı taşıma kapasitesini de arttırdığını belirtmişlerdir. Ancak, bu oluk yapısının eğime karşı oldukça kötü performans sergilediğini belirtmişlerdir. Vlassov ve diğerleri [22] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, oluk yapıları haricinde tamamıyla özdeş olan, dikdörtgen ve girintili oluklara sahip ısı borularının ısı taşıma performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışma akışkanı olarak aseton kullandıkları bu çalışmanın sonucunda, girintili oluklara sahip ısı borusunun, dikdörtgen oluklara sahip ısı borusuna kıyasla daha yüksek ısı taşıma performansına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, girintili oluk tipine sahip ısı borularında fitil yapısı tarafından meydana getirilen kapiler kuvvetlerin, çalışma akışkanının dolum oranına daha hassas tepkiler verdiğini belirtmişlerdir.

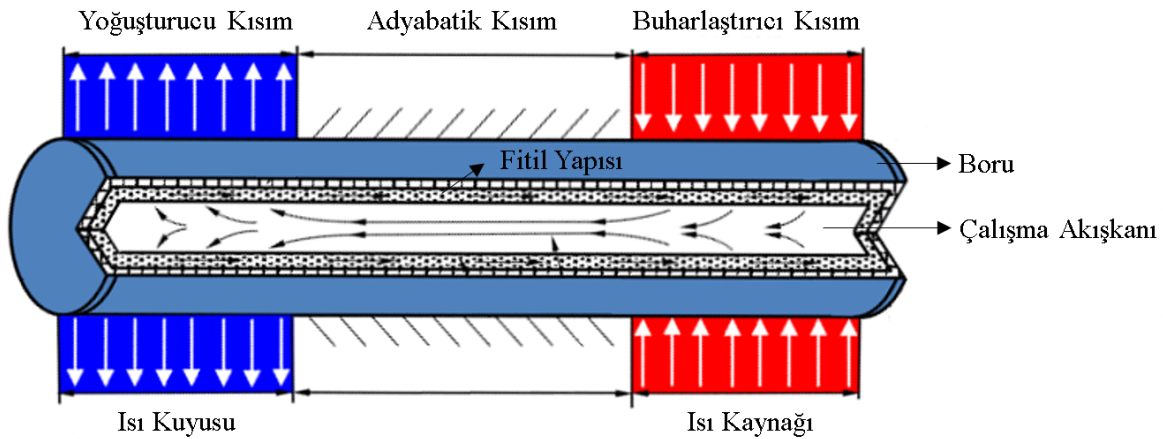
Anand [23], yaptığı çalışma ile, ısı borularının buharlaştırıcı kısımlarının uzunluklarının ısı performanslarına olan etkilerinin incelemiştir. Bu amaçla çalışma akışkanı amonyak olan iki farklı ısı borusunu farklı eğimlerde ve farklı buharlaştırıcı kısım uzunluklarında test etmiştir. Bu çalışma ile ısı borularında buharlaştırıcı kısmın boyunu uzatmanın bu bölgeye olan ısı akısını düşürdüğünü ve aynı zamanda ısı taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir. Buharlaştırıcı kısımda ısı akısının azalmasının, ısı borusunda kapiler basıncı arttırdığı belirtilmiş, bunun sebebinin ise çalışma sıvısının temas açısının azalması olduğuna değinilmiştir. 20° C ve 60 °C çalışma sıcaklıklarında yaptıkları testlerde, çalışma sıvısının temas açısının sıcaklık arttıkça azaldığı sonucunu elde etmişlerdir. 10 mm eğimde buharlaştırıcı kısmın boyunun 125 mm'den 325 mm'ye çıkartılması ile ısı taşıma kapasitesinde 1,6 kat artış yaşandığı, 7,17 mm eğimde ısıtıcı boyunda yapılan aynı değişiklikte ise ısı taşıma kapasitesinde 1,8 kat artış olduğu belirtilmiştir. Lataoui ve diğerleri [24], yaptıkları çalışma ile, çalışma akışkanı amonyak olan ikizkenar yamuk oluklara sahip alüminyum ısı borularının yeryüzü koşullarında gerçekleştirilen testler ile ısı davranışlarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu amaçla, -40°C ile 80°C aralığındaki çalışma sıcaklıklarında ve 0 mm ile 10 mm aralığındaki eğim seviyelerinde bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Bu

Çalışma sonucunda, ısı borularında, buharlaştırıcı kısmın üst tarafında bulunan olukların alt tarafında bulunanlara göre daha önce kapiler limitlerine ulaştığı ve böylece kuruduğı belirlenmiştir. Alt tarafta bulunan oluklarında üst taraftakiler göre daha geç kurummasının ise çalışma akışkanının bu bölgelere çökmesinden kaynaklı olduğı ifade edilmiştir. Alt tarafta bulunan oluklarda çalışma akışkanının çökmesinden kaynaklı oluşan bu etkinin ise artan eğimle birlikte azaldığı belirtilmiştir. Yang ve diğerkleri [25], çalışma akışkanı olarak amonyak kullanan ve girintili oluk yapısına sahip alüminyum ısı borularının farklı çalışma sıcaklıklarında ve ısı yüklerinde performanslarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu doğrultuda, ısı borusunun eksenel sıcaklık dağılımı, efektif ısıl iletkenlik değerini, ısıl direncini ve maksimum ısı taşıma kapasitesi değerini belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışma ile sabit çalışma sıcaklığında, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısım arasındaki sıcaklık farkının artan ısı yükü ile birlikte arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ısı borusunun efektif ısıl iletkenlik değerinin çalışma sıcaklığının ve ısı yükünün artması ile arttığını ifade etmişlerdir. ısıl direncin ise ısı yükünün artması ile azaldığını belirtmişlerdir.

3. ISI BORULARINDA TEMEL KAVRAMLAR

Isı boruları, bir ısı kaynağı ile bir ısı kuyusu arasında etkin ısı aktarımı sağlayan cihazlardır. Bu aktarımı yaparken içlerinde bulunan saf akışkanın hal değişiminden ve boru içinde bulunan kılcal yapıdan faydalanırlar. Böylece, pompa gibi dışarıdan herhangi bir hidrolik enerji girdisi sağlayan makineye ihtiyacı olmadan pasif bir şekilde çalışırlar.

Isı boruları temel olarak üç ana kısımdan oluşurlar. Bunlar, ısı kaynağında bulunan buharlaştırıcı kısım, ısı kuyusunda bulunan yoğuşturucu kısım ve ikisinin arasında bulunan adyabatik kısımdır (Şekil 3.1). Bu bölümlerin birbirlerinden ayırt edici özellikleri yoktur. O anki çalışma durumlarına göre iki uçta buharlaştırıcı ya da yoğuşturucu olabilir. Aynı zamanda buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımların uzunlukları da o andaki çalışma şartlarına göre değişebilir.



Şekil 3.1. Isı borusu kısım ve bileşenleri [26]

Bir dış kanyaktan radyasyon, taşınım veya iletim yolu ile ısı kaynağından buharlaştırıcı kısma aktarılan ısı sayesinde ısı borularının içlerinde bulunan çalışma akışkanı, gizli ısı depolayarak buharlaşır. Buharlaşan akışkan, oluşan buhar basıncının da etkisiyle ısı kuyusunda bulunan buharlaştırıcı kısma doğru hareket eder. Isı kuyusunda gizli ısını atarak tekrar yoğuşan akışkan, ısı borusunun duvarlarında bulunan fıtil yapısı tarafından meydana getirilen kılcal kuvvetler sayesinde tekrar ısı kaynağına doğru hareket eder. Yoğuşturucu kısmın buharlaştırıcı kısma göre daha yüksekte olduğu ısı borusu uygulamalarında çalışma akışkanın buharlaştırıcı kısma olan hareketine yer çekimi de katkı sağlamaktadır. Ancak buharlaştırıcı kısmın yoğuşturucu kısma göre yüksekte olduğu veya uzay uygulamalarında olduğu gibi yerçekimi etkisinin bulunmadığı uygulamalarda, akışkan

buharlaştırıcı kısma sadece fitil yapısının oluşturduğu kılcal kuvvetler tarafından taşınır. Böylece ısı boruları pasif bir şekilde çift fazlı dolaşım sağlayarak ısı aktarımı sağlarlar. Isı boruları, içlerinde bulunan çalışma akışkanının hal değişimleri ile çalıştıklarından, çalışma akışkanı doyma sıcaklığına yakın seviyelerde bulunur. Böylece ısı boruları iki uçları arasında küçük bir sıcaklık farkı ile çalışırlar.

3.1. Isı Borusu Bileşenleri

Isı boruları temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadırlar. Bunlar, çalışma akışkanı, fitil yapısı ve bu bileşenleri barındıran ve bütünlüğünü sağlayan borudur (Bkz. Şekil 3.1).

3.1.1. Çalışma akışkanı

Isı borularında ısıнын taşınmasını sağlayan ana bileşen çalışma akışkanıdır. Bu doğrultuda, bir ısı borusu uygulaması için en önemli adım uygun çalışma akışkanının seçilmesidir. Isı, çalışma akışkanının ısı borusu içerisindeki hal değişimlerinden faydalanılarak iletilir. Bu sebeple çalışma akışkanı seçiminde, ısı borusunun çalışacağı sıcaklıklar göz önünde bulundurulmalıdır. Çizelge 3.1’de ısı borularında kullanılan bazı akışkanlar ve bu akışkanların atmosfer basıncındaki hal değiştirme sıcaklıkları verilmektedir. Çizelge 3.1’den görülebildiği üzere çalışma akışkanlarının ve böylece ısı borularının kullanım aralıkları oldukça düşük sıcaklıklardan (-271 °C) oldukça yüksek sıcaklıklara (2300°C) kadar değişiklik göstermektedirler.

Çizelge 3.1. Isı borusu uygulamalarında kullanılan bazı çalışma akışkanları [27, 28]

Akışkan	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Uygun Kullanım Aralığı
Helyum	-271	-261	-271 – -269
Nitrojen	-210	-196	-230 – -160
Amonyak	-78	-33	-60 – 100
Pentan	-130	28	-20 – 120
Aseton	-95	57	0 – 120
Metanol	-98	64	10 – 130
Flutec PP2	-50	76	10 – 160

Çizelge 3.1. (devam) Isı borusu uygulamalarında kullanılan bazı çalışma akışkanları [27, 28]

Etanol	-112	78	0 – 130
Heptan	-90	98	0 – 150
Su	0	100	30 – 200
Toluen	-95	110	50 – 200
Flutec PP9	-70	160	0 – 225
Thermex	12	257	150 – 350
Cıva	-39	361	250 – 650
Sezyum	29	670	450 – 900
Potasyum	62	774	500 – 1000
Sodyum	98	892	600 – 1200
Lityum	179	1340	1000 – 1800
Gümüş	960	2212	1800 – 2300

Çalışma akışkanının seçiminde çalışma sıcaklığının yanı sıra dikkat edilmesi gereken diğer bir faktörde çalışma akışkanının, boru ve fitil yapısı ile malzeme özellikleri açısından uyumluluğudur. Isı borularının uzun süreli kullanılabilmeleri için çalışma akışkanı ne boru ile ne de fitil yapısı ile hiçbir şekilde kimyasal reaksiyona girmemelidir. Isı borularında çalışma akışkanı seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer özellik ise çalışma akışkanın yüksek yüzey gerilimleri değerine sahip olmalarıdır. Bu özellik, özellikle uzay uygulamalarında kullanılan ısı borularında, ısı borusunun yerçekimi desteği olmadan çalışabilmesi için oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, çalışma akışkanın, fitil yapısını ve boruyu ıslatabilme özelliklerinin de yüksek olması gerekir. Çalışma akışkanın ısı iletkenliğinin yüksek olması ise ısı aktarımı açısından önemli bir parametredir. Çalışma akışkanın yüksek gizli ısıya sahip olması, daha az miktardaki akışkan ile daha çok ısı taşınması anlamına gelir. Çalışma akışkanın düşük viskoziteye sahip olması da ısı borusu içerisinde yapacağı hareketler açısından önemli olmakla birlikte akışkanın çalışma sıcaklığındaki buhar basıncı ne çok yüksek ne de çok düşük olmalıdır.

3.1.2. Fital yapısı

Temel olarak fitil yapısının görevi, özellikle yerçekimi etkilerinin bulunmadığı uzay uygulamalarında veya ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının yoğunlaştırıcı kısmından daha yüksekte olduğu uygulamalarda, yoğunlaşan çalışma akışkanının herhangi bir dış kuvvete gerek kalmadan buharlaştırıcı kısma iletilmesini sağlamaktır. Çalışma akışkanının fitil yapısı içerisindeki bu hareketi, fitil yapısı tarafından meydana getirilen kılcal kuvvetler sayesinde gerçekleşir. Kılcal kuvvetler sıvı moleküllerin katı moleküllere yapışmasıyla meydana gelir. Bunun en iyi örneği, bitkilerin köklerinden emilen suyun yapraklara ulaşmasıdır. Fital yapısının bir diğer görevi ise çalışma akışkanının buharlaştırıcı üzerine dağıtılmasını sağlamaktır. Uygulamada temel olarak üç farklı fitil yapısı görülmektedir. Bunlar oluklu, sinterlenmiş ve tel ağılı fitil yapılarıdır (Resim 3.1). Bu oluk tiplerinin birbirleri ile kombine edilerek de kullanıldığı uygulamalara da rastlanmaktadır.



a) Sinterlenmiş Toz

b) Oluklu

c) Tel Ağılı

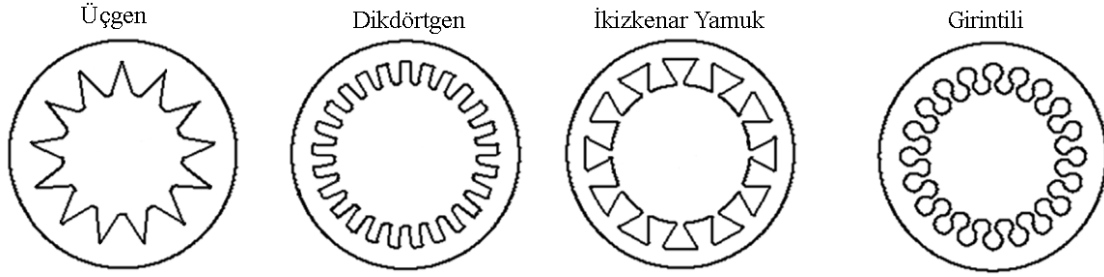
Resim 3.1. Isı borularında kullanılan farklı fitil yapıları [29]

Tel ağılı fitil yapısı, tellerin bir mandrel etrafına çaprazlama olarak sarılması ve ısı borusu içerisine yerleştirilmesiyle elde edilir. Tel ağılı fitil yapılarında, fitil yapısının performansı, tellerin sarım sıklığı ve sarım şekli ile belirlenmekte olup bu tip fitil yapılarında yüksek kılcal kuvvetler ve ısıl iletkenlik değerleri elde edilirken ısılatılabilirlik değerleri düşük seviyelerde kalmaktadır.

Sinterlenmiş toz fitil yapısı, metal tozlarının ısı borusunun iç cidarında sinterlenmesi ile elde edilirler. Bu fitil yapısının elde edilmesi diğer fitil yapılarına göre oldukça zahmetlidir. Ancak bu fitil yapıları yüksek kılcal kuvvetler oluşturmaları nedeniyle kendilerine kullanım alanı bulmaktadırlar.

Oluklu fitil yapısına sahip ısı boruları ekstrüzyon yolu ile imal edilirler. Bu tip fitil yapıları yüksek ısıl iletkenlik sağlarken, oluşturdıkları kılcal kuvvetler diğer fitil yapılarına göre düşük seviyelerdedir. Fakat bu oluk tipi diğer oluk tiplerine göre daha geniş gözenekli yapıya

sahip olduğundan, çalışma akışkanı gözenekte ilerlerken daha az viskoz dirençle karşılaşır ve sayede çalışma akışkanı (aynı zamanda ısı) çok daha uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı oluklu fitil yapıları sıklıkla uzay uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Uygulamada birkaç farklı oluklu fitil tipine rastlanmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Yaygın kullanılan oluk tipleri [30]

Fitil yapılarında, fitil boyutları küçülürken kılcal kuvvetler artar ancak akışa karşı daha çok direnç sağlanmış olur. Bu yüzden, uygun fitil yapısının seçimi uygulamaya göre yapılmalıdır. Örnek olarak uzay uygulamalarında, yer kısıtlamalarından ve yerçekimi desteği olmamasından kaynaklı olarak küçük çaplara sahip fitil yapıları kullanılmaktadır [27]. Fitil yapılarında en çok aranan özellikler ise fitil yapısının elde edildiği malzemenin, çalışma akışkanına ve şartlarına uyumlu olmasıdır. Fitil yapısının elde edildiği malzemenin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken diğer önemli noktalar ise, bu malzemenin ıslatılabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin yüksek olmasıdır.

3.1.3. Boru

Borunun görevi, çalışma akışkanı ile fitil yapısına mekanik destek sağlamak ve bu bileşenleri bir arada tutmaktır. Çalışma akışkanı borunun içerisinde basınçlı bir şekilde dolaşım gerçekleştirdiğinden, borunun sahip olması gereken başlıca özellik sızdırmazlıktır. Ayrıca, gaz difüzyonu olmaması için de gözenekli bir yapıya sahip olmamalıdır. Borunun elde edileceği malzemeni seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli özellik, bu malzemenin hem dış ortamla hem de çalışma akışkanı ile uyumlu olması gerekliliğidir. Bu kriter sağlandıktan sonra boru malzemesi için diğer özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Boru, ısı kaynağı ve ısı havuzu ile ara yüz oluşturduğundan elde edildiği malzeme yüksek ısıl iletkenlik özelliklerine sahip olmalıdır. Seçilen boru malzemesinin işlenebilirliğinin kolay olması da oluklu ısı borularında olduğu gibi boru ve fitil yapısının

beraber üretildiği uygulamalarda oldukça önem taşımaktadır. Özellikle uzay sistemlerinde kullanılan ısı boruları yüksek dayanıklılık/ağırlık oranına sahip olmalılardır. Uygulamada en sık bakır-su ve Al-amonyak ısı boruları kullanıldığı görülmektedir. Boru malzemesi olarak alüminyum kullanılması, radyatör bölgelerinde genellikle alüminyum malzemeden elde edilmesi nedeniyle termal genleşme sorununun ortadan kaldırılması avantajı sağlamaktadır [31]. Kullanılan boru şekilleri de uygulamaya ve ısı borusu tipine göre değişiklik gösterilmektedir.

3.1.4. Isı borusu bileşenlerinde uyumluluk

Isı borularında uyumluluk, ısı borusu bileşenlerinin kendi aralarında ve dış ortamla ile olan ilişkilerini ifade etmektedir. Isı borularında görülen temel uyumsuzluklardan ilki, fitil yapısı ve boru malzemesinin çalışma akışkanı ile tepkimeye girerek istenmeyen gaz çıktıları (ör. H_2 , N_2 , O_2) oluşturmalarıdır. İkinci uyumsuzluk ise boru ve fitil yapısının korozyona uğraması veya çalışma akışkanı içerisinde çözünmesidir. Bu uyumsuzluklar, ısı borusunun performansının düşmesi, gözenek yapısının bozulması, fitil yapısının bozulması veya ıslanabilirliğinin azalması gibi sonuçlar ortaya çıkartarak ısı borularının performanslarını önemli derecelerde düşürebilmekte hatta çalışmalarını imkânsız kılabilir.

Isı borularında çalışma akışkanları ve fitil yapılarının uyumlulukları üzerine Basilus ve filler tarafından yapılan çalışma [32], sıklıkla kullanılan çalışma akışkanları ile fitil ve boru malzemeleri bakımından özetlenerek Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelgede boş olan hücreler, o alanlar için yeteri kadar veri bulunmadığını ifade etmektedir.

Çizelge 3.2. Yaygın olarak kullanılan çalışma akışkanlarının fitil ve boru malzemeleriyle olan uyumları [32]

Fitil ve Boru Malzemesi	Çalışma Akışkanları					
	Su	Aseton	Amonyak	Metanol	Sodyum	Potasyum
Bakır	Uygun	Uygun	Uygun değil	Uygun		
Alüminyum	Gaz üretimi	Uygun	Uygun	Uygun değil		
Paslanmaz Çelik	Gaz üretimi		Uygun	Gaz üretimi	Uygun	
Nikel			Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Titanyum					Uygun değil	Uygun değil

3.2. Isı Borusu Çeşitleri

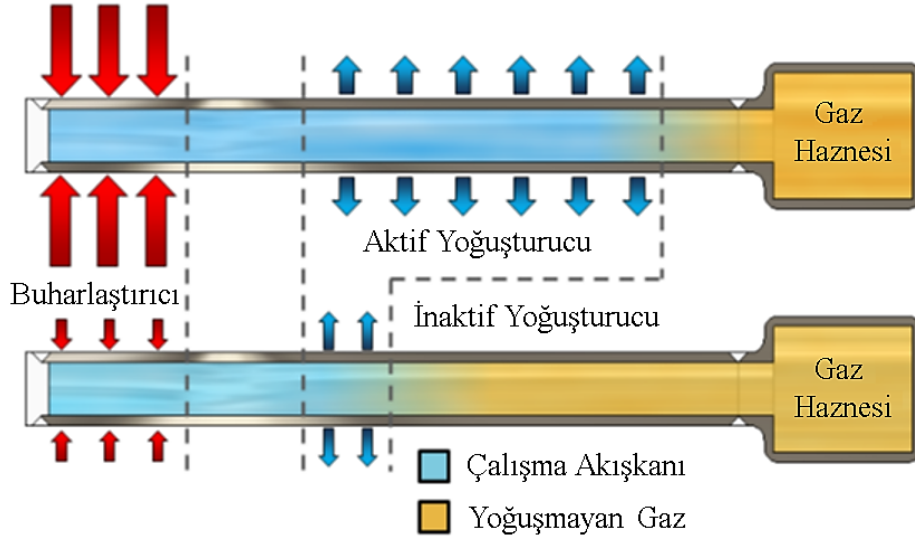
Isı boruları, ihtiyaçlar ve uygulama alanları doğrultusunda meydana gelen değişiklikler ile birkaç farklı türde bulunmaktadırlar.

3.2.1. Sabit iletkenlikli ısı boruları

Sabit iletkenlikli ısı boruları geleneksel ısı boruları olarak da bildiğimiz kılcal kuvvetler yardımıyla çalışan ısı borularıdır. Dış yapıyı oluşturan bir borudan, borunun iç çeperinde bulunan fitil yapısından ve çalışma akışkandan oluşmaktadırlar. Fitil yapısının oluşturduğu kılcal kuvvetler sayesinde çalışma akışkanı, ısı borusu içerisinde çift fazlı dolaşım yapmaktadır. Böylece yüksek miktarda ısı transferi gerçekleştirebilen sabit iletkenli ısı boruları, sıklıkla uzay uygulamalarında kullanılmaktadır.

3.2.2. Değişken iletkenlikli ısı boruları

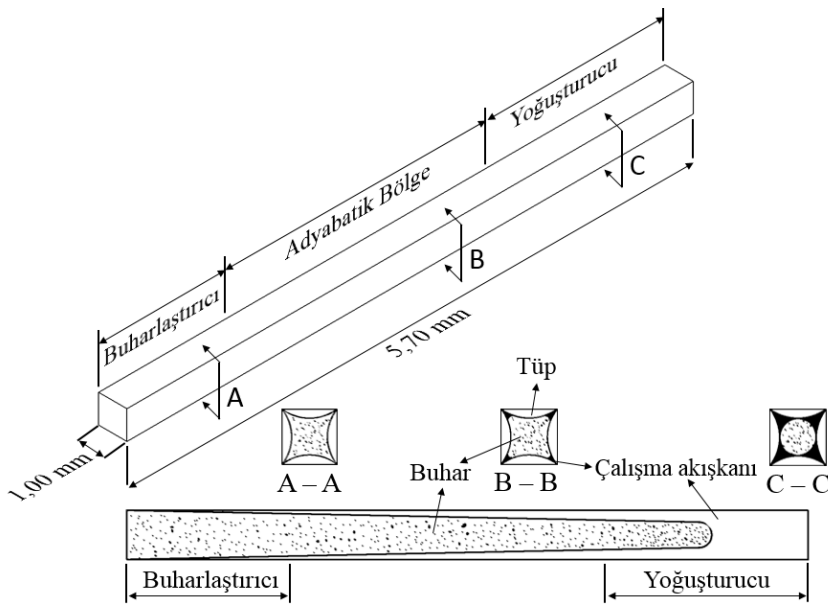
Değişken iletkenli ısı boruları, sabit iletkenlikli ısı borularının yoğuşturucu kısımlarına bir gaz haznesi ve bu hazne içerisine yoğuşmayan bir gaz eklenmesiyle elde edilir (Şekil 3.3). Isı borusunun buharlaştırıcı kısmından alınan ısı miktarı arttıkça ısı borusu içerisinde buhar basıncı artar ve yoğuşmayan gazı hazne içerisine sıkıştırarak yoğuşturucu kısmın uzunluğunu arttırmış olur. Böylece ısı borusunun iletkenliği de artar. Ters durumda, buharlaştırıcı kısımdan alınan ısı miktarı azaldığında, ısı borusu içerisindeki buhar basıncı düşer ve yoğuşmayan gaz yoğuşturucu içerisinde ilerleyerek yoğuşturucu kısmın uzunluğunu kısaltır ve ısı borusunun iletkenliği azalır. Bu nedenle bu tip ısı boruları değişken iletkenlikli ısı boruları adını almışlardır.



Şekil 3.3. Değişken iletkenlikli ısı boruları [33]

3.2.3. Mikro ve minyatür ısı boruları

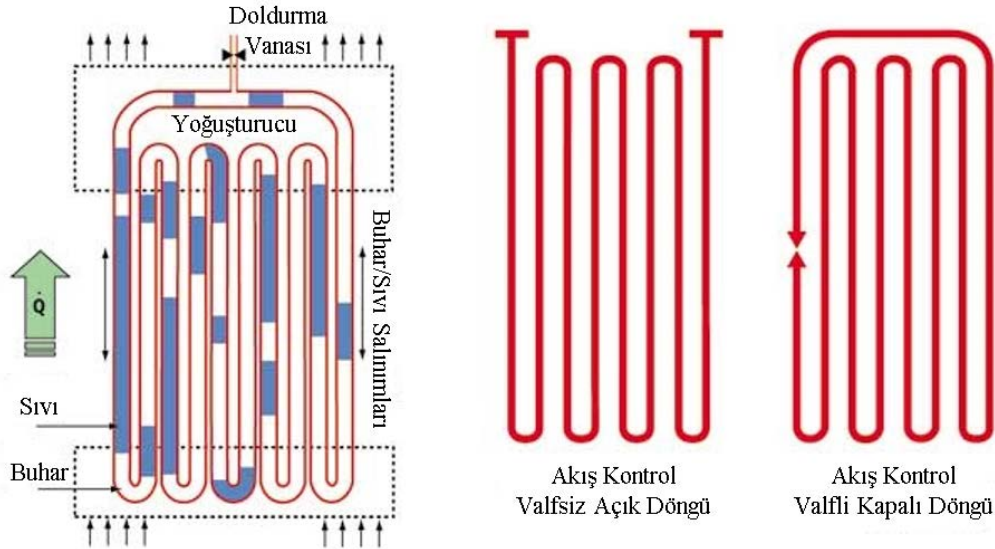
Genel olarak elektronik ekipmanların soğutulmasında kullanılan mikro ısı boruları fikri ilk olarak Cotter [34] tarafından ortaya atılmıştır. Mikro ısı boruları kalınlık olarak mikrometre mertebelerinde, köşeli olarak üretilen ısı borularıdır (Şekil 3.4). İçlerinde fitil yapısı bulundurmamaktadırlar. Çalışma akışkanın ilerlemesi için gerekli olan kılcal kuvvetler ise mikro ısı borularının köşeleri tarafından sağlanmaktadır. Minyatür ısı boruları ise, boyutsal ve çalışma prensipleri açısından mikro ısı borularına benzemektedirler. Ancak minyatür ısı borularında fitil yapısı da bulunmaktadır. Bu iki kavram literatürde sık sık karıştırılmaktadır.



Şekil 3.4. Mikro ısı boruları [35]

3.2.4. Salınlı ısı boruları

Titreşimli ısı boruları olarak da bilinen salınlı ısı boruları, uzun kılcal bir borunun birçok yerinden bükülmesiyle elde edilirler. Salınlı ısı borularının yoğuşturucu ve buharlaştırıcı kısımları bu kıvrımların içerisinde bulunmaktadır (Şekil 3.5). Salınlı ısı boruları, kılcal borunun iki ucunun birbirine bağlanıp bağlanmamasına göre kapalı (looped) ve açık (unlooped) olmak üzere iki farklı türde bulunmaktadır. Belirli bir oranda akışkan ile doldurulan kılcal boru içerisinde sıvı ve buhar bölümleri oluşur. Isı girişi ile artan buhar basıncı çalışma akışkanını hareket ettirir. Böylece soğuk kısımlar ısı kaynağına doğru ilerleyerek ısınır ve buharlaşarak salınımın devam etmesini sağlar. Salınlı ısı boruları genel olarak uzay uygulamalarda ve elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır.

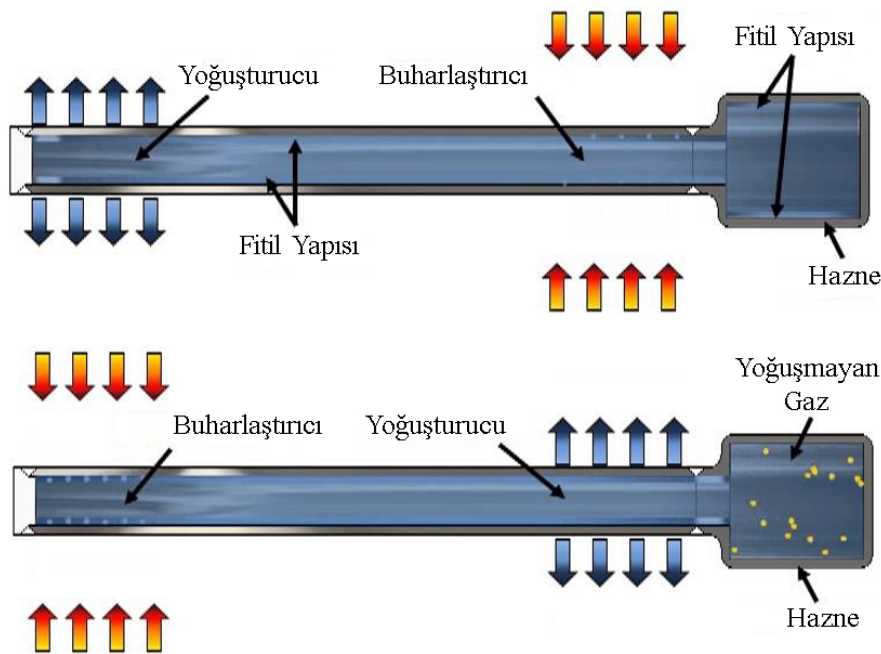


Şekil 3.5. Salınlı ısı boruları [36]

3.2.5. Diyet ısı boruları

Geleneksel ısı boruları, ısıyı sıcak uçtan soğuk uca olmak üzere iki yönde de taşıyabilirler. Bazı ısı boruları ise ısıyı sadece tek yönde taşırlar. Bu tip ısı boruları diyet ısı boruları olarak adlandırılmaktadır. Diyet ısı boruları, değişken iletkenli ısı boruları gibi uçlarına bir hazne eklenerek elde edilir. Yoğuşturucu kısma hazne eklenmesiyle buhar tuzaklı diyet ısı boruları, buharlaştırıcı kısma hazne eklenmesi ile ise sıvı tuzaklı diyet ısı boruları olarak adlandırılırlar (Şekil 3.6). Buhar tuzaklı ısı borularında, buharlaşan çalışma akışkanı yoğuşturucu kısma doğru ilerleyerek, yoğunlaşmayan gazı hazne içerisine sıkıştırır ve ısı borusu normal bir şekilde çalışır. Eğer yoğuşturucu kısmın sıcaklığı buharlaştırıcı kısmın sıcaklığına

geçerse, gazlaşan çalışma akışkanı buharlaştırıcı kısma doğru ilerler ve hazne içerisinde bulunan yoğuşmayan gaz serbest kalarak ısı iletimini engeller. Sıvı tuzaklı ısı borularında ise, buharlaştırıcı kısmın sonuna ısı borusunun fitil yapısı ile ilişkili olmayan fitil yapısına sahip bir hazne yerleştirilir. Haznenin bulunduğu kısım ısıtıldığında buhar yoğuşturucu kısma doğru ilerler ve yoğuşan akışkan fitil yapısı sayesinde tekrar buharlaştırıcıya gelerek ısı borusu normal bir şekilde çalışmaya devam eder. Ancak, yoğuşturucu kısmın sıcaklığı buharlaştırıcı kısmı geçerse, yoğuşan akışkan hazneye doğru ilerler ve buradaki fitil yapısına sahip hazne içinde sıkışır. Böylece ısı borusu çalışmaya devam edemez.



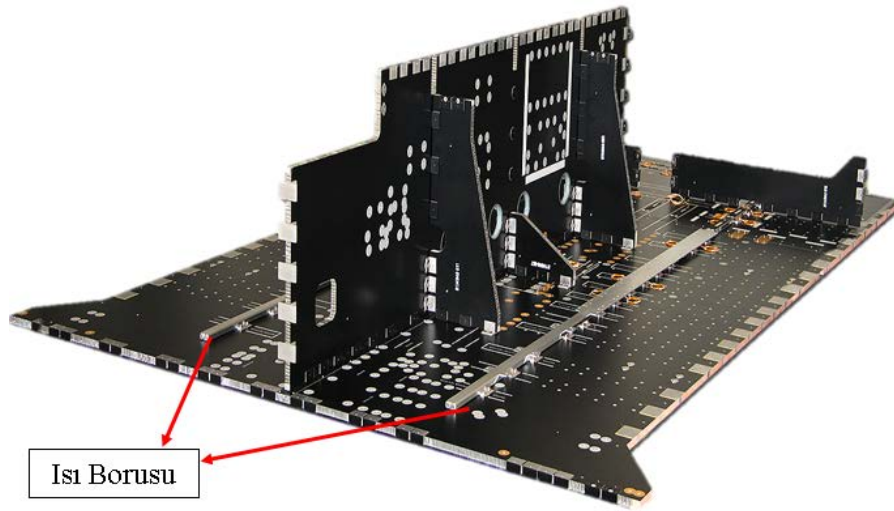
Şekil 3.6. Sıvı tuzaklı diyot ısı boruları (üstte) ve buhar tuzaklı diyot ısı boruları (altta) [37]

3.3. Isı Borusu Uygulama Alanları

Isı boruları birçok farklı alanda, temel olarak üç farklı amaç ile kullanılmaktadırlar. Kullanım amaçlarından ilki bir noktadan başka bir noktaya yüksek miktarda ısı taşıyabilmeleridir. Böylece elektronik ekipmanlarda soğutucu kısımlar için yer ihtiyacını ortadan kaldırarak kompakt tasarım olanakları sağlarlar. İkinci kullanım amaçları ise izotermal bir şekilde ısı dağılımı sağlamaktır. Böylece farklı sıcaklık bölgelerine sahip bir sistemdeki termal gerilmeleri en aza indirebilirler. Bu kullanım şekli uydu panellerinde görülmektedir. Üçüncü kullanım amaçları ise yüksek miktarlardaki ısıyı çok hızlı bir şekilde taşıdıkları için sıcaklık kontrolü uygulamalarıdır. Böylece bir bölgeyi sabit sıcaklıkta tutabilirler [38].

3.3.1. Uzay sistemleri

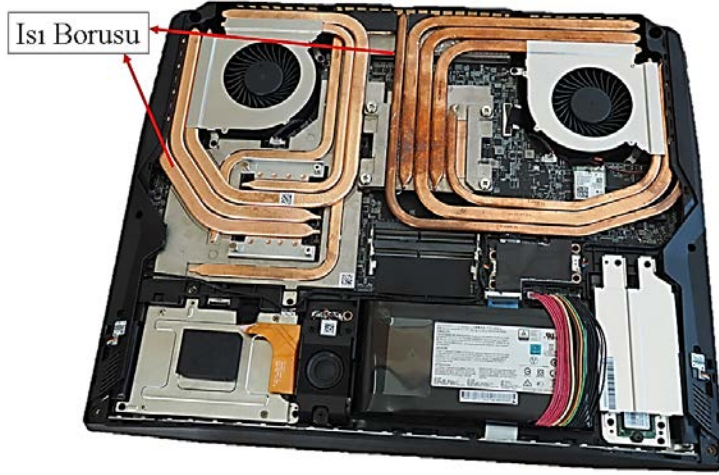
Uzay araçlarında kullanılan birçok ekipman çalışma prensipleri gereği ısı yayarlar. Uzay araçlarının ısı kontrol sistemlerinin amacı ise bu araçların ve bu araçlarda bulunan ekipmanların sıcaklıklarını uygun aralıklarda tutmaktır. Uzay araçlarında yakıt kullanımı ve ağırlık önemli hususlar olduğundan soğutma sistemi olarak güç girişi gerektirmeyen ve ağırlık açısından oldukça avantajlı olan ısı borularının kullanımı yaygındır. Uzay sistemleri uygulamalarında ısı borularının iki farklı kullanım şekli bulunur. Bunlardan ilki ısıyı, yüksek ısı yayılımı yapan ekipmanlardan direk olarak radyatör bölgelerine taşımaktır. İkincisi kullanım şekli ise ekipmanların bulundukları paneller boyunca homojen ısı dağılımı sağlamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda uzay sistemlerinde Al boru ve amonyak çalışma akışkanına sahip oluklu ısı boruları kullanılır (Resim 3.2).



Resim 3.2. Uydu panellerinde kullanılan ısı boruları [39]

3.3.2. Elektronik sistemler

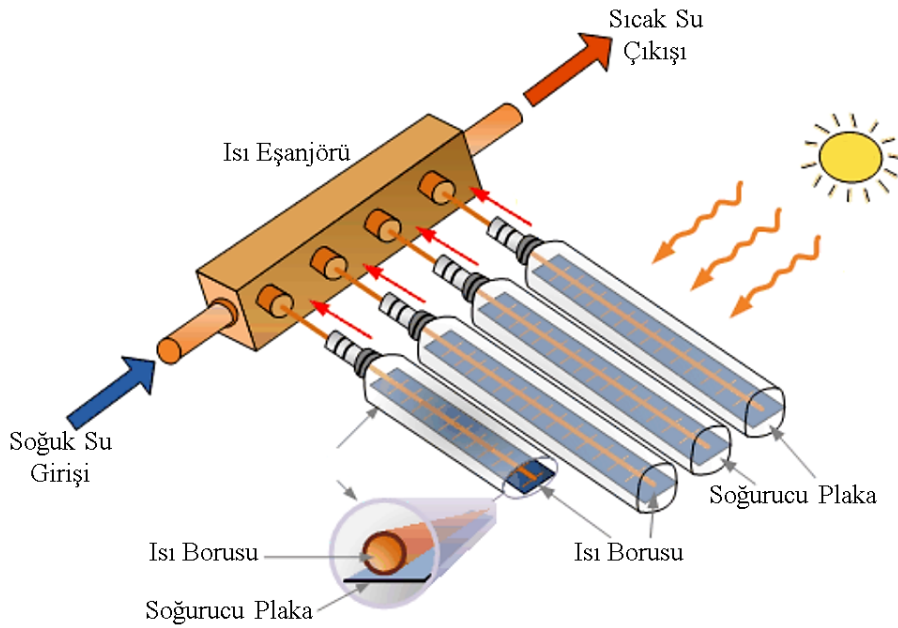
Elektronik cihazlarında en çok karşılaşılan sorun ısınma problemidir. Bununla beraber bu cihazların giderek daha kompakt hale gelmesi ve daha çok işlem güçlerine sahip olmaları ısınma problemlerini daha zorlu hale getirmektedir. Bu nedenle içlerine yerleştirilen soğutma sistemlerinin de daha kompakt ve daha etkili hale gelmeleri gerekmektedir. Küçük hacimlerde olabilmeleri ve sessiz çalışmaları sayesinde ısı boruları elektronik sistemlerde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [40]. Resim 3.3'te bir diz üstü bilgisayarda işlemcinin soğutulması için kullanılan ısı boruları görülmektedir. Elektronik sistemlerde genellikle bakır ısı boruları kullanılmaktadır.



Resim 3.3. Elektronik sistemlerde kullanılan ısı boruları [40]

3.3.3. Solar sistemler

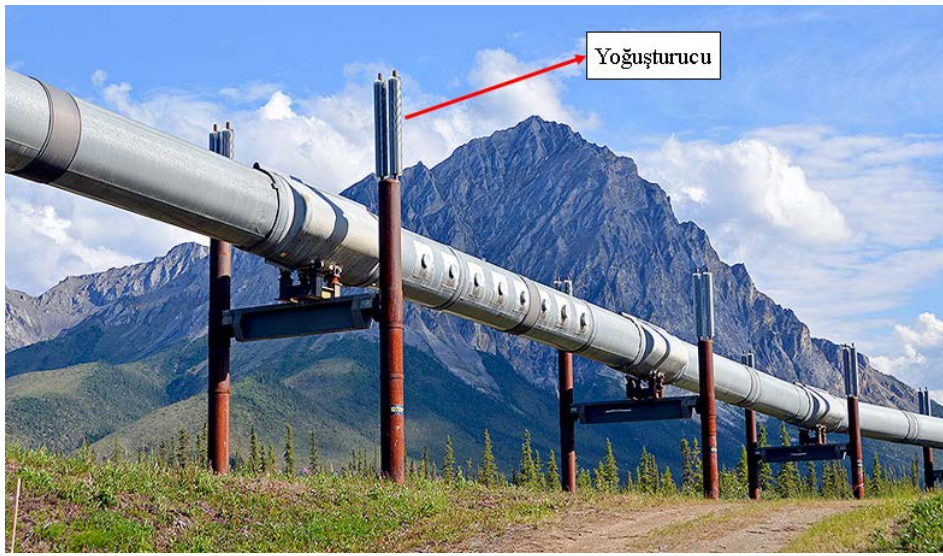
Solar sistem uygulamalarında ısı boruları özellikle tüp tipi güneş enerji kolektörleri ile bir birlikte kullanılmaktadırlar (Şekil 3.7). Bu uygulamalarda ısı borularının buharlaştırıcı kısımları tüp kolektörlerin içlerine yerleştirilir. Kolektörler tarafından toplanan güneş enerjisi ile buharlaşan çalışma akışkanı yoğunlaştırıcı kısma doğru ilerler. Böylece ısı, su veya ortam ısıtması gibi kullanım alanlarına iletilir. Bu uygulamalarda genellikle çalışma akışkanı olarak su kullanan bakır ısı boruları kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Solar sistemlerde kullanılan ısı boruları [41]

3.3.4. Donmuş toprak (Permafrost) uygulamaları

Donmuş toprak üzerine inşa edilen yapılar, her zaman bu yapıdan toprağa ısı geçme tehlikesi ile karşı karşıyadırlar. Toprağa geçen ısı, donmuş tabakanın erimesine sebep olabilir. Eriyen toprak tabakası ise üzerindeki yapının zarar görmesine veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Isı boruları bu noktada devreye girerler. Buharlaştırıcı kısımları toprağa gömülen ısı boruları topraktaki ısıyı çekerek, daha soğuk olan dış ortamdaki yoğuşturucu ile atılmasını sağlar (Resim 3.4).



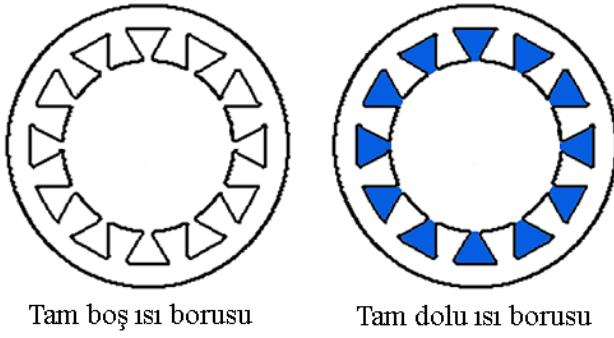
Resim 3.4. Donmuş toprak (permafrost) uygulamalarında ısı borusu kullanımı [42]

4. DOLUM ORANI, EĞİM AÇISI VE OLUK ŞEKLİNİN OLUKLU ISI BORUSU ISIL PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak ısı borularının ısı taşıma performanslarına etki eden dolum oranı, eğim ve oluk şekli parametrelerinin, ısı borularında ifade ettikleri anlamlara değinilmiştir. Ardından, bu parametrelerin ısı borularının performanslarına olan etkilerini belirlenmesi amaçlanan deneysel yaklaşım ve hazırlıklarından bahsedilmektedir. Isı borusunun hazırlanması ve deney düzeneğinin oluşturulması adımları ayrı başlıklar altında detaylandırılmıştır. Son olarak ise deney sonuçlarından elde edilen veriler sonucunda belirlenen performans parametrelerinden bahsedilmektedir.

4.1. Dolum Oranı

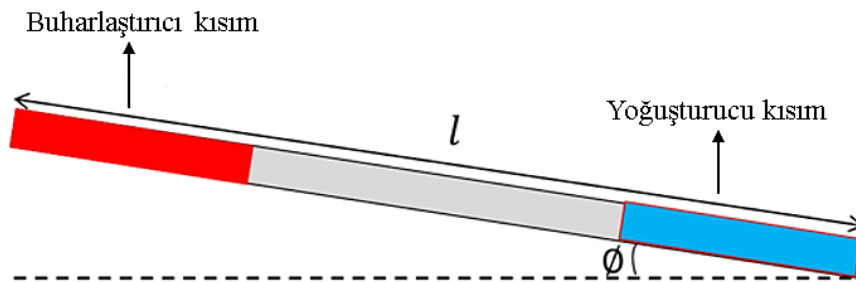
Isı boruları, içlerinde bulunan çalışmama akışkanının sıvı ve buhar olmak üzere çift fazlı dolaşımı ile ısı aktarımı sağlarlar. Çalışma akışkanının buhar fazı ısı borusunun merkezinde hareket ederken sıvı fazı ise fitil yapısında hareket eder. Isı borularında dolum miktarı bu sıvı ve buhar fazlarının toplam kütlelerini ifade eder. Isı borularında dolum miktarı hesaplanırken, fitil yapısının ve buhar kısmının hacimleri ve çalışma akışkanının ısı borusunun çalışma sıcaklığındaki sıvı ve gazların fazlarının öz kütleleri göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma akışkanı olarak kullanılan amonyağın termo-dinamik özellikleri EK-1’de verilmektedir. Isı borularının sıvı dolaşım gerçekleşen fitil yapısının tamamen çalışma akışkanının sıvı hali ile tam dolu olduğu oran %100 dolum oranı olarak isimlendirilmekte (Şekil 4.1) ve bu oran yerçekimsiz ortamda en iyi ısı taşıma performansını vermektedir [43]. Fakat ısı borusunun çalışma sıcaklığı değiştiğinde, çalışma akışkanının öz kütlesi de değişeceğinden dolum oranı da değişim gösterecektir. Bu nedenle, bir çalışma sıcaklığı için yapılan dolum diğer bir çalışma sıcaklığı için en iyi ısı taşıma performansını sergilemeyebilir.



Şekil 4.1. Isı borularının tam boş ve tam dolu halleri

4.2. Eğim

Isı borularında, yoğuşturucu kısımda yoğuşan çalışma akışkanı buharlaştırıcı kısma doğru hareket ederek burada buharlaşır ve tekrar yoğuşturucu kısma gider. Çalışma akışkanının sıvı fazının buharlaştırıcı kısma yaptığı bu hareket, fitil yapısı tarafından meydana getirilen kapiler kuvvetler sayesinde gerçekleşmektedir. Bu kapiler kuvvetlerin yanı sıra, sıvı iletiminin gerçekleştirilmesinde akışkanın yüzey gerilimi ve yerçekimi etkisi tarafından oluşturulan kuvvetlerde bulunmaktadır. Çalışma akışkanının yüzey gerilimi, fitil yapısı tarafından oluşturulan kapiler kuvvetlere aksi yönde etki etmektedir. Yerçekimi kuvveti ise ısı borusunun eğimine göre ısı taşıma performansına olumlu ya da olumsuz bir şekilde etki edebilmektedir. Çalışma akışkanının yoğuşturucu kısımdan buharlaştırıcı kısma olan hareketinin sağlanabilmesi için kapiler kuvvetler, kendisine aksi yönde etki eden bu kuvvetlerden büyük olmalıdır. Isı borularında buharlaştırıcı kısmın, yoğuşturucu kısma göre daha yüksekte olduğu durumlarda (Şekil 4.2) yerçekimi kuvveti kapiler kuvvetlere aksi yönde hareket etmektedir. Eğim testleri ise bu durumun ısı borusu ısı taşıma performansına olan etkilerini gözlemlemek için gerçekleştirilmektedir. Bu testlerde ısı boruların eğimleri, buharlaştırıcı kısmın yoğuşturucu kısma göre olan yüksekliğini ifade etmektedir.

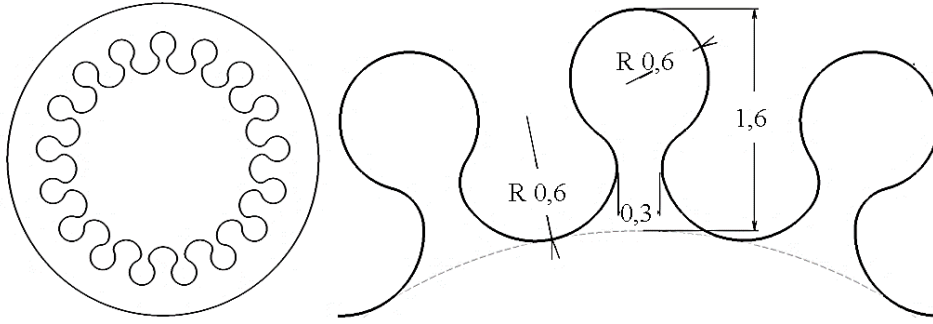


Şekil 4.2. Isı borusunda buharlaştırıcı kısmın yoğuşturucu kısımdan daha yüksekte olduğu negatif eğim durumu

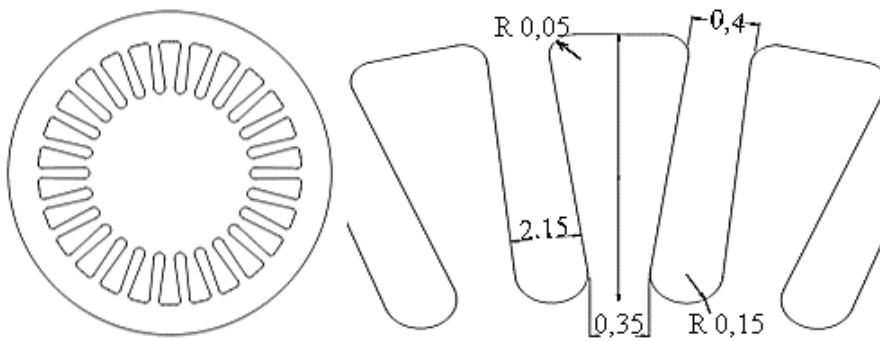
4.3. Oluk Şekli

Oluklar, ısı borularında çalışma akışkanının sıvı fazının hareketini sağlayan fitil yapısı türlerinden bir tanesidir. Diğer fitil yapılarına göre üretim kolaylığı sağlaması ve kolayca bükülebilmeleri [44], oluklu ısı borularının tercih sebepleridir. Oluklu fitil yapılarında, olukların kesit alanlarının diğer fitil yapılarına göre fazla olması, ısı borularının ısı taşıma kapasitelerini olumlu yönde etkilerken, bu fitil yapılarında meydana gelen kapiler kuvvetler diğer fitil yapılarına göre görece daha az olmaktadır. Oluklar, ikizkenar yamuk ve girintili gibi farklı şekillerde elde edilebilmekteledir. Bu farklı oluk tiplerinde ısı taşıma kapasiteleri ve meydana getirilen kapiler kuvvetlerde farklılık göstermektedir. Bu oluk tipleri arasındaki farklılıklar, bu oluk tiplerine sahip ısı boruları performans testlerine sayesinde tahmin edilebilmektedir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, bu çalışmada kullanılan girintili ve ikizkenar yamuk oluk yapılarını bu yapılara ait oluk detaylarını göstermekte şekil üzerinde verilen ölçüler milimetre (mm) cinsindendir. Bu oluk yapılarına ait teknik resimler, girintili oluk yapısı için EK-2’de, ikizkenar yamuk oluk yapısı için ise EK-3’de verilmektedir.



Şekil 4.3. Girintili oluk yapısı ve oluk detayları



Şekil 4.4. İkizkenar yamuk oluk yapısı ve oluk detayları

4.4. Deneysel Yaklaşım ve Hazırlıkları

Bu bölümde, ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş ısı borularının test faaliyetleri için hazır hale getirilmelerinden ve performans testlerini gerçekleştirebilmek için tasarlanan test düzeneğinin kurulumundan bahsedilecektir. Ardından, testlerin gerçekleştirilme adımlarından ve ısı borularının performanslarını etkileyen parametrelerin, bu testlerden elde edilen veriler ile (Q_{max} , k_{eff} vb.) nasıl elde edildiklerinden bahsedilmektedir.

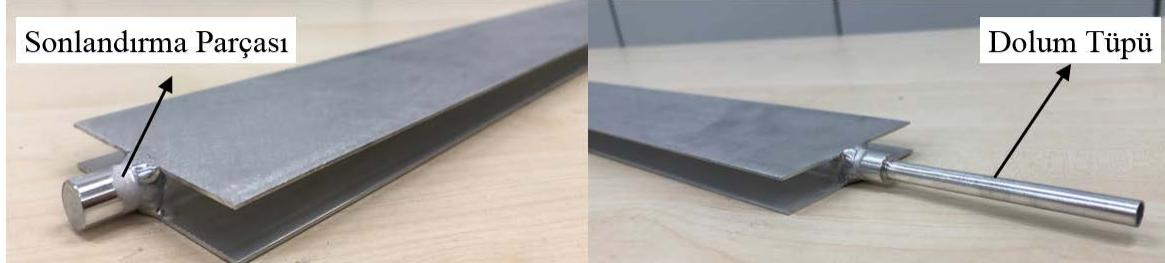
4.4.1. Isı borusun hazırlanması

Isı borularına akışkan dolumu yapılmadan önce ısı boruları, dolum tüpleri ve sonlandırma parçaları çok detaylı bir şekilde temizlenmiştir. Bu temizlik, üretim sonrası ısı borusunun oluklarının tıkanmalarına neden olacak parçacıkların uzaklaştırılması, çalışma akışkanının saflığını bozmaması için ısı borusu içerisinde kalan suyun uzaklaştırılması ve ısı borusu oluklarının ve çalışma akışkanının yapısını bozabilecek diğer etmenlerin uzaklaştırılması için yapılmaktadır [45]. Öncelikle ısı borusun kesildiği yüzeylerde ve oluklarında gözle görülür çapaklar bir fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra, Type-HP (degreaser) temizleyici ısı borusunun içerisine dökülüp 3 dakika boyunca çalkalanmıştır. Type-HP temizleyicisi silikon ve yağ gibi atıkları temizlemekte kullanılan korozyon engelleyici bir temizlik malzemesidir. Isı borusu Type-HP ile çalkalandıktan sonra basınçlı hava tabancası ile ısı borusu içinden boşaltılmıştır. Daha ısı borusunun içerisine saf izo-propil alkol dökülerek çalkalanmış ve kuru hava ile tekrar kurutularak dolum tüpü ve sonlandırma parçaları ile uçları kapatılmıştır.

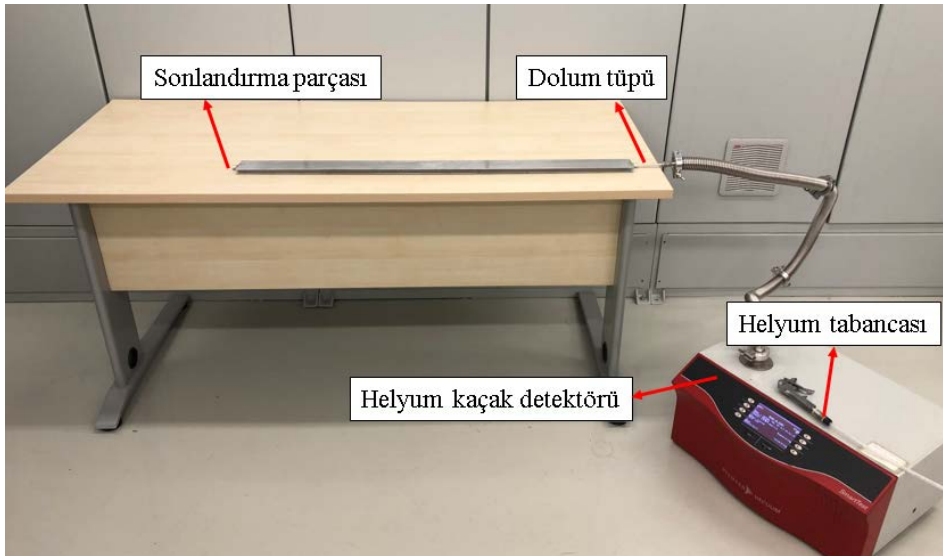
Dolum tüpü ve sonlandırma parçasının ısı borusuna eklenmesi

Çalışma akışkanının ısı borusuna doldurulabilmesi için ısı borusunun uçlarına dolum tüpü ve sonlandırma parçasının entegre edilmesi gerekmektedir (Resim 4.1). Bu parçalar, ısı borusuna sıkı geçecek şekilde imal edilmiş olup ısı borusuna eklendikten sonra argon kaynağı ile ısı borusuna kaynatılmaktadırlar. Çalışma akışkanı ısı borusu içerisinde gaz fazında da dolaşım yapmasından dolayı, bu parçalara yapılan kaynağın, parça bütünlüğü ile birlikte sızdırmazlığı da sağlaması gerekmektedir. Bu doğrultuda, kaynak işlemi sonrası ısı borusu ilk olarak su havuzuna daldırılarak baloncuk sızdırmazlık testine tabii tutulmuştur. Herhangi bir kaçak durumu gözlemlenmeyen baloncuk testinden sonra ısı borularına helyum

kaçak testi uygulanmıştır (Resim 4.2). Bu konudaki literatür incelendiğinde helyum kaçak testi 10^{-6} mbar.l/s değerinde sızdırmazlıklar seviyelerini ifade etmektedir. Bu testin sonucunda da ısı borularında kaçak gözlemlenmemiştir.



Resim 4.1. Isı borusu sonlandırma parçası ve dolum tüpü entegrasyonu



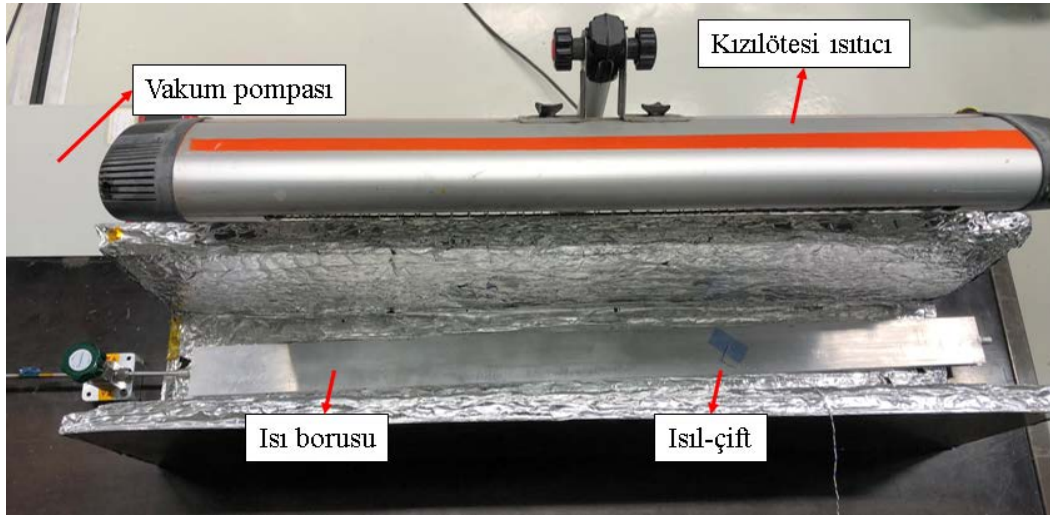
Resim 4.2. Kaynak işlemleri sonrasında ısı borusuna helyum kaçak testi uygulaması

Isı borusuna dolum tüpü ve sonlandırma parçasının eklenmesinin ardından çalışma akışkanı doldurulması işlemlerine geçilmiştir.

Çalışma akışkanı dolum faaliyetleri

Isı borularına çalışma akışkanı doldurulmadan önce, ısı borusu içerisinde ve ısı borusu malzemelerinde hapsolan gazlardan kurtulmak gerekmektedir. Bu doğrultuda ısı borularına, çalışma akışkanı ile doldurulmalarından önce gaz salınımı (outgassing) yaptırılmalıdır. Bu işlemin yaptırılmadığı durumlarda, ısı borusu içerisinde hapsolan gazlar zamanla açığa çıkabilmekte ve ısı borularının performanslarını olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Gaz salınımı işlemine geçmeden önce ısı borusunun ve çalışma akışkanının doldurulmasında kullanılacak hatlarından sızdırmazlıkların emin olunması gerekmektedir. Gaz salınımı

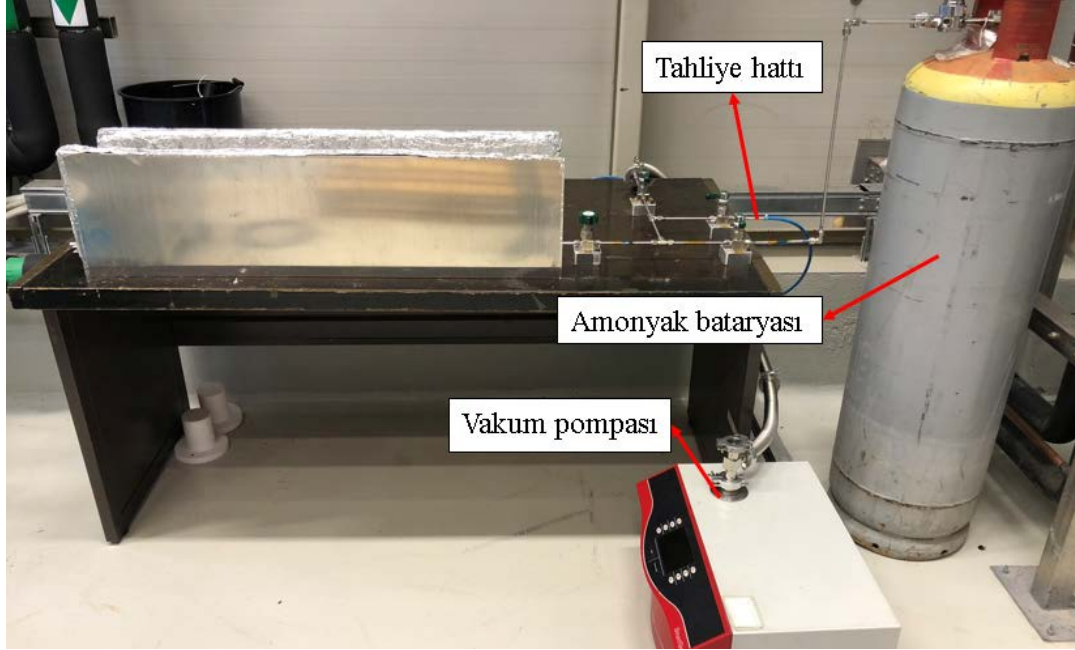
işlemi sırasında ısı borusu, gaz salınımı işleminin etkinliğinin artırılması ve salınan gazlarının ısı borusu içerisinden uzaklaştırılması amacıyla, bir vakum pompası kullanılarak 5×10^{-4} mbar değerinin altında seviyelere kadar vakumlanmıştır. Vakumlama işleminin tamamlanmasının ardından ısı borusu, bir kızılötesi ısıtıcı yardımıyla 80 ± 5 °C'ye ısıtılmıştır. Böylece, bu şartlarda 10 saat boyunca bekletilen ısı borusunun gaz salınımı gerçekleştirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3. Isı borusuna gaz salınımı yaptırılması

Gaz salınım işlemleri tamamlandıktan sonra çalışma akışkanının ısı borusuna doldurulması işlemlerine geçilmiştir. Çalışma akışkanı olarak seçilen amonyak, normal koşullarda gaz halde bulunması ve insan sağlığı açısından oldukça tehlikeli olması nedeniyle dolum işlemleri için özel olarak tasarlanmış bir düzene kullanılmıştır (Resim 4.4) [46]. Bu düzene, oda koşullarında sıvı-buhar doymuş karışım halinde ve 7 barlık basınçta bulunan amonyağın ısı borusuna doldurulması için tasarlanmıştır. İlk olarak, dolum düzeneğinde bulunan helyum kaçak detektörü sayesinde bütün amonyak dolum hattı ve ısı borusu vakumlanarak bütün hatta helyum kaçak testi uygulanmıştır. Bu test sonucunda helyum kaçak detektöründen $5,4 \times 10^{-8}$ mbar.l/s kaçak değeri elde edilmiştir. Literatür incelendiğinde uzay sistemleri uygulamalarında kullanılacak bu tip sistemler için helyum kaçak testi başarı ölçütünün 1×10^{-7} mbar.l/s değeri olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, ısı borusunun ve amonyak dolum düzeneğinin sızdırmaz olduğu sonucuna varılmaktadır. Kullanılan bu düzene sayesinde, normal koşullarda gaz halinde bulunun amonyak kuru buz yardımı ile ilave bir hazneye gerek duyulmadan direk olarak ısı borusunun içerisinde sıvılaştırılmaktadır (Resim 4.5). Isı borusu üzerine yerleştirilen ısı-çiftler sayesinde ısı borusunun sıcaklığı ölçülmüştür. Isı borusu sıcaklıkları 5 ± 1 °C'ye ulaştığında amonyak bataryasının vanaları

açılarak dolum işlemine başlanmıştır. Yeterli miktarda amonyak dolumu gerçekleştirildikten sonra ısı borusunun kütlesi hassas tartı ile ölçülmüştür. Bu sayede, boş ağırlığı bilinen ısı borusuna doldurulan amonyak miktarı elde edilmiştir. Son olarak, dolum hatlarında bulunan amonyak, tahliye vanası ve tahliye hortumu yardımıyla güvenli bir şekilde dışarı atılmıştır.



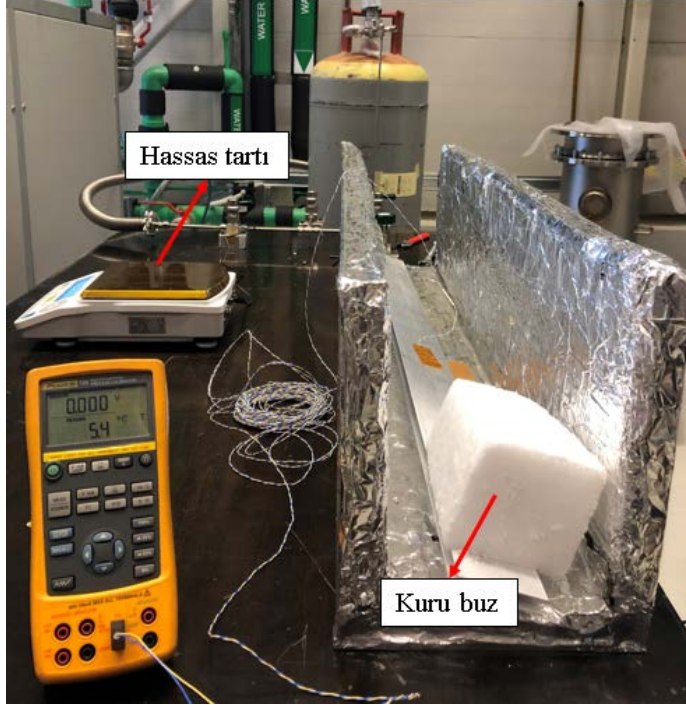
Resim 4.4. Çalışma akışkanının doldurulması için kullanılan düzenek

Isı borularına doldurulacak amonyak miktarı, bütün olukların tamamen sıvı amonyak ile dolacağı ve gaz hareketinin gerçekleştiği ortadaki boşluğun ise tamamen gaz amonyak ile dolacağı şeklinde varsayılarak belirlenmelidir [1]. Bu doğrultuda, test faaliyetlerinde kullanılan ısı borularına doldurulan amonyak miktarları aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenmiştir.

$$m_{\text{amonyak}} = A_g l_1 \rho_b + A_o N l_1 \rho_s \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte, m_{amonyak} bir ısı borusuna doldurulacak toplam amonyak kütlesini, A_g gaz dolaşımının gerçekleştiği buhar kısmının alanını, A_o sıvı dolaşımının gerçekleştiği tek bir oluk alanını, N toplam oluk sayısını, l_1 toplam ısı borusu uzunluğunu, ρ_g ve ρ_s ise, sırasıyla, amonyağın gaz ve sıvı fazlardaki öz kütle değerlerini ifade etmektedir. Burada öz kütle değerleri seçilirken, çalışma akışkanının ısı borusunun çalışma sıcaklığındaki termodinamik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Böylece, test faaliyetlerinde kullanılan ısı borularından girintili oluklara sahip olan ısı borusuna 11,7 gram, ikizkenar yamuk şeklindeki

oluklara sahip olan ısı borusuna ise 19,2 gram amonyak doldurulmuş olup bu miktarlar ısı borularının %100 dolu olduğu dolum oranlarıdır.



Resim 4.5. Isı borusunun kuru buz ile soğutulması

4.4.2. Test düzeneğinin oluşturulması

Isıtıcı hazırlanması ve yerleştirilmesi

Isı borularının buharlaştırıcı kısımlarına ısı girişi CLAYBORN marka şerit tipi ısıtıcılarla sağlanmıştır (Resim 4.6). Testler sırasında gerekli olacak ısı akışını elde edebilmek amacıyla şerit ısıtıcılar, yarım inç genişliğinde, dört telli B16-28 tip olarak seçilmiştir. Bu ısıtıcılar, ısı borularının buharlaştırıcı kısımlarında bulunan flanşların alt ve üst yüzeylerine yerleştirilmişlerdir. Uzunluğu 20 cm olarak tayin edilen buharlaştırıcı kısma, her bir flanş yüzeyine 80 cm olmak üzere toplamda 160 cm şerit ısıtıcı kullanılmıştır (Resim 4.7). Dört adet tele sahip olan şerit ısıtıcılar, EK-4’de bulunan CLAYBORN kataloğunda [47], (1) numaralı bağlantı tipi olarak bulunan paralel şekilde bağlanmışlardır. Bu bağlantı tipi ile birlikte, şerit tipi ısıtıcılar, her bir cm için maksimum 2,3 W güç verme kapasitesine sahip olarak toplamda yaklaşık 370 W güç verilebilecek şekilde kullanılmışlardır. Bağlantıları gerçekleştirilen şerit ısıtıcılara bu üç değerlerini sağlamak için ise 0 – 10 A ve 0 – 40 V değerleri arasında çalışılabilen bir güç kaynağı kullanılmıştır.



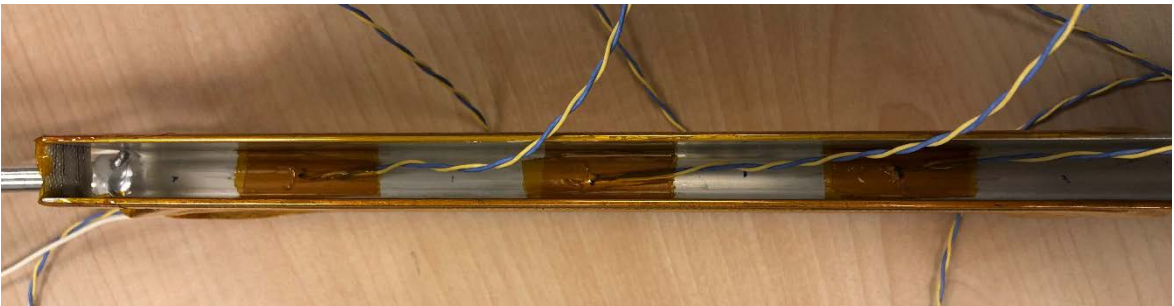
Resim 4.6. Şerit tipi ısıtıcılar



Resim 4.7. Buharlaştırıcı kısma yerleştirilen ısıtıcılar

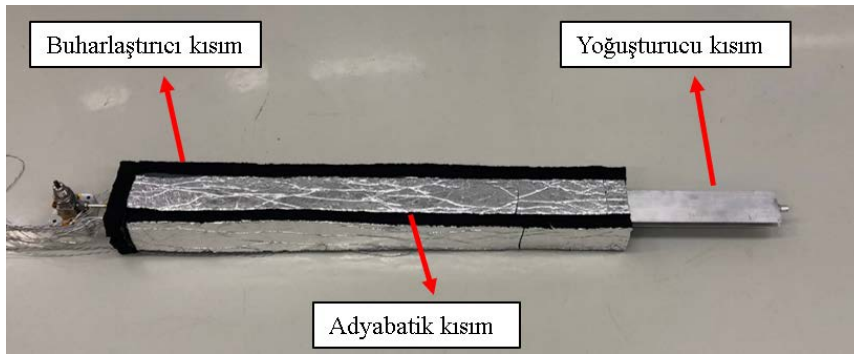
Isıl-çift yerleştirilmesi

Testler sırasında ısı borusu üzerinden sıcaklık verilerinin elde edilebilmesi amacıyla ısıl-çiftler kullanılmıştır. Bu ısıl-çiftler T-tipi ısıl-çiftler olup ısı borusunun flanşlarının aralarında bulunan yanal duvarlara yapıştırılmışlardır (Resim 4.8).



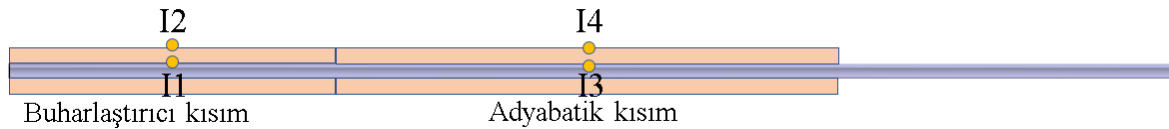
Resim 4.8. Isı borusunun yanal duvarlara yapıştırılan ısıl-çiftler

Isı borusu üzerinden meydana gelecek ısı kaçaklarını en aza indirmek amacıyla, buharlaştırıcı ve adyabatik kısımları izolasyon ile kaplanmıştır (Resim 4.9). Kullanılan izolasyon, İzocamflex marka 25 mm kalınlığında elastomerik kauçuk köpük levha olup teknik bilgileri EK-5’te verilmektedir. Bu bölgelere uygulanan izolasyon malzemesinin de hem iç hem de dış kısımlara bu bölgelerin orta noktalarına denk gelecek şekilde ısııl-çiftler yapıştırılmıştır (Şekil 4.5). Böylece, bu bölgelerden oluşan ısı kaçakları hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen testlerde adyabatik kısım flanşlarının kestirip izolasyon uygulamasının yapılmasının kaçak ısı hesabında farklılık oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

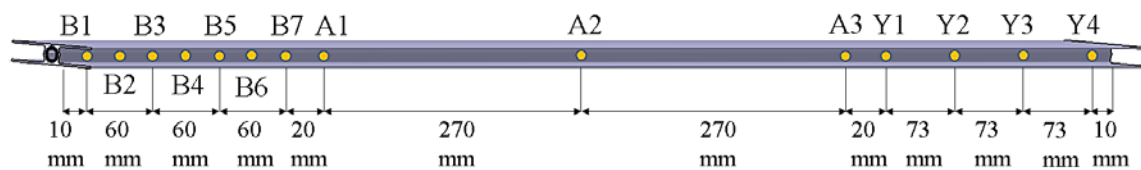


Resim 4.9. Buharlaştırıcı ve adyabatik kısımlara uygulanan izolasyon

Isıl-çiftlerin yoğun olarak yapıştırıldıkları buharlaştırıcı kısımda, bazı ısııl-çiftler ısı borusunun karşı duvarına yapıştırılarak karmaşıklık azaltılmıştır. Isı boruları ve izolasyon üzerine yapıştırılan ısııl-çiftler ve isimlendirmeleri Şekil 4.5’te ve Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Buharlaştırıcı kısımda bulunan ısııl-çiftler BX, adyabatik kısımda olan ısııl-çiftler AX, yoğuşturucu kısımda olan ısııl-çiftler YX ve izolasyon üzerinde bulunan ısııl-çiftler IX olarak adlandırılmıştır. Buharlaştırıcı kısımda bulunan E2, E4 ve E6 numaralı ısııl-çiftler ısı borusunun karşı duvarına, E1, E3, E5 ve E7 numaralı ısııl-çiftlerin orta noktalarına gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir.



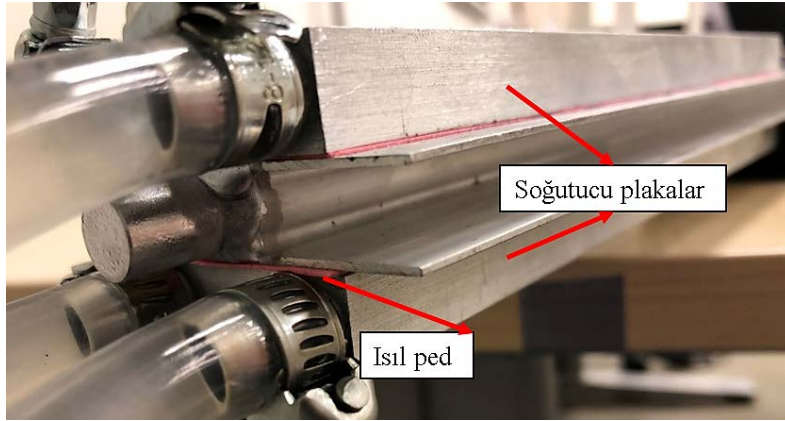
Şekil 4.5. İzolasyon üzerine yerleştirilen ısııl-çiftler ve isimlendirmeleri



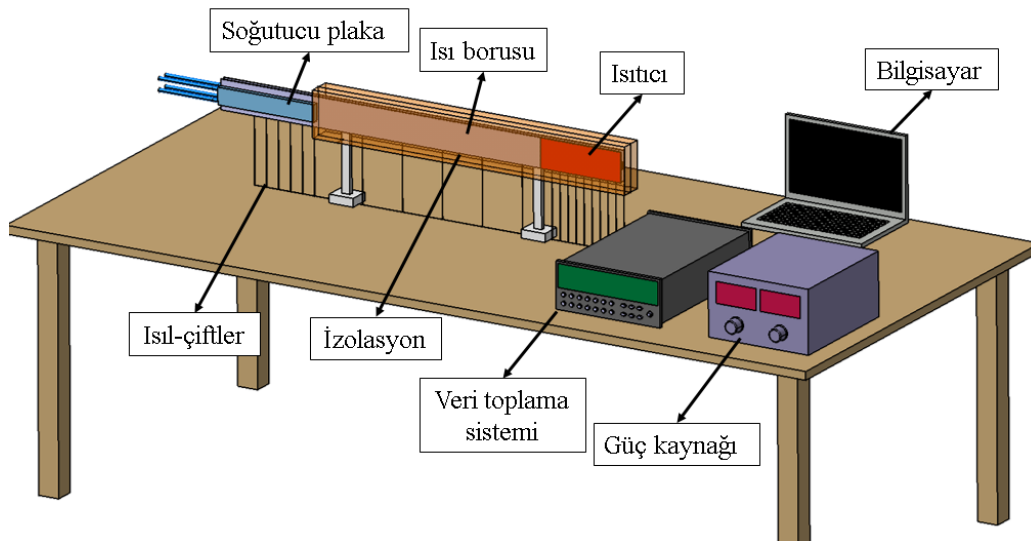
Şekil 4.6. Isı borusu üzerine yapıştırılan ısııl-çiftler ve isimlendirmeleri

Isıl-çiftler sayesinde elde edilen sıcaklık verileri gözlemlenebilmesi ve kaydedilebilmesi için AGILENT markasının 34972A model veri toplama sistemi kullanılmıştır. Maksimum 60 kanaldan veri toplanmasına olanak sağlayan veri toplama sistemi, farklı ısıl-çift tiplerinden farklı sıcaklık birimlerinde veri toplanmasına ve anlık olarak okunmasına olanak sağlamaktadır.

Testler esnasında, buharlaştırıcı kısımdan verilen ısıyı ısı borusundan uzaklaştırmak için yoğunlaştırıcı kısımda bulunan flanşların iki yüzüne de su ile soğutma sağlayan soğutucu plakalar yerleştirilmiştir. Bu plakaların, ısı borusu flanşları ile olan temas yüzeylerini arttırmak için ise ısıl pedler (thermal pad) kullanılmıştır (Resim 4.10). Test düzeneğinin şematik gösterimi ise Şekil 4.7’de verilmektedir.



Resim 4.10. Isıyı uzaklaştırmak için kullanılan soğutucu plakalar ve ısıl pedler



Şekil 4.7. Test düzeneği

4.5. Test Faaliyetleri

Test düzeneğinin kurulum aşamalarının tamamlanmasının ardından test faaliyetlerine geçilmiştir. Test faaliyetleri aşağıda maddeler halinde verilen adımların sıra ile gerçekleştirilmesiyle yürütülmüştür.

- Isı borusunun eğiminin ayarlanması. Eğimin ayarlanması ve gözlemlenmesi amacıyla Mitutoyo marka eğim ölçer kullanılmıştır (Resim 4.11).
- Veri toplama sistemi aktifleştirilmesi. Bu adımın ardından bir süre beklenilerek ısı borusu üzerine yerleştirilen bütün ısı-çiftlerden mantıklı veriler alındığına emin olunmuştur.
- Buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcılara kademeli olarak güç verilmesi. Isıtıcılara verilen güç değerleri, ısı borusunun kuruması beklenen tahmini değerlere göre ilk aşamalarda 20W'lık artışlarla daha sonra 10W'lık artışlarla ve ısı borusunun kuruması beklenen değerlere yaklaşıldığında ise 5W'lık artışlarla kademeli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kademeli güç artışının sebebi, ısı borularında kurumanın gerçekleştiği ısı yükü değerini hassas bir şekilde belirleyebilmektir.
- Her bir güç artırımının ardından, ısı borusu üzerinde bulunan ısı-çiftlerden elde edilen bütün sıcaklık verilerinin kararlı duruma gelmelerinin beklenmesi. Bu çalışmada kararlı durum kriteri $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ dk.}$ olarak belirlenmiştir.
- Kuruma gerçekleşene kadar güç artırımına devam edilmesi. Isı borusunda kuruma, buharlaştırıcı kısmın uç tarafında bulunan ısı-çiftler sıcaklıkları ile (Bkz. Şekil 4.6) adyabatik kısımda bulunan ısı-çift sıcaklıkları aralarındaki farklarda ani artışların gözlemlenmesi ile belirlenmektedir. Bu durum, ısı borusuna verilen ısı için gereken akışın, ısı borusunun pompalama kapasitesinden fazla olduğunu ifade etmektedir [48].
- Kurumanın gerçekleştiği güç değerinden kaçak ısı miktarları çıkartıldıktan sonra ısı borusunun testin gerçekleştirildiği eğimdeki ısı taşıma kapasitesi belirlenir.
- Kurumanın gerçekleşmesinin ardından ısıtıcılara güç verilmesi ve veri toplama sonlandırılır. Test düzeneğinin bir sonra ki teste hazır hale gelebilmesi için soğuması beklenir.



Resim 4.11. Eğim ölçer ile ısı borusu eğiminin ölçülmesi

4.6. Isı Borusu Performans Parametreleri ve Hesaplamaları

Bu bölümde ısı borularının performanslarını etkileyen parametrelerden ve bu parametrelerin, gerçekleştirilen performans testlerinden elde edilen veriler ile hesaplanmalarından bahsedilmektedir.

4.6.1. Isı borusu sıcaklıkları

Isı borularının buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları (T_b , T_a , T_y), o bölgelerdeki ısı-çift sıcaklıklarının ortalamaları alınarak hesaplanır. Ancak, yoğuşturucu kısımda sıvı sıkışması (slug) ve buharlaştırıcı kısımda kuruma (dry-out) durumları oluşmuş ise, ortalama alınırken bu bölgelerde bulunan ısı-çift sıcaklıklarının hesaplama katılmamaları gerekmektedir. Isı borularının operasyon sıcaklığı (T_{op}) ise adyabatik kısımda bulunan ısı-çiftlerin ortalamaları alınarak elde edilir [48]. Bu doğrultuda, ısı borusu sıcaklıklarını hesaplamak için kullanılan eşitlikler aşağıdakiler gibidir.

$$\overline{T_b} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \quad (4.2)$$

$$\overline{T_a} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (4.3)$$

$$\overline{T_y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde n, ısı borusunun buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu kısımlarındaki, sıvı sıkışması ve kuruma oluşan bölgelerdeki ısı-çiftler hariç, ısı-çift sayılarını ifade etmektedir.

4.6.2. Efektif ısı borusu uzunluğu

Buharlaştırıcı kısmın başlangıcında çalışma akışkanının buhar ve sıvı fazlarındaki hızları sıfırdır. Buharlaşmanın etkisi ile bu noktadan adyabatik bölüme kadar doğrusal olarak maksimum hızlarına ulaşırlar. Adyabatik bölümde ise hızları sabit kalır. Buharlaştırıcı bölümün tersine, yoğuşturucu kısımda buhar ve sıvı fazlarının hızları yoğuşmanın etkisiyle yoğuşturucu bölümün sonuna kadar doğrusal olarak sıfırlanır. Bu doğrultuda ısı borusunun efektif uzunluğu buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımlarının uzunluklarının yarısı ile adyabatik kısmın uzunluğunun tamamı toplanarak elde edilebilir [49]. Ancak, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımlarda kuruma veya sıvı sıkışması olduğunda, efektif ısı borusu uzunluğu, bu bölgelerin uzunlukları buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısım uzunluklarından çıkartılarak hesaplanmalıdır [50]. Bu doğrultuda efektif ısı borusu uzunluğunu (l_{eff}) hesaplamak için aşağıda verilen eşitlik kullanılabilir.

$$l_{eff} = \frac{(l_b - l_{dryout}) + (l_y - l_{slug})}{2} + l_a \quad (4.5)$$

Burada, l_b , l_a ve l_y sırasıyla buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu kısımlarının uzunluklarını, l_{dryout} buharlaştırıcı kısımda kuruyan bölgenin uzunluğunu, l_{slug} ise yoğuşturucu kısımda sıvı sıkışması meydana gelen bölgenin uzunluğunu ifade etmektedir.

4.6.3. Isı taşıma kapasitesi

Isı taşıma kapasitesi, bir ısı borusunun çalışma şartlarında kurumadan önce taşıyabildiği maksimum ısı yüküdür. Isı taşıma kapasitesi, ısı borusunun buharlaştırıcı kısmında bulunan şerit tipi ısıtıcıların dirençleri ve bu ısıtıcılara güç vermek için kullanılan güç kaynağı üzerinden elde edilen akım değeri kullanılarak elde edilmektedir. Isı borularına olan ısı girişini sağlamak için kullanılan 4 telli şerit tipi ısıtıcılar paralel şekilde bağlanılarak kullanılmıştır. Clayborn marka bu ısıtıcıların özellikleri [47] incelendiğinde, oda sıcaklığında santimetre başına 2,3 W güç elde edilebileceği görülmektedir. Ancak, sıcaklık değeri 260°C'ye ulaştığında, sıcaklık arttıkça tel direnci de artacağından, bu değer lineer olarak 0 W değerine düştüğü belirtilmektedir. Bu doğrultuda her bir ısı borusu için ısı taşıma kapasitesi (Q_{max}) aşağıda belirtilen eşitlik ile direnç değerinin sıcaklık ile olan değişimi de hesaba katılarak hesaplanmalıdır.

$$Q_{max} = I^2 \times R_{ref} \times [1 + \alpha (T - T_{ref})] \quad (4.6)$$

Burada, I güç kaynağı üzerinden okunan akım değerini, R_{ref} şerit tipi ısıtıcının oda sıcaklığındaki direnç değerini, α ısıtıcıda bulunan telin malzemesinin sıcaklık dayanımı katsayısını, T_{ref} ise oda sıcaklığını ifade etmektedir.

Testler sırasında ısı borularının buharlaştırıcı ve adyabatik kısımları meydana gelecek ısı kayıplarını en aza indirebilmek amacıyla izolasyon ile kaplanmıştır. İzolasyon boyunca oluşan kaçak (Q_{loss}), maksimum ısı taşımanın gerçekleştiği durumlarda izolasyon üzerine yerleştirilen ısıl-çiftlerden (Bkz. Şekil 4.5) elde edilen veriler ile Fourier yasasından faydalanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{loss} = k_i \left[\frac{A_B}{\delta} (T_{I2} - T_{I1}) + \frac{A_A}{\delta} (T_{I4} - T_{I3}) \right] \quad (4.7)$$

Burada k_i izolasyon malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısını, A kaçak miktarı belirlenecek bölgenin alanını, T_h kaçak hesaplanacak olan ısı borusu bölgesinin sıcaklığını, T_i ise izolasyon sıcaklığını ifade etmektedir. Bu sıcaklık değerleri, izolasyon üzerine koyulan (I1, I2, I3 ve I4) ısıl-çiftlerden elde edilmektedir.

Isı kaçaklarının hesaplanmasının ardından taşınan net ısı miktarı (Q_{net}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır ve ısıl performans hesaplamalarında bu değer dikkate alınmıştır.

$$Q_{net} = Q_{max} - Q_{loss} \quad (4.8)$$

4.6.4. Efektif ısıl iletkenlik

Isı transferi sistemlerinin matematiksel modellerini doğrulamak için gereken en önemli parametrelerden bir tanesi de efektif ısıl iletkenliktir [51]. Efektif ısıl iletkenlik değerinin doğru bir şekilde belirlenmemesi bu sistemlerin ısıtma ve soğutma bileşenlerinin olmaları gerektiği gibi tasarlanamamalarına yol açabilmektedir. Isı borularının efektif ısıl iletkenlik katsayıları (k_{eff}), Fourier yasasından faydalanılarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$k_{eff} = \frac{4 \times Q_{max} \times l_{eff}}{D_o^2 \times \pi \times \Delta T} \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte D_o ısı borusunun dış çapını ifade etmektedir.

4.6.5. Kapiler basınç

Isı borularının performanslarını belirleyen en önemli parametrelerden bir tanesi de buhar ve sıvı fazlar arasında meydana gelen kapiler basınç farkıdır. Kapiler basıncın yetersiz kaldığı durumlarda akışkan buharlaştırıcı kısma ilerleyemeyecek ve böylece ısı borusunda kuruma meydana gelecektir. Kapiler basıncı etkileyen en önemli faktör ise fitil yapısının fiziksel özellikleridir [44]. Bir ısı borusunun kapiler basıncı (ΔP_{cap}) aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [52].

$$\Delta P_{cap} = \frac{2\sigma}{r_{eff}} \quad (4.10)$$

Burada σ çalışma akışkanının yüzey gerilimi katsayısını, r_{eff} ise efektif kapiler yarıçapı (efektif pompalama yarıçapı olarak da anılmakta) ifade etmektedir. Farklı oluk tipleri için efektif kapiler yarıçap değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı oluk tipleri için efektif kapiler yarıçap kabulleri [53]

Fitil yapısı	Efektif Kapiler Yarıçap (r_{eff})
Dairesel Oluk	$r_{eff} = r$
Dikdörtgen Oluk	$r_{eff} = w$
Üçgen Oluk	$r_{eff} = w / \cos \beta$
Tel Ağı	$r_{eff} = (s_w + d_w)/2 = 1/2N$
Sinterlenmiş Toz	$r_{eff} = 0,41r_s$

Çizelge 4.1’de r yarıçapı, w oluk genişliğini, β yarı üçgen açısını, s_w tel aralığını, d_w tel çapını, r_s ise toz yarıçapını ifade etmektedir.

Çizelge 4.1’de oluklu ısı borularında efektif kapiler yarıçapı için belirtilen kabuller incelendiğinde, bu çalışmada kullanılan ve çizelgede bulunan oluk tiplerine göre daha kompleks oluk tipleri olan girintili ve ikizkenar yamuk oluk tiplerine ait efektif kapiler yarıçap değerleri bulunmamaktadır. Bu nedenle bu oluk tiplerine efektif kapiler yarıçap

değerleri aşağıda deneysel yollarla elde edilen veriler sayesinde verilen eşitlik ile hesaplanacaktır.

$$r_{eff} = \frac{2H_L}{H_s} \quad (4.11)$$

Burada eşitlikte ise H_L fitil yükseklik faktörünü, H_s ise statik fitil yüksekliğini ifade etmektedir. Fitil yükseklik faktörü çalışma akışkanına bağlı bir parametre olup aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$H_s = \frac{\sigma}{\rho_s \times g} \quad (4.12)$$

Burada ρ_s çalışma akışkanının sıvı fazının öz kütlesini, g ise yerçekimi sabitini ifade etmektedir.

Isı borularının performanslarını belirlemek için yer çekimli ortamlarda gerçekleştirilen performans testlerinde, çalışma akışkanına bağlı bir parametre olan fitil yükseklik faktörü, bu performansın belirlenmesinde önemli etkilere sahip olabilmektedir. Bu değer, ısı borusunun ısı taşıma performansının eğime karşı gösterdiği hassasiyet olarak da ifade edilmektedir [10]. Bu değer hesaplanırken çalışma akışkanın sadece sıvı fazının öz kütlesi hesaba katılmalıdır.

Statik fitil yüksekliği ise yeryüzü koşullarında, çalışma akışkanı üzerinde oluşan kuvvetlerin, fitil yapısının oluşturduğu kapiler kuvvetlere eğit olduğu eğim değeri ni ifade etmektedir [10]. Bu doğrultuda bu parametre, ısı taşıma kapasitesinin eğime göre olan değışimi gösteren grafik yardımıyla hesaplanabilir. Bu grafikte ısı taşıma kapasitesini sıfır olduğu eğim değeri statik fitil yüksekliğini ifade etmektedir. Bu eğim değeri ne ise test edilen eğim değeri nin ekstrapolasyonu sayesinde ulaşılmaktadır.

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, gerçekleştirilen performans testlerine ait sonuçlar sunulmaktadır. Performans testleri, ısı borusu eğiminin ısı taşıma performansına olan etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla beş farklı eğim seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma akışkanının dolum oranının ısı borusu ısı taşıma performansına olan etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla ise girintili oluklu ısı borusuyla sabit eğimde farklı dolum oranlarında testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu testler doğrultusunda girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapılarının kıyaslaması yapılmaktadır. Elde edilen sonuçların deneysel belirsizlikleri EK-7’de verilmektedir.

5.1. Eğimin Isı Borusu Isıl Performansına Olan Etkisi

5.1.1. Girintili oluklu ısı borusu için farklı eğimlerde gerçekleştirilen test sonuçları

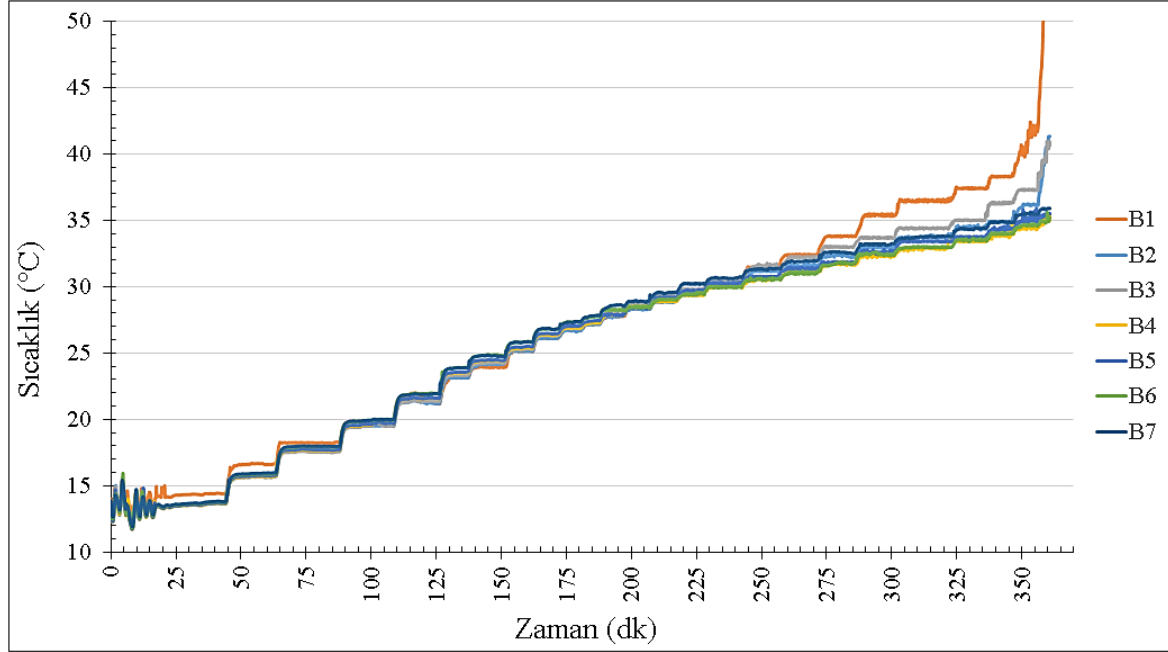
Girintili oluklu ısı borusunda buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerleri, ısıtıcı ve ona eklenen güç kablosunun toplam direncinden güç kablosunun kendi direnci çıkartılarak elde edilen direnç değeri ve güç kaynağı üzerinden okunan akım değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Buharlaştırıcı kısma aktarılan ısı miktarı ise Eş. 4.8 yardımıyla ısıtıcıya verilen güç değerinden izolasyondan kaçan ısı miktarı çıkartılarak elde edilmiştir.

0 mm eğim (yatay konum) testi sonuçları

Şekil 5.1, girintili oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 0 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedirler. Çizelge 5.1 ise, bu test boyunca ısı borusunun buharlaştırıcı kısmına aktarılan güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.1 incelendiğinde, 250. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının (ısıl-çift konumları Şekil 4.6’de gösterilmektedir) birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika sonrasında B1 numaralı ısıl-çift (ısı borusunun en ucunda bulunan ısıl-çift) sıcaklığı, diğer ısıl-çift sıcaklıklarından ayrılmaya başlamış fakat bir süre sonra yine de sabit denge sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. Devam eden süreçte ise, 345. dakika itibari ile ısı borusunun buharlaştırıcı kısmına aktarılan güç miktarı 199,3 W değerine ulaştığında, bu ısıl-çift sıcaklığının diğer ısıl-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısıl-çiftin

bulunduğu bölgede kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, girintili oluklu ısı borusunun, 0 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı 199,3 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Girintili oluklu ısı borusu 0 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

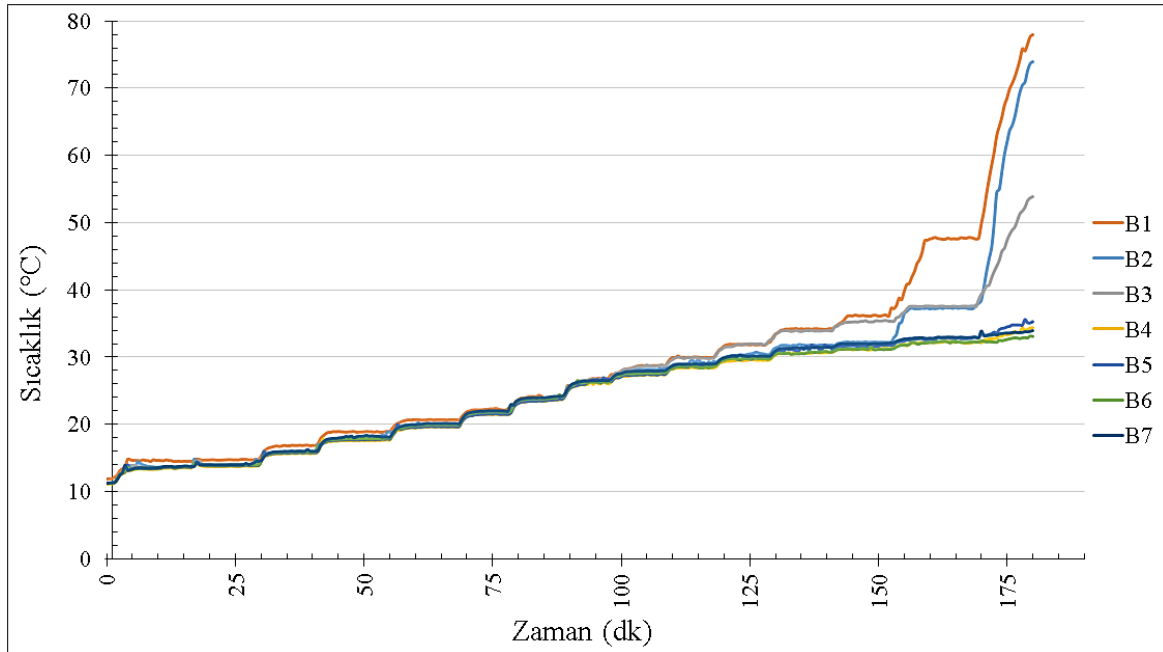
Çizelge 5.1. Girintili oluklu ısı borusu 0 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 44,7	17,4	207,5 – 217,5	151,7
44,7 – 63,7	34,6	217,5 – 227,5	155,8
63,7 – 87,7	52,5	227,5 – 242,5	160,0
87,7 – 108,67	69,56	242,5 – 256,5	164,8
108,9 – 126,8	86,4	256,5 – 271,5	169,1
126,8 – 137,5	103,9	271,5 – 286,5	173,4
137,5 – 152,5	112,3	286,5 – 301,5	177,8
152,5 – 162,5	121,3	301,5 – 321,5	182,1
162,5 – 172,5	130,2	321,5 – 336,3	186,6
172,5 – 180,5	134,2	336,3 – 346,3	190,9
180,5 – 187,5	138,7	346,3 – 356,3	195,5
187,5 – 197,5	142,8	356,3 – 360,8	199,3
197,5 – 207,5	146,8		

2 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.2 girintili oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 2 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.2 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısmına aktarılan güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.2 incelendiğinde, 120. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak, 120. dakika sonrasında B1 numaralı ısı-çift sıcaklığı, diğer ısı-çift sıcaklıklarından ayrılmaya başlamış, fakat bir süre sonra yine de sabit denge sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. 150. dakika itibari ile B1 numaralı ısı-çiftte kısmı kuruma gerçekleşmiştir. Devam eden süreçte ise, 170. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 169,1 W değerine ulaştığında, B1 ve B2 numaralı ısı çiftlerin diğer ısı-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısı-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumunun gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda girintili oluklu ısı borusunun, 2 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 169,1 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Girintili oluklu ısı borusu 2 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

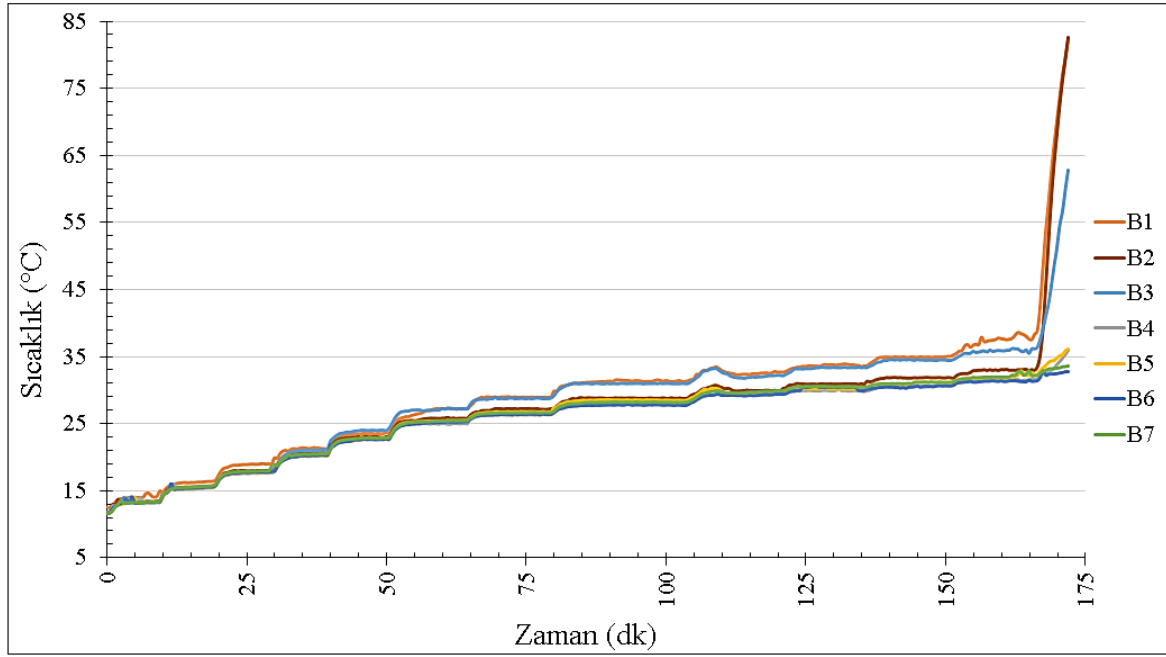
Çizelge 5.2. Girintili oluklu ısı borusu 2 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 28,0	17,4
28,0 – 38,0	34,6
38,0 – 54,0	52,5
54,0 – 68,0	69,6
68,0 – 78,0	86,4
78,0 – 88,0	103,9
88,0 – 98,0	121,3
98,0 – 108,0	130,2
108,0 – 118,0	138,7
118,0 – 128,0	146,8
128,0 – 138,0	155,8
138,0 – 153,0	160,0
153,0 – 168,0	164,8
168,0 – 180,0	169,1

4 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.3, girintili oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 4 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.3 ise, 4 mm eğim testi boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.3 incelendiğinde, 165. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak, 165. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 142,8 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısıl-çift sıcaklıklarının diğer ısıl-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısıl-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, girintili ısı borusunun 4 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 142,8 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Girintili oluklu ısı borusu 4 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

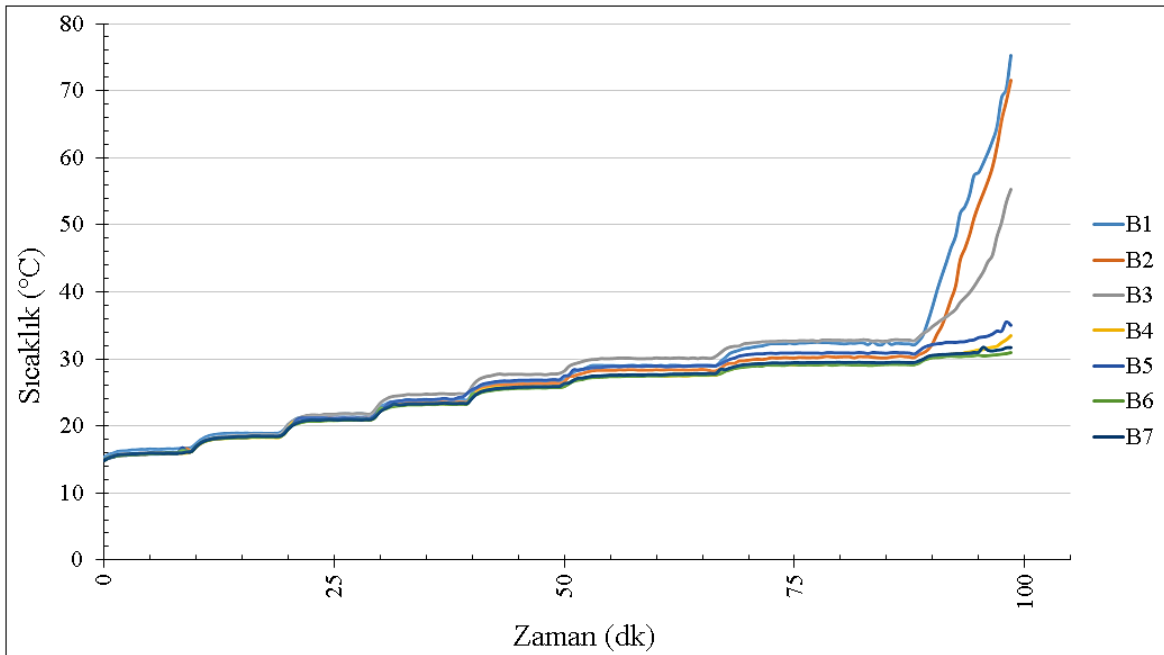
Çizelge 5.3. Girintili oluklu ısı borusu 4 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 9,5	17,4
9,5 – 20,0	34,6
20,0 – 30,0	52,5
30,0 – 40,0	69,6
40,0 – 50,0	86,4
50,0 – 65,0	103,9
65,0 – 80,0	112,3
80,0 – 105,0	121,3
105,0 – 120,0	125,7
120,0 – 135,0	130,2
135,0 – 150,0	134,2
150,0 – 165,0	138,7
165,0 – 172,0	142,8

6 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.4, girintili oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 6 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.4 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.4 incelendiğinde, 88. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak 88. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 112,3 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 ısıl-çift sıcaklıklarının diğer ısıl-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve ısıl-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, girintili oluklu ısı borusunun, 6 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 112,3 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Girintili oluklu ısı borusu 6 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

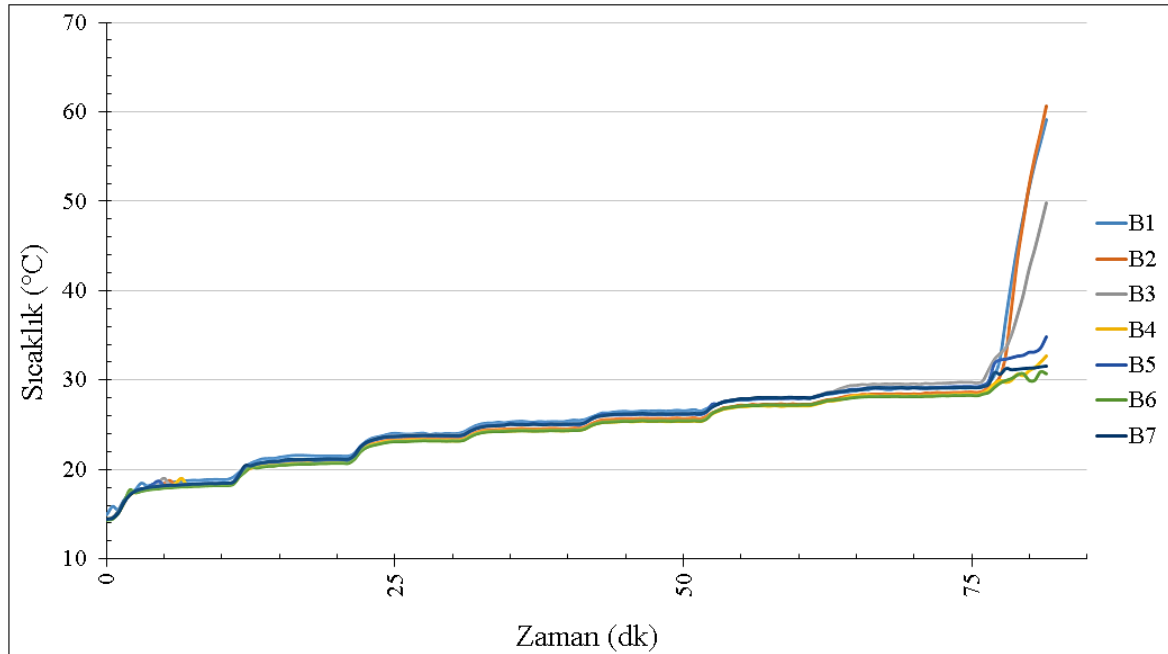
Çizelge 5.4. Girintili oluklu ısı borusu 6 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 9,50	17,4	39,50 – 49,50	86,4
9,50 – 19,50	34,6	49,50 – 64,50	95,8
19,50 – 29,50	52,5	64,50 – 90,00	103,9
29,50 – 39,50	69,6	90,00 – 98,50	112,3

8 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.5, girintili oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 8 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.5 ise, 8 mm eğim testi boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.5 incelendiğinde, 76. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak 76. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 86,4 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısı-çift sıcaklıklarının diğer ısı-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısı-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, girintili oluklu ısı borusunun, 8 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 86,4 W olarak elde edilmiştir.

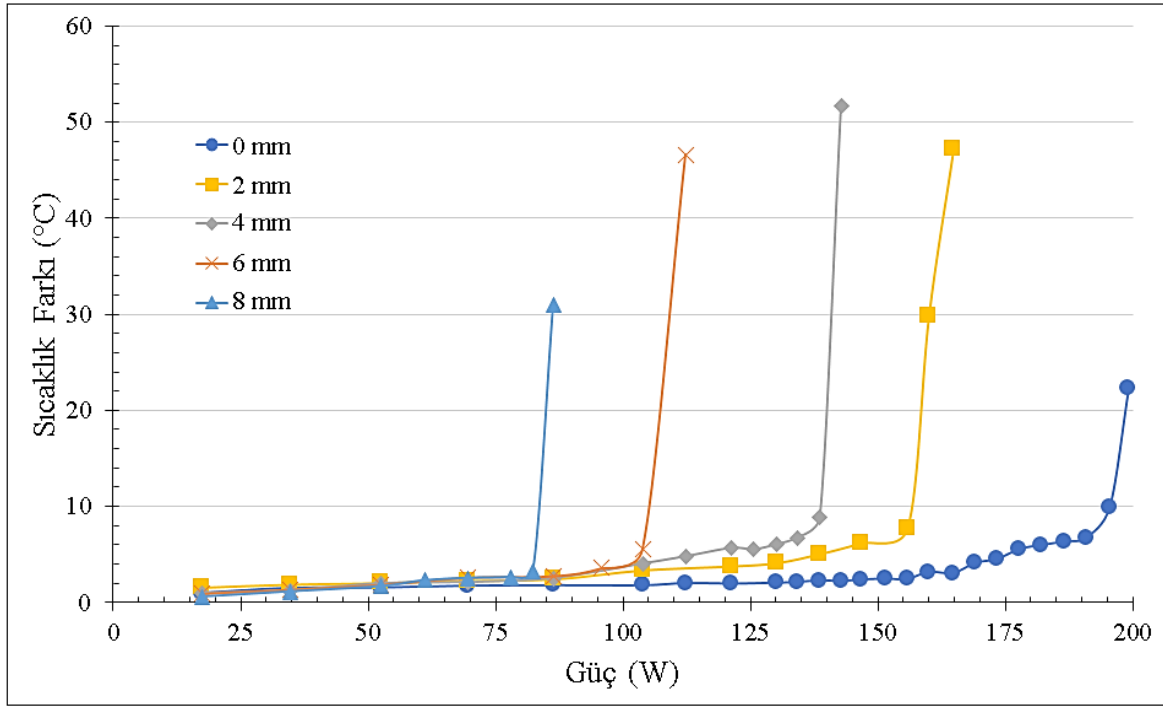


Şekil 5.5. Girintili oluklu ısı borusu 8 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

Çizelge 5.5. Girintili oluklu ısı borusu 8 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 10,5	17,4	40,5 – 50,5	69,6
10,5 – 20,5	34,6	50,5 – 60,5	78,0
20,5 – 30,5	52,5	60,5 – 75,5	82,4
30,5 – 40,5	61,1	75,5 – 81,5	86,4

Şekil 5.6, girintili oluklara sahip ısı borusunda her bir eğim değeri için ısı taşıma kapasitesine karşılık adyabatik kısım ve buharlaştırıcı kısım arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir. Şekil üzerinden de görüleceği üzere adyabatik kısım ve buharlaştırıcı kısım arasındaki sıcaklık farkın hızlı bir şekilde yükselmeye başladığı noktalar ısı borusunun kurumaya başladığı noktalardır.



Şekil 5.6. Girintili oluklara sahip ısı borusunda kuruma noktaları

Girintili oluklu ısı borusunun kuruma noktalarında adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları her bir eğim değeri için Çizelge 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5.6. Girintili oluklu ısı borusu her bir eğim için adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları

Eğim (mm)	0 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
T_a (°C)	32,4	30,7	30,4	28,6	28,1
T_y (°C)	29,0	27,2	27,0	26,4	25,9

Girintili oluklu ısı borusu için her bir eğim değerinde ısı borusunun maksimum ısı taşıma kapasitesi ve efektif ısıl iletkenlik katsayıları Çizelge 5.7'de verilmektedir. Bu çizelgede verilen sonuçlar incelendiğinde, eğim değerindeki artış ile birlikte ısı taşıma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu azalış, eğim artmasıyla yerçekimi kuvvetinin ısı borusunda

çalışma akışkanının hareket ettiği eksenle giderek artması ve akışkanın iletimini zorlaştırmasıdır. Maksimum ısı taşıma kapasitesindeki bu azalmaya bağlı olarak da ısı borusunun efektif ısı iletkenlik değerinin de azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.7. Girintili oluklu ısı borusunun farklı eğimlerdeki ısı taşıma kapasiteleri ve efektif ısı iletkenlik katsayıları

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Maksimum Isı Taşıma Kapasitesi (W)	199,3	169,1	142,8	112,3	86,4
Efektif Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	276408,3	218368,5	169590,7	151202,7	114503,2

Bir ısı borusunun çalışabilmesi için fitil yapısı tarafından meydana getirilen kapiler kuvvetlerin, kendisine zıt yönde etki eden yüzey gerilimi ve yerçekimi gibi kuvvetlerin toplamından daha fazla olması gerekmektedir. Çizelge 5.7’de verilen eğim testleri sonuçları incelendiğinde, eğim arttıkça ısı borusu ısı taşıma kapasitesi azaldığı görülmektedir.

Isı taşıma kapasitesinin 0 olduğu eğim değeri ısı borularında statik fitil yüksekli olarak anılmaktadır. Bu değer, fitil yapısı tarafından meydana getirilen kapiler kuvvetler ile negatif eğimlerde bu kuvvetlere zıt yönde etki eden yerçekimi ve yüzey kuvvetlerinin eşitlendiği eğim değerini ifade etmektedir. Böylece, bu eğim değerinde çalışma akışkanının ısı borusu içerisindeki dolaşımı sağlanamamakta ve ısı iletimi gerçekleşmemektedir. Bu doğrultu, bu değerden yola çıkılarak fitil yapılarının meydana getirdiği kapiler basınç değerleri elde edilebilmektedir.

Girintili oluklu ısı borusunun ısı taşıma kapasitesinin 0 olduğu eğim değerinde, girintili oluk yapısının statik fitil yüksekliği 14,1 mm olarak elde edilmektedir.

Girintili oluklu ısı borusunda, çalışma akışkanının, ısı borusunun ortalama adyabatik sıcaklığındaki termo-dinamik özellikleri [54, 55] göz önünde bulundurularak sıvı fazdaki öz kütlesi ve yüzey gerilim katsayısı değerleri, sırasıyla, 595,4 kg/m³ ve 0,02 N/m olarak elde edilmektedir.

Bu doğrultuda, Eş. 4.12 yardımıyla girintili oluklu ısı borusu için statik fitil yüksekliği faktörü, $342,4 \times 10^{-8}$ N/m olarak elde hesaplanmıştır.

Efektif kapiler yarıçap değeri, statik fitil yüksekliği ve fitil yükseklik faktörü değerleri Eş. 4.11 yardımı ile kullanılarak girintili oluklu ısı borusu için 0,483 mm olarak elde edilmiştir.

Girintili oluklu ısı borusu için efektif kapiler yarı çap değerinin belirlenmesi ile birlikte Eş. 4.10 kullanılarak bu ısı borusunun çalışma şartlarına meydana getirdiği kapiler basınç değeri $82,7 \text{ N/m}^2$ olarak elde edilmiştir.

Ayrıca, efektif kapiler yarıçap değerleri belirlenen ısı borularında aşağıdaki eşitlik kullanılarak çalışma sıvının temas açısı hesaplanabilmektedir.

$$r_{eff} = \frac{w}{\cos\theta} \quad (5.1)$$

Bu doğrultuda, girintili oluklu ısı borusunun temas açısı $51,6^\circ$ olarak elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında 19 adet girintili oluklu bir ısı borusunun performansı da yollarla belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak bu ısı borusu, beklenenin aksine 17 girintili oluklu ısı borusundan daha düşük performans göstermiştir. Bu durumun ise ısı borusunun yeteri kadar temizlenememesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu ısı borusunda gerçekleştirilen performans testine ait buharlaştırıcı bölge sıcaklıkları EK-8’de sunulmaktadır.

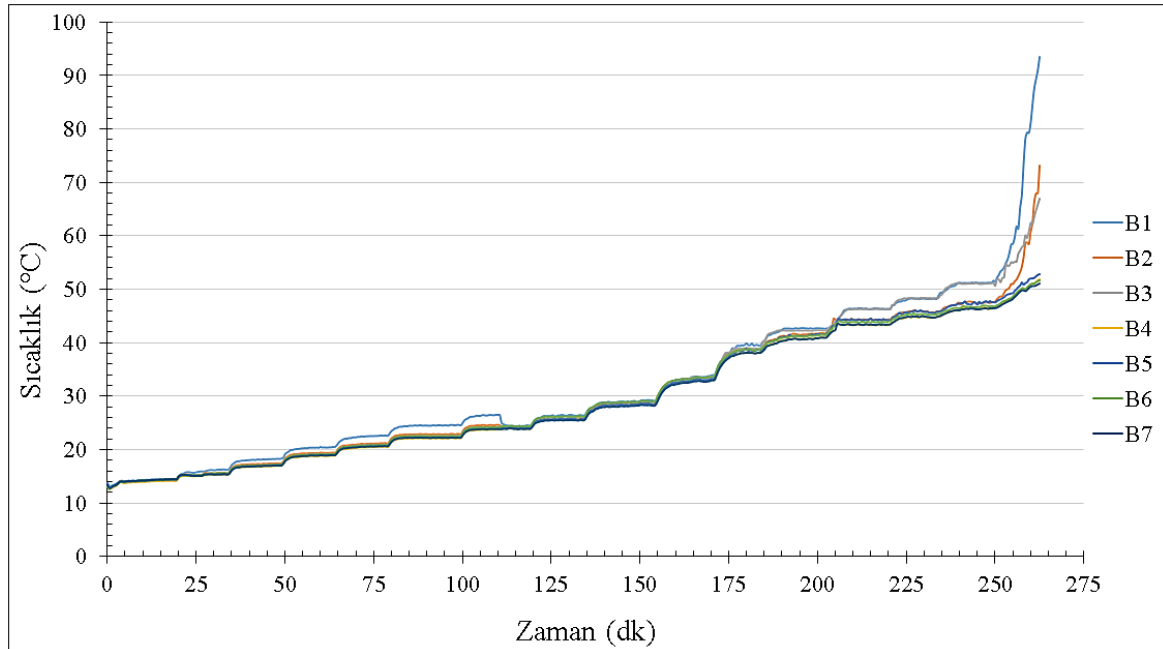
5.1.2. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu için farklı eğimlerde gerçekleştirilen test sonuçları

İkizkenar yamuk oluk ısı borusunda buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerleri, ısıtıcının güç kablosu eklenmeden önce ölçülen direnci ve güç kaynağı üzerinden okunan akım değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Buharlaştırıcı kısma aktarılan ısı miktarı ise, Eş. 4.8 yardımıyla ısıtıcıya verilen güç değerinden izolasyondan kaçan ısı miktarı çıkartılarak hesaplanmıştır.

0 mm eğim (yatay konum) testi sonuçları

Şekil 5.7, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 0 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.8 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.7 incelendiğinde, 205. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının (ısıl-çift konumları Şekil 4.6'de gösterilmektedir) birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika sonrasında özellikle B1 (ısı borusunun en ucunda bulunan ısıl-çift) ve B3 numaralı ısıl-çift sıcaklıkları, diğer ısıl-çift sıcaklıklarından ayrılmaya başlamış fakat bir süre sonra yine de sabit denge sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. Devam eden süreçte ise, 250. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 224,4 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısıl-çift sıcaklıklarının diğer ısıl-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısıl-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun, 0 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 224,4 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.7. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 0 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

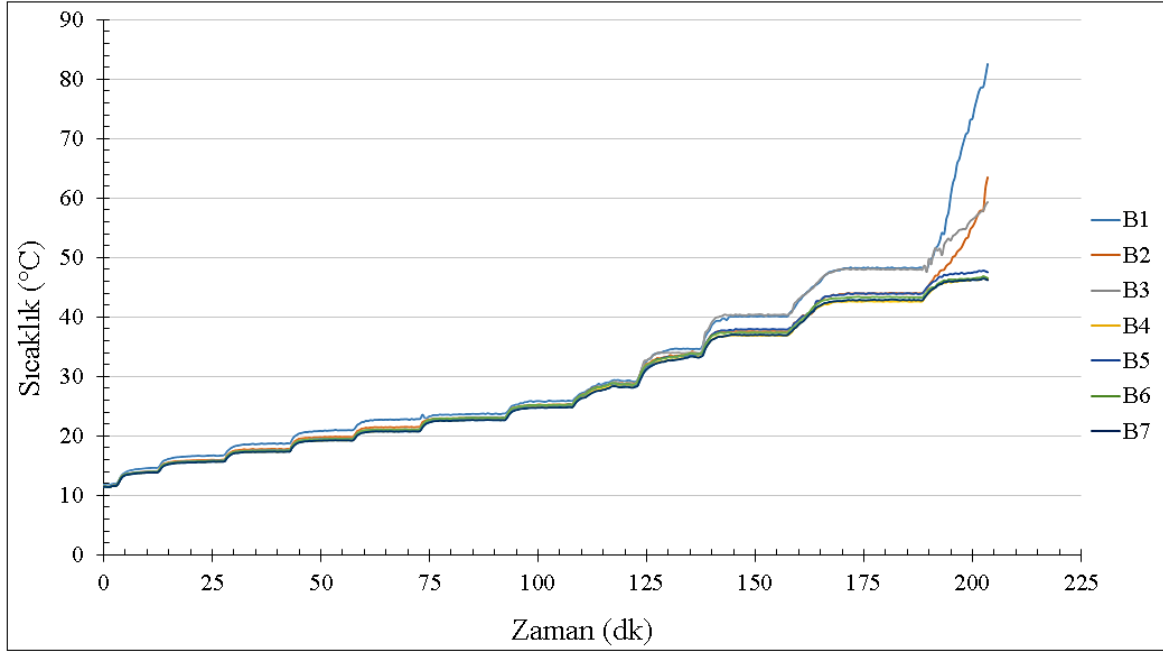
Çizelge 5.8. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 0 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 19,0	17,8	134,5 – 154,0	158,9
19,5 – 34,0	35,6	154,5 – 170,5	176,4
34,5 – 49,0	53,2	171,0 – 184,0	194,2
49,5 – 64,0	71,0	184,5 – 200,0	202,7
64,5 – 79,0	88,5	200,5 – 219,5	211,5
79,5 – 99,0	106,1	220,0 – 234,0	216,0
99,5 – 119,0	124,3	234,5 – 249,5	219,8
119,5 – 134,0	141,8	250,0 – 262,5	224,4

2 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.8, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 2 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.9 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.8 incelendiğinde, 138. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika sonrasında özellikle B1 ve B3 numaralı ısı-çift sıcaklıkları, diğer ısı-çift sıcaklıklarından ayrılmaya başlamış fakat bir süre sonra yine de sabit denge sıcaklığına ulaştığı görülmüştür. Devam eden süreçte ise, 199. dakika itibarı ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 189,9 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısı-çift sıcaklıklarının diğer ısı-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısı-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun 2 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 189,9 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.8. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 2 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

Çizelge 5.9. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 2 mm testi güç süreleri

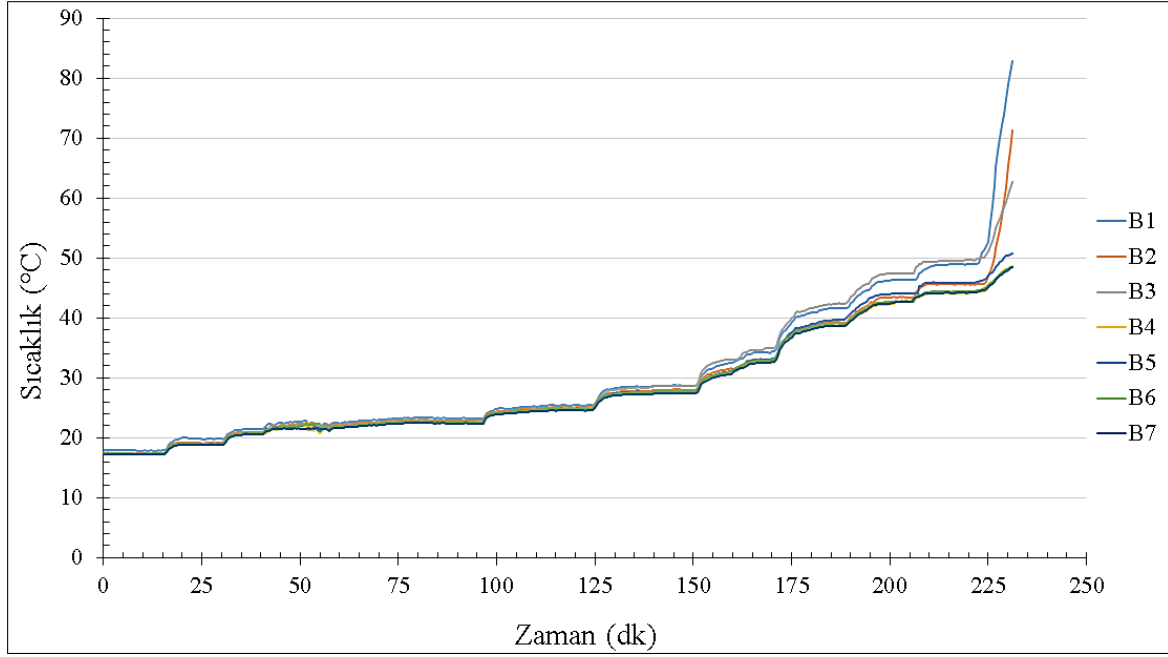
Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 12,5	17,8	92,5 – 107,5	124,3
12,5 – 27,5	35,6	107,5 – 122,5	141,8
27,5 – 42,5	53,2	122,5 – 137,50	158,9
42,5 – 57,5	71,0	137,5 – 157,50	176,4
57,5 – 72,5	88,5	157,5 – 188,50	185,2
72,5 – 92,5	106,1	188,5 – 203,50	189,9

4 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.9, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 4 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedirler. Çizelge 5.10 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.9 incelendiğinde, 150. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika sonrasında özellikle B1 ve B3 numaralı ısı-çift sıcaklıkları diğer ısı-çift sıcaklıklarından ayrılmaya başlamış fakat bir süre sonra yine de sabit denge sıcaklığına ulaştıkları görülmüştür. Devam eden süreçte ise,

224. dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 158,9 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısıl-çift sıcaklıklarının diğer ısıl-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısıl-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun, 4 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 158,9 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.9. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 4 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

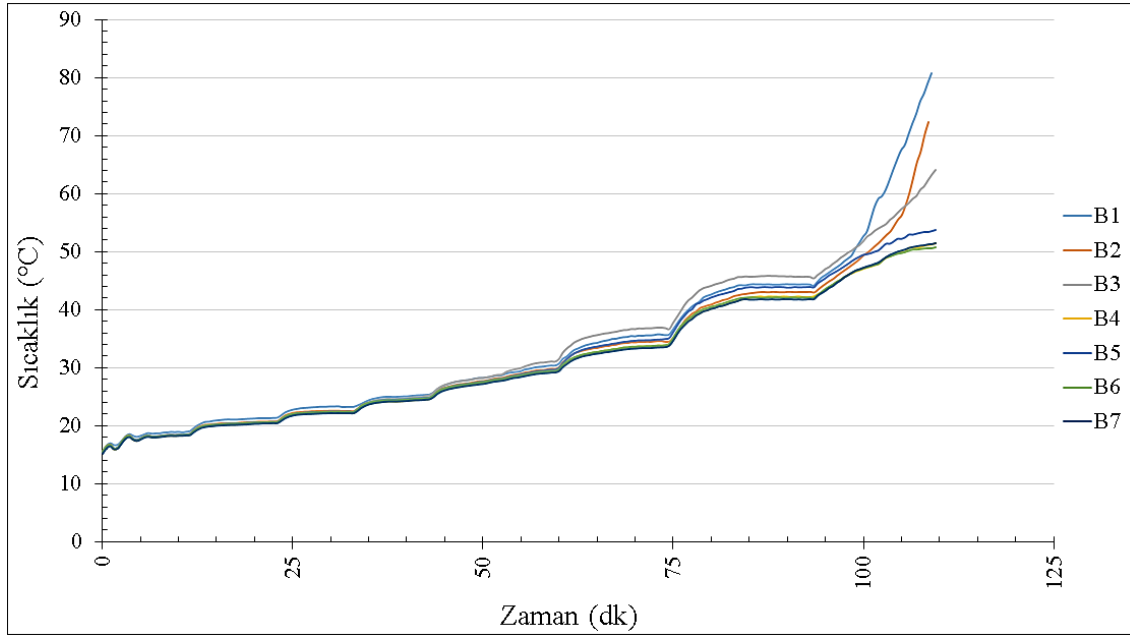
Çizelge 5.10. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 4 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 15,5	17,8
15,5 – 30,5	35,6
30,5 – 40,5	53,2
40,5 – 96,0	71,0
96,0 – 124,5	88,5
124,5 – 150,0	106,1
150,0 – 170,5	124,3
170,5 – 189,0	141,8
189,0 – 224,0	150,2
224,0 – 231,0	158,9

6 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.10, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 6 mm eğim testi boyunca gösterdiği, sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedirler. Çizelge 5.11 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.10 incelendiğinde, 94. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 128,2 W değerine ulaştığında, B1, B2 ve B3 numaralı ısı-çift sıcaklıklarının diğer ısı-çiftlerden tamamen ayrıştığı ve bu ısı-çiftlerin bulundukları bölgelerde kurumamanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun 6 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 128,2 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.10. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 6 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

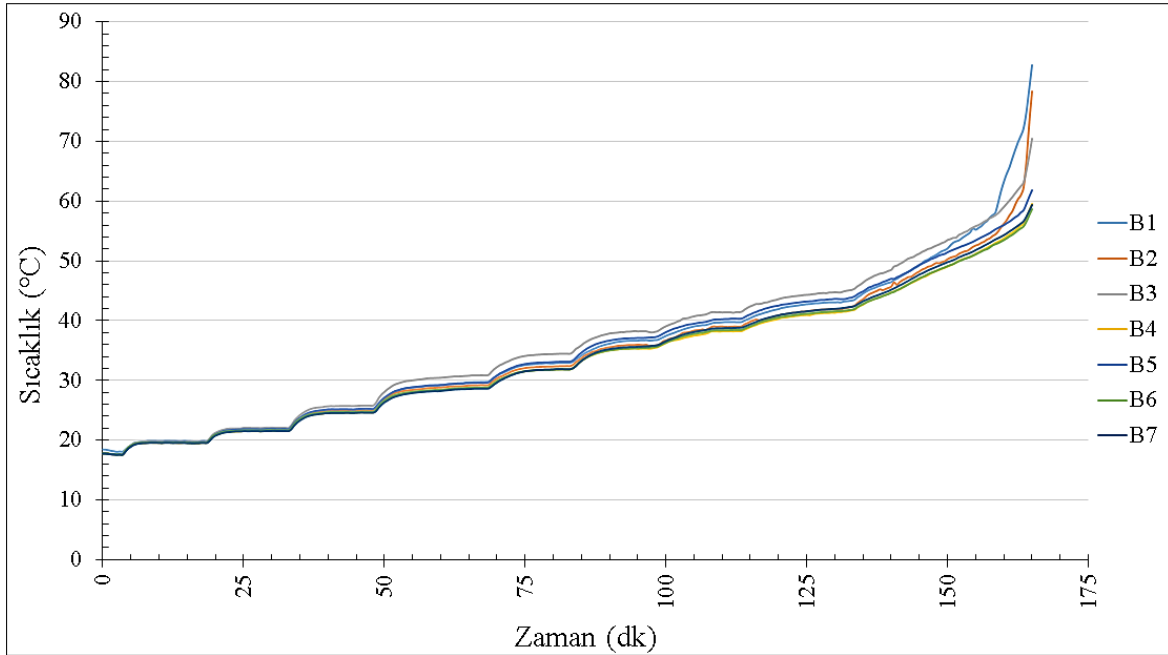
Çizelge 5.11. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 6 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk)	Güç (W)
0 – 11,0	17,8	43,0 – 59,5	88,5
11,0 – 23,0	35,6	59,5 – 74,0	106,1
23,0 – 33,0	53,2	74,0 – 93,5	124,3
33,0 – 43,0	71,0	93,5 – 109,5	128,2

8 mm eğim testi sonuçları

Şekil 5.11, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının, 8 mm eğim testi boyunca gösterdiği sıcaklık değişimlerine ait verileri içermektedir. Çizelge 5.12 ise, bu test boyunca buharlaştırıcı kısımda bulunan ısıtıcıya verilen güç değerlerini ve sürelerini içermektedir.

Şekil 5.11 incelendiğinde, 133. dakikaya kadar buharlaştırıcı kısım sıcaklıklarının birbirleri ile uyumlu değerlerde oldukları görülmektedir. Ancak bu dakika itibari ile ısıtıcıya verilen güç miktarı 97,7 W değerine ulaştığında, buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları uzun bir süre dengeye ulaşmamış, sonrasında ise hepsinde birden kuruma gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, 26 ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun, 8 mm eğimde taşıyabileceği maksimum ısı kapasitesi 97,7 W olarak elde edilmiştir.

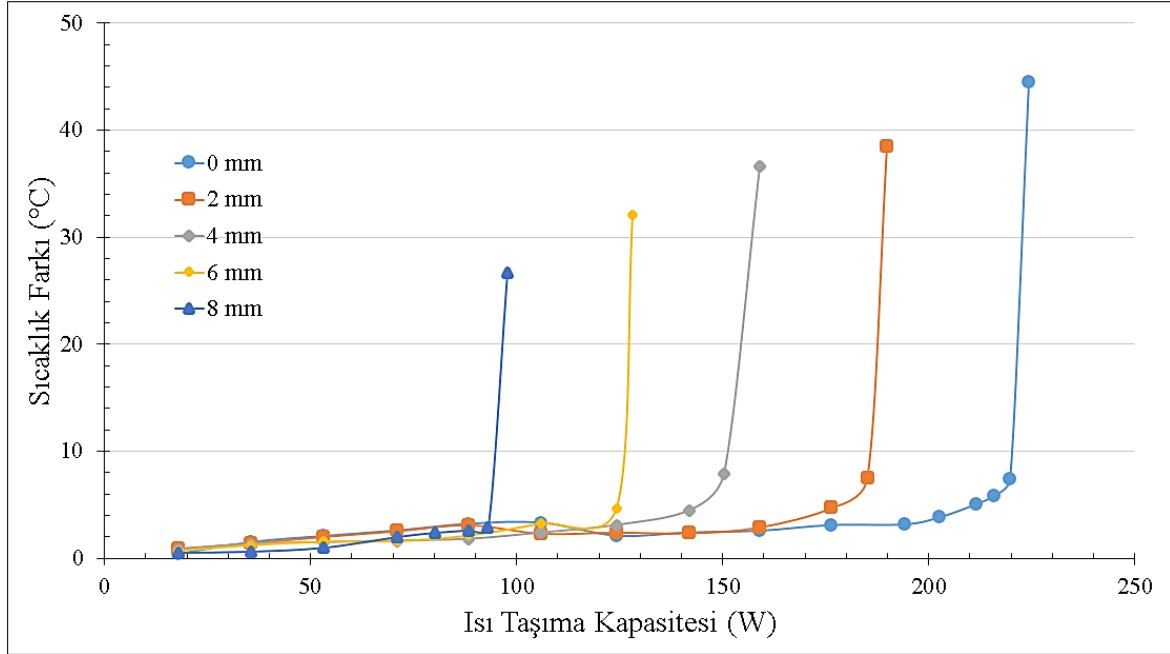


Şekil 5.11. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 8 mm testi buharlaştırıcı kısım sıcaklıkları

Çizelge 5.12. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu 8 mm testi güç süreleri

Süre (dk.)	Güç (W)	Süre (dk.)	Güç (W)
0 – 18,0	17,8	68,0 – 83,0	80,1
18,0 – 33,0	35,6	83,0 – 98,0	88,5
33,0 – 48,0	53,2	98,0 – 113,0	93,0
48,0 – 68,0	71,0	113,0 – 133,0	97,7

Şekil 5.12, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunda her bir eğim değeri için ısı taşıma kapasitesine karşılık adyabatik kısım ve buharlaştırıcı kısım arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir. Şekil üzerinden de görüleceği üzere adyabatik kısım ve buharlaştırıcı kısım arasındaki sıcaklık farkın hızlı bir şekilde yükselmeye başladığı noktalar ısı borusunun kurumaya başladığı noktalardır.



Şekil 5.12. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunda kuruma noktaları

İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunun kuruma noktalarında adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları her bir eğim değeri için Çizelge 5.13'te verilmektedir.

Çizelge 5.13. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu her bir eğim için adyabatik ve yoğuşturucu kısım sıcaklıkları

	0 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
T_a (°C)	46,3	45,9	45,8	44,2	44,0
T_y (°C)	37,1	33,5	29,9	29,6	26,3

İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu için her bir eğim değerinde ısı borusunun maksimum ısı taşıma kapasitesi ve efektif ısıl iletkenlik katsayıları Çizelge 5.14'de verilmektedir. Bu çizelgede verilen sonuçlar incelendiğinde, eğim değerindeki artış ile birlikte ısı taşıma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu azalış, eğim artmasıyla yerçekimi kuvvetinin,

ısı borusunda çalışma akışkanının hareket ettiği eksenide giderek artarak akışkanın iletimini zorlaştırmasıdır. Maksimum ısı taşıma kapasitesindeki bu azalmaya bağlı olarak da ısı borusunun efektif ısıl iletkenlik değerinin de azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.14. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunun farklı eğimlerdeki ısı taşıma kapasiteleri ve efektif ısıl iletkenlik katsayıları

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Maksimum Isı Taşıma Kapasitesi (W)	224,4	189,9	158,9	128,2	97,7
Efektif Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	131028,4	124254	71527,63	49607,91	34003,3

İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunun ısı taşıma kapasitesinin 0 olduğu eğim değerinde, ikizkenar yamuk oluk yapısının statik fitil yüksekliği 14,3 mm olarak elde edilmektedir.

İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunda, çalışma akışkanın, ısı borusunun ortalama adyabatik sıcaklığındaki termo-dinamik özellikleri [54, 55] göz önünde bulundurularak sıvı fazdaki öz kütlesi ve yüzey gerilim katsayısı değerleri, sırasıyla, 562,9 kg/m³ ve 0,015 N/m olarak elde edilmektedir.

Bu doğrultuda, Eş. 4.12 yardımıyla ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için statik fitil yüksekliği faktörü, $271,6 \times 10^{-8}$ N/m olarak elde hesaplanmıştır.

Efektif kapiler yarıçap değeri, statik fitil yüksekliği ve fitil yükseklik faktörü değerleri Eş. 4.11 yardımı ile kullanılarak ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için 0,378 mm olarak elde edilmiştir.

İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu için efektif kapiler yarı çap değerinin belirlenmesi ile birlikte Eş. 4.10 kullanılarak bu ısı borusunun çalışma şartlarına meydana getirdiği kapiler basınç değeri 79,2 N/m² olarak elde edilmiştir.

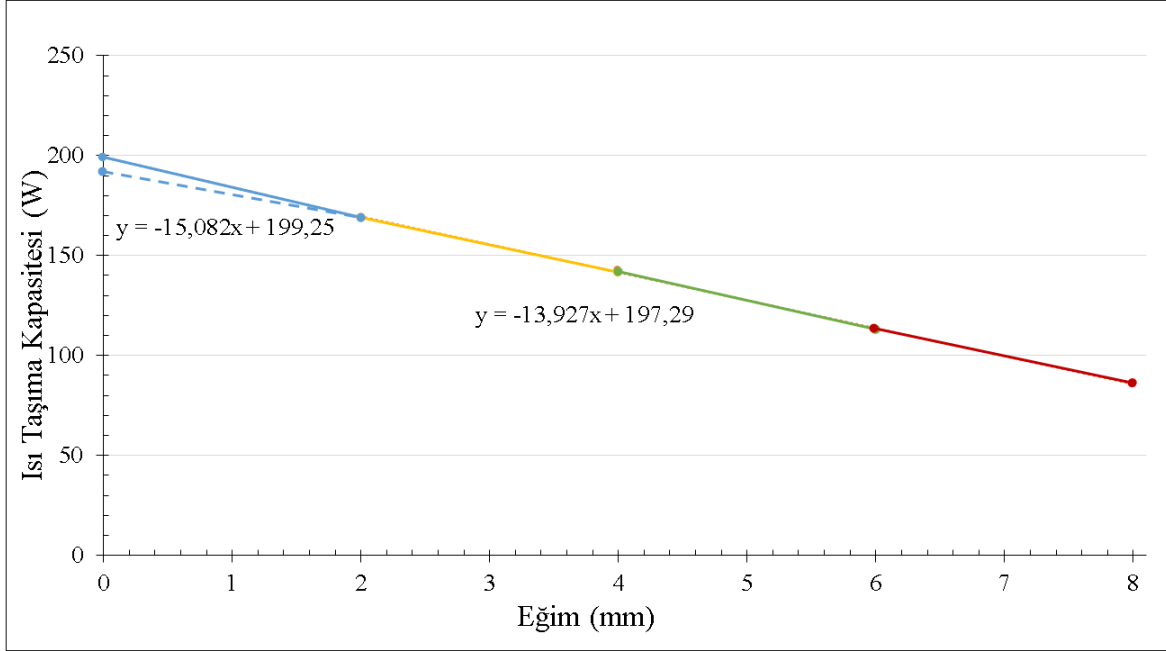
İkizkenar yamuk oluklu ısı borusunda, çalışma sıvının temas açısı Eş. 5.1 kullanılarak 22,4° olarak hesaplanmıştır.

5.1.3. Oluklu ısı borularının uzay performanslarının belirlenmesi

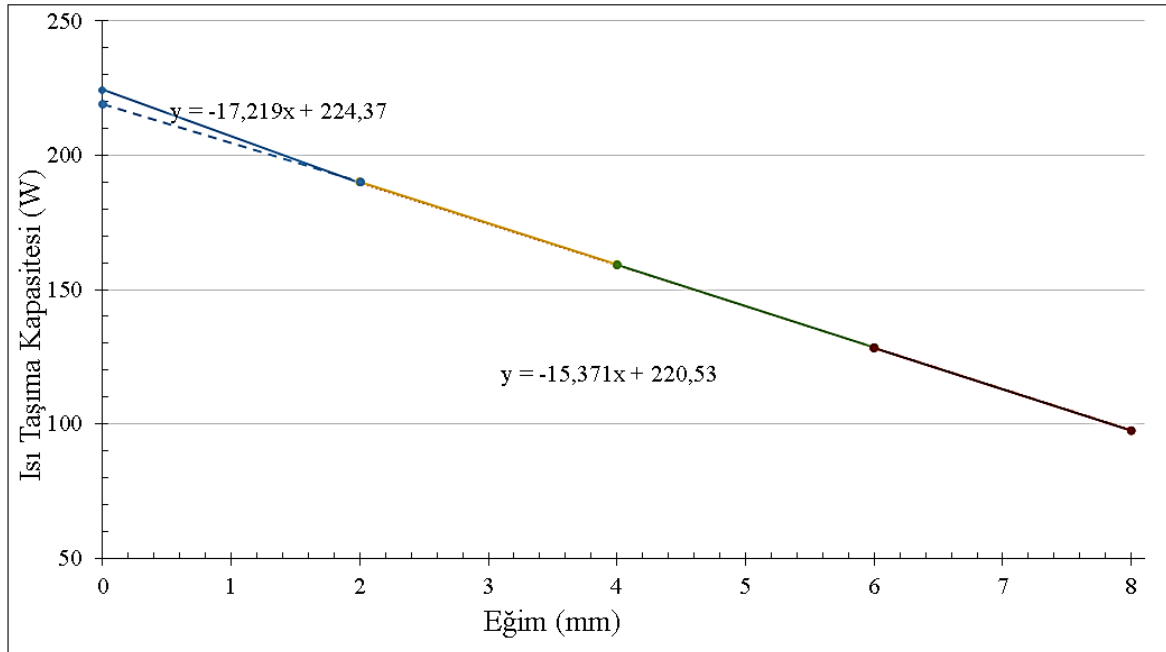
0-g şartlarda kullanılmak için üretilen ısı borularının performans testlerini yeryüzü koşullarında yatay konumda yapmak, bu ısı borularının performanslarının olması gerekenden farklı bir şekilde hesaplanmasına yol açmaktadır. Bu durum, yeryüzü koşullarında yerçekiminden dolayı çalışma akışkanının çökmesinden kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda, ısı borularının uzay performanslarını yeryüzü koşullarda hesaplayabilmek için sadece yatay konumda değil, farklı eğimler seviyelerinde de (buharlaştırıcı kısmın yoğunlaştırıcı kısımdan yüksekte olduğu test eğim seviyelerinde) ısı borusunun performans testlerinin gerçekleştirilmeleri gerekmektedir. Farklı eğim seviyelerinde gerçekleştirilen bu performans testleri ile yatay konumda veya yatay konuma yakın eğim seviyelerinde çalışma akışkanının çökmesinden dolayı, olması gerekenden fazla hesaplanan ısı taşıma kapasitesi, diğer eğim seviyelerinde elde edilen ısı taşıma kapasitesi değerlerinin doğrusal regresyonu ile doğru bir şekilde tahmin edilir. Böylece ısı borularında ısı taşıma kapasitelerindeki çalışma akışkanının çökmesinden kaynaklı hatalı hesaplamalar giderilerek ısı borularının 0-g şartlarda gösterecekleri ısı taşıma performansları belirlenmiş olur.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de sırasıyla girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında farklı eğim seviyelerinde gerçekleştirilen performans testleri ile elde edilen ısı taşıma kapasitesi değerleri gösterilmektedir. Grafikler üzerinde bu eğim aralıkları için elde edilen doğruların denklemleri belirtilmektedir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’den görüleceği üzere 2 mm üzerindeki eğim aralıklarında doğru denklemleri ile 0 – 2 mm aralığında bulunan doğru denklemleri birbirleri ile uyumlu olmadığı görülmektedir. 0 – 2 mm aralığındaki oluşan bu farklılık, yeryüzü koşullarında test edilen ısı borularında düşük eğim seviyelerinde meydana gelen çalışma akışkanının yerçekimi etkilerinden kaynaklı ısı borusunun buhar kısmının alt tarafına çökmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, ısı borularının yatay konumdaki ısı taşıma performansının olması gerekenden fazla tahmin edilmesine yol açmaktadır. Bu hata girintili oluklu ısı borusunda 2 W, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunda ise 4W olarak görülmektedir. Çalışma sıvısının 0 – 2 mm eğim aralığında buhar kısmın alt tarafına çökmesiyle oluşan bu hata, 2 – 8 mm aralığındaki doğrunun doğrusal regresyonu sayesinde giderilir. Çalışma akışkanının çökmesinden kaynaklan bu hatanın girintili ve ikizkenar yamuk oluklara sahip ısı borularında farklı değerlerde ortaya çıkmasının sebebi ise ısı boruların oluk genişlikleri ile alakalıdır. Oluk yapısının, buhar kısmı ile birleştiği noktada daha dar genişliği sahip olan girintili ısı borusunda (0,3 mm) ikizkenar yamuk oluklu ısı borusuna göre (0,35

mm) daha az akışkan çökmesi gerçekleşmiş ve böylece ısı taşıma kapasitesi daha az hata ile elde edilmiştir.



Şekil 5.13. Girintili oluklu ısı boru eğim ve ısı taşıma kapasitesi grafiği



Şekil 5.14. İkizkenar yamuk oluklu ısı borusu eğim ve ısı taşıma kapasitesi grafiği

5.2. Oluk Performansının Karşılaştırılması

Isı borularında ısı taşınımı fitil yapıları sayesinde gerçekleşmektedir. Bu doğrultuda, oluklu ısı borularında bir oluk başına düşen ısı taşıma miktarı, toplam taşınan ısı miktarının oluk sayısına bölünmesiyle elde edilebilir. Ancak bu kıyaslamayı yapabilmek için ısı borularının operasyon sıcaklıkları aynı olması gerekmektedir. Bu çalışmada, deney düzeneğindeki kısıtlamalar nedeniyle girintili ve ikizkenar yamuk oluklara sahip ısı boruları ile aynı operasyon sıcaklıkları değerlerinde çalışılamamıştır. Bu doğrultuda, bu iki ısı borusunun ısı taşıma performansları analitik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama, ısı borularına ait sıvı taşıma faktörü değeri (N_l) sayesinde girintili oluklu ısı borusu ısı taşıma kapasitelerinin, ikizkenar oluklu ısı borusu çalışma sıcaklığındaki değerlerine ekstrapolere edilmesi ile gerçekleştirilecektir. Sıvı taşıma faktörü aşağıda bulunan eşitlik yardımı ile veya Ek-6'da bulunan grafik yardımı ile belirlenmektedir.

$$N_l = \frac{\sigma \rho_1 \lambda}{\mu_1} \quad (5.3)$$

Bu eşitlik yardımı ile aşağıda maddeler halinde verilen kabuller yapılarak ısı taşıma kapasitesi Eş. 5.4 yardımı ile hesaplanabilmektedir [44].

- Isı borusunun kapiler kuvvetler ile çalıştığı
- Buhar basıncı kayıplarının önemsiz olduğu
- Fitil genişliğinin, buhar alanı yarıçapına göre daha küçük olduğu
- Isı akısı yoğunluğunun hem buharlaştırıcı hem de yoğunlaştırıcı kısımlarda aynı seviyede olduğu

$$Q_{max} = 2 \frac{N_l}{l_{eff}} \left(\frac{K}{r_{eff}} \right) (2\pi r_v t_w) \quad (5.4)$$

Eş. 5.3'ten de görülebileceği [44] üzere ısı taşıma kapasitesi, sıvı taşıma faktörü ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Girintili ısı borusunun her bir eğim değeri için sıvı taşıma faktörleri Çizelge 5.15'de verilmektedir. Çizelge 5.16'da ise girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu operasyon sıcaklığındaki sıvı taşıma faktörleri verilmektedir. Bu iki farklı sıvı taşıma faktörü değerleri arasındaki oran doğrultusunda girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar oluklu ısı borusunun operasyon sıcaklığındaki ısı

taşıma kapasitesi değerleri ve efektif ısı iletkenlik değerleri elde edilmiş ve Çizelge 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.15. Girintili oluklu ısı borusunda her bir eğim değerinde sıvı taşıma faktörleri

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Sıvı Taşıma Faktörü	$9,97 \times 10^{10}$	$10,07 \times 10^{10}$	$10,09 \times 10^{10}$	$10,20 \times 10^{10}$	$10,23 \times 10^{10}$

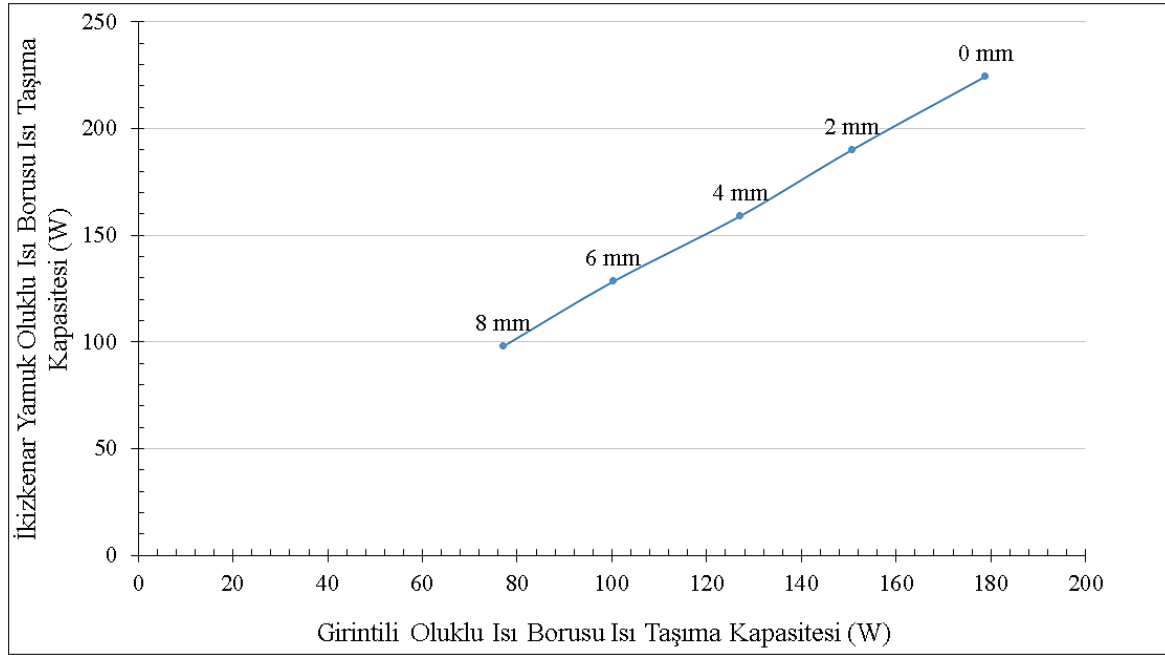
Çizelge 5.16. Girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu operasyon sıcaklığındaki sıvı taşıma faktörleri

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Sıvı Taşıma Faktörü	$8,94 \times 10^{10}$	$8,98 \times 10^{10}$	$8,98 \times 10^{10}$	$9,12 \times 10^{10}$	$9,14 \times 10^{10}$

Çizelge 5.17. Girintili oluklu ısı borusunun, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu operasyon sıcaklığındaki teorik olarak hesaplanmış ısı taşıma kapasiteleri

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Isı Taşıma Kapasitesi (W)	178,9	150,8	127,2	101,8	77,1
Efektif Isıl İletkenlik (W/m.K)	249434,2	194748,9	151048,9	137045,3	102164,2

Elde edilen bu veriler doğrultusunda, Şekil 5.15’de girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında gerçekleştirilen her bir eğim testi için ısı taşıma miktarları gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularının her bir eğim seviyesindeki ısı taşıma kapasiteleri

Girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında her eğim değeri için elde edilen ısı taşıma kapasitesi değerlerini, bu ısı borularında bulunan oluk sayılarına bölünmeleri ile her bir girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapıları tarafından taşınan oluk başına ısı değerleri Çizelge 5.18’de verilmektedir.

Çizelge 5.18. Girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında her bir eğim seviyesinde oluk başı ısı taşıma performansları

Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Girintili Oluk Isı Taşıma Performansı (W)	10,5	8,9	7,48	5,9	4,5
İkizkenar Yamuk Oluk Isı Taşıma Performansı (W)	8,6	7,3	6,1	4,9	3,8

Çizelge 5.18’de bulunan değerler incelendiğinde girintili oluk yapısının ikizkenar yamuk oluk yapısına göre her bir eğim değerinde %18 daha fazla ısı taşıdığı görülmektedir. Çizelge 5.19’da girintili ve ikizkenar oluklu ısı borularının aynı operasyon sıcaklığındaki efektif ısıl iletkenlik değerleri verilmektedir. Bu çizelge incelendiğinde girintili oluklu ısı borusunun efektif ısıl iletkenlik değerleri, ikizkenar oluklu ısı borusunun efektif ısıl iletkenlik

değerlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın sebepleri, girintili oluk yapısının daha fazla ısı taşıma ve girintili oluklara sahip ısı borusunun daha buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kısımları arasında küçük sıcaklık farkları ile çalışmasıdır.

Çizelge 5.19. Girintili ve ikizkenar oluklu ısı borularının aynı operasyon sıcaklığındaki efektif ısı iletkenlik değerleri

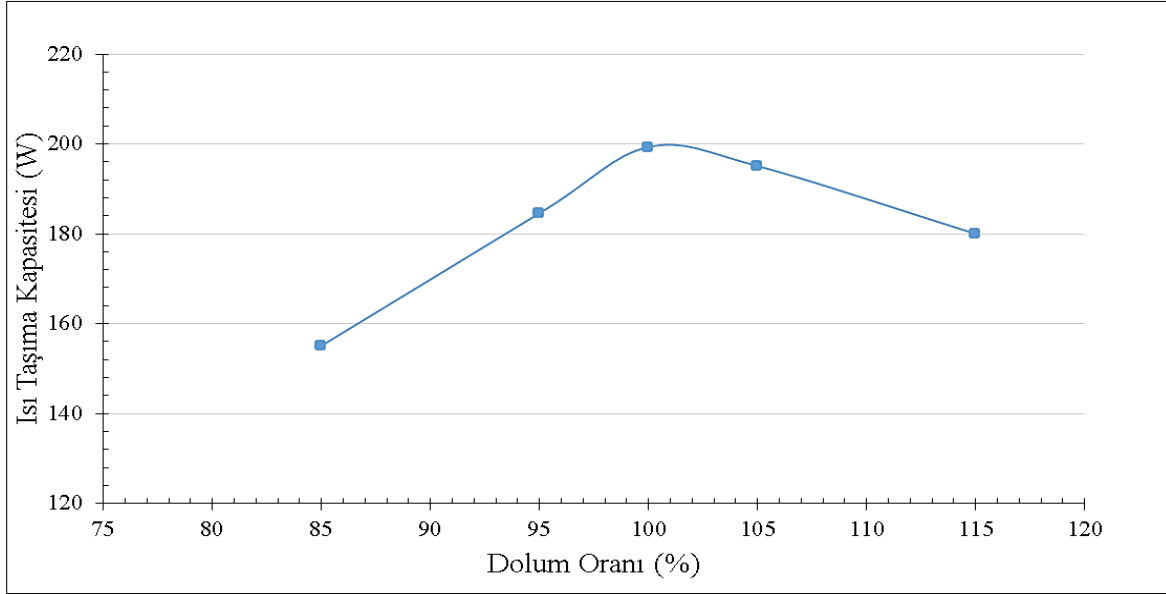
Eğim (mm)	0	2	4	6	8
Girintili Oluk Efektif Isıl İletkenlik (W/m.K)	249434,2	194748,9	151048,9	137045,3	102164,2
İkizkenar Yamuk Oluk Efektif Isıl İletkenlik (W/m.K)	131028,4	124254	71527,63	49607,91	34003,3

5.3. Farklı Dolum Oranlarının Isı Borusu Performansına Olan Etkisi

Isı borularında, çalışma akışkanının farklı dolum oranlarının ısı borusu ısı performansına olan etkilerini belirlemek amacıyla girintili oluklu ısı borusu farklı oranlarda doldurularak yatay konumda performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu oranlar doğrultusunda doldurulan amonyak miktarları Şekil 5.16’de bu testler sonucunda, girintili ısı borusunun farklı dolum oranlarındaki ısı taşıma performansı gösterilmektedir.

Çizelge 5.20. Farklı dolum oranlarındaki amonyak miktarları

Dolum Oranı (%)	%85	%95	%100	%105	%115
Amonyak Miktarı (g)	9,7	10,8	11,4	12	13,1



Şekil 5.16. Girintili oluklu ısı borusunun farklı dolum oranlarındaki ısı taşıma kapasiteleri

Şekil 5.16'ten de görülebileceği üzere en yüksek ısı taşıma kapasitesi ısı borusunun tam dolu olduğu (%100 dolu olduğu) durumda elde edilmiştir. Çizelge 5.21 incelendiğinde, bu seviyenin altında veya üzerinde gerçekleştirilen dolum oranlarında ise borusunun ısı taşıma kapasitesinde azalmalar görülmüştür. Şekil 5.16 incelendiğinde, ısı taşıma performansına görülen bu azalmanın, az dolum yapılan durumlarda fazla dolum yapılan durumlarda olduğundan daha çok olduğu görülmektedir. Fazla dolum yapılan durumlarda ısı taşıma performansının düşmesinin sebebi, ısı borusu içerisindeki fazla akışkanın, yoğunlaştırıcı kısmın sonuna sıkışarak yoğunlaştırıcı kısımdaki bazı olukları iki fazlı ısı transferinden mahrum bırakmasıdır. Ancak bu durumda ısı borusu içerisindeki dolaşımı sağlayacak yeteri kadar akışkan bulunmaktadır. Tam dolu olduğu seviyeden daha az dolum yapılan durumlarda ısı taşıma performansında görülen azalmanın sebebi ise, buharlaştırıcı kısmından olan ısı girişi yükseldikçe, ısı borusu içerisinde yeterli dolaşımı sağlayacak yeterli akışkanın bulunmaması ve yeteri kadar gizli ısı transferi yapılamamasıdır. Bu doğrultuda, tam dolu olduğu seviyeni altındaki dolum oranlarında, üstündeki dolum oranlarına göre ısı taşıma kapasitesinde daha fazla düşüş görülmektedir.

Çizelge 5.21. Girintili oluklu ısı borusunun farklı dolum oranlarındaki ısı taşıma performansları

Dolum Oranı	%85	%95	%100	%105	%115
Isı Taşıma Kapasitesi (W)	153,2	182,5	199,3	192,5	177,9

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Isı boruları günümüzde birçok farklı alanda kullanılabilen etkili ısı transferi cihazlarıdır. Dışardan hidrolik bir güç girişi gerektirmeden iki ucu arasındaki sıcaklık farkı sayesinde, içlerinde bulunan çalışma akışkanının hal değişimlerinden faydalanarak çalışmaktadırlar. Uygun şartlar sağlandığında etkili ısı transfer performanslarına sahip olabilmektedirler. Bu çalışma ile öncelikle ısı boruları ile ilgili temel kavramlara değinilmiş ve ısı borularının çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Daha sonra, çalışma akışkanının dolum oranının, ısı borusunun eğiminin ve oluk yapısının ısı borularında ifade ettikleri anlamlara değinilerek bu parametrelerin ısı borularının ısı performanslarına olan etkileri araştırılmıştır.

Dolum oranının, eğimin ve oluk şeklinin ısı borularının ısı performanslarına olan etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla, bu parametrelerin testlerinin gerçekleştirileceği bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu testlerin gerçekleştirilebilmesi için dolum ve sonlandırma parçalarının ısı borusuna eklenmesi ve ısı borusunun çalışma akışkanı ile doldurulması gibi ısı borularının hazırlık adımlarından bahsedilmiştir. Sonrasında deney düzeneğin hazırlık faaliyetlerinden ve deneysel yaklaşımdan bahsedilerek ısı borularının test edilmesi adımlarına değinilmiştir. Daha sonra, ısı boruların performans parametrelerinden bahsedilerek bu parametrelere gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilere ile nasıl ulaşılacağı anlatılmıştır.

Çalışma akışkanının dolum oranının, ısı borularının ısı taşıma performanslarını belirleyebilmek amacıyla girintili oluklu ısı borusu, %85, %95, %100, %105 ve %115 olmak üzere beş farklı oranda doldurularak yatay konumda (0 mm eğimde) performans testlerine tabii tutulmuştur. Eğimin ısı borularının performanslarına olan etkilerini belirleyebilmek amacıyla ise girintili ve ikizkenar yamuk oluklara sahip ısı boruları %100 doluluk oranlarında, 0 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm eğim değerlerinde performans testleri gerçekleştirilmiştir. Yer yüzü koşullarında gerçekleştirilen eğim testlerinden elde edilen verilerle, oluklu ısı borularının uzay performansları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonrasında, girintili ve ikizkenar yamuk oluklu ısı borularında gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilerle, bu oluk yapıların kıyaslamaları yapılmıştır.

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

- Girintili oluklu ısı borusuna %85, %95, %100, %105 ve %115 oranlarında amonyak doldurularak, çalışma akışkanının dolum oranının ısı borularının performanslarına olan etkileri belirlenmiştir. %100 dolum oranında 199,25 W olan ısı taşıma performansı, sırasıyla, %85, %95, %105 ve %115 dolum oranlarında sırasıyla, 153,2 W, 182,5 W, 192,5 W ve 177,9 W olarak elde edilerek, ısı borularının daha fazla veya daha az doldurmasının ısı taşıma performansını azalttığı görülmüştür.
- Çalışma akışkanının daha az doldurulduğu %85 ve %95 dolum oranlarında ısı taşıma performansı %23,11 ve %8,4 oranlarında azalmıştır. Fazla dolum yapıldığı %105 ve %115 dolum oranlarında ise %3,4 ve %10,7 oranlarında azalmıştır. Fazla dolum yapılan durumlarda meydana gelen bu azalmanın sebebi fazla çalışma akışkanın, yoğunlaştırucu kısmına sonuna çökerek bu bölgenin performansını, dolayısıyla ısı borusunun performansını düşürmesidir. Isı taşıma kapasitesinde, az dolum yapılan durumlarda meydana gelen azalmanın sebebi ise, ısı borusunun ısı yükünü karşılayabilecek seviyede dolaşım gerçekleştirecek çalışma akışkanı bulunamamasıdır. Bu sebeple ısı taşıma performansında, daha az dolum yapılan seviyelerde daha fazla dolum yapılan seviyelere göre daha fazla düşüş gözlemlenmiştir.
- Girintili ve ikizkenar yamuk oluklara sahip ısı borularının, 0 mm (yatay konum), 2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm eğim seviyelerinde performansları test edilmiştir. Bu testler sonucunda, ısı borularının ısı taşıma performanslarının da eğimin artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Girintili oluklara sahip ısı borusunda bu azalma, 0 mm eğim değerine göre, 2 mm eğim değerinden 8 mm eğim değerine doğru sırasıyla, %15,1, %28,3, %43,6, ve %56,6 oranlarında meydana gelmiştir. İkizkenar yamuk oluklara sahip ısı borusunda ise bu azalma, %15,3, %29,1, %42,8 ve %56,4 oranlarında gerçekleştiği görülmüştür.
- Eğim artışı ile ısı borularının ısı taşıma performanslarına meydana gelen azalma doğrultusunda, ısı boruların efektif ısıl iletkenliklerinde de azalmanın meydana geldiği görülmüştür.

- Yeryüzü koşullarında gerçekleştirilen testler ile ısı borularının uzay koşullarındaki performanslarını tahmin edebilmek amacı ile eğim grafikleri çizilmiştir. Bu eğim grafiklerinde, düşük eğim seviyelerinde (0 – 2 mm arası), çalışma akışkanının yerçekimi etkilerinden dolayı çökmesi nedeni ile ısı taşıma performanslarının olması gerekenden fazla belirlendiği görülmüştür. Grafik üzerinde daha yüksek eğim seviyelerinde (2 – 8 mm) gerçekleştirilen testlerden elde edilen doğrular ile yapılan lineer regresyon çalışması ile bu fazla hesaplamanın girintili oluklu ısı borusunda 2 W, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunda ise 4 W olduğu belirlenmiştir.
- Her bir ısı boru için eğim grafiklerinin çizilmesi ile bu ısı boruna ait statik fitil yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Bu değer, fitil yapısının oluşturduğu kapiler kuvvetlerin kendisine zıt yönde etki eden kuvvetlere eşit olduğu ve böylece ısı taşıma kapasitenin 0 olduğu eğim değeridir. Bu değer hesaplanmasının ardından ısı borularının çalışma sıcaklıklarındaki amonyağın yüzey gerilim katsayısı ve sıvı fazının öz kütleleri belirlenerek bu değerler yardımıyla ısı borularının fitil yükseklik faktörleri elde edilmiştir. Fitil yükseklik faktörü ve statik fitil yükseklik faktörü değerlerin de girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapılarının efektif kapiler yarıçap değerleri, sırasıyla, 0,483 mm ve 0,379 mm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda ise girintili ve ikizkenar yamuk oluk yapılarının ısı borusunun içerisinde meydana getirdikleri kapiler basınç değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, girintili ve ikizkenar yamuk şeklindeki oluk yapıları için, sırasıyla, 82,7 N/m² ve 79,2 N/m² olarak elde edilmiştir.
- Girintili oluklu ısı borusunda gerçekleştirilen eğim testlerinde, her bir oluğun taşıdığı ısı miktarının (ısı taşıma faktörü ile ikizkenar yamuk oluklu ısı borusunun çalışma sıcaklığındaki elde edilen değerler ve 0 mm eğim değerinden 8 mm eğim değerine doğru) 10,5 W, 8,9 W, 7,5 W, 6,0 W ve 4,5 W olduğu görülmüştür. İkizkenar oluklu ısı borusunda ise 8,6 W, 7,3 W, 6,1 W, 4,9 W ve 3,8 W olduğu görülmüştür. Girintili ve ikizkenar yamuk oluk yapıların ısı taşıma performansları kıyaslandığında, girintili oluk yapısının, ikizkenar yamuk oluk yapısına göre her bir eğim değeri için oluk başına %18 daha fazla ısı taşıdığı görülmüştür. Ancak, aynı dış ve iç çap değerlerine sahip olan ısı borularında, daha fazla ikizkenar yamuk oluk yerleştirilebildiğinden ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu toplamda daha fazla ısı taşımıştır.

Bu çalışma ile oluklu fitil yapılarına sahip ısı borularında, dolum oranının, eğimin ve oluk şeklinin, ısı borularının ısı performanslarına olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilebilecek gelecek çalışmalara dair öneriler, aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

- Isı boruları, adyabatik kısımlarından farklı açılarda bükülerek, kullanımlarında sıklıkla karşılaştıkları bu durumun oluk yapıları ve ısı taşıma performansları üzerine olan etkileri araştırılabilir.
- Isı borularının performansları, farklı operasyon sıcaklıklarında ve farklı çalışma akışkanları kullanılarak araştırılabilir.
- Isı boruları farklı operasyon sıcaklıklarında kurutularak, sıvı-duvar arasındaki temas açısı amonyak için farklı sıcaklıklarda bulunabilir.
- Bu çalışma ile gerçekleştirilenler araştırmalar, oluklu fitil yapılarına ek olarak sinterlenmiş toz ve tel ağ yapılı fitil yapılarında da gerçekleştirilerek, dolum oranının ve eğimin etkileri bu fitil yapıları için de araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Gaugler, R. S. (June 1944). *Heat transfer device*. U.S. Patent 2350348.
2. Grover, G. M., Cotter, T. P. and Erikson, G. (1964). Structures of very high thermal conductivity, *Journal of Applied Physics*, 35(6), 1990-1991.
3. Lefèvre, F., Conrardy, J. B., Raynaud M. and Bonjour J. (2012). Experimental investigations of flat plate heat pipe with screen meshes of grooves covered with screen meshes as capillary structure. *Applied Thermal Engineering*, 37, 95-102
4. Misselhorn, J. E., Brennan, P.J., Thienel, L. and Fleischman, G.L. (June 1987). *Application of heat pipes to a cryogenic focal plane space experiment*. 22nd Thermophysics Conference, Honolulu, Hawaii.
5. Solomon, A. B., Sekar, M. and Yang, S.H. (2016). Analytical expression for thermal conductivity of heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 100, 462-467.
6. Mahdavi, M., Tiari, S., Champheleire, S. D. and Qiu, S. (2018). Experimental study of the thermal characteristics of a heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93, 292-304.
7. Gerner, H. J., Brouwer, H., Groot, Z. and Guo, J. (2018). *Water-filled heat pipes for CubeSat thermal control*. 19th International Heat Pipe Conference (IHPC) and 13th IHPS, Pisa, Italy.
8. Kaya, T. and Garcia, M. (2008). Comparative investigation of operational performance characteristics of axially grooved heat and arterial heat pipes. *Heat and Mass Transfer*, 44, 739-750.
9. Atay, A., Sariaslan, B., Kuşçu, Y. F., Akkuş, Y., Saygan, S., Gürer, A. T., Çetin, B. ve Dursunkaya Z. (2017). *Sinterli ve oluklu ısı borularında kuruma sınırlarının deneysel tespiti*. Ulusal ısı bilimi ve Tekniği Kongresi, Çorum, Türkiye.
10. Schlitt, K.R., Brennan, P.J. and Kirkpatrick, J.P. (1975). Parametric performance of extruded axial grooved heat pipes from 100 to 300 K. *Astronautics and Aeronautics: Heat Transfer with thermal Control Applications*, 39, 215–227.
11. Harwell, W., Kaufman, W., and Tower, L. (1977). *Re-Entrant Groove Heat Pipe*, Proceedings of 12th AIAA Thermophysics Conference, 131-147.
12. Castle, M. R., Thomas S. K. and Yerkes K. L. (2001). The effect of working fluid inventory on the performance of revolving helically grooved heat pipes. *Journal of Heat Transfer*, 123.
13. Edelstein, F. and Kosson, R. (18-20 June 1991). *A high capacity re-entrant groove heat pipe for cryogenic and room temperature space applications*, Space Cryogenics Workshop, Cleveland, OH, USA.
14. Hoa, C., Demolder, B. and Alexandre, A. (2003). Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL SPACE's satellites, *Applied Thermal Engineering*, 23(9), 1099-1108.

15. Lataoui, Z., Cyril, R., Yves, B., Abdelmajid, J. and Daniel P. (May 20-24 2012). *Experimental investigation on the thermal behavior and performance of an axially grooved heat pipe*, 16th International Heat Pipe Conference, Lyon, France.
16. Mozumder, A. K., Akon, A. F., Chowdhury, M. S. H. and Banik, S. C. (2010). Performance of heat pipe for different working fluids and fill ratios, *Journal of Mechanical Engineering*, 41(2), 97-102.
17. Chen, Y., Zhu, W., Wangfa, Zhang, C. and Shi, M. (2010). Thermal characteristics of heat pipe with axially swallow-tailed microgrooves, fluid flow and transport phenomena, *China Journal of Chemical Engineering*, 18(2), 185–193.
18. Anand, A. R., Vedamurty, A. J., Chikkala, S. R., Kumar, D. and Gupta P. P. (2011). Analytical and experimental investigations on axially grooved aluminum-ethane heat pipe. *Heat Transfer Engineering*, 29(4), 410-416.
19. Bertoldo, J., Vlassov, V. V., Cândido, P. A. and Genaro, G. (May 20-24 2012). *Experimental performance comparison of axially grooved heat pipes charged with acetone and ammonia*, 16th International Heat Pipe Conference (16th IHPC), Lyon, France.
20. Wu, S. C., Wang, D., Gao, J. H., Huang, Z. Y. and Chen, Y. M. (2014). Effect of the number of grooves on a wick's surface on the heat transfer performance of loop heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 71, 371-377.
21. Shen, Y., Zhang, H., Xu, H., Yu, P. and Bai, T. (2015). Maximum heat transfer capacity of high temperature heat pipe with triangular grooved wick. *Journal of Central South University*, 22(1), 386-391.
22. Vlassov, V. V., Bertoldo, J., and Santos N. (June 10-14 2018). *A comparative study of performance of heat pipes with rectangular and omega-type grooves*, 19th International Heat Pipe Conference (19th IHPC), Pisa, Italy.
23. Anand, A. R. (2019). Investigations on effect of evaporator length on heat pipe transport of axially grooved ammonia heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 150, 1233-1242.
24. Lataoui, Z., Romestant, C., Bertin, Y., Jemni, A. and Petit, D. (2010). Inverse thermal analysis of the drying zone of the evaporator of an axially grooved heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 562-574.
25. Yang, K., Mao, Y., Cong, Z. and Zhang, X. (2017). *Experimental research of novel aluminium-ammonia heat pipes*. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC, Jinan, China.
26. Faghri, A. Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges, *Front. Heat Pipes*, vol. 5, no. 1, 2014
27. Reay, D. and Kew, P. (2006). *Heat pipe theory, design and applications* (5th Edition), MA: Butterworth-Heinemann.
28. Yang, X., Yan, Y.Y. and Mullen, D. (2012). Recent developments of lightweight, high performance heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 33-44, 1-14.

29. İnternet: Heatpipe Wick Structures Exposed: Sintered, Groove and Mesh. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.frostytech.com%2Farticleview.cfm%3FarticleID%3D2466&date=2018-02-25>, Son Erişim Tarihi: 20.11.2019.
30. Ömür, C., Uygur, A. B., Horuz, İ., Işık, H. G., Ayan, S. and Konar, M. (2018). Incorporation of manufacturing constraints into an algorithm for the determination of maximum heat transport capacity of extruded axially grooved heat pipes, *International Journal of Thermal Sciences*, 123, 181-190.
31. Fleischman, G. L., Chiang T. C. and Ruff, R. D., (June 24-26 1991). *Oxygen heat pipe 0-g performance evaluation based on 1-g tests*, AIAA 26th Thermophysics Conference, Honolulu, Hawaii.
32. Basiulis, A. and Filler, M., (April 26-28 1971). *Operating Characteristics and Long-Life Capabilities of Organic Fluid Heat Pipes*, AIAA 6th Thermophysics Conference, Tullahoma, U.S.A.
33. Tarau, C., Anderson, W., and Peters, C., *Thermal Management System for Long-Lived Venus Landers*, 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference, International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC).
34. Cotter, T. P., (1984). *Principles and Prospects for Micro Heat Pipes*, Proceedings of 5th International Heat Pipe Conference, Tsukuba, Japan.
35. Babin, B.R., Peterson, G.P. and Wu, D. (1989). *Analysis and testing of a micro heat pipe during steady-state operation*, Proceedings of ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 89-HT-17.
36. Khandekar, S. and Groll, M. (May 2003). Introduction to pulsating heat pipe, *Electronic cooling*, 9(2).
37. İnternet: Diode Heat Pipes. URL: <https://www.1-act.com/resources/heat-pipe-fundamentals/different-types-of-heat-pipes/diode-heat-pipes/>, Son Erişim Tarihi: 30.11.2019.
38. Faghri, A. (2012). Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology, *Journal of Heat Transfer*, 134(12), 123001.
39. İnternet: Spacecraft Thermal Radiators. URL: <https://www.aascworld.com/portfolio/thermal-radiator/>, Son Erişim Tarihi: 30.11.2019.
40. İnternet: Heat Pipe. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pipe#/media/File:Laptop_Heat_Pipe.JPG, Son Erişim Tarihi: 30.11.2019
41. İnternet: Evacuated Tube Collector. URL: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>, Son Erişim Tarihi: 30.11.2019.
42. İnternet: The Thale of Trans-Alaska URL: https://www.eenews.net/special_reports/black_gold/stories/1060058240, Son Erişim Tarihi: 30.11.2019.

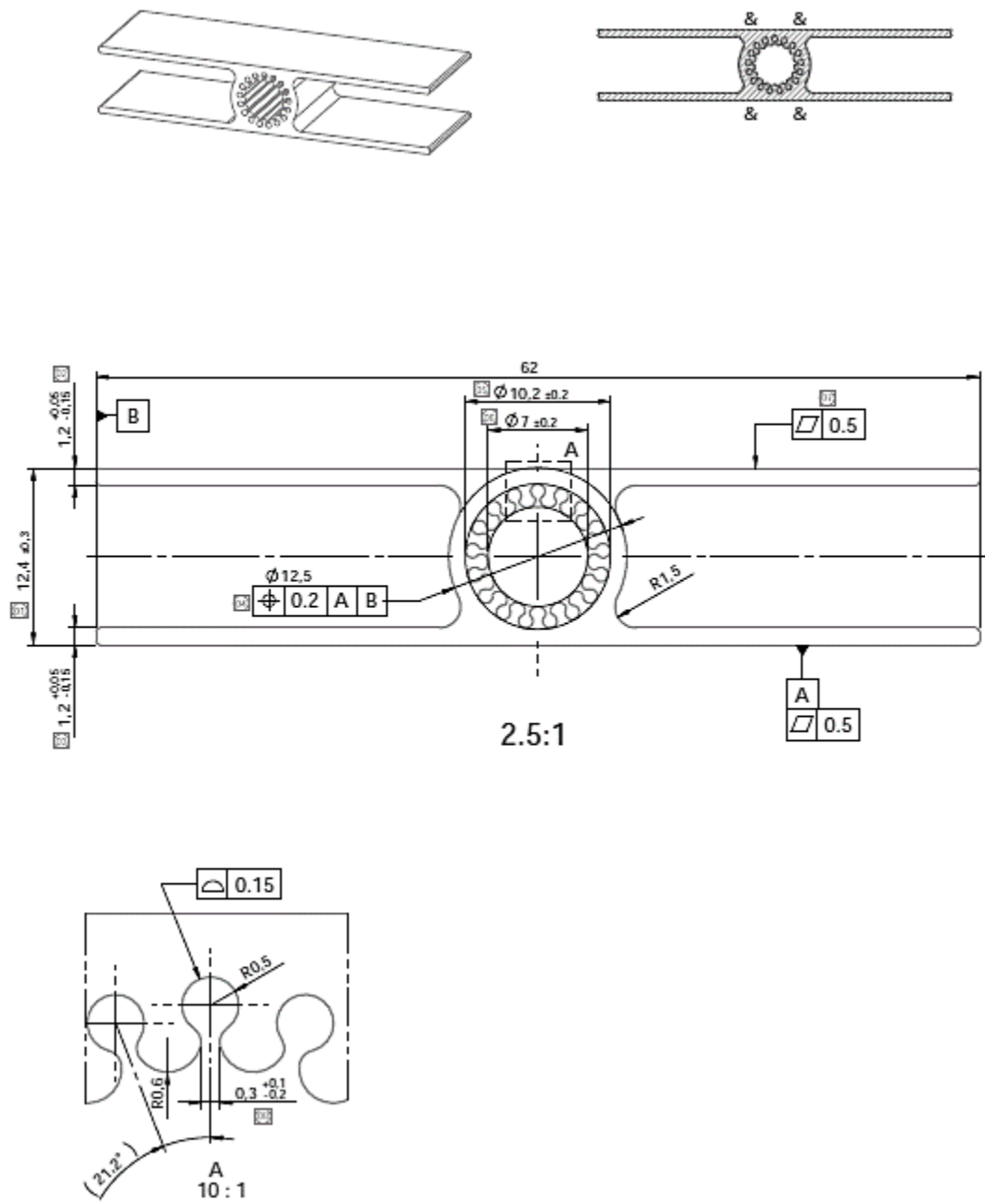
43. Peterson, G. P. (1994). *An introduction to heat pipes: modelling, testing and applications*, NY: John Wiley&Sons.
44. Zohuri, B. (2016). *Heat pipe design and technology, modern applications for practical thermal management* (2nd ed.), Switzerland: Springer, 336-341.
45. Norui, A. B. and Layeghi. M. (2005). A review of concentric annular heat pipes. *Heat Transfer Engineering*, 26(6), 45-48.
46. Ömür, C., Horuz, İ., Uygur, A. B. and Işık, H. G. (2018). *An ammonia filling system*. Patent. 2018/02067
47. İnternet: Claybornlab heat tape specifications URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.claybornlab.com%2Fheat_tape_specifications.html&date=2018-02-25, Son Erişim Tarihi: 19 Kasım 2019.
48. Brennan, J.P. and Kroliczek E. J. (1979). *Heat pipe design handbook*, volume 1, Maryland: B&K Engineering.
49. İnternet: Capillary Limit URL: <https://www.1-act.com/resources/heat-pipe-performance/capillary-limit/>, Son Erişim Tarihi: 01 Aralık 2019.
50. Ömür, C. (2018). Uzak Uygulamaların Kullanılacak Eksenel Oluklu Sabit İletkenlikli Isı Borusu Geliştirilmesi ve Performansının İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
51. Ömür, C., Muratoğlu, O. F. and Horuz, İ. (2019). Methodology and Realization of a Heat Pipe Performance Test in a Thermal Vacuum Chamber. *Journal of Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 12(2), 137-144.
52. Faghri, A. (1995). *Heat pipe science and technology*. Washington, DC: Taylor & Francis
53. Chi, S. W. (1976). *Heat pipe theory and practice*. New York: McGraw-Hill.
54. Tillner-Roth, R., Harms-Watzenberg, F. and Baehr, H. D. (1993). Eine neue fundamentalgleichung für ammoniak, *DKV-Tagungsbericht*, 20(2), 167-181,
55. Liley, P. and Desai, P. (1993). Thermophysical properties of refrigerants. *SI ed. ASHRAE*, 259-267.
56. Haar, L. and Gallagher, J.S. (1978). Thermodynamic Properties of Ammonia, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 7(3), 635-792.
57. Kline, S.J. and McClintock, F. A. (1953). Describing the uncertainties in single sample experiments. *Mechanical Engineering*, 3-8.

EKLER

EK-1. Amonyagın termo-dinamik özellikleri [48]

Temp. °C	Pressure bar	Specific volume		Free energy G/RT	Internal energy		Enthalpy		Latent heat J/g	Entropy	
		Liquid cm ³ /g	Vapor cm ³ /g		Liquid J/g	Vapor J/g	Liquid J/g	Vapor J/g		Liquid J/g·K	Vapor J/g·K
-6.00	3.413	1.54637	359.53	-23.68	-790.92	369.68	-790.39	492.39	1282.7837	5.5944	10.3962
-5.00	3.549	1.54955	346.48	-23.66	-786.36	370.57	-785.81	493.54	1279.3419	5.6115	10.3825
-4.00	3.689	1.55276	334.00	-23.64	-781.78	371.44	-781.20	494.67	1275.8710	5.6285	10.3689
-3.00	3.834	1.55600	322.06	-23.62	-777.20	372.30	-776.60	495.78	1272.3871	5.6455	10.3554
-2.00	3.983	1.55926	310.62	-23.61	-772.61	373.15	-771.99	496.89	1268.8743	5.6625	10.3421
-1.00	4.137	1.56254	299.68	-23.59	-768.02	373.99	-767.37	497.97	1265.3476	5.6794	10.3288
-0.00	4.295	1.56585	289.20	-23.57	-763.42	374.82	-762.75	499.05	1261.7921	5.6963	10.3157
1.00	4.458	1.56919	279.16	-23.55	-758.82	375.64	-758.12	500.10	1258.2217	5.7131	10.3026
2.00	4.626	1.57255	269.54	-23.54	-754.21	376.45	-753.48	501.14	1254.6224	5.7299	10.2897
3.00	4.799	1.57594	260.32	-23.52	-749.60	377.25	-748.84	502.17	1251.0074	5.7466	10.2768
4.00	4.976	1.57936	251.47	-23.50	-744.97	378.04	-744.19	503.18	1247.3635	5.7633	10.2640
5.00	5.159	1.58281	242.99	-23.49	-740.35	378.81	-739.53	504.17	1243.7030	5.7800	10.2513
6.00	5.347	1.58628	234.85	-23.47	-735.71	379.58	-734.86	505.15	1240.0135	5.7966	10.2387
7.00	5.540	1.58979	227.03	-23.45	-731.08	380.33	-730.20	506.11	1236.3064	5.8132	10.2262
8.00	5.738	1.59332	219.53	-23.44	-726.43	381.08	-725.52	507.05	1232.5702	5.8298	10.2138
9.00	5.942	1.59688	212.33	-23.42	-721.78	381.81	-720.83	507.98	1228.8155	5.8463	10.2015
10.00	6.152	1.60048	205.41	-23.41	-717.12	382.53	-716.14	508.89	1225.0316	5.8628	10.1892
11.00	6.367	1.60410	198.76	-23.39	-712.46	383.24	-711.44	509.79	1221.2283	5.8792	10.1770
12.00	6.588	1.60776	192.37	-23.38	-707.79	383.94	-706.73	510.66	1217.3955	5.8956	10.1649
13.00	6.814	1.61145	186.22	-23.36	-703.12	384.62	-702.02	511.52	1213.5494	5.9120	10.1529
14.00	7.047	1.61517	180.31	-23.35	-698.44	385.29	-697.30	512.36	1209.6596	5.9283	10.1410
15.00	7.286	1.61892	174.62	-23.34	-693.75	385.95	-692.57	513.18	1205.7555	5.9446	10.1291
16.00	7.531	1.62271	169.15	-23.32	-689.06	386.60	-687.84	513.99	1201.8214	5.9609	10.1173
17.00	7.782	1.62653	163.88	-23.31	-684.36	387.23	-683.09	514.77	1197.8652	5.9771	10.1056
18.00	8.040	1.63039	158.81	-23.29	-679.65	387.85	-678.34	515.54	1193.8780	5.9934	10.0939
19.00	8.304	1.63428	153.93	-23.28	-674.94	388.46	-673.58	516.28	1189.8689	6.0095	10.0823
20.00	8.575	1.63821	149.22	-23.27	-670.22	389.06	-668.82	517.01	1185.8284	6.0257	10.0708
21.00	8.852	1.64218	144.69	-23.26	-665.50	389.64	-664.04	517.72	1181.7639	6.0418	10.0593
22.00	9.136	1.64618	140.32	-23.24	-660.76	390.21	-659.26	518.41	1177.6682	6.0578	10.0479
23.00	9.427	1.65022	136.11	-23.23	-656.03	390.76	-654.47	519.08	1173.5475	6.0739	10.0366
24.00	9.726	1.65430	132.04	-23.22	-651.28	391.30	-649.67	519.73	1169.3951	6.0899	10.0253
25.00	10.031	1.65842	128.13	-23.21	-646.53	391.82	-644.86	520.35	1165.2167	6.1059	10.0140
26.00	10.344	1.66258	124.35	-23.20	-641.77	392.33	-640.05	520.96	1161.0062	6.1218	10.0028
27.00	10.664	1.66678	120.70	-23.18	-637.00	392.83	-635.22	521.54	1156.7686	6.1377	9.9917
28.00	10.991	1.67102	117.18	-23.17	-632.23	393.31	-630.39	522.11	1152.4983	6.1536	9.9806
29.00	11.327	1.67531	113.78	-23.16	-627.45	393.78	-625.55	522.65	1148.1999	6.1695	9.9696
30.00	11.669	1.67964	110.49	-23.15	-622.66	394.23	-620.70	523.17	1143.8681	6.1853	9.9586
31.00	12.020	1.68400	107.32	-23.14	-617.87	394.66	-615.84	523.67	1139.5072	6.2011	9.9477
32.00	12.379	1.68842	104.26	-23.13	-613.06	395.08	-610.97	524.14	1135.1123	6.2169	9.9368
33.00	12.745	1.69288	101.30	-23.12	-608.25	395.48	-606.10	524.59	1130.6872	6.2327	9.9259
34.00	13.120	1.69739	98.44	-23.11	-603.44	395.86	-601.21	525.02	1126.2273	6.2484	9.9151
35.00	13.503	1.70194	95.67	-23.10	-598.61	396.23	-596.31	525.42	1121.7361	6.2641	9.9043
36.00	13.895	1.70654	92.99	-23.09	-593.78	396.58	-591.41	525.80	1117.2092	6.2798	9.8936
37.00	14.295	1.71119	90.40	-23.08	-588.94	396.92	-586.49	526.16	1112.6499	6.2954	9.8829
38.00	14.704	1.71589	87.90	-23.07	-584.09	397.23	-581.57	526.49	1108.0542	6.3111	9.8722
39.00	15.122	1.72064	85.48	-23.06	-579.24	397.53	-576.63	526.79	1103.4248	6.3267	9.8616
40.00	15.548	1.72544	83.13	-23.05	-574.37	397.81	-571.69	527.07	1098.7579	6.3422	9.8510
41.00	15.984	1.73030	80.86	-23.04	-569.50	398.07	-566.73	527.32	1094.0563	6.3578	9.8404
42.00	16.428	1.73521	78.66	-23.03	-564.62	398.31	-561.77	527.55	1089.3161	6.3733	9.8298
43.00	16.882	1.74017	76.54	-23.02	-559.73	398.53	-556.79	527.75	1084.5398	6.3888	9.8193
44.00	17.346	1.74519	74.47	-23.01	-554.83	398.74	-551.80	527.92	1079.7241	6.4043	9.8088
45.00	17.819	1.75027	72.48	-23.01	-549.92	398.92	-546.81	528.06	1074.8708	6.4198	9.7983
46.00	18.301	1.75540	70.54	-23.00	-545.01	399.08	-541.80	528.18	1069.9769	6.4353	9.7879
47.00	18.793	1.76060	68.66	-22.99	-540.08	399.22	-536.77	528.27	1065.0440	6.4507	9.7774
48.00	19.296	1.76585	66.84	-22.98	-535.15	399.34	-531.74	528.33	1060.0692	6.4661	9.7670
49.00	19.808	1.77117	65.08	-22.97	-530.21	399.44	-526.70	528.36	1055.0541	6.4815	9.7566
50.00	20.330	1.77655	63.37	-22.96	-525.25	399.52	-521.64	528.36	1049.9957	6.4969	9.7462
51.00	20.863	1.78200	61.71	-22.96	-520.29	399.58	-516.57	528.32	1044.8954	6.5123	9.7358
52.00	21.406	1.78751	60.10	-22.95	-515.31	399.61	-511.49	528.26	1039.7505	6.5277	9.7254
53.00	21.960	1.79309	58.54	-22.94	-510.33	399.62	-506.39	528.17	1034.5619	6.5430	9.7150
54.00	22.524	1.79875	57.02	-22.94	-505.34	399.60	-501.28	528.04	1029.3272	6.5583	9.7047
55.00	23.099	1.80447	55.55	-22.93	-500.33	399.57	-496.16	527.89	1024.0472	6.5736	9.6943
56.00	23.685	1.81027	54.12	-22.92	-495.31	399.50	-491.03	527.69	1018.7194	6.5889	9.6839
57.00	24.282	1.81614	52.73	-22.91	-490.29	399.42	-485.87	527.47	1013.3445	6.6042	9.6736
58.00	24.891	1.82209	51.38	-22.91	-485.24	399.30	-480.71	527.21	1007.9200	6.6195	9.6632
59.00	25.511	1.82812	50.08	-22.90	-480.19	399.17	-475.53	526.92	1002.4463	6.6348	9.6529
60.00	26.142	1.83422	48.80	-22.89	-475.13	399.00	-470.33	526.59	996.9213	6.6501	9.6425
61.00	26.785	1.84042	47.57	-22.89	-470.05	398.81	-465.12	526.22	991.3452	6.6653	9.6321
62.00	27.440	1.84670	46.36	-22.88	-464.96	398.59	-459.89	525.82	985.7156	6.6806	9.6217
63.00	28.106	1.85306	45.20	-22.88	-459.86	398.35	-454.65	525.38	980.0326	6.6959	9.6113

EK-2. Girintili oluklu ısı borusu teknik resmi



ölçü birimi mm'dir

EK-4. Şerit tipi ısıtıcı katalogu [47]

DESCRIPTION	SILICONE ADHESIVES (-16 SERIES)	ACRYLIC ADHESIVES (-28 SERIES)
• Operating Temperature Range	-100°C to +250°C	-40°C to +150°C
• Outgassing ... TML/VCM	1.047% / .322%	1.000% / .100%
• Adhesion to etched aluminum oz/inch width	25@ +150°C 450@ -100°C	15@ +125°C 50@ -100°C
• Overall Thickness Applied	.025"	.028"
• Dielectric Strength	600 vdc	600 vdc

Note: In applications exposed to weather, water, mechanical abuse or solvents, tapes will require additional protection. If there is any potential for moisture to come in contact with the heat tape, we recommend a ground circuit should be installed between the aluminum top surface of the heating tape and the grounded metal heat sink to which it is applied.

- Determine the length (L) of the heating tape needed to give even distribution of the total wattage (Tp) over the surface of the object to be heated.
- Determine the amount of power necessary for your application. The total wattage (Tp) required to maintain the object to be heated at the desired temperature can be calculated as follows (based on temperature maintenance only. Does not provide for rapid warm-up or heat losses/gains due to fluids in tube):

Flat Surface Heating	Tube and Pipe Heating
$Tp = P \times A \times \Delta T$	$Tp = P \times L_{tube} \times \Delta T$
Where: P = Watts required to maintain temperature per square foot per degree F temperature rise (see table below) A = Heated Area, square feet ΔT = Temperature rise, °F above ambient	Where: P = Watts required per lineal foot of tube per degree F temperature rise (see table below) L = Length of tube, feet ΔT = Temperature rise, °F above ambient

Insulation Thickness	BARE	.5"	1"	2"
P WATTS / SQ. FT. / F	.3	.15	.10	.07

		Tube Diameter			
		1/4"	1/2"	1"	2"
Insulation Thickness	BARE	.10	.13	.21	.4
	1/2"	.07	.09	.13	.20
	1"	.04	.05	.08	.11

- CALCULATE THE OHMS / FOOT OF TAPE**
 $E^2 / Tp \times L$ where:
 E = Your operating voltage.
 Tp = Total from item 2.
 L = Length of tape from item 1.
- CALCULATE WATTS / FOOT OF TAPE**
 Tp / L
- SEE THE DATA TABLE BELOW**
 From the data table select the tape with the approximate ohms/foot as calculated in step "3" and equal or greater maximum watts/foot capacity as calculated in step "4".

EK-4. (devam) Şerit tipi ısıtıcı teknik özellikleri [47]

Specify resistance code letter (A-K), Silicone or Acrylic (16 or 28), and Number of conductors (1,2,4) i.e., H-16-2, B-28-4. Quantity discounts on 500 or more feet of a single type

Width Conductors	1/6" 1		1/4" 2			1/2" 4			
Part Number (Resistance Code)	ohms per ft.	Max. watts per ft.	ohms per ft. see notes		Max. watts per ft.	ohms per ft. see notes			Max. watts per ft.
		(4)	(1)	(2)	(4)	(1)	(3)	(2)	(4)
A-16 or 28	1.9	25	.9	3.8	40	.5	1.9	7.6	70
B-16 or 28	3.2	25	1.6	6.4	40	.8	3.2	12.8	70
C-16 or 28	4.0	23	2.0	8.0	35	1.0	4.0	16.0	62
D-16 or 28	4.9	20	2.4	9.8	30	1.2	4.9	19.6	52
E-16 or 28	7.0	25	3.5	14.0	40	1.7	7.0	28.0	70
F-16 or 28	8.8	23	4.4	17.6	35	2.2	8.8	35.2	62
G-16 or 28	10.8	20	5.4	21.6	30	2.7	10.8	43.2	52
H-16 or 28	13.2	20	6.6	26.4	30	3.3	13.2	52.8	52
J-16 or 28	21.3	13	10.6	42.6	20	5.3	21.3	85.2	32
K-16 or 28	26.8	10	13.4	53.6	16	6.7	26.8	107.2	25

Custom resistances from .11 ohms/ft. to 60 ohms/ft. available upon request.

(1) Ohms/foot with all conductors in parallel connection.

(2) Ohms/foot with all conductors in series connection.

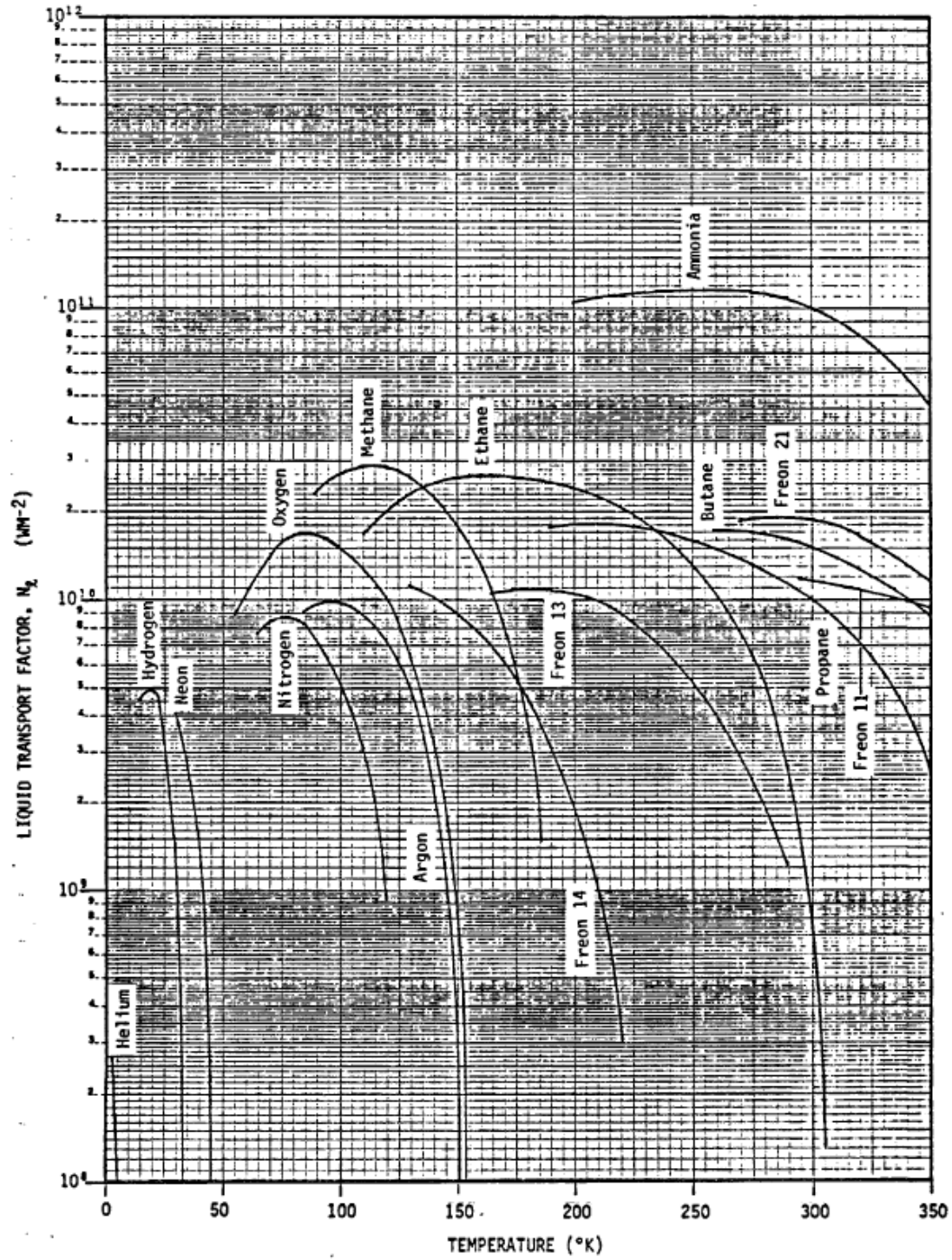
(3) Ohms/foot with conductors in parallel/series connection.

(4) Maximum wattage per lineal foot when applied to a metal heat sink at room temperature. Reduce these ratings linearly to zero watts output at 500°F. Use of Clayborn Terminals is encouraged to insure thermal grounding of Heating Tape along its entire length ([see Terminal Literature -->](#)) Adhesion to heat sink along entire length is important to prevent burnout when tape is used near maximum wattage rating.

EK-5. İzolasyon malzemesi teknik özellikleri

Özellikler	Sembol	Birim	Tanım						Tolerans	Standart	
Malzeme	-	-	Elastomerik Kauçuk Köpük						-	TS EN 14303	
Malzeme Tipi	-	-	İzocamflex Levha	İzocamflex AL	İzocamflex KY	İzocamflex AL-KY				-	-
Kaplama	-	-	Kaplamasız	Al-folyo (18µ, takviyeli, yanmaz)	Kendinden yapışkanlı film	Al-folyo, Kendinden yapışkanlı film				-	-
Yangına Tepki Sınıfı	-	-	B-s3,d0	C-s3,d0					-	TS EN 13501-1	
Hizmet Sıcaklığı	-	°C	-50 / 105			-50 / 85			-	-	
Uzunluk	l	mm	3000 ≤ L ≤ 60000						± 1,5 %	EN 822	
Genişlik	b	mm	1000						± 2 %	EN 822	
Et Kalınlığı	d	mm	6 ≤ d ₀ ≤ 50 *						d ≤ 6	±1,0	EN 823
									6<d≤19	±1,5	
									d > 19	±2,0	
Isıl İletkenlik Beyan Değeri	T	°C	-20	0	20	40	60	80	-	TS EN 12667	
	λ ₀	W/m.K	0,034	0,036	0,038	0,040	0,043	0,045			
Su Buharı Difüzyon Direnci	μ	-	≥ 7000						-	EN 12086	
Yağlara Karşı Direnç	-	-	İyi						-	-	
Hava Koşullarına Direnç	-	-	İyi						-	-	
Esneklik	-	-	Çok İyi						-	-	
Küf Oluşumu	-	-	Yoktur						-	-	
Ambalajlama	-	-	Karton Kutu						-	-	
Diğer Bilgiler		İzocamflex %95'den fazla kapalı hücre yapısına sahiptir. Korozyon ile ilgili olarak DIN 1988/7 standardına uygundur. Ürün %0,2'den az amonyum ve 0,05'den az suda çözünür klor iyonu içerir.									

EK-6. Farklı akışkanlar için sıvı taşıma faktörünün sıcaklığa göre değişimi [56]



EK-7. Elde edilen sonuçların belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda elde edilen verilen belirsizlik analizi yapılmalıdır. Kline ve McClintock [57] belirsizlik için günümüzde de halen geçerli olan “hatanın sahip olabileceği olası bir değer” tanımını yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda iki farklı ölçüm türü vardır. Bunlar tek örnekli ve çok örnekli ölçümlerdir. İdeal olarak ölçümleri farklı cihazlar kullanarak çok kere yapılması gerekmektedir. Ancak çoğu mühendislik uygulamasında belirsizlik istatistiklerini elde etmek için bir deneyi çok kere yapmak mümkün olmamaktadır. Bu doğrultuda yapılan deneyler genellikle tek ter örnekli olmaktadır. Bu çalışmada, tek örnekli deneyler için Kline ve McClintock tarafından ortaya atılan belirsizlik analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Buna göre, ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olursa ($R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$) ve her bağımsız değişkene ait $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ olursa, R ’ni hata oranı w_R aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Bu doğrultuda, eğim testlerinde kullanılan güç kaynağının akım ölçüm belirsizliği %1,0, dolum oranı testlerinde kullanılan güç kaynağının akım ölçüm belirsizliği ise %0,1, direnç ölçümü için kullanılan multimetrenin ölçüm belirsizliği %0,05 ve sıcaklık ölçüm belirsizliği 1°C değerleri için ısı taşıma kapasitesinin (Q_{max}) belirsizlik değeri, aşağıdaki hesaplamalar sonucunda eğim testleri için %3,7, dolum oranı testleri için ise %3,2 olarak elde edilmiştir.

$$Q_{max} = I^2 x R(T)$$

$$w_Q = \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial I} w_I \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial R} w_{R(T)} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_Q}{Q} = \sqrt{4x \left(\frac{w_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{w_R}{R} \right)^2 + \left(\frac{w_T}{T} \right)^2}$$

Efektif ısı iletkenlik katsayısı değeri için, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgelerin uzunluklarının belirsizlikleri, art arda takılan iki ısıl-çiftin arasındaki mesafenin yarısı olan 0,5 cm olarak, D_o değerindeki belirsizlik ise teknik çizimlerden elde edilen 0,1 mm’dir. Bu doğrultuda efektif ısı iletkenlik değeri için belirsizlik oranı aşağıdaki formül yardımıyla girintili oluklu ısı borusu için %11,7, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için ise %5,9 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{w_{k_{eff}}}{k_{eff}} = \sqrt{\left(\frac{w_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{w_{l_{eff}}}{l_{eff}} \right)^2 + 4x \left(\frac{w_{d_o}}{d_o} \right)^2}$$

Fitil yükseklik faktörü çalışma akışkana bağlı bir parametre olup, bu değerdeki belirsizlik sıcaklık ölçümündeki belirsizlik doğrultusunda aşağıdaki formül yardımı ile girintili oluklu ısı borusu için %6,6, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için ise %4,3 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{w_{HL}}{H_L} = \sqrt{\left(\frac{w_{T_\sigma}}{T_\sigma}\right)^2 + \left(\frac{w_{T_{\rho_s}}}{T_{\rho_s}}\right)^2}$$

Statik fitil yüksekliğindeki belirsizlik ise ısı taşıma kapasitesi ve ölçüm belirsizlik değeri %0,003 olan eğim ölçümlerinden gelen belirsizlikler doğrultusunda aşağıda belirtilen formül yardımı ile %3,7 olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{w_{H_s}}{H_s} = \sqrt{\left(\frac{w_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{w_h}{h}\right)^2}$$

Efektif kapiler yarıçap değeri, statik fitil yüksekliği ve fitil yükseklik faktörüne bağlı olup bu değerdeki belirsizlik aşağıdaki formül yardımı ile girintili oluklu ısı borusu için %7,5, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için ise %5,6 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{w_{r_{eff}}}{r_{eff}} = \sqrt{\left(\frac{w_{H_L}}{H_L}\right)^2 + \left(\frac{w_{H_s}}{H_s}\right)^2}$$

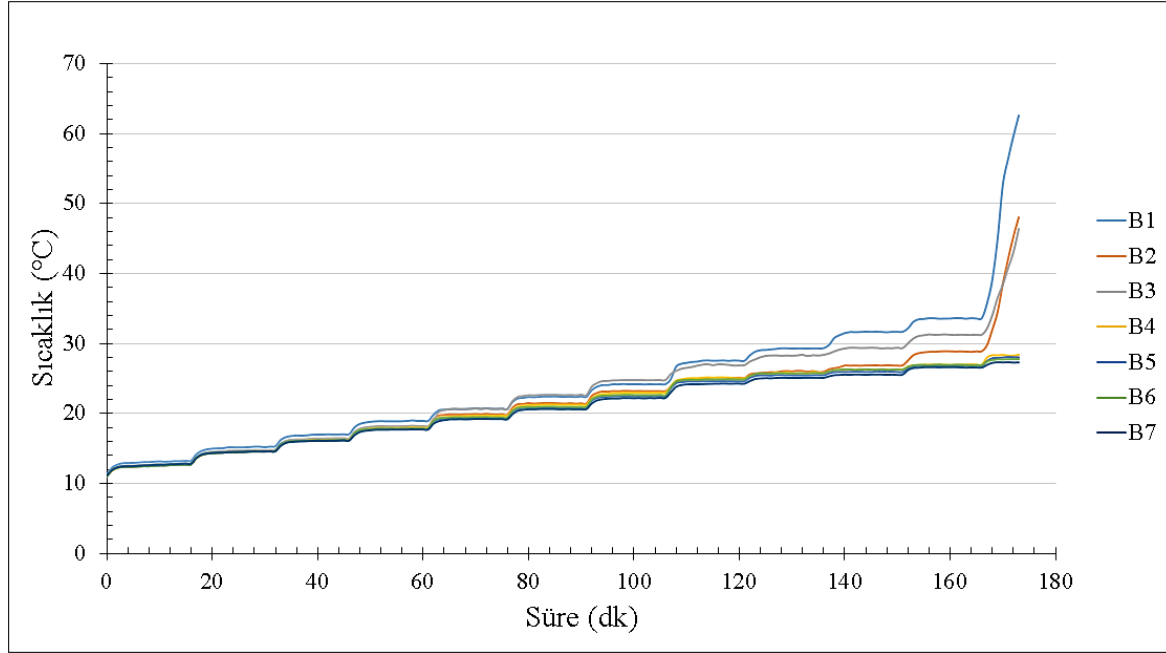
Kapiler basınç değeri ise çalışma akışkanın yüzey gerilim katsayısı ve efektif kapiler yarıçap değerine bağlı olup bu değerlerin belirsizlikleri doğrultusunda aşağıdaki formül yardımı ile girintili oluklu ısı borusu için %8, ikizkenar yamuk oluklu ısı borusu için ise %5,9 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{w_{P_{cap}}}{P_{cap}} = \sqrt{\left(\frac{w_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{w_{r_{eff}}}{r_{eff}}\right)^2}$$

Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen verilerin belirsizlik analizleri

	Belirsizlik Oranı (%)	
	Girintili	İkizkenar Yamuk
Q _{max} (Eğim Testi)	3,7	3,7
Q _{max} (Dolum Oranı)	3,2	3,2
k _{eff}	11,7	5,9
H _L	6,6	4,3
H _s	3,7	3,7
r _{eff}	7,5	5,6
P _{cap}	8	5,9

EK-8. 19 girintili oluklu ısı borusu buharlaştırıcı bölge sıcaklıkları



Güç Süreleri

Süre (dk)	Güç (W)
0 – 16	19,6
17 – 32	39,2
33 – 46	58,7
47 – 61	78,4
62 – 76	97,9
77 – 91	117,4
92 – 106	137,0
107 – 121	156,6
122 – 141	166,4
142 – 166	171,3
167 – 174	176,4

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MURATOĞLU, Osman Furkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.08.1993, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 811 18 00
 E-mail : furkanmuratoglu1@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2011
Lise	Reha Alemdaroğlu Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş.	Isıl Test Mühendisi

Yabancı Dil

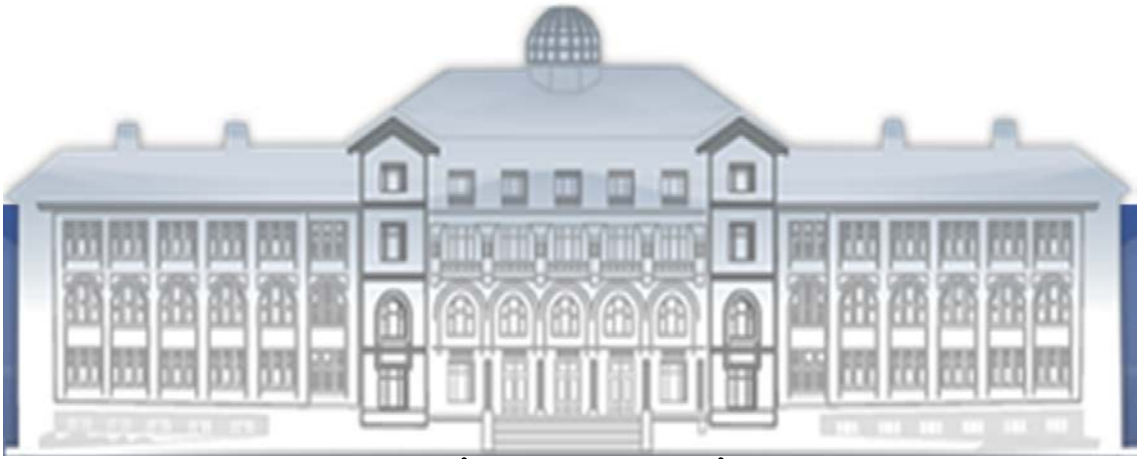
İngilizce

Yayınlar

1. Ömür, C., Muratoğlu, O. F. and Horuz, İ. (2019). Methodology and Realization of a Heat Pipe Performance Test in a Thermal Vacuum Chamber, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 12 (2), 137–144.
2. Muratoğlu, O. F., Ömür, C. And Horuz, İ. (2019). A Methodology to Determine the 0-g Thermal Performance of Heat Pipes via Thermal Performance Tests at 1-g Conditions, 9th Recent Advances in Space Technologies, İstanbul, Turkey.

Hobiler

Kitap okumak, Doğa gezileri



GAZİ GELECEKTİR..