

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI KANAL KONFIGÜRASYONLARININ ATIMLI ISI
BORULARININ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ayşe CANDAN CANDERE

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI KANAL KONFİGÜRASYONLARININ ATIMLI ISI
BORULARININ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Ayşe CANDAN CANDERE

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18/09/ 2024

Tezin Savunma Tarihi : 28/10/ 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN

İkinci Danışman : Doç. Dr. Burak MARKAL

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Farklı Kanal Konfigürasyonlarının Atımlı Isı Borularının Performansı Üzerindeki Etkisinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı kapsamında hazırlanmıştır.

Doktora eğitimim süresince bana rehberlik eden ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Orhan AYDIN’a ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Burak MARKAL’a içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin izleme sürecindeki katkıları ve destekleri için tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Tülin BALI ve Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’e de en samimi teşekkürlerimi sunarım. Tezin deneysel kurulum aşamasında emeği geçen Mak. Yük. Müh. Kübra AKSOY, Mak. Yük. Müh. Ramazan VAROL ve Mak. Müh. Şükrücan TONYALI’ya teşekkür ederim. Test bölgesi imalatında sağladıkları yardımlar için Takım Tezgâhları Laboratuvarı teknik elemanları Hüseyin EKŞİ ve Levent DEMİR’e teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca yanımda olan ve desteğini hissettiren değerli dostlarım Öğr. Üyesi Ayşenur ALTUNKAYA, Dr. Muhammed ÇAVUŞ, Dr. Beyza BOZDEMİR ve Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM’a çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun (TÜBİTAK) 3501 Kariyer Geliştirme Programı (Proje no: 217M341) ve BİDEB 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Tez çalışmamın tamamlanmasında sağladığı finansal destekten dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Ayrıca, University of Brighton’daki çalışmalarımda rehberlik eden Prof. Dr. Marco Marengo ve Dr. Nicolas Miche’ye de teşekkür ederim.

Tez sürecimde her daim yanımda olan sevgili babam Mustafa CANDAN, canım annem Fatma CANDAN ve değerli kardeşlerim Hacı, Hasan ve Hüseyin CANDAN’a en derin teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Ayrıca, en büyük destekçim olan sevgili eşim Bayram CANDERE’ye sonsuz teşekkürler.

Bu tez çalışmasının, gelecekteki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ayşe CANDAN CANDERE

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Farklı Kanal Konfigürasyonlarının Atımlı Isı Borularının Performansı Üzerindeki Etkisinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/10/2024

Ayşe CANDAN CANDERE

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Isı Borusu	3
1.2.1. Isı Borusunun Çalışma Prensibi ve Bileşenleri	6
1.3. Atımlı Isı Borusu	8
1.3.1. Atımlı Isı Borusunun Çalışma Mekanizması	10
1.3.2. Atımlı Isı Borusunun Isı Aktarım Sürecinde Sıvı-Buhar Kabarcığına Etkiyen Kuvvetler	12
1.4. Atımlı Isı Borusunun Çalışma Performansını Etkileyen Parametreler	13
1.4.1. İş Akışkanı.....	14
1.4.2. Geometri.....	15
1.4.3. Dolum Oranı.....	18
1.4.4. Eğim Açısı ve Yerçekimi	19
1.4.5. Isıtma Gücü	19
1.5. Literatür Araştırması	20
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Bakır Tabanlı Atımlı Isı Borusu İçin Deneysel Yöntem Aşamaları	36
2.1.1. Tasarım ve Üretim.....	36
2.1.2. Test Bölümü	40
2.1.3. Deney Düzenekinin Kurulumu.....	44
2.1.4. Sızdırmazlık Testi.....	46
2.1.5. Deney Prosedürü	47

2.1.6. Deneysel Verilerin Analizi.....	47
2.2. Polimer Tabanlı Atımlı Isı Borusu İçin Deneysel Yöntem Aşamaları.....	49
2.2.1. Tasarım ve Üretim.....	49
2.2.2. Test Bölümü ve Deney Düzeneği.....	53
2.2.3. Sızdırmazlık Testi, Gaz Arındırma ve Dolum İşlemi.....	56
2.2.4. Deneylerin Yapılışı ve Hesaplama Yöntemi	58
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
3.1. Bakır Tabanlı Atımlı Isı Borularının Isıl Performans Analizi	60
3.1.1. Üniform Kanal Kesit Geometrisine Sahip PHP'nin Isıl Performansı	60
3.1.2. Farklı Kanal Kesit Geometrisine Sahip Atımlı Isı Borularının Performans Analizi.....	69
3.1.3. Kademeli Kanal Kesit Değişimine Sahip PHP'lerin Performans Analizi	84
3.1.4. Atımlı Isı Borusunun Performans Analizi.....	95
3.2. Polimer Tabanlı Atımlı Isı Borularının Isıl Performans Analizi	99
3.2.1. Sıcaklık ve Basınç Profilleri.....	99
3.2.2. Isıl Direnç	103
3.2.3. Geometri Etkisi.....	105
4. SONUÇLAR.....	108
5. ÖNERİLER.....	110
6. KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

FARKLI KANAL KONFIGÜRASYONLARININ ATIMLI ISI BORULARININ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ayşe CANDAN CANDERE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2024, 119 Sayfa

Bu tezde, farklı kanal konfigürasyonlarına sahip düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performans ve akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, bakır malzeme kullanılarak üretilmiş atımlı ısı boruları için iş akışkanı olarak etanol kullanılmıştır. Deneyler, farklı eğim açılarında (-90° , 0° , 30° , 60° ve 90°), dolum oranlarında (%20, %40, %50, %60 ve %80) ve ısı yüklerinde geometrik olarak beş farklı ısı alıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kademeli kesit değişimi sunan geometrik yapı, dengelenmemiş kılcallık kuvveti etkisiyle salınımlı akış karakteristiklerini iyileştirerek, az sayıda döngüye sahip atımlı ısı borularının yer çekimi desteği olmadan çalışabilmesini sağlamıştır. Kabarcıklı ve taşınımlı kaynama mekanizmaları ile yapıya özgü akış olayları yüksek hızlı kamera desteğiyle incelenmiştir. Bakır atımlı ısı borularına ek olarak stereolitografi (SLA) tekniğiyle üretilen polimerik atımlı ısı boruları da deneysel olarak incelenmiştir. Dikey konumlandırılarda, sabit dolum oranı (%50) ve farklı ısı yükleri altında FC-72 iş akışkanı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bulgular, üniform olmayan kanal konfigürasyonlarının daha iyi ısı transfer performansı, sıvı dağılımı ve çalışma stabilitesi sağladığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Düz plakalı atımlı ısı borusu, Isı performans, Akış görüntüleme, Eklemlili imalat, Kanal geometrisi

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT CHANNEL CONFIGURATIONS ON THE PERFORMANCE OF PULSATING HEAT PIPES

Ayşe CANDAN CANDERE

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2024, 119 Pages

In this thesis, the thermal performance and flow characteristics of flat plate closed loop pulsating heat pipes with different channel configurations are experimentally investigated. Ethanol was used as the working fluid for the pulsating heat pipes manufactured using copper material. The experiments were performed using five different geometrical heat sinks, various inclination angles (-90° , 0° , 30° , 60° , and 90°), filling ratios (20%, 40%, 50%, 60%, and 80%), and heat loads. The geometric structure, featuring a gradual change in cross-sectional area, enhanced the oscillating flow characteristics through unbalanced capillary forces, enabling pulsating heat pipes with a limited number of turns to operate without gravitational support. Flow phenomena were examined using a high-speed camera. The study also involved the experimental analysis of polymeric pulsating heat pipes fabricated through stereolithography (SLA). The experiments were conducted in a vertical position, constant filling ratio (50%), and different heat loads, using FC-72 as the working fluid. The results indicated that non-uniform channel configurations provide better heat transfer performance, fluid distribution, and operational stability.

Key Words: Flat plate pulsating heat pipe, Thermal performance, Flow visualization, Additive manufacturing, Channel geometry.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Elektronik arızaların başlıca nedenleri (He vd., 2021).....	1
Şekil 2. İki fazlı kılcal tahrikli ısı transfer cihazının şematik resmi (Mameli, 2012).....	4
Şekil 3. Termosifon (a) ve ısı borusunun (b) şematik resmi (David Reay vd., 2013).....	5
Şekil 4. Isı borusunun bölümleri ve bileşenleri (URL-1)	7
Şekil 5. Fitil yapıları: Sinterli (a), eksenel oluklu (b) ve örgülü (c) (Supowit, 2016).....	8
Şekil 6. Düz plakalı atımlı ısı borusu (a) ve kılcal tüplü atımlı ısı borusu (b) (Ayel vd., 2021; URL-2)	9
Şekil 7. Atımlı ısı borularının çeşitleri: kapalı döngülü (a), çek valfli kapalı döngülü (b) ve açık döngülü (Kumar ve Abraham, 2024).....	10
Şekil 8. Kapalı döngülü atımlı ısı borusu (a) ve akış deseninin yakınlaştırılmış hali (Marango ve Nikolayev, 2018).....	12
Şekil 9. Sıvı-buhar öbeğine etkiyen kuvvetler (Khandekar, 2010).....	13
Şekil 10. Atımlı ısı borularının tek döngüde kanal genişliklerinin gösterimi: PHP1 (a), PHP2 (b), PHP3 (c), PHP4 (d) ve PHP5 (c)	37
Şekil 11. Üretilen atımlı ısı borusu	38
Şekil 12. Termoelemanların yerleşimi	39
Şekil 13. Atımlı ısı borusunun montajlı (a) ve kesit (b) resimleri	39
Şekil 14. Test bölgesinin genel görünümü.....	41
Şekil 15. Isıtıcı blok (a) ve kartuş ısıtıcılar (b)	42
Şekil 16. Soğutucu plakanın üst (a) ve alt (b) yüzeyleri ile termoeleman bağlantıları (c).....	43
Şekil 17. Isıtıcı blok ve soğutucu plakanın teflon gövdeye yerleşimi	44
Şekil 18. Deney düzeneğinin görünümü: fotoğraf (a) ve şematik resim (b).....	45
Şekil 19. Doldurma / boşaltma portunun görünüşü	47
Şekil 20. Tek bir döngüde PPHP1 (a), PPHP2 (b) ve PPHP3 (c)'ün kanal genişliklerinin şematik gösterimi.....	50
Şekil 21. SLA yazıcı ve kürleme-yıkama makinesi (a), yazıcının şematik gösterimi	52
Şekil 22. SLA yazıcıyla üretilen polimerik atımlı ısı borusu.....	53
Şekil 23. Test bölümü	54

Şekil 24.	Deney düzeneğinin şematik resmi	55
Şekil 25.	Termoelemanların yerleşimi	55
Şekil 26.	Vakum pompası (a) ve sızıntı dedektörü (b)	56
Şekil 27.	Dolum ve gazdan arındırma sisteminin resmi ve şematik gösterimi	57
Şekil 28.	Isıl direncin ısıtma gücü ile değişimi	61
Şekil 29.	PHP1 için $FR = \%50$, $IA = 60^\circ$, 15 W (a), 35 W (b), 60 W (c) koşullarındaki akış görüntüleri.	63
Şekil 30.	PHP1 için her bir dolum oranında, eğim açısının bağlı olarak ısıl direncin uygulanan ısıtma gücü ile değişimi.	65
Şekil 31.	PHP1 için 0° (a), 30° (b), 60° (c) ve 90° (d) eğim açıları için farklı dolum oranlarında ısıl direncin net ısıl güç ile değişimi	66
Şekil 32.	Isıtma gücü 35 W ve eğim açısı 90° koşulları için farklı dolum oranlarına ait ardışık akış görüntüleri (0.2s aralıklarla): $\%80$ (a), $\%60$ (b), $\%40$ (c) ve $\%20$ (d)	67
Şekil 33.	PHP1, PHP2 ve PHP3 için $\%50$ dolum oranında ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklıklarındaki değişimler	71
Şekil 34.	$IA = 90^\circ$, $FR = \%50$, $Q_e = 50$ W koşullardaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)	72
Şekil 35.	$IA = 0^\circ$, $FR = \%50$, $Q_e = 35$ W koşullarındaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)	74
Şekil 36.	$FR = \%80$ 'de PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığındaki değişiklikler	77
Şekil 37.	$IA = 0^\circ$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: $\%20$ (a), $\%40$ (b) ve $\%60$ (c)	78
Şekil 38.	$IA = 30^\circ$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: $\%20$ (a), $\%40$ (b) ve $\%60$ (c)	79
Şekil 39.	$IA = 60^\circ$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: $\%20$ (a), $\%40$ (b) ve $\%60$ (c)	79
Şekil 40.	$IA = 90^\circ$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: $\%20$ (a), $\%40$ (b) ve $\%60$ (c)	80
Şekil 41.	Dolum oranı ve eğim açısının ısıl performans üzerindeki etkileri	81
Şekil 42.	$FR = \%80$, $IA = 90^\circ$ ve $Q_e = 45$ W koşullarındaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)	83
Şekil 43.	PHP4 ile PHP5'in farklı deney koşullarında karşılaştırılması	85
Şekil 44.	$IA = 90^\circ$, $FR = \%20$ çalışma koşullarında PHP5'in akış görüntüleri: 15 W (a), 45 W (b) ve 75 W, ardışık üç görüntü (c)	88
Şekil 45.	Farklı ısıtma güçleri için $FR = \%40$ dolum oranına sahip PHP5'in yatay konumda akış görüntüleri: 15 W (a), 45 W (b) ve 55 W (c)	90
Şekil 46.	Farklı dolum oranlarında eğim açısına bağlı olarak PHP4 ve PHP5'in ısıl performans değişimleri	91

Şekil 47.	Dolum oranının PHP4 ve PHP5'in ısı performansları üzerindeki etkisi: Yatay (a) ve dikey (b).....	93
Şekil 48.	%60 dolum oranı, 90° eğim açısı ve 70 W ısı yük koşulları için PHP5'in akış görüntüsü.....	95
Şekil 49.	Yatay konumlandırmada tüm PHP'lerin dolum oranı açısından kaylaştırılması	96
Şekil 50.	Dikey konumlandırmada tüm PHP'lerin dolum oranı açısından kaylaştırılması	97
Şekil 51.	Sıcaklık ve basınç profilleri: Paralel (a-b), asimetrik (c-d) ve genişleyen-daralan (e-f).....	101
Şekil 52.	Üç farklı PPHP konfigürasyonu için standart sapma değerleriyle birlikte ısı direnç-ısıtma gücü grafikleri	104
Şekil 53.	Üç farklı kanal konfigürasyonuna sahip polimer tabanlı atımlı ısı borularının ısı direnç (a) ve ortalama buharlaşma sıcaklığı (b) grafikleri	105
Şekil 54.	PPHP1 (a), PPHP2 (b) ve PPHP3 (c) için 5 W (i), 10 W (ii) ve 30 W (iii) ısıtma gücündeki akış görüntüleri.....	107

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Etanolün atmosferik basınçtaki termofiziksel özellikleri (Kim ve Kim, 2020).....	46
Tablo 2. Polimerik atımlı ısı borularının kanal boyutları.....	50
Tablo 3. Geometrik ve çalışma parametrelerinin tanımlanması	51
Tablo 4. FC-72'nin atmosferik basınçtaki termofiziksel özellikleri (Kim ve Kim, 2020).....	58



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

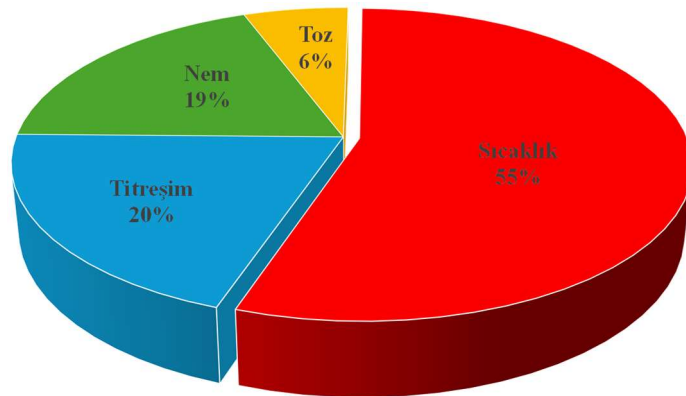
CEMPHP	: Açık Döngülü Mikro Atımlı Isı Borusu
CLMPHP	: Kapalı Döngülü Mikro Atımlı Isı Borusu
FDM	: Eriyik Biriktirmeli Modelleme
FEP	: Florlu Etilen Propilen
FP-CLPHP	: Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusu
FR	: Dolum Oranı
IA	: Eğim Açısı
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
LDPE	: Polietilen
l	: Sıvı
MPHP	: Mikro Atımlı Isı Borusu
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PHP	: Atımlı Isı Borusu
PPHP	: Polimerik Atımlı Isı Borusu
PTFE	: Politetrafloroetilen
SLA	: Stereolitografi
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultraviyole
ν	: Buhar
D_h	: Hidrolik çap [mm]
H_{lv}	: Buharlaşma özgül ısısı [kJ kg^{-1}]
Q_c	: Yoğuşturucu bölümünden soğutucu plakaya transfer edilen ısı güç [W]
Q_e	: Buharlaştırıcı güç kaynağı ile sağlanan ısı güç [W]
R_{th}	: Isıl direnç [$^{\circ}\text{C W}^{-1}$]
T_c	: Yoğuşturucu bölgesinin ortalama sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_e	: Buharlaştırıcı bölgesinin ortalama sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_i	: Soğutma giriş çıkış sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_o	: Soğutma suyunun çıkış sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
$\dot{V}$	: Suyun hacimsel debisi [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
c_p	: Özgül ısı [$\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

$\dot{m}$	: Suyun kütleli debisi [kg s^{-1}]
Bo	: Bond sayısı
D	: Kanal çapı [mm]
I	: Akım [A]
V	: Gerilim [V]
w	: Kanal genişliği [mm]
g	: Yerçekimi ivmesi [m s^{-2}]
α	: Genişleme açısı [$^\circ$]
ρ	: Yoğunluk [kg m^{-3}]
μ	: Viskozite [Pa s]
σ	: Yüzey gerilimi [N m^{-1}]

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektronik endüstrisinde ısı dağıtımına duyulan gereksinim, üretim teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak sürekli bir artış göstermektedir. Özellikle, küçültülmüş bileşenlere sahip yoğun paketlenmiş ünitelerde, yüksek miktarda ısı akısı açığa çıkmaktadır (Karayiannis ve Mahmoud, 2017). Elektronik cihazlarda meydana gelen arızaların başlıca sebepleri arasında yüksek sıcaklık, nem, titreşim ve toz gibi faktörler bulunmakta olup, bu arızaların yaklaşık %55'i ise yetersiz ısıl yönetimden kaynaklanmaktadır (He vd., 2021; Şekil 1). Bu durumun çözülmesi, gelişmiş tasarım, üretim ve ısıl yönetim uygulamaları yoluyla elektronik cihazların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artırmak için gereklidir. Etkili bir ısıl yönetim, elektronik bileşenlerin optimum sıcaklık aralıklarında çalışmasını sağlayarak homojen olmayan ısı dağılımı engeller ve sıcak nokta oluşumu riskini azaltır. Böylece, cihazların uygun sıcaklık seviyelerinde çalışması sağlanarak maksimum performans elde edilebilir. Son yıllarda, nükleer enerji (Mueller ve Tsvetkov, 2021), havacılık (Su vd., 2018), otomotiv (Lu vd., 2020) ve yenilenebilir enerji sistemleri (Wang vd., 2023) gibi sektörlerde yüksek ısı transfer kapasitesine sahip yenilikçi soğutma tekniklerine olan talep hızla artmaktadır.



Şekil 1. Elektronik arızaların başlıca nedenleri (He vd., 2021)

Elektronik bileşenlerdeki yüksek ısı akısını dağıtmak için mikro kanallarda tek ve iki fazlı akışlar (Lee ve Mudawar, 2009; Maghrabie vd., 2023), çarpan jetler (Jones-Jackson

vd., 2021) ve sprey soğutma (Chen vd., 2022) gibi bazı soğutma teknikleri kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemler, fan, pompa veya kompresör gibi enerji tüketen sürücülere gereksinim duymaktadır. Bu durum, titreşim, gürültü, bakım maliyetleri gibi ek zorluklara yol açar. Özellikle dizüstü bilgisayarlar veya diğer taşınabilir hassas elektronik cihazlar, kompakt ve etkili soğutma sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, ısıl güdümlü pasif soğutma teknolojilerinden biri olan ısı borularına ilgi artmaktadır. Yüksek ısı transfer kapasitesi ve nispeten düşük bileşen maliyetleri sayesinde soğutma sistemlerinde tercih edilmektedir.

Isı borusu, fiziksel mekanizması sıvı-buhar faz değişimine dayanan pasif bir soğutma cihazıdır. Tipik bir ısı borusundaki ısı aktarımı, akışkanın buharlaştırıcı bölümünde buharlaşması ve yoğuşturucu bölümünde yoğuşması ile gerçekleşir. Yoğuşan sıvı, fitil yapısının oluşturduğu kılcallık basıncı etkisiyle buharlaştırıcı bölümüne geri döner (Ma, 2015). Isı borusunun performansı, büyük ölçüde, fitilin iş akışkanını yoğuşturucudan buharlaştırıcıya yeniden sirküle etme etkinliğine bağlıdır. Ancak, fitilin kullanılmadığı ısı boruları da mevcuttur. Yüksek performanslı, küçük boyutlu ve kompakt bileşenlere sahip elektronik cihazlarda birim alan başına düşen ısı üretiminde hızlı bir artış gözlenmektedir. Bu doğrultuda, etkin ısı dağılımının sağlanması cihazların performansı, güvenilirliği, çalışma ömrü ve kabul edilebilir sistem sıcaklıklarının korunması açısından önemlidir.

Pasif iki fazlı ısı transfer cihazlarının bir üyesi olan atımlı ısı borusu, yüksek ısı transfer performansı, hızlı ısıl tepkisi, kompakt boyutu ve basit yapısı sayesinde soğutma teknolojisi alanında oldukça ilgi görmektedir. Atımlı ısı borularının tasarım ve çalışma prensibi, geleneksel ısı borularından farklıdır. İş akışkanının bir bölgeden diğerine akmasına yardımcı olan fitil yapısına ihtiyaç duyulmaz (Bastakotia vd., 2018). Çalışma esnasında, akışkanın yoğuşturucuda devamlı yoğuşması ve buharlaştırıcıda devamlı kabarcık oluşumu sürekli değişken bir iç basınç dağılımı oluşturur ve değişken basınç farkı meydana gelir. Kılcal boyutlu kanallarda bulunan sıvı-buhar kabarcıkları, bu basınç farkı sayesinde kendi kendine sürdürülebilir bir salınım hareketi gerçekleştirir. Böylece, akışkanın aktarımı için pompa veya kompresör gibi bir mekanik güç sağlayıcıya ihtiyaç duyulmaz (Ma, 2015).

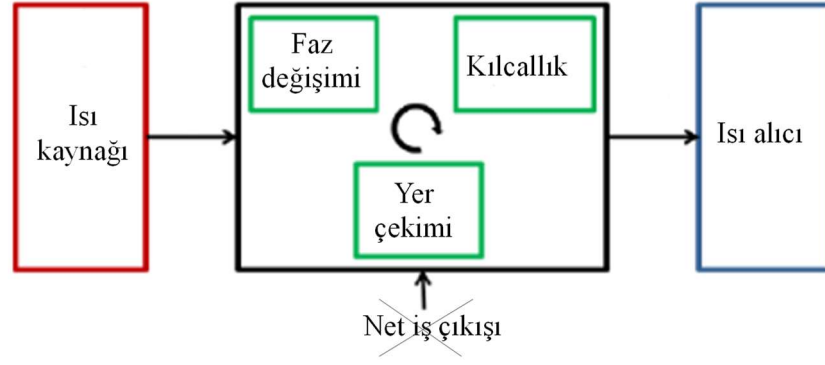
Atımlı ısı boruları genellikle bakır, alüminyum, cam ve silikon gibi sert malzemeler kullanılarak üretilmektedir (Cui vd., 2014; Patel vd., 2017; Liu vd., 2019; Kumar vd., 2019). Ancak, son yıllarda, katlanabilir ekran panelleri ve giyilebilir cihazlar gibi esnek elektroniklerin kullanım alanı giderek genişlemektedir. Bu tür cihazlar için düşük esnekliğe sahip atımlı ısı borularının bir ısı dağıtıcı olarak uygulanması teknik olarak zordur (Lim ve Kim, 2018). Dolayısıyla, ince, esnek ve hafif bir atımlı ısı borusunun üretimi, çeşitli

havacılık, uzay, taşınabilir ve bükülebilir elektronik uygulamalar için önemli bir gereksinim haline gelmiştir. Bu sayede, esnek atımlı ısı boruları, ısı kaynağının ve ısı alıcının farklı düzlemlerde olduğu konfigürasyonlarda kolaylıkla kullanılabilir (Der vd., 2018). Esnek, ince ve hafif bir ısı transfer cihazının geliştirilmesinde, atımlı ısı borusunun taban malzemesinin seçimi kritik bir parametredir. Bu konuda, polimer malzeme üzerine yapılan çalışmalar daha çok ilgi çekmektedir. Polimer malzemeler, esneklik, hafiflik, dayanıklılık, mükemmel korozyon direnci, düşük maliyet ve geri dönüşüm kolaylığı gibi avantajları sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

Atımlı ısı boruları, karmaşık iki faz ısı transfer süreci ve çok değişkenli çalışma mekanizması nedeniyle anlaşılması zor sistemlerdir. Bu alanda yapılan araştırmalar, atımlı ısı borularının fiziksel mekanizmasını, sistemin termo-hidrodinamik özelliklerini ve performansını etkileyen parametreleri anlamaya ve tanımlamaya odaklanarak yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, geniş bir parametre aralığında bakır tabanlı düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performans ve akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı ısı yükleri, dolum oranları ve eğim açıları için eşzamanlı görsel ve ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, esnek atımlı ısı borularının üretiminden kaynaklanan olumsuzlukların giderilmesi amacıyla polimer malzeme tabanlı esnek atımlı ısı borusu imal edilmiş ve farklı kanal konfigürasyonları için ısı testleri uygulanmıştır.

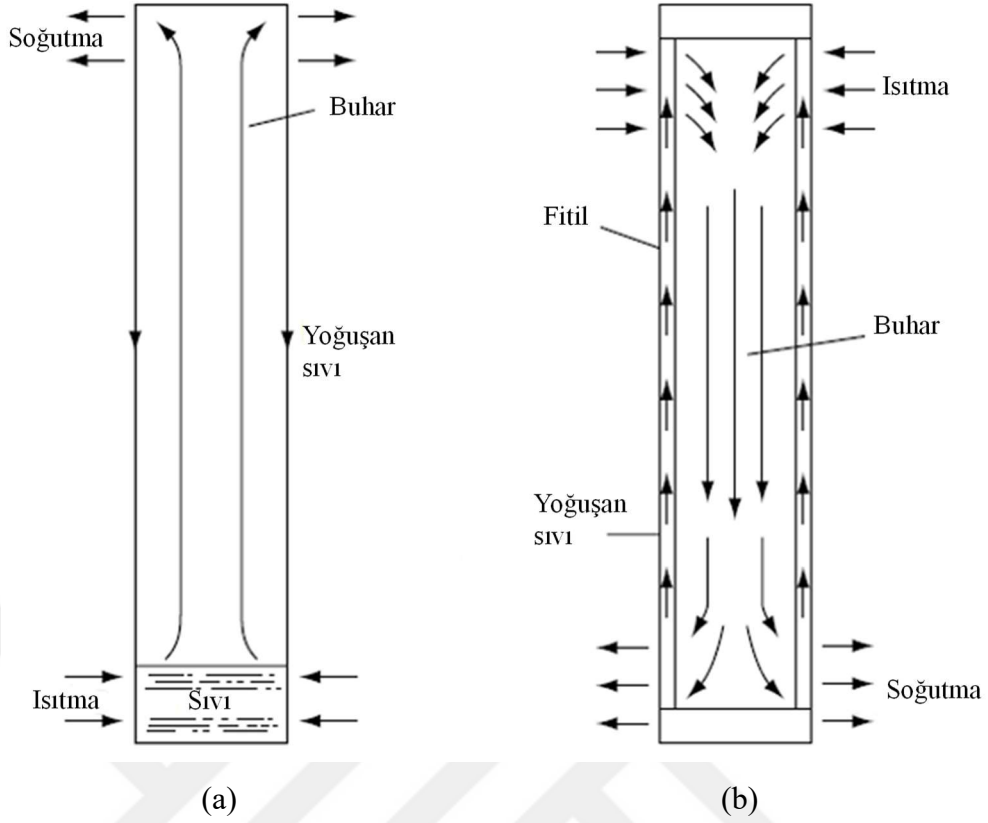
1.2. Isı Borusu

Pasif ısı transfer cihazlarının çalışması genel olarak üç fiziksel olgunun birleşik etkisine dayanmaktadır: faz değişimi, yerçekimi ve kılcallık. Şekil 2'deki şemada görüldüğü üzere uygun sınır koşulları (ısı kaynağı/emici güç ve kapalı hacimden oluşan geometri) sağlandığı sürece, bu fiziksel olaylar devreye girer ve ısı transferi süreci devam eder. Isı borusu tamamen ısı olarak tahrik edilir; ısıtma gücü, buharlaşma/yoğuşma süreçlerini harekete geçirir. Bunun sonucunda oluşan buhar genişmesi, sıvı faz üzerindeki kapiller/yer çekimi etkisi ile sıvı sirkülasyonunu sürdürmek için gereken “pompalama gücünü” sağlar (Mameli, 2012).



Şekil 2. İki fazlı kılcal tahrikli ısı transfer cihazının şematik resmi (Mameli, 2012).

Isı borusu, bazı açılardan termosifona benzemektedir. Termosifon, sızdırmaz bir boru içerisindeki havanın tahliye edilmesi ve belirli bir miktarda akışkanın doldurulup dikey konumda yerleştirilmesi ile çalışır. Borunun alt ucunun ısıtılması, sıvının buharlaşmasına ve buharın borunun soğuk ucuna hareket etmesine neden olur. Yoğuşan sıvı, yerçekimi etkisiyle sıcak uca geri döner. Bu sayede termosifon, buharlaşma sırasında gizli ısıyı kullanarak ısıyı uçtan uca çok küçük bir sıcaklık farkıyla taşıyabilir ve yüksek bir ısıl iletkenlik sergiler. Ancak, yoğuşan sıvının sadece yerçekimi kuvveti desteği ile buharlaştırıcı bölgesine geri dönmesi termosifonun çalışma aralığını sınırlandırır. Isı borusunda ise termosifondan farklı olarak iç yüzeyde fitilli bir yapı bulunur. Fitil sayesinde oluşan kılcallık kuvveti, akışkanın yoğuşturucudan buharlaştırıcıya geri akmasını sağlar. Isı borusu, buharlaştırıcının konumu kısıtlanmadan herhangi bir yönde kullanılabilir. Ancak, buharlaştırıcının en alt konumda olması, yerçekimi kuvvetinin kılcal kuvvetlere yardımcı olmasını sağlar. Şekil 3'te termosifon ve ısı borusunun şematik resimlerine yer verilmiştir.



Şekil 3. Termosifon (a) ve ısı borusunun (b) şematik resmi (David Reay vd., 2013)

Isı boruları, sürücü kuvvet, sıcaklık, şekil veya biçim faktörüne göre farklı türlerde kategorize edilmektedir (Ma, 2015).

Sürücü kuvvete bağlı olan (kılcal tahrikli) ısı boruları:

- Geleneksel ısı boruları, termosifonlar
- Atımlı ısı boruları
- Dönen ısı boruları

Boyut veya biçim faktörüne dayalı ısı boruları:

- Mikro ısı boruları
- Düz plakalı ısı boruları
- Buhar odaları

Sıcaklığa dayalı olan ısı boruları:

- Düşük sıcaklıklı veya kroyojenik ısı borusu
- Yüksek sıcaklıklı veya metal ısı borusu

1.2.1. Isı Borusunun Çalışma Prensibi ve Bileşenleri

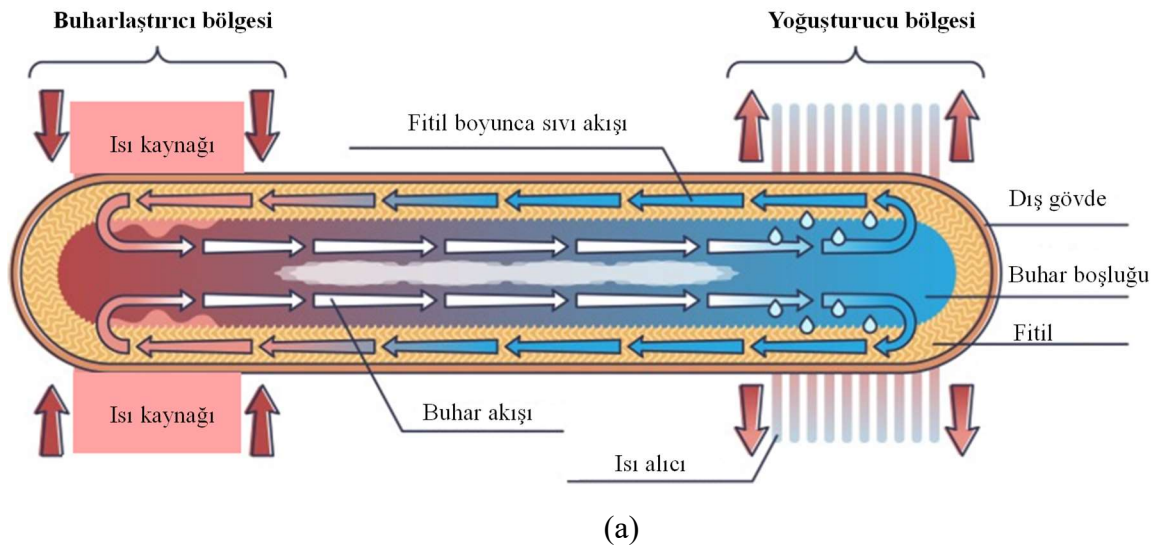
Isı borusu, sızdırmaz bir dış gövde, fitil yapı ve iş akışkanını bileşenlerinden oluşur. Dış gövde, genellikle üç bölüme ayrılır: ısıtının uygulandığı buharlaştırıcı bölümü (ısı kaynağı), ısı transferinin olmadığı adyabatik bölüm ve ısıtının atıldığı yoğuşturucu bölümü (ısı alıcı). Buharlaştırıcı bölümüne uygulanan ısı, konteynırın cidarı boyunca radyal doğrultuda aktarılır ve iş akışkanına ulaşır. Akışkan sıcaklığı, yerel doyma basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığına ulaştığında iş akışkanını buharlaşır ve buharlaştırıcı bölümünde buhar üretimi gerçekleşir. Yoğuşturucu bölümündeki sıcaklık, buharlaştırıcı bölümüne göre daha düşüktür ve bu bölgede oluşan doyma basıncı da buharlaştırıcıdaki doyma basıncından daha düşük seviyededir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki sıcaklık farkının oluşturduğu basınç farkı, buharı buharlaştırıcıdan yoğuşturucu bölümüne doğru yönlendirir ve ısı, ısı alıcıya aktarılır. İş akışkanının yeniden buharlaştırılabilmesi için yoğuşan sıvı, kılcallık kuvveti, yer çekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti veya diğer kuvvetler aracılığıyla buharlaştırıcı bölümüne geri pompalanır (Ma, 2015).

Dış gövdenin temel işlevi, iş akışkanını dış ortamdan izole etmektir. Bu nedenle, sızdırmaz olmalı, cidarları boyunca basınç farkını koruyabilmeli ve ısı transferine izin verebilmelidir. Dış gövde malzemesinin seçimi çeşitli faktörlere bağlıdır: (a) iş akışkanını ile uyumu, (b) ısıl iletkenlik, (c) kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik gibi imalat kolaylığı, (d) gözeneklilik ve (e) ıslanabilirlik. Alüminyum, bakır ve paslanmaz çelik en yaygın kullanılan konteynır malzemeleridir (Zohuri, 2011).

Uygun bir iş akışkanının tanımlanmasındaki ilk husus, çalışma buharı sıcaklık aralığıdır. Belirli bir sıcaklık aralığında, birkaç olası iş akışkanını bulunabilir. Bu akışkanlar arasından en uygun olanını seçmek için, dikkate alınan uygulamanın gereksinimlerine göre çeşitli özelliklerin incelenmesi gerekmektedir.

- fitil ve duvar malzemeleri ile uyumluluk
- yüksek ısıl kararlılık
- fitil ve duvar malzemelerinin iyi ıslatılabilirliği
- buhar basıncının çalışma sıcaklığı aralığında olması
- yüksek gizli buharlaşma ısısı
- yüksek ısıl iletkenlik
- düşük sıvı ve buhar viskozitesi
- yüksek yüzey gerilimi

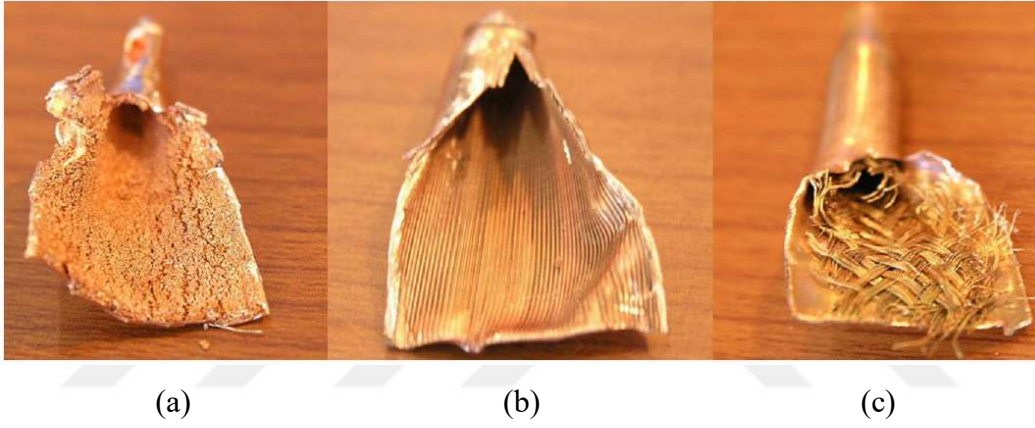
Isı borusunun yerçekimine karşı verimli bir şekilde çalışabilmesi ve yüksek bir kılcal tahrik kuvveti oluşturabilmesi için iş akışkanının yüzey geriliminin yüksek olması istenen bir özelliktir. Yüksek yüzey gerilimine ek olarak, iş akışkanının fitil ve dış gövde malzemesini iyi ıslatması, yani temas açısının küçük olması gerekir. İş akışkanının buhar basıncı, çalışma sıcaklığı aralığında yeterince büyük olmalıdır. Bu, yüksek buhar hızları ve akış kararsızlıklarına yol açabilecek büyük sıcaklık gradyanlarından kaçınmak için önemlidir. Minimum sıvı akışı ile büyük miktarlarda ısı aktarımı sağlamak ve ısı borusu içinde basınç düşüşlerini minimumda tutmak için iş akışkanı yüksek gizli buharlaşma ısısına sahip olmalıdır. Radyal sıcaklık gradyanını en aza indirmek ve fitil veya duvar yüzeyinde kabarcıklı kaynama olasılığını azaltmak için iş akışkanının ısıl iletkenliği de yüksek olmalıdır. Düşük buhar ve sıvı viskoziteli akışkanlar seçilerek akışkan akışına karşı direnç en aza indirilmelidir. İş akışkanının seçimi aynı zamanda, viskoz, sonik, kılcal, sürüklenme ve kabarcıklı kaynama seviyeleri gibi ısı borusunda oluşan ısı akışı sınırlamalarıyla ilgili termodinamik faktörlere de dayanmalıdır (Zohuri, 2011). Şekil 4'te ısı borusunun bölümleri ve bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Isı borusunun bölümleri ve bileşenleri (URL-1)

Isı borusu bileşenlerinden biri olan fitil, genellikle metalden yapılmış mikro gözenekli bir yapıya sahiptir ve ısı borusu gövdesinin iç yüzeyine yerleştirilir. İş akışkanı, fitilin gözenekli yapısındaki boşluklarda bulunur. Fitilin temel işlevi, iş akışkanını yoğusturucu bölümünden buharlaştırıcıya taşımak için kılcal basınç oluşturmaktır. Bu işlevin etkin bir

şekilde sağlanması ve uygun fitil seçimi, genellikle iş akışkanının özelliklerine bağlı olarak çeşitli faktörlere dayanır. Fitilin gözenek boyutu, geçirgenliği ve ısı iletkenliği ısı borusunun çalışma sınırlarını belirler. Fitil tarafından üretilen maksimum kılcallık basıncı, gözenek boyutu küçüldükçe artar. Isı borusunun ısı taşıma kapasitesi fitil kalınlığı artırılarak iyileştirilebilir. Buharlaştırıcıdaki toplam ısıl direnç, fitil içindeki iş akışkanın iletkenliğine de bağlıdır. Ayrıca, fitilin iş akışkanı ile uyumluluğu ve ıslanabilirliği de önemli faktörlerdir (Zohuri, 2011). Fitil yapı, genel olarak, ısı borusu iç yüzeyine tel örgüler, metal köpükler, sinterlenmiş tozlar veya gelişmiş aşındırma ve kaplama teknikleri kullanılarak oluşturulur (Gibbons vd., 2021). Şekil 5’te farklı fitil yapılarına yer verilmiştir.



Şekil 5. Fitil yapıları: Sinterli (a), aksenel oluklu (b) ve örgülü (c) (Supowit, 2016)

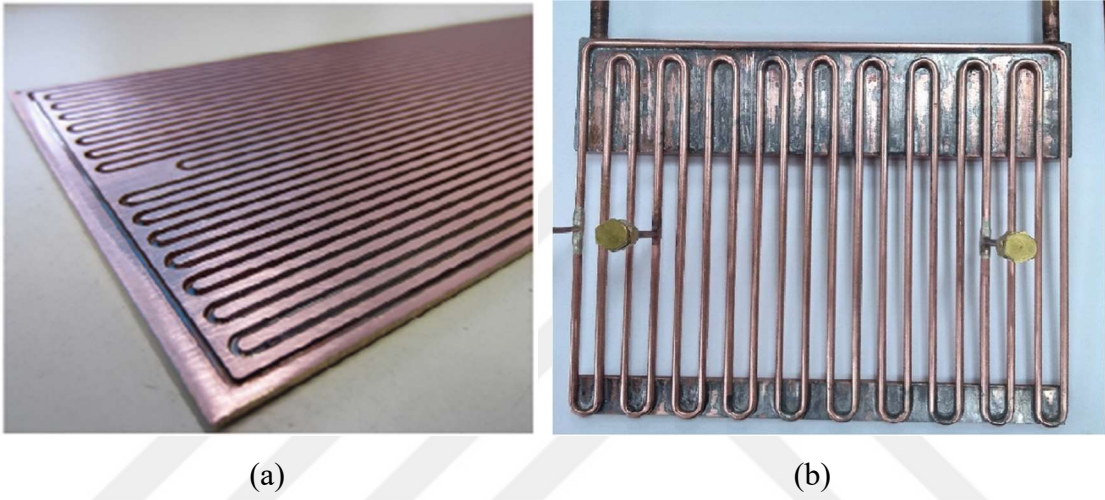
1.3. Atımlı Isı Borusu

Atımlı ısı borusu, ısıl olarak uyarılan atım / salınım hareketi aracılığıyla çalışan bir ısı transfer cihazıdır. İş akışkanın periyodik faz değişimiyle oluşan sıvı ve buhar kabarcıklarının salınım hareketi, akışkan akışını sağlar. Atımlı ısı borularının üretimi iki kategoriye ayrılabilir:

- Kılcal tüplü atımlı ısı borusu: Isı kaynağı ve soğutma alanı etrafında serpantin şeklinde kıvrılan tek bir kılcal tüpten üretilir.
- Düz plakalı atımlı ısı borusu: Serpantin şeklindeki kanalların metal bir plaka üzerine açılması ve bu kanalların ikinci bir plaka ile hava geçirmez şekilde kapatılmasıyla oluşturulur.

Düz plakalı atımlı ısı boruları, kılcal tüplü atımlı ısı borularına göre önemli avantajlar sunar. Kompakt ve hafif yapıları, alan ve ağırlığın kritik faktörler olduğu uygulamalarda

kolaylık sağlar. Düz taban tasarımı, düz ısı kaynakları ile uyumlu çalışarak özellikle elektronik cihazlarda daha iyi ısıl temas ve verimlilik sağlar. Ayrıca, kanallar arasındaki geometrik süreklilik, enine ısıl dirençleri düşürerek genel ısıl performansı artırır. Kare veya dikdörtgen kanallara sahip düz plakalı atımlı ısı borularında, keskin köşeler kılcal oluklar gibi davranarak sıvının buharlaştırıcıya geri akışını kolaylaştırır. Bu durum, özellikle dikey konumlarda kılcal pompalama etkisini iyileştirir (Ayel vd., 2021). Şekil 6’da düz plakalı ve kılcal tüplü atımlı ısı borularının görseli verilmiştir.

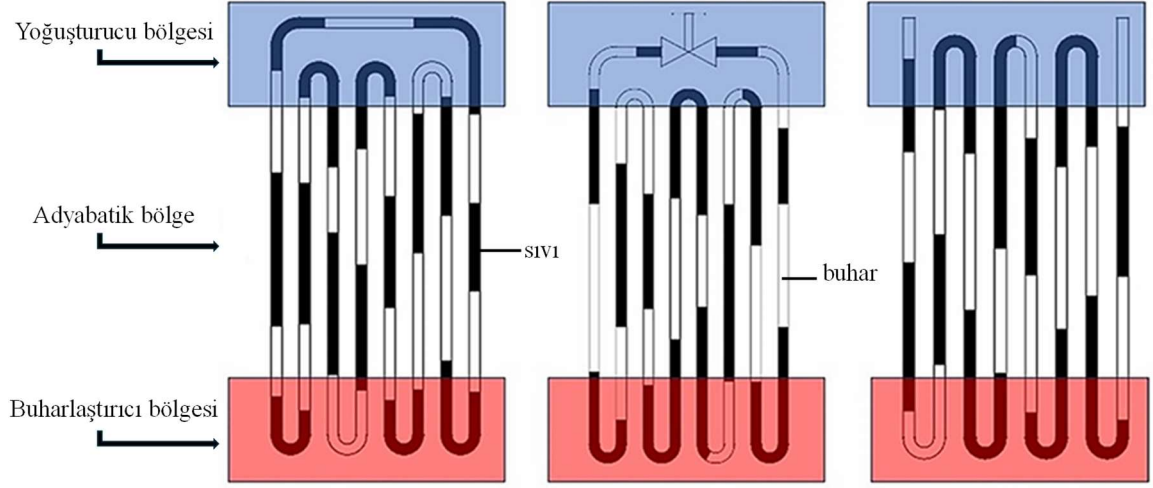


Şekil 6. Düz plakalı atımlı ısı borusu (a) ve kılcal tüplü atımlı ısı borusu (b) (Ayel vd., 2021; URL-2)

Atımlı ısı boruları, genellikle, buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri, atımlı ısı borusunun her iki ucunun sonuna yerleştirilir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinin arasında kalan kısım adyabatik bölümdür. Atımlı ısı boruları, yapısal tasarımlarına göre kapalı döngülü ve açık döngülü olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca, iş akışkanının tek yönlü akışını sağlamak amacıyla, çek valfli kapalı döngülü atımlı ısı boruları da geliştirilmiştir (Han vd., 2016). Şekil 7’de üç farklı yapıdaki atımlı ısı borularının şematik görselleri sunulmuştur. Atımlı ısı borusunda ısıl performansı iyileştirmek için iş akışkanının sirküle edilmesi gereklidir. Bu bağlamda, kapalı döngülü atımlı ısı borusu daha iyi bir ısıl performans sağladığı için araştırmaların büyük çoğunluğu bu tasarıma odaklanmıştır (Chien vd., 2012).

Atımlı ısı boruları, geleneksel ısı borularından farklı olarak; fitilsiz tasarımları, kolay üretim süreçleri, düşük ısıl direnç ve yüksek ısı taşıma kapasitesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, yapısı ve çalışma prensibi gereği, kılcallık ve sürüklenme gibi çalışma

sınırlarından etkilenmezler. Fitilsiz yapıları, özellikle düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularını, minyatürleştirilme ve mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) tabanlı elektronik çiplerle doğrudan entegrasyona uygun hale getirmektedir. Bu durum, modern elektronik cihazlardaki yüksek ısı akısı sorunlarının çözümü açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 7. Atımlı ısı borularının çeşitleri: kapalı döngülü (a), çek valfli kapalı döngülü (b) ve açık döngülü (Kumar ve Abraham, 2024)

1.3.1. Atımlı Isı Borusunun Çalışma Mekanizması

Atımlı ısı boruları, yapısal olarak basit olmalarına rağmen, faz değişimi, akışkan hareketi ve basınç dalgalanmaları gibi faktörlerin etkileşimi nedeniyle oldukça karmaşık bir çalışma mekanizmasına sahiptir (Karimi and Culham, 2004). Atımlı ısı borularının çalışma prensibi, etkili ısı transferine katkıda bulunan birkaç temel mekanizmayı içerir:

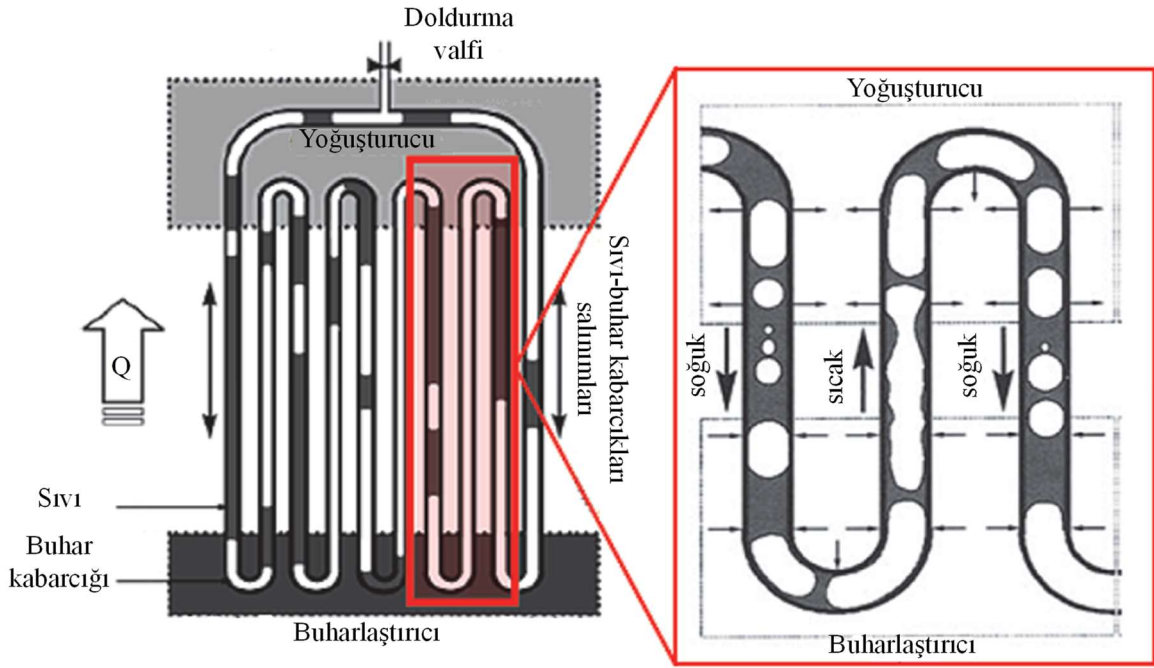
- **Faz Değişimi:** Atımlı ısı borusunun temel çalışma mekanizması, iş akışkanının faz değişimine dayanır. Isı transferi, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgeleri arasında gerçekleşen sıvı-buhar faz değişiminin oluşturduğu doğal salınım hareketiyle gerçekleşir.
- **Basınç Gradyanı:** Buharlaştırıcı bölümüne uygulanan ısı yük, buhar kabarcıklarının oluşumuna ve yüksek basınç neden olur. Yüksek basınç, sıvı ve buhar kabarcıklarını yoğuşturucuya doğru iter. Eş zamanlı olarak, yoğuşturucu bölümündeki düşük sıcaklık ve basınç, yoğuşan akışkanı geri akmaya zorlar. Buharlaştırıcıda oluşan

kabarcıklar, sıvının hareket etmesi için gereken basınç farkını oluşturan pompalama/emme elemanları olarak işlev görür. Dolayısıyla, sıvı ve buhar kabarcıklarının hareketi, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan basınç dalgalanmalarının bir sonucudur (Ma, 2015).

- Kılcal Hareket: Yoğuşan sıvının buharlaştırıcıya geri dönüşü, tüp içindeki kılcal hareketle kolaylaşır. Kılcal yapı, sıvının geri akışını destekleyerek sürekli bir buharlaşma ve yoğuşma döngüsü oluşturur.
- Sıvı ve Buharın Salınımı: Atımlı ısı borusunun tasarımı, tüp içinde buhar kabarcıklarının ve sıvının salınımına izin verir. Bu salınım, itici güçler (basınç farkları) ve geri yükleyici güçler (kılcal hareket) arasındaki etkileşim sonucunda meydana gelir. Buharlaştırıcı bölümünde, buhar kabarcıklarının oluşumu ve hacminin genişlemesi meydana gelir. Yoğuşturucu bölümünde ise sıvının uzaklaştırılmasıyla buhar kabarcıkları yoğuşur ve hacmi azalır. Buhar kabarcıklarının hacminin genişlemesi ve daralması, sıvı ve buhar kabarcıklarının salınım / atım hareketine neden olur.
- Isıl Direnç Yönetimi: Buharlaşma ve yoğuşma ile ilişkili ısı direnç değerleri, atımlı ısı borusunun performans değerlendirmesinde önemli bir rol oynar. Atımlı ısı borusunun efektif çalışması, sıvı ve buhar fazları arasındaki etkili salınım ile gerçekleşir.

Yukarıda belirtilen mekanizmalar bir arada çalışarak atımlı ısı borularının minimum sıcaklık farkları ile büyük miktarlarda ısıyı transfer etmesini sağlar. Bu durum, atımlı ısı borularını elektronik cihazlarda ve diğer alanlarda yüksek performanslı ısıl yönetim uygulamaları için ideal hale getirir. Şekil 8’ de kapalı döngülü bir atımlı ısı borusu ve tüp içerisindeki akış deseninin şematik resmi verilmiştir.

Atımlı ısı borularının çalışma mekanizması nedeniyle ortaya çıkan çalışma limitleri konvansiyonel ısı borularından çok farklıdır. Geleneksel ısı borularının aksine, atımlı ısı borularının kararlı durum basınç dengesine ulaşması mümkün değildir. Gerçek sistemlerdeki doğal karışıklıklar, sistemde basınç dalgalanmalarını artırır (Karimi and Culham, 2004). Atımlı ısı borularında ısı transfer hızı arttıkça, ısıl olarak uyarılan salınım hareketleri de artar. Sistemde sıvı ve buhar kabarcıklarının artan hızı, kapiler tüp veya kanalda hareket eden sıvının uzunluğunu azaltır. Buhar hızı kritik değeri aştığında, buhar tüm sıvıya nüfuz eder ve halkasal akış meydana gelir. Bu durumda, atımlı ısı borusu maksimum ısı taşıma kapasitesine ulaşır (Ma, 2015).



Şekil 8. Kapalı döngülü atımlı ısı borusu (a) ve akış deseninin yakınlştırılmış hali (Marango ve Nikolayev, 2018)

1.3.2. Atımlı Isı Borusunun Isı Aktarım Sürecinde Sıvı-Buhar Kabarcığına Etkiyen Kuvvetler

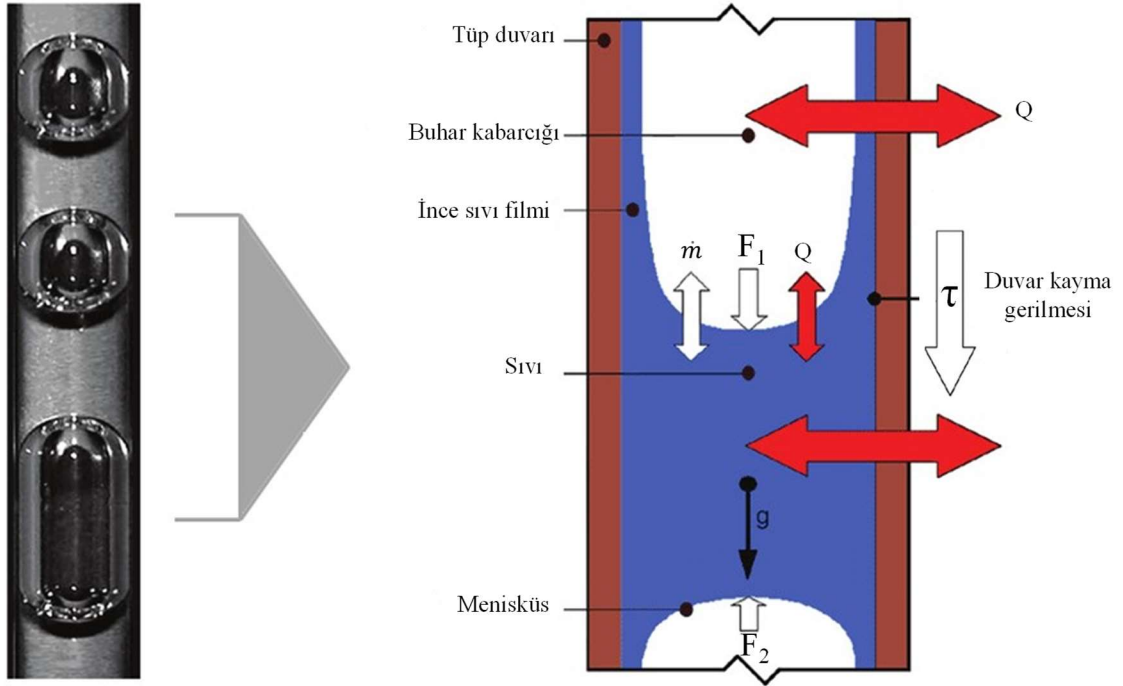
Atımlı ısı borusu içindeki sıvı-buhar kabarcıklarının etkileşimlerini ve ısı aktarımı sürecini etkileyen temel kuvvetler Şekil 9’da verilmiştir.

- Atımlı ısı borusundaki sıvı ve buhar kabarcıkları, yüzey gerilimi etkisiyle şekillenir. Sıvının kenarlarında menisküsler oluşurken, buhar kabarcıklarını çevreleyen ince bir sıvı filmi meydana gelir. Menisküsün temas açısı, ince sıvı filmi kalınlığı ve stabilitesi, seçilen çalışma parametrelerine bağlıdır.
- Sıvı ve buhar kabarcıkları, atımlı ısı borusunun buharlaştırıcı konumuna bağlı olarak, yerçekimi kuvveti doğrultusunda veya belirli bir açıyla hareket eder.
- Sıvı ve buhar kabarcıkları, bitişigindeki komşu sıvı ve buhar kabarcıklarından kaynaklanan (F_1 ve F_2) basınç kuvvetlerine maruz kalır.
- Sıvı ve buhar kabarcıkları, atımlı ısı borusunda hareket ettikçe viskoz dağılımın yanı sıra duvar kayma geriliminden de etkilenir.
- Sıvı ve buhar kabarcıkları, genellikle borunun çevresi boyunca (radyal yönde) ısıyı boru duvarından alabilir ve dışarıya verebilir. Bu, atımlı ısı borusunun çevresindeki

ısı kaynakları veya ısı alıcıları ile gerçekleşen ısı transferini ifade eder. Ayrıca, buhar kabarcıkları borunun uzunluğu boyunca (eksenel yönde) da ısıyı alıp verebilir, yani kabarcıklar borunun bir ucundan diğer ucuna ısı taşır.

- Bir buhar kabarcığı buharlaştırıcı bölgesinde hareket ettiğinde, çevresindeki sıvı film ve bitişik sıvıdan buharlaşma kütle transferi gerçekleşir ve böylece anlık yerel doygunluk basıncı ve sıcaklığı artar ve sisteme pompalama işi sağlar.

Buharlaştırıcı için açıklanan süreçler yoğuşturucuda ters yönde tekrarlanır.



Şekil 9. Sıvı-buhar öbeğine etkiyen kuvvetler (Khandekar, 2010)

1.4. Atımlı Isı Borusunun Çalışma Performansını Etkileyen Parametreler

Atımlı ısı borusu üzerine yapılan araştırmalar, sistemin çalışma mekanizmasını, termo-hidrodinamik özelliklerini ve performansını etkileyen çeşitli parametreleri belirlenmesi ve anlaşılmasına odaklanmıştır. Yang vd.'nin (2009) belirttiği gibi atımlı ısı borusunun işlevselliği oldukça değişkendir ve birçok parametrenin birleşik etkileşimiyle şekillenir. Bu nedenle, iş akışkanının fiziksel özellikleri, geometrik yapı, dolum oranı, eğim açısı ve ısıtma gücü gibi faktörler, atımlı ısı borusunun çalışma karakteristikleri üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, bu parametrelerin

atımlı ısı borusunun kendiliğinden sürdürülen salınımlı iki fazlı akış mekanizmasına ve ısıl performansına olan etkileri aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

1.4.1. İş Akışkanı

Atımlı ısı borusunda kullanılan iş akışkanı, çeşitli çalışma koşulları altında cihazın ısıl performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Dolayısıyla, uygulama alanına ve çalışma durumuna göre uygun bir iş akışkanının seçilmesi gerekir. İş akışkanının, buharlaşma gizli ısısı, kaynama noktası, özgül ısısı, yüzey gerilimi, ısıl iletkenliği ve viskozitesi gibi termofiziksel özellikleri, atımlı ısı borusunun performansında etkili bir rol oynar.

Buharlaşma gizli ısısı ve kaynama noktası yüksek olan akışkanlar, faz değişimi için daha yüksek ısıtma gücü gerektirir. Bu durum, atımlı ısı borusunun yüksek sıcaklıklarda yüksek ısı akılarını yönetmesi gereken uygulamalarda önemli bir faktör olabilir. Czajkowski vd. (2020), 2 kW'a kadar yüksek ısıtma güçleri altında ısıl ve akış performansını incelemek için büyük ölçekli bir atımlı ısı borusu tasarlamıştır. Su, etanol ve aseton gibi iş akışkanlarını kullanmıştır. Tüm çalışma koşulları içinde en kararlı performans, su ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. Düşük ısıl yük uygulamalarında ise yüksek kaynama noktası ve buharlaşma gizli ısısına sahip akışkanlar, buhar kabarcıklarının oluşumunu yavaşlatır ve salınım hareketinin başlamasını geciktirir. Borgmeyer ve Ma (2007) atımlı ısı borusunun su ile yüklendiğinde düşük ısıtma güçlerinde salınım hareketinin oluşmadığını, aynı koşullarda etanol ile yüklendiğinde yüksek genlik ve hızlarda çalıştığını belirtmiştir. Akışkanın buharlaşma gizli ısısının düşük olması, buhar kabarcıklarının hızlı bir şekilde genişlemesine ve daralmasına neden olur ve böylece atım hareketinin başlamasını kolaylaştırır (Yang vd., 2015).

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasında belirli bir akış hızı için iş akışkanının özgül ısısının yüksek olması, daha fazla enerji taşımaya olanak tanıdığı için duyulur ısı transferini artırır (Han vd., 2014). İş akışkanının yüzey gerilim gradyanı, atımlı ısı borusunun sıcak bölgesinden soğuk bölgesine akışkanı taşımak için bir itici güç görevi görür (Nazari vd., 2018). Yüksek yüzey gerilimi, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgesi arasında salınım başlangıcına ek bir basınç farkı oluşturabilir. Ayrıca, yüksek yüzey gerilimi borunun izin verilen maksimum iç çapını artırarak daha yüksek ısıl performans sağlayabilir (Xiao ve Cao, 2012). Ancak, Zhang ve Faghri'nin (2008) belirttiği gibi, boru çapının artması ısıl

performansın iyileşmesine olanak tanırken aynı zamanda artan bir basınç düşüşüne de yol açar. Bu durum, daha fazla kabarcık pompalaması ve dolayısıyla atımlı akışı sürdürüebilmek için daha yüksek bir ısıtma gücü gerektirir. Dinamik viskozitenin düşük olması ise cidar boyunca kayma gerilimini azaltarak basınç düşüşünü minimize eder. Bu sayede, atımlı bir akışı sürdürmek için daha düşük bir ısıtma gücü yeterli olmaktadır (Zhang ve Faghri, 2008).

İş akışkanının ısıl iletkenliği, atımlı ısı borusunun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir; bu etki, sıcaklık dağılımı ve tepki süresine yansımaktadır. Yüksek ısıl iletkenlik, ısı transfer hızını artırarak, buharlaştırıcı ve yoğuşurucu bölümleri arasındaki sıcaklık farkını azaltır (Han vd., 2016). Buharlaştırıcı ve yoğuşurucu bölümlerindeki basınç, doyma sıcaklığı ile belirlenir ve doyma koşullarında sıcaklığa bağlı basınç değişim oranının $((dp / dT)_{\text{doyma}})$ yüksek olması, buharlaştırıcı ve yoğuşurucu bölümleri arasındaki buhar basınç farkını artırır. Bu durum, akışkanın hareketi için itici bir kuvvet oluşturarak atımlı ısı borusunun performansını iyileştirir ve salınım hareketini güçlendirir (Yang vd., 2015; Zhang ve Faghri, 2008).

Farklı iş akışkanları, çeşitli termofiziksel özelliklere sahiptir ve tek bir iş akışkan, atımlı ısı borusunun performansını artırmak için gereken tüm avantajlı özellikleri aynı anda sunamayabilir. Bu nedenle, farklı akışkanların belirli oranlarda karıştırılması performans artışı sağlayabilir (Bastakoti vd., 2018). Zhu vd. (2014), su ve aseton karışımından oluşan ikili bir akışkanın atımlı ısı borusunun başlatma ve ısı transferi performansı üzerindeki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, düşük dolum oranlarında su-aseton karışımının, atımlı ısı borusunun başlama performansı açısından saf suya göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, karışımın özelliklerinin ısıl performans üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmıştır.

1.4.2. Geometri

Atımlı ısı borusunun tasarım sürecindeki önemli adımlardan biri, geometrik parametrelerin belirlenmesidir. Çalışma performansını optimize etmek için iç çap, kanal kesiti ve konfigürasyonu, döngü sayısı ve bölge uzunluğu (buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşurucu) gibi geometrik özelliklerin detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Atımlı ısı borusunun iç çapının, salınımlı akışı tetiklemek için yeterince küçük olması ve belirli kriterleri karşılaması önem taşır. Hidrolik çap, sıvı ve buhar kabarcıklarının dizilimini oluşturabilmek için kritik çaptan küçük olmalıdır (Bastakoti vd., 2018; Kim ve Kim, 2020).

Kritik hidrolik çap ($D_{h,crit}$), genellikle yerçekimi ve akışkanın yüzey gerilimi ile doğrudan ilişkili olan Bond sayısı kullanılarak belirlenir:

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D^2}{\sigma} \quad (1)$$

$$D_{h,crit} \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (2)$$

Burada, D_h , g , σ , ρ_l ve ρ_v sırasıyla hidrolik çap, yerçekimi ivmesi, yüzey gerilimi, sıvı yoğunluğu ve buhar yoğunluğunu ifade etmektedir. Ayrıca, bazı araştırmacılar kılcal bir tüpte sıvı-buhar dizilimini sağlamak için kanal çapının belirli bir aralıkta olması gerektiğini önermişlerdir (Lin vd., 2009; Yang vd., 2015). Hidrolik çap için önerilen aralık aşağıda verilmiştir:

$$0.7 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \leq D_h \leq 1.8 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (3)$$

Atımlı ısı borusunun kanal kesitinin şekli, akış deseni geçişlerini ve iş akışkanı dağılımını etkileyen kritik bir parametredir. Özellikle, kanal kesitinin dairesel olmadığı durumlarda, dikdörtgen ve üçgen kesitli kanallardaki açılı veya keskin köşeler akış desenleri üzerinde daha belirgin bir etki yaratır (Khandekar vd., 2002). Keskin köşeler, sıvı fazının ıslak çevre boyunca tutunmasını kolaylaştırır. Bu durum, uzun kabarcıklı ve halkasal akışlarda sıvı-buhar kabarcığının daha yüksek hızlarda sürdürülebilmesini sağlar. Ayrıca, düşük dolum oranlarında termosifon etkisini belirgin şekilde iyileştiren kılcal etkiler oluşturur (Yang vd., 2009).

Atımlı ısı borusunun etkili bir akış sirkülasyonu oluşturması ve dolayısıyla ısı performansını artırması için kanal konfigürasyonlarının tasarımı da önemli bir katkı sağlar. Liu vd. (2007), sirkülasyon akışını başlatmak ve sürdürmek amacıyla iki farklı kanal konfigürasyonu geliştirmiştir. İlk atımlı ısı borusu, kanal çaplarının dönüşümlü olarak değiştiği bir yapı olarak tasarlanmıştır; bu yapıda, iki bitişik tüpün iç çapları sırasıyla 2 ve 1.6 mm'dir. Diğer atımlı ısı borusu ise, sadece bir kanal kesiti daha kalın bir tüp bölümü (iç çap: 2 mm, dış çap: 8 mm) ile düzenlenmiş, diğer kanalları sabit (iç çap: 1.6 mm)

tutulmuştur. Sabit çaplı atımlı ısı borusu ile karşılaştırıldığında, bu geliştirilmiş tasarımlar daha yüksek ısı performans göstermiştir. Benzer şekilde, Chien vd. (2012) atımlı ısı borusunda geleneksel üniform tüp çapı yerine farklı boyutlarda kılcal tüplere sahip yeni bir konsept geliştirmiştir. Bu tasarımlar, dengelenmemiş kılcallık kuvvetleri sayesinde yatay konumda atımlı ısı borusunun başarılı bir şekilde çalışmasını sağlamıştır. Ebrahimi vd. (2015) buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinde çapraz bağlantılar kullanarak birbiriyle bağlantılı kanallar oluşturmuştur. Thompson vd. (2011a) ise akış sirkülasyonunu iyileştirmek ve ısı performansını artırmak amacıyla düz plakalı atımlı ısı borusunda Tesla tipi çek valfler kullanmıştır.

Atımlı ısı borusunun buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve adyabatik bölge uzunluklarının seçimi, ısı performansı ve iş akışkanının miktarını etkilemektedir. Yoğuşturucu bölümünde iş akışkanının yetersiz kalması, buharlaştırıcıda aşırı ısınmaya ve kuruma problemine yol açabilir. Bu nedenle, ısı transfer hızını arttırmak ve kuruma olmaksızın daha yüksek ısı yüklerde salınım hareketini sürdürmek için yoğuşturucu uzunluğu buharlaştırıcı uzunluğundan daha fazla olmalıdır. Qu ve Wang (2013), düşük ısı direnç sağlayarak atımlı ısı borusunun performansını artıran optimum bir buharlaştırıcı uzunluğunun belirlenebileceğini vurgulamıştır. Bu optimum uzunluk, büyük ölçüde iş akışkanının türüne, dolum oranına ve ısıtma gücüne bağlıdır. Adyabatik uzunluk ise atımlı ısı borusunun performansını etkileme potansiyeli olan diğer bir parametredir. Czajkowski vd., (2020) daha kısa adyabatik uzunlukların akış sirkülasyonun daha hızlı başlamasını sağladığını belirtmiştir.

Atımlı ısı borusunun döngü sayısı, iç basınç dağılımını ve ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir (Bastakoti vd., 2018). Yerçekiminden bağımsız bir performans elde edilebilmesi için döngü sayısının 16'dan fazla olması gerektiği öngörülmektedir (Charoensawan vd., 2003). Yang vd. (2009), 40 kanallı kapalı döngülü atımlı ısı borusunun, belirli dolum oranı aralığında her konumda başarılı bir şekilde çalıştığını belirtmiştir. Mameli vd. (2014a), değişken yer çekimin koşullarında ısı performansını incelemek amacıyla 32 paralel kanallı atımlı ısı borusu üzerinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar, döngü sayısının artırılmasının iç basınç dalgalanmalarını güçlendirdiğini ve yerçekimi etkisini zayıflattığını göstermektedir. Jun ve Kim (2016), genellikle 20'den fazla döngüye sahip atımlı ısı borularının eğim açısından bağımsız ve kararlı bir şekilde çalıştığını belirtmiştir. Ancak, döngü sayısının fazla olması, atımlı ısı borusunun daha fazla yer kaplamasına ve dolayısıyla uygulama alanlarının sınırlandırılmasına yol açabilir. Bu

sebeple, atımlı ısı borusunun konumdan (açıdan) bağımsız olarak çalışabilmesi için minimum bir döngü sayısına ihtiyaç vardır. Ayrıca, Han vd.'nin (2016) belirttiği gibi kritik döngü sayısının, iç çap, ısı akısı ve iş akışkanının fiziksel özellikleri gibi parametrelerden de etkilendiğini vurgulamıştır.

1.4.3. Dolum Oranı

Dolum oranı (filling ratio, FR), oda sıcaklığında atımlı ısı borusuna yüklenen iş akışkanı hacminin, borunun toplam iç hacmine oranı şeklinde tanımlanır. Atımlı ısı borusundaki sıvı-buhar kabarcıklarının göreceli miktarı, dolum oranına bağlıdır; bu nedenle, atımlı ısı borusunun ısı ve çalışma performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (Han vd., 2016). Düşük dolum oranlarında, sıvı-buhar kabarcıklarının oluşumu için yeterli sıvının bulunmaması, akış hareketi için gerekli olan sürekli 'kabarcık pompalama' hareketinin zayıf kalmasına neden olur. Bu durumda, atımlı ısı borusunda çok zayıf salınım hareketi gözlemlenir veya sıvı-buhar hareketi hiç meydana gelmez (Liu vd., 2019). Yerçekimi destekli konumlarda atımlı ısı borusu termosifon modunda çalışabilir; ancak bu modda ısı taşıma kapasitesi sınırlıdır ve kuruma olayı nispeten düşük ısı yüklerinde gerçekleşir. Yüksek dolum oranlarında ise sıvı fazlalığı sistemin serbestlik derecesini azaltır. Bu durum, atımlı ısı borusundaki iki fazlı akış hareketinin kısıtlanmasına ve salınım olayının belirgin bir şekilde azalmasına neden olur.

Yang vd. (2008) dolum oranının atımlı ısı borusunun performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Maksimum ısı yük için belirli bir buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklığında optimum dolum oranının %40 ve %70 arasında olduğunu belirtmiştir. Mameli vd. (2014b) farklı sistem ve çalışma koşulları altında, R-72 iş akışkanını kullanarak en iyi performansı %50 dolum oranında elde etmiştir. Qu and Wang (2013) ise etanol ile yüklenen atımlı ısı borusunda en etkili ısı performansın %40 dolum oranında elde etmiştir. Czajkowski vd. (2020) geniş bir ısıtma gücü aralığında incelenen atımlı ısı borusu için kararlı çalışma koşullarını sağlayan optimum dolum oranını %75 olarak belirlemiştir. Bu farklılığın, çalışmada uygulanan ısıtma gücünün literatürde tanımlanan atımlı ısı borusu çalışma koşullarına kıyasla daha yüksek olmasından ve tasarlanan atımlı ısı borusunun büyük ölçekli olmasından kaynaklandığını açıklamışlardır.

1.4.4. Eğim Açısı ve Yerçekimi

Atımlı ısı borusunda yerçekiminin rolü, dış bir kuvvet kullanmaksızın yoğuşturucu bölümünde yoğuşan akışkanın yeniden buharlaştırıcıya geri dönmesini sağlamaktır. Atımlı ısı borusunun performansı üzerindeki yerçekimi etkisi, eğim açısı dikkate alınarak değerlendirilebilir. Genellikle, bu açı dikey alttan ısıtma modu (90°), yatay ısıtma modu (0°) ve dikey üstten ısıtma modu (-90°) olarak tanımlanır.

Eğim açısının atımlı ısı borusunun çalışması üzerindeki etkisi iş akışkanı, ısıtma gücü, döngü sayısı ve geometri gibi faktörlere bağlıdır. Marango ve Nikolayev (2018), düşük yüzey gerilimli akışkanlar için, eğim açısının atımlı ısı borusunun ısı direnci üzerindeki etkisinin, suya kıyasla daha belirgin olduğunu belirtmiştir. Kwon and Kim (2015) üniform çaplı mikro atımlı ısı borusu ile çift çaplı olan mikro atımlı ısı borularının ısı dirençlerini farklı eğim açıları karşılaştırmıştır. Araştırmalarında, üniform çaplı mikro atımlı ısı borusunun ısı performansının eğim açısına bağlı olduğunu ve dikey (alttan ısıtma modu) konumdan yatay konuma geçişte performansın belirgin şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Bu durum, buharlaştırıcı bölümüne sıvı beslemesi ile ilişkilendirilir; yetersiz sıvı tedariki, aktif olmayan bir akışkan hareketine ve buharlaştırıcı bölümün iç duvarında kurumaya neden olur. Üniform çaplı atımlı ısı borusu dikey olarak konumlandırıldığında (90°), sıvı salınım hareketi zayıf olsa da yerçekimi etkisiyle sıvı filmi buharlaştırıcıya geri döner.

Kwon and Kim (2015) sabit kanal çapına sahip atımlı ısı borularının, döngü sayısının az olduğu durumlarda yerçekimine karşı konumlarda verimli çalışmadığını belirtmiştir. Bu nedenle, üniform kesitli ve az döngüye sahip atımlı ısı boruları için buharlaştırıcı bölgesinin yerçekimine karşı konumlandırılması, en olumsuz konfigürasyon olarak kabul edilir. Yerçekimi, atımlı ısı borusunun başlangıç performansını da önemli ölçüde etkiler. Mameli vd. (2014b) yatay konumdan küçük bir eğim verilmesinin atımlı ısı borusunun çalışma performansını artırmaya yardımcı olduğunu ifade etmiştir.

1.4.5. Isıtma Gücü

Atımlı ısı borusunun ısı transfer performansı için ısıtma gücü önemli bir parametredir. Han vd. (2016) ısı akısının etkisini iki farklı açıdan açıklamıştır: atımlı ısı borusunun başlangıç ısı akısı ve ısı akısı ile ısı transfer performansı arasındaki ilişki. İlk olarak, atımlı ısı borusunun çalışmaya başlaması için belirli bir minimum ısı akısına ihtiyaç duyulduğu, bu

minimum değerin aşılmadığı durumlarda cihazın çalışamayacağı belirtilmiştir. İkinci olarak, iş akışkanının salınım hareketini gerçekleştirebilmesi için gerekli olan basınç farkını oluşturan ısı akısının önemi vurgulanmıştır. Bu bağlamda, ısı akısı, salınım hareketlerinin dinamikleri ve atımlı ısı borusunun ısı transfer performansı ile yakından ilişkilidir.

Isıtma gücü, atımlı ısı borusunun pompalama mekanizmasının temel kaynağı olduğundan, artan ısı yük genellikle performansın iyileşmesine katkı sağlar. Isıl yük arttıkça sıvı-buhar sirkülasyonu artar ve böylece ısı direnç azalır (Yang vd., 2009). Ancak, aşırı ısıtma gücünde, ısı olarak indüklenen buhar genişlemesi nedeniyle ani bir basınç artışı meydana gelebilir ve bu durum ısıl kararsızlığa yol açabilir. Isıl kararsızlık, buharlaştırıcı sıcaklığında ani bir yükselme ve buna bağlı olarak ısıl direncin artması şeklinde kendini gösterir (Mameli vd., 2014b).

1.5. Literatür Araştırması

Atımlı ısı boruları, kılcal hareket, buharlaşma ve yoğuşma işlemlerinin bir kombinasyonunu kullanarak çeşitli çalışma koşulları altında güvenilir bir ısıl aktarım sağlar. Takawale vd.'nin (2019) de belirttiği gibi atımlı ısı borusunun çalışma mekanizması bir dizi fiziksel olguya bağlıdır: ince sıvı filmi tabakasının buharlaşması, kabarcık birleşmesi ve ayrılması, kılcal boyutlu çaplar nedeniyle yüzey gerilmesi, yerçekiminin varlığında kaldırma kuvveti, yoğuşma ve kabarcıklı kaynama. Akachi (1990) tarafından ilk kez tanıtılmasından bu yana atımlı ısı borusunun performansını belirleyen temel mekanizmalar ve çalışma parametrelerinin etkileri üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür. Bu bölümdeki literatür araştırması atımlı ısı boruları hakkındaki bilgi durumunu sentezlemeyi ve bu alandaki önemli gelişmeleri vurgulamayı amaçlamaktadır. Böylece, ilgili alanda yürütülen teorik ve deneysel çalışmalara ilişkin kapsamlı bir genel bakış sunulmuştur.

Khandekar vd. (2002) hidrolik çapı yaklaşık 2 mm olan dikdörtgen ve dairesel kesitli düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı boruları için deneysel bir çalışma yapmıştır. Dolum oranı, ısıl yük, iş akışkanı ve kanal kesit geometrisinin ısıl performansa olan etkisi incelenmiştir. Keskin köşelerin kılcal yapı gibi davranmasından dolayı kare kesitli atımlı ısı borusunun ısıl direncinin dairesel kesitliye göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, dairesel kesitli atımlı ısı borusunun daha düşük ısı taşıma kabiliyetine sahip olduğu belirtilmiştir.

Charoensawan vd. (2003) kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı transfer verimliliğini etkileyen temel parametrelere odaklanarak deneysel bir araştırma sunmuştur. Su, R-123 ve etanol gibi farklı çalışma akışkanlarının etkilerini yüzey gerilimi, buharlaşma gizli ısı ve viskozite gibi termofiziksel özelliklerini vurgulayarak analiz etmişlerdir. Atımlı ısı boruları, iç çapları 2 mm ve 1 mm olan bakır tüplerden üretilmiştir ve buharlaştırıcıdaki döngü sayıları 5 ile 23 arasında değiştirilmiştir. Atımlı ısı borusunun yatay konumlandırmada çalışabilmesi ve eğim açısından kaynaklanan performans farkının kapatılması için belirli bir döngü (yaklaşık olarak 16 döngü) sayısının gerekliliğinden bahsedilmiştir. Ayrıca, belirli bir sıcaklık farkı için ısı performansın iç çaptaki artışla arttığını ve bu nedenle iç çapın atımlı ısı borusunun tanımını etkileyen bir parametre olduğu belirtilmiştir.

Khandekar vd. (2003a) kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansını üzerinde iş akışkanı ve dolum oranının birleşik etkilerine odaklanmıştır. Test akışkanları su, etanol ve R-123'tür. Düşük dolum oranlarında her akışkan için sirkülasyon gözlemlendiği belirtilmiştir. Isıtma gücü ve dolum oranının atımlı ısı borusunun performansını büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir. İlgili akışkanlar için optimum dolum oranları; su için $FR=15-30$; etanol için $FR=25-55$ ve R-123 için $FR=35-60$ 'tır. Yerçekiminin önemli bir rol oynamasından dolayı atımlı ısı borusunun yatayda çalışmadığını ifade etmişlerdir.

Khandekar vd. (2003b) deneysel akış görüntüleme ve matematiksel modelleme yoluyla kapalı döngülü atımlı ısı borularının çalışma özelliklerini tartışmıştır. Matematiksel modelleme için boyutsuz sayılara dayalı yarı ampirik bir korelasyon geliştirmişlerdir. Atımlı ısı borusunun analizini ve modellemesini zorlaştıran kabarcık kümelenmesi, akış kaynaması ve çalışma parametrelerinin (ısı akısı, geometri, eğim açısı) akış desenleri üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Atımlı ısı borularında sirkülasyonlu akış hareketine geçişin, buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya doğru gelişen halkasal / yarı halkasal akış ile karakterize edildiği belirtilmiştir.

Kim vd. (2003) atımlı ısı borularının akış modelleri ve ısı transferi performansı üzerindeki etkilerini çeşitli deneysel koşullar altında değerlendirmişlerdir. Döngü sayısı, iş akışkanı (etanol ve R-142b) ve ısıtma gücü çalışmanın temel parametreleridir. Elde edilen bulgular, artan ısıtma gücü ile sıvı ve buhar akışlarının salınım frekansının arttığını göstermiştir. Özellikle, R-142b'nin akış deseninin, etanole kıyasla daha aktif olduğu ve daha yüksek ısı transfer verimliliği sağladığı gözlemlenmiştir. Döngü sayısı arttıkça, iş akışkanın salınımı ve sirkülasyonu daha aktif hale gelmiştir.

Xu vd. (2005) atımlı ısı borularında yüksek hızlı akış görüntüleme üzerine, iş akışkanları olarak metanol ve suyun akış dinamikleri ve kabarcık davranışına odaklanan bir çalışma sunmuştur. Kabarcık çekirdeklenmesi, birleşmesi ve yoğuşmasının birleşik etkilerinin iki fazlı akış hareketinden ve yerel akış doğrultusu değişiminden sorumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Su ile yüklenen atımlı ısı borusuna kıyasla daha düşük buharlaşma gizli ısıya sahip olan metanol ile yüklenen atımlı ısı borusunun, aynı ısı girdisinde daha büyük buhar hacimleri üreterek daha belirgin salınımlara ve akış dinamiklerine yol açtığı belirtilmiştir.

Borgmeyer ve Ma (2007) iş akışkanının, ısıtma gücünün, dolum oranının ve eğim açısının atımlı akış üzerindeki etkilerini belirlemek ve düz plakalı atımlı ısı borusu içindeki buhar kabarcıklarının ve sıvı öbeklerinin hareketini değerlendirmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yer değiştirme, hız ve frekans dahil olmak üzere atımlı ısı borusunda meydana gelen sıvı-buhar kabarcıklarının salınım hareketlerinin konumları izlenmiş ve analiz edilmiştir. Ölçümler, ısı girdisi arttıkça yer değiştirme, hız ve frekansın hepsinin arttığını ve bununla birlikte, salınım hareketlerinin çok düzensizleştiğini göstermiştir. Atımlı ısı borusu, su, etanol, Flutec PP2 ve Flourinert gibi farklı iş akışkanları ile yüklenmiştir. İş akışkanın, salınım hareketini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Atımlı ısı borusunun suyla yüklendiğinde hiçbir salınım hareketinin oluşmadığını, buna karşılık, etanol ile yüklendiğinde, sıvı-buhar arayüzünün en büyük genlikleri ve hızları sergileyerek üstün ısı performans gösterdiği açıklanmıştır. Isıl iletkenlik ve yüzey gerilimi gibi iş akışkanı özelliklerinin atımlı ısı borularının etkinliğinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Charoensawan ve Terdtoon (2008) farklı iç çaplara, buharlaştırıcı uzunluklarına ve dönüş sayılarına sahip bakır kılcal borulardan üretilmiş kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performansını üzerine bir çalışma sunmuştur. Atımlı ısı borusunun yatay konumda çalışması için asgari döngü sayısı gerektiğini açıklamıştır. Ayrıca, bu kritik döngü sayısının atımlı ısı borusunun çapına bağlı olduğunu belirtmiştir. (Örneğin, iç çap=1 mm için 10 döngü, iç çap=1.5 ve 2 mm için 15 döngü). Çalışma, ayrıca, uygun iş akışkanın kılcal boruların iç çapına göre değiştiğini, 2 mm çap için suyun tercih edildiğini ve 1 mm çap için hem su hem de etanolün uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Yang vd. (2009) biri $2 \times 2 \text{ mm}^2$ kesite sahip 40 paralel kanaldan diğeri ise $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 'lik kesite sahip 66 paralel kanaldan oluşmak üzere iki adet düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı boruları için kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Dolum oranı, ısı yük ve eğim açısı gibi çeşitli çalışma parametrelerinin termo-hidrokinamik performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İş

akışkanı olarak etanol kullanılmıştır. Yatay ve $(-90)^\circ$ konumlarında optimum doldurma oranı %50 – %65 olarak elde edilmiştir. Isıl yük arttıkça yığın sirkülasyon akışının daha fazla meydana geldiği ve böylece, ısıl direncin azaldığı vurgulanmıştır. Dolum oranı %70'ten fazla olduğu durumda sıvı fazlalığının sistemin serbestlik derecesini sınırlandırdığını ifade etmiştir. Kesit şeklinin ve kanal boyutunun akış desenleri ve geçişleri üzerindeki önemini vurgulamış ve keskin açılı köşelerin atımlı ısı borularının çalışma özelliklerini etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca, daha büyük kanal boyutlarının ısıl performansı artırabileceği sonucuna varılmıştır. Daha küçük kanal boyutu ve daha fazla döngü sayısına bağlı olarak artan akış direnci, daha fazla iç pertürbasyona neden olduğu ve çalışma performansını olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Lin vd. (2009) çapı 2 mm olan ve 10 paralel kanaldan oluşan atımlı ısı borusunda akış görüntüleme yapılabilmesi için silikon tabanlı organik polimer (polidimetilsiloksan, PDMS) kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır. İş akışkanı olarak metanol ve etanol kullanmıştır. Isıl performansı test etmek için tek bir dolum oranında (%60) ve farklı ısıtma güçlerinde (3 – 8 W) çalışılmıştır. Yer çekiminin atımlı ısı borusunun performansı üzerinde bir etkiye sahip olduğunu ve ısıtıcının altta olduğu düşey konumlandırmanın yatay konumlandırmadan daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Metanol ile yüklenen atımlı ısı borusunun ısıl direncin etanolünkinden daha düşük olduğunu açıklamıştır.

Thompson vd. (2009) yoğunlaştırıcı sıcaklığı, ısıtma modları ve ısı girdilerinin etkilerine odaklanarak üç boyutlu düz plakalı atımlı ısı borusunun performansına ilişkin deneysel bir araştırma sunmuştur. Atımlı ısı borusu, %80 dolum oranında aseton ile doldurulmuştur. Akışkan hareketlerinin ve ısıl davranışın daha iyi görüntülenebilmesi için nötron görüntüleme teknolojisi kullanılmıştır. Geleneksel düz plakalı tasarımların aksine, üç boyutlu kompakt tasarımın çoklu ısıtma düzenlemelerine ve daha yüksek ısı akılarına imkân sunduğu belirtilmiştir. Bu tasarımın, eğim açısının neden olduğu performans değişikliklerini azaltarak daha düzgün bir sıvı dağılımı ve akışı sağladığı belirtilmiştir.

Cheng vd. (2010) dört farklı kanal konfigürasyonuna sahip düz plakalı atımlı ısı borularının ısıl performansını teorik ve deneysel olarak araştırmıştır. Aseton, su, elmas/aseton, altın/su ve elmas/su nanoakışkanları kullanılan iş akışkanlarıdır. Deneysel sonuçları teorik tahminlerle karşılaştırarak atımlı ısı borusunun ısıl direnci ve efektif ısıl iletkenliği incelenmiştir. Elmas-su ve altın-su karışımları gibi nanoakışkanların kullanımının, geleneksel akışkanlara kıyasla ısıl direnci daha da azalttığı gösterilmiştir. Ancak, düşük ısıtma gücünde, yüksek konsantrasyonlu nanoakışkan uygulandığında atımlı

ısı borusunun performansının kötüleştiği ifade edilmiştir. Bu durumun, nanoparçacıkların birbiriyle bağlantılı kanallar boyunca yerleşmesi ve akışı tıkamasından dolayı oluştuğu açıklanmıştır.

Lips vd. (2010) açık döngülü atımlı ısı borularını karakterize etmek, basınç salınımlarına ve/veya duvar kızma farkına bağlı olarak tek kılcal bir boru içerisinde salınımlı iki fazlı akış olayını görüntülemek için çeşitli deneyler yapmıştır. Yüksek hızlı kamera ile alınan akış görüntüleri buhar kabarcığının ilerleyen ve geri çekilen menisküslerinin davranışına odaklanmıştır. Bu menisküslerin eğrilik ve hızlarındaki farklılıklar, akışta mevcut olan basınç farklılıklarını ve kararsızlıkları anlamak için analiz edilmiştir. Boru çapları, döngü sayıları ve içerdikleri iş akışkanları birbirinden farklı olan iki adet atımlı ısı borusu kullanılmıştır: PHP1: 40 döngülü, iç çapı 1.2 mm ve iş akışkanı su; PHP2: 20 döngülü, iç çapı 2.5 mm ve iş akışkanı aseton. Düşük ısı akılarında ısıl direnç eğrisinin düzensiz ve ısıl performansın konumlandırmaya bağlı olduğu; yüksek ısı akılarında ise ısıl direnç eğrisinin düzgün ve konumlandırmadan bağımsız çalıştığı belirtilmiştir.

Thompson vd. (2011b) üç boyutlu mikrokanallı düz plakalı atımlı ısı borusunun performansını, değişen ısıtma alanı, soğutucu sıcaklığı ve konumlandırma gibi çalışma koşulları için deneysel olarak değerlendirmiştir. Su ve aseton kullanılan iş akışkanlarıdır. Isıtma alanı daha büyük olduğunda, atımlı ısı borusunun eğim açısına olan duyarlılığının daha az olduğu belirlenmiştir. En düşük ısıl direnç, iş akışkanı olarak su kullanıldığında, daha büyük bir ısıtma alanıyla özellikle de 60 °C soğutma sıcaklığında yaklaşık 0.079 °C/W değerine ulaşan dikey konumlandırma sırasında elde edilmiştir.

Chien vd. (2012) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı boruların kanal çapı değişimiyle ilgili bir tasarım önermiştir. 16 paralel kanaldan oluşan, sırasıyla, her bir komşu kanalın 2 x 2 mm² ve 1 x 2 mm² kesit alanlarına sahip olduğu atımlı ısı borusu tasarlayarak dengelenmemiş ek kılcallık kuvveti oluşturmayı ve böylece akışkan hareketini desteklemeyi amaçlamıştır. Saf su iş akışkanı olarak kullanılmış ve üç farklı dolum oranı (%40, %50, %60, %70) ile dört farklı eğim açısı (0°, 30°, 60°, 90°) değerlendirilmiştir. Üiform kanal kesit alanına sahip atımlı ısı borusunun yatay konumlandırmada işlevsel olmadığını ancak üniform olmayan kanal kesitine sahip atımlı ısı borusunun yeterli dolum oranı ($\geq$ %60) sağlandığında çalıştığını belirtmiştir.

Barua vd. (2013) iç çapı 2.2 mm olan kılcal tüplü kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Isıl verimliliğin iş akışkanı, dolum oranı ve ısıtma gücü gibi parametrelerin değişiminden etkilendiğini belirtmiştir. Tüm deneyler dikey

konumda yapılmıştır ve %28, %41.3, %63, %82.5, %100 dolum oranlarında iki farklı iş akışkanı (su ve etanol) ile çalışılmıştır. Düşük ısıtma güçlerinde su, ısı transferi açısından etanolden daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte, daha yüksek ısı güçlerinde (70W'ın üzerinde), her iki akışkan da benzer ısı direnç değişimi sergilemiştir, bu da performans farkının yüksek ısı yüklerinde daraldığını göstermiştir.

Sarangi ve Rane, (2013) iç çapı 1 mm ve 16 döngüden oluşan atımlı ısı borusunun başlangıç ve maksimum ısı yüküne odaklanmıştır. Su ve etanol kullanılan iş akışkanlarıdır. %0, %25, %37.5, %50, %62.5, %75 ve %100 dolum oranlarında çalışılmıştır. Başlangıç ısı yükün dolum oranından bağımsız olarak sabit kalırken, maksimum ısı yükün dolum oranından etkilendiği ve optimum dolum oranının kullanılan çalışma akışkanına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Maksimum ısı yükler, optimum dolum oranlarında, su için %62.5 ve etanol için %50 olarak belirlenmiştir. Başlangıç ısı yükünün iş akışkanların ısı özelliklerinden etkilendiği vurgulanmıştır. Su, etanole kıyasla daha yüksek bir başlangıç ısı yükü sergilemiştir. Bu farkın, suyun başlangıç aşamasında ısıyı daha etkili bir şekilde depolama ve aktarma kabiliyetine katkıda bulunan daha yüksek gizli ısı, ısı iletkenlik ve ısı kütle özelliğinden kaynaklandığı atfedilmiştir. Su ve etanol için maksimum ısı yükler, sırasıyla, 56 ve 96 W'tır.

Qu ve Wang (2013) dikey kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansı üzerinde iş akışkanı (su ve etanol), ısıtma gücü girişi, dolum oranı, iç çap ve buharlaştırıcı uzunluğu gibi parametrelerin etkisini incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. 1.2, 2 ve 2.4 mm iç çapındaki bakır kapiler tüplerden oluşan üç farklı kapalı döngülü atımlı ısı boruları üretilmiştir. Isıl performansı tahmin etmek için Bond sayısı, Morton sayısı ve Prandtl sayısı gibi boyutsuz grupları içeren ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir. En düşük ısı dirence karşılık gelen optimum bir buharlaştırıcı uzunluğunu tanımlanmıştır. Bu optimum uzunluk, iş akışkanına, dolum oranına ve ısıtma gücüne bağlı olarak değişir. Örneğin, etanol yüklü atımlı ısı borusu için optimum uzunlukların %40, %50 ve %60 dolum oranlarında sırasıyla 50 mm, 50 mm ve 70 mm olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, su yüklü atımlı ısı borusu için nispeten daha yüksek ısı girişlerinde optimum buharlaştırıcı uzunlukları 50, 70 ve 70 mm olarak elde edilmiştir. Buharlaştırıcı uzunluğunun yoğunlaştırıcıdan çok daha uzun olması, aşırı ısınma sorunlarına ve iş akışkanının buharlaştırıcıya yeterli miktarda dönmediği durumlarda kurumaya yol açabileceği vurgulanmıştır.

Mameli vd. (2014b) FC-72 ile doldurulan bakır kapalı döngülü atımlı ısı borusunun eğim açısının ve dolum oranının, değişen ısı yükler altında ısı performansını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Dikey konumlandırmanın yüksek ısı yük seviyelerinde kararsızlığa yol açabilirken, yatay konumlandırmanın maksimum ısı yüküne ulaşılan kadar performans düşüşü olmadan verimliliği koruduğu ortaya atılmıştır. Isı kararsızlıklar, büyük genlikli sıcaklık salınımları ve farklı kanallar arasındaki eşit olmayan sıcaklık dağılımı ile karakterize edilmiştir.

Mameli vd. (2014c) ısı-hidrolik davranışı araştırmak için adyabatik bölümü şeffaf cam tüpten oluşturulmuş, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri bakır U-dönüşleri ile bağlanmış kapalı döngülü atımlı ısı borusu tasarlamıştır. Yerel ısı transfer katsayıları, akış salınımları ve akış modelleri çeşitli koşullar altında araştırılmıştır. Buharlaştırıcıdaki ısı transfer katsayısının ısı yük arttıkça akış desenindeki değişiklikler nedeniyle kademeli olarak değiştiğini gözlemlemiştir. Yerel ısı transfer katsayısının en yüksek değerleri halkasal akışın olduğu yüksek ısı yüklerde elde edilmiştir. Akış modellerinin eğim açısıyla birlikte değiştiği de belirtilmiştir. Eğim açısı arttıkça, akış modeli kabarcıklı akıştan yarı dairesel halkasal akışa ve tamamen halkasal akışa geçmiştir.

Han vd. (2014) deiyonize su, metanol, etanol ve aseton gibi farklı iş akışkanları ile doldurulan atımlı ısı borusunun ısı transfer performansı ile iş akışkanlarının termofiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemiştir. 10 döngülü bakır tüpten oluşan atımlı ısı borusu, alttan ısıtma modunda (dikey konum) çalışılmıştır. Her bir iş akışkanı için buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgesindeki sıcaklık salınımları farklı dolum oranları (%20 - %95) ve ısıtma güçlerinde (5-100 W) test edilmiştir. Kaynama noktası ve buharlaşma gizli ısısı daha düşük olan iş akışkanı ile (aseton) yüklenen atımlı ısı borusunun kurumaya daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, iş akışkanı seçiminin atımlı ısı borusunun çalışma kararlılığını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Genel olarak, dinamik viskozitenin yüksek ve $(dP / dT)_{\text{doy}}$ değerinin küçük olmasının iş akışkanının yavaş akmasına ve ısı transferinin kötüleşmesine neden olduğu belirtilmiştir.

Tseng vd. (2014) su, metanol ve HFE-7100 gibi farklı iş akışkanları kullanarak tek tip ve değişken tüp çapının atımlı ısı borusunun ısı performansına olan etkisini araştırmıştır. Üniform tip ısı borusu, iç çapı 2.4 mm'lik tüpten oluşturulmuştur, diğer yandan, alternatif tasarımda, her bir döngünün yarısı, üniform tüp çapıyla aynıdır, kalan yarısı ise, çapı 1.5 mm olan oval benzeri bir konfigürasyon şeklinde tasarlanmıştır. Değişken tüp çaplı tasarım, özellikle, yatay düzenlemelerde önemli ölçüde daha düşük ısı direnç sergilemiştir. Test

edilen iş akışkanları arasında HFE-7100 düşük ısıtma gücünde en düşük ısıl direnci gösterirken, su daha yüksek ısıtma güçlerinde (60 W üzeri) en düşük ısıl direnci göstermiştir.

Zhu vd. (2014) su ve aseton karışımı olan ikili akışkanın atımlı ısı borusunun ısı transferi üzerindeki etkisini incelemek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Farklı su-aseton karışımları oranları (13:1, 4:1, 1:1 1:4 ve 1:13), dolum oranları (%35-%70) ve ısıl yüklerde (10-100 W) test edilmiştir. Su-aseton karışımları ile yüklenen atımlı ısı boruları saf suya kıyasla daha iyi başlatma performansı göstermiştir. Bu gelişme, özellikle, %35 ve %45 dolum oranlarında ve 10 W ısıl yük altında kaydedilmiştir. Yüksek dolum oranlarında ise (%62 ve %70), saf akışkan ile yüklenen atımlı ısı borusunun ısı transfer performansı, su-aseton karışımı atımlı ısı borusuna göre daha üstün bir davranış göstermiştir.

Ayel vd. (2015) kapalı döngülü düz plakalı atımlı ısı borusunu yeryüzünde ve yüksek yer çekimli ve yerçekimsiz ortamda 60. ESA parabolik uçuş seferi esnasında test etmiştir. Deneyler, sabit dolum oranında (%50) iki farklı konum için (dikey ve yatay) yapılmıştır ve kullanılan iş akışkanı FC-72'dir. Basınç çalkantıları ve ısıl kararsızlıklar yatay konumda daha büyük olduğundan dolayı durma ve başlama fazları oluşmuştur. Bu durumun artan ısıtma gücüyle azaldığı ifade edilmiştir. Düşey yönde test edilen atımlı ısı borusunun ısıl davranışının yerçekimi seviyelerindeki değişimden açıkça etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Ebrahimi vd. (2015) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularında buharlaştırıcı ve yoğusturucu bölümlerinde çapraz bağlantılar kullanarak birbiriyle bağlantılı kanallar oluşturmuştur. Bu sayede, akış direncinin azaltılması ve akışkanın toplam ısı transferinin artırılması amaçlanmıştır. Dikdörtgen kesitli kanallardan ve 6 döngüden oluşan atımlı ısı borusu etanol ile yüklenmiştir. Birbirine bağlı kanalların varlığının akış için kısa yol oluşturduğunu ve böylece daha az basınç düşümü ve daha yüksek ısı transferine yol açtığını belirtmiştir. Ancak, yüksek ısıl yüklerde modifiye edilmiş atımlı ısı borusunun performansının klasik atımlı ısı borusunun performansından daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Yüksek ısıl yüklerde birbirine bağlı kanal hacminin tamamı buhar ile kaplanması sıcaklıkta yerel artışa neden olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla, yeni geometrinin en iyi performansının orta dolum oranlarıyla düşük-orta ısıl yüklerde veya yüksek dolum oranlarıyla yüksek ısıl yüklerde olduğu belirtilmiştir.

Kwon ve Kim (2015) düz plakalı mikro atımlı ısı borularının (*Micro pulsating heat pipes*, MPHPs) akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerinde çift çaplı kanalların etkisinin incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Etanol ve FC-72 iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Yatay konumda, çift çaplı MPHP'lerin simetrik MPHP'ye göre daha düşük

ısı dirençlere sahip olduğu görülmüştür. Yatay konumda MPHP'nin çalışması için çift çaplı kanalların önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun farklı kanal çaplarından kaynaklanan kılcallık basınç farkıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Atımlı ısı borularının eğim açısından bağımsız performans sergilemesinin kanal çaplarındaki farktan dolayı üretilen kılcallık basıncının viskoz basınç düşüşünden daha büyük olduğunda ortaya çıktığı varsayılmıştır.

Yang vd. (2015) değişken mikro kanal genişliklerine sahip atımlı ısı borusunun ısı performansı üzerinde iş akışkanlarının (deiyonize su ve metanol) termofiziksel özelliklerinin etkilerini araştırmıştır. Silikon tabanlı mikro atımlı ısı borusu, 64 paralel dikdörtgen kesitli kanaldan oluşturulmuş ve komşu kanalları 0.5 mm ve 0.3 mm olacak şekilde iki farklı genişlikte tasarlanmıştır. Su yüklü atımlı ısı borusunun çalışmaması nedeniyle daha yüksek ısı dirence sahip olduğu belirtilmiştir. Bu durumun muhtemel nedeni olarak yüksek yüzey gerilmesi ve yüksek buharlaşma gizli ısısı gibi olumsuz akışkan özellikleri gösterilmiştir. Metanol yüklü atımlı ısı borusunun ise %80'lik bir dolum oranında 6 W'tan daha yüksek bir ısıtma gücünde çalışabildiği gözlenmiştir.

Spinato vd. (2016) tek döngülü atımlı ısı borusu için R245fa akışkanı kullanarak eş zamanlı ısı ve gözlemsel inceleme yapmıştır. Sirkülasyonlu akış esnasında buharlaştırıcıda gelişen halkasal / yarı halkasal akışın ısı performansı belirgin bir şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Düşük ısı dirençler, yüksek ısı yüklerde ve düşük dolum oranlarında ölçülmüştür. Bütün test koşullarında ince film buharlaşmasının toplam yerel ısı transfer katsayısının en büyük bileşeni olduğu ve bu nedenle baskın ısı transfer mekanizması olarak öngörülmüştür.

Jun ve Kim (2016) kapalı döngülü mikro atımlı ısı borularının (*Closed-loop micro pulsating heat pipes*, CLMPHPs) ve kapalı uçlu mikro atımlı ısı borularının (*Closed-end micro pulsating heat pipes*, CEMPHPs) ısı performansları ve akış karakteristikleri deneysel veriler üzerinden karşılaştırmıştır. Farklı döngü sayılarına sahip atımlı ısı boruları, silikon tabaka üzerinde kıvrımlı dikdörtgen kesitli kanallar ile oluşturulmuştur. 20 döngülü durumda, CLMPHP ve CEMPHP'nin ısı performans ve akış karakteristikleri benzerlik göstermiş olup, her iki yapı da konumlandırmadan bağımsız bir performans sergilemiştir. 15 ve 10 döngülü konfigürasyonlarda, CEMPHP'nin eğim açısından bağımsız kararlı bir performans sağladığı gözlenirken, CLMPHP'nin ısı performansının, dikey konumdan yatay konuma geçişle birlikte önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. 5 döngülü durumda, CLMPHP'nin performansı konuma bağlı olarak değişiklik göstermiş, buna karşın CEMPHP

herhangi bir eğim açısında çalışmaya başlayamamıştır. Sonuçlar, konumdan bağımsız bir performans sağlanabilmesi için CLMPHP'de 20 döngü sayısının gerekli olduğunu, CEMPHP'de ise 10 döngü sayısının yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

Han vd. (2016) çeşitli oranlarda su-metanol, su-etanol ve su-aseton zeotropik karışımları ile şarj edilen ve dikey olarak konumlanan atımlı ısı borusunu deneysel olarak araştırmıştır. Faz geçişindeki zeotropik özellikler ve bileşenler arasındaki moleküler etkileşimler nedeniyle, karışımlarla yüklü atımlı ısı borularının saf akışkanlara göre oldukça karmaşık olduğu ifade edilmiştir. Küçük veya orta dolum oranlarında (%35, %45 ve %55), ikili karışımların çoğu, saf akışkanlara göre daha iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak, kurumanın nadiren meydana geldiği yüksek dolum oranlarında (%62 ve %70), ikili karışımlarla yüklenen atımlı ısı borusunun ısıl performanslarının genellikle saf akışkanlara, özellikle de saf suya bir üstünlük oluşturmadığı belirtilmiştir.

Shi vd. (2016) etanol-su, etanol-metanol ve etanol-aseton ile doldurulan atımlı ısı borularının ısı transfer performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Etanol bazlı karışım oranları 2:1 ve 4:1 olup, %45-%90 dolum oranı ve 10-100W ısıtma gücü aralığında çalışılmıştır. Etanolün, su ile karıştırıldığında kurumanın geciktiği ve düşük dolum oranında ısı transfer performansını arttırdığı; aseton ile karıştırıldığında, ısı transfer performansını yalnızca %55 dolum oranında iyileştirdiği; metanol ile karıştırıldığında ise ısı transfer performansını iyileştiremediği belirtilmiştir. Yüksek dolum oranlarında (%62, %70 ve %90), saf iş akışkanları ile yüklenen atımlı ısı borularının performansı etanol bazlı karışım akışkanlarına göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Wang vd. (2017) aseton bazlı ikili karışımlarla yüklü atımlı ısı borusunun (aseton-deiyonize su, aseton-metanol ve aseton-etanol) çalışma performansı araştırılmıştır. Karışım oranları 2:1, 4:1 ve 7:1 şeklinde olup, 10 ila 100 W aralığındaki ısıtma gücünde ve çeşitli dolum oranlarında (%45, %55, %62 ve %70) testler yapılmıştır. Düşük dolum oranında (%45), ikili karışımların zeotropik özelliklerinin atımlı ısı borusunun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Aseton-su karışımının kurumayı geciktirdiğini belirtmiştir. % 55 dolum oranında, ısıl performansın hem faz geçiş özelliklerinden hem de iş akışkanlarının fiziksel özelliklerinden etkilendiği belirtilmiştir. Yüksek dolum oranlarında ise (%62 ve %70), aseton bazlı karışımların ısı transfer performanslarının saf asetona göre daha zayıf olduğu belirtilmiştir.

Qu vd. (2017) adyabatik bölümü flor kauçuk tüplerden oluşan hibrit esnek bir atımlı ısı borusu imal etmiştir. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinde sarmal mikro oluklu bakır borular kullanılmıştır.

Xue ve Qu (2017) akış desenleri ile termo-hidrokinamik arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Farklı ısı güçlerinde akış desenlerinin kendine özgü özelliklerini belirlemek amacıyla yüksek hızlı kamera kullanarak akış görüntüleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Atımlı ısı borusu, iç çapı 2 mm ve dış çapı 6 mm olan, 6 döngülü kuvars tüpler kullanılarak tasarlanmıştır. Deneylerde iş akışkanı olarak amonyak tercih edilmiş ve %70 dolum oranında çalışılmıştır. Halkasal akışın, yüksek ısı transfer performansına sahip tek yönlü bir sirkülasyon oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca, atımlı ısı borusunun çalışma mekanizmasında, gizli ısıнын etkisinin duyulur ısıya göre daha düşük olmasına rağmen akış hareketinde itici bir rol oynadığı vurgulanmıştır.

Yoon ve Kim (2018) mikro atımlı ısı borusunun termo-hidrokinamik karakteristiklerini, özellikle ısı yük ile buhar dağılımı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Silikon tabanlı, beş döngülü ve 667 µm hidrolik çaplı bir atımlı ısı borusu tasarlanmıştır. İş akışkanı olarak etanol kullanılmış ve deneyler dikey konumda (alttan ısıtma), %55 dolum oranında gerçekleştirilmiştir. Başlıca vurgulanan ısı transfer mekanizmaları: buhar kabarcığını çevreleyen sıvı filmi boyunca gerçekleşen gizli ısı transferi ve sıvı dizinlerinin salınımıyla sağlanan duyulur ısı transferi. Her buhar kabarcığının sıvı filmi tarafından çevrelendiği ve tekrarlayan hacim genişmesi ve daralması yoluyla buharlaştırıcı bölümdeki salınım hareketini sürdürdüğü ifade edilmiştir. Yüksek ısı yüklerinde akış deseninin halkasal akış olarak karakterize edildiği, buharlaştırıcıdaki sıcaklığın artan ısı yüküyle arttığı ve buharlaştırıcı bölümde aktif kabarcıklı kaynamanın gözlemlendiği belirtilmiştir.

Lim ve Kim (2018) polimer tabanlı atımlı ısı borusunun esnek bir ısı dağıtıcı olarak geliştirilmesi ve deneysel değerlendirmesine odaklanmıştır. Polimerik esnek atımlı ısı borusunun taban imalatı için düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) femtosaniye lazer kullanılarak kesilmiştir. Isı ve basınç uygulanarak çok katmanlı lamine film, ısı borusu tabanın alt ve üst yüzeyine sıkıştırılmıştır. Yanal yönde atımlı ısı borusuna yoğunlaşmayan gazların nüfuz etmesini en aza indirmek için ısı yalıtımlı flanşlar indiyum metal ile kaplanmıştır. Atımlı ısı borusunun toplam kalınlığı 1 mm'dir.

Jun ve Kim (2019) deneysel çalışmalarında mikro atımlı ısı borusunda oluşan buhar kabarcıklarının analizini yapmıştır. Mikro termoelemanlar ve basınç sensörleri kullanılarak sıcaklıktaki geçici değişimler ve buhar kabarcıklarının basıncı ölçülmüştür. Buhar kabarcığı

sıvı filmi tarafından çevrelendiğinde kabarcık boyunca sıcaklık farkı oluşmadığını belirtmiştir. Diğer taraftan, buhar öbeği sıvı filmi olmaksızın ısı borusunun duvarı ile doğrudan temas etmesi durumunda buhar kabarcığının aşırı ısındığını ve bu nedenle, buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler arasında buhar sıcaklığında farklılıklar oluştuğu ifade edilmiştir. Yatay konumda, tekrarlayan kısa süreli durma olayından (*stopover phenomenon*) dolayı yoğunlaştırıcı bölümündeki sıvının çok düşük bir genlikte salınım yapması sonucu sıvının buharlaştırıcı bölümüne erişemediğini ve bu nedenle kurumanın gerçekleştiği belirtilmiştir.

Takawale vd. (2019) düz plakalı atımlı ısı borusu ve kılcal tüplü atımlı ısı borusu arasındaki ısı performansların ve akış rejimlerin karşılaştırılması için deneysel bir çalışma yapmıştır. Farklı dolum oranları (%40, %60 ve %80) ve değişen ısıtma güçlerinde (20-80W) akış rejimlerine ve ısı performanslarına dayanılarak iki konfigürasyon arasında bir kıyaslama yapılmıştır. İş akışkanı olarak etanol kullanılmış ve atımlı ısı boruların konumları alttan ısıtma (dikey) şeklindedir. Kılcal tüplü atımlı ısı borusunda, düz plakalı atımlı ısı borusuna kıyasla salınımların genliği daha yüksektir. Düz plakalı atımlı ısı borusunun düşük ısı performansının gerçekleşen yanal iletimden kaynaklandığı belirtilmiştir. Yanal iletimin bitişik kanallar arasında ısı transferi sağladığı için, her bir kanalın sıcaklık gradyanı azalmıştır. Sıcaklık gradyanı, sıvı ve buhar fazları arasında basınç farkı oluşturarak salınım hareketini tetikler. Dolayısıyla, düşük sıcaklık gradyanlarının salınım oluşumunu zorlaştırdığı ve bu durumun salınım genliğini zayıflattığı sonucuna varılmıştır.

Liu vd. (2019) silikon tabanlı mikro atımlı ısı borularında termo-hidrokinamik etkileri incelemek amacıyla eş zamanlı ısı ve görsel analizler gerçekleştirmiştir. Atımlı ısı borusu, hidrolik çapı 550µm olan dikdörtgen kesitli kanallardan oluşturulmuş ve iş akışkanı olarak aseton tercih edilmiştir. Farklı ısı yükleri, dolum oranları ve eğim açıları altında mikro atımlı ısı borusunun sıvı akışı ve sıcaklık salınım özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, farklı çalışma parametreleri altında akış hareket diyagramları ve ısı direnç kontur haritaları düzenlenmiş ve ısı performans ile ilişkilendirmek için analiz edilmiştir. Kabarcıklı akış, uzun kabarcıklı akış (*slug flow*) ve halkasal akış (*annular flow*) desenleri gözlemlenmiştir. Eğim açısı arttıkça, ısı yük ve dolum oranının verimli çalışma aralıkları artmıştır. Bu bulgular, yerçekiminin mikro atımlı ısı borusunun performansında hâlâ ihmal edilemez bir pozitif rol oynadığını göstermiştir.

Jo vd. (2019) 5 döngülü mikro atımlı ısı borusunun ısı transfer mekanizmasını incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yerel sıcaklık ve ısı akısına karşılık gelen

yerel akış desenlerini belirlemek için eş zamanlı olarak akış görüntüleme yapılmıştır. Atımlı ısı borusunun ısı transfer mekanizmasını anlamak için, duyulur ve gizli ısı transferinin toplam ısı transferine olan katkılarının ölçülmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Isının, sıvı yığınlarının bulunduğu bölgelerde tek fazlı zorlanmış taşınım ile aktarılırken buhar kabarcıklarını çevreleyen ince sıvı filminin bulunduğu alanlarda ince film yoğuşmasının meydana geldiği belirtilmiştir. Film yoğuşması ile gerçekleşen ısı transferinin sıvı yığını ile oluşan taşınımlı ısı transferinden çok daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Gizli ısı transferinin baskın ısı transfer mekanizması olduğu sonucuna varılmıştır.

Xu vd. (2019) çalışmalarında farklı eğim açıları ve ısıtma güçleri altında atımlı ısı borusunun çalışma karakteristikleri ve ısı transfer performansı deiyonize su, HFE-7100 ve beş farklı zeotropik karışmaz ikili karışımla (4:1, 2:1, 1:1, 1:2 ve 1:4) deneysel olarak incelemiştir. HFE-7100 oranının artmasıyla kanaldaki uzun buhar kabarcıklarının tam dağılımı kademeli olarak azalmış, iş akışkanının salınım frekansı artmış ve buhar akışı (*plug flow*), kademeli olarak kararlı, tek yönlü bir akış döngüsü şeklinde elde edilmiştir.

Jung vd. (2020) uzun vadeli çalışma güvenilirliğini sağlamak için metal ile hava geçirmez şekilde kapatılmış yüksek performanslı esnek atımlı ısı borusunun üretimi üzerine bir çalışma sunmuştur. Atımlı ısı borusunun taban malzemesi olarak bir polikarbonat levha kullanılmış ve kimyasal işlem ile esnek-bakır kaplı laminatlarla (*flexible-copper-clad-laminates*, FCCL) kaplanmıştır. Pikosaniye lazer kullanılarak polikarbonat tabaka üzerine 15 döngülü, çift çaplı bir atımlı ısı borusu oluşturulmuştur. Kanalin genişlikleri 0.5 mm ve 1.5 mm, kanalın yüksekliği ise 0.5 mm'dir.

Der vd. (2021) düz plakalı polimerik atımlı ısı borularının geliştirilmesi ve ısıl yönetim üzerindeki etkisini vurgulamak için parametrik bir analiz sunmuştur. Katmanlı bir yapıya sahip esnek atımlı ısı borularını üretmek için polipropilen malzeme kullanmıştır. Atımlı ısı borusu, ticari bir lazer kesici kullanarak siyah bir polipropilen levha üzerine serpantin kanalın oluşturulması, aynı malzemeden iki şeffaf polipropilen levha arasına sıkıştırılması ve seçici lazer kaynağı ile birbirine bağlanması ile üretilmiştir.

Han ve Chang (2023) 3D baskı teknolojisi (*Fused deposition modeling*, FDM) kullanılarak oluşturulan polimerik esnek atımlı ısı borusu üretmiştir. Baskı işlemi sırasında termoplastik poliüretan (TPU) filament kullanmıştır. Atımlı ısı borusunun genel boyutları, 87 mm x 25 mm x 5 mm ve 4 döngüden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan iş akışkanı etanoldür. Dolum oranlarının (%30-%60), ısıtma gücü girişlerinin (1 W-8 W) ve bükülme açılarının (0°, 45° ve 90°) atımlı ısı borusunun ısıl performansı üzerindeki etkileri

analiz edilmiştir. En düşük ısı direnç, %40 dolum oranında elde edilmiştir ve ısı direnç bükülme açısı arttıkça artmıştır.

Solanki ve Kapadia (2023) buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri için bakır kılcal tüpler ve adyabatik bölüm için silikon kauçuk tüp kullanılarak esnek atımlı ısı borusu tasarlamıştır. 0° , 45° , 60° ve 90° bükülme açılarındaki testler yapılmıştır. Adyabatik bölümde bükülmeden kaynaklanan deformasyonun atımlı ısı borusunun çalışmaya başlamasını geciktirdiğini ve ısı performansı olumsuz etkilediği sonucuna varmıştır. Dikey konumlandırılarda (0°), 99,88 W ısıtma gücünde 0.65°C/W minimum ısı direnç ile en iyi ısı performansı sergilemiştir.

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Isıl kontrol yöntemleri, aşırı ısınmayı önleme, optimum performansı koruma ve bileşenlerin güvenilirliği ile uzun ömürlülüğünü artırma açısından elektronik cihazlar için kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, işletim esnasında oluşan ısıyı etkin bir şekilde dağıtarak cihazların ideal sıcaklık aralıklarında tutulmasını sağlar ve böylece hasar veya arıza riskini azaltır. Atımlı ısı boruları, faz değişimi, kılcal hareket, optimize edilmiş kanal tasarımı, farklı konumlara uyarlabilirlik gibi avantajları sayesinde ısı aktarım verimliliğini artırarak, çeşitli uygulamalarda ısı yönetim için etkili çözümler sunar.

Atımlı ısı boruları için ilgili literatürde, yer çekimi desteğinin azaldığı konumlandırmalarda özellikle az döngülü tasarımlarda sistemin çalışmaması nedeniyle kontrolsüz sıcaklık artışları ve buharlaştırıcıda kuruma gibi problemlerin olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, ilgili kritik problemlere çözüm bulmak için geniş parametre aralığında, farklı kanal konfigürasyonlarına sahip düz plakalı bakır tabanlı kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performans ve akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. İş akışkanı olarak etanolün kullanıldığı beş farklı kanal geometrisi ile çeşitli eğim açılarındaki (-90° , 0° , 30° , 60° ve 90°), dolum oranlarında (%20, %40, %50, %60 ve %80) ve ısı yükleri altında testler gerçekleştirilmiştir. Farklı dolum oranları, eğim açısı ve ısıtma gücünün akış modelleri aracılığıyla atımlı ısı borusunun ısı transferi üzerindeki birleşik etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Özgün geometrik düzenlemeler sayesinde, az döngülü atımlı ısı borularında, kendi kendine sürdürülebilir salınımlı akışın desteklenmesi, yerçekimine olan bağımlılığın azaltılması, kurumanın önlenmesi / ötelenmesi ve akış görüntüleme ile karmaşık fiziksel

yapının irdelenmesi amaçlanmıştır. Her bir döngüde, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinde farklı kesit oranlarına sahip atımlı ısı borusu tasarımları geliştirilmiştir. Ardışık kanallardan birinin, buharlaştırıcı bölümüne denk gelen kısmı daha geniş tutularak bu bölümdeki sıvı miktarının artırılması ve kurumanın önlenmesi hedeflenmiştir. Döngü içerisinde kademeli daralma sağlanarak akış sirkülasyonunun iyileştirilmesi ve yerçekimi etkisinin azaltılması amaçlanmıştır.

Atımlı ısı borularının performansını ve işlevselliğini üretim tekniği de etkilemektedir. Malzeme geliştirme ve üretim tekniklerindeki ilerlemeler, esnek, kompakt, küçük ölçekli ve hafif yeni nesil elektronik cihazların üretilmesini sağlamıştır. Özellikle, katlanabilir elektroniklerde kullanılmak üzere, farklı şekil ve boyutlardaki ısı kaynakları ve soğutuculara uyum sağlayacak şekilde bükülebilir atımlı ısı borularının tasarımı, bu tür uygulamalar için ideal bir seçenek haline gelmektedir. Esnek atımlı ısı boruları oldukça popüler ve güncel bir konu olmasına rağmen sınırlı sayıda araştırmalar bulunmaktadır. Bu durumun temel sebebi, esnek atımlı ısı borusu üretimi ve çalışma performansı için önerilen yaklaşımlarda ortaya çıkan teknik sorunlardır. Bu bağlamda, polimer tabanlı atımlı ısı borusunun stereolitografi (SLA) tekniği kullanılarak üretilmesi, esnek, uyarlanabilir ve hafif ısı yönetim çözümleri sunmak adına yenilikçi bir adımı temsil etmektedir.

Bu çalışmada, literatürde ilk kez, düz plakalı polimerik atımlı ısı boruları, sıvı fotopolimer reçineyi katılaştırmak için UV ışığı kullanan SLA tekniği ile üretilmiştir. Farklı geometrik modellere sahip atımlı ısı borularının ısı performansını deneysel olarak değerlendirilmiştir. İş akışkanı olarak, düşük kaynama noktası ve UV reçine ile uyumluluğu nedeniyle FC-72 kullanılmıştır. Alttan ısıtma konfigürasyonu (90°) ve %50 sabit dolum oranında 5W ila 30W ısıtma güçleri için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Esnek, ince ve hafif bir ısı transfer cihazının geliştirilmesinde atımlı ısı borusunun polimer malzemeden tasarlanması, üretim kolaylığı, maliyet etkinliği, hafiflik ve esneklik gibi avantajlı yönler sunmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Atımlı ısı borularında (*pulsating heat pipes*, PHPs), çalışma prensibi ve yapısal özellikleri nedeniyle, geleneksel ısı borularındaki gibi akışkanın buharlaştırıcı bölümüne geri dönüşünü destekleyen bir fitil malzemesi bulunmamaktadır. Bu nedenle, buharlaştırıcı bölümünde üretilen doğal pompalama gücünün, yani itici kuvvetin, atımlı ısı borusunun buharlaştırıcı ve yoğuşurucu bölümleri arasındaki sirkülasyonu sağlaması gerekmektedir. Sürekli ve istikrarlı bir çalışma için akış döngüsü korunmalı ve buharlaştırıcı bölgesi sıvı tarafından ıslatılmalıdır. Aksi takdirde buharlaştırıcı bölgesinde kuruma meydana gelir ve bu durum, atımlı ısı borusunun çalışması esnasında en istenmeyen bir senaryodur. Bu nedenle, atımlı ısı borusunun ısıl performansı üzerinde geometrik tasarım kritik bir öneme sahiptir.

Bu tez kapsamında, farklı kanal konfigürasyonlarına sahip bakır ve polimer tabanlı atımlı ısı borularının ısıl performans ve akış karakteristiği deneysel olarak incelenmiştir. Kanal geometrisi, dolum oranı, ısıtma gücü, eğim açıları gibi kritik çalışma parametrelerinin ısıl performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Atımlı ısı borularında, iki fazlı akış sırasında oluşan akış desenleri, ısıl performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, atımlı ısı borularının çalışma mekanizmasını anlamak ve akış desenlerini incelemek amacıyla ısıl testlerin yanı sıra akış görüntüleme de yapılmıştır.

Bu bölüm, atımlı ısı borularının geometrik tasarımı ve üretimi, deneysel kurulum ve aşamaları, çalışma koşulları ve hesaplama yöntemleri hakkında detaylı bilgileri iki ana başlık altında sunmaktadır. İlk kısımda, bakır malzemeden üretilen atımlı ısı borularının deneysel aşamaları detaylandırılmıştır. Deney düzeneğinin bölümleri, kullanılan cihazlar ve sistemin genel yapısı tanıtılmış; deney öncesinde yapılan sızdırmazlık testleri ve deneyin uygulanma süreci ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. İkinci kısımda ise polimer malzemeden üretilen atımlı ısı borularının deneysel aşamaları detaylandırılmıştır. Polimerik atımlı ısı borularının üretim süreci ve geometrik özellikleri hakkında bilgi verilmiş, deney düzeneği ve sistem bileşenleri tanıtılmıştır.

2.1. Bakır Tabanlı Atımlı Isı Borusu İçin Deneysel Yöntem Aşamaları

2.1.1. Tasarım ve Üretim

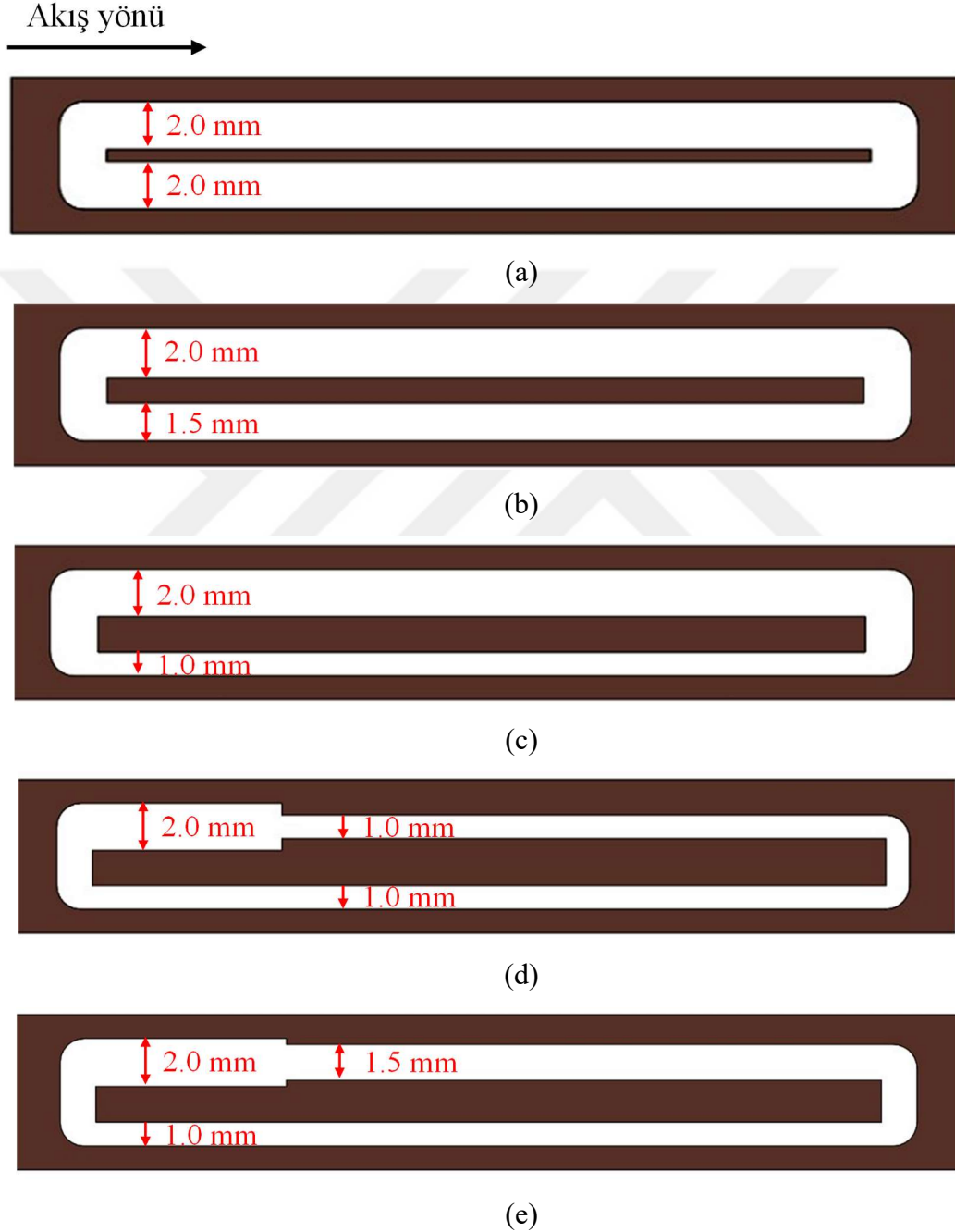
Bu bölümde, beş farklı düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusu üretilmiştir. Tüm atımlı ısı borularının kanal yükseklikleri sabit olup 2 mm'dir. Burada, değişkenlik gösteren faktör kanal genişliğidir ve boyutların daha anlaşılır olması için her bir atımlı ısı borusunun kanal genişlikleri Şekil 1'de tek bir döngüde gösterilmiştir. Sekiz döngüden oluşan atımlı ısı borularında toplam 16 kanal mevcuttur.

Farklı dolum oranları ve eğim açıları için kanal kesit oranının ısı performans üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, PHP1, PHP2 ve PHP3 olarak isimlendirilen atımlı ısı boruları tasarlanmıştır. Şekil 10a, b ve c'de görüldüğü üzere, PHP1, PHP2 ve PHP3 için paralel kanallar arasında kesit oranı, kanal genişliklerinin değiştirilmesi ile sağlanmıştır. Asimetrik (üniform olmayan) kanal kesitlerine sahip atımlı ısı boruları dengelenmemiş kılcallık kuvveti oluşturarak yerçekimine olan bağımlılığı azaltmayı hedefleyen bir tasarım yaklaşımı ile oluşturulmuştur.

Atımlı ısı borularının kanal geometrilerini tasarlarken hedeflenen stratejik yaklaşımlardan biri, buharlaştırıcı bölümünü daha geniş tutarak bu bölgede sıvı miktarını artırmak ve kurumunun önlenmesini veya geciktirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla, döngü içerisindeki kanallardan birinin buharlaştırıcı bölümü daha geniş, yoğunlaştırıcı ve adyabatik bölümlerinin ise aynı genişliğe sahip olduğu PHP4 tasarlanmıştır (Şekil 10d). Ayrıca, döngü içerisinde kademeli daralma sağlanarak, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri için farklı kesit oranları içeren PHP5 geometrisi sunulmuştur (Şekil 10e). PHP5'in her kanal çifti kademeli olarak daraltılmış bir kesit yapısına sahiptir. Buharlaştırıcı bölgesindeki bir dönüşün yarısına denk gelen kanal kesiti 2 mm genişliğindedir. Bu genişlik, daha sonra 1,5 mm'ye düşmekte ve bu değer yoğunlaştırıcı bölümün sonuna kadar geçerliliğini korumaktadır. Yoğunlaştırıcı bölümünün çıkışında ise genişlik 1 mm'ye kadar daralmaktadır. Bu şekilde, bir kanal çifti arasında iki farklı kesit oranı elde edilebilmektedir.

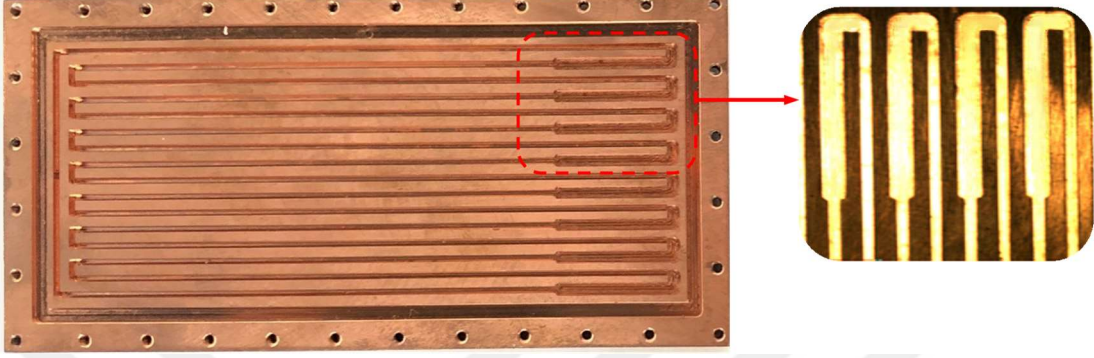
Kademeli kesit değişimi veya daralma ile dengelenmemiş ek kılcallık kuvvetinin etkinliğinin artırılması ve böylece yer çekimine olan bağımlılığın azaltılması amaçlanmaktadır. Böylece, sistemin yatay konumda da çalışmaya devam etmesi sağlanabilecektir. Bu durum, aynı zamanda akış sirkülasyonunun iyileşmesi anlamına da

gelmektedir. Akış sirkülasyonunun iyileşmesi, yoğunlaştırucu bölgesinde yoğunlaşan sıvının buharlaştırıcıya sürekli ulaşmasını sağlayarak kuruma problemini önleyecektir. Önerilen tasarım ile döngü boyunca akışın hızlanıp hızlanmadığı ve bunun ısı performans üzerindeki etkisi incelenecektir.



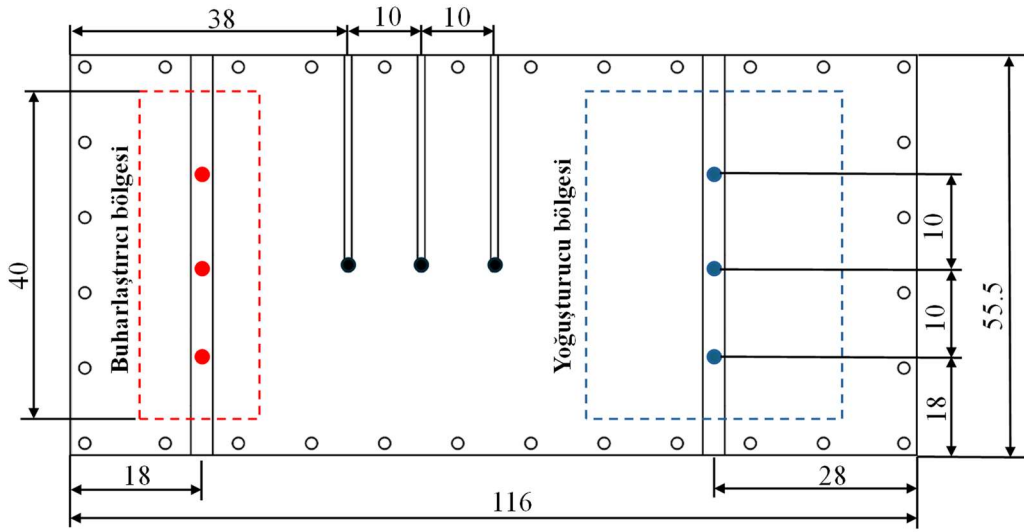
Şekil 10. Atımlı ısı borularının tek döngüde kanal genişliklerinin gösterimi: PHP1 (a), PHP2 (b), PHP3 (c), PHP4 (d) ve PHP5 (e)

Atımlı ısı borularının her biri, toplam boyutları 116 mm x 55.5 mm x 4 mm olan saf bakır plakalar üzerine yüksek devirli CNC freze tezgahında işlenerek üretilmiştir. Şekil 11’de üretilen atımlı ısı borusunun fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 11. Üretilen atımlı ısı borusu

Atımlı ısı borularının arka yüzeyine yerleştirilen termoelemanların şematik gösterimi ise Şekil 12’de verilmiştir. Buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu bölgelerindeki sıcaklık değerlerini ölçmek için her bölgede üçer adet T-tipi termoeleman (Omega) kullanılmıştır. Tüm atımlı ısı boruları için termoelemanların dağılımı aynıdır. Termoeleman için atımlı ısı borusunun arka yüzeyine açılan oluklar her bölge de 1 mm derinliğindedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgelerindeki termoelemanlar radyal olarak yerleştirilmiş olup, bu bölgelerde oluk genişliği 3 mm’dir. Adyabatik bölgede ise 1 mm genişliğinde üç adet eksenel oluk bulunmaktadır. Şekil 12’de kırmızı kesikli çizgilerle gösterilen kısım buharlaştırıcı bölgesini temsil etmektedir ve bu bölüm, ısı borusuna ısıtma gücünü sağlayan ısıtıcı blok üzerine yerleştirilir. Mavi kesikli çizgilerle çevrili alan ise soğutucu plakanın bakır yüzeyine yerleştirilen yoğuşturucu bölgesine karşılık gelmektedir. Bu iki bölge arasında kalan alan ise adyabatik bölgedir.



Şekil 12. Termoelemanların yerleşimi

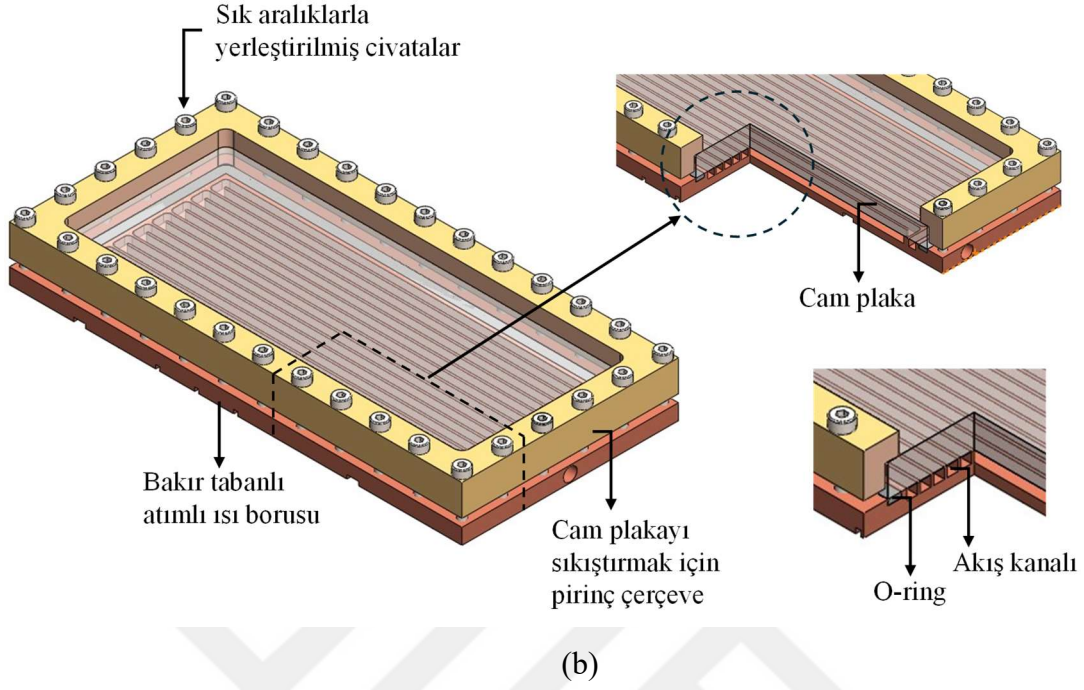
Atımlı ısı boruları, akış görselleştirmeye izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Atımlı ısı borularının üst yüzeyi, 6 mm kalınlığında şeffaf temperli cam plaka ile kapatılmıştır. Kapalı bir hacim oluşturmak amacıyla, cam plakanın üzerine pirinç malzemeden üretilmiş destekleyici bir çerçeve yerleştirilmiştir. Bu çerçeve, çevresel olarak yerleştirilen 32 adet (M2) cıvata ile bakır atımlı ısı borusuna sıkıca monte edilmiştir. Cıvataların düzenli ve sıkı bir şekilde montajı, atımlı ısı borularının üst yüzeyi ile cam yüzey arasındaki tam teması sağlar. Ayrıca, olası bir sızıntıyı önlemek amacıyla cam ve atımlı ısı borusu arasına bir O-ring yerleştirilmiştir. Atımlı ısı borusunun yoğuşurucu bölgesinde, vakum ve dolum işlemleri için bir port bulunmaktadır. Atımlı ısı borusunun tam montajlı resmi (a) ve kapalı formdaki detayları gösteren çizimler (b) Şekil 13'te verilmiştir.



(a)

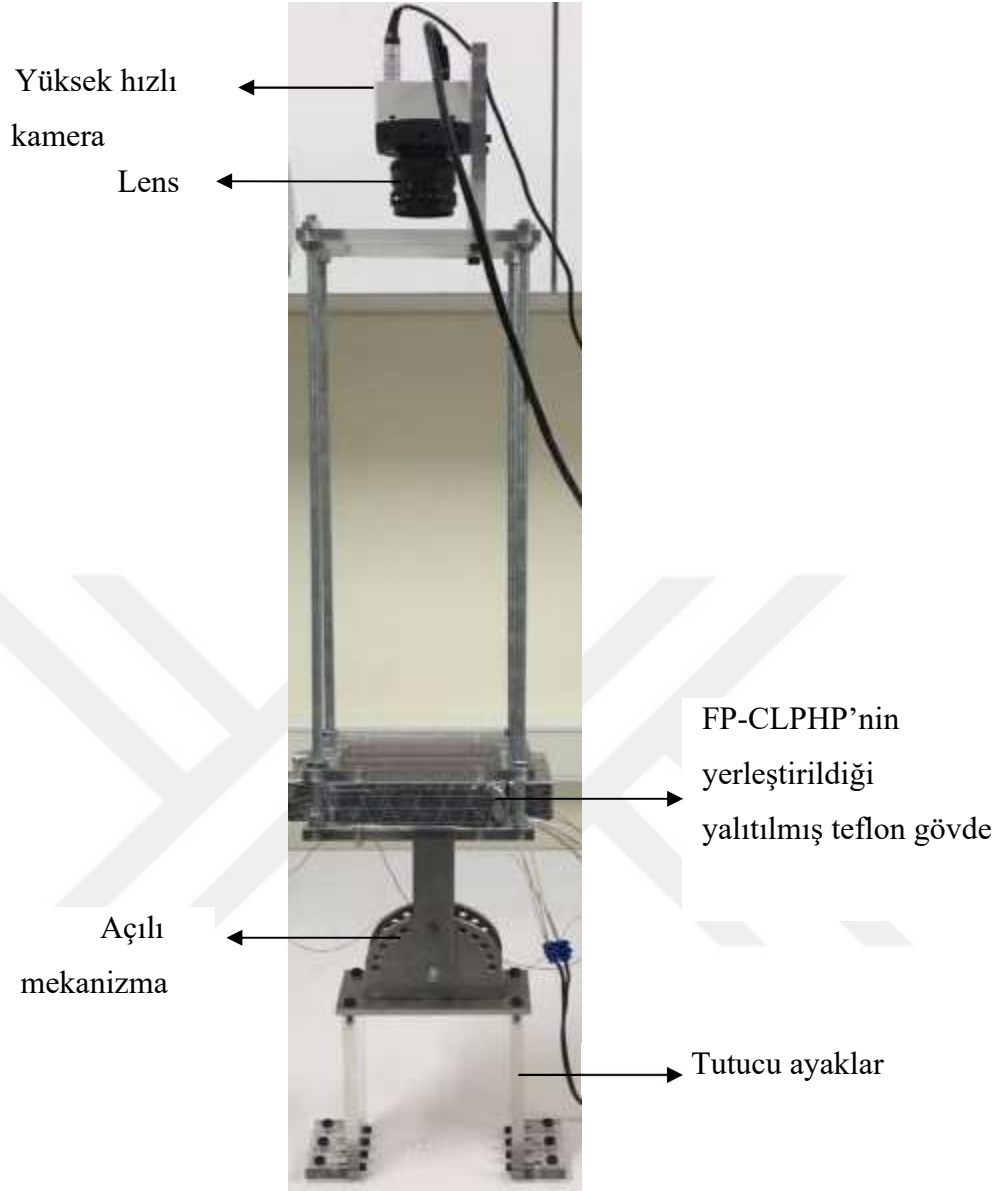
Şekil 13. Atımlı ısı borusunun montajlı (a) ve kesit (b) resimleri

Şekil 13'ün devamı



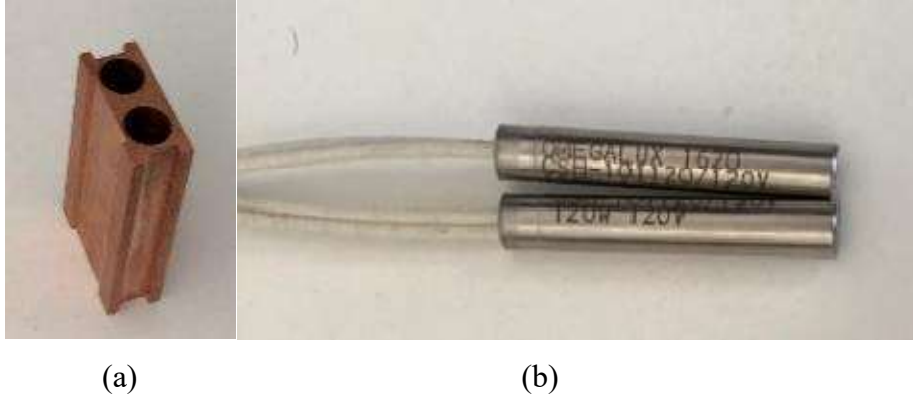
2.1.2. Test Bölümü

Genel görünümü Şekil 14'te sunulan test bölümü, deney sisteminin temel parçasıdır. Test bölümü; teflon gövde, ısıtıcı blok, soğutucu plaka ve atımlı ısı borusu olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Teflon gövde, atımlı ısı borusunu, ısıtıcı bloğu ve soğutucu plakayı muhafaza edecek şekilde tasarlanmıştır. Teflonun ısıl iletkenliği düşük ($\approx 0.25 \text{ W/mK}$) olmasına rağmen, ısı kaybını en aza indirmek amacıyla teflonun dış yüzeyleri, yaklaşık 0.033 W/mK ısıl iletkenliğe sahip ekstrüde polistiren (XPS) tabakalarla kaplanmıştır. Teflon gövde, deneyler sırasında istenilen açığı sağlamak için ayarlanabilir bir mekanizma üzerine yerleştirilmiştir.



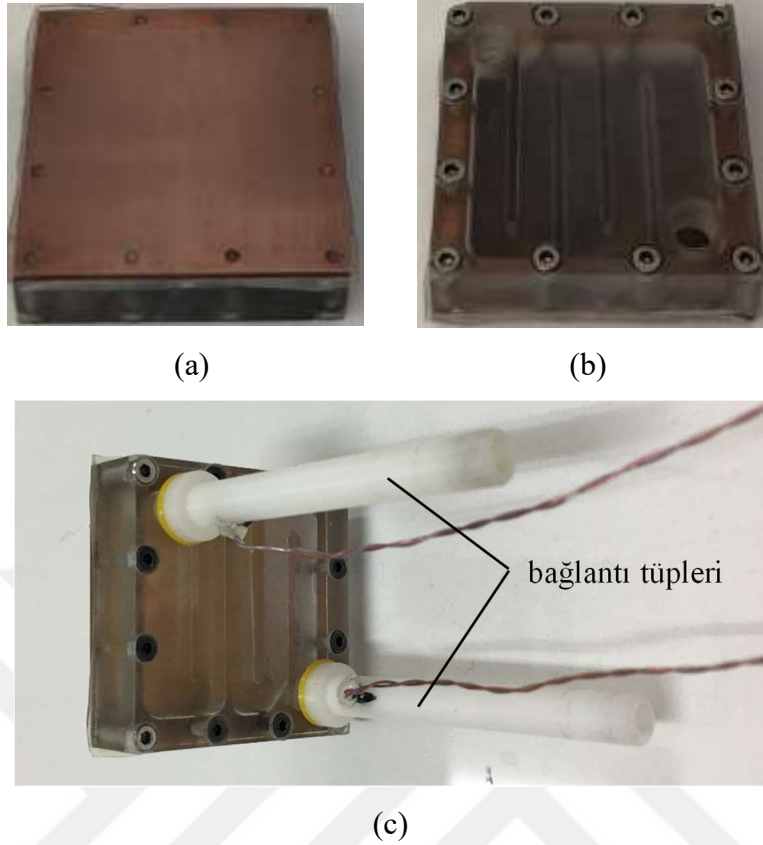
Şekil 14. Test bölgesinin genel görünümü

Isıtıcı blok, 20 mm x 40 mm platform alanına sahip 9 mm kalınlığında bakır malzemeden üretilmiştir. Bloğun içerisine iki adet kartuş ısıtıcı (maksimum kapasitesi: 120W) yerleştirilmiştir. Bloğun üst yüzeyi, atımlı ısı borusunun buharlaştırıcı bölümüyle temas halindedir. Şekil 15'te tasarlanan ısıtıcı bloğun ve kartuş ısıtıcıların fotoğrafları yer almaktadır.



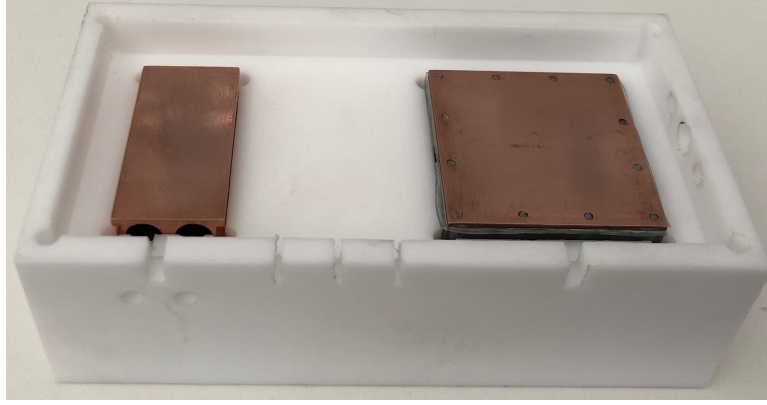
Şekil 15. Isıtıcı blok (a) ve kartuş ısıtıcılar (b)

Atımlı ısı borusunun çalışma prensibi gereği, buharlaştırıcı bölgesinde alınan ısıyı yoğuşturucu bölgesinden dış ortama atılması gerekmektedir. Bu amaçla, içerisinde soğutma suyunun dolaşımını sağlayan bir soğutucu plaka tasarlanmıştır. Soğutucu plaka, 2mm kalınlığında bakır levha ile 10 mm kalınlığında polikarbonat levhadan oluşan iki parçalı bir yapıya sahiptir. Platform alanı 40 mm x 40 mm olan bakır levha, polikarbonat parçaya vidalanmıştır. Soğutucu plakanın bakır yüzeyi, ısı borusunun yoğuşturucu bölümü ile temas eder. Polikarbonat plaka üzerine soğutma sıvısının dolaşımı için kıvrımlı kanallar açılmıştır. Soğutma suyu, atımlı ısı borusunun yoğuşturucu bölümünden ısıyı absorbe etmek amacıyla soğutucu plakanın içindeki kıvrımlı kanallardan geçmektedir. Kanalların giriş ve çıkışına polyamid malzemeden üretilen bağlantı tüpleri yerleştirilmiştir. Soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları, bu tüpler üzerindeki T-tipi termoelemanlar ile ölçülmüştür. Bağlantı tüpleri, sirkülasyon hattındaki borularla birleştirilerek yoğuşturucu bölümü için kapalı devre bir sirkülasyon hattı oluşturulmuştur. Soğutucu plakanın üst ve alt yüzeyleri ile polyamid tüp üzerindeki termoelemanlara ait fotoğraflar, sırasıyla, Şekil 16a, b ve c’de verilmiştir.



Şekil 16. Soğutucu plakanın üst (a) ve alt (b) yüzeyleri ile termoeleman bağlantıları (c)

Test bölgesinin dış gövdesi; atımlı ısı borusu, ısıtıcı blok ve soğutucu plakanın birbiriyle bağlantısını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Teflon (Politetrafloroetilen, PTFE), dış gövde malzemesi olarak tercih edilmiş ve sistemin geometrik özelliklerine göre işlenmiştir. Teflonun tercih edilme sebebi, ısı iletim katsayısının düşük olması (yaklaşık 0.25 W/mK) ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır. Bu sayede, test bölgesinden çevreye olan ısı kayıpları en aza indirilmiştir. Ayrıca, sistemin çalışma sıcaklığı aralığı dikkate alındığında gövde malzemesinde herhangi bir erime veya deformasyon oluşmamaktadır. Isıl temas direncini en aza indirmek için atımlı ısı borusu, ısıtıcı blok ve soğutucu plaka arasındaki arayüzlere termal macun (Omega OT-201) uygulanmıştır. Isıtıcı blok ve soğutucu plakanın teflon gövdeye yerleşimi Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Isıtıcı blok ve soğutucu plakanın teflon gövdeye yerleşimi

2.1.3. Deney Düzenəğinin Kurulumu

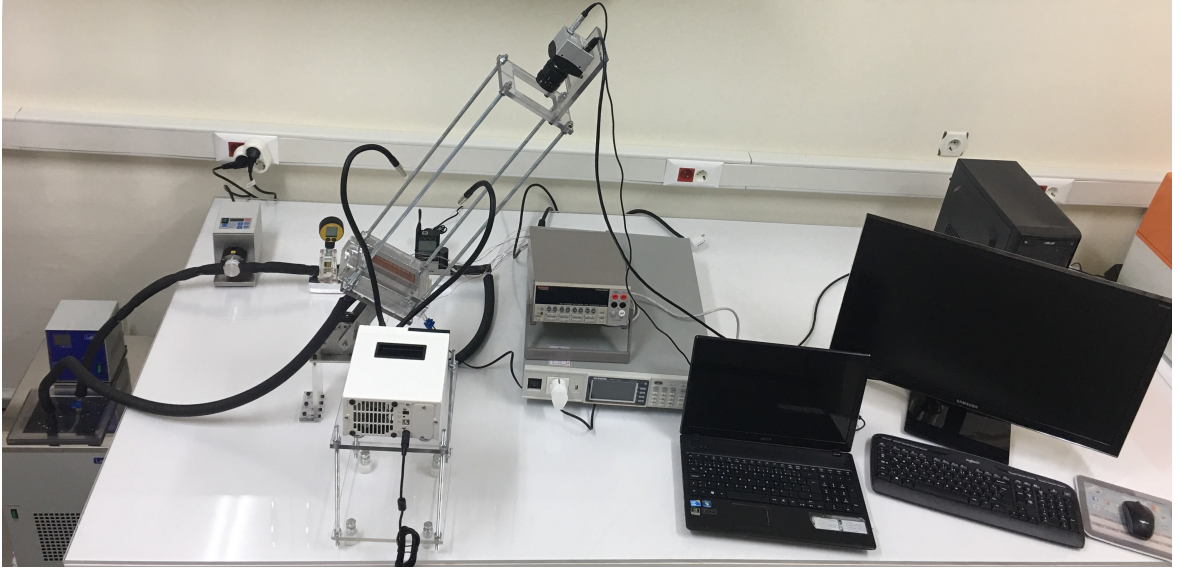
Deney setinin genel görünümüne ait bir fotoğraf ve bir şematik resim Şekil 18’de yer almaktadır. Deney setinin temel kısımları; test bölümü, soğutucu akış hattı ve akış görselleştirme-veri toplama ünitesidir.

Test bölümünün imalatı ve montaj aşamaları, önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Test bölümünde ısıtıcı bloğa yerleştirilen kartuş ısıtıcılar, belirlenen ısıtma gücünü atımlı ısı borusuna aktarmak için bir AC güç kaynağına (GW INSTEK / APS-7100) bağlanmıştır. Isıl yük değerleri, güç kaynağının ön paneli üzerinden sabit bir frekansta (50 Hz) gerilim ayarlarıyla kontrol edilmiştir.

Yoğuşturucu bölgesinin alt yüzeyine yerleştirilen soğutucu plaka, kapalı devre bir soğutucu akış hattına bağlıdır. Bu akış hattı, sabit sıcaklık banyosu, dijital pompa sürücüsü ile mikro pompa, manometre, dijital akış ölçer, teflon borular ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Sabit sıcaklık banyosu (Labo / PH200-22), deney süresince soğutma suyunun soğutucu plakaya giriş sıcaklığını sabit tutmak (20 °C) amacıyla kullanılmıştır. Soğutma suyunun sirkülasyon akış hattında bulunan bir dişli mikro pompa (Cole-Parmer / 73003-14) aracılığıyla sağlanmıştır. Dişli pompa, manyetik tahrikli hassas bir dijital pompa sürücüsü (Ismatec / 78008-15) ile bütünleşik olarak çalışmaktadır. Böylece, akışkan debisi (20 ml/dk) pompa sürücüsü üzerinden hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Soğutucu akış hattında bulunan akış kontrol cihazı (Cole-Parmer / 32907-44) pompadan geçen akışkan debisini kontrol etmektedir. Dişli pompanın çıkışına yerleştirilen dijital manometre (Keller / LEO2) ise sistem basıncını ölçmek için kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin bir diğer bölümü, akış görselleştirme-veri toplama ünitesidir. Görüntüleme için yüksek hızlı kamera (Fastec / HiSpec4 Color), lens (Navitar / 25mm f/0.95, 1" format), ışık kaynağı (PHOTONIC OPTICS / F3000) ve masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Kameranın test bölgesinden olan uzaklığı, lensin odak mesafesine bağlı olarak ayarlanmıştır. Akış görüntüleri, 1000 fps ile kaydedilmiştir ve kamera ara yüz programı aracılığıyla “.jpeg” ve “.avi” formatlarında dijital ortama aktarılmıştır.

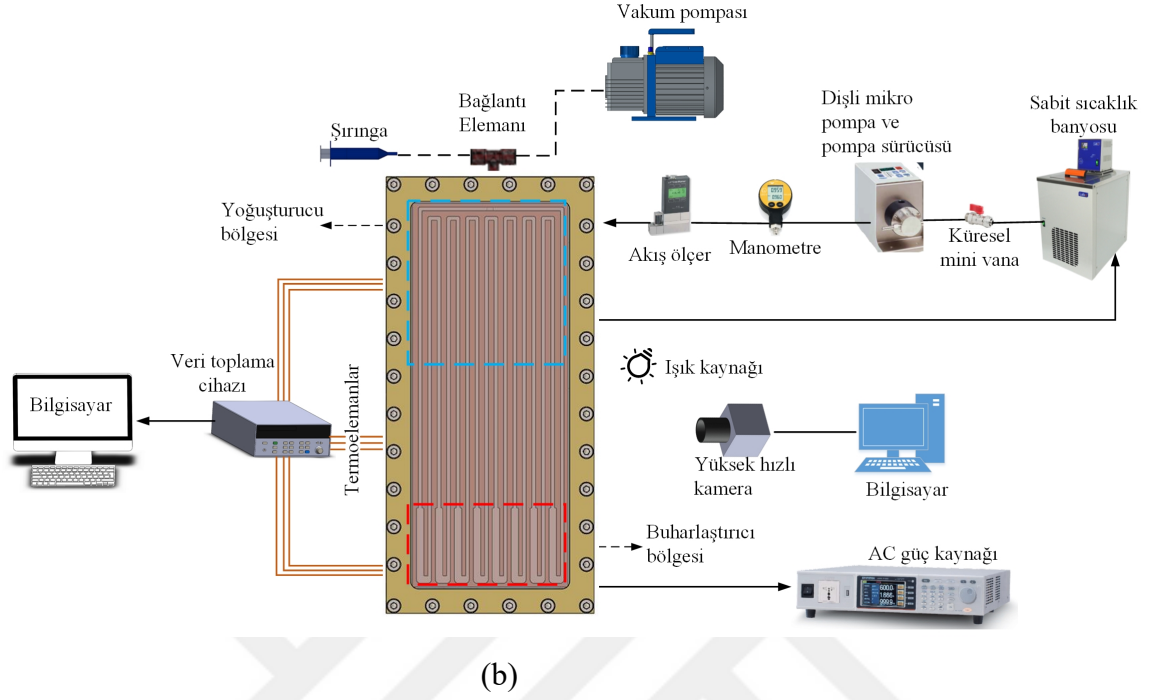
Test bölgesindeki sıcaklık ölçümlerinin dijital ortamda kaydedilmesi ise veri toplama ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Veri toplama sistemi; veri toplama cihazı (Keithley / 2701/E), 40 kanallı bir veri kartı (Keithley / 7708) ve dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Deneyler esnasında sistem kararlı hale geldiğinde, veri kartında aktif olan kanallardan belirli bir aralık süresince sıcaklık değerleri okunarak kayıt altına alınmıştır. Veri toplama işlemi, dizüstü bilgisayara kurulan EXCELINX ara yüz programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



(a)

Şekil 18. Deney düzeneğinin görünümü: fotoğraf (a) ve şematik resim (b)

Şekil 18'in devamı

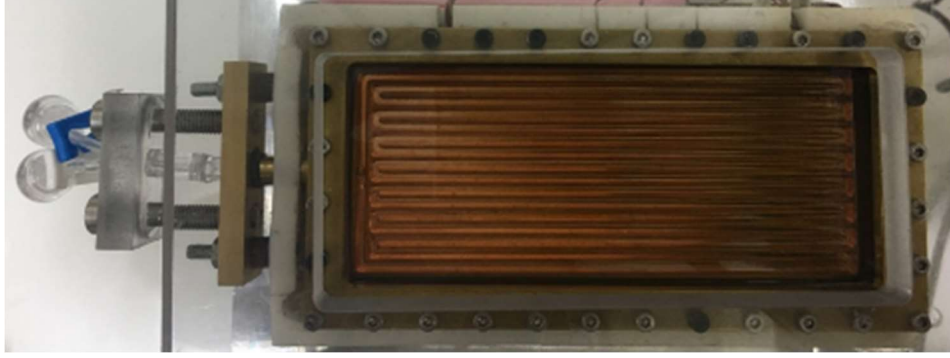


2.1.4. Sızdırmazlık Testi

Atımlı ısı borusuna iş akışkanının doldurulabilmesi için içerideki havanın tamamen tahliye edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yoğuşturucu bölgesinde bulunan port ve ara bağlantı elemanları kullanılarak tahliye ve dolum prosesi gerçekleştirilmiştir. Ara bağlantı bileşenlerinin resmi Şekil 19'da gösterilmiştir. Her deney öncesinde vakumlama işlemi yapılmıştır. Vakum pompası (VALUE / V-i260SV), port ile bağlantı kurularak aktif hale getirilmiştir. Vakumlama işleminden sonra sızdırmazlığın kontrol edilmesi için atımlı ısı borusuna toplam iç hacmi kadar iş akışkanı doldurulmuştur. Akışkanın atımlı ısı borusu içerisinde tamamen yayılması, vakumlama işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Deneylerde iş akışkanı olarak saf etanol (Merck) kullanılmıştır. Etanolün atmosferik basınçtaki termodinamik özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Etanolün atmosferik basınçtaki termodinamik özellikleri (Kim ve Kim, 2020)

ρ_l	μ_l	$C_{p,l}$	H_{lv}	$\sigma \times 10^{-3}$	$(dP/dT)_{sat}$
[kg m ⁻³]	[Pa s]	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]	[kJ kg ⁻¹]	[N m ⁻¹]	[kPa °C ⁻¹]
789.34	1.19	2.40	926.01	22.35	0.35



Şekil 19. Doldurma / boşaltma portunun görünüşü

2.1.5. Deney Prosedürü

Atımlı ısı borularının ısı performansını ve akış karakteristiklerini çeşitli dolum oranlarında (20%, 40%, 50%, 60% ve 80%) ve eğim açılarında (-90° , 0° , 30° , 60° ve 90°) incelemek üzere deneyler yapılmıştır. Uygulanan deney yönteminin aşamaları şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, atımlı ısı borusu içerisindeki havanın tahliyesi için vakum pompası çalıştırılır. İş akışkanı kaynatılarak içindeki çözünmüş oksijen miktarı azaltılır. Ardından, atımlı ısı borusu istenilen dolum oranında iş akışkanı ile doldurulur ve sistemin eğim açısı ayarlanır. Soğutucu akış hattı devreye alınarak, soğutma suyunun debisi 20 ml/dk olarak ayarlanır ve giriş sıcaklığı 20°C 'ye sabitlenir. Güç kaynağı aktif edilir ve başlangıç ısıtma gücü değeri 5 W'ta ayarlanır. Buharlaştırıcı bölümünün ortalama sıcaklığı yaklaşık 110°C 'ye ulaşana kadar ısı yük 5 W'lık artışlarla artırılır. Her ısıtma gücünde, sistem kararlı duruma ulaştığında (yaklaşık 20-25 dakika), sıcaklık ölçümleri veri toplama ünitesi aracılığıyla kaydedilir. Akış görüntüleri ise akış görselleştirme sistemi kullanılarak kaydedilir. Bu deney prosedürü, her dolum oranında ve tüm eğim açıları için tekrarlanır.

2.1.6. Deneysel Verilerin Analizi

Isıl direnç, atımlı ısı borularının ısı performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir kavramdır. Çalışma koşulları, boyutları ve malzemesi göz önünde bulundurularak, belirli bir uygulama için en uygun atımlı ısı borusu geometrisinin seçilmesine veya etkinliğinin karşılaştırılmasına yardımcı olur. Düşük ısı direnç

değerlerine sahip bir atımlı ısı borusu, ısıyı uzunluğu boyunca etkili bir şekilde taşıma kapasitesine sahiptir. Isıl direncin hesaplanması için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$R_{th} = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (4)$$

Burada, T_e ve T_c , sırasıyla, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerindeki ortalama sıcaklıkları; Q ise, ısı borusuna güç kaynağı aracılığıyla sağlanan ısı güç değeri (Q_e) ile yoğuşturucu bölümünden soğutucu plakaya transfer edilen ısı miktarının (Q_o) aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. İlgili terimlerin açılımı aşağıda belirtilmiştir.

$$Q = \frac{Q_e + Q_c}{2} \quad (5)$$

$$Q_c = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (6)$$

Burada, $\dot{m}$, soğutma suyunun kütleli debisi; c_p , özgül ısı; T_o ve T_i ise, sırasıyla, soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. Bu hesaplama prosedürü, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chien vd., 2012; Yang vd., 2015; Spinato vd., 2016).

Isıl direncin belirsizlik değeri, elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak Kline ve McClintock (1953) yöntemine göre hesaplanmıştır. Isıl direnç üzerinde etkili olan parametreler ve hesaplama prosedürü aşağıda verilmiştir:

$$R_{th} = f(\dot{V}, Q_e, c_p, \rho, T_e, T_c, T_i, T_o) \quad (7)$$

Eşitlik (6)'daki ρ ve $\dot{V}$, sırasıyla, soğutma suyunun yoğunluğu ve hacimsel debisini temsil eder. Isıl direnç için belirsizlik formülünün genişletilmiş hali aşağıda sunulmuştur:

$$W_{R_{th}} = \left[\left(\frac{\delta R_{th}}{\delta \dot{V}} W_{\dot{V}} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta Q_e} W_{Q_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta c_p} W_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta \rho} W_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_e} W_{T_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_c} W_{T_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_i} W_{T_i} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_o} W_{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

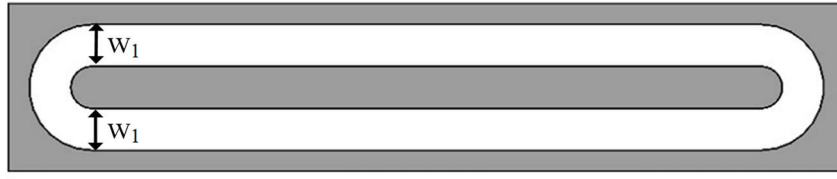
$$\%W_{R_{th}} = \frac{W_{R_{th}}}{R_{th}} \times 100 \quad (9)$$

Mevcut deneysel veri tabanına bağılı olarak, ısıl direnç için maksimum belirsizlik değeri $\pm\%5.9$ olarak elde edilmiştir. Termoelemanlar, sıcaklık kararlılığı ± 0.02 °C olan bir kalibrasyon banyosunda kalibre edilmiştir. Dolayısıyla, termoelemanların sıcaklık okumalarındaki belirsizliği yaklaşık ± 0.1 °C olarak belirlenmiştir. Bu noktada, yoğunluk ve özgül ısı belirsizlikleri de sıcaklık değerlerine bağılı olarak tablolardan okunduğu için sıcaklık belirsizliği ile ilişkilendirilmiştir. Isıtma gücü (Q_e) ve hacimsel debinin ($\dot{V}$) belirsizlikleri için sırasıyla güç kaynağı ($\pm\%0.6$) ve akış ölçer ($\pm\%2$) cihazlarının veri sayfalarındaki değerler dikkate alınmıştır.

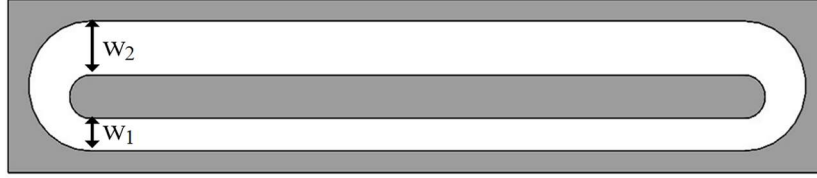
2.2. Polimer Tabanlı Atımlı Isı Borusu İçin Deneysel Yöntem Aşamaları

2.2.1. Tasarım ve Üretim

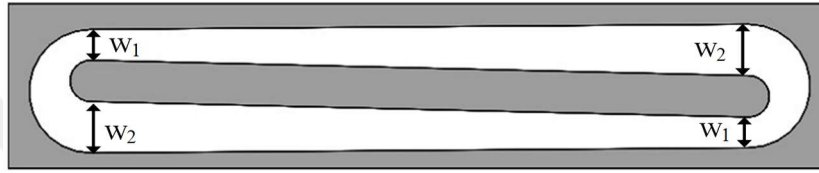
Bu bölümde, polimerik atımlı ısı boruları (*Polymeric Pulsating Heat Pipes*, PPHP) 3D baskı teknolojilerinden biri olan LCD tabanlı SLA (Stereolitografi) tekniği kullanılarak üretilmiştir. PPHP'lerin tasarımında üç farklı geometrik konfigürasyon kullanılmıştır: paralel, asimetrik ve genişleyen-daralan. Bu konfigürasyonlar, referans kolaylığı sağlamak amacıyla sırasıyla PPHP1, PPHP2 ve PPHP3 olarak adlandırılmıştır. Kanal genişliklerinin temsili gösterimi, Şekil 20'de tek bir döngü için sunulmuştur. Kanalların yüksekliği 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Tüm PPHP'lerin yüzey alanları eşdeğerdir; dolayısıyla iç hacimleri de aynıdır. PPHP'lerin kanal boyutlarının doğruluğu, bir koordinat ölçüm cihazı (Quantum 4 CNC) ile ölçülmüştür. PPHP'lerin kanal geometrisine ilişkin boyutlar Tablo 2'de verilmiştir; parantez içindeki değerler, modellerin imalat sonrası ölçülen boyutlarını göstermektedir. Tablo 2'de de görüldüğü gibi, imalat hata aralığı (-0.01) ile (-0.06) mm arasında değişmektedir. Tüm PPHP'lerin toplam boyutu ise 185 mm uzunluk, 85 mm genişlik ve 2 mm kalınlıktan oluşmaktadır. Polimer PPHP'lerin geometrik ve çalışma parametrelerine kapsamlı bir genel bakış Tablo 3'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 20. Tek bir döngüde PPHP1 (a), PPHP2 (b) ve PPHP3 (c)'ün kanal genişliklerinin şematik gösterimi

Tablo 2. Polimerik atımlı ısı borularının kanal boyutları

Tasarım Kodu	Kanal genişliği w_1 , (mm)	Kanal genişliği w_2 , (mm)	Kanal genişliği w_3 , (mm)	Genişleme açısı, α	Hidrolik çapları (mm)
PPHP1	2.30 (2.290)	-	1.0 (0.939)	0°	1.29, 1.39 ve 1.47
PPHP2	1.80 (1.790)	2.80 (2.789)	1.0 (0.939)		
PPHP3	1.80 (1.790)	2.80 (2.789)	1.0 (0.939)	0.25°	

Tablo 3.Geometrik ve çalışma parametrelerinin tanımlanması

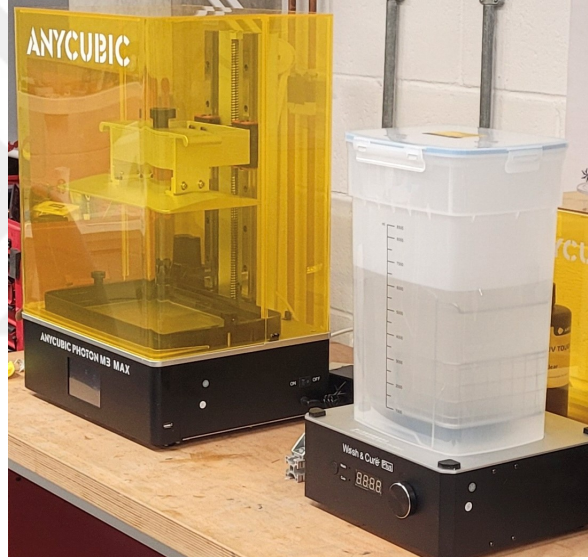
Parametreler	PPHP
Geometrik parametreler	Döngü sayısı
	8
	Buharlaştırıcı[mm]
	20
	Adyabatik [mm]
Çalışma parametreleri	66
	Yoğuşturucu [mm]
	40
	Toplam hacim [ml]
	7.96
Çalışma parametreleri	İş akışkanı
	FC-72
	Dolum oranı [%]
	50
	Isıl yük [W]
	5 – 30
	Konumlandırma
Çalışma parametreleri	Dikey (Altan ısıtma modu)
	Soğutma suyu giriş sıcaklığı [°C]
	20
	Yoğuşturucu bölümündeki soğutma suyunun debisi [L/dk]
Çalışma parametreleri	0.5

Yüksek kaliteli 3D baskılı PPHP modelleri, Anycubic Photon M3 Max SLA yazıcı ve Anycubic Esnek Sert Reçine kullanılarak üretilmiştir. Yazıcı, 6480 x 3600 piksel (7K) çözünürlüklü 13,6" LCD ekrana sahip olup, 300 x 298 x 164 mm boyutunda, 46 mikron xy çözünürlüğünde baskı yapabilmektedir. SLA 3D yazıcı dört ana bölümden oluşur: reçine tankı, platform, UV ışık ve bilgisayar kontrol ünitesi. Şekil 21’de SLA yazıcının görseli ve şematik resmi verilmiştir.

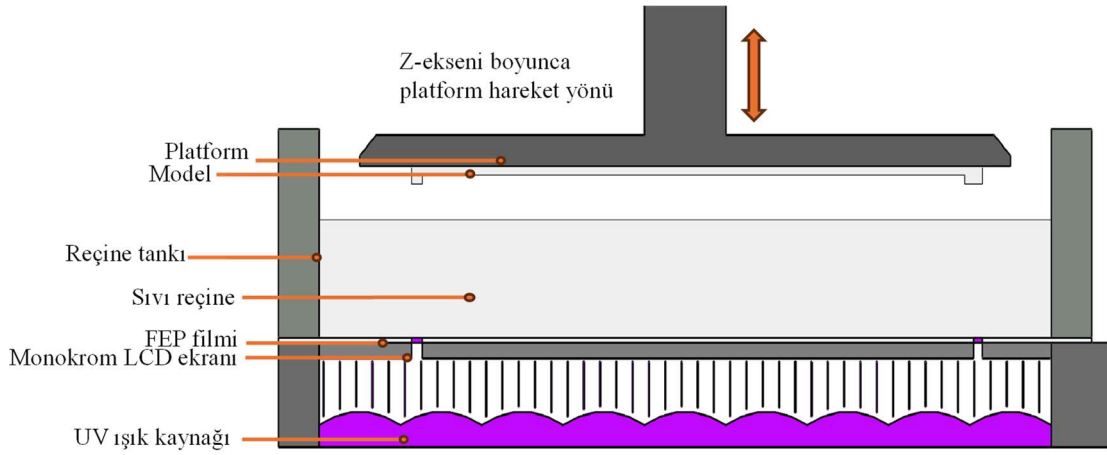
3D baskı teknolojisinin üretimde kullanılması hızlı prototipleme olanağı sunmakla birlikte, genel kalite ve boyutsal doğruluk çeşitli parametrelere bağlıdır. LCD tabanlı SLA yazıcılar için genel baskı kalitesini, gücünü ve boyutsal doğruluğunu etkileyen bazı temel parametreler vardır: reçinenin kalitesi (kürleme sırasında hacimsel genleşme yüzdesi), LCD ekran çözünürlüğü, katman kalınlığı, ilk pozlama süresi, pozlama süresi, basılı parçanın temizlenme yöntemi ve son kürleme süresi.

SLA yazıcıda, sıvı reçineyi katı tabakalar halinde sertleştirmesi için UV (ultraviyole) ışık kullanılır, bu sayede yüksek çözünürlüklü ve pürüzsüz yüzeyli parçalar oluşur. UV ışığı, bir UV lazer veya UV-LED projektör (LCD-tabanlı) aracılığıyla üretilir. Bir SLA yazıcısının çalışma mekanizması şu şekildedir: X-Y eksenleri boyunca hareket eden UV lazer ışığı, parçanın kesitini izleyerek sıvı reçineyi FEP (*Florlu Etilen Propilen*) filminden

aydınlatır. Reçine, UV ışığına duyarlı olduğundan lazer tarafından maruz kalan alanlar anında katılırken, maruz kalmayan alanlar sıvı formda kalır. Yazıcının platformu, FEP filmi ve önceki katman arasında yeni bir reçine tabakasının yayılmasına izin vermek için yukarı doğru hareket eder. Ardından, önceki basılı bölüme bir katman kalınlığında temas edecek şekilde aşağı iner. Lazer, bir sonraki katmanı basmaya başlar ve işlem, tüm model tamamlanana kadar her bir katman için tekrarlanır. Baskı tamamlandıktan sonra model, yazıcı platformundan çıkarılır, fazla reçinenin giderilmesi için yıkanır ve dayanıklılığını artırmak için UV ışığı altında kürlenir. LCD tabanlı SLA yazıcı da benzer prensiplerle çalışır; tek fark, hareketli UV lazer ışığı yerine monokrom LCD ekran ve UV-LED projektör kullanmasıdır.



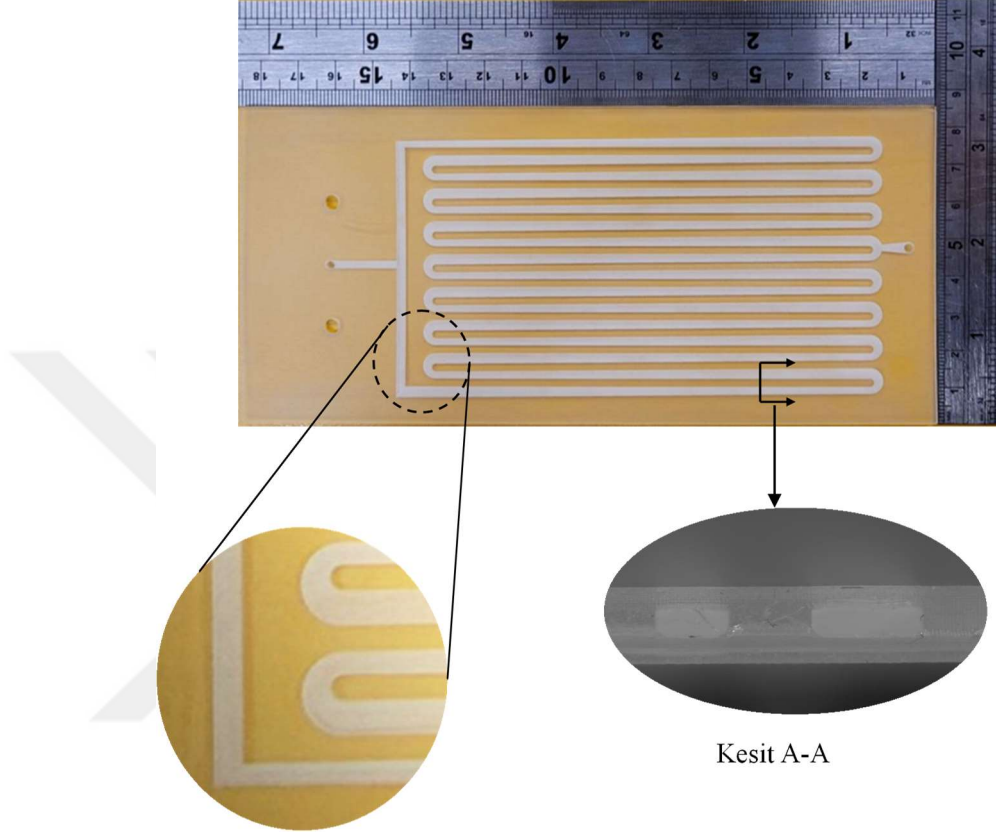
(a)



(b)

Şekil 21. SLA yazıcı ve kürleme-yıkama makinesi (a), yazıcının şematik gösterimi

Polimer tabanlı atımlı ısı boruları, serpantin kanallardaki iki fazlı akışı görüntülemek için şeffaf bir reçine kullanılarak üretilmiştir. SLA yazıcıyla üretilen PPHP, Şekil 22’de gösterilmektedir.

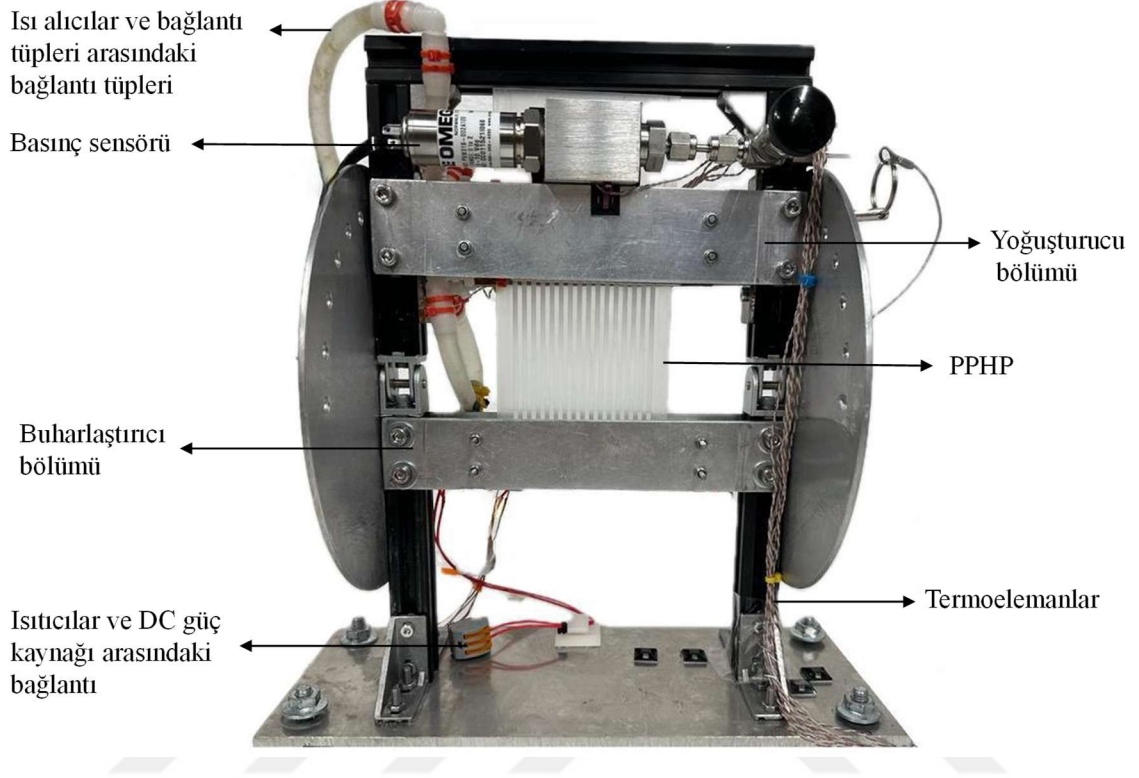


Şekil 22. SLA yazıcıyla üretilen polimerik atımlı ısı borusu

2.2.2. Test Bölümü ve Deney Düzeneği

Test bölümü, deneyler esnasında güvenilir ve doğru veri toplanmasını sağlamak amacıyla koruyucu bir ortam sunan bir Zargès kutusunun içine yerleştirilmiştir. PPHP'nin buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri, yapısal destek sağlayan ve bir menteşe mekanizmasıyla bağlanan alüminyum bir çerçeveye sabitlenmiştir. Buharlaştırıcı bölüm, iki özdeş ısıtma sistemi arasına yerleştirilirken, yoğuşturucu bölüm, sıvı soğutma döngüsüne bağlı iki özdeş ısı alıcı sistem ile entegre edilmiştir. Isıtma sistemi, bir ısıtıcı, bir bakır levha, bir alüminyum levha ve bir Teflon yalıtım levhası gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Kapton şerit ısıtıcılar (Omega – KHLVA-104/10, 40W/28V), ısı dağıtıcı görevi gören ve belirlenen konumlarda termoelemanlar için oluklara sahip olan bir bakır

levhaya tutturulur. Bakır levha, PPHP'nin buharlaştırıcı alanının yüzeyleriyle temas halindedir. PPHP test bölümünün genel bir görünümü Şekil 23'te gösterilmiştir.



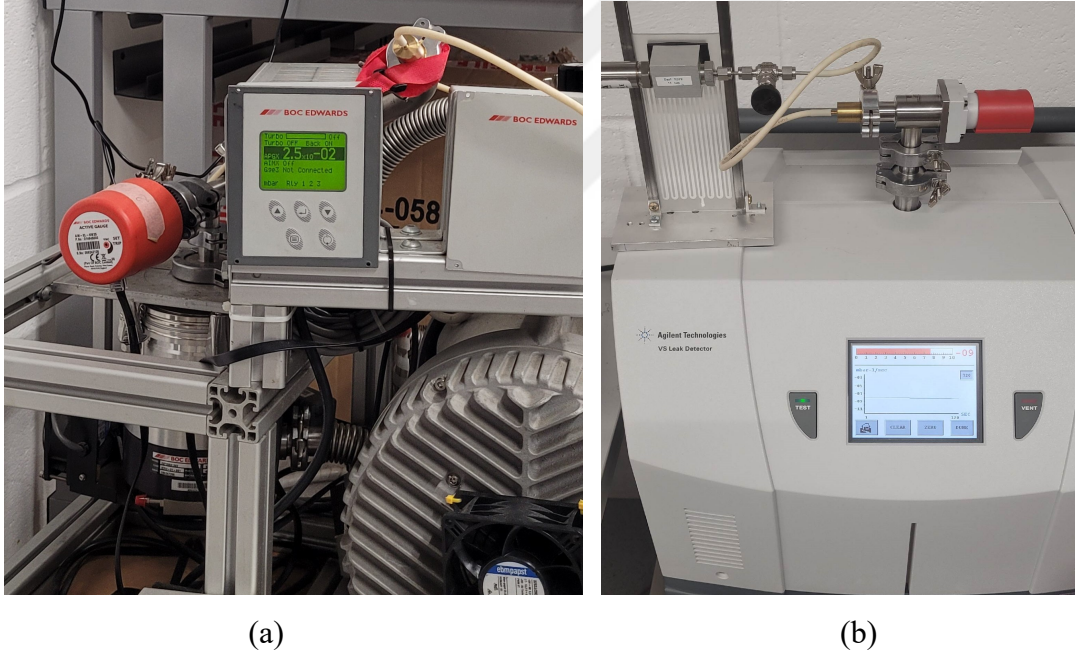
Şekil 23. Test bölümü

PPHP'nin buharlaştırıcı bölümündeki ısı kayıplarını en aza indirmek için ısıtıcıların arkasına yalıtım malzemesi olarak Teflon plakalar yerleştirilmiştir. Alüminyum şeridin işlevi ise PPHP'yi mekanik olarak çerçeveye sabitlemektir. Çalışma koşullarındaki ısıtma gücü değerlerinin ayarlanması için ısıtıcılar, DAQ sistemine (NI cRio 9067) bağlı programlanabilir bir DC güç kaynağına (EA-PS 2042-10B, 160W) bağlanmıştır.

Şekil 24'te deney düzeneğinin şematik resmi verilmiştir. Sirkülasyon bölümünde bulunan alüminyum su soğutmalı ısı alıcı, sıvı döngü sistemi ile ilişkilidir. Sistem, alüminyum soğutucular için düzenlenmiş sabit bir sıcaklık (20 °C) ve akış debisi (500 ml/dk) sağlar. Soğutma suyunun sıcaklığını ölçmek amacıyla soğutucunun giriş ve çıkış portlarına iki adet T tipi termoeleman yerleştirilmiştir. PPHP'deki akış görüntülerini takip etmek için yüksek hızlı bir görsel spektrum kamerası (Ximea XiQ®) kullanılmıştır. Sıcaklıkların kararlı duruma ulaştığı aşamalarda, adyabatik bölümden akış görüntüleri alınmıştır. DAQ sistemi, soğutma, ısıtma ve basınç/sıcaklık ölçüm fonksiyonlarını

2.2.3. Sızdırmazlık Testi, Gaz Arındırma ve Dolum İşlemi

Atımlı ısı borusunda, hava veya diğer gazların varlığı sıvı-buhar periyodik faz değişimiyle ortaya çıkan salınım hareketini olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, iş akışkanının herhangi bir şekilde dış ortama sızması, atımlı ısı borularının performansını kademeli olarak düşürür. Bu nedenle, üretilen tüm PPHP'ler, vakum pompası (Boc Edwards) ve helyum kütle spektrometresi sızıntı dedektörü (Agilent Technologies) kullanılarak sızıntı testine tabi tutulmuştur. PPHP içindeki hava, yüksek performanslı bir vakum pompası kullanılarak uzaklaştırılmış, ardından sızıntı dedektörü, sızıntı noktalarını tespit etmek için etkinleştirilmiştir. Sonrasında PPHP'ye az miktarda helyum uygulanmış ve yapılan testlerde PPHP'lerde helyum sızıntısı tespit edilmemiştir. Sızdırmazlık testinde kullanılan cihazların fotoğrafları Şekil 26'da gösterilmiştir.

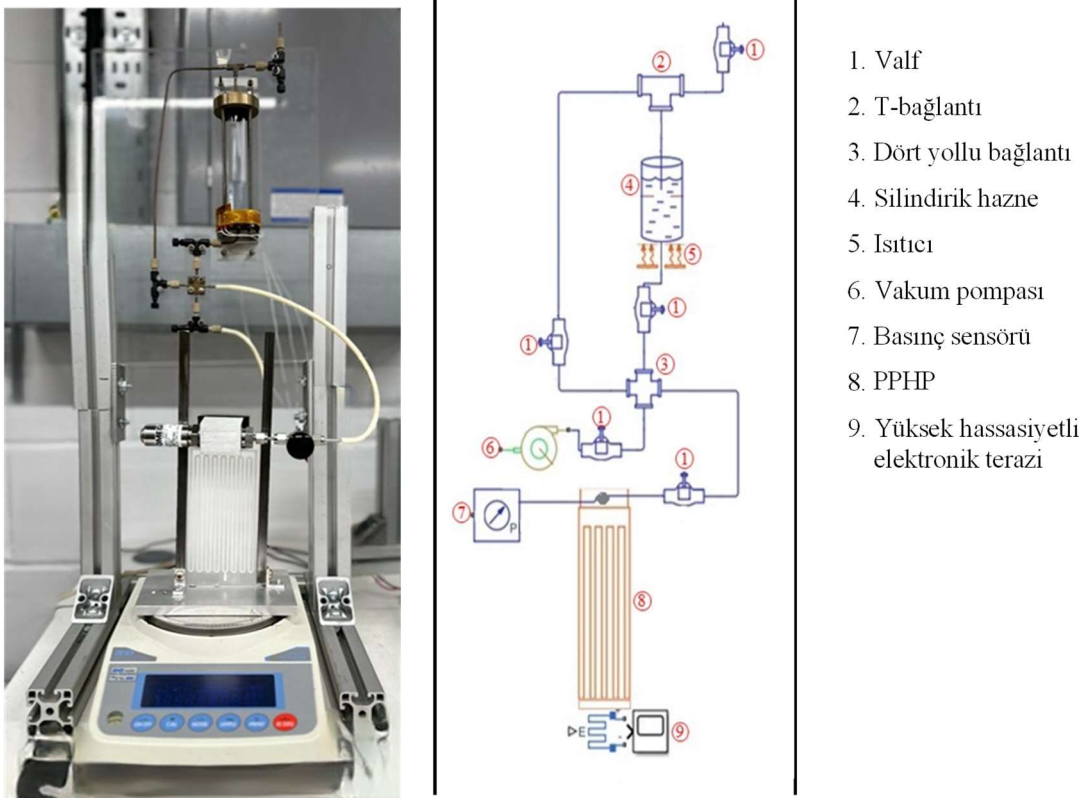


Şekil 26. Vakum pompası (a) ve sızıntı dedektörü (b)

Şekil 27, iş akışkanı dolumu ve gazdan arındırma işlemi için kullanılan bağlantı boruları ve valflerden oluşan düzeni göstermektedir. PPHP'nin yoğuşturucu bölümünde, iş akışkanının tahliyesi ve dolumu için kullanılan bir port bulunur. Gazdan arındırma işlemi, iş akışkanındaki yoğuşturucu gazları ortadan kaldırır. Bu işlem, iş akışkanının depolandığı silindir haznenin ısıtılması ve vakumlanmasıyla gerçekleştirilir. Silindir haznesi içinde depolanan FC-72'yi kaynatmak için esnek Kapton ısıtıcılar kullanılmıştır ve ısıtma

işleminde sonra yoğunlaşmayan gazları uzaklaştırılması için hazneye vakum uygulanmıştır. Gazdan arındırma işlemi tamamlandıktan sonra, iş akışkanının PPHP'ye dolum süreci başlatılır. PPHP içindeki havayı boşaltmak için vakum pompası etkinleştirilir ve gerekli vakum basıncına (0,01 Torr) ulaşıldığında pompa devre dışı bırakılır. Ardından, silindir bölmesi ile PPHP arasındaki valf açılarak iş akışkanının doğrudan PPHP'ye dolumu sağlanır. İş akışkanının doğru miktarda doldurulması işlemi, yüksek hassasiyetli elektronik terazi ile izlenir.

İş akışkanı (FC-72) ile polimerik PHP arasında kimyasal reaksiyon olmadığından emin olmak amacıyla, deneylere başlamadan önce boş PPHP'nin ağırlığı hassas bir terazi ile ölçülmüştür. Tüm deneyler tamamlandıktan sonra boş PPHP'nin ağırlığı tekrar ölçülmüştür. Ağırlıkta herhangi bir değişiklik olmaması, polimer malzemeden üretilen PHP'nin iş akışkanı ile kimyasal bir reaksiyona girmediğini göstermektedir. Tekrarlanan deneyler sırasında polimerik PHP'de şekil ve yapısal deformasyon gözlenmemiştir.



Şekil 27. Dolum ve gazdan arındırma sisteminin resmi ve şematik gösterimi

2.2.4. Deneylerin Yapılışı ve Hesaplama Yöntemi

SLA 3D baskı yöntemiyle üretilen ve farklı kanal konfigürasyonlarına sahip polimer tabanlı atımlı ısı borularının deneysel prosedürü dikkatlice yapılandırılmış bir dizi adımla değerlendirilir. Başlangıçta, gazdan arındırma ve dolum prosedürleri bir önceki bölümde açıklandığı gibi her bir deney için gerçekleştirilir. Gaz giderme işlemi tamamlandıktan sonra, PPHP istenen miktarda iş akışkanı ile doldurulur. Yoğuşturucu bölgesindeki ısı alıcıya bağlı soğutma suyu döngü sistemi devreye girer. Güç kaynağı, buharlaştırıcı bölgesine ısı girişinin sağlanması için aktif edilir. Başlangıç ısıtma gücü 5 W olarak ayarlanır ve 5 W'lık artışlarla kademeli olarak artırılır. Sanki kararlı durum koşulları oluştuğunda sıcaklık ölçümleri ve akış görüntüleri kaydedilir.

Sıcaklık ölçümleri ve akış görüntüleri, sözde-kararlı durum koşullarına ulaşıldıktan sonra her ısı girişinde PPHP'nin ısı ve akışkan dinamiği davranışını analiz etmek için toplanır. PPHP'ye gelebilecek herhangi bir zararı önlemek için deney, buharlaştırıcı bölümü ortalama 80 °C sıcaklığa ulaştığında sonlandırılır. Tablo 4'te FC-72'nin atmosferik basınçtaki termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. FC-72'nin atmosferik basınçtaki termofiziksel özellikleri (Kim ve Kim, 2020)

ρ_l [kg m ⁻³]	μ_l [Pa s]	$C_{p,l}$ [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]	H_{lv} [kJ kg ⁻¹]	$\sigma \times 10^{-3}$ [N m ⁻¹]	$(dP/dT)_{sat}$ [kPa °C ⁻¹]
1690.40	0.72	1.04	94.39	12.28	1.08

Kararlı durum periyotları sırasında kaydedilen buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerindeki sıcaklıklar, ısı direnci (R_{th}) hesaplamak için kullanılmıştır.

$$R_{th} = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (10)$$

Burada, T_e ve T_c sırasıyla buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinin ortalama sıcaklıkları ve Q ısıtma gücüdür. Isıtıcılara sağlanan ısıtma gücü denklem (11) ile belirlenir.

$$Q = V \times I \quad (11)$$

Burada V ve I sırasıyla elektrik gerilimi ve akımıdır. Isıl direnç hesaplamalarındaki belirsizliği belirlemek için Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak, $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklık belirsizliği ve sırasıyla %0.3 ve %0.2'lik voltaj ve akım ölçümlerinin maksimum doğruluğu göz önüne alındığında, ısıl direnç ölçümlerinde belirlenen maksimum belirsizlik %2.3'tür.

$$R_{th} = f(T_e, T_c, V, I) \quad (12)$$

$$W_{R_{th}} = \left[\left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_e} W_{T_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta T_c} W_{T_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta V} W_V \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{th}}{\delta I} W_I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, farklı kanal konfigürasyonlarına sahip düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performans ve akış karakteristikleri geniş parametre aralığında deneysel olarak incelenmiştir. Bakır ve polimer malzemeden üretilen atımlı ısı borularının performans analizi iki ana alt başlık altında değerlendirilmiştir.

3.1. Bakır Tabanlı Atımlı Isı Borularının Isıl Performans Analizi

Bu bölümde, bakır tabanlı atımlı ısı borularının ısı performans ısıtma gücü, eğim açısı, dolum oranı ve geometri etkileri açısından araştırılmış ve alt başlıklar halinde sunulmuştur. İş akışkanı olarak etanolün kullanıldığı beş farklı atımlı ısı borusu (PHP) için testler yapılmıştır. Isıtma gücü, buharlaştırıcı bölümündeki sıcaklıklar yaklaşık 110 °C'e erişene kadar sabit aralıklarda (5 W) arttırılmıştır. Üiform ve üniform olmayan kanal geometrine sahip PHP'ler ısı direnç, buharlaştırıcı sıcaklığı ve akış görüntüleme sonuçları dikkate alınarak tartışılmıştır.

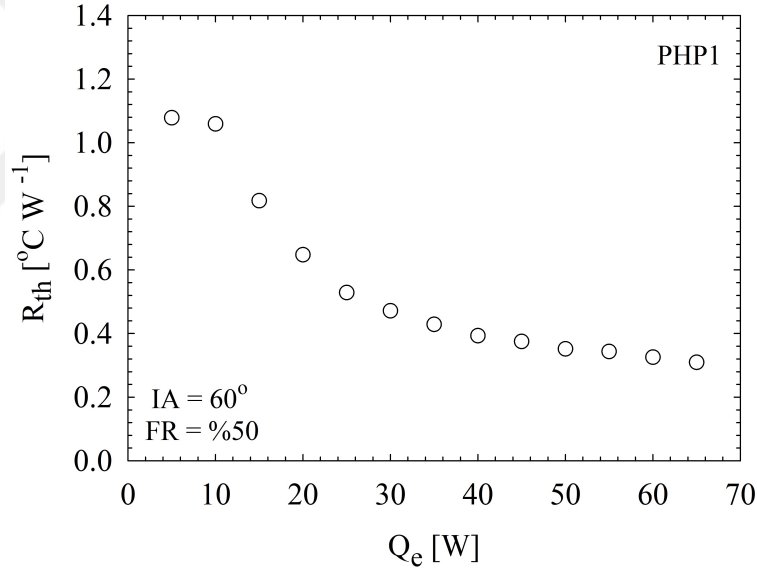
3.1.1. Üiform Kanal Kesit Geometrisine Sahip PHP'nin Isıl Performansı

Kesit alanı (2 mm x 2mm) sabit olan PHP1'in çalışma performansı üzerinde ısıtma gücü, eğim açısı ve dolum oranının genel bir etkisi incelenmiştir. Test koşulları beş farklı eğim açısını (-90°, 0°, 30°, 60° ve 90°) ve dolum oranını (%20, %40, %50, %60 ve %80) kapsamaktadır.

a. Isıtma Gücü Etkisi

Atımlı ısı borularının performans değerlendirmeleri ısı direnç üzerinden yapılmıştır. Bu bağlamda, üniform kanal kesit geometrisini temsil eden PHP1 için Şekil 28'de ısı direncin, uygulanan ısıtma gücü ile değişimini gösteren bir grafik sunulmuştur. Isıl direnç, artan ısıtma gücü ile başlangıçta hızlı bir şekilde azalmakta, ardından azalış hızı belirgin şekilde düşmektedir. Isıl direnç eğrisinde, ısı akısındaki artışa bağlı olarak, gözlemlenen bu azalmanın başlıca nedenleri, akışkanın sirkülasyon hızındaki (Chien vd., 2012; Yang vd., 2009) veya salınım genliklerindeki (Takawale vd., 2019) artışla ilişkilidir. Atımlı ısı borularında temel sürücü kuvvet ısı kaynağıdır. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinde

gerçekleşen faz değişimi ve buharlaştırıcıdaki sıcaklık artışı, pompalama kuvvetini arttırmaktadır. Pompalama kuvveti, atımlı ısı borusundaki sıvı ve buhar dolaşımını sağlayan itici gücü ifade eder. Bu kuvvet, temelde, buhar kabarcıklarının oluşumu ve çökmesi sonucunda meydana gelen basınç çalkantılarından ve buharlaştırıcı ile yoğuşturucu arasındaki basınç farkından kaynaklanmaktadır. Isıtma gücünün artmasıyla birlikte, buhar kabarcıklarının oluşumu şiddetlenir ve buharlaştırıcı ile yoğuşturucu bölgeleri arasında bir basınç farkı oluşur. Bu basınç farkı, sıvıyı atımlı ısı borusunun kanalları boyunca hareket ettiren bir itici güç rolü üstlenir. PHP1'in ısıtma gücü arttıkça, buharlaştırıcı bölgesindeki sıcaklık da artar ve bu durum, buhar kabarcıkları tarafından uygulanan basınç kuvvetinde bir artışa yol açar (Wan vd., 2020). Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgeleri arasındaki basınç farkının artması ile buhar sıvıyı daha kolay bir şekilde iter, sirkülasyon hızı artar ve böylece ısı direnci azalır.



Şekil 28. Isıl direncin ısıtma gücü ile değişimi

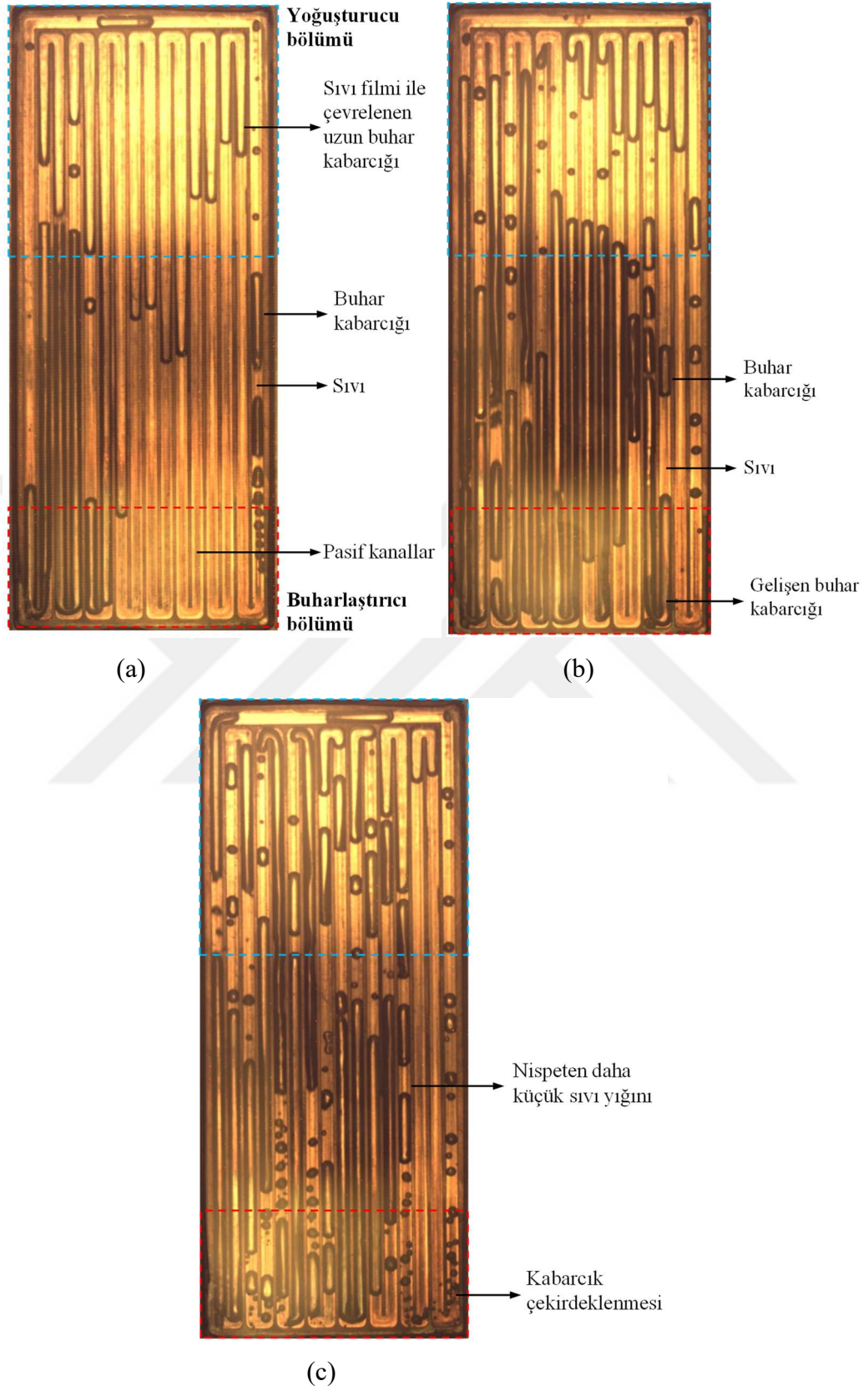
Isıtma gücüne bağlı değişimlerin akış desenleri üzerindeki etkilerini açıklamak amacıyla, %50 dolum oranı ve 60° eğim açısı koşullarında, farklı ısıtma güçlerinde (15, 35 ve 60 W) alınan akış görüntüleri Şekil 29'da sunulmuştur. Isıtma gücü kademeli olarak arttıkça, akış deseni dağılımlarında belirgin değişiklikler meydana gelmektedir. 15 W ısıtma gücünde (Şekil 29a), sadece birkaç ayrı buhar kabarcığı gözlemlenmiştir ve buharlaştırıcı bölümünün büyük kısmı sıvı faz durumundadır. Bununla birlikte, bazı kanallarda ince film buharlaşmasını veya yoğuşmasını temsil eden uzun buhar kabarcıkları oluşmaya başlamıştır.

Bu akış deseni dağılımı, salınımlı hareketin başlangıç evrelerini yansıtmaktadır. İlgili akış görüntüsü, 15 W ısıtma gücünde ani bir düşüşün gözlemlendiği direnç eğrisi (Şekil 28) verileri ile uyumludur. Direnç eğrisindeki bu düşüş, literatürde (Pastukhov ve Maydanik, 2016) belirtildiği üzere atımlı ısı borusunun çalışmaya başladığını göstermektedir.

Isıtma gücünün artmasıyla, Şekil 29b'de gösterildiği gibi, buhar kabarcıklarının sayısında artış ve tüm kanallar boyunca kabarcıkların yayılması gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük bir ısı direnç değerine karşılık gelmektedir. Isıtma gücündeki artışa dayalı olarak, atımlı ısı borusunun performansını arttıran iki temel faktör öne çıkmaktadır: (1) akış sirkülasyon hızının artması ve (2) taşınımlı kaynama ve yoğunlaşma mekanizmasının aktif hale gelmesi. Özellikle ikinci faktör, akış modeli ile doğrudan ilişkilidir. Buhar kabarcıklarının sayısındaki artış, atımlı ısı borusunun iç yüzeyine temas eden ince sıvı filmin daha uzun süre ısı transfer yüzeyiyle temasını sağlamaktadır. Ayrıca, buharlaştırıcı bölgesindeki akış dalgalanmaları artmakta, sıvı yığını küçülmekte ve dolayısıyla buhar kabarcıkları tarafından itilen sıvı miktarı azalmaktadır.

Isıtma gücünün artmasıyla, buharlaştırıcı bölgesinin sıcaklığı da yükselmektedir. Bu durum, büyüyen buhar kabarcıkları tarafından oluşturulan basınç kuvvetinin artmasına ve dolayısıyla akış sirkülasyonunun iyileşmesine katkı sunmaktadır. Yüksek ısıtma güçlerinde (Şekil 29c, 60 W) ise, orta güçlerde (35 W) meydana gelen akış olaylarının daha aktif hale geldiği gözlemlenmektedir. Kabarcık çekirdeklenmesi ve kabarcık popülasyonu artmaktadır. Kabarcık çekirdeklenmesi ve taşınımlı kaynama, toplam ısı transfer süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Xu vd., (2020) tarafından belirtildiği gibi, atımlı ısı borularının ısı transfer performansında kabarcık popülasyonunun önemi büyüktür.

Tüm kanallar boyunca gözlenen genel sıcaklık artışı, sıvı fazının çoğunlukla ayırık buhar kabarcıkları ve daha küçük sıvı kümelerine dönüşmesine neden olmaktadır. Şekil 29b ve c'den açıkça görüldüğü üzere, orta ve yüksek ısıtma güçlerinde akış geçişleri genellikle ince bir sıvı film ile çevrili uzun buhar kabarcıkları veya daha küçük ayırık buhar kabarcıkları ile kaplanmaktadır. Bu aşamada, ısı; kabarcık oluşumu ve ince film buharlaşmasıyla gerçekleşen faz değişimi üzerinden etkili bir şekilde transfer edilmektedir. Benzer şekilde, yoğunlaşma işlemi de ince sıvı film aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, Jo vd., (2019)'nin bulgularıyla uyumlu olarak, mevcut çalışma sonuçları da ince sıvı filminin buharlaşması şeklindeki faz değişiminin ısı transferinde daha etkin bir mekanizma olduğunu göstermektedir.



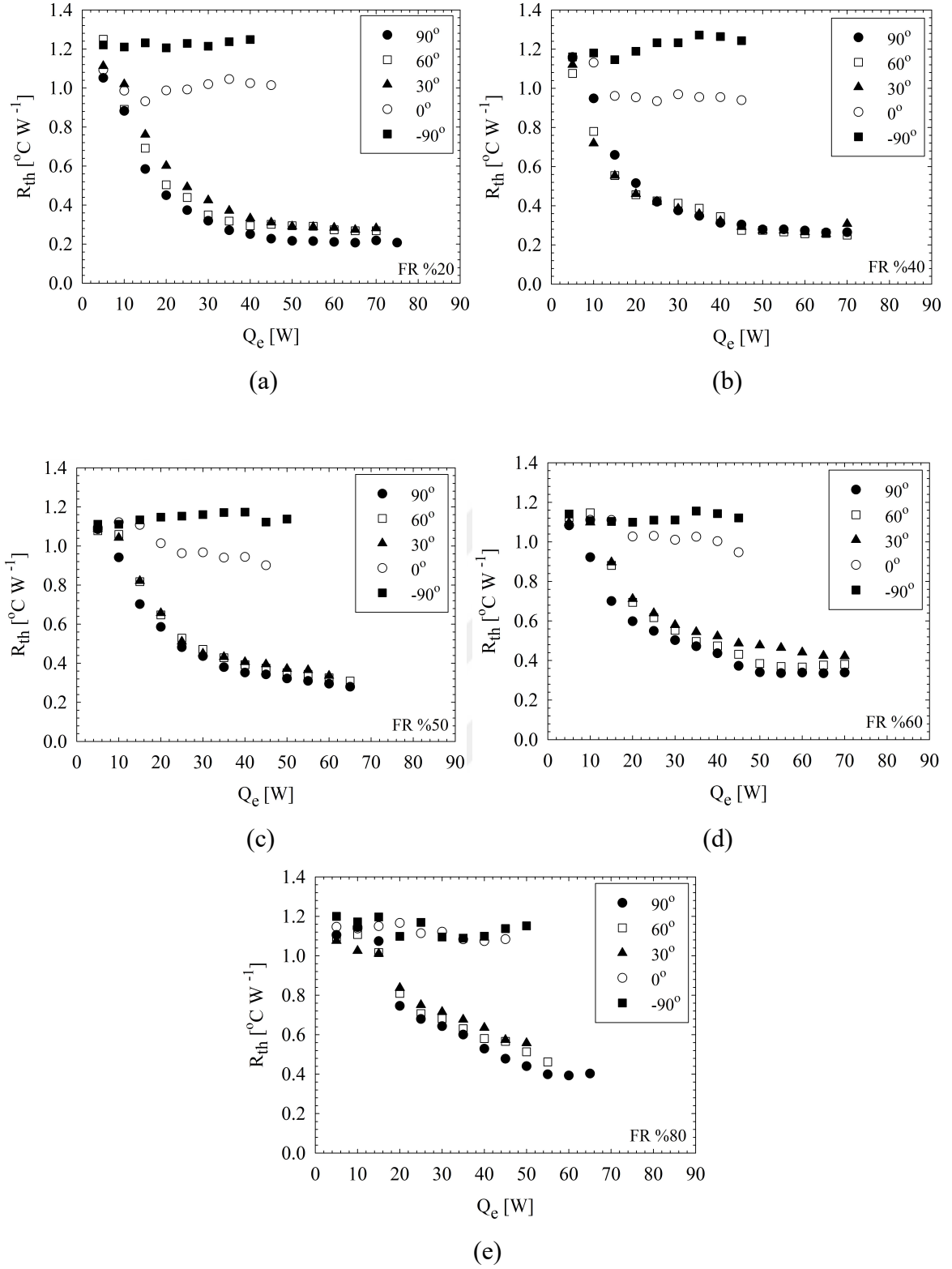
Şekil 29. PHP1 için $FR = \%50$, $IA = 60^\circ$, 15 W (a), 35 W (b), 60 W (c) koşullarındaki akış görüntüleri.

b. Eğim Açısı Etkisi

Eğim açısı, yerçekimi kuvveti, akış modelleri ve maksimum ısıl yük kapasitesi üzerinde etkili olup, atımlı ısı borularının performansında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 30'da PHP1 için, her bir dolum oranında eğim açısına bağlı olarak ısıl direnç grafikleri verilmiştir. PHP1'in 0° (yatay) ve -90° (üstten ısıtma) eğim açılarında çalışmadığı görülmektedir. Isıl direncin artan ısıtma gücüne rağmen yatay, yataya yakın veya yukarı yönlü bir eğilim göstermesi, atımlı ısı borusunun çalışmadığının kanıtıdır.

Üniform kesit alanına sahip atımlı ısı boruları, basınç dengesizliklerine dayalı olarak salınım/atım hareketiyle çalışsa da az sayıda döngüye sahip geometrilerde, yerçekimi desteği olmadan çalışamazlar. Bu durum, Chien vd. (2012)'nin çalışması başta olmak üzere, literatürde benzer çalışmalarla da desteklenmiştir. Yatay konum (0°), yer çekimi desteğinin bulunmadığı, üstten ısıtma konumu (-90° , buharlaştırıcı bölgesi yukarıda) ise yer çekiminin akışa karşı ters yönde etki gösterdiği konumlandırmalardır. Bu nedenle, az döngülü üniform kesitli PHP1'de yer çekimi katkısı olmadan, akışın salınım karakteristiğini gösteren yığın hareketi gerçekleşmemektedir.

Şekil 30b ve c'de görüldüğü gibi yatay konumda, ısıl dirençte kısmi bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalmanın nedeni, akışkanın kanallar içinde düşük genlikli ve kısa süreli titreşimler sergilemesidir. Bu davranış, (Chien vd., 2012)'nin tanımladığı düşük genlikli “başla-dur” hareketine benzetilmekte; ancak bu durumda, yüksek genlikli salınımlar veya akışkan sirkülasyonu oluşmamakta ve sistem tam olarak çalışmamaktadır. Yatay konumdaki ısıl direnç değerleri, genellikle -90° eğim açısındakilere kıyasla daha düşüktür. Bunun sebebi, yatay konumda akışkanın -90° 'ye göre kanallar içinde kısmen daha iyi dağılması ve buna bağlı olarak ısıl iletimin iyileşmesidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, -90° 'ye yerleştirilen tüm atımlı ısı borularında herhangi bir çalışma gözlenmemiştir. Bu nedenle, diğer bölümlerde -90° ait grafiklere yer verilmemiş ve değerlendirmeler 0° , 30° , 60° ve 90° eğim açıları üzerinden yapılmıştır.

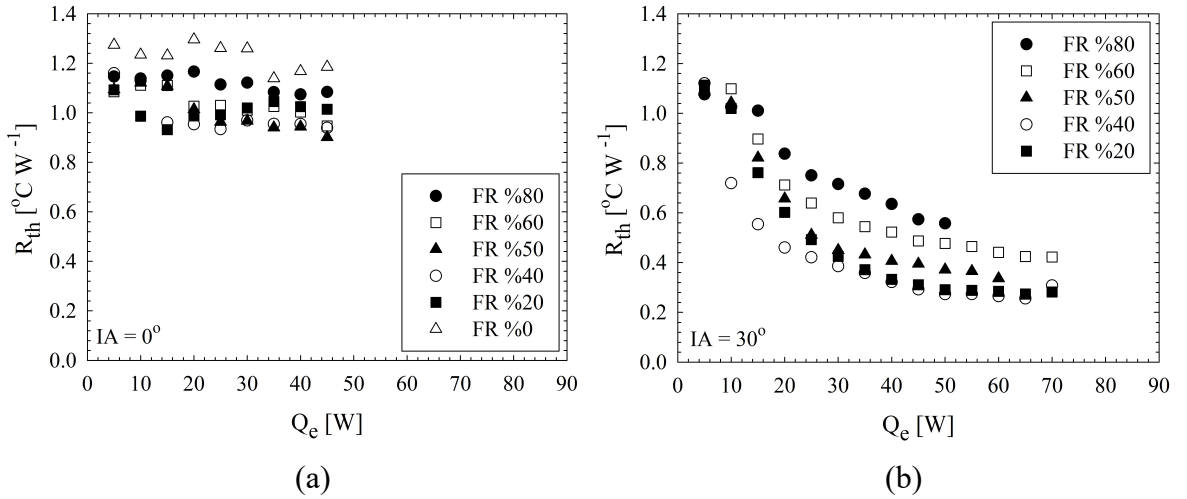


Şekil 30. PHP1 için her bir dolum oranında, eğim açısının bağlı olarak ısı direncinin uygulanan ısıtma gücü ile değişimi.

c. Dolum Oranı Etkisi

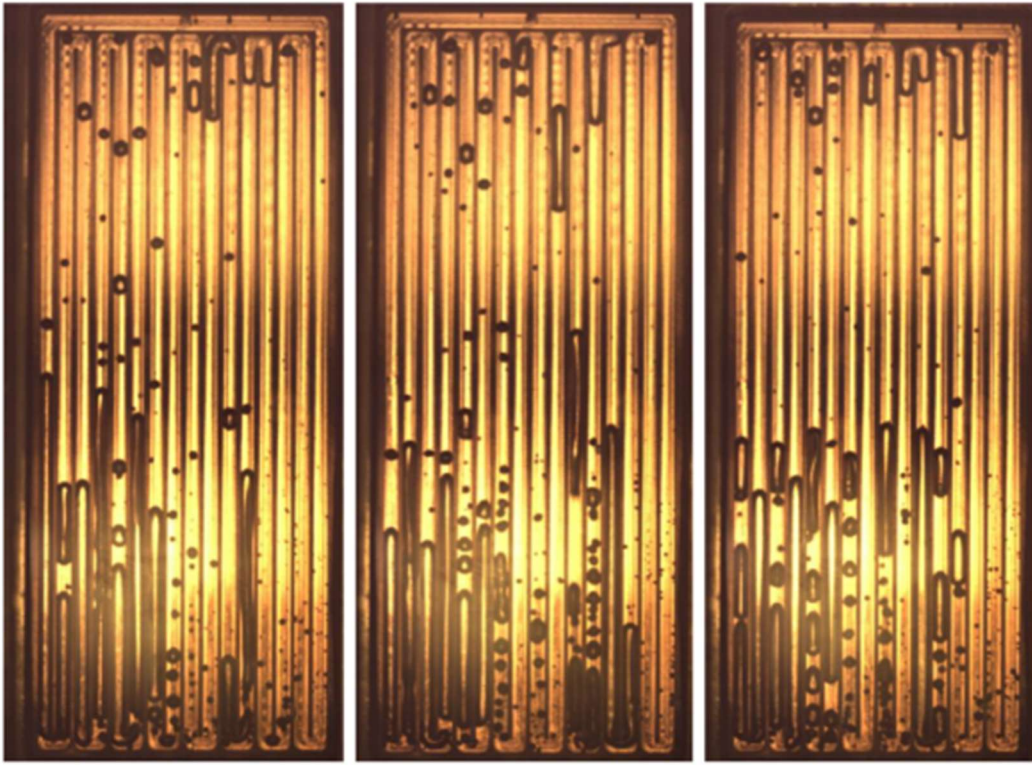
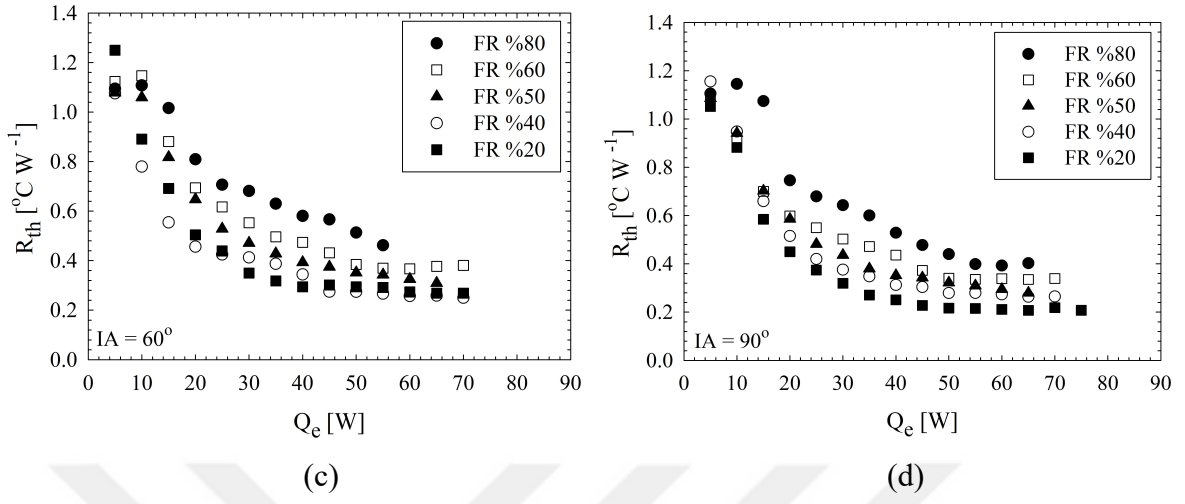
Şekil 31 a-d’de, üniform kesit alanına sahip PHP1 için her bir eğim açısında, dolum oranına bağlı olarak ısı direncin uygulanan ısıtma gücü ile değişimi verilmiştir. Şekil 31a’da, 0° eğim açısında ısı direncin dolum oranından bağımsız olarak yataya yakın bir eğilim sergilediği görülmektedir. Bu durum, PHP1’in yatay konumda çalışmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla, üniform kanallı atımlı ısı borularının yatay konumlar için uygun olmadığı, başka bir deyişle, yönden bağımsız sürekli bir çalışma sürdüremedikleri sonucuna varılmaktadır. Şekil 31a’daki $FR = \%0$ atımlı ısı borusunun boş durumunu temsil eder ve ısınsın sadece iletim yoluyla aktarıldığı referans bir durumu temsil etmektedir.

Eğim açısı arttıkça (Şekil 31b, c ve d), dolum oranının verimli çalışma aralıkları genişlemektedir. Bu durum, Liu vd.’nin (2019) belirttiği gibi yerçekiminin üniform kanallara sahip atımlı ısı borularının performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Grafiklerde de görüldüğü üzere, pozitif eğim açılarında (30° , 60° ve 90°) tüm dolum oranlarında ısı direnç azalan bir eğilim sergilemiştir. Ancak, genel olarak, dolum oranı arttıkça ısı direnç de artış göstermektedir. Bu nedenle, verilen bir ısı güç değerinde, dolum oranındaki artış, atımlı ısı borusunun performansında belirgin bir düşüşe yol açmaktadır. Şekil 32’de, ısıtma gücü 35 W ve eğim açısı 90° koşulları için farklı dolum oranlarına ait ardışık akış görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 31. PHP1 için 0° (a), 30° (b), 60° (c) ve 90° (d) eğim açıları için farklı dolum oranlarında ısı direncin net ısı güç ile değişimi

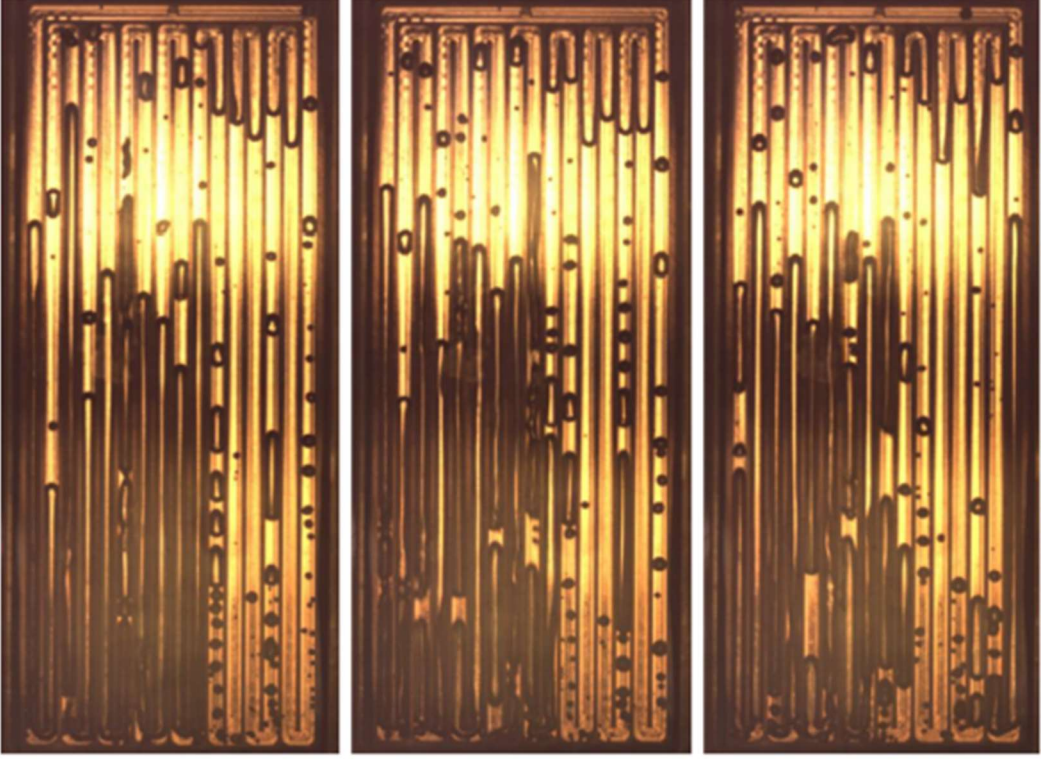
Şekil 31'in devamı



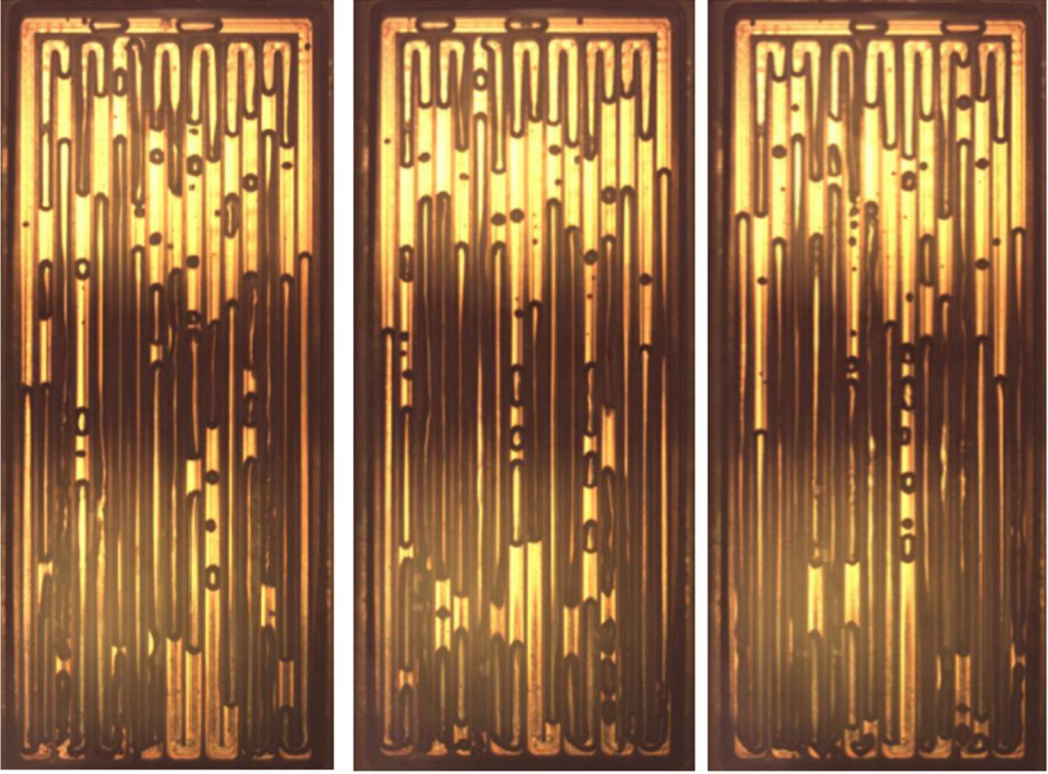
(a)

Şekil 32. Isıtma gücü 35 W ve eğim açısı 90° koşulları için farklı dolum oranlarına ait ardışık akış görüntüleri (0.2s aralıklarla): %80 (a), %60 (b), %40 (c) ve %20 (d)

Şekil 32'nin devamı

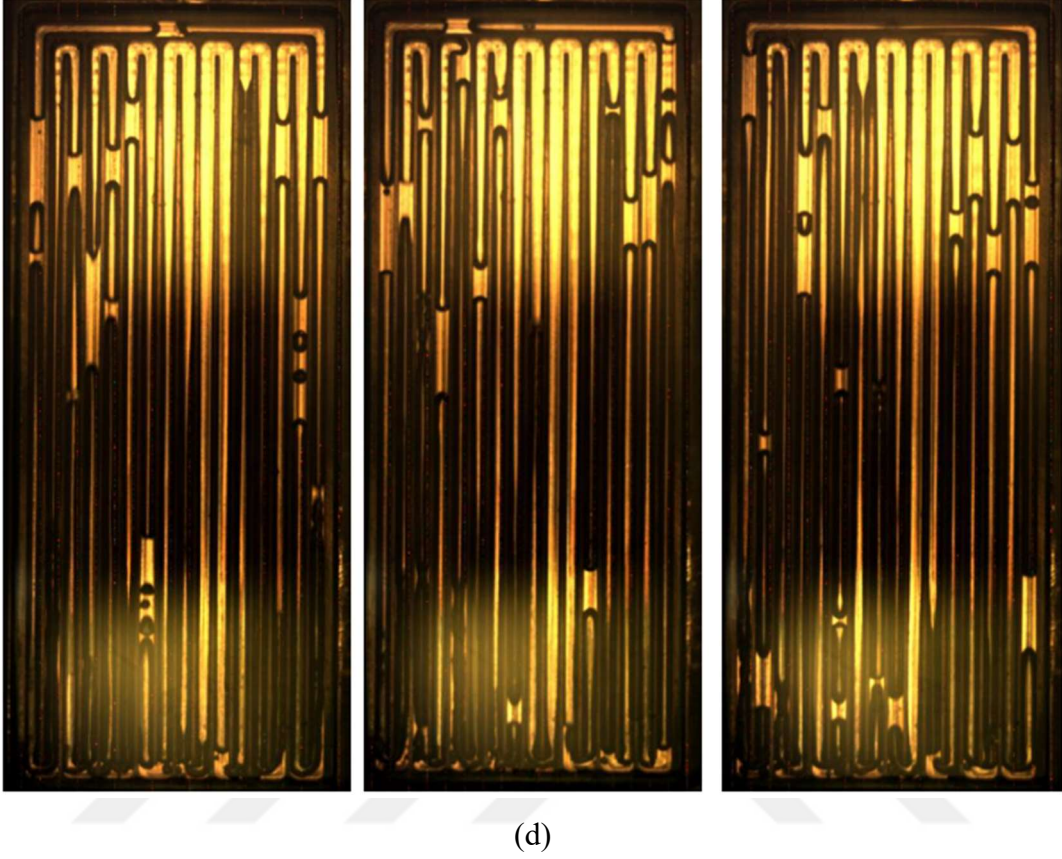


(b)



(c)

Şekil 32'nin devamı



3.1.2. Farklı Kanal Kesit Geometrisine Sahip Atımlı Isı Borularının Performans Analizi

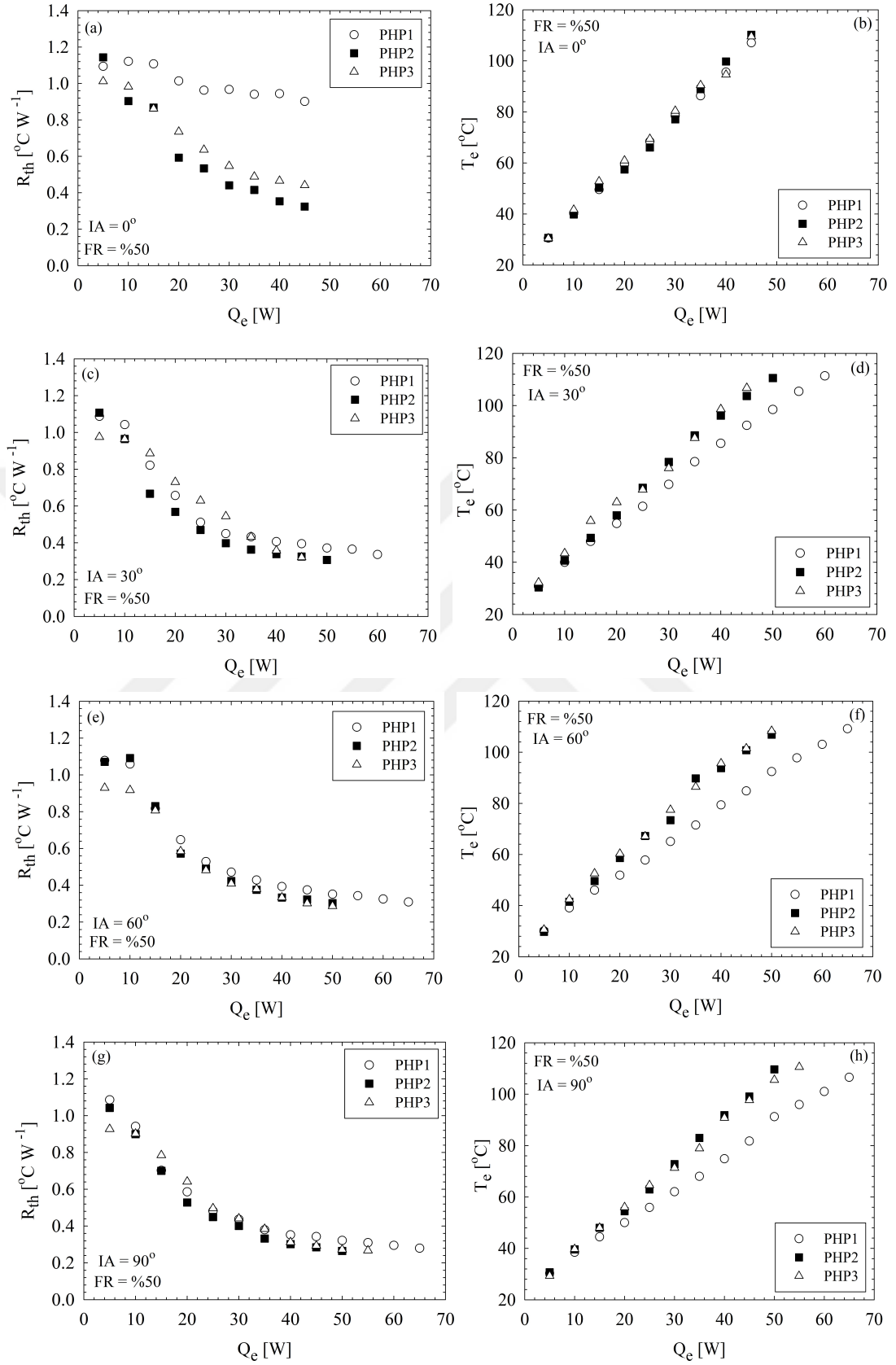
Bu bölümde, komşu kanallar arasındaki kesit değişiminin etkisi, farklı ısıtma güçleri, dolum oranları ve eğim açıları için incelenmiştir. Atımlı ısı borularının performansı, ısıl direnç, maksimum ısıtma gücü, başlatma performansı, buharlaştırıcı sıcaklığı ve akış desenlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi üzerinden analiz edilmiştir. Burada, kesit değişimi, her bir döngüdeki iki kanal arasındaki genişlik farkından kaynaklanan asimetri olarak da ifade edilebilir.

a. Geometri Etkisi

Şekil 33'te, %50 dolum oranında farklı eğim açıları için ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının ısıtma gücü ile değişimi gösterilmiştir. Burada, PHP1, PHP2 ve PHP3 sırasıyla 2-2 mm, 2-1.5 mm ve 2-1 mm paralel kanal genişliklerine sahip geometrileri temsil etmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere, pozitif eğim açıları ($IA = 30^\circ, 60^\circ$ ve 90°) ve yatay

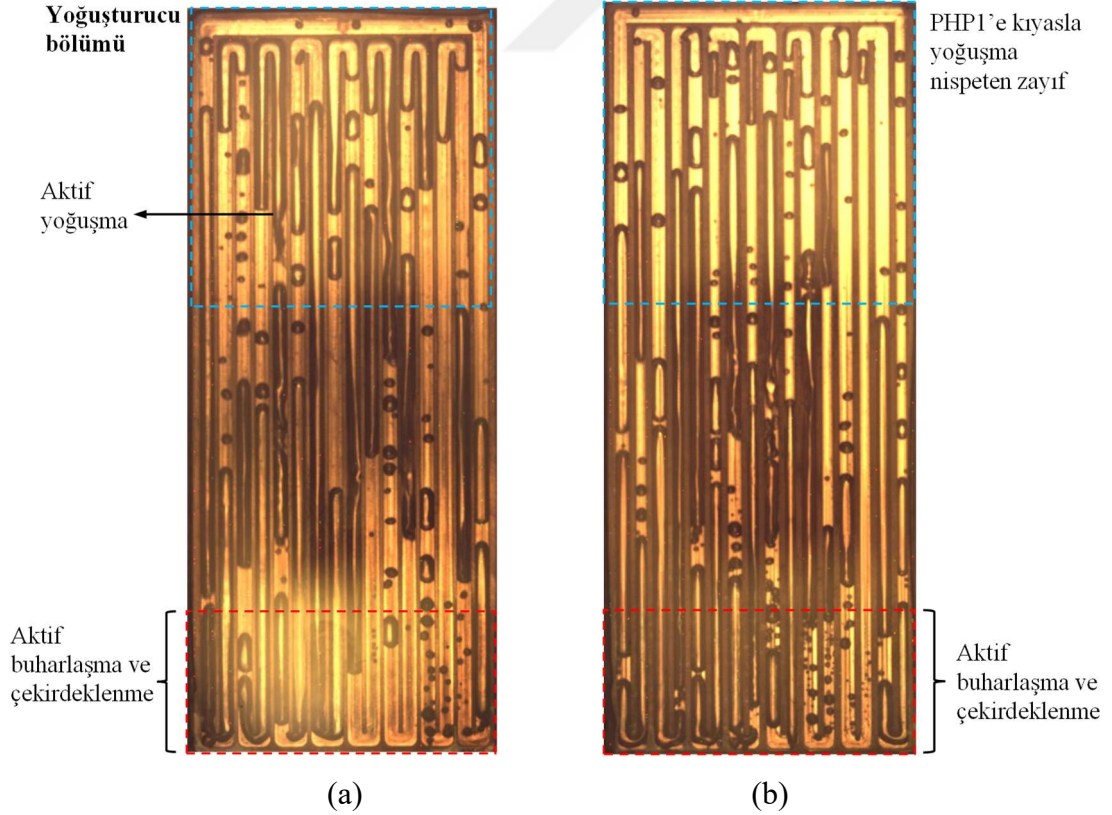
konum ($IA = 0^\circ$) arasında önemli farklılıklar mevcuttur. Pozitif eğim açılarında, ısıtma gücü arttıkça PHP1, PHP2 ve PHP3'te ısıl direnç azalmaktadır. Özellikle 30° eğim açısında, ısıl dirençler arasındaki fark daha belirgin iken, 60° ve 90° açılarında bu farkın azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, yerçekiminin farklı eğim açılarında ısıl direnç üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak, ısıl dirençte, 15 W ısıtma gücünde atımlı ısı borularının çalışmaya başladığını gösteren ani bir düşüş meydana gelmektedir; bu durum, 30° ve 60° eğim açılarındaki PHP1, PHP2 ve PHP3 için geçerlidir. PHP1 ve PHP2, dikey konumda ($IA = 90^\circ$) 10 W'lık ısıtma gücünde çalışmaya başlarken, PHP3 15 W'ta aktif hale gelmektedir. PHP2'nin ısıl direnci, 30° , 60° ve 90° eğim açılarında genel olarak en düşük seviyededir. Ancak, ısıl direnç eğrilerindeki değişim, atımlı ısı borularının ısıl performanslarını kıyaslamak için tek kriter değildir. Bu bağlamda, atımlı ısı borularının ulaştığı maksimum ısıl yük değerleri de önemli bir performans göstergesi olup, ilgili şekilden de görüldüğü üzere, farklı koşullar için farklı değerler almaktadır. Örneğin, 90° eğim açısında, PHP1, PHP2 ve PHP3'ün maksimum ısıl yük değerleri sırasıyla 65W, 50W ve 55W olarak kaydedilmiştir.

Pozitif eğim açıları için buharlaştırıcı sıcaklık eğrileri incelendiğinde (Şekil 33d, f ve h), PHP1'in buharlaştırıcı sıcaklığının PHP2 ve PHP3'e kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Eğim açısı azaldıkça, $IA = 30^\circ$ durumunda (Şekil 33d), PHP1, PHP2 ve PHP3 için maksimum sıcaklıklara karşılık gelen ısıl yük değerleri sırasıyla 60 W, 50 W ve 45 W'tır. $FR = \%50$ ve $IA = 30^\circ - 90^\circ$ koşullarında, PHP1'in en iyi ısıl performans sergilediği, PHP2 ve PHP3'ün ise karşılaştırılabilir sonuçlar sunduğu sonucuna varılmıştır. Dikey konumda ($IA = 90^\circ$) PHP3, PHP2'den daha iyi performans gösterirken; eğim açısı azaldıkça PHP2 PHP3'e kıyasla daha iyi bir ısıl performans sergilemektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, bazı deneysel koşullar altında PHP1, daha yüksek ısıl direnç değerlerine rağmen, PHP2 ve PHP3'e göre daha düşük buharlaştırıcı sıcaklığı ve daha yüksek maksimum ısıtma gücü göstermektedir. Bu bağlamda, üniform ve üniform olmayan (asimetrik) kanallar arasındaki farkları anlamak amacıyla akış görüntülerinden yararlanılmıştır.



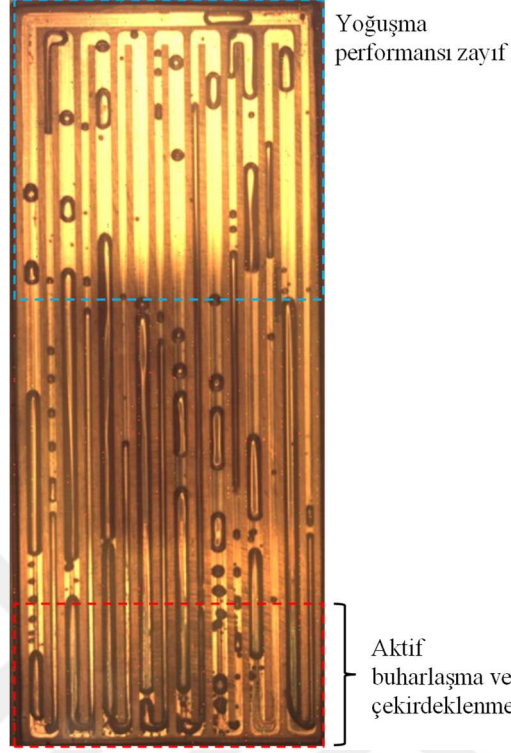
Şekil 33. PHP1, PHP2 ve PHP3 için %50 dolum oranında ısııl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklıklarındaki değişimler

Şekil 34'te, PHP1, PHP2 ve PHP3 için $IA = 90^\circ$, $FR = \%50$ ve $Q_e = 50$ W koşullarındaki akış görüntüleri sunulmuştur. Görüntülerden görüldüğü üzere, buhar kabarcıklarının oluşumu, büyümesi ve hareketi nedeniyle akış alanında meydana gelen salınım ve dalgalanma hareketleri benzerdir. Bununla birlikte, PHP1'in yoğuşturucu bölgesindeki yoğuşma sürecinin (Şekil 34a) PHP2 ve PHP3'e kıyasla daha aktif olduğunu görülmektedir. Yoğuşma hızı ve yoğuşturucu bölgesindeki kabarcık aktivitesi PHP1'de daha yüksektir. Bu durum, buharlaştırıcı bölgesinden taşınan ısının, yoğuşturucu bölgesinden etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Isının yoğuşturucu bölgesinden verimli bir şekilde atılması, buharlaştırıcı bölgesindeki ani sıcaklık artışlarını önler ve böylece çalışma aralığını (maksimum ısıtma gücünü) genişletir. Ayrıca, PHP2 ve PHP3'te, sıvı-buhar kabarcıkları özellikle yoğuşturucu bölgesindeki U-dönüşlerinde yavaşlama eğilimindedir. Akış görüntüleme sonuçları, ölçümler ve geometrik farklılıkların genel değerlendirmesine dayanarak, atımlı ısı borularının performansını etkileyen dört temel faktör olduğu belirlenmiştir: (1) etkili kuvvetlerin rolü, (2) toplam sıvı içeriği (3) etkin ısı transfer alanı ve (4) atımlı ısı borusu malzemesinin ısı iletimi.



Şekil 34. $IA = 90^\circ$, $FR = \%50$, $Q_e = 50$ W koşullardaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)

Şekil 34'ün devamı

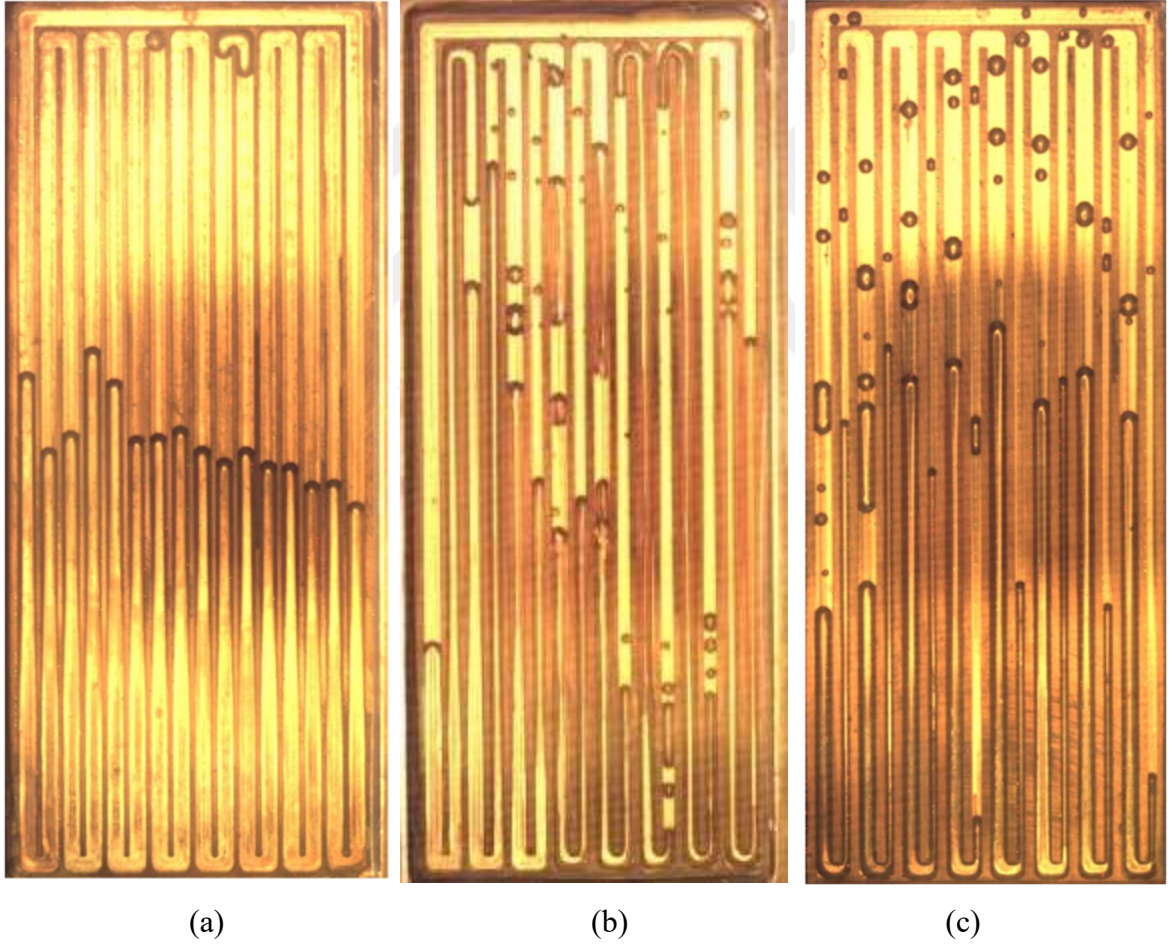


(c)

Asimetrik kanal tasarımlarının kullanılmasının esas nedeni, atımlı ısı borularında akış hareketini artıran dengelenmemiş kılcal kuvvet oluşturmaktır. Bu durum, özellikle yerçekimi desteğinin olmadığı yatay konum ($IA = 0^\circ$) için önemlidir. Mevcut bulgular da asimetrik kanal tasarımların önemini ortaya koymaktadır. PHP1, PHP2 ve PHP3 yatay konuma yerleştirildiğinde (Şekil 33), tamamen farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yatay konumlandırmada ısıl direnç eğrileri arasındaki fark belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 33a). PHP1'in ısıl direnç eğrisi neredeyse yatay bir eğilim sergilemektedir; bu durum PHP1'in $IA = 0^\circ$ 'de çalışmaya başlayamadığını göstermektedir. Yatay konuma yerleştirilince, PHP1'in maksimum ısıtma gücü 65 W'tan 45 W'a düşmektedir. Buna karşın, PHP2 ve PHP3 yatay konumda çalışmayı sürdürmekte ve PHP1'den daha iyi bir ısıl performans sergilemektedir.

Şekil 35a, b ve c'de, sırasıyla, PHP1, PHP2 ve PHP3 için alınan üç farklı akış görüntüsü sunulmuştur. Şekil 35a'da görüldüğü üzere, PHP1'in buharlaştırıcı bölgesinde kabarcık çekirdeklenmesi mevcut değildir; ayrıca akış kanallarında dağılmış ayrık buhar kabarcıkları veya sıvı bulunmamaktadır. PHP2 ve PHP3'te ise akış kanalları boyunca

dağılmış çok sayıda ayrıık buhar kabarcıkları ve sıvı dizilimi mevcuttur (Şekil 35b ve c). Üniform kanal geometrisine sahip PHP1'in çalışmaması, yatay konumda yerçekimi kuvvetinin eksikliği ve az sayıda döngü olması nedeniyle oluşan yetersiz basınç pertürbasyonlarıyla açıklanabilir (Spinato vd., 2016). PHP2 ve PHP3 kıyaslandığında, dikey konum hariç, PHP2'nin nispeten daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Pozitif eğim açılı konumlarda ($IA = 30^\circ, 60^\circ$ ve 90°), en etkili sürücü kuvvetlerden biri olan yerçekimi kuvveti, akış mekanizması üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, asimetrik kanal geometrisi kullanılarak yerçekiminin ısı performans üzerindeki etkisi belirgin şekilde azaltılabilir.



Şekil 35. $IA = 0^\circ$, $FR = \%50$, $Q_e = 35$ W koşullarındaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)

İç basınç pertürbasyonlarının ve yerçekimi desteğinin eksikliği, dengelenmemiş kılcallık kuvvet aracılığıyla telafi edilebilir. Kanal genişlikleri arasındaki farktan kaynaklanan kılcallık basınç farkı, iş akışkanını yönlendirmede ve sirkülasyonu sürdürmede

önemli bir rol oynar. Kılcallık basınç farkı, buharlaştırıcı bölümüne yeterli sıvı beslemesini sağlamak ve atımlı ısı borusundaki ısı transferinin kolaylaştırmak için gereklidir. Ancak, farklı kanal kesit oranına sahip atımlı ısı borularının verimli çalışması, büyük ölçüde viskoz basınç düşüşü ile kılcallık basınç farkı arasındaki dengeye bağlıdır (Kwon ve Kim, 2015). Kılcallık basınç farkı, viskoz basınç düşüşünden daha büyük olduğunda, yerçekimi desteği olmasa bile iş akışkanının buharlaştırıcı bölümüne hareketini kolaylaştırır. Bu durum, buharlaştırıcıya ulaşan sıvının sürekli olarak buharlaşmasını ve ısı transfer verimliliğinin korunmasını sağlar. Diğer taraftan, kılcallık basınç farkı viskoz basınç düşüşünden az ise, buharlaştırıcı bölümünde kuruma meydana gelebilir ve bu da ısı transferi verimliliğinin düşmesine neden olur. Kwon ve Kim'in (2015) tanımına ek olarak, kaynamalı akış literatüründe (Alam vd., 2016) ele alınan buharlaşma momentum kuvveti de sonuçların değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır. Buharlaşma momentum kuvveti, buharlaşan ara yüzeyde, buhar fazının yüksek bir hızla genişlemesi sonucu oluşan momentum değişiminden kaynaklanır. Bu momentum değişimi, sıvı-buhar arayüzünde etkili olan ve sistem içindeki akış modellerini ve ısı transfer özelliklerini etkileyen bir kuvvetle sonuçlanır. Buharlaşma momentum kuvveti matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_{emf} = \frac{A_{bia}}{\rho_v A_{ct}^2} \left(\frac{Q_e}{h_{fv}} \right)^2 \quad (14)$$

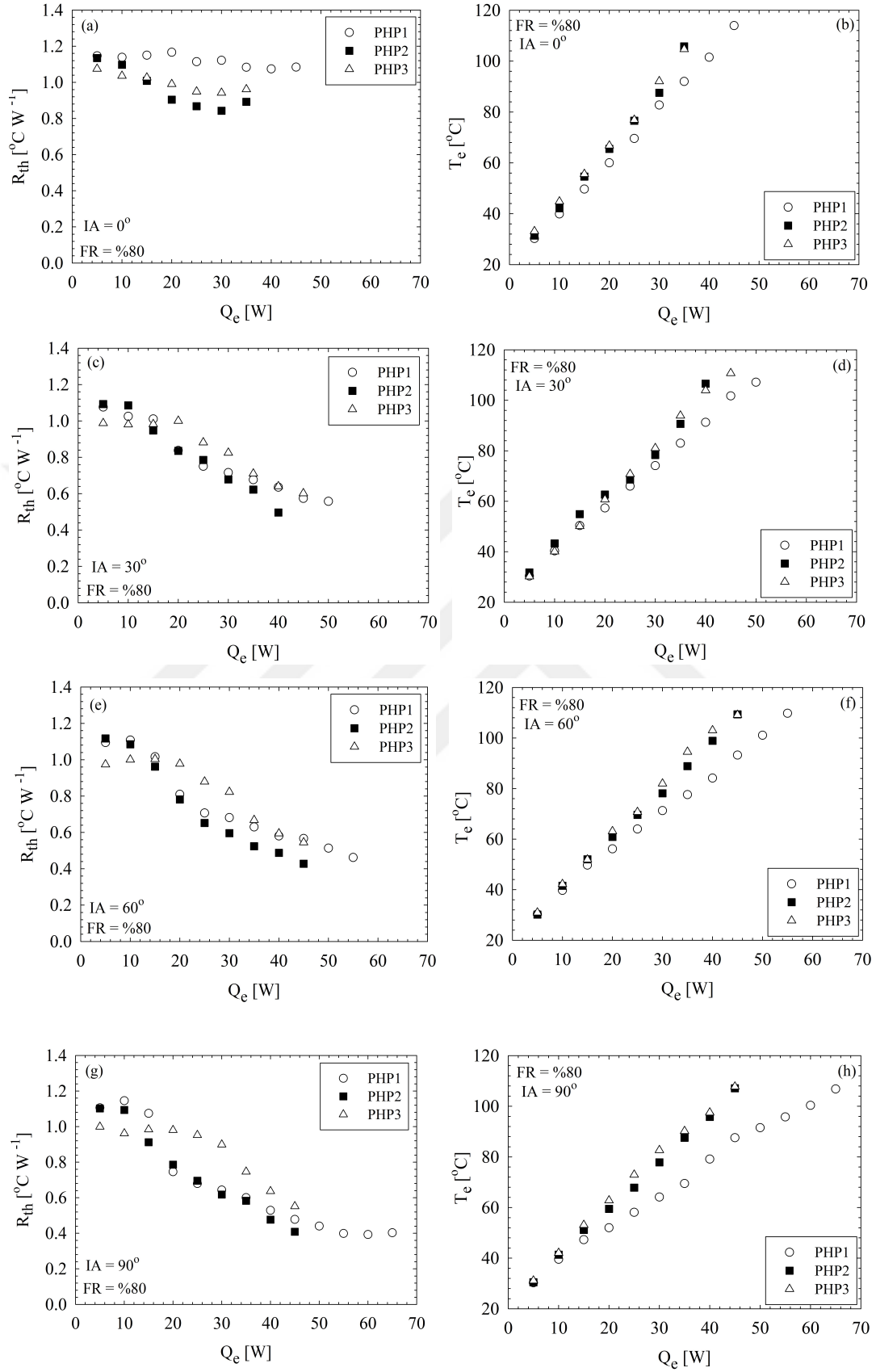
Burada, ρ_v buhar yoğunluğu, A_{ct} ilgili kanalın toplam ısı transfer alanı, A_{bia} kabarcık ara yüzey alanı ve h_{fv} buharlaşma gizli ısıdır. Eşitlik (14)'e göre, kanal ısı transfer alanının veya kanal boyutunun küçülmesi, buharlaşma momentum kuvvetinin artmasına yol açar. Azalan kanal boyutu, sınırlama etkisi nedeniyle sıvı-buhar hızlarının artmasına ve dolayısıyla daha yüksek buharlaşma momentum kuvvetinin oluşmasına neden olur. PHP2 ve PHP3'te, kanallardan biri daha dardır, bu nedenle ilgili kanalın kesit alanı döngüdeki diğer kanala göre daha küçüktür. Bu durum, komşu kanallarda farklı kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Bu farklılık, basınç pertürbasyonlarını veya kanallar arasındaki dengesiz basınç dağılımını artırarak atımlı ısı borusunun çalışma performansını iyileştirir ve yerçekimi desteğinin olmadığı durumlarda avantaj sağlar. Kısacası, basınç pertürbasyonları artar, buharlaştırıcı bölümünde dengesiz basınç kuvvetleri oluşur ve buharlaşma momentum kuvveti, yerçekimi desteğinin olmadığı koşullarda dengelenmemiş kılcallık kuvvetine ek olarak akışkan akışına katkı sağlar. Kanal çapının küçülmesi buharlaşma momentum

kuvvetini artırır, ancak bu kuvvet, akış direnci oluşturarak yoğunlaştırıcı bölümündeki akışkanın geri dönüşünde geciktirici bir etkiye de neden olabilir. Bu nedenle, paralel kanalların kesit oranının optimize edilmesi önemlidir.

Atımlı ısı borularının sıvı miktarı, performansı etkileyen bir diğer önemli faktördür. Aynı dolum oranında PHP1, sırasıyla PHP2 ve PHP3'e kıyasla yaklaşık %12.5 ve %22 daha fazla iş akışkanı içerir. Bu artan akışkan içeriği, buharlaştırıcı bölgesinde ısıнын daha etkin bir şekilde absorbe edilmesini veya ısıнын yüzeyden daha hızlı çekilmesini sağlar. Buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya doğru akış gerçekleştiğinde, akışkan yoğunlaştırıcı bölgesine daha fazla ısı enerji taşır ve böylece ısı alıcısından daha fazla ısı atılmasını sağlar. Dolayısıyla, PHP1'in pozitif açılı konumlarında daha düşük buharlaştırıcı sıcaklığı ve daha yüksek maksimum ısıtma gücü elde edilmesinin olası nedenlerinde biri, sıvı içeriğinin daha fazla olmasıdır.

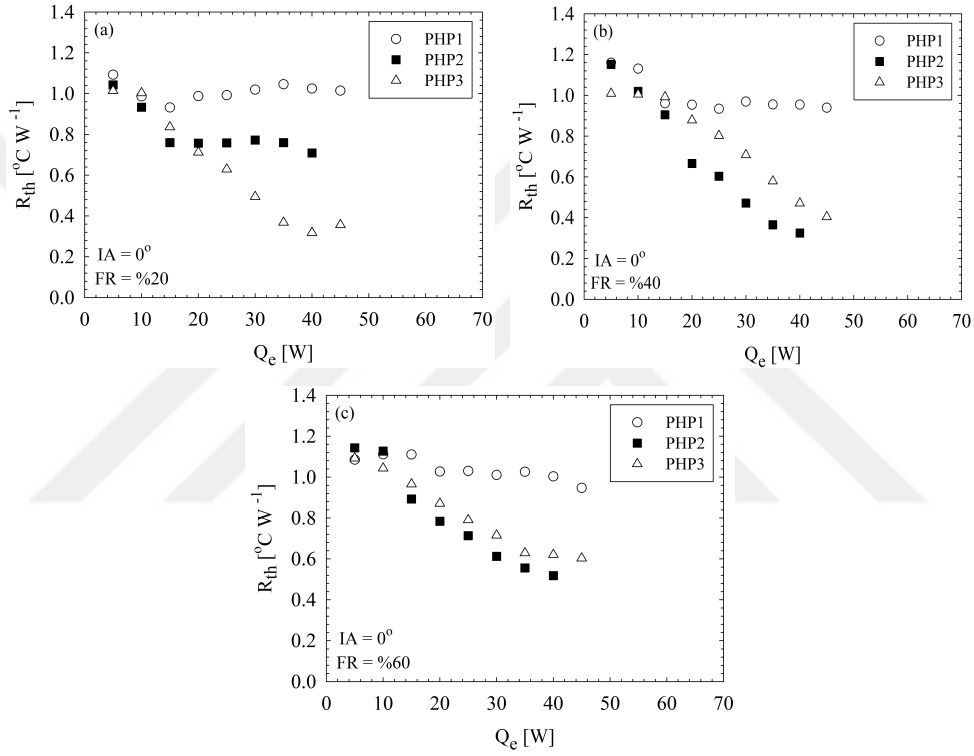
Geometri farklılıklarından kaynaklanan bir diğer önemli faktör ise akışkan tarafından ısıtılan alan, yani ısı transfer alanlarındaki değişimdir. PHP1, PHP2 ve PHP3 aynı döngü sayısına sahip olmasına rağmen, PHP1 en ince kanatçıklara, dolayısıyla, en büyük ısı transfer alanına sahiptir. Buna karşılık, PHP3 en küçük ısı transfer alanına sahiptir. Isı transfer alanının artırılması, sistemin ısı performansını iyileştirir. Bu geometrik farklılık, aynı zamanda başka bir önemli faktörü de ortaya çıkarır: atımlı ısı borusu malzemesindeki ısı iletimi. Isı borusu malzemesi olarak kullanılan bakır, yaklaşık 395 W/mK'lik yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir. Düz plakalı atımlı ısı boruları, eksenel iletimi ve radyal yönde paralel kanal etkileşimini kolaylaştıran tek bloklu yapılardır.

Şekil 36'da, %80 dolum oranı için ilgili sonuçlar sunulmuştur. Dolum oranı %80'e çıktığında, kanalların davranışını büyük ölçüde değiştiren önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. İlk kayda değer değişiklik yatay konumda ($IA = 0^\circ$) meydana gelmektedir. Burada, PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrilerinde ısı yük arttıkça belirgin bir düşüş gözlenmez. PHP1 için eğri neredeyse yataydır, bu da PHP1'in çalışmadığının göstergesidir. Öte yandan, ısıtma gücündeki artışla birlikte PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrisinde gözlemlenen hafif düşüş, buharlaştırıcı bölgesinde buhar kabarcıklarının oluştuğuna işaret etmektedir. Dolum oranı %80 için, PHP'lerin eğim açısına bağlılığı, özellikle üniform kanallı PHP1 için daha belirgindir. PHP1 için 0° , 30° , 60° ve 90° eğim açılarında maksimum ısıtma güçleri sırasıyla 45 W, 50 W, 55 W ve 65 W'tır.

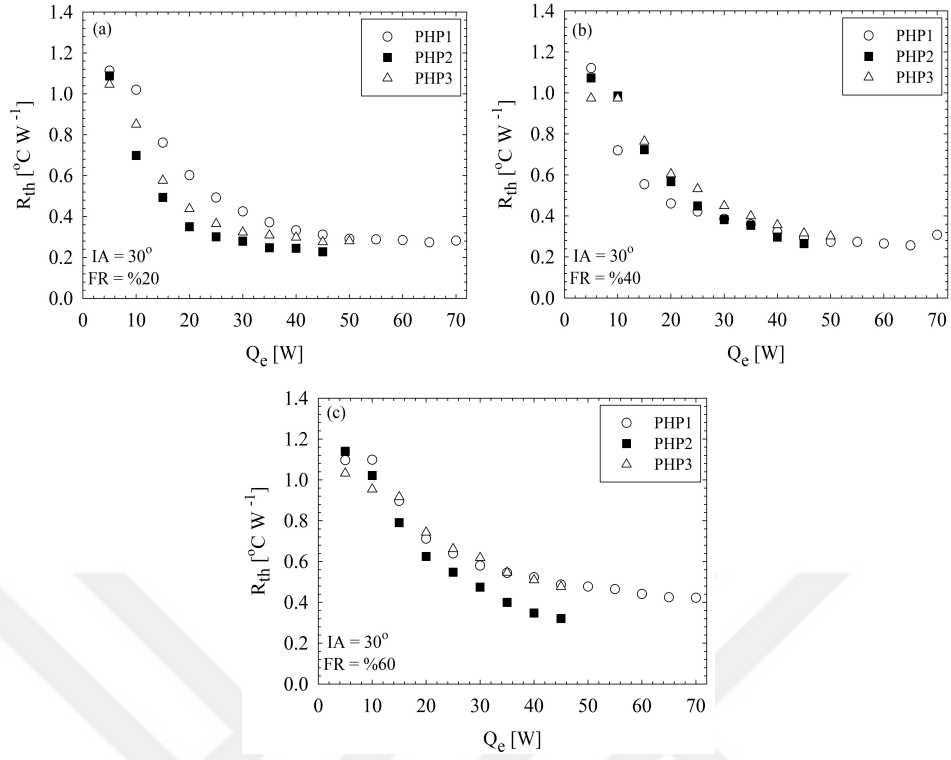


Şekil 36. $FR = \%80$ 'de PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığındaki değişiklikler

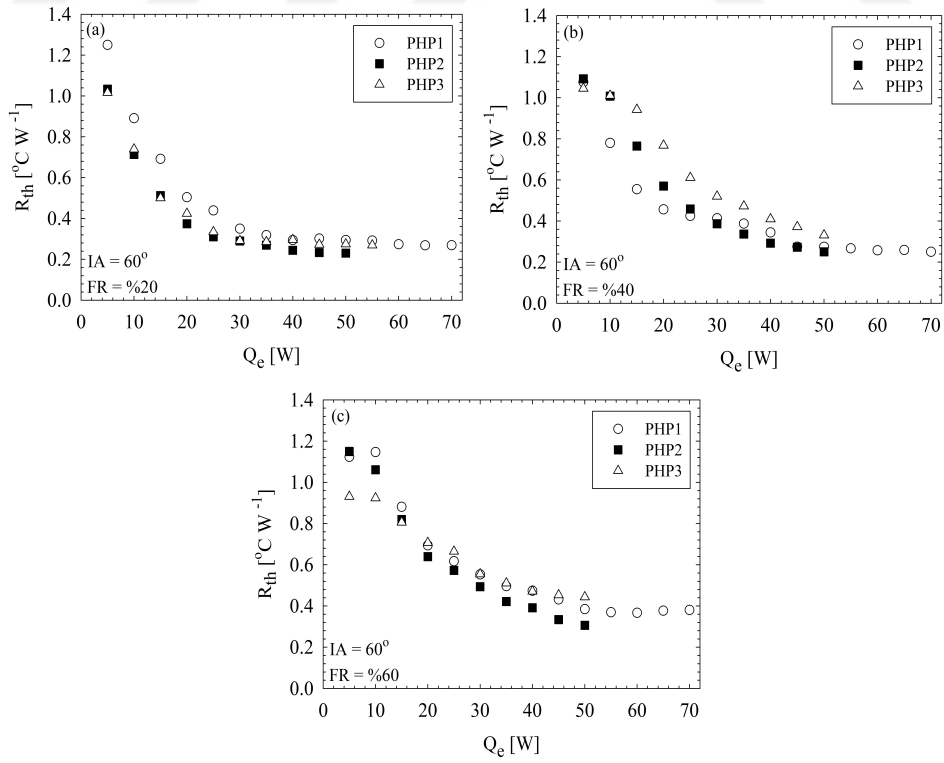
Yerçekiminin PHP1'in ısıl performansı üzerindeki etkisi diğer PHP'lere kıyasla daha belirgindir. Asimetrik kanal tasarımının yerçekiminin performans üzerindeki etkisini azalttığı sonucuna varılabilir. PHP2 için 0° , 30° , 60° ve 90° eğim açılarında maksimum ısıtma güçleri sırasıyla 35 W, 40 W, 45 W ve 45 W'tır. PHP3 için 0° , 30° , 60° ve 90° eğim açılarında maksimum ısıtma güçleri sırasıyla 35 W, 45 W, 45 W ve 45 W'tır. PHP1, PHP2 ve PHP3 %20, %40 ve %60 dolum oranları için farklı eğim açılarında kıyaslanması, sırasıyla Şekil 37, 38, 39 ve 40'ta verilmiştir.



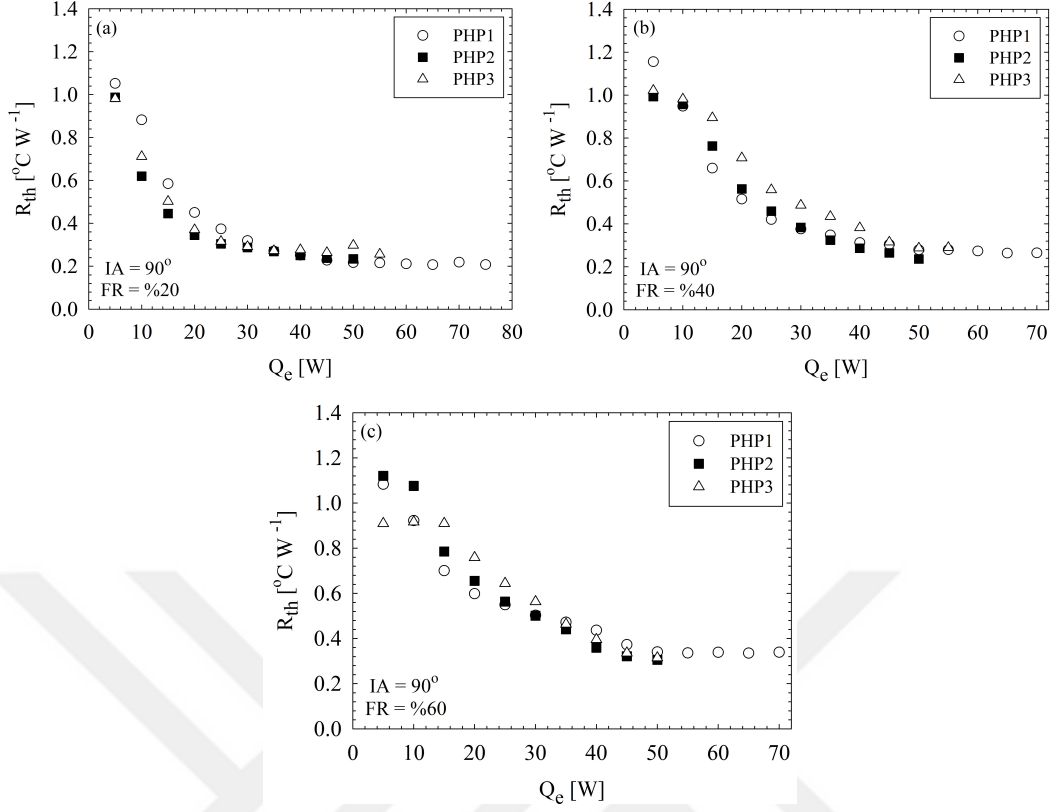
Şekil 37. $IA = 0^\circ$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: %20 (a), %40 (b) ve %60 (c)



Şekil 38. $IA = 30^{\circ}$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: %20 (a), %40 (b) ve %60 (c)



Şekil 39. $IA = 60^{\circ}$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısıl direnç eğrileri: %20 (a), %40 (b) ve %60 (c)



Şekil 40. $IA = 90^{\circ}$ için PHP1, PHP2 ve PHP3'ün ısı direnç eğrileri: %20 (a), %40 (b) ve %60 (c)

b. Dolum Oranı ve Eğim Açısı Etkisi

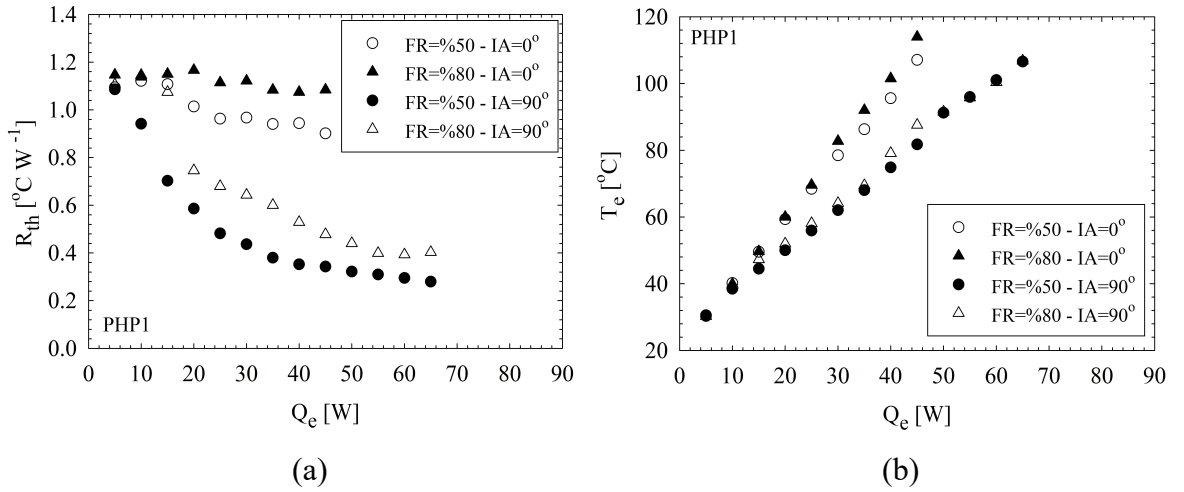
Dolum oranı, atımlı ısı borularının ısı performansını önemli ölçüde etkileyen kritik bir parametredir ve bu etki diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, Şekil 41'de dolum oranının, PHP tasarımlarının ve eğim açılarının birleşik etkileri gösterilmektedir.

Şekil 41a'da, 0° 'lik bir eğim açısı için, PHP1 dolum oranından bağımsız olarak yaklaşık yatay bir eğilim sergilemektedir. Akış görüntüleri de üniform kanallı PHP1'in yatay konumdayken sürekli ve kararlı bir çalışma sürdüremediğini ortaya koymaktadır. Dikey konumda ise PHP1'in ısı direnç değerleri, %50 ve %80 dolum oranlarında artan ısıtma gücü ile azalmaktadır. Ancak, %50 dolum oranında, PHP1'in hem ısı dirençleri hem de buharlaştırıcı sıcaklıkları daha düşüktür. Bu durum, PHP1'in performansının artan dolum oranıyla birlikte belirgin bir şekilde azaldığını göstermektedir. %80 dolum oranındaki PHP1'de, buharlaştırıcı bölümünde genellikle sıvı ortamda yüzen çok sayıda kabarcık oluşur. Tipik olarak, her bir buhar kabarcığı bulunduğu kanal boyunca yükselir ve yoğunlaştırıcı bölümünün başlangıcına ulaştığında yoğunlaşır. Ancak, belirgin bir akış sirkülasyonu yoktur.

ve yoğuşturucu bölümü ağırlıklı olarak sıvı ile doludur. İlerleyen kabarcıkların önünde biriken sıvı kütlesi fazla olduğundan, buhar kabarcıklarının sıvıyı itmesi zorlaşır.

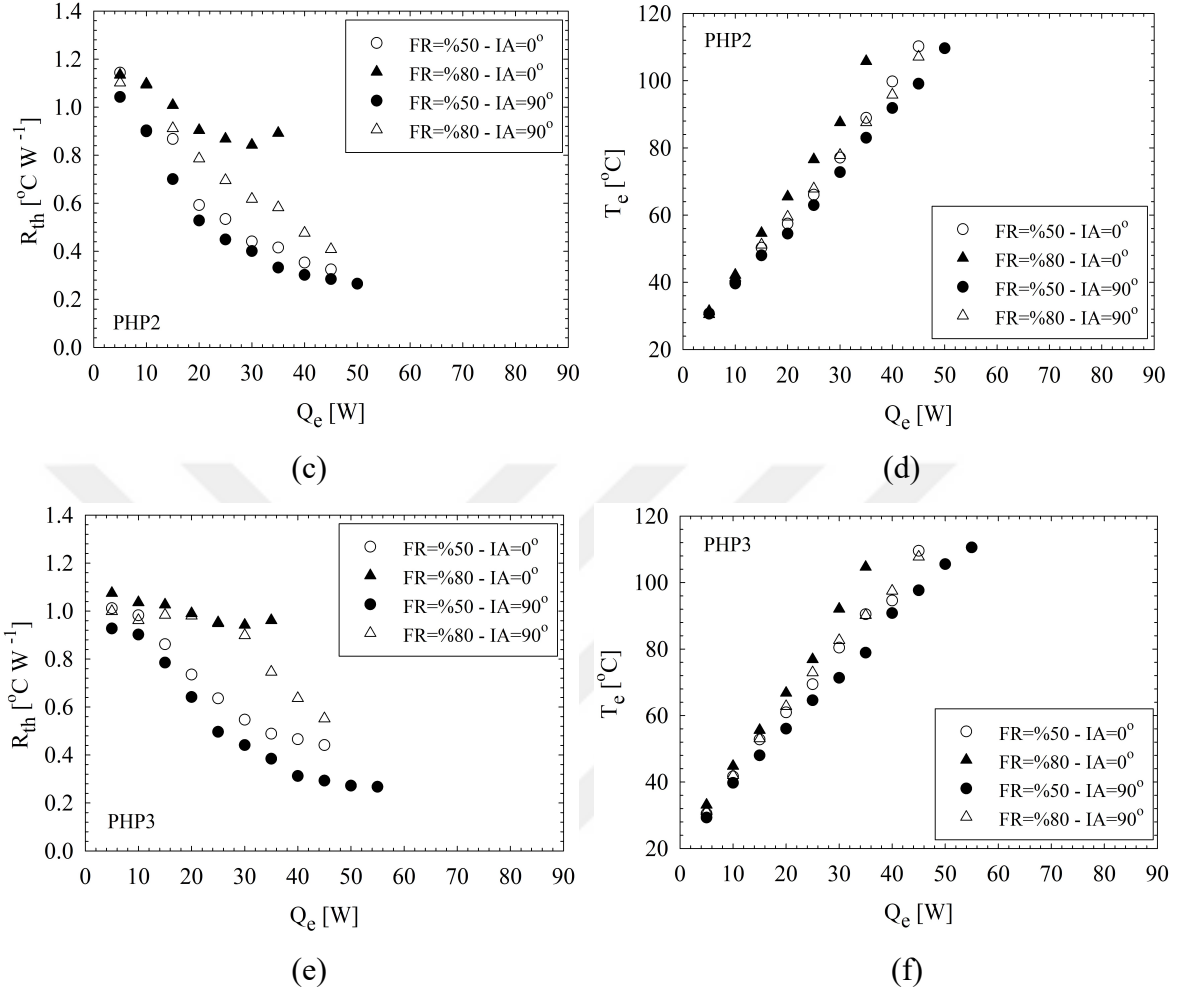
Bu olguların arkasındaki temel fiziksel neden, fazla sıvı içeriğidir. Sıvı miktarının fazlalığı, sirkülasyonu ve salınım hareketini kısıtlayarak akış modellerini ve geçişlerini etkiler. İnce film buharlaşması ve yoğuşması önemli ölçüde azalır. %50 dolum oranında gözlemlenen akış olayları, %80 dolum oranında yer almaz. PHP'nin iç hacminin büyük bir kısmını kaplayan yüksek sıvı içeriği, sıvı-buhar diziliminin akış kanalları boyunca kolayca hareket etmesi için gerekli esnekliği, yani serbestlik derecesini kısıtlar.

PHP2 ve PHP3 için %50 dolum oranında, eğim açısının çalışma performansı üzerindeki etkisi, PHP1'e kıyasla önemli ölçüde azalmaktadır. Eğim açısına olan bağımlılığın azalması özellikle PHP2'de belirgindir. Bu davranışın birincil nedeni komşu kanallar arasındaki kesitsel varyasyondur. Bu geometrik yapı, önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, dengesiz buharlaşma momentumu ve dengelenmemiş kılcallık kuvvetleri sağlayarak yerçekimi etkilerinin eksikliğini telafi etmektedir. Bununla birlikte, dolum oranı, asimetrik kanal geometrisine sahip atımlı ısı boruları için bile önemini korumaktadır. Dolum oranının %50'den %80'e çıkması hem ısı direnç değerlerinin hem de buharlaştırıcı sıcaklıklarının belirgin şekilde yükselmesine neden olmaktadır (Şekil 41c ile 41f).



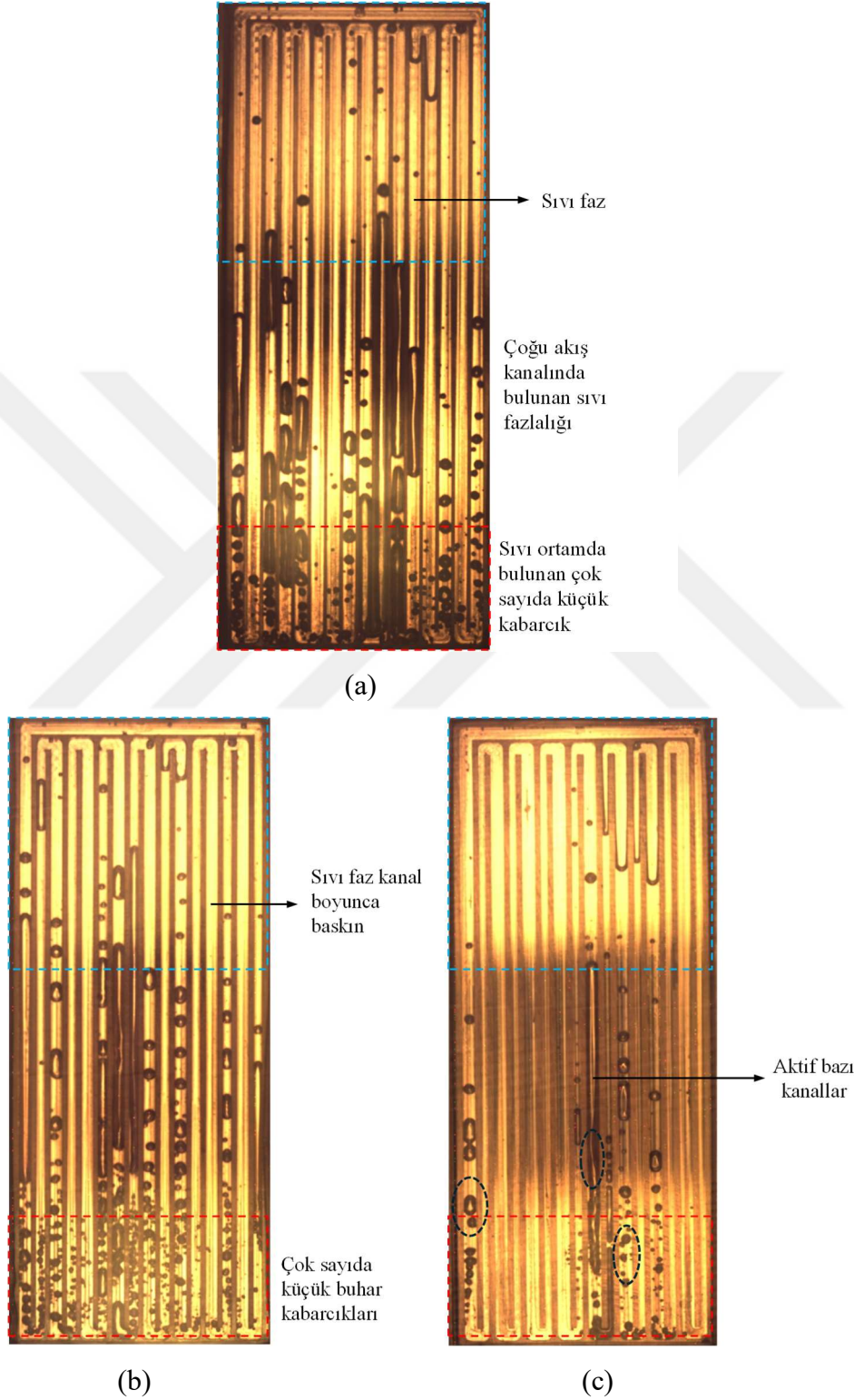
Şekil 41. Dolum oranı ve eğim açısının ısı performans üzerindeki etkileri

Şekil 41'in devamı



PHP1, PHP2 ve PHP3 için %80 dolum oranında, 90° eğim açısında ve 45 W ısıtma gücündeki çalışma koşullarına ait akış modelleri Şekil 42'de verilmiştir. Atımlı ısı borusunun orta bölümde, birkaç kanalda kısmi buhar kabarcığı ve sıvı geçişleri gözlemlenmektedir. Genel olarak akış, buharlaştırıcı bölgesinde üretilen küçük buhar kabarcıklarının bulunduğu kanal boyunca uzun buhar kabarcıklarına dönüşmesi şeklinde gelişir. Ancak, fazla sıvı nedeniyle bu buhar kabarcıkları, yoğunlaştırıcı bölgesinin girişinde veya girişe ulaşmadan önce yoğunlaşır. Dolum oranındaki artışla birlikte, PHP3 için dikkate değer gözlemler yapılabilir. Şekil 36'da gösterildiği üzere, %80 dolum oranında PHP3 en düşük ısıl performansı sergilemektedir. Dolum oranının %50'den %80'e yükselmesi PHP3'ün ısıl direncinde kayda değer bir değişikliğe yol açmaktadır. Şekil 42c'de PHP3'ün akış görüntüsü sunulmuştur. Genel olarak, sadece birkaç kanal aktiftir ve aktif olan kanallar,

genişliği daha büyük olanlardır. PHP3'te buhar kabarcıklarının sayısı, PHP1 ve PHP2'ye kıyasla belirgin şekilde daha azdır.



Şekil 42. $FR = \%80$, $IA = 90^\circ$ ve $Q_e = 45$ W koşullarındaki akış görüntüleri: PHP1 (a), PHP2 (b) ve PHP3 (c)

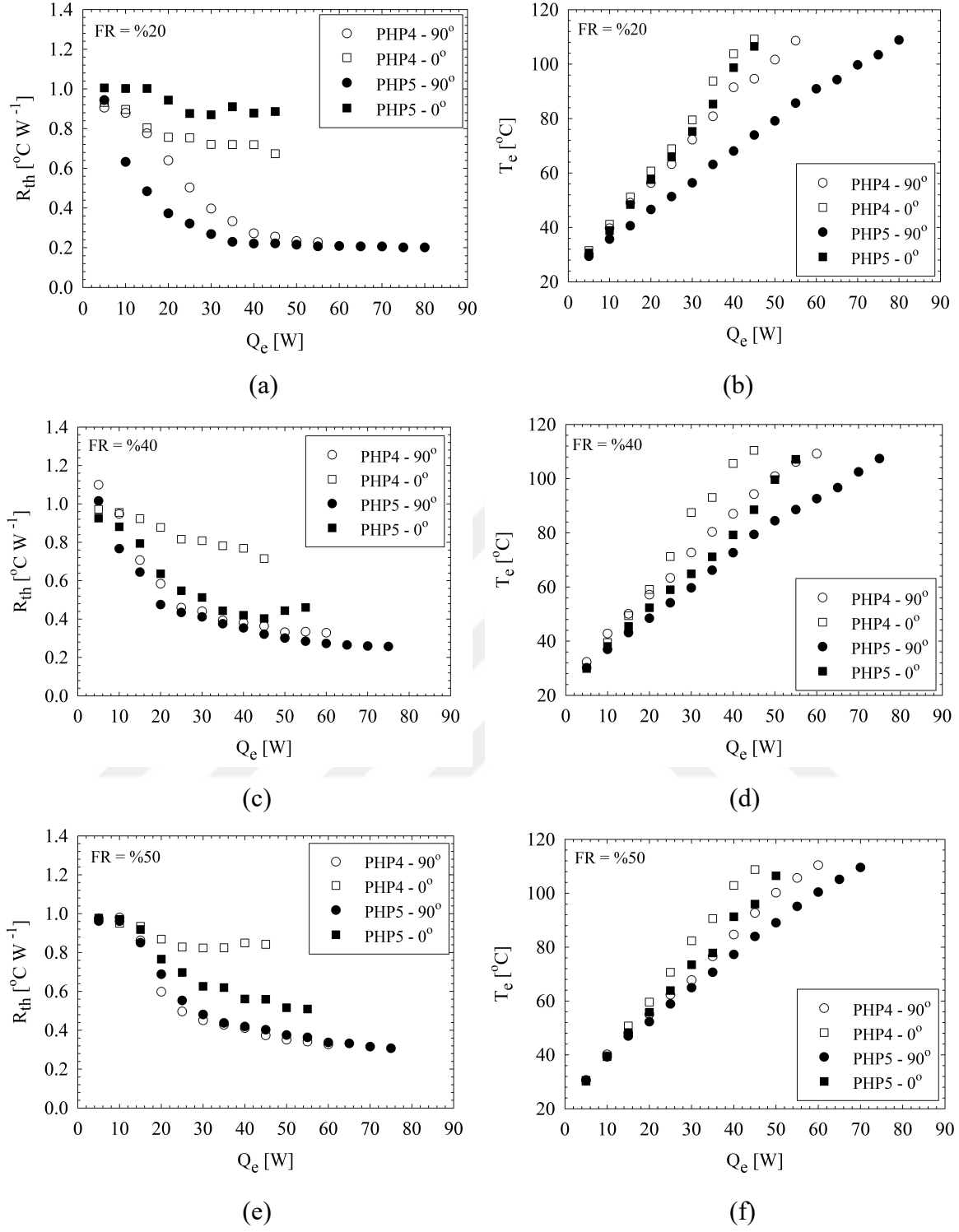
3.1.3. Kademeli Kanal Kesit Değişimine Sahip PHP'lerin Performans Analizi

Bu bölümde, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinde farklı kesit oranlarına sahip atımlı ısı borularının (PHP4 ve PHP5) ısı ve akış özellikleri sunulmuştur. Deneyler, farklı ısı yükleri altında çeşitli dolum oranlarını (%20, %40, %50, %60 ve %80) ve eğim açılarını (0° , 30° , 60° ve 90°) kapsamaktadır.

a. Geometri Etkisi

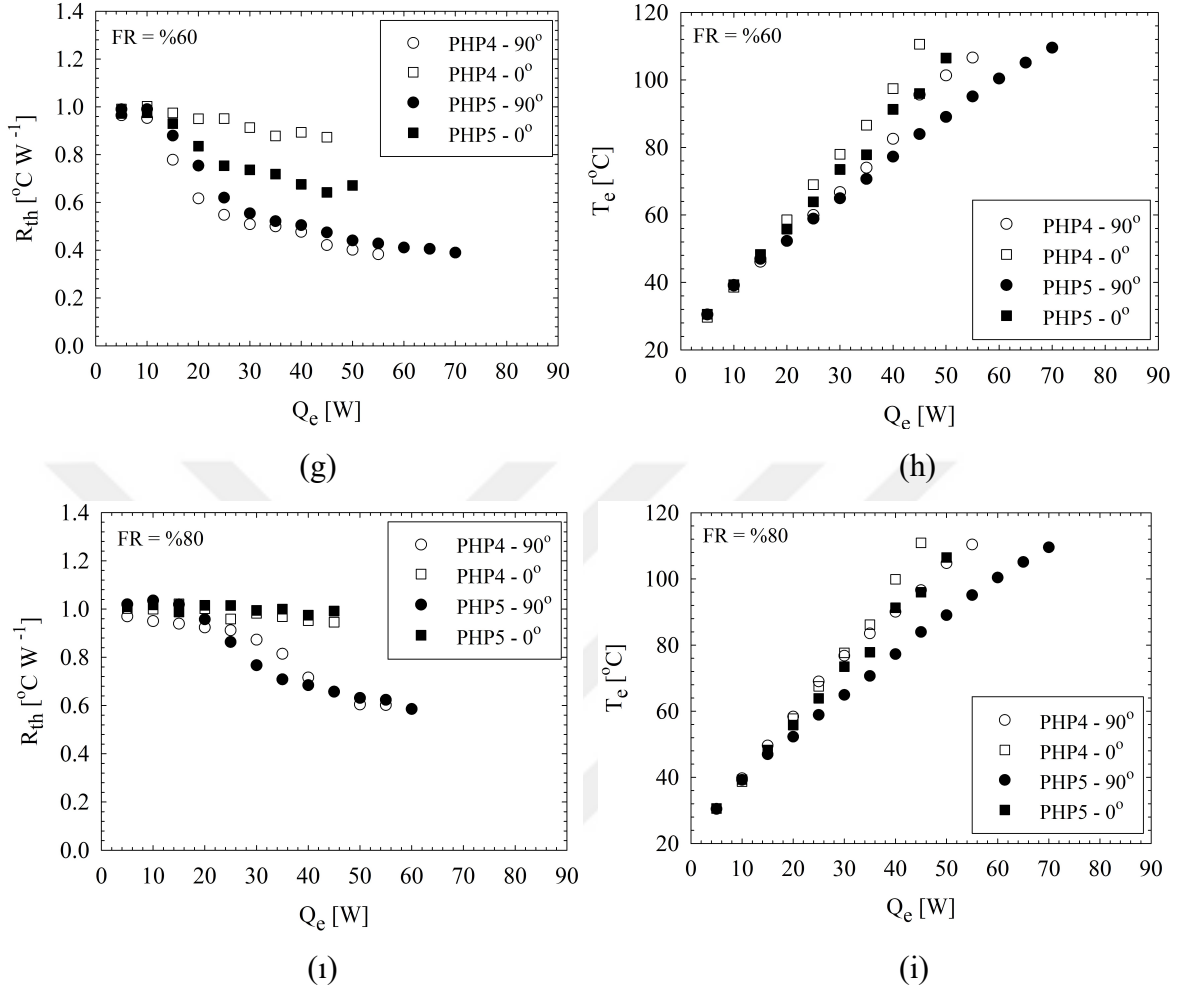
PHP4 ve PHP5'te her bir döngüdeki kanallardan biri kademeli olarak daralan bir kanal kesitine sahiptir. Yatay ve dikey konumda, farklı dolum oranlarına göre PHP4 ve PHP5'in kıyaslanmasına ilişkin grafikler Şekil 43a ile 43i'de sunulmuştur. Isıl performans değerlendirmesinde dört kriter dikkate alınmıştır: (1) ısı direnç, (2) ortalama buharlaştırıcı sıcaklığı, (3) yönden bağımsız çalışabilme durumu ve (4) izin verilen en yüksek yüzey sıcaklığındaki maksimum ısıtma gücü.

Şekil 43a ve b'de, %20 dolum oranı için PHP4 ve PHP5'in yatay ve dikey konumlardaki sonuçları verilmiştir. Dikey konumda (90°), her iki PHP için de artan ısıtma gücüyle birlikte ısı direnç belirgin bir şekilde azalmaktadır. Şekil 43b'de sıcaklıklardaki değişimler incelendiğinde, PHP5'in buharlaştırıcı sıcaklıklarının PHP4'e kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, PHP5, PHP4'e göre daha erken çalışmaya başlamaktadır. PHP5, 10 W ısıtma gücünde çalışmaya başlarken, PHP4'ün başlangıç ısıtma gücü 20 W'tır. Ek olarak, PHP5'in maksimum ısıtma gücü PHP4'e göre oldukça yüksektir; bu değerler PHP4 ve PHP5 için sırasıyla 55 W ve 80 W'tır. Yukarıda belirtilen kriterlere dayanarak, PHP5'in ısı performansının PHP4'e kıyasla daha üstün olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 43. PHP4 ile PHP5'in farklı deney koşullarında karşılaştırılması

Şekil 43'ün devamı

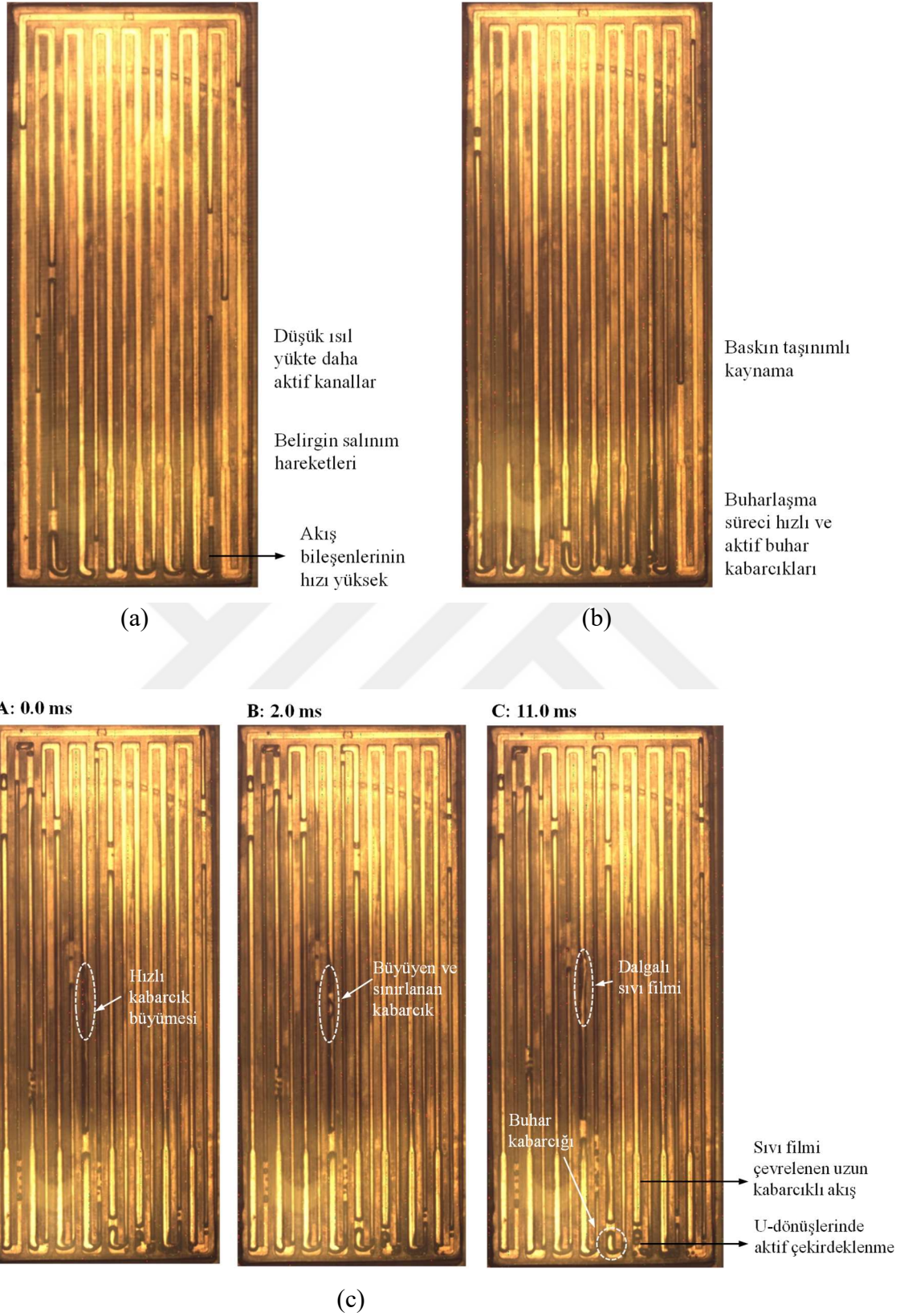


PHP5'in akış mekanizmasını daha iyi anlamak amacıyla, Şekil 44'te %20 dolum oranı ve 90° eğim açısındaki koşullar altında beş farklı akış görüntüsü sunulmuştur. Burada, düşük ısı yüklerinde (15 W, Şekil 44a) bazı kanallarda salınım hareketinin başladığı gözlemlenmiştir. Orta ısı yüklerinde (45 W, Şekil 44b), buharlaştırıcı bölgesinde buharlaşma süreci daha hızlı gerçekleşmektedir. Buharlaştırıcı bölümünün herhangi bir U-dönüşünde oluşan buhar kabarcıkları, dar kesitli kanallardan geniş kesitlere doğru hızla hareket eder. Bu aşamada, taşınımlı kaynama baskın ısı transfer mekanizması olarak öne çıkmakta ve bu süreç, PHP5'in buharlaştırıcı sıcaklığının daha düşük olmasına katkı sağlamaktadır. Q_u ve Mudawar (2003) tarafından da belirtildiği gibi, taşınımlı kaynama halkasal akış ile ilişkilidir. Görüntüleme testleri sırasında, PHP5'in buharlaştırıcı bölgesinde sıvı filminin hızla buharlaştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 44c’de, 75 W ısıtma gücüne ait üç ardışık akış görüntüsü verilmiştir. Kesit alanlarındaki farklılıklar nedeniyle, U-dönüşünde çekirdeklenen bir kabarcık veya en dar kanaldan gelen bir buhar kabarcığı en geniş bölüme doğru genişler. Böylece, buharlaştırıcı bölgesinin U-dönüşlerinde yüksek akış hızlarının oluşmasına neden olur. Ayrıca, kabarcığın aniden genişlemesi ve hareketi, salınımların veya çalkantıların iyileşmesine katkı sağlar.

Aniden genişleyen kabarcık, en geniş bölümden (kanal genişliği=2 mm) orta bölüme (kanal genişliği=1.5 mm) geçerken, daralan kesit nedeniyle sıkışır. Bu daralma, geniş bölümdeki basıncı artırarak buhar kabarcığının ve sıvı yığının daha yüksek hızda itilmesini sağlar. Aslında, atımlı ısı borusu doğal bir pompalama sistemi gibi çalışır ve buharlaştırıcı bölgesi bu pompanın çıkış hattı olarak görev yapar. Spinato vd. (2016) tarafından belirtildiği gibi, yüksek pompalama gücü atımlı ısı borusunun performansını artırmaktadır. Diğer taraftan, kanal çiftinin en dar kanalında, mikro kanallardaki akış kaynamasına özgü bir akış dengesizliği olan hızlı kabarcık büyümesi veya şiddetli kaynama (*explosive boiling*) gerçekleşir. Şekil 44c (A'dan C'ye kadar) gösterilen bu fiziksel olgunun gelişimi yaklaşık 11 milisaniye içinde gerçekleşmektedir.

PHP4 ve PHP5 yatay olarak yerleştirildiğinde ($FR = \%20$ ve $IA = 0^\circ$ koşullarında), tamamen farklı sonuçlar elde edilmektedir. Isıl direnç değerlerinden anlaşıldığı üzere, her iki atımlı ısı borusu da artan ısıtma gücü ile etkin bir şekilde çalışamaz. Isıl direnç eğrilerinde gözlenen hafif düşüşler, düşük genlikteki başla-dur hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Yatay konumlandırma nedeniyle sıvı, buharlaştırıcı bölümünde toplanamamakta ve düşük sıvı içeriği bu durumda belirleyici bir rol oynamaktadır. Yeterli sıvının olmaması, aktif sıvı-buhar sirkülasyonunu sağlayamaz ve buharlaştırıcı sıcaklığının keskin bir şekilde artmasına neden olur. Dolayısıyla, buharlaştırıcı bölgesinde ciddi bir kuruma meydana gelir ve sistem çöker.



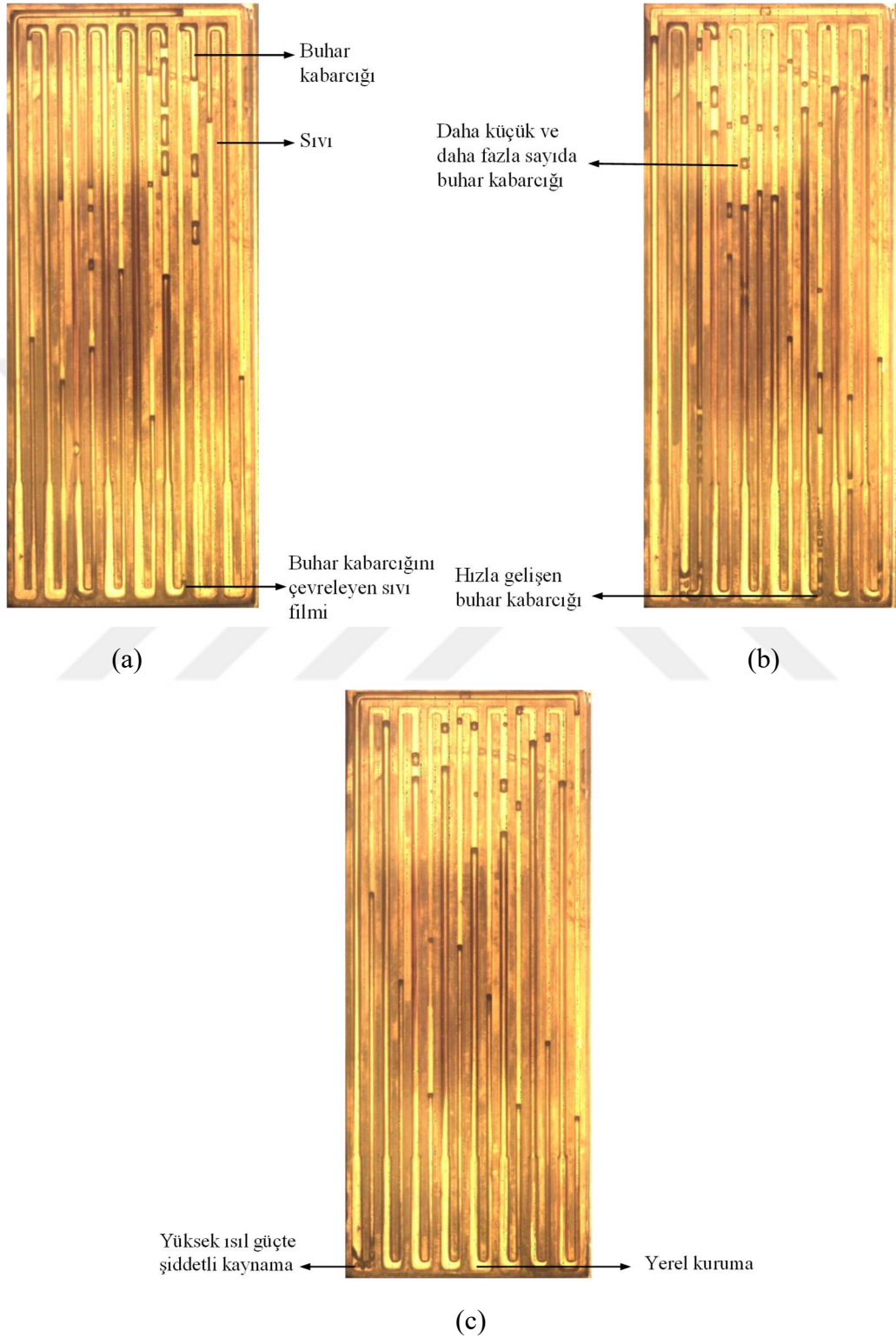
Şekil 44. $IA=90^\circ$, $FR = \%20$ çalışma koşullarında PHP5'in akış görüntüleri: 15 W (a), 45 W (b) ve 75 W, ardışık üç görüntü (c)

PHP4'ün ısıl direnç eğrilerindeki değişim, %50, %60 ve %80 dolum oranında yatay konumlandırmada (Şekil 43e, g ve ı), artan ısıtma gücü ile önemli ölçüde azalmamaktadır. Bu durum, PHP4'ün yatay konumda çalışmadığını göstermektedir. Yatay olarak konumlandırılan PHP4'ün %40 dolum oranındaki ısıl direnç eğrisi ise artan ısıtma gücü ile nispeten azalır. Ancak, PHP5'in yatay konumda başarılı bir şekilde çalıştığı açıkça görülmektedir. PHP5'in %40 dolum oranında hem dikey hem de yatay konumlandırmada ısıl direnç eğilimlerinin neredeyse aynı olması, uygun koşullar altında yönden bağımsız çalışma sağlayabileceğini göstermektedir. Yatay konum ve %40 dolum oranında PHP5'in farklı ısı yükleri altındaki akış görüntüleri Şekil 45'te sunulmuştur. Düşük ısı yükünde (15 W), akışkanın sirkülasyon hızı düşüktür ve belirgin çekirdeklenme olayları gözlenmez. Uzun buhar kabarcıklarının buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya geçişi, düşük bir hızla gerçekleşmektedir.

Isıtma gücü arttıkça, ısıl direnç azalmakta ve 45 W'ta en küçük değerine ulaşmaktadır. Şekil 45b'deki akış görüntüsünden görüldüğü üzere, küçük buhar kabarcıklarının sayısı artar ve akış hızı yüksektir. Buharlaştırıcı bölgesinde bazı U-döngülerinde çekirdekli kaynamanın yoğunluğu artarken, diğer döngülerde ince film buharlaşması etkili bir şekilde gerçekleşir. Bununla birlikte, ısıtma gücünün daha da artmasıyla ısıl direnç artmaya başlar. 55 W'lık ısıtma gücünde (Şekil 45c), buhar kabarcıklarının ve sıvının hızı azalır. Buharlaştırıcı bölümündeki yüksek sıcaklıklar nedeniyle bazı bölgelerde kuruma meydana gelir. Cui vd. (2016) tarafından vurgulandığı gibi, kısmi kuruma, ısıl dirençte gözlemlenen artışın birincil nedenidir.

Akış mekanizmasının karmaşık yapısına rağmen, atımlı ısı borularının çalışma prensibi temelde kararsızlıklarla ilişkilidir. Çeşitli çalışmalar, daha fazla döngü sayısına sahip atımlı ısı borularının artan iç pertürbasyonlarla daha düzgün bir çalışma performansı sergilediğini göstermiştir (Yang vd., 2009; Jun ve Kim, 2016). Sekiz döngüden oluşan PHP4, yerçekimi desteği olmadan yatay konumda verimli bir çalışma performansı sunamamıştır. PHP4'ün yoğunlaştırıcı bölgesindeki U-dönüşlerinde kanal genişliklerinin sabit olması nedeniyle basınç kuvvetleri daha dengelidir. Dikey konumda ise farklı zamanlarda çekirdeklenen kabarcıklar, PHP4'ün çalışmasını desteklerken, yerçekimi de istikrarlı çalışmayı sürdürmeye yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, atımlı ısı borularının verimli ve konumlandırma açısından bağımsız olarak çalıştırılabilmesi için yerçekimi etkisinin eksikliğini telafi eden alternatif mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bir dönüşte ya da

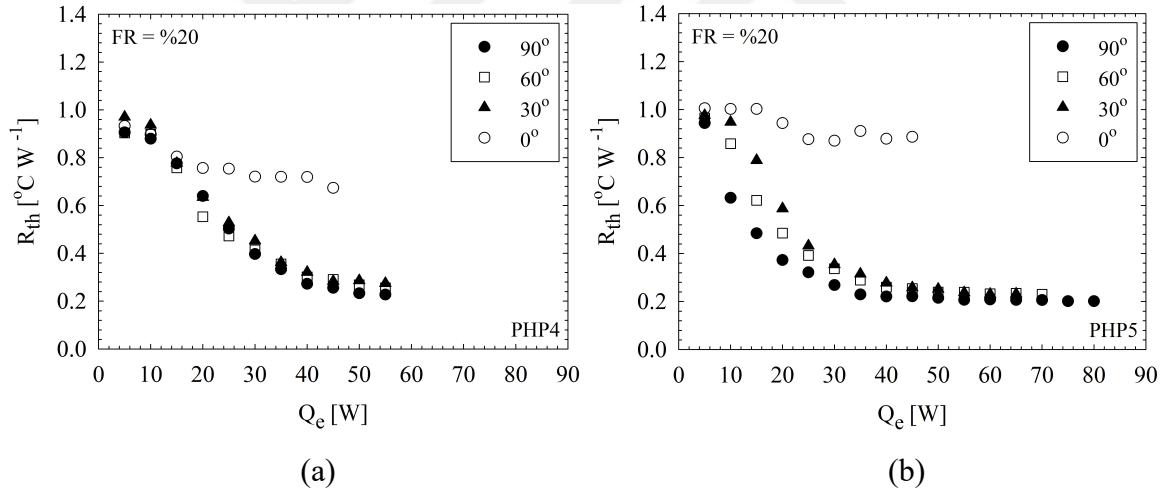
komşu kanallarda iki farklı kesit daralmasını bulunması, PHP5'in başlatılmasını ve sürekli çalışmasını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 45. Farklı ısıtma güçleri için $FR = \%40$ dolum oranına sahip PHP5'in yatay konumda akış görüntüleri: 15 W (a), 45 W (b) ve 55 W (c)

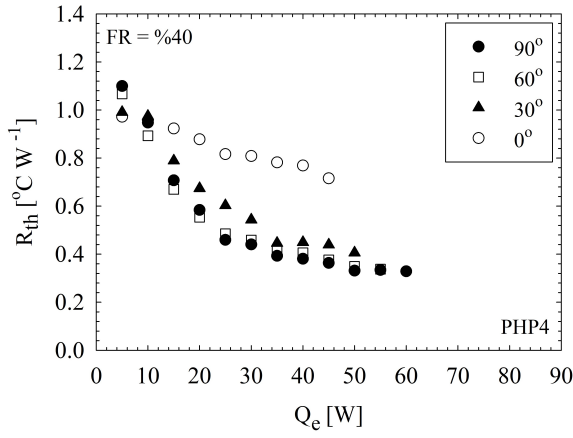
b. Dolum Oranı ve Eğim Açısı Etkisi

Farklı dolum oranlarında eğim açısına bağlı olarak PHP4 ve PHP5'in ısı performansındaki değişimler Şekil 46'da gösterilmektedir. PHP5, yatay konumda %20 dolum oranı haricinde etkin bir şekilde çalışmaktadır. Literatürde, uygun dolum oranı aralığı genellikle %30-60 olarak kabul edilmektedir (Spinato vd., 2016). Ancak, elde edilen bulgular, dolum oranı alt sınırının %20'ye kadar genişletilebileceğini göstermektedir (yatay konumlandırma hariç). Eğim açısının etkisi, genellikle, düşük ısıtma güçlerinde daha belirgindir. Bunun olası nedeni, atımlı ısı borularının ısı olarak tahrik edilen sistemler (*thermally driven systems*) olması ve düşük ısı girdilerinde düşük pompalama eylemi (basınç farkı) ile sonuçlanmasıdır. PHP4'te eğim açısının etkisindeki azalma (yatay konum hariç) %50 dolum oranında gözlenmektedir. PHP5'te ise açının etkisi %40, %50 ve %60 dolum oranlarında önemli ölçüde azalmaktadır. Özellikle, %40 dolum oranında PHP5'in ısı performansı, eğim açısından neredeyse bağımsız hale gelmektedir.

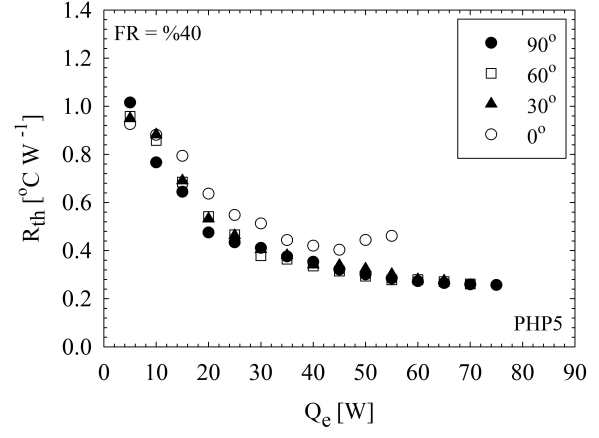


Şekil 46. Farklı dolum oranlarında eğim açısına bağlı olarak PHP4 ve PHP5'in ısı performans değişimleri

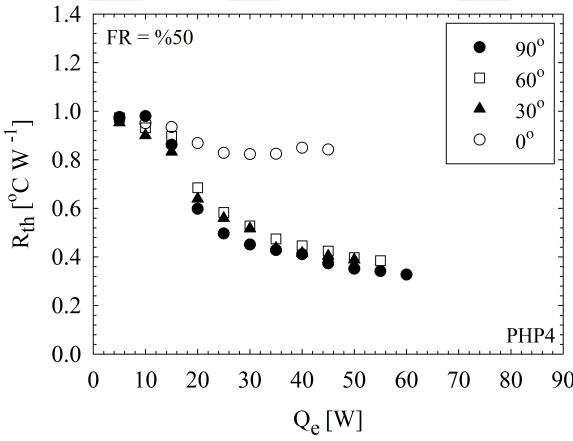
Şekil 46'nın devamı



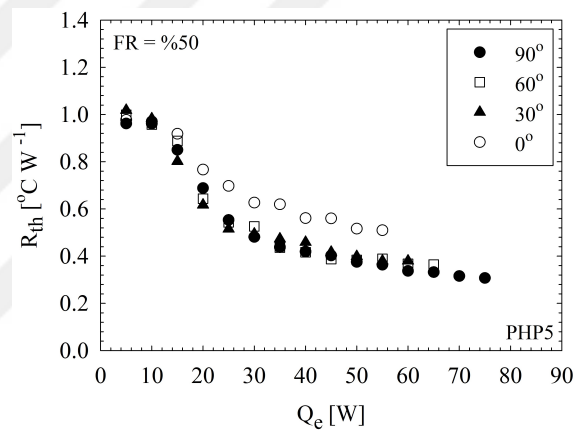
(c)



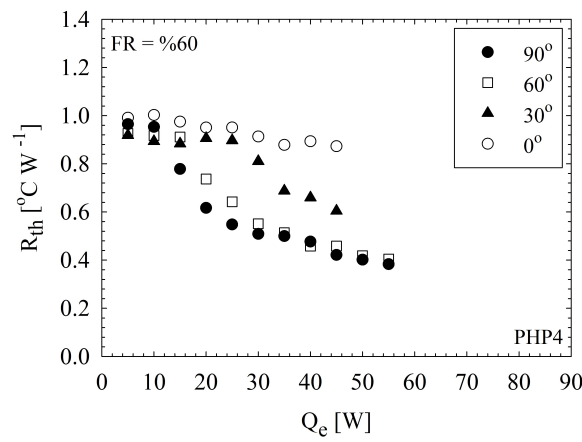
(d)



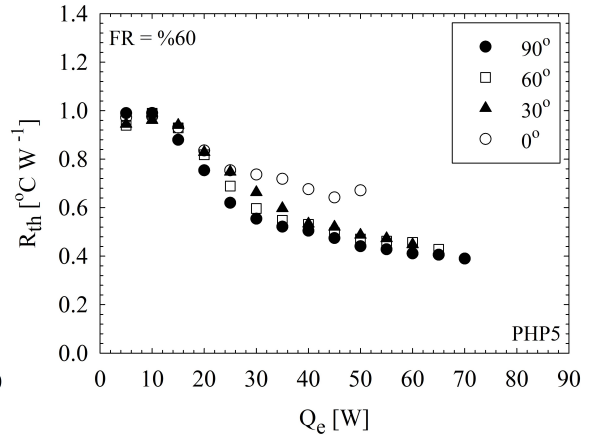
(e)



(f)

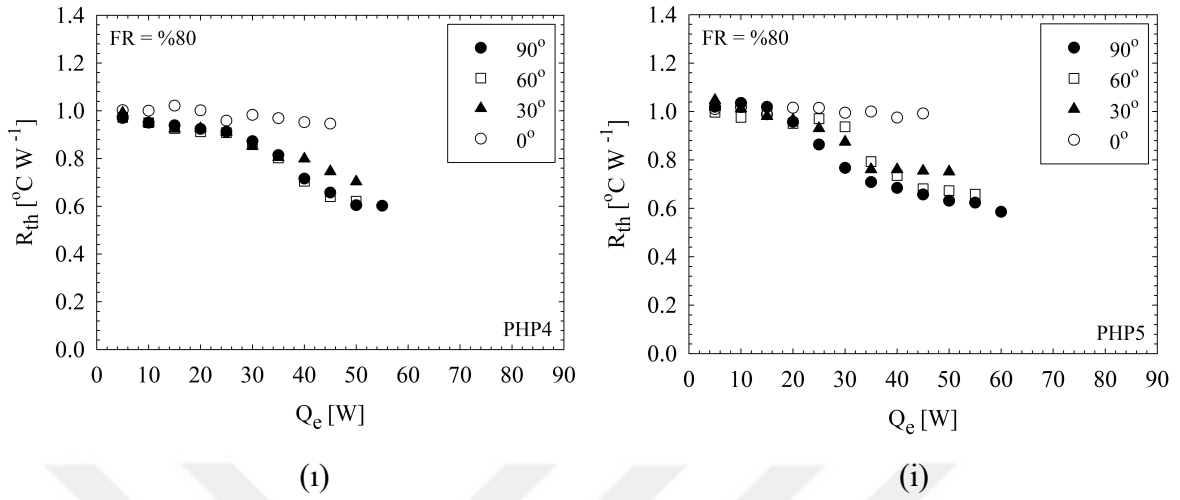


(g)

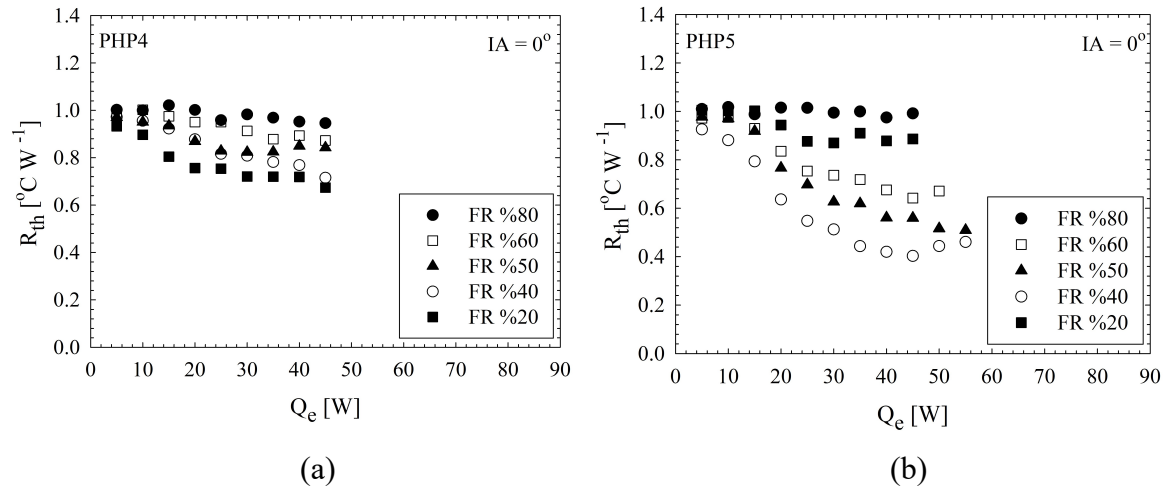


(h)

Şekil 46'nın devamı

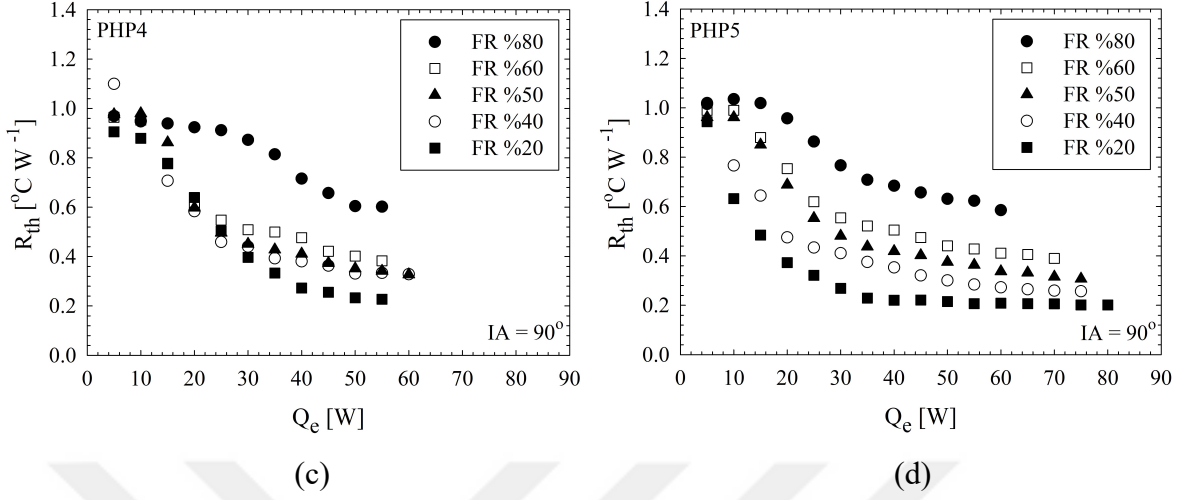


Dolum oranının etkisini analiz etmek amacıyla Şekil 47, yatay ve dikey konumlar için sunulmuştur. Dikey konumlandırma, $FR = \%20$ en iyi performansı sergilemekte, ancak $FR = \%40$ 'ta benzer sonuçlar vermektedir. Buna karşılık, yatay konumda %20 ve %40 dolum oranları arasında önemli bir performans farkı vardır. Dolayısıyla, istikrarlı ve ideal çalışma koşulları için %40 dolum oranı önerilmektedir.

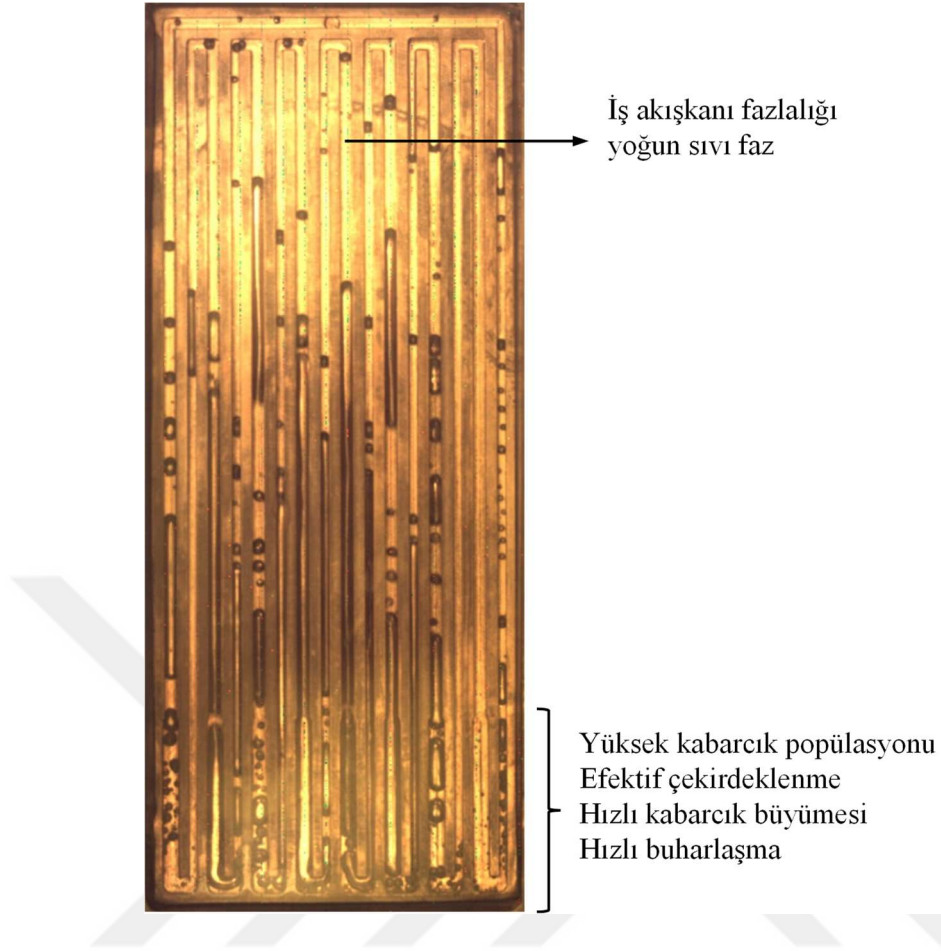


Şekil 47. Dolum oranının PHP4 ve PHP5'in ısı performansları üzerindeki etkisi: Yatay (a) ve dikey (b)

Şekil 47'nin devamı



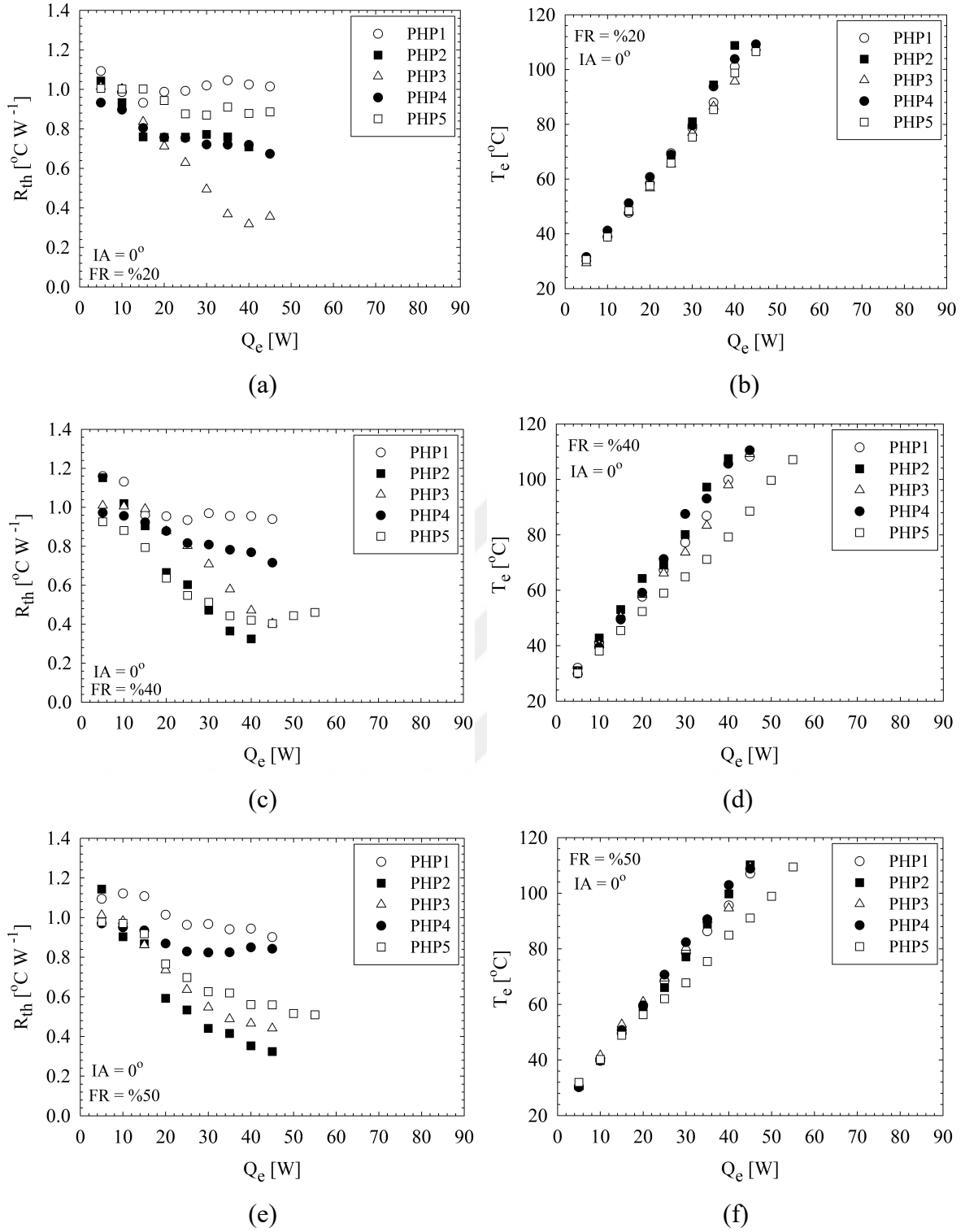
Dolum oranı %40'tan %60'a çıkarıldığında ise ısı performans düşmektedir. Sıvı miktarının fazla olması sistemdeki serbestlik derecesini kısıtlamaktadır. PHP5 için, Şekil 48'de, $FR = \%60$, $IA = 90^{\circ}$ ve 70 W koşulları için bir akış görüntüsü sunulmuştur. Buharlaştırıcı bölgesinde, ısı performansına uygun akış olayları gözlemlenmektedir. Özellikle, yüksek kabarcık popülasyonları, aktif ve etkili çekirdeklenme ve buhar kabarcığının hızlı büyümesi gibi akış olayları görülmektedir. Ancak, yoğuşurucu bölgesinde, iş akışkanının fazlalığı nedeniyle fazla miktarda sıvı bulunmaktadır. Bu sıvı kütlesini dolaştırmak için çok daha fazla pompalama gücü gerekmekte ve ısı, buharlaştırıcı bölgesinde etkin bir şekilde absorbe edilse de yoğuşurucu bölgesinden verimli bir şekilde uzaklaştırılamamaktadır. Dolayısıyla, buharlaştırıcı bölgesinin sıcaklığı artar ve ısı performans düşer. Spinato vd. (2016), yüksek dolum oranının, gizli ısı transferine kıyasla duyulur ısı transferinin katkısını artırdığını belirtmiştir. Dolayısıyla, duyulur ısı transferinin baskın olduğu koşullarda ısı taşıma kapasitesinin daha düşük olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, %60 dolum oranındaki ısı dirençler %40 dolum oranına kıyasla daha yüksektir.



Şekil 48. %60 dolum oranı, 90° eğim açısı ve 70 W ısı yük koşulları için PHP5'in akış görüntüsü

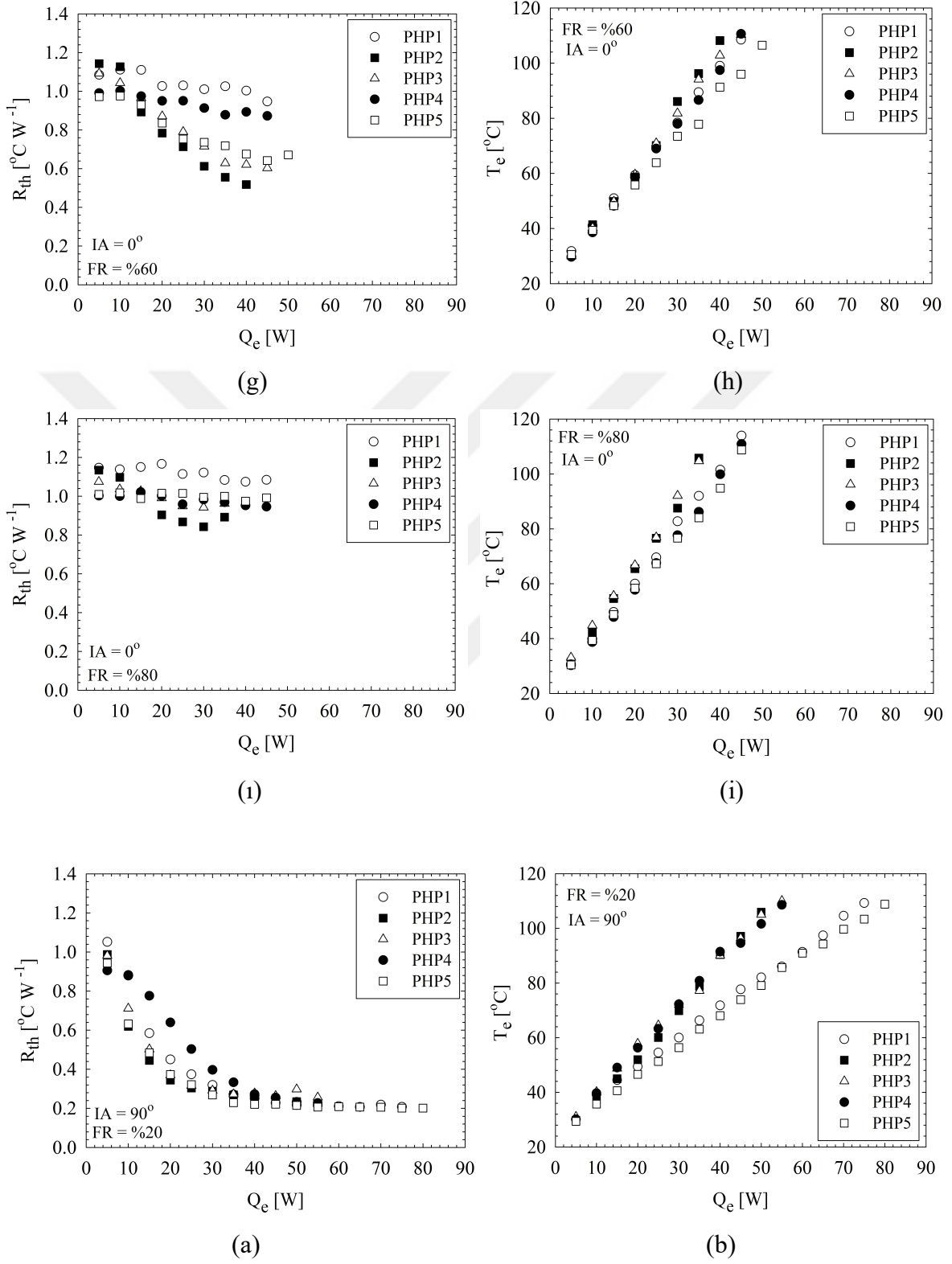
3.1.4. Atımlı Isı Borusunun Performans Analizi

Beş farklı kanal geometrisine sahip atımlı ısı borularının genel performans değerlendirilmesi, yatay ve dikey konumlar için sırasıyla Şekil 49 ve 50'de verilmiştir. PHP5, dikey konumda %20 dolum oranında en iyi performansı sergilerken, yatay konumda %40 dolum oranıyla daha iyi sonuçlar vermektedir. PHP5, optimum dolum oranı (%40) sağlandığında, her açıdan bağımsız ve istikrarlı bir performans sunmaktadır. Özgün tasarımıyla PHP5, çeşitli avantajlar sağlamaktadır: (1) buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri arasındaki basınç farkını artırır. (2) Bir döngü boyunca basınç dengesizliklerini artırır (3) Kademeli olarak daraltılmış yapı, tek yönlü sirkülasyon akışını ve akışkanın buharlaştırıcı bölümüne doğru geri dönüşünü destekleyen iki farklı (kademeli) kapiler etki sağlar. (4) Kademeli olarak daraltılmış yapı aynı zamanda akış direncindeki ani artışı önler ve iş akışkanının sirkülasyon süreci için yumuşak bir geçiş görevi görür.



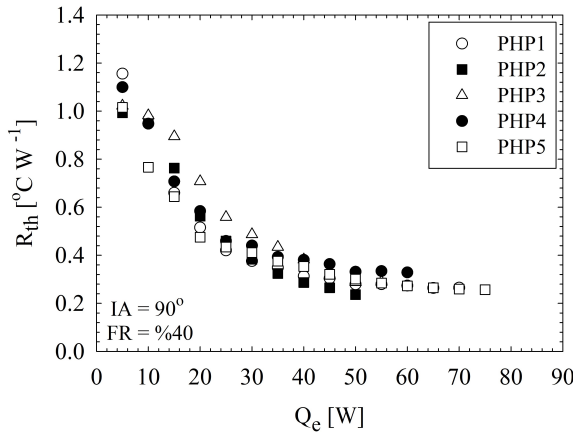
Şekil 49. Yatay konumlandırmada tüm PHP'lerin dolum oranı açısından kıyaslanması

Şekil 49'un devamı

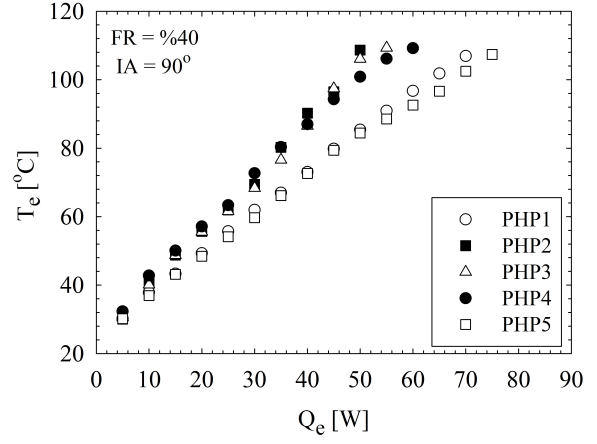


Şekil 50. Dikey konumlandırmada tüm PHP'lerin dolum oranı açısından kıyaslanması

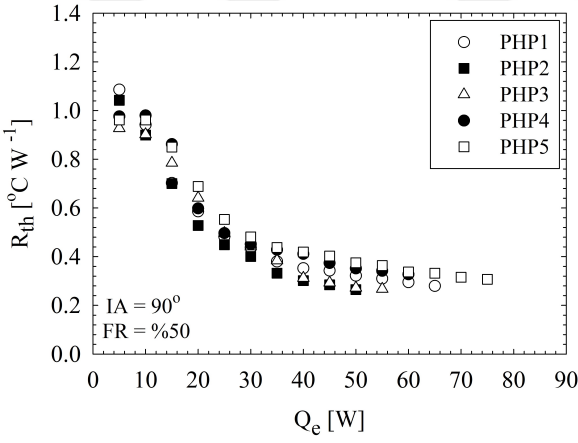
Şekil 50'nin devamı



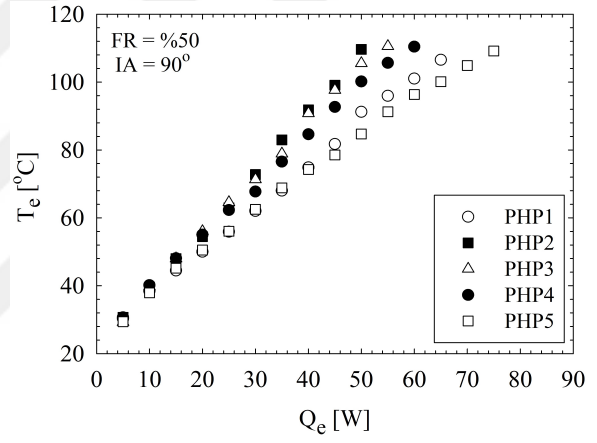
(c)



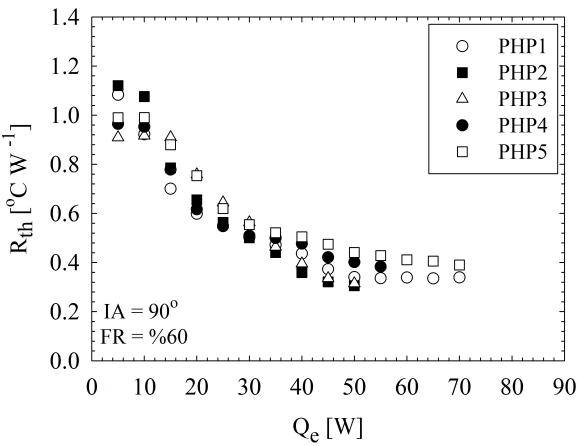
(d)



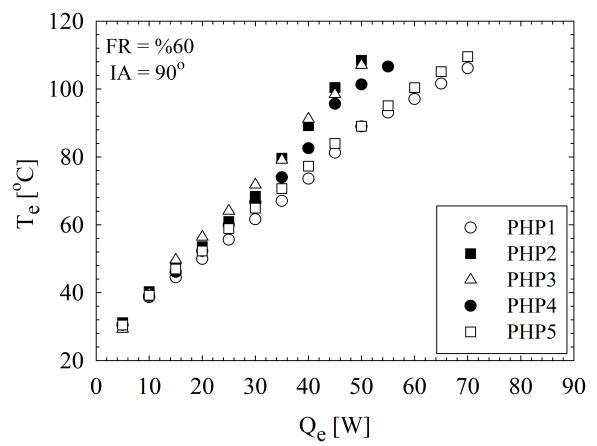
(e)



(f)

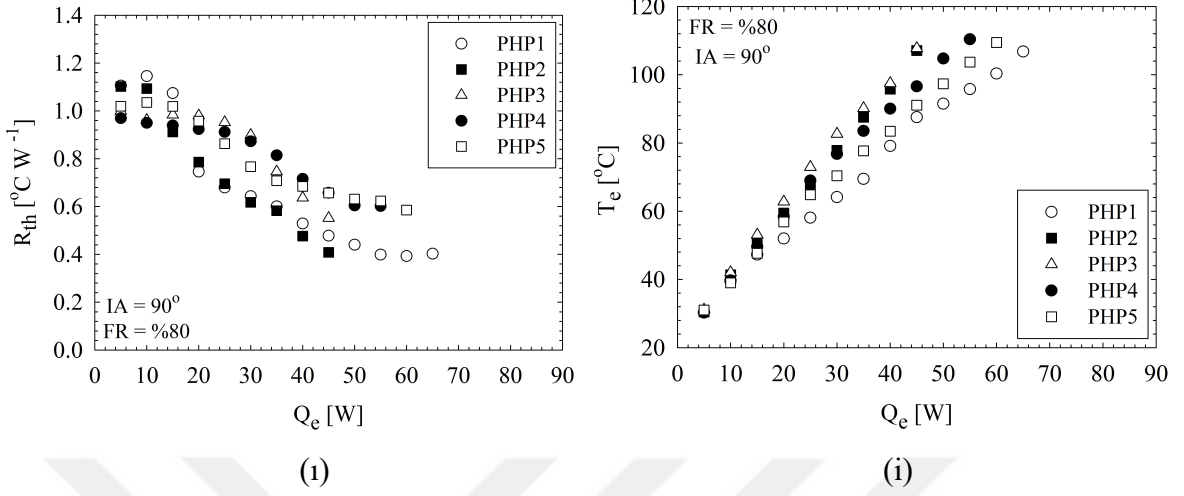


(g)



(h)

Şekil 50'nin devamı



3.2. Polimer Tabanlı Atımlı Isı Borularının Isıl Performans Analizi

Bu bölümde, stereolitografi (SLA) tekniği ile üretilen farklı geometrik modellere sahip düz plakalı polimerik atımlı ısı borularının ısıl performansları incelenmiştir. İş akışkanı olarak, düşük kaynama noktası ve UV reçinesi ile uyumluluğu nedeniyle FC-72 tercih edilmiştir. Deneyler, alttan ısıtma konfigürasyonunda (90°) ve $\%50$ sabit dolum oranında 5W ila 30W aralığındaki ısıtma güçlerinde gerçekleştirilmiştir. Maksimum ısıtma gücü sınırı, polimerik reçineden üretilen atımlı ısı borularının dayanıklılığını korumak amacıyla ortalama buharlaştırıcı sıcaklığı esas alınarak belirlenmiştir. Özellikle, ortalama buharlaştırıcı sıcaklığının 80°C 'yi aşmaması sağlanmıştır.

3.2.1. Sıcaklık ve Basınç Profilleri

Polimerik atımlı ısı borularında (PPHP), çalışma koşullarına ve plastik malzemenin özelliklerine bağlı olarak ortam havasından iş akışkanına gaz geçişi meydana gelebilir. Gaz geçirgenliği, iş akışkanının basınç ve akış dinamiklerini değiştirerek atımlı ısı borularının performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, literatürde, istenen çalışma koşullarını sağlamak için her deneyin ardından polimerik atımlı ısı boruları için iş akışkanını doldurma işlemi tekrarlanmaktadır (Alqahtani vd., 2022). Bu bölümde, üç farklı kanal konfigürasyonuna sahip polimerik atımlı ısı boruları için aynı koşullarda herhangi bir yeniden şarj ve dolum işlemi yapılmaksızın dört ardışık deney gerçekleştirilmiştir.

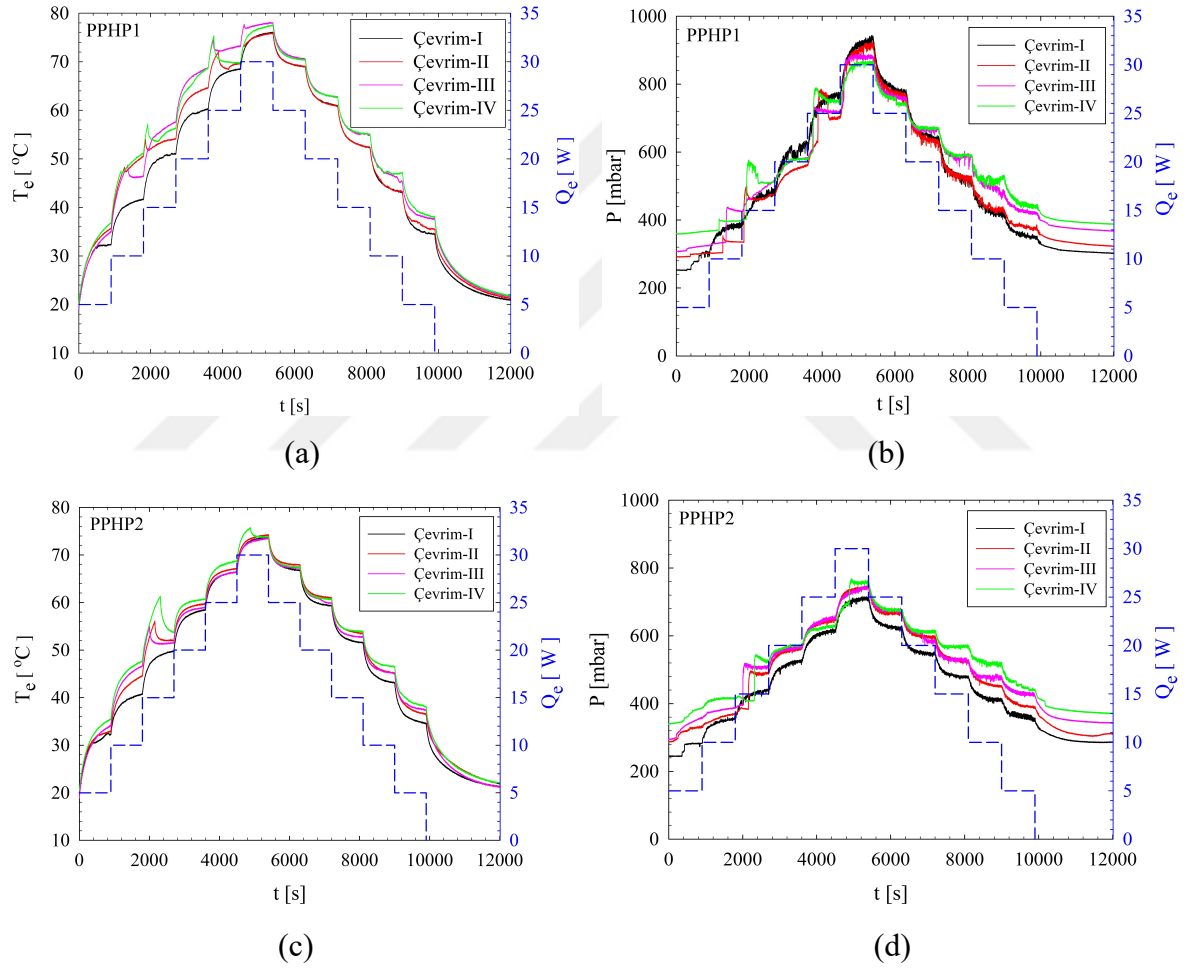
Şekil 51a-f, her bir polimerik atımlı ısı borusunun ısıtma gücü ile buharlaştırıcı sıcaklığı ve basınç arasındaki ilişkiyi incelemek için tekrarlanan dört çevrimi göstermektedir. Basınç ve sıcaklık dağılımları, benzer profiller ve dalgalanmalar sergilemektedir. Tekrarlanabilirlik testlerinde, aynı PPHP kullanılarak iki gün boyunca dört çevrim gerçekleştirilmiştir. Çevrim I-II ve çevrim III-IV'ün deneyleri aynı gün art arda yapılmıştır. Her bir döngü tamamlandıktan sonra, PPHP'ler basıncın dengeye ulaşması için yeterli süre boyunca pasif durumda bırakılmıştır. Sonraki döngünün bütünlüğünü korumak amacıyla buharlaştırıcı bölgesi devre dışı (güç kaynağı kapalı) bırakılarak basıncın dengelenmesine izin verilmiş ve belirli bir bekleme süresi uygulanmıştır. Şekil 51 b, d ve f, bu bekleme süresinin yeterli olduğunu göstermektedir. Özellikle, çevrim II'nin sonunda ölçülen basınç değeri ile çevrim III'ün başlangıcındaki basınç değeri, aralarında yaklaşık 12 saatlik bir bekleme süresine rağmen neredeyse aynı olduğu gözlemlenir.

Çevrim-I'de, tüm PPHP'lerin sıcaklık ve basınç değerleri, ısıtma gücünün artma ve azalma periyotlarında simetrik bir trend göstermektedir. Buharlaştırıcı sıcaklığındaki artış, artan ısıtma güçleri ile tutarlı bir eğilim sergilemektedir. Ayrıca, ısıtma gücündeki artış, akış salınımının iyileşmesine katkı sağlamıştır. Nine vd. (2014)'nin belirttiği gibi, yüksek ısıtma yükleri, akışkan buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya doğru iten daha güçlü salınım kuvvetleri üretmektedir.

Tüm PPHP'ler, çevrimlerin her birinde farklı başlatma modları ve kararlı durum sıcaklıklarına sahiptir. Düşük ısıtma güçlerinde, üniform kanal kesitine sahip olan PPHP1, başlatma ve salınım hareketini sürdürmekte zorlanmaktadır. Buharlaştırıcı sıcaklıklarında, 10 W (çevrim-II) ve 15 W'ta (çevrim-III ve IV) ani değişiklikler gözlenmekte ve bu durum başlatma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olgu, Marengo ve Nikolayev'in (2018) belirttiği gibi, PPHP içerisinde yoğunlaşmayan gazların varlığına bağlı olarak ortaya çıkan bir sıcaklık histerezisinin göstergesi olabilir. Yoğunlaşmayan gazlar, atımlı ısı borusunda bulunduğunda, akışkan salınımlarını ve dolayısıyla ısı transferini olumsuz yönde etkileyerek, histerezise yol açarlar. Bu sebeple, yoğunlaşmayan gazların varlığı ve ısıtma-soğutma döngülerinin PPHP performansı üzerindeki etkilerini dikkate almak önemlidir.

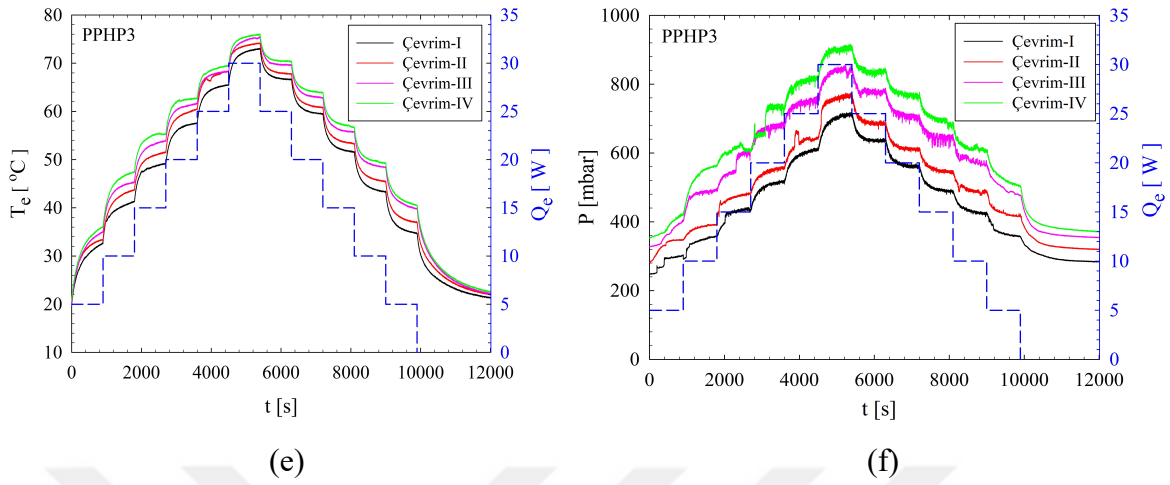
Yerçekimi kuvveti, tüm çevrimler dikey yönde gerçekleştirildiği için akışkanın yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya geri dönüşünü kolaylaştıran önemli bir faktördür. Özellikle, PPHP1'de, ısıtma gücünün artmasıyla birlikte, çevrim II, III ve IV sırasında kanallar içindeki buhar hacimsel oranında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış, yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya sıvı akışını engeller. Kanallar içinde buharın baskın hale gelmesi hızlı bir

sıcaklık artışına neden olur. Bununla birlikte, 25 W'lık ısıtma gücü eşliğinde, sıvı sıcaklığı ve buhar basıncındaki ani artış, yoğunlaştırıcı bölgesinde biriken sıvının yeniden harekete geçmesini sağlar. Böylece, eş zamanlı sıcaklık düşüşü ve basınç artışı ile karakterize edilen salınım hareketi tekrar başlar. Sıcaklık ve basınç arasında benzer bir ilişki PPHP2'de (asimetrik kanallara sahip) gözlenmektedir. Kanalların aktif hale gelmesi ve hızlı salınım hareketleri 15 W'ta ortaya çıkar, ancak PPHP1'de gözlenen kısa süreli durma olayı artan ısıtma güçlerinde PPHP2'de meydana gelmemektedir. PPHP2'de sıvı-buhar akışında süreklilik ve kararlılık korunmuştur.



Şekil 51. Sıcaklık ve basınç profilleri: Paralel (a-b), asimetrik (c-d) ve genişleyen-daralan (e-f)

Şekil 51'in devamı



PPHP3'ün sıcaklık ve basınç grafiklerinde (Şekil 51e ve f), PPHP1 ve PPHP2'ye kıyasla ani bir sıcaklık artışı veya düşüşü gözlenmemektedir. PPHP3, tüm çevrimlerde 10W'da aktif olarak çalışmaya başlar. PPHP3'te basınç değişimleri, her döngüde PPHP1 ve PPHP2'ye kıyasla daha belirgindir. Bunun nedeni, PPHP3'ün ek bir basınç artışına neden olan genişleyen-daralan kanal konfigürasyonudur. PPHP3'te, kanal çiftlerinden biri yoğunlaştırıcı bölümüne doğru genişlerken diğeri buharlaştırıcı bölümüne doğru daralmaktadır. Yoğunlaştırıcıya doğru genişleyen kanal, yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı arasındaki basınç farkını ve akış direncini azaltarak sıvı-buhar kabarcıklarının daha hızlı hareket etmesine olanak tanımaktadır. Buna karşın, buharlaştırıcıya doğru daralan kanal, yoğunlaşan sıvının hızını artırırken buharlaştırıcı bölgesinde ek bir basınç artışına neden olur.

Test süresi boyunca gözlemlenen basınç artışları, Der vd. (2021) tarafından benzer deneysel koşullar altında yürüttükleri çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, polimer malzemenin yapısından kaynaklanan gaz geçirgenliği ve üretim tekniklerine bağlı olası sızıntıların etkisini vurgulamak amacıyla yapılmıştır. Der vd.'nin (2021) çalışmasında sunulan basınç grafiği incelendiğinde, 4,3 saatlik bir deney sonunda 166 mbar'lık bir basınç artışı gözlemlenmiştir. Buna karşın, bu çalışmada test süresinin sonunda yaklaşık 40 mbar'lık bir basınç artışı kaydedilmiştir. Der vd. (2021) çalışmasında, siyah polipropilen levha üzerine kıvrımlı kanallar oluşturmak amacıyla ticari bir lazer kesici kullanılmış ve bu levha, nanosaniye atımlı fiber lazer ile iki şeffaf polipropilen tabaka arasına yerleştirilmiştir. Bu bağlamda, plastik malzemeden kaynaklanan olası gaz geçirgenliğinin yanı sıra montajdan kaynaklanan sızıntılar da atımlı ısı borularının uzun vadeli güvenilirliğini olumsuz

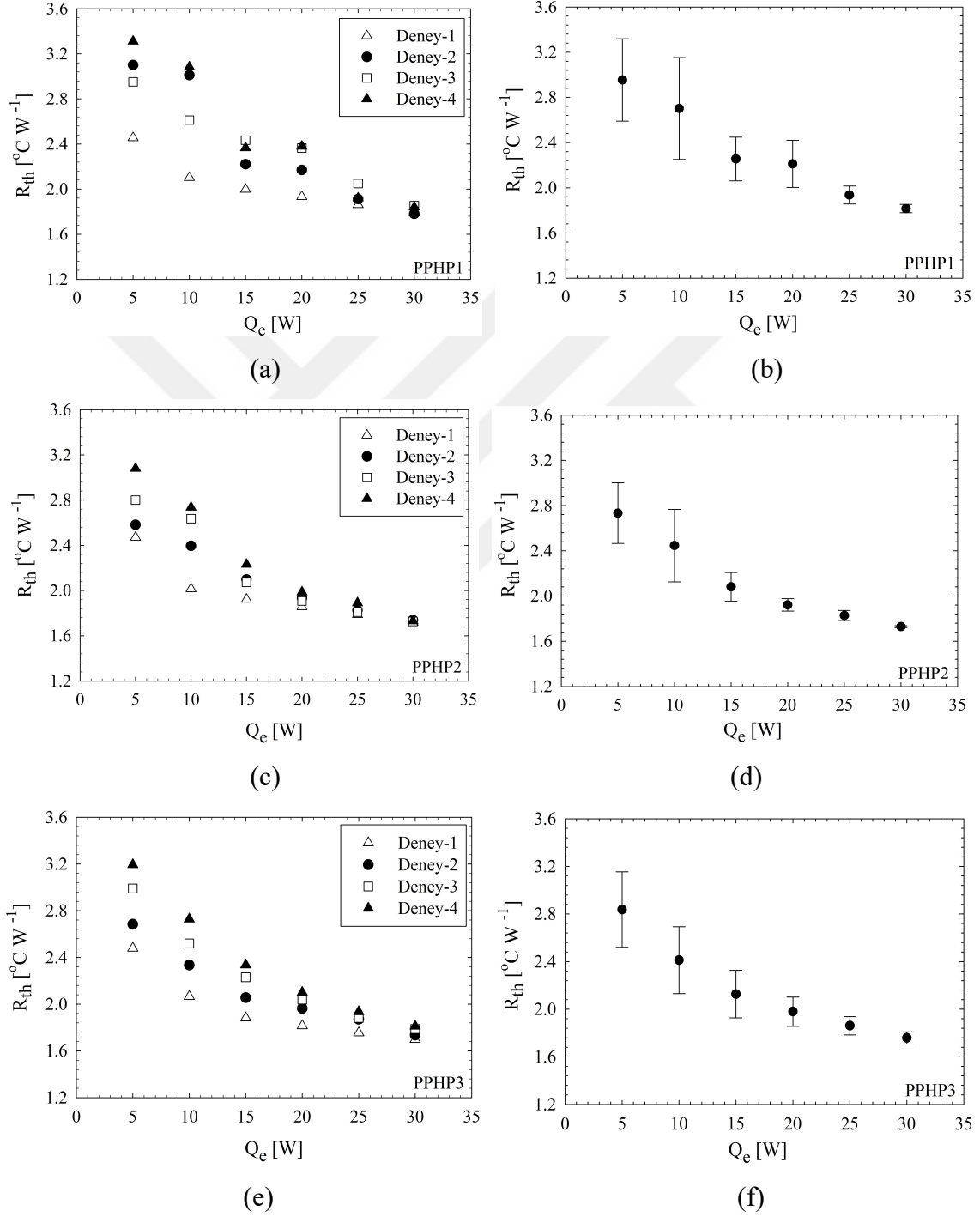
etkileyebilir. Bu çalışmada üretilen atımlı ısı boruları ile farklı bileşenlerin bir araya getirilmesi ve sandviçleme işlemi ortadan kaldırılarak sızıntı riskini en aza indiren tek parçalı bir yapı elde edilmiştir. Yapılan bu karşılaştırma, iki çalışma arasında kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri açısından temel farklılıkları ortaya koymaktadır.

3.2.2. Isıl Direnç

Şekil 52a-f, üç farklı geometrik konfigürasyon için ısıtma gücüne karşı ısı direnç grafiklerini, standart sapma değerleriyle birlikte göstermektedir. Polimerik atımlı ısı boruları, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümleri arasındaki basınç farkına bağlı olarak çalışmaktadır. Yoğuşmayan gazların kanal boyunca yayılması, PPHP'lerin çalışma mekanizmasını etkileyerek basınç farkını azaltmakta ve sıvı akışını engellemektedir. Bu nedenle, PPHP'ler salınım hareketini tetiklemek için daha yüksek ısı girdisine ihtiyaç duymaktadır. Şekil 52a, c ve e'de ısı direnç grafiklerinden de anlaşılabacağı üzere, yoğuşmayan gazların varlığı düşük ısıtma güçlerinde ısı transferini, yani başlangıç çalışma performansını etkilemektedir. Ancak, yüksek ısıtma güçlerinde gaz geçirgenliğinin ısı dirençler üzerindeki etkisi oldukça zayıftır. İzin verilen maksimum sıcaklık değerleri dikkate alındığında, tüm deneyler aynı ısıtma güçlerinde sonlandırılmıştır. Bu durum, polimerik atımlı ısı borusundaki yoğuşmayan gazların ani sıcaklık artışlarına ve deneylerin sonlandırılmasına yol açmadığını göstermektedir. Benzer bir inceleme Hao vd. (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, iş akışkanının ısı performans üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek için teflon malzemeden atımlı bir ısı borusu önermişlerdir. Deneyin ikinci gününde yapılan tekrarlı testlerde, maksimum ısıtma gücü değeri aseton için yaklaşık %40, su ve etanol için %25 azalmıştır.

Standart sapma grafikleri (Şekil 52 b, d ve f), her bir PPHP için gerçekleştirilen dört deneyden elde edilen ısı direnç değerlerinin dağılımını genel olarak sunmaktadır. Bu grafikler, dört deneyin sonuçlarını farklı ısıtma güçlerinde PPHP'lerin ortalama ısı direncini temsil eden tek bir eğride birleştirerek, verilerin daha sade bir şekilde yorumlanmasını sağlamaktadır. Grafiklerdeki hata çubukları, her bir ısıtma gücündeki ısı direncin standart sapmasını göstermekte ve verilerdeki değişkenliğin büyüklüğünü görsel olarak temsil etmektedir. Düşük ısıtma güçlerinde (5-15 W) standart sapma değerlerinin yüksek, yüksek ısıtma güçlerinde (20-30 W) ise düşük olması şu şekilde açıklanabilir: düşük ısıtma güçlerinde PPHP henüz stabilize olmamıştır veya etkili çalışma potansiyeline ulaşmamıştır.

Bu aşamada, gaz geçirgenliğinin ısı performans üzerindeki etkisi daha belirgindir ve ısı direnç değerlerinde farklılıklara yol açar. Yüksek ısıtma güçlerinde ise PPHP, daha kararlı ve verimli çalışmaktadır. Gaz geçirgenliğinin ısı direnç üzerindeki etkisi zayıflamakta ve bu da standart sapma değerlerinin düşmesine neden olmaktadır.

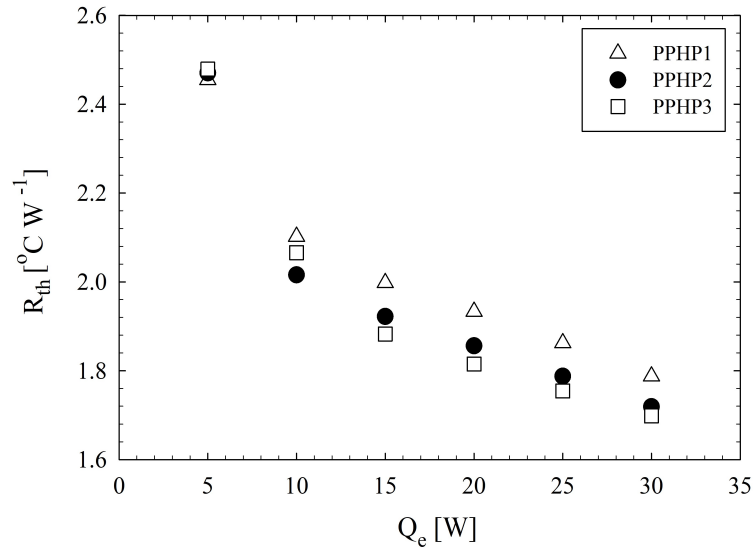


Şekil 52. Üç farklı PPHP konfigürasyonu için standart sapma değerleriyle birlikte ısı direnç-ısıtma gücü grafikleri

3.2.3. Geometri Etkisi

Farklı kanal geometrilerine sahip polimerik atımlı ısı borularının ısı direnç ve ortalama buharlaştırıcı sıcaklığı üzerinde ısıtma gücünün etkisi, sırasıyla Şekil 53a ve b'de sunulmuştur. Grafikler, iş akışkanının dolumunun ardından gerçekleştirilen ilk deneyden (çevrim-I) elde edilen sonuçları yansıtmaktadır. Ardışık deneylerde gözlemlenen hava penetrasyonunun etkilerini ihmal etmek için ilk testten elde edilen veriler kullanılarak ısı direnç hesaplanmıştır. Paralel, asimetrik ve genişleyen-daralan kanal geometrilerine sahip PPHP'ler sırasıyla PPHP1, PPHP2 ve PPHP3 olarak tanımlanmıştır (Şekil 20).

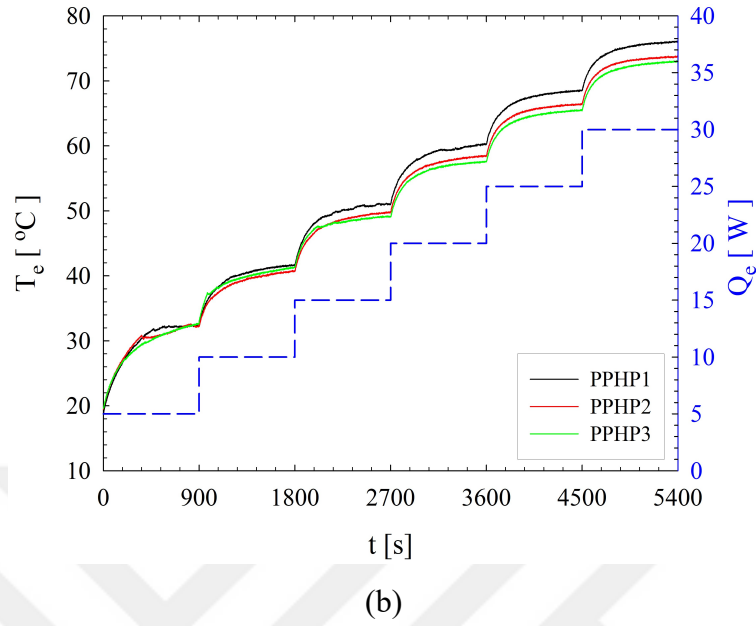
Şekil 53a, her üç kanal geometrisinin de minimum 10 W başlangıç ısıtma gücü gerektirdiğini ve bu noktada ısı direncin hızla azaldığını göstermektedir. Bu durum, PPHP'lerin çalışabilmesi için gerekli itici güce ulaştığını işaret etmektedir. İtici mekanizmanın temel kaynağı, ısı yük arttıkça buharlaştırıcı bölgesinde meydana gelen buhar basıncındaki artıştır. PPHP'lerde kullanılan polimerik malzemenin düşük ısı iletkenliği nedeniyle, düşük ısıtma güçlerindeki çalışma performansları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Tüm PPHP'ler 5 W ve 10 W ısıtma güçlerinde karşılaştırıldığında, ısı direnç veya buharlaştırıcı sıcaklıklarında kayda değer bir fark oluşmamaktadır. Bu nedenle, akış görüntülerini ve ısı performans grafiklerini birlikte analiz edilmesi, PPHP'lerin işleyişini daha iyi anlamak açısından önemlidir.



(a)

Şekil 53. Üç farklı kanal konfigürasyonuna sahip polimer tabanlı atımlı ısı borularının ısı direnç (a) ve ortalama buharlaşma sıcaklığı (b) grafikleri

Şekil 53'ün devamı

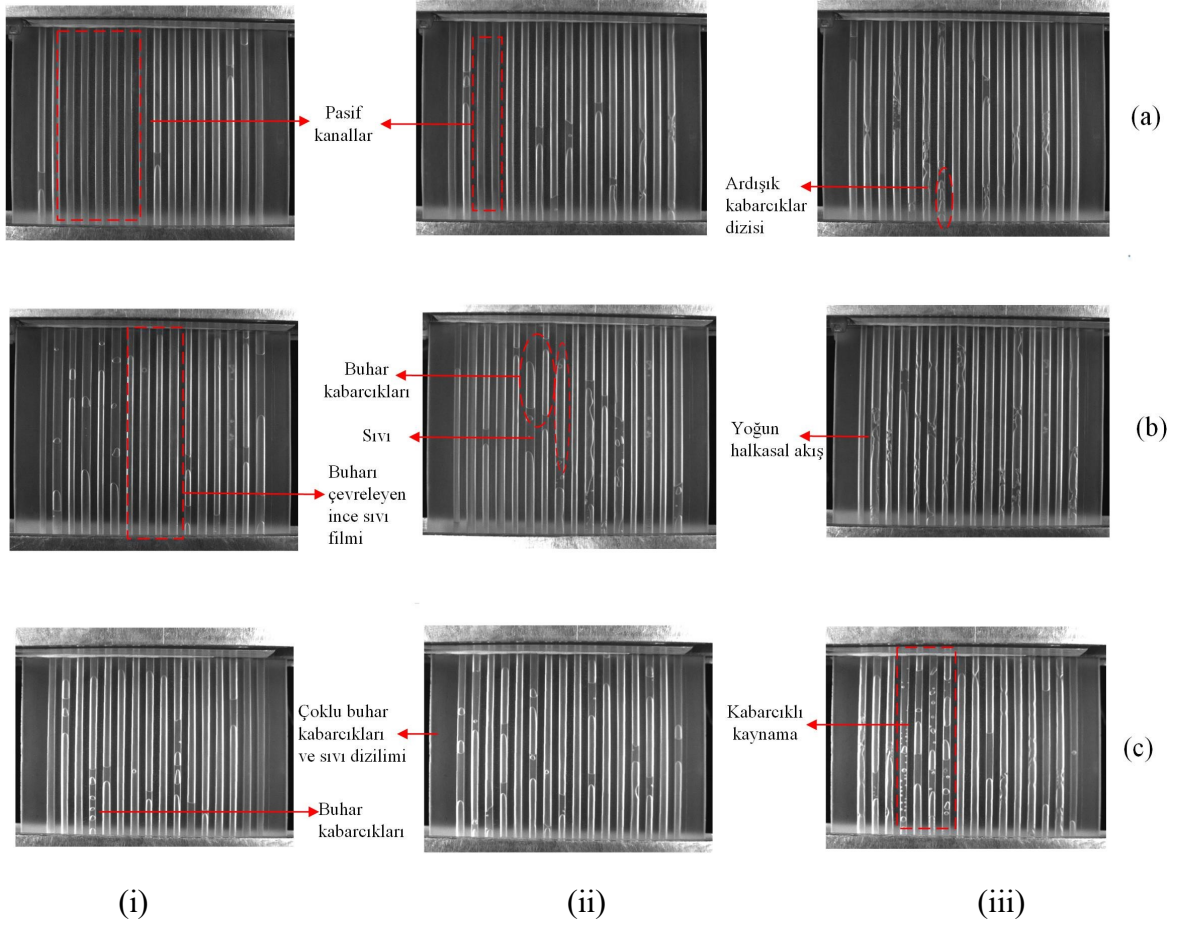


Şekil 54, 5 W, 10 W ve 30 W ısıtma güçlerinde tüm PPHP'ler için akış görüntülerini sunmaktadır. Görselleştirme testi sırasında, PPHP2 ve PPHP3'teki (Şekil 54b ve c) adyabatik bölgenin, PPHP1'e kıyasla daha aktif olduğu görülmektedir. Üniform olmayan kanallara sahip PPHP'lerde kabarcık aktivitesi daha fazladır. PPHP1'de kanalların çoğu pasif davranış sergilemektedir. Şekil 54a'da, 5W ısıtma gücünde, kırmızı kesikli çizgi ile işaretlenen bazı kanallarda sıvı-buhar kabarcıklarının hareketi görülmemektedir. Üniform olmayan PPHP'lerde kabarcık çekirdeklenmesi 5W'da meydana gelmektedir, ancak sıvı-buhar faz değişiminin yavaş gerçekleşmesi nedeniyle bu durum, ısı direnç ve sıcaklık üzerinde uzun süreli bir etki yaratmamaktadır. Isıtma gücünün 10W'a çıkarılması ile sıvı ve buhar kabarcıkları hızla yoğunlaştırıcı bölümüne doğru hareket etmektedir.

Şekil 54c'de görüldüğü üzere, PPHP3'te sıvı ve çoklu buhar kabarcıkları, kanal boyunca dağılmıştır. Bu konfigürasyon, yoğunlaşan iş akışkanın buharlaştırıcı bölümüne geri döndürülmesi için güçlü kılcal hareketi teşvik eder ve atımlı ısı borusu içinde kesintisiz bir döngü sağlar. Ek olarak, buhar kabarcıklarının salınımları, taşınım ısı transferi sürecini güçlendirmektedir (Kwon ve Kim, 2015). Ayrıca, ilgili buharlaştırıcı sıcaklık grafiğinden (Şekil 53b), PPHP1'in buharlaştırıcı sıcaklıklarının diğer PPHP'lerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Polimer tabanlı atımlı ısı borularının ısı performans gelişimini değerlendirmek için katı bakır (398 W/mK) ve kurlenmiş reçinenin (0.327 W/mK) ısı iletkenlikleri

karşılaştırılmıştır. PPHP'nin efektif ısıl iletkenliği hesaplanmıştır ($k_{eff} = \frac{Q_e L_{eff}}{A_c \Delta T}$). Burada, Q_e ısıl yük, L_{eff} buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki orta mesafe (96 mm), A_c ısıl borusunun kesit alanı ($\approx 170 \text{ mm}^2$) ve ΔT buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki sıcaklık farkını temsil etmektedir. 30 W'lık ısıtma gücünde, polimerik atımlı ısı borusunun efektif ısıl iletkenliği 332.2 W/mK olarak hesaplanmıştır. Bu değer, bakırın ısıl iletkenliğinden %16.5 daha düşük ve blok halinde kürlenmiş reçineden 1016 kat daha yüksektir.



Şekil 54. PPHP1 (a), PPHP2 (b) ve PPHP3 (c) için 5 W (i), 10 W (ii) ve 30 W (iii) ısıtma gücündeki akış görüntüleri

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bakır ve polimer tabanlı düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularının ısı performansları deneysel olarak incelenmiştir. Bakır tabanlı atımlı ısı boruları için geniş parametre aralığında farklı geometri, dolum oranı, eğim açısı ve ısıtma gücünün ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kabarcık dinamiği, sıvı faz davranışı ve sıvı-buhar etkileşimlerini içeren akış karakteristikleri akış görüntüleri üzerinden analiz edilmiştir. Polimer tabanlı atımlı ısı boruları ise stereolitografi (SLA) tekniği ile üretilmiştir. Sabit dolum oranında ve dikey konumlandırma koşulları altında, farklı kanal geometrilerine sahip polimerik atımlı ısı borularının ısı performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. Bakır tabanlı atımlı ısı borularında;

- Farklı kanal kesit oranları (asimetri etkisi) kıyaslandığında, yerçekiminin ısı performans üzerindeki etkisi, PHP1 için daha belirgindir. PHP2 ve PHP3'te yerçekiminin etkisi önemli ölçüde azalmaktadır.
- PHP1 yatay konumlandırıldığında, tüm dolum oranlarında ısı direnç eğrisi belirgin bir değişim göstermemektedir, bu da PHP1'in çalışmadığı anlamına gelir.
- PHP2 ve PHP3 yatay yönde çalışmakta ve PHP1'e kıyasla daha iyi ısı performans sergilemektedir.
- Dengelenmemiş kılcallık kuvvetine ek olarak, buharlaşma momentum kuvveti de yerçekimi desteğinin olmadığı koşullarda PHP2 ve PHP3'ün çalışma performansını artıran bir faktördür.
- Üniform olmayan PHP'lerin en önemli avantajı, uygun dolum oranları ile yatay konumda (yerçekimi desteğinin olmadığı durum) düzgün bir şekilde çalışabilmeleridir.
- Genel olarak, PHP2, PHP3'e göre daha iyi ısı performans göstermektedir.
- Atımlı ısı borularının ısı performansı, artan dolum oranıyla birlikte önemli ölçüde azalmaktadır; bunun temel nedeni sıvı içeriğinin fazlalığıdır.
- Tüm atım ısı boruları arasında, PHP5 en iyi geometrik düzenlemeye sahip model olarak öne çıkmaktadır.

- PHP5, optimum dolum oranında (%40) neredeyse yönden bağımsız performans sunabilmektedir.
- PHP5'te akış hızının artması, çekirdeklenme ve taşınımlı kaynamanın güçlenmesi, dengelenmemiş kılcallık kuvvetinin etkisi ve hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı, ısı transferinin artmasına katkıda bulunmaktadır. Bu olayların birleşik etkileri, artan iç pertürbasyonlar ve itici güçle birlikte yüksek performanslı bir atımlı ısı borusu ortaya çıkarmıştır.
- PHP5 için %20 dolum oranı ve düşey konumda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Düşük sıvı içeriği için başarılı sonuçlar elde edilmesi, soğutucuya olan gereksinimin azaltılması açısından önem arz etmektedir.

2. Polimer tabanlı atımlı ısı borularında;

- Polimerik atımlı ısı boruları (PPHP) için yapılan testler, yoğunlaşmayan gazların ısıl histerezise yol açması nedeniyle her çevrim (artan veya azalan ısıtma gücüyle) farklı başlatma modlarına sahiptir.
- Dört deneyden oluşan bir seride, polimerik atımlı ısı borularının yeniden şarj ve dolum yapılmadan test edilmesi yoğunlaşmayan gazların birikimine neden olmaktadır. Bu durum, düşük ısıtma güçlerinde ısıl direncin artmasına, basınç farkının azalmasına ve sıvı akışının engellenmesine neden olmaktadır.
- Ortam havasından iş akışkanına gaz geçişi atımlı ısı borularının başlangıç performansını olumsuz etkilemektedir.
- Yerçekimi, akışkan geri dönüşünü kolaylaştırırken, PHP içindeki düzensiz basınç dağılımı pompalama kuvvetini artırarak akışkan hareketini tetiklemektedir.
- PPHP3'ün genişleyen-daralan kanal konfigürasyonu, ek basınç farklılıklarının oluşmasına neden olmaktadır.
- Üniform olmayan kanallarda, yüksek ısıtma güçlerinde, buhar kabarcıklarının salınımları taşınımlı ısı transferini artırmaktadır.

5. ÖNERİLER

Atımlı ısı borularının verimliliğini artırma açısından gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Farklı geometri, boru/kanal çapı, uzunluk, yüzey pürüzlülüğü ve benzeri özelliklere sahip ısı boruları incelenip, ısı transfer performansını optimize eden koşullar belirlenebilir. Ayrıca, mikro ve nano-ölçekli yapıların etkisi araştırılabilir.
- Yerçekiminin atımlı ısı borularının performansına olan etkisi daha ayrıntılı deneysel ve sayısal çalışmalarla incelenebilir. Özellikle, uzay uygulamaları gibi düşük yerçekimi (mikro gravite) ortamlarında atımlı ısı borularının kullanılabilirliği üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılabilir.
- Farklı geometriler ve çalışma koşulları altında atımlı ısı borularının performansını tahmin etmek için sayısal modeller geliştirilebilir.
- Atımlı ısı borularının dinamik, yani değişken yükler altında nasıl performans gösterdiği incelenebilir. Özellikle çevre koşullarının hızlı değiştiği durumlarda, atımlı ısı boruların verimliliğini koruyup koruyamayacağına dair çalışmalar yapılabilir.
- Polimer malzemelerin düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek ve atımlı ısı borularının ısı transfer performansını artırmak için metalik plazma kaplama veya termal sprey kaplama gibi yöntemler kullanılabilir.
- Polimerik atımlı ısı borularının ısı performansını uygun dolum oranlarında düşük buhar basınçlarına sahip ve reçine ile uyumlu farklı iş akışkanları kullanılarak incelenebilir.
- Termoplastik malzeme üzerinde yüzey modifikasyonları yapılarak temas açısının azaltılması ve malzemenin ıslanabilirliğinin artırılması sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Alam, T., Li, W., Yang, F., Chang, W., Li, J., Wang, Z., Khan, J., & Li, C. (2016). Force analysis and bubble dynamics during flow boiling in silicon nanowire microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 915–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.045>
- Alhuyi Nazari, M., Ahmadi, M. H., Ghasempour, R., & Shafii, M. B. (2018). How to improve the thermal performance of pulsating heat pipes: A review on working fluid. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 630–638. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.042>
- Alqahtani, A. A., Edwardson, S., Marengo, M., & Bertola, V. (2022). Performance of flat-plate, flexible polymeric pulsating heat pipes at different bending angles. *Applied Thermal Engineering*, 216, 118948. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118948>
- Ayel, V., Araneo, L., Scalambra, A., Mameli, M., Romestant, C., Piteau, A., Marengo, M., Filippeschi, S., & Bertin, Y. (2015). Experimental study of a closed loop flat plate pulsating heat pipe under a varying gravity force. *International Journal of Thermal Sciences*, 96, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.010>
- Ayel, V., Slobodeniuk, M., Bertossi, R., Romestant, C., & Bertin, Y. (2021). Flat plate pulsating heat pipes: A review on the thermohydraulic principles, thermal performances and open issues. *Applied Thermal Engineering*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117200>
- Barua, H., Ali, M., Nuruzzaman, M., Quamrul Islam, M., & Feroz, C. M. (2013). Effect of filling ratio on heat transfer characteristics and performance of a closed loop pulsating heat pipe. *Procedia Engineering*, 56, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.093>
- Bastakoti, D., Zhang, H., Li, D., Cai, W., & Li, F. (2018). An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance. *Applied Thermal Engineering*, 141, 305–332. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121>
- Borgmeyer, B., & Ma, H. B. (2007). Experimental investigation of oscillating motions in a flat plate pulsating heat pipe. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 21(2), 405–409. <https://doi.org/10.2514/1.23263>
- Charoensawan, P., & Terdtoon, P. (2008). Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 28(5–6), 460–466. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.05.007>
- Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., & Terdtoon, P. (2003). Closed loop pulsating heat pipes- Part A: Parametric experimental investigations. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2009–2020. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00159-5)

- Chen, H., Ruan, X. hui, Peng, Y. hang, Wang, Y. ling, & Yu, C. kun. (2022). Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102181. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102181>
- Cheng, P., Thompson, S., Boswell, J., & Ma, H. B. (2010). An investigation of flat-plate oscillating heat pipes. *Journal of Electronic Packaging*, 132(4). <https://doi.org/10.1115/1.4002726/455200>
- Chien, K. H., Lin, Y. T., Chen, Y. R., Yang, K. S., & Wang, C. C. (2012). A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), 5722–5728. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.068>
- Cui, X., Zhu, Y., Li, Z., & Shun, S. (2014). Combination study of operation characteristics and heat transfer mechanism for pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 65(1–2), 394–402.
- Cui, X., Qiu, Z., Weng, J., Li, Z. (2016). Heat transfer performance of closed loop pulsating heat pipes with methanol-based binary mixtures. *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 76, 253–263.
- Czajkowski, C., Nowak, A. I., Błasiak, P., Ochman, A., & Pietrowicz, S. (2020). Experimental study on a large scale pulsating heat pipe operating at high heat loads, different adiabatic lengths and various filling ratios of acetone, ethanol, and water. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114534. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114534>
- Der, O., Alqahtani, A. A., Marengo, M., & Bertola, V. (2021). Characterization of polypropylene pulsating heat stripes: Effects of orientation, heat transfer fluid, and loop geometry. *Applied Thermal Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116304>
- Der, O., Marengo, M., & Bertola, V. (2018). A Low Cost, Flexible Pulsating Heat Pipe Technology. *3rd Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC)*, 2018-March, 321–327. <https://doi.org/10.1615/TFEC2018.CES.021455>
- Ebrahimi, M., Shafii, M. B., & Bijarchi, M. A. (2015). Experimental investigation of the thermal management of flat-plate closed-loop pulsating heat pipes with interconnecting channels. *Applied Thermal Engineering*, 90, 838–847. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.040>
- Faghri, A. (2014). Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1). <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
- Gibbons, M. J., Marengo, M., & Persoons, T. (2021). A review of heat pipe technology for foldable electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117087>
- H. Akachi. 1990. Structure of a Heat Pipe, United States Patent, No. 4921041.

- Han, H., Cui, X., Zhu, Y., & Sun, S. (2014). A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP). *International Journal of Thermal Sciences*, 82(1), 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.04.003>
- Han, H., Cui, X., Zhu, Y., Xu, T., Sui, Y., & Sun, S. (2016). Experimental study on a closed-loop pulsating heat pipe (CLPHP) charged with water-based binary zeotropes and the corresponding pure fluids. *Energy*, 109, 724–736. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.061>
- Han, X., Wang, X., Zheng, H., Xu, X., & Chen, G. (2016). Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 692–709). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.350>
- Han, Z., & Chang, C. (2023). Fabrication and Thermal Performance of a Polymer-Based Flexible Oscillating Heat Pipe via 3D Printing Technology. *Polymers*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/polym15020414>
- Hao, T., Ma, H., & Ma, X. (2019). Heat transfer performance of polytetrafluoroethylene oscillating heat pipe with water, ethanol, and acetone as working fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.133>
- He, Z., Yan, Y., & Zhang, Z. (2021). Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review. *Energy*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119223>
- Jo, J., Kim, J., & Kim, S. J. (2019). Experimental investigations of heat transfer mechanisms of a pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 181, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.027>
- Jones-Jackson, S., Rodriguez, R., & Emadi, A. (2021). Jet Impingement Cooling in Power Electronics for Electrified Automotive Transportation: Current Status and Future Trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(9), 10420–10435. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3059558>
- Jouhara, H., Reay, D., McGlen, R., Kew, P., & McDonough, J. (2023). Heat pipes: theory, design and applications. Butterworth-Heinemann.
- Jun, S., & Kim, S. J. (2016). Comparison of the thermal performances and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 890–901. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.064>
- Jun, S., & Kim, S. J. (2019). Experimental investigation on the thermodynamic state of vapor plugs in pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.053>

- Jung, C., Lim, J., & Kim, S. J. (2020). Fabrication and evaluation of a high-performance flexible pulsating heat pipe hermetically sealed with metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119180>
- Karayiannis, T. G., & Mahmoud, M. M. (2017). Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1372–1397. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.08.063>
- Karimi, G., & Culham, J. R. (2004). Review and assessment of pulsating heat pipe mechanism for high heat flux electronic cooling. *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference*, 2, 52–59. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2004.1318252>
- Khandekar, S. (2003). Thermofluid Dynamic Study Of Flat-Plate Closed-Loop Pulsating Heat Pipes. *Microscale Thermophysical Engineering*, 6(4), 303–317. <https://doi.org/10.1080/10893950290098340>
- Khandekar, S. (2010). Pulsating heat pipe based heat exchangers. *In Proceedings of the 21st International Symposium on Transport Phenomena*, Kaohsiung City, Taiwan.
- Khandekar, S., Charoensawan, P., Groll, M., & Terdtoon, P. (2003). Closed loop pulsating heat pipes - Part B: Visualization and semi-empirical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2021–2033. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00168-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00168-6)
- Khandekar, S., Dollinger, N., & Groll, M. (2003). Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 23(6), 707–719. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00237-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00237-5)
- Kim, J.-S., Bui, N. H., Kim, J.-W., Kim, J.-H., & Jung, H.-S. (2003). Flow Visualization of Oscillation Characteristics of Liquid and Vapor Flow in the Oscillating Capillary Tube Heat Pipe. *In KSME International Journal*, 17, 10.
- Kim, J., & Kim, S. J. (2020). Experimental investigation on working fluid selection in a micro pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 205, 112462.
- Kim, W., & Kim, S. J. (2020). Effect of a flow behavior on the thermal performance of closed-loop and closed-end pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119251>
- Kline S.J., & McClintock, F.A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech. Eng*, 75, 3–8.
- Kumar, M. S., & Abraham, S. (2024). Applications of pulsating heat pipe (PHP) as an efficient heat transfer device: a review of recent developments. *Heat and Mass Transfer*, 1-27.
- Kumar, M., Kant, R., Das, A. K., & Das, P. K. (2019). Effect of Surface Tension Variation of the Working Fluid on the Performance of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *Heat Transfer Engineering*, 40(7), 509–523. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1436390>

- Kwon, G. H., & Kim, S. J. (2015). Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 817–828. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.091>
- Lee, J., & Mudawar, I. (2009). Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 32(2), 453–465. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2008.2005783>
- Lim, J., & Kim, S. J. (2018). Fabrication and experimental evaluation of a polymer-based flexible pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 156, 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.022>
- Lin, Y. H., Kang, S. W., & Wu, T. Y. (2009). Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 29(2–3), 573–580. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.028>
- Lips, S., Bensalem, A., Bertin, Y., Ayel, V., Romestant, C., & Bonjour, J. (2010). Experimental evidences of distinct heat transfer regimes in pulsating heat pipes (PHP). *Applied Thermal Engineering*, 30(8–9), 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.12.020>
- Liu, S., Li, J., Dong, X., & Chen, H. (2007). Experimental study of flow patterns and improved configurations for pulsating heat pipes. *Journal of Thermal Science*, 16(1), 56–62. <https://doi.org/10.1007/s11630-007-0056-8>
- Liu, X., Xu, L., Wang, C., & Han, X. (2019). Experimental study on thermo-hydrodynamic characteristics in a micro oscillating heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109871>
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. In *Journal of Energy Storage*, 27. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155>
- Ma, H. (2015). Oscillating heat pipes.
- Maghrabie, H. M., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Wilberforce, T., Elsaid, K., Doranehgard, M. H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Microchannel heat sinks with nanofluids for cooling electronic components: Performance enhancement, challenges, and limitations. In *Thermal Science and Engineering Progress*, 37. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101608>
- Mameli, M. (2012). Pulsating heat pipes: Numerical modeling and experimental assessment (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Bergamo).
- Mameli, M., Araneo, L., Filippeschi, S., Marelli, L., Testa, R., & Marengo, M. (2014). Thermal response of a closed loop pulsating heat pipe under a varying gravity force. *International Journal of Thermal Sciences*, 80(1), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.023>

- Mameli, M., Manno, V., Filippeschi, S., & Marengo, M. (2014). Thermal instability of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe: Combined effect of orientation and filling ratio. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.04.009>
- Mameli, M., Marengo, M., & Khandekar, S. (2014). Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 75, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.025>
- Marengo, M., & Nikolayev, V. S. (2018). Pulsating Heat Pipes: Experimental Analysis, Design and Applications. 1–62. https://doi.org/10.1142/9789813234406_0001
- Mueller, C., & Tsvetkov, P. (2021). A review of heat-pipe modeling and simulation approaches in nuclear systems design and analysis. In *Annals of Nuclear Energy*, 160. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108393>
- Nine, M. J., Tanshen, M. R., Munkhbayar, B., Chung, H., & Jeong, H. (2014). Analysis of pressure fluctuations to evaluate thermal performance of oscillating heat pipe. *Energy*, 70, 135–142. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.03.098>
- Pastukhov, V. G., & Maydanik, Y. F. (2016). Development of a pulsating heat pipe with a directional circulation of a working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 109, 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.076>
- Patel, V. M., Gaurav, & Mehta, H. B. (2017). Influence of working fluids on startup mechanism and thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1568–1577. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.017>
- Qu, J., & Wang, Q. (2013). Experimental study on the thermal performance of vertical closed-loop oscillating heat pipes and correlation modeling. *Applied Energy*, 112, 1154–1160. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.030>
- Qu, J., Li, X., Cui, Y., & Wang, Q. (2017). Design and experimental study on a hybrid flexible oscillating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 640–645. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.076>
- Qu, W., & Mudawar, I. (2003). Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-I. Experimental investigation and assessment of correlation methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(15), 2755–2771. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00041-3)
- Sarangi, R. K., & Rane, M. V. (2013). Experimental investigations for start up and maximum heat load of closed loop pulsating heat pipe. *Procedia Engineering*, 51, 683–687. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.097>
- Shi, S., Cui, X., Han, H., Weng, J., & Li, Z. (2016). A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.014>

- Solanki, A., & Kapadia, R. G. (2023). Effect of foldability on the start-up behavior and thermal performance of flexible pulsating heat pipe. *Heat and Mass Transfer*, 59(3), 439–447. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03273-4>
- Spinato, G., Borhani, N., & Thome, J. R. (2016). Operational regimes in a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 102, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.11.006>
- Su, Q., Chang, S., Zhao, Y., Zheng, H., & Dang, C. (2018). A review of loop heat pipes for aircraft anti-icing applications. *Applied Thermal Engineering*, 130, 528–540. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.030>
- Sun, Q., Qu, J., Yuan, J., Wang, H., & Thompson, S. M. (2019). Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Micro Oscillating Heat Pipes With and Without Expanding Channels. *ASME 2019 6th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, MNHMT 2019. <https://doi.org/10.1115/MNHMT2019-3976>
- Supowit, J.A. (2016). Advanced Working Fluids for Flat Heat Pipes (Doctoral dissertation, University of California).
- Takawale, A., Abraham, S., Sielaff, A., Mahapatra, P. S., Pattamatta, A., & Stephan, P. (2019). A comparative study of flow regimes and thermal performance between flat plate pulsating heat pipe and capillary tube pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 149, 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.119>
- Thompson, S. M., Cheng, P., & Ma, H. B. (2011). An experimental investigation of a three-dimensional flat-plate oscillating heat pipe with staggered microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17–18), 3951–3959. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.030>
- Thompson, S. M., Ma, H. B., & Wilson, C. (2011). Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(7), 1265–1273. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.04.014>
- Thompson, S. M., Ma, H. B., Winholtz, R. A., & Wilson, C. (2009). Experimental investigation of miniature three-dimensional flat-plate oscillating heat pip. *Journal of Heat Transfer*, 131(4), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.3072953>
- Tseng, C. Y., Yang, K. S., Chien, K. H., Jeng, M. S., & Wang, C. C. (2014). Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.01.019>
- URL-1. (2024, Eylül 16). https://www.global.dnp.biz/column/detail/10162360_4117.html adresinden alındı.
- URL-2. (2024, Eylül 16). <https://cordis.europa.eu/article/id/443199-pulsating-heat-pipes-are-no-longer-a-black-box> adresinden alındı.

- Wan, Z., Wang, X., & Feng, C. (2020). Heat transfer performances of the capillary loop pulsating heat pipes with spring-loaded check valve. *Applied Thermal Engineering*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114803>
- Wang, W. W., Yang, H. F., Zhang, H. L., Xu, T. Y., Zhao, F. Y., & Wu, S. J. (2023). Pulsating heat pipe and thermo-electric generator jointly applied in renewable energy exploitation: Analytical and experimental investigations. *Energy*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125573>
- Wang, W., Cui, X., & Zhu, Y. (2017). Heat transfer performance of a pulsating heat pipe charged with acetone-based mixtures. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 1983–1994. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1958-3>
- Xiao, L., & Cao, Y. (2012). Recent Advances in Pulsating Heat Pipes And its Derivatives. *In Journal of Enhanced Heat Transfer*, 19, 3.
- Xu, J. L., Li, Y. X., & Wong, T. N. (2005). High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(16), 3338–3351. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.034>
- Xu, R., Zhang, C., Chen, H., Wu, Q., & Wang, R. (2019). Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.070>
- Xu, Y., Xue, Y., Qi, H., & Cai, W. (2020). Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119727>
- Xue, Z. H., & Qu, W. (2017). Experimental and theoretical research on a ammonia pulsating heat pipe: New full visualization of flow pattern and operating mechanism study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.042>
- Yang, H., Khandekar, S., & Groll, M. (2008). Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 28(1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.033>
- Yang, H., Khandekar, S., & Groll, M. (2009). Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(4), 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.017>
- Yang, K. S., Cheng, Y. C., Liu, M. C., & Shyu, J. C. (2015). Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths. *Applied Thermal Engineering*, 83, 131–138.
- Yoon, A., & Kim, S. J. (2018). Understanding of the thermo-hydrodynamic coupling in a micro pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1004–1013.
- Zhang, Y., & Faghri, A. (2008). Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Heat Transfer Engineering*, 29(1), 20–44.

Zhu, Y., Cui, X., Han, H., & Sun, S. (2014). The study on the difference of the start-up and heat-transfer performance of the pulsating heat pipe with water-acetone mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 834–842.

Zohuri, B. (2011). Heat pipe design and technology: A practical approach. CRC Press.



ÖZGEÇMİŞ

Ayşe CANDAN CANDERE, 2014 yılında KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisans derecesini aldı. 2017 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2015 yılından itibaren KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Ayşe CANDAN CANDERE, 2021/1'de TÜBİTAK'ın 2214-A Yurtdışı Araştırma Burs Programı kapsamında (University of Brighton / İngiltere) burs almaya hak kazanmıştır. CANDAN CANDERE'nin doktora tezi kapsamında yayınlanan makale ve bildiri çalışmaları aşağıda sunulmaktadır.

1. Candere, A. C., Miché, N., Bernagozzi, M., Sağlam, M., Georgoulas, A., Aydın, O., & Marengo, M. (2024). A novel fabrication method for polymeric flat plate pulsating heat pipe via additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*, 241, 122398.
2. Markal, B., Candere, A. C., Avcı, M., & Aydın, O. (2021). Effect of double cross sectional ratio on performance characteristics of pulsating heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 105583.
3. Markal, B., Candere, A., Avcı, M., & Aydın, O. (2021). Investigation of flat plate type pulsating heat pipes via flow visualization-assisted experiments: Effect of cross sectional ratio. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 125, 105289.
4. Candere, A. C., Markal, B., Avcı, M., & Aydın, O. (2021). Effect of filling ratio on the working performance of pulsating heat pipe with non-uniform section. *Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Gaziantep, Türkiye, vol.2*, pp. 1797-1805.
5. Candere, A. C., Markal, B., Aydın, O. Avcı, M. (2021). Experimental investigation of the pulsating heat pipes having larger flow sections in the evaporator region. *5th International Anatolian Energy Symposium, Trabzon, Turkey*, pp.630-636.