



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARIŞIMLARLA YÜKLÜ ÜNİFORM OLMAYAN YAPIYA SAHİP
ATIMLI ISI BORULARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ramazan VAROL

**Danışman
Doç. Dr. Burak MARKAL**

**RİZE
2022**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Burak MARKAL danışmanlığında, Ramazan VAROL tarafından hazırlanan *Karışımlarla Yüklü Üniform Olmayan Yapıya Sahip Atımlı Isı Borularının Deneysel İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 26/09/2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı SOYADI

İmza

Başkan	:	Doç. Dr. Burak MARKAL
Üye	:	Prof. Dr. Mete AVCI
Üye	:	Prof. Dr. Tülin BALI

ETİK BEYAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Karışımlarla Yüklü Üniform Olmayan Yapıya Sahip Atımlı Isı Borularının Deneysel İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

26/09/2022

Ramazan VAROL

ÖN SÖZ

Elektronik sistemlerin gelişmesi ve küçülen boyutlar ile birlikte işlem kapasitesi eş zamanlı artmaktadır. Bu artış sonrası sistemlerde, ısı kaynaklı deformasyonlar ve performansta düşüş meydana gelmektedir. İlgili deformasyonları önlemek ve/veya en aza indirmek için yenilikçi ısı kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Harici herhangi bir mekanik enerji harcanmadan veya çalışma sürecinde hiçbir mekanik cihaza ihtiyaç duymayan çalışan (pasif yapıdaki) ve ısı aktarım prosesi esnasında faz değişim sürecinden yararlanan atımlı ısı boruları, uygulamadaki mevcut sorunları ve geleceğe yönelik beklentileri en iyi şekilde karşılayabilecek ısı kontrol cihazları arasında yer almaktadır.

Bu tez kapsamında, farklı saf akışkanlar ve akışkanların ikili ve üçlü karışımlarıyla (ve/veya akışkan çiftleriyle) yüklenen, üniform olmayan kanal kesitine sahip iki farklı düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusunun (FP-CLPHP) ısı performansı ve akış karakteristikleri farklı çalışma koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir.

Bu yüksek lisans tezinde, araştırma konusu belirleme, deney süreci ve tez yazımı olmak üzere, çalışmamın tüm sürecinde bilgi birikimi ve tecrübesi ile destek olan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Burak MARKAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bana olan güvenlerini yitirmeden, maddi ve manevi destekleri ile hep yanımda olan sevgili aileme de çok teşekkür ediyorum.

Bu Yüksek Lisans Tezi, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 217M341 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ramazan VAROL
2022/RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
KISALTMALAR.....	IX
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XI
GİRİŞ.....	1
1.GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Geleneksel Isı Borusu ve Çalışma Mekanizması.....	4
1.1.1 Isı Borusu Bileşenleri ve Sahip Olması Gereken Özellikler	6
1.2. Isı Borusu Çalışma Limitleri.....	9
1.3. Atımlı Isı Boruları.....	10
1.3.1 Atımlı Isı Borusunun Çalışma Mekanizması	12
1.4 Atımlı Isı Borusunun Çalışma Prensibi ve Tasarımını Etkileyen Fiziksel Parametreler	13
1.4.1 İş Akışkanı.....	14
1.4.2 Çalışma Koşulları.....	15
1.4.3 Ön Tasarım Sürecine Ait Bağıntılar	16
1.5. Literatür Özeti.....	19
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	31
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Deney Düzeneği.....	34
2.1.1 Test Bölgesi.....	35
2.1.2 Soğutucu ve Isıtıcı Bölüm	42
2.1.3 Veri Toplama ve Akış Görüntüleme Sistemi	43
2.2. Deneylerin Yapılışı	45

2.3. Deneysel Hesaplama Yöntemi.....	47
2.4. Bulgular.....	48
2.4.1. Tekrarlanabilirlik Testler.....	48
2.4.2. İkili Karışıma Sahip Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun Isıl İncelenmesi ve Akış Model Analizi.....	49
2.4.2.1. Isıl Yük ve Karışım Oranının Etkisi	50
2.4.2.2. Eğim Açısı ve Dolum Oranının Etkisinin Detaylı Analizi	54
2.4.3. Birbiriyle Karışan ve Karışmayan Akışkan Çiftlerinin Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP) Isıl Performansı Üzerindeki Rolü.....	57
2.4.3.1. Farklı Akışkan Türleriyle Yüklü FP-CLPHP'nin Isıl Performansı.....	57
2.4.3.2. Karışımların Karakteristik Davranışları.....	60
2.4.3.3. Karışım Oranı Etkisi	61
2.4.3.4. Eğim Açısının Etkisi.....	63
2.4.4. Üçlü Karışımlarla Yüklenen Düz Plakalı Atımlı Isı Borusunun (FP- CLPHP-2) Deneysel Analizi.....	66
2.4.4.1. Isıl Yük ve Dolum Oranı Etkisi	66
2.4.4.1.1. Isıl Yük Etkisi.....	66
2.4.4.1.2. Optimum Dolum Oranı ve Dolum Oranı Etkisi	67
2.4.4.2. Karışım Oranı Etkisi	70
2.4.4.3. Eğim Açısının Etkisi.....	72
3. TARTIŞMA VE SONUÇ	73
3.1. Tartışma.....	73
3.1.1. Tekrarlanabilirlik Testler.....	73
3.1.2. İkili Karışıma Sahip Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun Isıl İncelenmesi ve Akış Model Analizi.....	73
3.1.2.1. Isıl Yük ve Karışım Oranının Etkisi	73
3.1.2.2. Eğim Açısı ve Dolum Oranının Etkisinin Detaylı Analizi	77
3.1.3. Birbiriyle Karışan ve Karışmayan Akışkan Çiftlerinin Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP) Isıl Performansı Üzerindeki Rolü.....	80

3.1.3.1. Farklı Akışkan Türleriyle Yüklü FP-CLPHP'nin Isıl Performansı	80
3.1.3.2. Karışımların Karakteristik Davranışları.....	81
3.1.3.3. Karışım Oranının Etkisi	84
3.1.3.4. Eğim Açısının Etkisi	85
3.1.4. Üçlü Karışımlarla Yüklenen Düz Plakalı Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP-2) Deneysel Analizi.....	86
3.1.4.1. Isıl Yük ve Dolum Oranı Etkisi	86
3.1.4.1.1. Isıl Yük Etkisi.....	86
3.1.4.1.2. Optimum Dolum Oranı ve Dolum Oranı Etkisi	88
3.1.4.2. Karışım Oranı Etkisi	90
3.1.4.3. Eğim Açısının Etkisi.....	93
3.2. Sonuç.....	94
3.2.1. Bölüm 3.1.2 Kapsamındaki Sonuçlar.....	94
3.2.2. Bölüm 3.1.3 Kapsamındaki Sonuçlar.....	97
3.2.3. Bölüm 3.1.4 Kapsamındaki Sonuçlar.....	98
3.3. Öneriler.....	99
KAYNAKÇA	100

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Doç. Dr. Burak MARKAL
Hazırlayan : Ramazan VAROL
Yıl : 2022
Sayfa Sayısı : 106

ÖZET

KARIŞIMLARLA YÜKLÜ ÜNİFORM OLMAYAN YAPIYA SAHİP ATIMLI ISI BORULARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Bu tez kapsamında, saf akışkanlar ve farklı hacimsel karışım oranlarında akışkanların ikili ve üçlü karışımlarıyla (ve/veya akışkan çiftleriyle) yüklenen üniform olmayan (tek bir döngüde değişken kesit alanına sahip) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularında (FP-CLPHP) ısı transfer karakteristikleri ve akış olayları deneysel olarak incelenmiştir. Farklı hacimsel karışım oranları (MR), dolum oranları (FR), eğim açıları (IA), ısı yük değerleri ve akışkan türleri için kapsamlı deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneyler esnasında, ölçümlerle eş zamanlı olarak, yüksek hızlı kamera ile görüntü alınarak akış desenleri incelenmiş ve ilgili görüntüler fiziksel mekanizmanın irdelenmesinde kullanılmıştır. Deneyler kapsamında iki adet FP-CLPHP kullanılmıştır. Her bir ısı borusunda, bir döngüdeki paralel kanalların kesit değerleri birbirinden farklıdır. Bu tez, üç temel kısım olarak ele alınmıştır. Birinci kısımda, değişken paralel kanallara sahip (2mm x 2 mm ve 1 mm x 2 mm) atımlı ısı borusunun, farklı dolum oranı, karışım oranı ve eğim açısı koşulları altında deneysel incelenmesi yapılmıştır. İş akışkanı olarak etanol ve pentan ikili karışımları kullanılmıştır. Karışım oranındaki değişimin sonuçlar üzerinde önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. E:P=1:3 formundaki iş akışkanı ile yüklü ısı borusu, hem düşük (FR=%30) hem de yüksek (FR=%60) dolum oranları için en iyi ısı karakteristikleri sunmuştur. İkinci kısımda, birbirleri ile karışabilen ve karışamayan ikili akışkanlarla yüklenen üniform olmayan (2mm x 2 mm ve 1.5 mm x 2 mm) FP-CLPHP'nin, tek dolum oranında deneysel incelemesi yapılmıştır. İş akışkanı olarak hekzan, pentan ve metanolün tekil formları ve ikili karışımları kullanılmıştır. Farklı konumlarda (yatay ve dikey) ölçümler alınmıştır. Saf akışkanlar arasında, hekzan ve pentan benzer ısı performans sunmuştur. Ancak metanol bu iki saf akışkana kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. MR=1:1 ve MR=4:1 için birbiriyle karışmayan akışkan çiftlerinin (metanol-hekzan ve pentan-metanol) ısı performansı birbiriyle karışan akışkan çiftinin (hekzan-pentan karışımı) ısı performansından daha yüksektir. En iyi ısı performans, P:M=1:1 iş akışkanı ile yüklü ısı borusunda gözlemlenmiştir. Üçüncü kısımda ise üçlü karışımlarla yüklü asimetrik tasarımlı (2mm x 2 mm ve 1.5 mm x 2 mm) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusunun, farklı dolum oranı, karışım oranı ve eğim açısındaki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Su, metanol ve pentan olmak üzere üç akışkan dikkate alınmıştır. Her bir akışkanın saf hali de iş akışkanı olarak incelenmiştir. IA=90° konumunda, genel olarak, üçlü karışımlar saf akışkanlara kıyasla daha iyi ısı performans göstermiştir. W:M:P=1:2:3 üçlü karışımı en yüksek ısı performansını sunarken; en düşük ısı performans W:M:P=1:0:0 (saf su) için elde edilmiştir. Her bir çalışma kapsamında, üniform olmayan kanallarda çalışma mekanizmasına etki eden dört önemli kuvvet tanımlanmıştır: (1) buharlaşma momentum kuvveti, (2) yüzey gerilme kuvveti, (3) kayma kuvveti ve (4) yer çekimi kuvveti.

Anahtar Kelimeler: Atımlı Isı Borusu, Üçlü Karışım, Karışan/Karışmayan Akışkanlar, Isıl Direnç

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Energy Systems Engineering
Thesis Type : Master's Thesis
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Burak MARKAL
Author : Ramazan VAROL
Year : 2022
Pages : 106

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NON-UNIFORM PULSATING HEAT PIPES CHARGED WITH MIXTURES

In this thesis, heat transfer characteristics and flow phenomena of non-uniform (variable cross-sectional area in a turn) flat plate closed loop pulsating heat pipes (FP-CLPHPs) charged with pure fluids and binary and ternary mixtures (and/or fluid pairs) of fluids at different volumetric mixing ratios were experimentally investigated. Extensive experiments have been carried out for different volumetric mixing ratios (MR), filling ratios (FR), inclination angles (IA), heat loads and fluid types. In addition, during the experiments, flow images were taken with a high-speed camera simultaneously with the measurements, and the flow patterns were examined, and the relevant images were used to examine the physical mechanism. Two FP-CLPHPs were used in the experiments. In each heat pipe, the cross-sectional values of the parallel channels in a turn are different from each other. This thesis was divided into three main parts. In the first part, experimental investigation of pulsating heat pipe with variable parallel channels (2mm x 2mm and 1mm x 2mm) under different conditions of filling ratio, mixing ratio and inclination angle was conducted. Binary mixtures of ethanol and pentane were used as the working fluid. It was determined that the change in the mixing ratio had a significant effect on the results. The heat pipe charged with working fluid in the form of E:P=1:3 presented the best thermal characteristics for both low (FR=30%) and high (FR=60%) fill rates. In the second part, an experimental investigation of the non-uniform (2mm x 2mm and 1.5mm x 2mm) FP-CLPHP charged with miscible or immiscible binary fluids at a single filling ratio was conducted. Single forms and binary mixtures of hexane, pentane and methanol were used as working fluids. Measurements were taken at different positions (horizontal and vertical). Among the pure fluids, hexane and pentane presented similar thermal performance. However, methanol performed better than these two pure fluids. For MR=1:1 and MR=4:1, the thermal performance of the immiscible fluid pairs (methanol-hexane and pentane-methanol) was higher than the thermal performance of the miscible fluid pair (hexane-pentane mixture). The best thermal performance was observed in the heat pipe charged with the working fluid of P:M=1:1. In the third part, the performance of an asymmetrical designed (2mm x 2 mm and 1.5 mm x 2 mm) flat plate closed-loop pulsating heat pipe charged with ternary mixtures was experimentally investigated at different filling ratios, mixing ratios and inclination angles. Three fluids, water, methanol and pentane, were considered. The pure state of each fluid was also studied as a working fluid. At IA=90°, in general, ternary mixtures showed better thermal performance than the pure fluids. The ternary mixture of W:M:P=1:2:3 presented the highest thermal performance; while the lowest thermal performance was obtained for W:M:P=1:0:0 (pure water). Within the scope of each study, four important forces acting on the working mechanism in non-uniform channels were defined: (1) evaporative momentum force, (2) surface tension force, (3) shear force, and (4) gravity force.

Keywords: Pulsating Heat Pipe, Ternary Mixture, Miscible/immiscible Fluids, Thermal Resistance

KISALTMALAR

CLPHP	: Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusu
FP-CLPHP	: Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusu
FR	: Dolum Oranı
HI	: Isıl Yük
IA	: Eğim Açısı
MR	: Karışım Oranı
PHP	: Atımlı Isı Borusu
Q_i	: Isı Borusuna Isıtıcı Aracılığıyla Uygulanan Isıl Güç [W]
Q_r	: Yoğuşturucu Bölgesinden Isı Alıcıya Aktarılan Isıl Güç [W]
R_{th}	: Isıl Direnç [$^{\circ}\text{C W}^{-1}$]
T_e	: Buharlaştırıcı Bölgesinin Ortalama Sıcaklık Değeri [$^{\circ}\text{C}$]
T_c	: Yoğuşturucu Bölgesinin Ortalama Sıcaklık Değeri [$^{\circ}\text{C}$]
T_{he}	: Soğutma Suyunun Isı Alıcıya Giriş Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_{hi}	: Soğutma Suyunun Isı Alıcıdan Çıkış Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
D	: Kanal Çapı [m]
C_p	: Özgül Isı [$\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
g	: Yer Çekimi İvmesi [m s^{-2}]
$\dot{m}$	: Kütlesel Debi [kg s^{-1}]
ρ_l	: Sıvı Yoğunluğu [kg m^{-3}]
ρ_v	: Buhar Yoğunluğu [kg m^{-3}]
σ	: Yüzey Gerilimi [N m^{-1}]

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Isı borusu çalışma limitlerinin kısa özeti	10
Tablo 2. Tez kapsamında kullanılan ısı borularının geometrik özellikleri ve boyutları	37
Tablo 3. Tez kapsamında kullanılan cihazların detaylı özellikleri.....	44
Tablo 4. Deneyler kapsamında kullanılan parametreler.....	45
Tablo 5. İş akışkanları ve ilgili termo-fiziksel özellikler (1 atm basınç)	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Konvansiyonel Bir Isı Borusu Yapısının Şematik Resmi	5
Şekil 2. Isı Borusunun Çalışma Prensibi	6
Şekil 3. Farklı fitil türlerinin şematik resmi.	8
Şekil 4. Atımlı ısı borularının çeşitleri: Kapalı döngülü (a), çek valfli kapalı döngülü (b) ve açık döngülü (c).....	11
Şekil 5. Düz plakalı atımlı ısı borusunun (FP-PHP) şematik gösterimi ve fotoğrafı. 12	
Şekil 6. PHP'nin çalışma şeklinin şematik resmi.	13
Şekil 7. Üiform olmayan PHP kesiti.	18
Şekil 8. Deney sistemine ait fotoğraf.....	34
Şekil 9. Deney düzeneğinin şematik resmi.	35
Şekil 10. FP-CLPHP-1 (a) ve FP-CLPHP-2 (b) şematik resmi.....	36
Şekil 11. Her bir FP-CLPHP'nin ortak geometrik özellikleri ve bölümleri.....	37
Şekil 12. FP-CLPHP'nin montajlı ve de-montajlı resimleri.....	38
Şekil 13. Termo-elemanların ısı borusundaki yerleşimine ait şematik resim.....	39
Şekil 14. Kartuş ısıtıcılar (a) ve ısıtıcı plaka (b).....	39
Şekil 15. Isı alıcısına ait detaylı fotoğraf; (a) üst yüzey ve (b) alt yüzey	40
Şekil 16. Isı borusunun Teflon gövdeye yerleşimine ait detaylar: fotoğraf (a) 3D de-montaj çizimi (b).....	41
Şekil 17. Test bölümünün tam montajlı resmi.....	42
Şekil 18. Soğutucu hattının fotoğrafı.....	43
Şekil 19. Yüksek hızlı kameranın, test bölümü ile tam montajlı resmi.....	44
Şekil 20. Tekrarlanabilirlik deneyler	49
Şekil 21. $FR=0.30$ ve $E:P$ ikili karışımı ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısı yük ile değişimi.....	50
Şekil 22. $E:P=1:3$, $IA=90^\circ$ ve $FR=0.30$ koşulu için akış görüntüleri; (a) $HI=25W$, (b) $HI=35W$ ve (c) $HI=45W$	51
Şekil 23. $FR=0.30$, $IA=90^\circ$ ve $HI=35W$ için akış görüntüleri: $E:P=1:1$ (a) ve $E:P=3:1$ (b).....	52

Şekil 24. FR=%60 ve E:P ikili karışımı ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısıl yük ile değişimi.....	52
Şekil 25. FR=%60, IA=0° ve HI=35W için akış görüntüleri: (a) E:P=3:1 ve (b) E:P=1:3	53
Şekil 26. FP-CLPHP-1 ile yüklü E:P iş akışkanının, farklı eğim açıları ve karışım oranları için dolum oranının fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi.....	54
Şekil 27. E:P=1:1, IA=90° ve HI=20W için akış görüntüleri: FR=%30 (a) ve FR=%60 (b)	55
Şekil 28. FP-CLPHP-1, E:P karışımları ile farklı dolum ve karışım oranları için eğim açısının fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi	56
Şekil 29. FP-CLPHP-2, FR=%50, Karışabilen ve karışmayan akışkan çiftlerinin ve saf akışkanların karşılaştırılması	57
Şekil 30. FP-CLPHP-2, FR=%50, IA=90°: Saf akışkanlar için artan ısıl yüke bağlı gelişen akış olayları	59
Şekil 31. FP-CLPHP-2, FR=%50, MR=1:1, IA= 90° ve HI=40W çalışma koşulları altında akış görüntüleri: H:P (a), M:H (b) ve P:M (c)	60
Şekil 32. Her bir iş akışkanının, IA=90° ve IA=0° eğim açısında karışım oranı etkisi.	61
Şekil 33. Eğim açısının fonksiyonu olarak ısıl direncin, ısıl yük ile değişimi tüm iş akışkanların	63
Şekil 34. IA=0°, HI=40W ve M:H=4:1 koşulları altında akış görüntüsü (FR=%50, FP-CPHP-2)	65
Şekil 35. Bölüm 3.3 kapsamındaki sonuçların optimizasyonu.....	65
Şekil 36. IA=90° konumda, iki farklı üçlü karışım oranları için dolum oranının fonksiyonu olarak ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının ısıl yük ile değişimi.....	67
Şekil 37. FP-CLPHP-2, IA=90°, W:M:P=1:2:3 ve FR=%50 akış görüntüleri: 15W (a), 30W (b) ve 40W (c).....	68
Şekil 38. FP-CLPHP-2, IA=90°, W:M:P=1:1:1 ve HI=25W akış görüntüleri: FR=%30 (a), FR=%50 (b) ve FR=%70 (c).....	69

Şekil 39. FP-CLPHP-2, FR=%50 IA=90° ve IA=0° için üçlü karışım ve saf akışkanların karışım oranı etkisi	70
Şekil 40. FP-CLPHP-2, IA=90° ve FR=%50 için akış yapılarının kıyaslanması: W:M:P=1:2:3 (HI=20W) (a), W:M:P=0:0:1 (HI=20W) (b) ve W:M:P=0:0:1 (HI=40W) (c).....	71
Şekil 41. FP-CLPHP-2, üçlü karışım ve saf akışkanlar için eğim açısının bir fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi.....	72



GİRİŞ

Mikroelektro-mekanik sistemler (MEMS), dijitalleşen dünyada, elektronik sistemlerin en önemli bileşenleridir. Mikro/nano boyutlarda işlemeye olanak sunan tekniklerin gelişimine paralel olarak, transistör yoğunluğu giderek artan elektronik çipler üretilmektedir. Bu durum, ilgili elektronik sistemlerin çalışması esnasında yüksek düzeyli ısı akılarının salınması anlamına gelmektedir ve ilgili atık ısılar bileşen yüzeylerinden uzaklaştırılmadığı takdirde elektronik sistemde ön görülen sıcaklık limitleri aşılarak, performans kaybı ve hatta mekanik deformasyon meydana gelebilir. Bu problemi önlemek ancak etkili/gelişmiş ısı kontrol tekniklerinin kullanımı ile mümkündür. Pasif karaktere sahip olan ve ısı aktarım süreci esnasında faz değişiminden faydalanan atımlı ısı boruları (Pulsating heat pipe / PHP), pratikteki söz konusu gereksinimi karşılayabilecek yenilikçi ve gelişmiş soğutma sistemleri arasında yer almaktadır.

Isı borusu, basit bir şekilde, buharlaşma ve yoğuşma mekanizmalarını kullanarak, bir yüzey üzerinde açığa çıkan ısıyı belli bir mesafe boyunca aktarabilen ısı transfer cihazıdır (Ma, 2015). Geleneksel veya klasik bir ısı borusu, silindirik formdaki fitilli bir ısı borusunu ifade etmekte olup; buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuştuğu olmak üzere üç bölümden ve konteynır, iş akışkanı ve fitil (gözenekli yapı) olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Isı borularının genel avantajlarına sahip olmalarına rağmen, konvansiyonel ısı boruları kılcallık ve sürüklenme limitleri gibi performansı sınırlandıran dezavantajlara ve akışkanın dönüşünü sağlamak için fitil etkisi oluşturacak ekstra yapılara ihtiyaç duyarlar. Bu durum, konvansiyonel ısı borularının nispeten yüksek üretim maliyeti, sınırlı performans, kısıtlı kullanım alanı ve şekil verilebilme esnekliği gibi dezavantajlara sahip olmasına yol açmaktadır. İlgili dezavantaj ve sorunları ortadan kaldırmak için, literatürde farklı tipte ısı boruları önerilmiş ve/veya geliştirilmiştir. En popüler ve gelecek vadeden ısı borusu türlerinden birisi ise atımlı (veya salınımlı) ısı borusudur.

Atımlı ısı boruları (PHP), yüksek ısı transfer performansına sahip, yapısında fitil bulundurmeyen ısı borusu türüdür. Düz bir plaka üzerinde kıvrımlı kanalların açılması veya kılcal bir borunun döngüler oluşturacak şekilde bükülmesiyle meydana getirilen, içerisinde iki fazlı akışın ve faz değişim süreçlerinin gerçekleştiği, pasif

karakterli (mekanik olarak tetiklenmeden çalışan) ısı transfer cihazıdır. Atımlı ısı boruları, sadece içerisi vakumlanmış ve bir miktar (dolum oranı nispetinde) iş akışkanı ile doldurulmuş katı malzemeden, bir başka ifade ile katı bir malzeme ve iş akışkanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak Akachi (1990) tarafından, bir patent kapsamında, döngülü kılcal boru formunda literatüre tanıtılmıştır. Çalışma prensibi gereği fitile ihtiyaç duymazlar, sürüklenme ve kılcallık limitlerine maruz kalmazlar, üretimleri kolay ve şekil verilebilme kabiliyetleri yüksektir. Atımlı ısı borularının genel karakteristiklerine ait detaylar, Faghri (2014) tarafından sunulan derleme çalışmasında başarılı bir şekilde özetlenmiştir. Özetle, PHP'ler, basit yapısı ile mini/mikro boyutlarda kolay üretilebilme, pasif ve sessiz çalışma karakterine sahip olma ve etkin ısı performans gibi özellikler sayesinde, birçok uygulama alanında (uzay elektroniği, diz üstü bilgisayarlar, portatif elektronik ekipmanlar ve benzeri) ısı kontrol kapsamında kullanım potansiyeline sahiptir.

Akışın karmaşık yapısı ve tasarlanan geometrilerin akış ve ısı transferi üzerinde doğrudan etkisi sebebiyle, atımlı ısı borularının çalışma prensibine yönelik fiziksel mekanizmanın incelenmesine ve anlaşılmasına yönelik çalışmalar hala devam etmektedir. Buna karşın, halihazırda elde edilmiş olan bilgi birikim doğrultusunda, PHP'lerdeki akış hareketinin, özetle, farklı zaman ve konumlarda oluşan, çöken ve/veya şekil değiştiren kabarcıkların yol açtığı basınç çalkantıları (veya değişimleri) ve buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki basınç farkı sebebiyle gerçekleştiği ifade edilebilir. Bu kapsamda, PHP'lerin ısı performansını etkileyen parametreler, geometrik özellikler (kanal geometrisi, kanalların yüzey özellikleri, döngü sayısı, vb.) ve çalışma parametreleridir (ısı gücü, eğim açısı, akışkan türü, ortam koşullarının özellikleri vb.).

Bu tez kapsamında, saf akışkanlar ve farklı hacimsel karışım oranlarında akışkanların ikili ve üçlü karışımlarıyla (ve/veya akışkan çiftleriyle) yüklenen üniform olmayan (tek bir döngüde değişken kesit alanına sahip) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularında (FP-CLPHP) ısı transfer karakteristikleri ve akış olayları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı hacimsel karışım oranları, dolum oranları, eğim açıları, ısı yük değerleri ve akışkan türleri için kapsamlı deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneyler esnasında, ölçümlerle eş zamanlı olarak, yüksek hızlı

kamera ile görüntü alınarak akış desenleri incelenmiş ve fiziksel mekanizmanın irdelenmesinde kullanılmıştır.



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Geleneksel Isı Borusu ve Çalışma Mekanizması

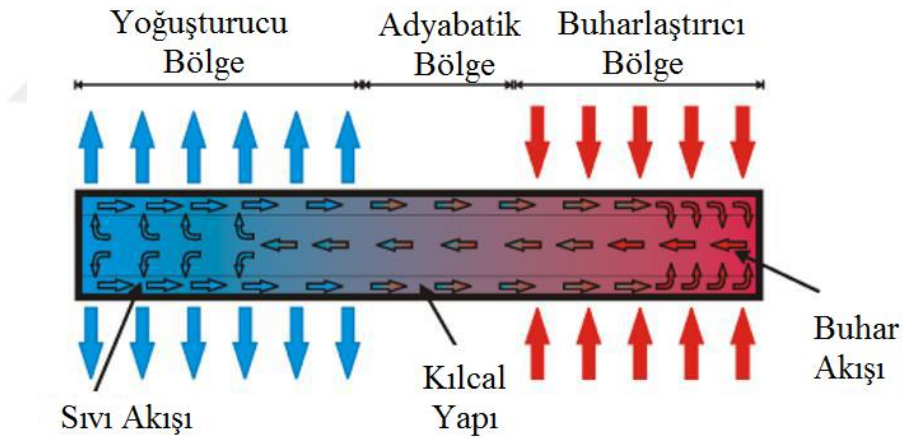
Isı borusu ile ilgili ilk temel fikir, 1944 yılında Gaugler tarafından ortaya atılmıştır. Gaugler (1944) ısı transferi üzerine yaptığı çalışmalar kapsamında, ısı transfer cihazı olarak adlandırdığı fikir/tasarım ürününün patentini almıştır. Ancak o dönemin teknolojisi ve uygulama gereksinimleri sebebiyle, böyle bir ısı kontrol cihazı pratiğe yansıtılamadı ve yaklaşık yirmi yıl boyunca sadece fikir olarak kaldı. Isı kontrol cihazının, 1960’larda uzay ve nükleer araştırma uygulamalarında kullanılması fikrini ise Trefethen (1962) önerdi ve daha sonra Wyatt (1964) tarafından patent başvurusu yapıldı. Grover vd. (1964) Los Alamos Ulusal Laboratuvarı’nda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, ısı borusunun yapısını ve çalışma mekanizmasını inceleyerek günümüzdeki önemine temel teşkil eden alt yapıyı oluşturmuşlardır. Ayrıca literatürde ilk kez, ısı borusu (heat pipe) terimini kullanmışlardır. Tarihsel gelişimine bakılırsa, ısı borularının önemi ve popülaritesi giderek artmaktadır. Özellikle ısı problemlerle uğraşan ve bu problemlere çözüm aramaya çalışan bilimsel çevreler ve ilgili endüstriyel kuruluşlar ısı borularına çok fazla ilgi göstermişlerdir. Faghri’nin (2012) tanımına göre ısı borusu, nispeten düşük sıcaklık farkı ile uzun bir mesafe boyunca yüksek miktardaki ısıyı, aktarabilen basit, efektif ve iki-fazlı pasif bir ısı transfer cihazıdır.

Geleneksel ısı borularının (fitilli silindirik formdaki ısı borusu) temel bileşenlerini ve bölümlerini gösteren şematik görsel Şekil 1’de sunulmuştur. Şekil 1’den de görüldüğü gibi konvansiyonel bir ısı borusunda konteynır, fitil ve iş akışkanı olmak üzere üç temel bileşen ve buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu olmak üzere üç bölge bulunmaktadır. Konteynır, iş akışkanının muhafaza edildiği ve ısı transfer yüzeyi oluşturan katı malzemeyi ifade eder. Konteynırın içerisine gözenekli bir yapı yerleştirilir. Bu yapının adı fitildir. Fitil kullanımındaki temel amaç, yoğuşturucu bölümünde sıvı faza dönüşen iş akışkanının buharlaştırıcı bölgesine geri getirilmesinde rol oynayan kılcallık kuvvetinin oluşumunu sağlamaktır. Geleneksel biri ısı borusu için bu durum buharlaştırıcı bölgesinin yoğuşturucu bölgesine kıyasla daha yukarda olduğu durumlarda zorunludur. Tam tersi durumlarda, fitile ihtiyaç duyulmadan sadece yer çekimi etkisiyle de iş akışkanı buharlaştırıcı bölgesine geri

Kaynak. Reay vd., 2006

5

Isı borusunun içerisinde yer alan iş akışkan, ısı enerji etkisi altında sıvı fazdan buhar fazına dönüşür (buharlaştır) ve buharlaştırıcı bölgesinde basınç artarak ısı borusunun her iki uç bölgesi arasında basınç farkı oluşmuş olur. Sonuç olarak, doğal bir pompalama kuvveti oluşur. Bu durum buhar fazındaki akışkanın yoğuşturucu bölümüne doğru hareket etmesini sağlar. Yoğuşturucu bölümünde akışkan, buhar fazından sıvı faza dönüşür (yoğuşur) ve sahip olduğu ısı enerjisi çevreye veya bir ısı alıcısına aktarır. Burada ısı alıcısı olarak, içinden sıvı akışı olan bir yapı kullanılabileceği gibi sadece kanatçıklı bir ısı alıcı da kullanılarak doğal taşınım mekanizmasından faydalanılabilir. Isı borusundaki akış döngüsünün/çevrimin tamamlanabilmesi ve sürdürülebilmesi için bir başka ifade ile ısı borusunun sürekli çalışabilmesi için yoğuşan akışkanın tekrar buharlaştırıcı bölümüne dönmesi gerekmektedir. Geleneksel fitilli bir ısı borusunda bunu sağlayan kuvvet temel olarak, kılcallık kuvvetidir. Şekil 2’de ısı borusunun çalışma prensibini temsil eden görsel sunulmuştur.



Şekil 2. Isı Borusunun Çalışma Prensibi

Kaynak. Krambeck vd., 2019

1.1.1 Isı Borusu Bileşenleri ve Sahip Olması Gereken Özellikler

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, konvansiyonel bir ısı borusunun, temel bileşenleri; konteynır, iş akışkanı ve fitildir. Isı borularının tasarımı ve üretimi yapılırken, geometrik özelliklerinin yanı sıra bu üç temel bileşene ait özelliklere ve birbirleri arasındaki uyuma da dikkat edilmelidir.

Konteynırın temel görevi iş akışkanını dış ortamdan ayırmak ve soğutma sürecinde ısı transfer yüzeyini oluşturmaktır. Soğutulmak istenen yüzeyden ısıнын hızlıca çekilmesini sağlamalı, iş akışkanına iletebilmeli ve yoğunlaştırıcı bölümünden ısıнын hızlıca atılmasına yardımcı olmalıdır. Bu sebeple, konteynır malzemesinin seçimi önemlidir ve seçim sürecinde dikkate alınması gereken kriterler şu şekilde ifade edilebilir: (a) iş akışkanı ile uyumlu olmalı, (b) dayanım/ağırlık oranı yüksek olmalı, (c) ısıl iletkenliği yüksek olmalı, (d) imalat kolaylığı (kaynak edilebilme ve işlenebilirlik) sunmalı, (e) iş akışkanı tarafından ıslanabilir özellikte olmalı ve (f) sızmaya yol açmayacak gözeneklilik değerlerine sahip olmalı (Reay vd., 2014). Bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik en yaygın kullanılan konteynır malzemeleridir (Zohuri, 2011).

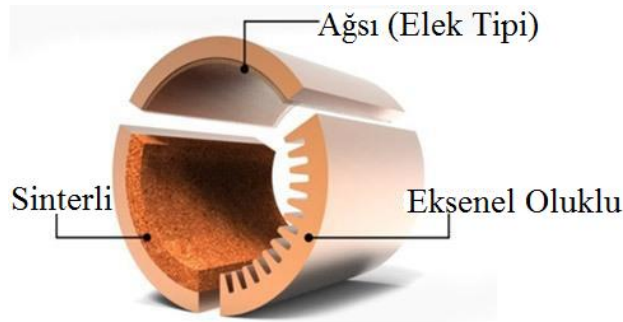
Isı borularında, en önemli bileşen iş akışkanıdır. İş akışkanı ısıyı bir bölgeden alarak başka bir bölgeye aktaran aracı ortamdır. Isı borusuna uygun iş akışkanı seçiminde, öncelikle, çalışma sıcaklık aralığı dikkate alınmalıdır. Akışkan seçiminde dikkate alınması gereken diğer özellikler ise aşağıda belirtilmiştir:

- Fıtil ve konteynır malzemesi ile uyumluluk,
- Fıtil ve konteynır malzemelerini ıslatabilme özelliğı,
- İyi derecede ısıl kararlılık,
- Uygun çalışma sıcaklık aralığı
- Yüksek gizli ısı,
- Yüksek ısıl iletkenlik,
- Düşük sıvı ve buhar viskozitesi
- Yüksek yüzey gerilimi

Isı borusunun son bileşeni olan fıtil, konteynırın iç kısmına sarılarak yerleştirilen, çelik, alüminyum, nikel veya bakır gibi metal malzemelerden üretilen mikro gözenekli bir yapıdır. Farklı yapılı fıtil türleri bulunmaktadır. Bunlar; homojen yapılı fıtil, damarsız yapılı fıtil, ağsı (elek tipi) yapılı fıtil, sinterli fıtil, oyuklu fıtil, sinterli metal tel yapılı fıtil (lifler) ve seramik fıtil olarak sınıflandırılabilir (Reay vd., 2014). Şekil 3'te farklı fıtil türlerine ait örnekler sunulmuştur. Fıtılın birincil görevi, iş akışkanını yoğunlaştırıcı bölgesinden, buharlaştırıcı bölgesine aktarmak için kılcallık basıncını oluşturmaktır. Aynı zamanda fıtil, akışkanı ısı borusunun ısıl yük uygulanan tüm bölümlerine (buharlaştırıcı bölümü) homojen/üniform olarak dağıtabilmelidir

(Reay vd., 2014). Fitilin bu işlevleri sağlaması için birçok faktöre bağlıdır. Fitol seçimi için gözenek boyutu, geçirgenlik, gözeneklilik ve ısıl iletkenlik gibi özellikler ısı borusunun çalışma limitlerini de belirler (Zohuri, 2011). İdeal fitil özellikleri, Reay vd. (2014) tarafından açıkça belirtildiği, gibi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

- Fitilin gözenekleri, iş akışkanını yoğunlaştırıcı bölümden buharlaştırıcı bölümüne gönderebilecek düzeyde kılcallık kuvveti oluşturacak boyutta olmalıdır.
- Yer çekimine karşı daha fazla iş yapılması gereken durumlarda daha küçük boyutlu gözenekler tercih edilmelidir.
- Hacimsel olarak ortaya çıkan sınırlandırmalar ve/veya yüksek güç kapasitesine ihtiyaç duyulması gibi durumlarda homojen olmayan ve/veya damarsı (arterial) fitillerin kullanımı tercih edilmelidir.
- Fitol kalınlığı radyal doğrultuda ısıl direnci artırır ve fitilin etkinliği üzerinde olumsuz rol oynar.
- İş akışkanı ile uyumlu olmalı (kimyasal reaksiyona girmemeli) ve iş akışkanı tarafından ısıtılabilirliktir.
- Isı borusunun içerisine montajının kolayca yapılabilmesi, konteynerin şeklini alması, tekrar kullanılabilir nitelikte olması ve maliyetinin düşük olması, fitilde aranan diğer özellikler arasında yer almaktadır.



Şekil 3. Farklı fitil türlerinin şematik resmi.

Kaynak. Deshpande ve Patil, 2016

1.2. Isı Borusu Çalışma Limitleri

Isı borusunun çalışabilmesi için, iş akışkanı ile iş akışkanının temas ettiği yüzeyler arasında ve akış esnasında farklı hızlardaki akışkan tabakaları arasında meydana gelen sürtünme kuvvetlerinin yenilmesi ve iş akışkanının buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasında sirkülasyonunun sağlanması için gerekli olan pompalama gücünün, sürdürülebilir nitelikte olması gerekmektedir. Isı borularında, akışın hareketi için dışarıdan herhangi bir elektriksel güç uygulanmaz, bir başka ifade ile bir pompa, kompresör ve benzeri bir mekanik bir cihazla akışkan harekete geçirilmez. Buna karşın, yukarıda belirtilen ve akışın sürdürülmesi için gerekli olan pompalama gücünün sağlanması gerekir. Bu pompalama gücü soğutulmak istenen cihazda açığa çıkan ısı enerjiden sağlanır. Özetle, bir ısı borusunda doğal bir pompalama kuvveti oluşur. Ma (2015) ise termodinamik bir sistem olarak düşünüldüğünde, bir ısı borusunun küçük bir makine/motor olarak dikkate alınabileceğini ifade etmiştir. Bu kapsamla, herhangi bir motorun ve/veya makinanın çalışma koşullarını sınırlayan ve zorlayan belli faktörler vardır. Isı borularının çalışmasını etkileyen ve kapasitesini sınırlandıran bu faktörler ısı borusu çalışma limitleri olarak adlandırılır.

Isı borularının ısı transfer kapasiteleri; geometriye, iş akışkanına, fitil ve malzeme yapısına bağlı olduğu gibi ısı transferini sınırlandıran fiziksel olaylar da bağlıdır. Belli bir uygulama için bir ısı borusunun tasarımı yapılacağı zaman, bileşen seçiminin önemli olduğu kadar ilgili fiziksel faktörlerin de dikkate alınması gerekir. Isı transferini etkileyen ilgili limitler şunlardır: (i) kılcallık limiti, (ii) kaynama limiti, (iii) sonik limit, (iv) sürüklenme (entrainment) limiti ve (v) viskoz limitidir (Faghri, 2014). Tablo 1’de ısı borusu çalışma limitlerinin özeti verilmiştir.

Tablo 1. Isı borusu çalışma limitlerinin kısa özeti

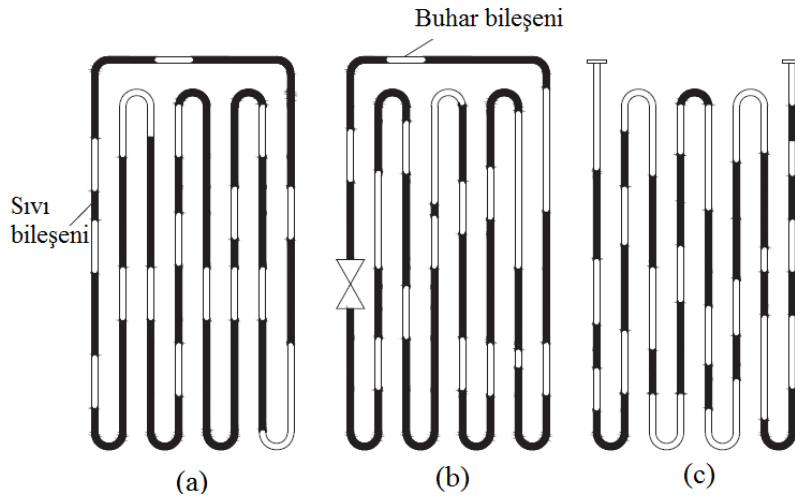
Çalışma Limitleri	Açıklama
Kılcallık Limiti	Isı borusu içerisinde sıvı ve buhar akış esnasında meydana gelen basınç düşümleri ile yer çekimi kaynaklı basınç düşümü bileşenlerinin toplamının ısı borusundaki fitilli yapı aracılığıyla sağlanan kılcallık pompalama basıncından büyük olması durumunda meydana gelir (Zohuri, 2011).
Kaynama Limiti	Buharlaştırıcı bölgesine yüksek düzeyde ısı gücü uygulandığı zaman ilgili bölgedeki fitilde bulunan sıvı kaynamaya başlar ve buhar kabarcıkları oluşur. Eğer kaynama şiddetli hala gelirse oluşan buhar kabarcıkları nedeniyle ilgili bölge sıvı tarafından ısıtılmaz ve kuruma meydana gelir. Bu şekilde oluşan limite kaynama limiti adı verilir (Faghri, 2014).
Sürüklenme Limiti	Konvansiyonel bir ısı borusu içerisinde buhar ve sıvı akışları birbirine ters doğrultuda hareket eder. Yüksek hızlı buhar akışı belli bir limit değerinden sonra sürtünme temelli etkiler nedeniyle sıvının buharlaştırıcı bölgesine dönüşünü engeller. Böylece buharlaştırıcı bölgesinde kuruma meydana gelir bu limite sürüklenme limit adı verilir (Ma, 2015; Zohuri, 2011).
Sonik Limit	Buhar akışının ısı borusunun buharlaştırıcı bölümünden çıkarken ses hızına ulaşması ile meydana gelen limittir. Özellikle düşük çalışma sıcaklıklarında çok fazla ısı gücü uygulanması bu limite yol açar (Zohuri, 2011).
Viskoz Limit	Bir ısı borusu, gerekli çalışma sıcaklığının altında çalışmaya maruz bırakıldığında oluşma potansiyeli olan bir limittir. Viskoz kuvvetlerin buhar akışını engellemesi ile karakterize edilir (Zohuri, 2011).

1.3. Atımlı Isı Boruları

Geleneksel ısı borularının genel yapısı ve çalışma prensibi önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. Isı borularında, geometri ile akış ve ısı transferi arasında güçlü bir birliktelik vardır ve geometri veya diğer çalışma parametrelerinde yapılacak olası değişiklikler akışın yapısını ve dolayısıyla ısı performansı direkt etkileyebilmektedir. Ayrıca, ısı borusunun kullanım alanlarına bağlı olarak (yerleştirildiği yüzeyin geometrik yapısı ve yer çekimi kuvveti düzeyi) da yapısal değişikliklere gidilebilmektedir. Belirtilen sebeplerle, literatürde farklı ısı borusu

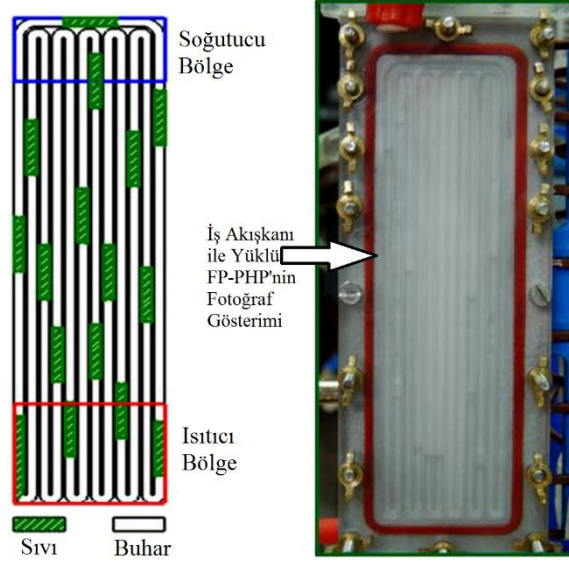
türleri önerilmiş, çalışılmış ve çalışılmaya devam etmektedir. Bu ısı borusu türlerinden biri de atımlı (pulsating) veya salınımlı (oscillating) ısı borusudur.

Atımlı ısı borusu, düz bir plaka üzerinde kıvrımlı formda kanalların açılması (Şekil 5) veya kılcal bir borunun birkaç tur bükülerek kıvrımlı hale getirilmesi ile oluşturulan, içerisinde iki fazlı akışın gerçekleştiği, pasif (akışın mekanik olarak tetiklenmediği) ısı transfer cihazıdır. Cheng vd. (2010) tarafından belirtildiği üzere, ısı boruları; kapalı döngülü ve açık döngülü olmak üzere temelde iki çeşittir. Isı borularının, ayrıca, çek valf eklenmiş türleri de mevcuttur, ancak ısı borularından beklenti küçük boyutlu ve basit yapıları olması olduğu için, çek valf kullanımı pratik açıdan avantajlı değildir (Reay vd., 2014). Kapalı döngülü atımlı ısı boruları hem pratik kullanım açısından hem de performans açısından avantajlı olmaları sebebiyle diğer türlere göre tercih edilmektedir. Şekil 4'te atımlı ısı borularının çeşitlerini temsil eden şematik resim verilmiştir.



Şekil 4. Atımlı ısı borularının çeşitleri: Kapalı döngülü (a), çek valfli kapalı döngülü (b) ve açık döngülü (c)

Kaynak. Han vd., 2016



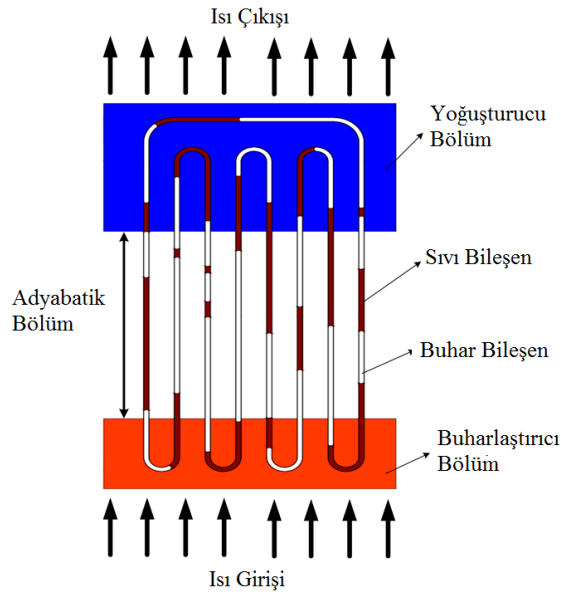
Şekil 5. Düz plakalı atımlı ısı borusunun (FP-PHP) şematik gösterimi ve fotoğrafı.

Kaynak. Srikrishna vd., 2019

1.3.1 Atımlı ısı Borusunun Çalışma Mekanizması

Atımlı ısı borusunun tasarımı ve ısı aktarım mekanizması, fitilli ısı borularından oldukça farklıdır. Konvansiyonel ısı borularından farklı olarak, atımlı ısı borularında sıvı ve buhar fazındaki iş akışkanı aynı akış pasajı içinde farklı yönlerde hareket etmez. Sıvı ve buhar fazlarındaki iş akışkanı aynı doğrultuda salınım ve titreşim yaparak hareket eder. Bu tür ısı borularının isminin atımlı (pulsating) ısı borusu olmasının sebebi de buhar kabarcıkları ve sıvı yığınları şeklinde, kanallar içerisinde dağılan akışkan bileşenlerinin yapmış olduğu hareketin şeklidir. Buharlaştırıcı bölgesine uygulanan ısısal güç sonucu, ilgili bölümde buharlaşma hızlanır ve buhar kabarcıkları oluşmaya başlar. Paralel kanallar içindeki kabarcık oluşumları hem şekil hem de zamansal olarak birbirinden farklıdır. Dolayısıyla kanallar arasında basınç farkları meydana gelir. Aynı zamanda, buharlaştırıcı bölgesine uygulanan ısısal gücün doğal bir sonucu olarak ilgili bölgedeki basınç diğer bölgelere kıyasla artar. Hem yerel olarak kanallar arasında oluşan basınç farklılıkları hem de buharlaştırıcı bölgesinin diğer bölümlere kıyasla artan basıncı sonucu buharlaştırıcı bölgeden yoğunlaştırıcı bölgesine doğru akışkan hareketi başlar. Görece soğuk akışkan tabakaları ile temas eden kabarcıklar, paralel kanallar içinde farklı zamanlarda ve farklı düzeylerde hacimsel değişikliklere maruz kalır. Bunun sonucu olarak birbiriyle bağlantılı olan kanallar arasında basınç farklılıkları ve kanallar içinde ani basınç

değişimleri meydana gelir. Yoğuşturucu bölümünde, ısı enerjisini dış ortama aktaran buhar fazındaki akışkanın sıvı faza dönme eğilimi ve yine buhar kabarcıklarının hacimlerinde meydana gelen konumsal ve zaman bağımlı değişimler de akış pasajları içindeki basınç farklılıklarını tetikler. Böylece hem bölgesel basınç farklılıkları hem de kanallar içerisinde zaman ve konum bağımlı anlık basınç çalkantıları sonucu buhar kabarcıkları ve sıvı yığınları formunda bulunan iş akışkanı atımlı ve titreşimli hareket yaparak sirkülasyon gerçekleştirir. Atımlı ısı borularının çalışma mekanizması yukarıda belirtildiği şekilde açıklanabilir. Şekil 6'da çalışmakta olan bir PHP'nin durumunu temsil eden şematik görsel sunulmuştur.



Şekil 6. PHP'nin çalışma şeklinin şematik resmi.

Kaynak. Chen vd., 2020

1.4 Atımlı Isı Borusunun Çalışma Prensibi ve Tasarımını Etkileyen Fiziksel Parametreler

Atımlı ısı borularının yapısı basit olmasına rağmen, çalışma mekanizmasını anlamak ve analiz etmek oldukça zordur. Bu kapsamda, termodinamik, akışkanlar dinamiği (iki fazlı salınımlı akış), ısı transferi (hem duyulur hem de gizli ısı) ve fiziksel tasarım parametreleri detaylı bir şekilde ve birlikte ele alınmalıdır (Zhang ve Faghri, 2008). İş akışkanı seçimi, çalışma koşullarındaki değişimler ve kanalın geometrik özellikleri atımlı ısı borularının çalışmasını etkileyen temel faktörler olarak özetlenebilir. Ayrıca, ön tasarım süreçlerinde, bir PHP'nin çalışıp çalışmayacağını ön

görmek için kanal çapı ile termofiziksel özellikleri ilişkilendiren bağıntılar da önerilmiştir. Aşağıda farklı başlıklar altında, atımlı ısı borularını etkileyen parametreler ve ön tasarım süreçlerinde kullanılabilecek bağıntılar açıklanmıştır.

1.4.1 İş Akışkanı

Atımlı ısı borusunun iki bileşeninden biri iş akışkanıdır. İş akışkanı, bir PHP içinde ısının bir konumdan diğerine aktarılmasını sağlar. Dolayısıyla, PHP'nin çalışmaya başlaması ve yüksek bir ısı performans sunmasında temel rol oynar. Seçilecek iş akışkanının, öncelikle, PHP malzemesi ile uyumlu olması ve çalışma sürecinde herhangi bir reaksiyona girmemesi gerekmektedir. Ayrıca, iş akışka'nın termofiziksel özellikleri (yüzey gerilimi, gizli ısı, özgül ısı, viskozite, buharlaşma gizli ısı, ısı iletkenlik, doyma sıcaklığı, yoğunluk ve $(dP/dT)_{sat}$), PHP'nin çalışmaya başlama (salınım/atım hareketi) performansını ve ısı direncini (ısı performansını) doğrudan etkilemektedir.

Özetle iş akışkanı seçimi bir ısı borusunun performansı açısından oldukça önemli bir konudur ve açık literatürde iş akışkanının belirlenme sürecinde faydalı olacak kapsamlı değerlendirmeler bulunmaktadır. (Zhang ve Faghri, 2008; Nazari vd., 2018). Literatürde, akışkanların termofiziksel özelliklerinin katkısına yönelik değerlendirmeler bulunmasına rağmen, farklı densesel koşullarda çalışılması veya mevcut bilgi birikimindeki yetersizlik gibi sebeplerle, özellikle termo-fiziksel özelliklerin tekil katkısına yönelik (olumlu veya olumsuz olarak) farklı değerlendirmeler bulunmaktadır. Genel karakter olarak, artan $(dP/dT)_{sat}$ ısı performansını artıran önemli parametreler arasında gösterilmektedir. Buna karşın Bastakoti vd. (2018) $(dP/dT)_{sat}$ 'ın baskın bir parametre olmadığını belirtmiştir. Katkısı konusunda hem fikir olunan özelliklerden biri ise viskozitedir. Düşük viskozite FP-CLPHP performansının artmasını sağlamaktadır. Buradaki temel faktör azalan viskozite ile akış esnasındaki enerji kaybının azalması ve akışkanın daha kolay hareket etmesidir. Düşük kaynama noktasına sahip akışkanlar, ısı borusunun daha erken reaksiyon göstermesini sağlar. Bir başka ifade ile akışkan akışı erken tetiklenir. Özellikle düşük dolum oranlarında ve düşük ısı yükleri altında, düşük yüzey gerilmesi ısı performansından avantaj sağlar. İlgili koşullarda (düşük yüzey gerilmesinde) buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasında akışkan hareketi kolaylaşır (Bastakoti vd.,

2018). Isıl iletkenliğin yüksek olması, ısı transferi açısından avantaj sunar. Sıvı yoğunluğunun ısı borusu performansı açısından olumlu ve olumsuz olarak iki farklı etkisi olabilir (Han vd., 2014). Olumsuz olarak, yüksek yoğunluk durumunda, sıvı bileşen buharlaştırıcı bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine daha zor ulaşır. Olumlu olarak ise, yüksek yoğunluk durumunda, sıvı fazındaki iş akışkanının yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya ulaşması daha kolaydır. Daha açık bir ifade ile pozitif açılı durumlarda, ilgili bileşene etkiyen yer çekimi kuvveti artar. Genel olarak, özgül ısının yüksek değerleri ısı transferi açısından avantaj sunar. Gizli ısı ise iki farklı etkiye sahip olan termo-fiziksel özellikler arasında yer almaktadır (Cui vd., 2016): (1) artan gizli ısı, ısının buharlaştırıcıda absorbe edilmesi ve yoğunlaştırıcıda ısı alıcıya aktarılması süreçlerinde iyileşme sağlanması anlamına gelmektedir. Bir başka ifade ile artan gizli ısı, ısı aktarım karakteristiklerini iyileştirir, (2) gizli ısının yüksek değeri atımlı ısı borusunun çalışmaya başlamasını geciktirir (sistemin tepki süresini uzatır). Yukarıda belirtilen etkilerin tamamının, açılal yerleşim, dolum oranı ve diğer çalışma koşullarına bağlı olduğu belirtilmelidir.

1.4.2 Çalışma Koşulları

Atımlı ısı borularının, ısı aktarım performansını daha iyi anlamak için araştırmacılar tarafından birçok deneysel/sayısal çalışma yapılmıştır. Dolum oranı, eğim açısı ve ısı yük etkisi gibi parametrelerin PHP'nin ısıl performansı üzerindeki birleşik etkisini bulmaya ve eş zamanlı olarak çalışma sınırlarını iyileştirmeye yönelik araştırmalar yapılmaktadır (Rajale vd., 2022).

Dolum oranı (filling ratio, FR), ortam sıcaklığında PHP'nin içerisine doldurulan iş akışkanı hacminin, PHP'nin toplam iç hacmine oranı şeklinde tanımlanır. Dolum oranı %0 ile %100 arasında değişmektedir. Dolum oranı etkisi, PHP'nin ısı aktarım yeteneği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Dave vd., 2021). Yüksek bir dolum oranı, sıvı bileşeninin buhar bileşeninden fazla olacağı ve buharlaştırıcı bölümünde gerçekleşen kabarcık üretiminin az olacağını anlamına gelmektedir. Bu durum PHP performansını olumsuz etkilemektedir (Rajale vd., 2022). Buna karşın, PHP'de ısıyı aktaran bileşen iş akışkanıdır ve atım/salınım hareketinin başlayarak ısının buharlaştırıcı bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine taşınabilmesi için yeterli miktarda iş akışkanının ısı borusu içerisinde bulunması gerekmektedir. Yeterli

sıvının olmaması, buharlaştırıcı bölümünün kurumasına da sebep olur (Zhang ve Faghri, 2008). Yapılan çalışmalar sonucu, literatürde, dolum oranının belli bir aralıkta ($30 \leq 60$) olması durumunda, PHP'nin normal şekilde çalışabileceği ifade edilmiştir (Han vd., 2016). Yang vd. (2008) yaptıkları çalışmada, optimum dolum oranının %50 olarak belirttiler ve bu dolum oranında PHP'nin en iyi ısı performansını gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Eğim açısı, yoğuşturucu bölümünde sıvı faza dönen iş akışkanının buharlaştırıcı bölümüne hareketinde önemli rol oynar. Farklı kanallarda farklı miktarlarda bulunan sıvı bileşenler, farklı ağırlıkları sebebiyle paralel kanallar arasında dengesiz kuvvetler oluşturarak çalışmayı destekler. Buna karşın, termosifonlardan farklı olarak, bir PHP'de yer çekimi etkisine mutlak bağımlılık söz konusu değildir. Farklı tasarımlarla, yer çekimi yardımı olmadan da PHP çalışabilir. Genellikle çok döngü sayısına sahip (40 döngüden fazla) PHP'lerde, çalışma performansının eğim açısından bağımsız olduğu belirtilmiştir (Zhang ve Faghri, 2008). Eğim açısı etkisini bertaraf etmek için yapılabilecek bir diğer tasarım ise üniform olmayan paralel kanal tasarımıdır. Bu sayede, ısı borusu kanal sayısı artırılmadan da yer çekimine bağımlılık azaltılabilir.

PHP'lerde akışkan hareketi mekanik bir sistemle gerçekleşmez. İhtiyaç duyulan enerji, soğutulmak istenen cihazdaki atıl ısı enerjisi ile sağlanır. Dolayısıyla, ısı yükü, bir PHP için temel sürücü kuvvettir. PHP içinde, buhar kabarcıklarının oluşması, basınç çalkantı ve farklılıklarının meydana gelebilmesi için ısı gücü zorunludur. Ayrıca, Han vd. (2016), PHP'nin çalışmaya başlayabilmesi için belli bir eşik ısı yükü değerinin geçilmesi gerektiğini ve bu değeri çalışmaya başlama ısı gücü değeri olarak adlandırmıştır.

1.4.3 Ön Tasarım Sürecine Ait Bağlılıklar

Literatürde, atımlı ısı borularının tasarım çap değerleri hakkında ön görüde bulunmak için bazı deneysel korelasyonlar önerilmiştir. Bu korelasyonların önerilmesindeki temel amaç, atımlı ısı borusu içerisinde gerçekleşen akışta rol oynayan kuvvetlere bağlı olarak çapa/hidrolik çapa ait ön görüde bulunmaktır. Bir başka ifade ile ön tasarım sürecine destek olmaktır. Bu amaçla, temel alınan boyutsuz sayı Bond sayısıdır. Bond sayısı, fiziksel olarak kaldırma kuvvetlerinin yüzey gerilme

kuvvetlerine oranını ifade etmekte olup, aynı zamanda kanalın çap değerini de içermektedir. Bu sebeple, yapılan deneyler sonucu, ısı borusunun çalıştığı ve çalışmadığı durumlar dikkate alınarak Bond sayısı üzerinden ampirik ilişkiler sunulmuştur. Bu ilişkiler aynı zamanda akışkanın termofiziksel özelliklerini de içerdiği için akışkan seçimi konusunda da yol gösterici olabilir. Bond sayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

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

Zhang ve Faghri (2008) tarafından ifade edildiği üzere, bir atımlı ısı borusunun çalışabilmesi için Bond sayısının 2'den küçük ($Bo \leq 2$) olması gerekmektedir. Bu tür bağıntılardaki çap değerinin kanal iç çapı olduğu belirtilmelidir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda, tasarım sürecinde atımlı ısı boruları için maksimum iç çap değeri aşağıdaki gibi önerilmiştir (Han vd., 2016).

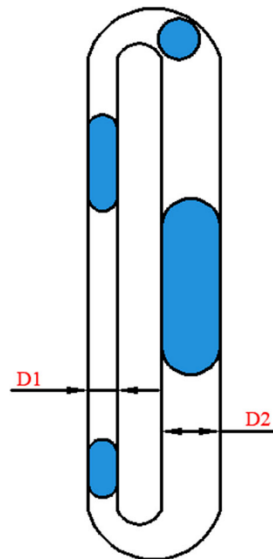
$$D_{\max} \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (2)$$

Atımlı ısı boruları için minimum bir çap değerinin olup olmadığı da literatürde tartışılmış veya incelenmiştir. Bu doğrultuda, PHP'ler için minimum ve maksimum çap değerlerini öneren bir bağıntı aşağıda sunulmuştur (Lin vd., 2009; Yang vd., 2015).

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

Bond sayısı incelendiğinde, literatürde, atımlı ısı borularının çalışıp çalışmayacağını ön görülmesi açısından, temel olarak, yüzey gerilmesi ile kaldırma kuvvetleri arasındaki dengenin dikkate alındığı görülmektedir. Dolayısıyla, akışkan seçiminin, PHP'lerin performansı açısından son derece önemli bir faktör olduğu buradan da görülmektedir. Bond sayısına bağlı korelasyonlar üretilse de atımlı ısı

Geometrik tasarımlara ait ilgi çekici yaklaşımlardan birisi de değişken kanal genişliğidir. Bu tür tasarımlar, kanallar içerisinde dengelenmemiş kılcallık kuvveti oluşturarak, yer çekiminden bağımsız bir şekilde PHP'nin çalışabileceğini göstermek için literatüre tanıtılmıştır. Bu konudaki öncü çalışma Chien vd. (2012) tarafından yapılmıştır. Chien vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, üniform olmayan (değişken kesitli) PHP'nin, yatay konumda da (yerçekimi olmaksızın) çalışabildiğini kanıtlanmıştır. Şekil 7'de üniform olmayan bir PHP'nin tek döngülü kesiti verilmiştir (Zhang vd., 2021).



Kaynak. Zhang vd., 2021

Buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve adyabatik bölümlerinin uzunluk değerleri de PHP'nin çalışma performansını etkilemektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu uzunluğunun azaltılması, ilgili bölümler ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyler olduğu için, etkili ısı transfer kapasitesini azaltır ve bu sebeple PHP'nin çalışma performansını düşer. Ayrıca, yoğuşturucu bölümünün uzunluğunun, buharlaştırıcı bölümünün uzunluğuna eşit ve/veya daha fazla olmasının PHP'nin performansını artıracacağı literatürde belirtilmiştir (Bastakoti vd., 2018). Adyabatik uzunluğa yönelik, kısa adyabatik bölge durumunda, bir PHP'de akışkan sirkülasyonunun hızlı bir şekilde başladığı ve adyabatik uzunluk arttıkça PHP'de ısı performansın azaldığı belirtilmiştir (Rajale vd., 2022).

PHP'deki döngü sayısı da ısı performansını etkileyen önemli bir geometrik faktördür. Döngü sayısını arttırmak, aynı zamanda, ısı transfer yüzey alanının da artması anlamına gelir. Ancak PHP'nin fazla döngü sayısına sahip olması, daha fazla yer kaplamasına, hacim ve ağırlık artışa yol açar ve pratik uygulamalar için istenilen bir durum değildir. Literatürde, döngü sayısının ısı ve çalışmaya başlama performansı üzerindeki etkisinin incelendiğini; ancak, farklı koşullar altında yapılan çalışmalarda ortak bir sonuca varılamadığı belirtilmiştir. Bu kapsamda, PHP için optimum bir döngü sayısı bulunmamaktadır (Rajale vd., 2022).

1.5. Literatür Özeti

Atımlı ısı borusu, elektronik sistemlerin soğutulması kapsamında hem günümüzde uygulanabilir nitelikte olan hem de gelecek vadeden en modern ısı kontrol yöntemlerinden biridir. Bu sebeple akademik çalışmalar kapsamında atımlı ısı borularına olan araştırma ilgisi artmakta ve çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Yapılan ilgili çalışmaların bazıları özet olarak aşağıda sunulmuştur.

Khandekar vd. (2003) çalışmalarında hidrolik çapı yaklaşık 2 mm olan beş döngülü bakır bir PHP kullanmış olup, dolum oranı ve iş akışkan türünün ilgili ısı borusunun ısı performans üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanı olarak su, etanol ve R-123 kullanılmıştır. Isı borusunun, düşey ve yatay konumlarda yerleştirilmiştir. Dolum oranı için %20-%70 aralığı dikkate alınmıştır. Düşük dolum oranlarında tüm akışkanlar için değişken bir titreşim modu gözlemlenmiştir. Optimum dolum oranları (FR) belirlenmiş olup, su için $FR = 15-30$;

etanol için $FR = \%25-55$ ve R-123 için ise $FR = \%35-60$ 'dır. Yer çekimi kuvvetinin ısı performans üzerinde baskın bir rol oynadığını ve yatay konumda, yukarıda her üç iş akışkanı içinde ısı borusunun çalışmadığını ifade etmişlerdir.

Charoensawan vd. (2003) yapılan çalışmada kapalı döngülü atımlı ısı borularının geometri değişkenliği ve akışkan türü gibi parametrelerin ısı performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. CLPHP'ler iç çapları 2 mm ve 1 mm olan bakır tüplerden yapılmıştır ve buharlaştırıcıdaki döngü sayıları 5 ile 23 arasında değiştirilmiştir. Kullanılan iş akışkanlar su, etanol ve R-123'tür. Eğim açısı ise 0° ve 90° olarak belirtilmiştir. İş akışkanın, termo-fiziksel özellikleri performans üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu ve ayrıca yer çekimi ile döngü sayısının çalışma performansı etkilediğinin altını çizmişlerdir. Ek olarak, belirli bir sıcaklık farkı için atımlı ısı borularının performansı iç çaptaki artışla eş zamanla arttığı ifade etmişlerdir. CLPHP'lerin, yer çekimi kuvvetine ihtiyaç olmadan çalışabilmesi için minimum 16 döngüye sahip olması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Zhang (2004) kapalı döngülü atımlı ısı borularının, termodinamik ısı salınım özelliklerini incelemiştir. Çalışmada kullanılna ısı borusu, iç çapı 1.18 mm olan ve 0.14 mm et kalınlığında kılcal bir boru türüdür. Deneyler, 5 – 60W ısı güç ve $\%60 - \%90$ dolum oranı aralığında, üç farklı akışkan (FC-72, etanol ve deiyonize su) kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlara göre, yüzey gerilimi doğrudan ısı salınım özellikleriyle ilişkilidir. Bu kapsamla, en düşük yüzey geilimi FC-72 akışkanında görülmüştür. Bu doğrultuda daha küçük salınım genliği ve daha kısa salınım döngü süresi belirlenmiştir. İlgili tüm akışkanlar için optimum dolum oranı $\%70$ 'dir. En düşük ısı güçte çalışmaya başlayan akışkan FC-32 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma koşulları esnasında performans olarak en iyi iş akışkanı su olduğunu ifade etmişlerdir.

Charoensawan ve Tertoon (2008) yatay olarak konumlandırılan bakır atımlı ısı borusunun ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Değişken parametreler; buharlaştırıcı bölge uzunlukları, kanal sayısı, boru iç çapı ve iş akışkanıdır. İş akışkanı olarak, etanol ve su kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, bir PHP'nin ısı performansını evaporatör uzunluğunu azaltarak ve/veya evaporatör sıcaklığı artırarak iyileştiği görülmektedir. PHP'nin yatay konumda çalışabilmesi için minimum döngü

sayısı olması gerektiği belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan genel değerlendirmede en iyi iş akışkanı su olduğunu belirtmişlerdir.

Wang vd. (2009) farklı iş akışkanlar ile yüklenen atımlı ısı borusunun ısı transfer performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, iç çapı 1.3 mm ve dış çapı 2.5 mm olan bakır boru kullanılmıştır. %50 dolum oranında, FS-39E mikrokapsül akışkan, Al_2O_3 nano akışkan ve su olmak üzere üç farklı iş akışkanı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, ısı transferinin arttırmanın en etkili parametre iş akışkanı olduğu gözlemlenmiştir. FS-39E mikrokapsül ve Al_2O_3 nanoakışkan ile yüklü PHP'de ısı transfer performansını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, en iyi iş akışkanı FS-39E mikrokapsül akışkanı olduğunu belirtmişlerdir.

Fumoto vd. (2010) yaptıkları deneysel çalışmada, kendi kendini ısılatma özelliğine sahip iş akışkanı ile yüklü PHP'nin performans etkisi incelemiştir. İş akışkanı olarak saf suya, 1-butanol veya 1-pentanol ilave edilerek kendi kendini ısılatan akışkan elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, butanol ve pentanol akışkanlarının saf su ile farklı karışım oranlarında karıştırılarak ısı direnci etkileyen parametreler üzerinde durulmuştur. Atımlı ısı borusu, kendini yeniden ısılatan akışkan sayesinde ısı taşıma özelliğini dört kat arttırdığını ifade etmişlerdir. Bunun altında yatan temel neden, kurumanın oluşmamasıdır. Pentanol-su karışımı, diğer akışkanlara (butanol-su çözeltisi ve saf su) göre atılım hareketi, düşük sıcaklıkta ve ısı performans olarak en iyisi olduğunu belirtmişlerdir.

Cheng vd. (2010) dört farklı düz plakalı atımlı ısı borusunun ısı transfer performansını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Aseton, su, elmas/aseton, altın/su ve elmas/su nanoakışkanları kullanılan iş akışkanlarıdır. Isıl performansı belirlemek için matematiksel bir model sunulmuştur. Isıl direncin giriş gücüne ve çalışma sıcaklığına bağlı olduğunu ve iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında daha düşük ısı direnç değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir. Ancak, düşük ısıtma gücünde, yüksek konsantrasyonlu nanoakışkan uygulandığında PHP performansının kötüleştiği ifade edilmiştir. Bu durumun, nanoparçacıkların akış pasajlarını tıkamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Qu vd. (2012) trapez kesitli silikon malzemeden üretilmiş, üç farklı PHP için çalışmaya başlama, ısı transferi ve akış özelliklerini eş zamanlı görüntü alınarak analizini yapmıştır. Trapez kesitinin hidrolik çapı sırasıyla 251 μ m, 352 μ m, 394 μ m

olarak belirtilmiştir. Kanalların kesitleri yamuk şeklinde ve iş akışkanları R113, FC-72, su ve etanoldür. İlgili iş akışkanlarını, farklı dolum oranları, eğim açıları ve ısı yüklerde çalışılmıştır. İş akışkanı, R113 veya FC-72'nin biri ile yüklü olan PHP, çalışmaya erken başlamıştır, diğer iş akışkanlarına kıyasla (su ve etanole). Bunun nedeni su ve etanolün termofiziksel özellikleri dikkate alındığında düşük $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip olması ve aynı sıcaklıkta yüksek viskozite, gizli ısı ve yüzey gerilimine sahip olmasıdır. Bu durum, sistemin başlama performansını etkileyen parametrelerden biridir. Düşük ısı yüklerde, iş akışkanı olarak R123 akışkanı FC-72'ye göre daha iyi ısı performans göstermiştir. R113 iş akışkanı düşey konumda, en iyi ısı direnç değerini artan hidrolik çap ile sırasıyla, %52, %55 ve %47 dolum oranlarında elde edilmiştir. Yatay pozisyonda ise ısı direnç düşmektedir.

Chien vd. (2012) düz plakalı kapalı döngülü PHP'lerin kanal çapı değişimiyle ilgili yeni bir konsept önermiştir. 16 paralel kanaldan oluşan, sırasıyla, her bir komşu kanalın $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ve $1 \times 2 \text{ mm}^2$ kesit alanlarına sahip olduğu FP-CLPHP tasarlayarak dengelenmemiş ek kılcallık kuvveti oluşturmayı ve böylece akışkan hareketini desteklemeyi amaçlamıştır. Üç farklı dolum oranı (%40, %50, %60 ve %70) ve dört farklı eğim açısında (0, 30, 60, 90°) çalışmış ve akışkan olarak saf su kullanmışlardır. Yatay konumda $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ sabit kesit alanına sahip üniform kanallı ısı borusunun çalışmadığını ancak üniform olmayan kanalın yeterli dolum oranı (≥ 50) sağlandığında çalışabildiğini belirtmişlerdir.

Pachghare ve Mahalle (2013) kapalı döngülü atımlı ısı borusunu, iç ve dış çapı sırasıyla 2 mm ve 3.6 mm olan 10 döngülü kılcal boru kullanılarak tasarlamıştır. Deneyler, %50 dolum oranı, 90° (dik) eğim açısı ve farklı iş akışkanları ile deneysel olarak çalışmışlardır. Performans incelemesi, saf akışkanları (su, etanol, metanol ve aseton) birbirleri ile ikili karıştırarak yapmışlardır. İkili karışımlar ve saf akışkanların ısı dirençlerinde görece bir farklılık görülmemiştir. Saf aseton diğer tüm akışkanlara göre daha iyi ısı performans gösterdiği belirtilmiştir. İkili karışımlarda su-metanol diğer ikili karışımlara göre ısı direnç değerleri düşük gelmiştir.

Clement ve Wang (2013) yapılan deneysel çalışmada, PHP'nin bir proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerinin kümelenmiş ısı yayma gereksinimini taklit etmek için farklı koşullar altında incelemiştir. İncelenen PHP, 46.80 cm uzunluğunda ve 14.70 cm genişliğinde olup, iç çapı 0.3175 cm olan bakır bir borudan üretilmiştir.

Isı borusunun performansını, ısıtıcı güç, iş akışkanı ve farklı dolum oranlarına bağlı parametreleri değiştirerek test etmişlerdir. İş akışkanı olarak aseton, metanol ve su kullanmışlardır. Isıl performans bakımından, en iyi akışkan olarak metanol önerilmiş ve optimum dolum oranı %45 olarak belirtilmiştir. İncelenen koşullarda, PHP'nin PEM yakıt hücreleri için pasif bir soğutma yöntemi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Qu ve Wang (2013) 1.2 mm, 2 mm ve 2.4 mm iç çaplarından oluşan, bakır kılcal kanallara sahip üç farklı ısı borusu tasarlamıştır. 90° (dikey) eğim açıda konumlandırılan CLPHP'nin ısıl performansı üzerinde; iş akışkanı, ısı yük, dolum oranı, iç çap ve evaporatör uzunluğu gibi deneysel parametrelerde çalışmışlardır. Kapalı döngülü atımlı ısı borusunda, iki farklı iş akışkanı olarak etanol ve su kullanılmıştır. Su veya etanol ile doldurulan CLPHP'nin artan dolum oranları ile eş zamanlı ısıl direnci de artmıştır. İş akışkanı, boru iç çapı, dolum oranları ve buharlaştırıcı uzunluğunun birleşik etkileri ile ısı transfer performansı arasında yakın bir ilişki olduğu belirtmişlerdir. Etanol ile doldurulan CLPHP'nin ısıl direnci, su ile yüklenen ısı borusuna kıyasla daha düşüktür ve dolayısıyla yüksek ısıl performansa sahip olduğu ifade etmişlerdir. Etanol yüklü CLPHP için optimum buharlaştırıcı uzunluğu değerleri, %40, %50 ve %60 dolum oranlarında sırasıyla 5 cm, 5 cm ve 7 cm'dir. Bununla birlikte, su ile doldurulan ısı borusu için optimum buharlaştırıcı uzunlukları, aynı dolum oranları için, sırasıyla, 5 cm, 7 cm ve 7 cm olarak belirtmişlerdir.

Han vd. (2014) deiyonize su, metanol, etanol ve aseton gibi farklı iş akışkanları ile doldurulan PHP'nin akış ve ısı transfer performansı ile iş akışkanlarının termofiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemiştir. Bakır tüp şeklinde, 10 döngülü kapalı PHP'de alttan ısıtma modunda çalışılmıştır. Her bir iş akışkanı için buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgesindeki sıcaklık salınımları farklı dolum oranları (%20 - %95) ve ısı girişinde (5-100 W) test edilmiştir. Aynı dolum oranı için, kaynama noktası ve buharlaşma gizli ısısı daha düşük olan iş akışkanı ile (aseton) yüklenen PHP'de yerel olarak kısa süreli kuruma ve buna bağlı olarak ani sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Dinamik viskozitenin yüksek olmasının salınımı sürdürmek için daha fazla güç gerektirdiğini ve yüksek $(dp/dT)_{sat}$ değerinde sıcaklıktaki düşük bir artışın basınçta yüksek bir artışa neden olmasından dolayı akışkan hareketi için büyük

sürücü kuvvetler oluşturduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, dinamik viskozitenin yüksek ve $(dp/dT)_{sat}$ değerinin küçük olmasının iş akışkanının yavaş hareket etmesine ve ısı transferinin kötüleşmesine neden olduğu belirtilmiştir.

Tseng vd. (2014) üniform ve değişen tüp çapının CLPHP'lerin ısı performansına olan etkisini araştırmıştır. Üniform tip CLPHP, iç çapı 2.4 mm olan tüpten oluşturulmuştur. Değişken çaplı kanallara sahip ısı borusunda ise her bir döngüdeki borulardan biri 2.4 mm çapında iken komşu boru 1.5 mm çapında olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneyler, yatay ve düşey konumlarda yapılmıştır. İş akışkanı olarak su, metanol ve HFE-7100 kullanılmıştır. Yatay konumda, değişken kanallı tasarımın, üniform tasarımlı ısı borusuna kıyasla, daha düşük ısıtma gücünde çalışmaya başladığı ve daha küçük ısı dirence sahip olduğunu belirtmişlerdir. Düşey konumda ısı direnç (kuruma olmadığı sürece) tüm iş akışkanları için artan ısıtma gücüne karşı sürekli bir düşüş göstermiştir. HFE-7100 ile doldurulan CLPHP'nin düşük ısıtma güçlerinde (<60 W), kolayca çalışmaya başlayabildiği ve ısı direncinin diğer akışkanların kullanıldığı durumlara kıyasla düşük olduğu ifade edilmiştir. Bunun sebebi, HFE-7100 akışkanının yüksek $(dp/dT)_{sat}$ ve düşük viskozite değerine sahip olmasına atfedilmiştir. Yüksek ısıtma güçlerinde ise iğır akışkanlara kıyasla, daha yüksek özgül ısı ve gizli ısı değerine sahip olan su ile doldurulan CLPHP'nin en düşük ısı direnci sunduğu belirlenmiştir.

Zhu vd. (2014) su ve asetondan oluşan ikili karışımla yüklü PHP'nin çalışmaya başlama ve ısı transfer performansını deneysel olarak incelemiştir. Farklı karışım oranları (13:1, 4:1, 1:1 1:4 ve 1:13), dolum oranları (35-70%) ve ısı güç değerlerinde (10-100 W) çalışmışlardır. Düşük dolum oranlarında (%35 ve %45) su-aseton karışımlı atımlı ısı boruları (4:1, 1:1 1:4 ve 1:13) saf akışkanlarla yüklü ısı borularına kıyasla kurumaya karşı daha iyi performans sunmaktadır. 50 W'ın altındaki ısı yük değerlerinde su-aseton karışımıyla yüklü ısı borusunun ısı direnç değerinin saf akışkanlara kıyasla %33.6 ile %68.9 arasında daha düşük olduğu belirtilmiştir. Buna karşın, %62 ve %70 gibi yüksek dolum oranlarında saf akışkanlarla yüklü ısı borularının ısı performansı karışım kullanılan durumlara kıyasla daha yüksektir.

Caihang vd. (2015) iç ve dış çapı, sırasıyla, 2 mm ve 3 mm olan üniform bakır borudan yapılmış PHP'nin, ısı performans sonuçlarına odaklanmıştır. Kullanılan iş akışkanının etanol ve aseton olmasının yanı sıra, 1:1, 1:3, 1:6, 3:1, 6:1 karışım

oranlarında etanol-aseton akışkan çiftleri incelenmiştir. Deneyler farklı dolum oranları (%30, %50, %70), eğim açıları (0°, 45°, 90°) ve ısı güç aralığında (10-50W) yapılmıştır. Sonuç olarak, karışımdaki asetonun karışım oranı arttıkça, dolum oranı fark etmeksizin ısı direnç değeri azalmıştır. Ayrıca ısı güç arttıkça ısı direnç değerindeki azalış durumu daha belirgin hale gelmiştir. En iyi ısı performans değeri, karışım oranı 1:6, eğim açısı 90° ve dolum oranı %50 için elde edilmiştir.

Kwon ve Kim (2015) farklı kesit alanına sahip kanal çiftlerinden oluşan mikro PHP'nin akış ve ısı transfer özelliklerine odaklanmıştır. Silikon plaka üzerine dikdörtgen kanallar açılmış olup, döngü sayısı 5'tir. Deneyler tek dolum oranında (%50) farklı ısı güç ve eğim açıları yapılmıştır. Kullanılan iş akışkanı etanol ve FC-72'dir. Yatay konumda, çalışılan tüm ısı güç değerlerinde, farklı kesitli mikro PHP'lerin üniform kesitli mikro PHP'ye göre daha düşük ısı dirençlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum ısı borusundaki farklı kanal çaplarından kaynaklanan kılcallık basınç farkıyla (dengelenmemiş kılcallık basıncı) ilişkili olduğu belirtilmiştir. Kanallar arasındaki kesit farkından dolayı, dengelenmemiş kılcallık basıncı oluşmakta ve bu basınç değerinin viskoz basınç kayıplarından daha büyük olması sebebiyle, ısı borusunun eğim açısından bağımsız olarak çalışabileceğini ifade etmişlerdir.

Yang vd. (2015) iş akışkanın termo-fiziksel özellikleri ile üniform olmayan mikro kanallı atımlı ısı borularının ısı performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Üniform olmayan yapı farklı genişliğe sahip (0.5 mm ve 0.3 mm) mikro kanalların bir döngüde kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Silikon tabanlı ısı borusu kullanılmış olup, ısı boruları dikdörtgen kesitli 64 paralel kanala sahiptir. Kanal derinlikleri 0.25 mm olarak sabittir. İş akışkanı olarak deiyonize su ve metanol kullanılmış ve %80 dolum oranında, düşey konumda çalışılmıştır. Suyla yüklenen ısı borusunun, ilgili deneysel aralıkta hiçbir koşulda çalışmadığını buna karşın, metanol yüklü ısı borusunun 6W'dan büyük ısıtma güçleri altında çalışabildiğini belirtmişlerdir. Suyun buharlaşma gizli ısısının ve yüzey geriliminin yüksek olması ve buna ek olarak ilgili Bond sayısının düşük olmasının, su yüklü ısı borusunun çalışmaması üzerindeki temel faktörler olduğunu belirtmişlerdir.

Cui vd. (2016) farklı dolum oranları (%45, %62, %70, %90), karışım oranları (2:1, 4:1, 7:1) ve ısı yüklerde (10-100W) metanol bazlı ikili karışımlarla (metanol-su, metanol-aseton, metanol-etanol) yüklenen kapalı döngülü atımlı ısı borularının

(CLPHP) ısı direnç karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. %45 gibi düşük dolum oranlarında metanole su eklenmesinin, yüksek ısı yükler altında kurumayı önlediğini ve aseton-metanol karışımlarının saf aseton ve metanole kıyasla daha düşük ısı direnç sunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca %62, %70 ve %90 gibi yüksek dolum oranlarında karışımların ve saf akışkanların, genel karakter olarak benzer ısı performans gösterdiğini (metanol-su karışımı hariç) ifade etmişlerdir.

Han vd. (2016) iç ve dış çapı, sırasıyla, 2 mm ve 4 mm olan, 5 döngülü, ikili karışımlarla yüklü kılcal boru tipindeki atımlı ısı borusunun deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanı olarak kullanılan ikili karışımlar su-aseton, su-etanol ve su-metanoldur. İlgili zeotropik ikili karışımlara ek olarak karışımlardaki her bir akışkan bileşenini tekil olarak da incelemiştir. Deneyler; farklı karışım oranları (13:1, 4:1, 2:1, 1:1, 1:4, 1:13), dolum oranları (%35, %45, %55, %62, %70) ve ısı yükler (10-100W) altında düşey konumdaki ısı borusu için yapılmıştır. Küçük (%35 ve %45) veya orta (%55) düzey dolum oranı değerlerinde, zeotropik karışımların faz değişim engelleme etkisi sebebiyle saf muadillerine, kıyasla kuruma direnci açısından, genel olarak üstünlük sağladığı belirtmişlerdir. Buna karşın yüksek dolum oranlarında ikili karışımlarla yüklü ısı borularının ısı performansı, saf akışkanlarla yüklü ısı borularına kıyasla daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Spinato vd. (2016) iş akışkanı olarak R245fa ile yüklenen, tek döngülü bir kanala sahip mikro CLPHP'nin sıcaklık değerlerini ve akış desenlerini analiz etmiştir. Çalışmalar; 0° ve 90° eğim açıları, %10-%90 dolum oranı aralığında ve 2W-60W ısı yük aralığında yapılmıştır. Mikro CLPHP'deki akış geçiş modelleri ve ısı direnç ölçümleri birlikte analiz edilerek, iş akışkanının çalışma haritasını oluşturmuşlardır. İlgili haritalar ve ölçülen ısı direnç sonucunda, iki fazlı akış modelinin mikro CLPHP'nin performansını etkilediğini ifade etmişlerdir. Buharlaştırıcı bölgesinde, oluşan halkasal ve/veya yarım halkasal akış deseninin ısı performansı iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Düşük ısı dirençleri, yüksek ısı yüklerde ve düşük dolum oranlarında elde edilmiştir. İnce film buharlaşmasının toplam yerel ısı transfer katsayısı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve ilgili fiziksel olayın mikro CLPHP'de baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca akış geçiş hareketleri ve mikro CLPHP'deki ısı performansın yer çekimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Shi vd. (2016) etanol bazlı iş akışkanlar (etanol-su, etanol-metanol ve etanol-aseton) ile yüklenen atımlı ısı borusunun, farklı dolum ve karışım oranlarında ısıl direncini incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yüksek dolum oranlarında (%62, %70 ve %90) saf akışkanlarla yüklü ısı borusunun ısı transfer performansı, ikili karışımlarla yüklü ısı borularından daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. %45 dolum oranında etanol-su (karışım oranı 2:1) iş akışkanı ile yüklü ısı borusunun ısıl direnci, saf etanol veya su ile yüklenen ısı borusundan daha düşük bir ısıl direnç değerine sahiptir. İlgili iş akışkanlarının düşük dolum oranlarında (%45 ve %55), ikili karışımlarla yüklü ısı borularında kurumayı geciktirir ve ısıl direnci azaltır. Bunun sebebi faz-değişim engelleme etkisidir.

Jang vd. (2017) FC-72 iş akışkanı ile yüklenen ve paralel kanalları arasında farklı geometrik ilişkiler bulunan düz plakalı PHP'nin ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Isıl performans üzerinde etkisi incelenen geometrik özellikleri, bir döngüdeki kanal çiftinin kesit alanları oranını ifade eden asimetri oranı (1- 4) ve bir döngüdeki kanalların genişlikleri toplamının her iki kanalın yükseklikleri toplamına oranını ifade eden boyut oranı (2.5 – 5) olarak belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, optimum asimetrik oranın boyut oranına kıyasla, uygulanan ısıl yüke daha fazla bağımlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu kapsamda, 6W ve 12W ısıtma güçlerinde, optimum asimetrik oranı ve boyut oranı, sırasıyla, 4 ve 2.5 olduğunu, buna karşın 18W ısıl yük altında boyut oranı için optimum değerin sabit kalırken, asimetrik oranın ısıl açıdan en ideal değerinin 4'ten 1.5'e düştüğünü belirtmişlerdir.

Kang vd. (2017) sabit dolum oranında, (%70) iş akışkanı deiyonize su ve su bazlı manyetik nanoakışkan ile yüklenen PHP'nin ısıl performansını deneysel olarak incelemiştir. Atımlı ısı borusu, iç ve dış çapı sırasıyla 3 mm ve 6 mm, cam tüplerden 5 döngüye sahiptir. Farklı ısıl yüklerde (20W, 55W, 90W, 125W, 160W) ve dikey konumda çalışılmıştır. Isıl yük arttıkça, ısıl direncin azaldığını belirtmişlerdir. Nanoakışkan ile yüklü PHP'de, nanoakışkanın artan hacim ile ısıl direncin azaldığını ve ayrıca, nanoakışkan kaynamanın olduğu bölgede birikmesi, kabarcık oluşumunun arttırdığını gözlemlemişlerdi. Yüksek ısıl yükte (160W) manyetik alandan bağımsız ısıl direncin düşük olduğunu ve akış modeli için halkasal akışın baskın olduğunu belirtmişlerdir.

Patel vd. (2017) iç çapı 2 mm ve 9 döngüye sahip CLPHP'nin çalışmaya başlama ve ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. İş akışkanı, saf akışkan (deiyonize su, etanol, metanol ve aseton) ve su bazlı yüzey aktif madde çözelti (sodyum dodesil sülfat) karışımı yapılarak, toplamda on bir iş akışkanı üzerinde inceleme yapmışlardır. Saf deiyonize su ile yüklü CLPHP'nin, su bazlı ikili akışkanalar ve yüzey aktif madde çözeltilerine kıyasla CLPHP'nin, çalışmaya başlaması ve ısı performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Tüm iş akışkanlarında CLPHP'de, 20W ısı yük altında salınım hareketi görülmemiştir. Saf deiyonize su ile yüklenen CLPHP'nin, diğer iş akışkanlarına kıyasla yüksek ısı yük altında salınım hareketi yapmıştır. Ancak saf deiyonize su ile karıştırılan diğer iş akışkanları ve su bazlı yüzey aktif maddelerin, iş akışkanının yüzey gerilimini azaltıp CLPHP'nin düşük ısı yüklerde çalışmaya başlamasını sağlamıştır.

Wang vd. (2017) farklı dolum oranlarında ikili karışımlarla yüklü, atımlı ısı borusunun ısı transfer performansını ve akış özelliklerini analiz etmiştir. Çalışma kapsamında, iş akışkanı olarak aseton bazlı ikili karışımlar (aseton-deiyonize su, aseton-metanol, aseton-etanol) kullanılmıştır. Saf aseton ile yüklü PHP çalışmaya erken başlamıştır. Çünkü kaynama noktası, özgül ısı ve buharlaşma gizli ısı düşük olmasından dolayıdır. Ancak yüksek ısı yükler altında erken kuruma görülmektedir. Bu nedenle, asetona yüksek özgül ısı ve buharlaşma gizli ısına sahip diğer bir iş akışkanı eklenmesiyle ısı transferi iyileştirilebilir. Örneğin, aseton-su karışımında asetonun kaynama noktası düşük iken suyun kaynama noktası yüksek olmasından dolayı, PHP içindeki kurumayı geciktirmiştir. Yüksek ısı gücünde, aseton-su iş akışkanı ile yüklü PHP'nin ısı direnci, saf aseton ve saf su ile yüklü PHP'nin arasında gelmiştir. Ancak PHP'nin ısı direnci, aseton-metanol 2:1 ve aseton-etanol 4:1 ikili karışım oranları, saf akışkanlara kıyasla daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Aseton ile su karşılaştırıldığında, PHP'deki kurumanın geciktirdiğini; orta düzeyli dolum oranında (%55), PHP'nin ısı transfer performansının hem faz geçiş özelliklerinden hem de iş akışkanlarının termo-fiziksel özelliklerinden etkilendiği; yüksek dolum oranlarında ise (%62 ve %70), PHP'nin aseton bazlı karışımlarıyla olan ısı transfer performanslarının saf aseton ile olan durumdan daha kötü olduğunu ifade etmişlerdir.

Nazari vd. (2018) sabit dolum oranı (FR=%50) ve farklı karışım oranlarında (0.25 g/lit, 0.5 g/lit, 1 g/lit, 1.5 g/lit) su bazlı, grafen oksit ile yüklenen atımlı ısı

borusunun, ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Saf suya eklenen grafen oksit ile PHP'nin ısı direnci yaklaşık %42 azaltmıştır. Ayrıca, yüksek karışım oranında (1.5 g/lit), diğer karışım oranlarına kıyasla ısı performansını kötüleştirdiğini gözlemlemiştir. Bunun sebebi olarak, nanoakışkanın dinamik viskozitesi yüksek olmasıdır. Yüksek dinamik viskozite, PHP'lerde akışkan salınımını sönümler ve bu yüzden ısı direnci arttırdığını ifade etmişlerdir.

Pradeep vd. (2018) iç ve dış çapı, sırasıyla, 2 mm ve 3 mm olan, 5 döngülü, dikey konuma sahip kapalı döngülü atımlı ısı borusunun ısı performansını incelemiştir. Çalışma kapsamında, değişken parametreler ise ısı yük, dolum oranı ve iş akışkanıdır. İş akışkanı, farklı saf akışkanları (aseton, etanol ve metanol) tek bir karışım oranındaki (1:1) ikili karışımlardır (aseton-etanol ve etanol-metanol). Ayrıca, saf akışkanlarında kendi bileşenleri arasında ısı performansını karşılaştırmışlardır. Saf akışkanlar için en düşük ısı direnci ve en iyi ısı transferi asetonda olduğunu ifade etmişlerdir. İkili karışımlar arasında, en iyi iş akışkanı ise aseton-etanol olduğunu belirtmişlerdir.

Xing vd. (2018) deiyonize su ve yüzey aktif maddenin (setil trimetil amonyum bromür) karışımı ile yüklenen atımlı ısı borusunun ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Yüzey aktif maddenin iş akışkanına eklenmesiyle, iş akışkanının yüzey gerilimini azalttığını ve ayrıca kurumayı geciktirdiğini, bu yüzden de ısı transferini arttırdığını gözlemlemiştir. Yüzey aktif çözelti ile yüklü PHP'nin ısı transferini iyileşmesi için, akışkan salınım hızına ve düşük ısı gücü altında çalışmaya başlamasına bağlıdır. Düşük dolum oranlarında (%10 ve %30) PHP'e, 40W ısı yükü altında çalışmaya başladığını ve düşük ısı direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Yüksek dolum oranlarında (%50, %70, %90) ise artan ısı yükü ile ısı direncinin azaldığını gözlemlemiştir.

Wang vd. (2019) CLPHP'nin çalışma mekanizmasının, farklı başlangıç basıncı ve ısı yük değerlerini değiştirerek üç boyutlu sayısal bir çalışma yapmıştır. Mevcut çalışmada iş akışkanı olarak deiyonize su ve yüzey aktif madde (heksaedesil trimetil amonyum klorür) karışımı kullanmışlardır. CLPHP'nin yüksek başlangıç basıncı (0.1 MPa) altında ısı direnci, yüzey aktif madde ile yüklenen CLPHP'nin performansı, deiyonize su ile yüklü CLPHP'ye göre daha yüksektir. Bunun sebebi, düşük yüzey gerilimine sahip yüzey aktif maddenin yüksek basınç altında salınım hareketini

destekleyemeyeceğini ifade etmişlerdir. Düşük başlangıç basınç koşullarında (0.05 MPa ve 0.07 MPa) ve yüksek ısı yükleri (30W ve 40W) altında, yüzey aktif madde ile yüklü CLPHP'nin ısı direnci, diğer iş akışkanına kıyasla düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Xu vd. (2019) ürettikleri üniform kanallara sahip düz plakalı atımlı ısı borusunun, çalışma özelliklerini ve ısı transfer performansını deneysel olarak incelemiş ve ayrıca PHP'deki akış desen karakteristikleri üzerine analiz yapmıştır. Çalışma kapsamında zeotropik karışmayan ikili karışımlar ile yüklü PHP'nin ısı direnci için, farklı eğim açıları, ısı yükleri ve karışım oranlarında çalışmışlardır. Dolum oranı ise %50 olarak sabit tutulmuştur. Saf HFE-700 ile yüklü PHP'nin, 210W ısı yükü altında ısı direncinin yüksek olduğunu ve buharlaştırıcı bölümünde kuruma görülmüştür. Ancak ikili karışımlarda, kuruma görülmedi ve ısı dirençleri hemen hemen aynı eğimde gelmiştir. Su-HFE-700 2:1 karışım oranı ile yüklü PHP'de en düşük ısı direnç değerini elde etmişlerdir. Yüksek eğim açılarında (75° ve 90°) yer çekimin etkisi ile ısı transfer performansını arttırdığını belirtmişlerdir.

Kim vd. (2020) hidrolik çapı 667 µm olan dikdörtgen kesitli kanallardan oluşan ve farklı iş akışkanları ile yüklenen mikro PHP'nin ısı direncini hesaplamıştır. Ayrıca, eş zamanlı olarak yüksek hızlı kamera tarafından akış görüntüleme ile desteklemiştir. Mikro PHP'nin ısı direnci, iş akışkanlarının sırasıyla, etanol, FC-72, HFE-700, R-245fa ve R-134a kullanılması ve kondenser bölümündeki ısı alıcısının giriş sıcaklık değeri artırılmasıyla (-10°C-60°C) azalmıştır. Akış görüntüleri incelendiğinde, ısı direncinin azalması, yoğuşurucu bölümünde bulunan iş akışkanının ortalama karışım oranının artmasıyla ilgilidir. Bu artış devam ettikçe, faz değişim olayının daha çok oluşmasından dolayı, yoğuşurucu bölümündeki gizli ısı transferini artırır. Ayrıca akışkan hareketi için, ivmelenme ve sürtünme basınç düşümü ile ilgili olduğunu hipotez etmişlerdir.

Czajkowski vd. (2020) farklı adyabatik kesit uzunlukları (500 mm, 750 mm, 1000 mm) ve iş akışkanlarına (aseton, etanol ve su) sahip atımlı ısı borusunun ısı performansını incelemiştir. PHP'nin, iç çapı 2.5 mm ve 14 döngüye sahip kılcal bir borudan tasarlanmıştır. Tüm çalışma koşulları altında su ile yüklü PHP'nin, diğer iş akışkanlara kıyasla, daha kararlı bir performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. İş akışkanı su ile doldurulan PHP için, yüksek ısı yükleri altında optimum dolum oranı

%75 olarak belirtilirken, daha düşük ısı yükler altında ise %50 olduğunu gözlemlemişlerdir. Genel olarak, iç hacminin artması ile optimal dolum oranının da arttığını ifade etmişlerdir. Kısa adyabatik kesit uzunluğuna sahip PHP'de, akışkanın sirkülasyon hareketi daha hızlı başlamıştır. Adyabatik kesit uzunluğunu artırarak, eğilim kuruma etkisi görülmezse daha yüksek ısı akılarını elde etmek mümkündür.

Wang vd. (2020) farklı ısıtma derecesine (5°, 33°, 147°, 175°) sahip CLPHP'nin, ısı transfer performansını ve salınım hareketini sayısal olarak incelemiştir. CLPHP'nin çalışma performansını hem temas açısı hem de ısı yük ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Düşük ısı yük altında (10W), hidrofobik ve süper hidrofobik yüzeyli CLPHP'nin, hidrofilik yüzeyli CLPHP'den düşük ısı dirence sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak yüksek ısı yükler altında (20 W, 30 W, 40 W), hidrofilik yüzeye sahip CLPHP'nin, hidrofobik yüzeye sahip CLPHP'den düşük çalışma dayanımına sahiptir. Temas açısı, CLPHP'nin kurumasını etkiler. Hidrofilik yüzeye sahip, yani temas açısı 5° ve 33° olan CLPHP'de kuruma olayını arttırabildiğini ifade etmişlerdir.

Xu vd. (2020) hibrit iş akışkanları (etanol-su, grafen nanoakışkan, su çözelti yüzey aktif madde) ile yüklenen PHP'nin ısı transfer performansını analiz etmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneyler kapsamında, hibrit iş akışkanları arasında az-katmanlı grafen nanoakışkan ile yüklü PHP'nin en iyi ısı performansına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Etanol-su karışımında, etanolün kaynama noktası ve buharlaşma gizli ısısının düşük, suyun ısı iletkenliği ve özgül ısısının ise yüksek olması PHP'nin ısı performansını iyileştirir. %30 etanol-su karışım oranıyla yüklenen PHP, diğer karışım oranlarına kıyasla daha iyi ısı performans sunmuştur.

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Atımlı ısı boruları; yüksek verimlilik, düşük maliyet, üretim kolaylığı ve sistem güvenilirliği açısından üstün avantajlar sağlamakta olup hem günümüzde uygulanabilir niteliktedir hem de geleceğe yönelik ısı kontrolle ilişkili beklentileri karşılama potansiyeline sahiptir. Bu kapsamla, modern ve/veya popüler ısı kontrol yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca pasif çalışma özelliğine sahip olması ve mikro üretime uygun olması sebebiyle mikro sistem uygulamalarında (elektronik/mekanik sistemlerin soğutulması) tercih edilme potansiyeline sahiptir.

Atımlı ısı borularının performansını etkileyen birçok parametre vardır. İlgili parametreler; dolum oranı, eğim açısı, ısı yük, akışkan türü (saf akışkan ve ikili ve üçlü karışımlar (ve/veya akışkan çiftleri) ile karışım oranı) ve geometrik yapı/tasarım olarak özetlenebilir. Yukarıda, belirtilen potansiyellerin ortaya konulabilmesi veya atımlı ısı borularından uygulamada daha fazla faydalanılabilmesi için kapsamlı deneysel incelemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda, tezin temel amacı, saf akışkanlar ile ikili ve üçlü karışım (ve/veya akışkan çiftleri) halindeki akışkanlarla yüklenen, farklı kesit alanı oranlarına sahip üniform olmayan yapıdaki iki farklı düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusunu kapsamlı çalışma parametreleri altında deneysel olarak incelemektir. Farklı iş akışkan türleri, bunların ikili ve üçlü karışımları, dolum oranları, ısı güçler ve eğim açısı değerleri altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deneyler süresinde, yüksek hızlı kamera kullanılarak akış görüntüleri alınmış ve fiziksel mekanizmanın irdelenmesinde görüntülerden faydalanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında, saf akışkanlar ve farklı hacimsel karışım oranlarında akışkanların tekil formu, ikili ve üçlü karışımlarıyla (ve/veya akışkan çiftleriyle) yüklenen üniform olmayan (tek bir döngüde değişken kesit alanına sahip) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borularında (FP-CLPHP) ısı transfer karakteristikleri ve akış olayları deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı hacimsel karışım oranları, dolum oranları, eğim açıları, ısı yük değerleri ve akışkan türleri için kapsamlı deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneyler esnasında, ölçümlerle eş zamanlı olarak, yüksek hızlı kamera ile görüntü alınarak, akış desenleri incelenmiş ve fiziksel mekanizmanın irdelenmesinde kullanılmıştır. Bu tez, üç temel kısım olarak ele alınmıştır. Deneyler kapsamında iki adet FP-CLPHP kullanılmıştır. Her bir ısı borusunda, bir döngüdeki paralel kanalların kesit değerleri birbirinden farklıdır. Akış görüntüleri saniyede 1000 kare olarak alınmıştır. Ayrıca tüm testlerde karışım oranı, dolum oranı, ısı yük ve eğim açısının birleşik etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

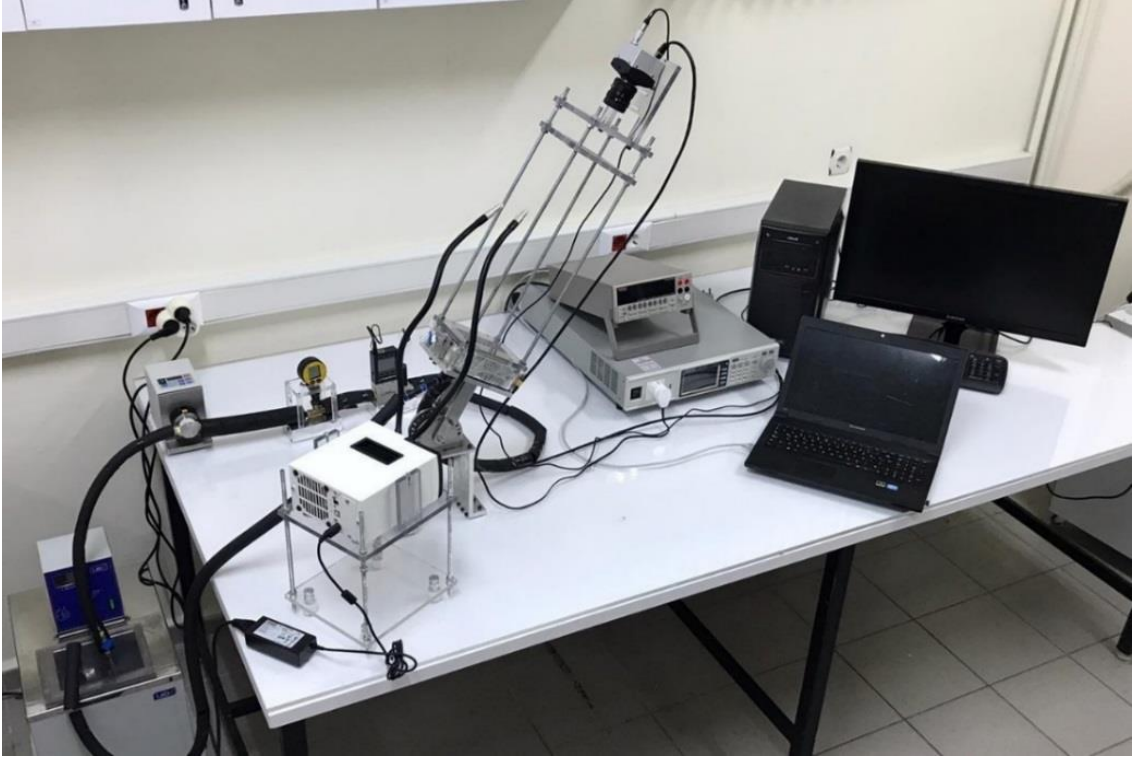
Birinci kısımda, değişken paralel kanallara sahip (2mm x 2 mm ve 1 mm x 2 mm) atımlı ısı borusunun, farklı dolum oranı (%30 ve %60), karışım oranı (1:1, 1:3 ve 3:1) ve eğim açısı (0 °ve 90 °) koşulları altında deneysel incelenmesi yapılmıştır. İş akışkanı olarak etanol ve pentan ikili karışımları kullanılmıştır.

İkinci kısımda, birbirleri ile karışabilen ve karışamayan ikili akışkanlarla yüklenen üniform olmayan (2mm x 2 mm ve 1.5 mm x 2 mm) FP-CLPHP'nin, tek dolum oranında (%50) deneysel incelemesi yapılmıştır. İş akışkanı olarak hekzan, pentan ve metanolün tekil formları ve ikili karışımları H:P, M:H ve P:M = 1:1, 1:4 ve 4:1) kullanılmıştır. Farklı konumlarda (yatay ve dikey) ölçümler alınmıştır.

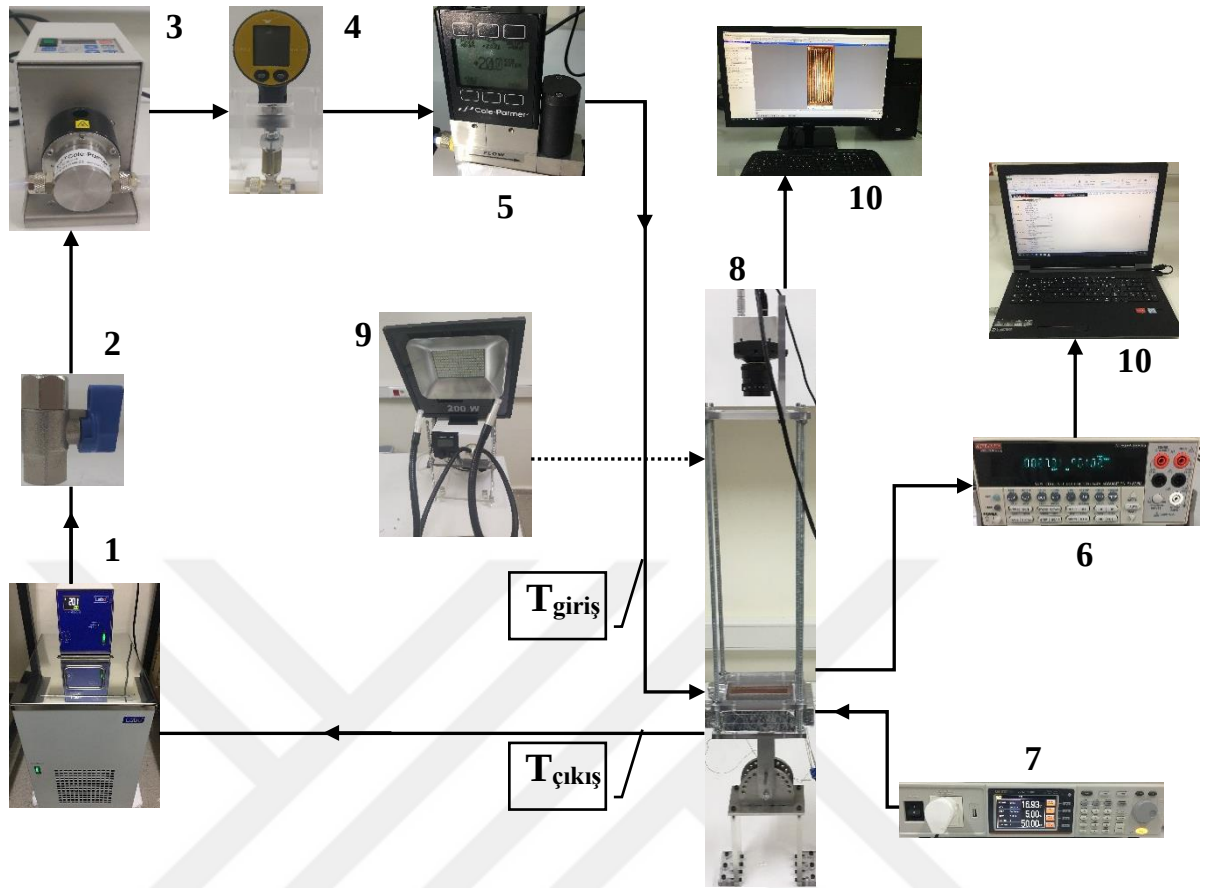
Üçüncü kısımda ise, farklı iş akışkanlarına sahip (su, metanol ve pentan) üçlü karışımlarla yüklü asimetric tasarımı (2mm x 2 mm ve 1.5 mm x 2 mm) düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusunun, farklı dolum oranı (%30, %50 ve %70), karışım oranı (1:1:1, 1:2:3 ve 1:3:2) ve eğim açısındaki (0° ve 90°) performansı deneysel olarak incelenmiştir. Her bir akışkanın saf hali de iş akışkanı olarak incelenmiştir.

2.1. Deney Düzenegi

Deneysel sistem, üç ana başlık altında incelenmiştir: (1) test bölümü (FP-CLPHP, ısıtıcı plaka, ısı alıcısı ve teflon gövde), (2) soğutucu ve ısıtıcı bölümü (sirkülasyon hattı ve ısıtıcı kaynak) ve (3) veri toplama-akış görüntüleme bölümü (masaüstü bilgisayar ve yüksek hızlı kamera). Deneysel sistemin fotoğrafı ve kapsamlı şematik resmi, sırasıyla Şekil 8 ve 9 ‘da sunulmuştur.



Şekil 8. Deney sistemine ait fotoğraf.



1. Sabit Sıcaklık Banyosu
2. Mini Küresel Vana
3. Dişli Mikro Pompa ve Sürücüsü
4. Manometre
5. Debi Ölçer

6. Veri Toplama Cihazı
7. AC Güç Kaynağı
8. Yüksek Hızlı Kamera
9. Işık Kaynağı
10. Bilgisayar

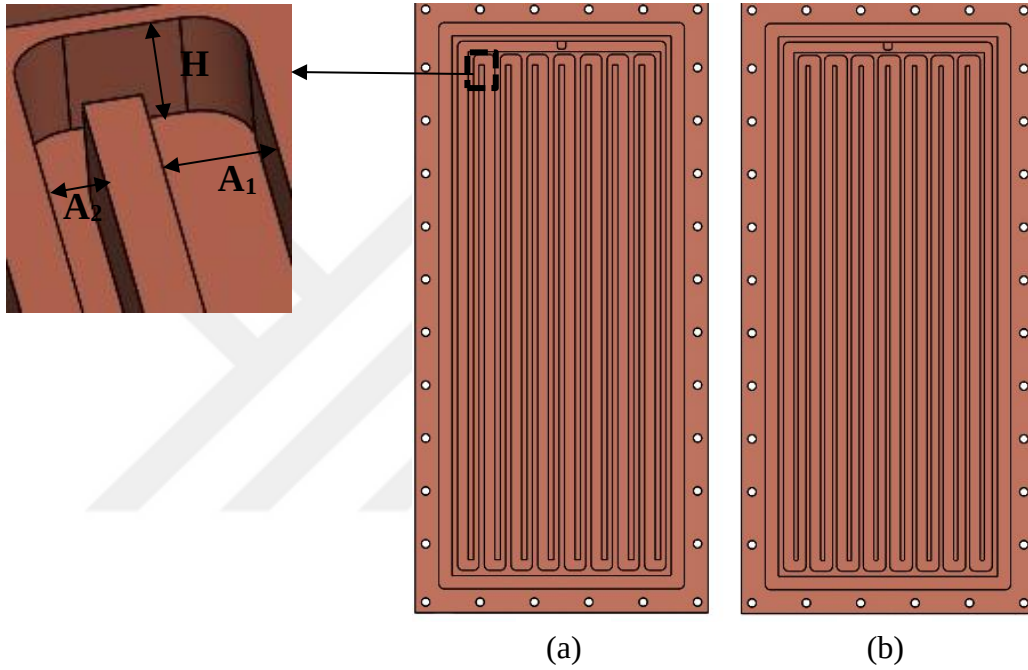
Şekil 9. Deney düzeneğinin şematik resmi.

2.1.1 Test Bölgesi

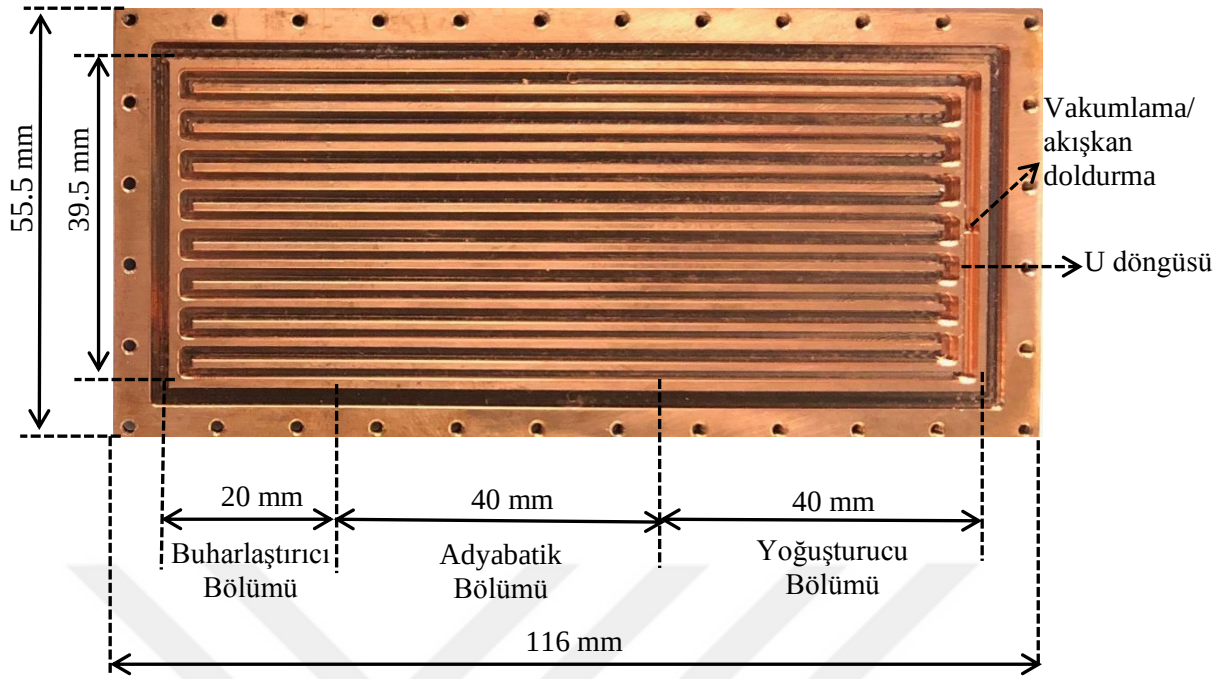
Test bölgesi, düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusu, ısıtıcı plaka, ısı alıcı ve teflon (Polytetrafluoroethylene, PTFE) gövdeyi içermesi sebebiyle düzeneğinin en önemli bölümüdür. Her bölüm detaylı olarak açıklanmıştır.

Çalışma kapsamında, saf bakır malzemeden üretilmiş iki adet düz plakalı kapalı döngülü atımlı ısı borusu kullanılmıştır. Isı boruları birbiriyle bağlantılı paralel kanallardan oluşmaktadır, ancak iki paralel kanal içeren her bir döngüdeki kanal kesit alanları birbirinden farklıdır. İki ısı borusunu birbirinden farklı kılan özellik ise her ikisindeki kesit alanı oranının birbirinden farklı olmasıdır. Burada, her iki ısı borusunun da kanal yükseklik değerinin 2 mm olarak sabit olduğu ve kesit alanındaki

değişimlerin kanal genişliği değiştirilerek elde edildiği belirtilmelidir. Şekil 10'da iki FP-CLPHP'nin katı model resmi ve kanal kesit görünüşü verilmiştir. Ayrıca, Şekil 11'de üretilen ısı borusunun fotoğrafı boyutları ile birlikte gösterilmiştir. Her iki ısı borusunun geometrik özellikleri ve boyutları ise Tablo 2'de detaylı olarak açıklanmıştır. Atımlı ısı borularının, toplam 8 döngü sayısı bulunmakta olup, plaka üzerinde birbiri ile bağlantılı 16 kanala sahiptir. Her iki ısı borusunun, kanal yüksekliği 2 mm olarak sabit alınmıştır.



Şekil 10. FP-CLPHP-1 (a) ve FP-CLPHP-2 (b) şematik resmi.



Şekil 11. Her bir FP-CLPHP'nin ortak geometrik özellikleri ve bölümleri

Tablo 2. Tez kapsamında kullanılan ısı borularının geometrik özellikleri ve boyutları

Tasarım Sayısı	Kanal Yüksekliği H (mm)	Kanal Genişliği A ₁ (mm)	Kanal Genişliği A ₂ (mm)
FP-CLPHP-1	2.0	2.0	1.0
FP-CLPHP-2	2.0	2.0	1.5

Not: Isı borularının her biri 116 mm x 55.5 mm x 4 mm boyutundadır.

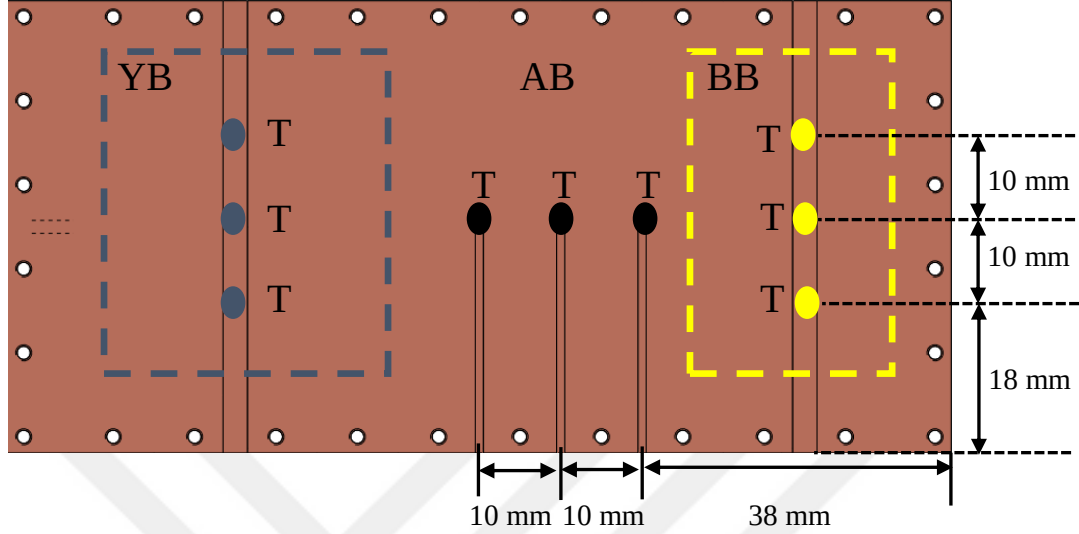
Tez kapsamında, deney esnasında eş zamanlı olarak akış görüntüleme yapıldığı için bakır plakanın üst yüzeyi plaka boyutunda 6 mm kalınlığında şeffaf cam plaka ile kapatılmıştır. Sistemin etkin çalışabilmesi için sızdırmaz kapalı bir ortam oluşturulmalıdır. Bu yüzden akış kanallarının dışına çevresel bir kanal daha açılmış ve buraya viton O-ring yerleştirilmiştir. Sızdırmazlığı desteklemek için pirinç malzemeden yapılmış çerçeve, 32 adet M2 cıvata bağlantısı aracılığıyla cam plakayı bakır ısı borusu malzemesine doğru sıkıştırmak için kullanılmıştır. FP-CLPHP'nin montajlı ve de-montajlı haline ait resim Şekil-12'de verilmiştir. Şekil-11'de belirtildiği gibi, atımlı ısı borusu buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Deneyler kapsamında, ilgili kısımların yüzey sıcaklıklarını

YB: Yoğuşturucu Bölümü

AB: Adyabatik Bölümü

T: Termo-elemanların yapıştırıldığı yüzey

BB: Buharlaştırıcı Bölümü



Şekil 13. Termo-elemanların ısı borusundaki yerleşimine ait şematik resim.

Test bölümünde bulunan ısıtıcı plaka ve ısı alıcısı teflon parçasının içerisine yerleştirilip, üzerine FP-CLPHP yerleştirilmiştir. Isıtıcı plaka 20 mm x 40 mm x 9 mm boyutlarında bakır malzemesinden yapılmıştır. Plakanın ısıtma görevi görmesi için içerisine 6.5 mm çapında iki adet kanal açılmıştır. Bu iki kanala her biri 120 W gücünde kartuş ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Isıtıcı plaka (b) ve kartuş ısıtıcıların (a) fotoğrafı Şekil 14’de verilmektedir.



(a)

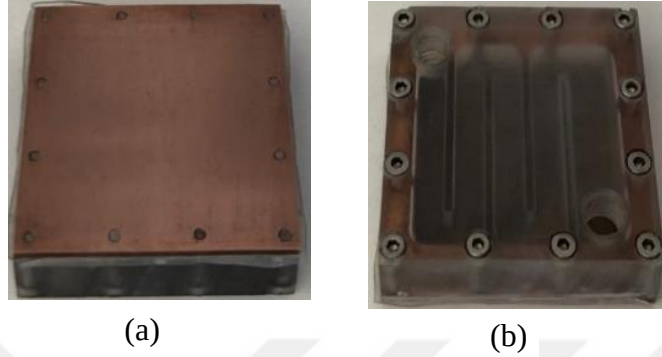


(b)

Şekil 14. Kartuş ısıtıcılar (a) ve ısıtıcı plaka (b)

Isı borusunun yoğuşturucu bölümü bir ısı alıcı üzerine yerleştirilmiştir. Üretilen ısı alıcısı, 40 mm x 40 mm x 12 mm olacak şekilde ve birbiri ile bağlantılı iki alt parçadan oluşmaktadır. Isı alıcısına ait detaylar Şekil 15a ve b’de sunulmuştur. Isı

alıcısı içerisinde, sirkülasyon hattında dolandırılan soğutucu akışkan (deiyonize su) geçmektedir. Isı alıcı giriş ve çıkışında, soğutucu akışkanın sıcaklık değerleri ölçülmektedir.



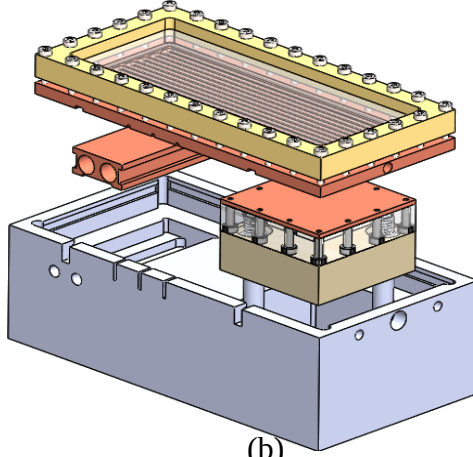
Şekil 15. Isı alıcısına ait detaylı fotoğraf; (a) üst yüzey ve (b) alt yüzey

Taşıyıcı gövde olarak teflon (PTFE) malzeme kullanılmıştır. Şekil 16a'da ısı borusunun Teflon gövdeye yerleştirilmiş haline ait fotoğraf, Şekil 16b'de ise ilgili yerleşimin demontajlı halinin 3 boyutlu çizimine ait görüntü sunulmuştur. Teflon malzeme, ısı iletim katsayısının düşük olması ($\sim 0.25 \text{ W/m. K}$), çalışma sıcaklık aralığının yüksek olması ve işlenebilir olması gibi özelliklerden dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca, sistemin ısı kaybını en aza indirmek için teflon gövdenin çevresi yalıtım malzemesi ile sarılmıştır ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



Montajlı
Fotoğraf

(a)

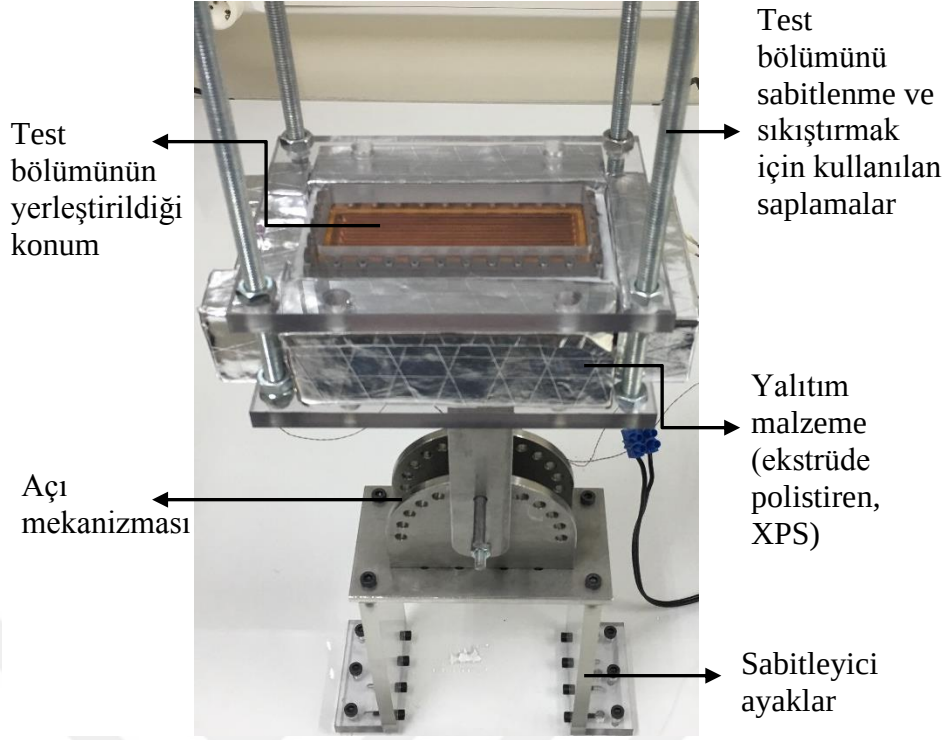


De-montajlı
Görünümü

(b)

Şekil 16. Isı borusunun Teflon gövdeye yerleşimine ait detaylar: fotoğraf (a) 3D de-montaj çizimi (b)

Deneysel sistemi bir bütün olarak taşımak ve farklı eğim açılarında çalışmasını sağlamak için hareketli bir mekanizma tasarlanmıştır. Değişken açısal konumda çalışmasını sağlaması için alüminyum çelik üzerine 15 derecelik delikler açıldı. Bu kapsamda, deney düzeneğinin farklı konumlarda (0 ve 90 derecede) yerleşimi sağlanabildi. Şekil 17’de test bölümünün bütün olarak detaylı resmi verilmiştir.



Şekil 17. Test bölümünün tam montajlı resmi

2.1.2 Soğutucu ve Isıtıcı Bölüm

FP-CLPHP'nin yoğuşturucu bölümü bir ısı alıcısı ile irtibatlıdır. Isı alıcısının aktif olarak kullanılabilmesi için bir akış hattı oluşturulmuştur. Akış hattında, temel olarak, sabit sıcaklık banyosu, pompa, akış ölçer ve sıcaklık ölçümü için termoelemanlar bulunmaktadır. Kapalı sistem olarak tasarlanan akış döngü hattının bir bileşeni de ısı alıcısıdır. Sabit sıcaklık banyosunda sıcaklığı ayarlanan ve pompa ve akış ölçer aracılığıyla istenilen debi değerine getirilen soğutucu akışkan ısı alıcıya gönderilir. Sirkülasyon hattında kullanılan akışkan deiyonize sudur. Suyun ısı alıcısına giriş sıcaklığı 20°C'a, akış hattındaki debisi ise 20 ml/dk'ya ayarlanmıştır. Isı alıcısının giriş ve çıkışından akışkan sıcaklık değerleri okunmaktadır. Şekil 18'de deney düzeneğinin soğutucu hattının fotoğrafı verilmiştir.

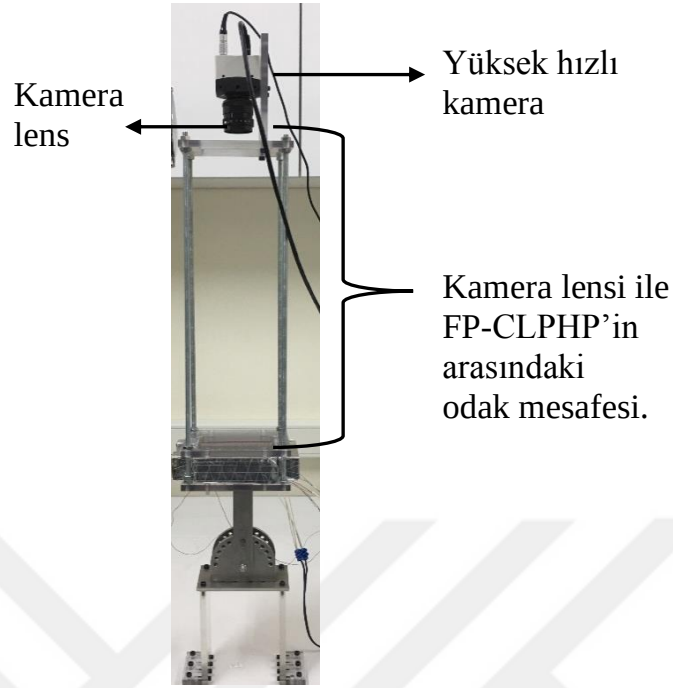


Şekil 18. Soğutucu hattının fotoğrafı.

Atımlı ısı borusunun buharlaştırıcı bölümü ise ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiştir. Isıtıcı AC güç kaynağı ile bağlantılı iki adet kartuş ısıtıcı içermektedir. Isı borusundaki deneyler boyunca buharlaştırıcı bölgesine kontrollü ısıl güç uygulanmaktadır. Bu işlem, kartuş ısıtıcılar ve AC güç kaynağı aracılığıyla sağlanmaktadır. Şekil 8 ve Şekil 9’da ilgili bölümün kapsamlı fotoğrafı ve şematik resmi gösterilmiştir. Ayrıca, deney düzeneğinde kullanılan cihazların model adları ve özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

2.1.3 Veri Toplama ve Akış Görüntüleme Sistemi

Deneyler kapsamında, test bölümüne takılan termo-elemanlardan, sıcaklık değerlerini ölçmek ve ilgili değerleri kaydetmek için veri toplama cihazına gerek duyulmaktadır. İlgili cihazın resmi Şekil 8 ve 9’da verilmiştir. Ayrıca özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Atımlı ısı boruları için yapılan deneylerde elde edilen ölçüm sonuçlarının arka planındaki fiziksel mekanizmaları ortaya koyabilmek için akış görüntüleme çalışması yapılmıştır. Akış görüntüleme kapsamında, yüksek hızlı kamera aracılığıyla saniyede 1000 görüntü alınmıştır (1000 fps). Şekil 19’da yüksek hızlı kameranın test bölümüne montajlı resmi verilmiştir.



Şekil 19. Yüksek hızlı kameranın, test bölümü ile tam montajlı resmi

Tablo 3. Tez kapsamında kullanılan cihazların detaylı özellikleri

Cihaz Adı	Modeli	Çalışma Aralığı	Doğruluğu
Sabit sıcaklık banyosu	Labo / PH200-H22	-20 / +100°C	± 0.02 °C
Akış ölçer	Cole-Parmer / 32907-44	0 – 100 ml/dk	$\pm \%2$
Manometre	Keller / LEO2	-1 – 3bar	$\pm \%0.1$
Güç kaynağı	GWINSTEK / APS-7100	1000 VA	$\pm \%0.6$
T-tipi termoeleman	Omega	-	± 0.1 °C (sabit sıcaklık banyosu ile kalibre edildi)
Dişli mikro pompa	L22097(Cole-Parmer/ 73003-14)	4.6 – 460 ml/dk	-
Yüksek hızlı kamera	Fastec / HiSpec 4 Color kamera ile Navitar lens	1150fps, çözünürlük: 1280x1024	-
Işık kaynağı	PHOTONIC OPTICS / F 3000	-	-
Veri toplama ünitesi	Keithley / 2701/E ile 7708 modül	500/s tarama hızı	-
Vakum pompası	VALUE / V-i260SV	Nihai vakum 0.15 Pa	-

2.2. Deneylerin Yapılışı

Tez kapsamında, iki farklı ısı borusunda kapsamlı çalışmak koşulları için deneyler yapılmıştır. Deneyler kapsamında kullanılan parametreler Tablo 4'te, deneylerde kullanılan iş akışkanları ve iş akışkanlarına ait termo-fiziksel özellikler ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Deneyler kapsamında kullanılan parametreler

Parametre	Değerler
Dolum oranı	%30, %50, %60, %70
Eğim açısı	0° ve 90°
Isıl yük	5W – 45W (~110 °C sıcaklığa ulaşılmıştır)
Akışkan türü	Su, metanol, pentan, hekzan
Karışım türü ve oranı	Deney kapsamında belirtilen akışkanların, saf hali ve/veya ikili karışımları (1:1, 1:3, 3:1, 1:4, 4:1) ve/veya üçlü karışımları (1:1:1, 1:2:3, 1:3:2)

Tablo 5. İş akışkanları ve ilgili termo-fiziksel özellikler (1 atm basınç)

Özellikler	Sıcaklık	Deiyonize su	Metanol	Hekzan	Pentan	Etanol
Kaynama noktası [°C]		100	64.7	68.7	36.06	78.3
Sıvı özgül ısı [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]		4.18	2.48	2.24	2.33	2.39
Sıvı yoğunluğu [kg m ⁻³]		998	791	659	625.5	789
Buharlaşma gizli ısı [kJ kg ⁻¹]	20°C	2257	1101	335	366.9	846
Sıvı ısıl iletkenliği [W m ⁻¹ °C ⁻¹]		0.599	0.212	0.128	0.138	0.172
Sıvı dinamik viskozitesi (x 10 ³) [Pa s]		1.01	0.6	0.3	0.242	1.15
Yüzey gerilmesi (x 10 ³) [N m ⁻¹]		72.8	22.6	18.5	15.8	22.8
Doyma basıncının sıcaklıkla değişimi (dP / dT) _{sat} (x 10 ³) [Pa °C ⁻¹]	80°C	1.9	6.7	4.27	10.1	4.23

Not: Etanol, deiyonize su, metanol (Shi vd., 2016), Pentan (Reay ve Kew, 2014), Hexane (URL-1, 2021)

Herhangi bir deney esnasında izlenen adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İlk olarak, vakum pompası kullanılarak FP-CLPHP'nin iç hacmi vakumlanır ve kullanılacak iş akışkanı ile doldurulur.
- Sirkülasyon hattı aktif hale getirilir. Dişli mikro pompa ile istenilen debi değeri (20 ml/dk) ayarlanır. Soğutma suyunun, ısı alıcıya giriş sıcaklığı 20°C olacak şekilde sabit sıcaklık banyosunda ayarlama yapılır. Ayrıca, ortam sıcaklığı 24°C olarak sabit tutulmuştur.
- İş akışkanı ile doldurulan FP-CLPHP'nin konumu, açılı mekanizması aracılığıyla istenilen eğim açısına getirilerek sabitlenir.
- Güç kaynağı aktif edilerek, başlangıçta 5W'lık güç verilir. Isı borusunda okunan sıcaklık değerlerinin kararlı hale erişmesi beklenir ve ölçüm değerleri kaydedilir.

- Sıcaklık ölçüm değerleri alındığı zaman, eş zamanlı olarak akış görüntüsü kamera sistemi aracılığıyla kaydedilmiştir.
- Buharlaştırıcı sıcaklığı 110°C'a erişinceye kadar ısı güç değeri 5W aralıklarla artırılır ve her bir ısı güç değerinde, kararlı halde ölçümler ve akış görüntüleri alınır.
- Deney parametreleri (dolum oranı, karışım oranı, eğim açısı) değiştikçe, yukarıdaki işlemler tekrarlanır.

2.3. Deneysel Hesaplama Yöntemi

Bir ısı borusu için en önemli ısı performans göstergelerinden biri ısı dirençtir. Isı direnç, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölümlerinden alınan ortalama sıcaklık farkının, net ısı yüküne oranı olarak tanımlanmaktadır. Literatürde, yaygın olarak kabul gören (Chien vd., 2012, Yang vd., 2015, Spinato vd., 2016) ve kullanılan matematiksel formül aşağıda ifade edilmiştir.

$$R_{th} = \frac{(\bar{T}_e - \bar{T}_c)}{Q} \quad (4)$$

Burada, $\bar{T}_e$ ve $\bar{T}_c$, sırasıyla, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgelerinde okunan sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamalarıdır. Eşitlik (4)'te paydada yer alan Q terimi ise, buharlaştırıcı bölümüne uygulanan ısı güç (Q_i) ile yoğuşturucu bölümünden ısı alıcısına aktarılan ısı gücün (Q_r) ortalama değeridir ve aşağıda açık formu verilmiştir.

$$Q = \frac{(Q_i + Q_r)}{2} \quad (5)$$

Q_r 'nin açık formu aşağıda verilmiştir.

$$Q_r = \dot{m}C_p (T_{he} - T_{hi}) \quad (6)$$

Burada, ısı alıcı bölümünden geçen soğutucu akışkanının giriş sıcaklık değeri T_{he} ile ve çıkış sıcaklık değeri T_{hi} , debisi $\dot{m}$ ile ve özgül ısısı C_p ile gösterilmiştir.

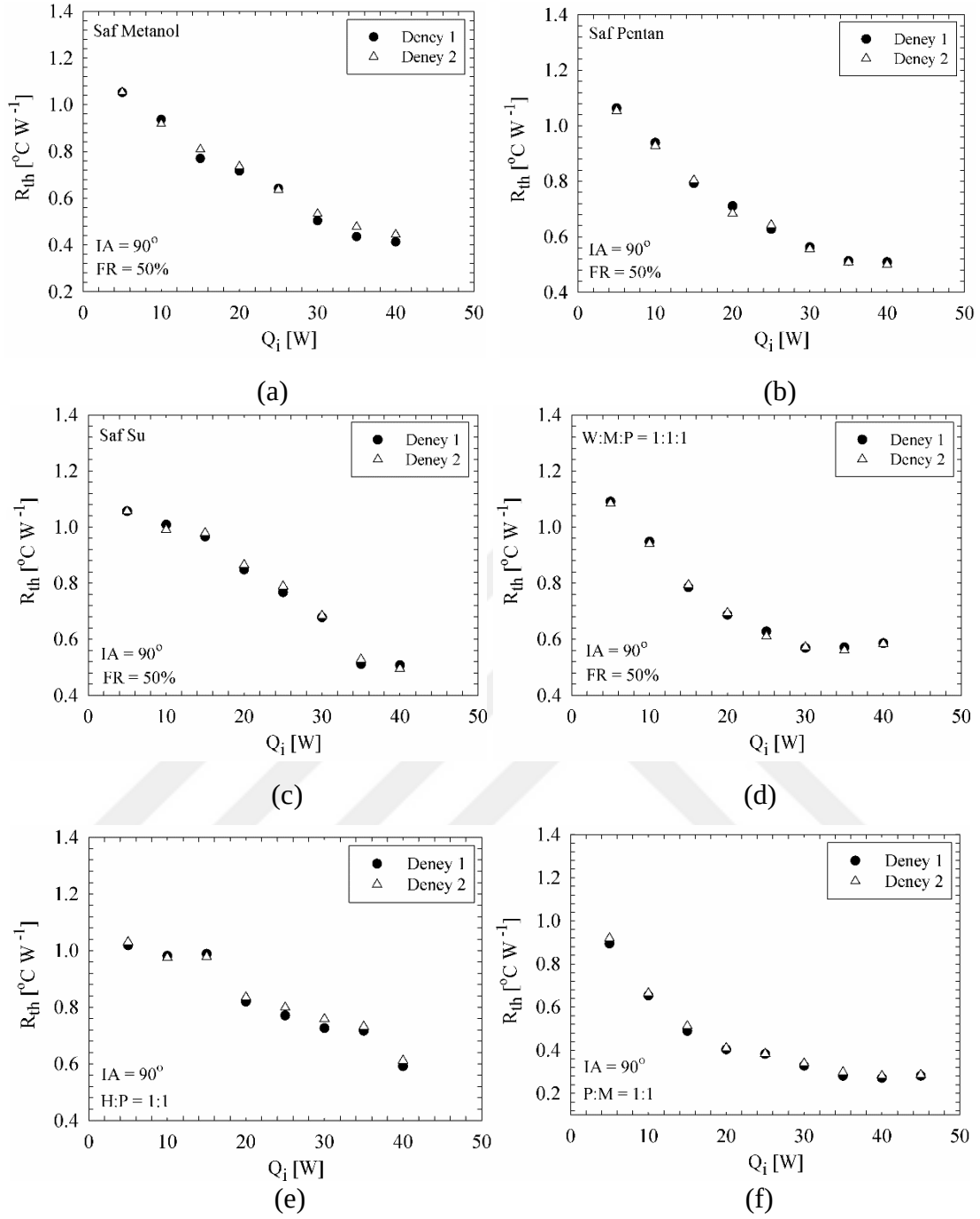
Çalışma kapsamında, hesaplanan ısıl direnç değerinin belirsizlik analizi, Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen ve literatürde kabul gören yönteme göre yapılmıştır. Tez kapsamında elde edilen tüm veri tabanı üzerinden yapılan belirsizlik analizi sonucu, ısıl direncin maksimum belirsizlik düzeyi $\pm\%5.7$ olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak T-tipi termo-elemanlar, deneyler başlamadan önce sabit sıcaklık banyosunda kalibre edilmiştir (0.02°C). Detaylı bilgiler Tablo 3'te belirtilmiştir.

2.4. Bulgular

Tez çalışması kapsamında, üniform olmayan kanallara sahip FP-CLPHP farklı çalışma koşulları altında (dolum oranı, FR; eğim açısı, IA; karışım oranı, MR; akışkan türü ve HI; ısıl güç) deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, ölçümlerle eş zamanlı akış görüntüleri alınmıştır. Deneylerde FP-CLPHP-1 ve FP-CLPHP-2 olmak üzere iki farklı ısı borusu kullanılmıştır. İş akışkanı olarak saf akışkanlar ile akışkanların ikili ve üçlü karışımları (ve/veya akışkan çiftleri) kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, çıktı odaklı sınıflandırılmış ve üç ana başlık altında aşağıda sunulmuştur.

2.4.1. Tekrarlanabilirlik Testler

Deneyler esnasında alınan ölçümlerin ve izlenen prosedürün (dolum oranı ve karışım oranının hazırlanması vb.) doğruluğunu ve hassasiyetini kontrol etmek amacıyla tekrarlanabilirlik deneyleri yapılmıştır. Bir başka ifade ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçların tekrarlanabilirlik düzeyleri kontrol edilmiştir. Birbirinden oldukça farklı ve karmaşık koşullar dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda saf akışkanlar (pentan, metanol ve su), ikili karışımlar (hekzan-pentan, H:P=1:1 ve pentan-metanol, P:M=1:1) ve üçlü karışımlarla (su-metanol-pentan, W:M:P=1:1:1) yüklenen ısı borusu (FP-CLPHP-2) için FR=%50'de ve IA= 90° çalışma koşulunda (düşey alttan ısıtma modu) ikişer kez deney yapılmıştır. Tekrarlanabilirlik deneylerine ait sonuçlar Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Tekrarlanabilirlik deneyler

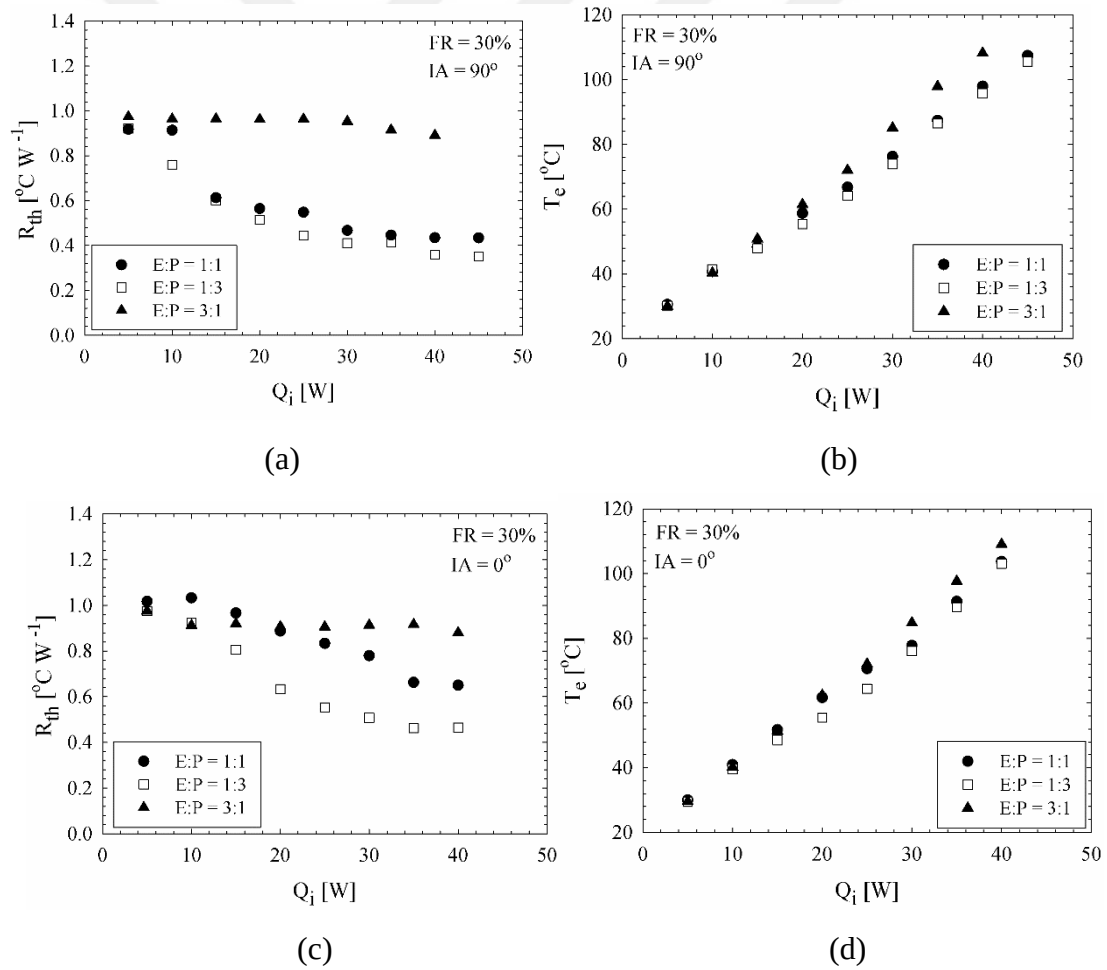
2.4.2. İkili Karışım Sahip Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun Isıl İncelenmesi ve Akış Model Analizi

Bu kısımda, Tablo 2’de belirtilen FP-CLPHP-1 kodlu ısı borusuna ait sonuçlar paylaşılmıştır. İlgili ısı borusu etanol (E) ve pentanın (P) farklı hacimsel oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ikili karışımlarla yüklenmiş ve farklı çalışma koşulları altında görüntü alınarak deneyler yapılmıştır. Bu bölümdeki çalışma koşulları, farklı

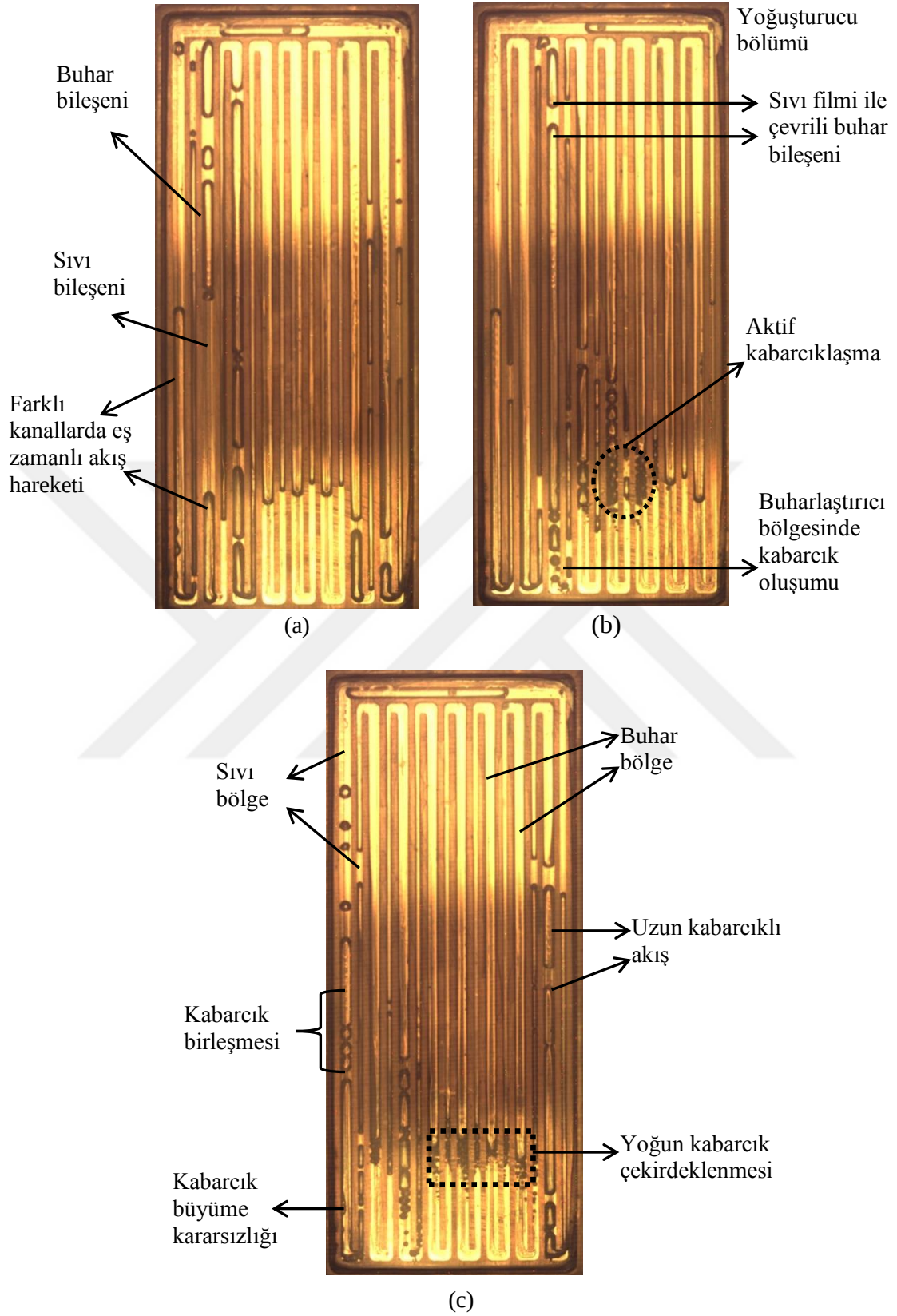
karışım oranlarını ($E:P = 1:1$, $1:3$ ve $3:1$), eğim açılarını ($IA=0^\circ$ ve $IA=90^\circ$), ısı yük değerlerini ($HI=5W$ 'tan başlanıp, $5W$ artışlarla sıcaklık değeri $110^\circ C$ 'e ulaşınca kadar) ve dolum oranlarını ($FR=\%30$ ve $FR=\%60$) kapsamaktadır. Görüntüler saniyede 1000 kare olacak şekilde alınmıştır.

2.4.2.1. Isıl Yük ve Karışım Oranının Etkisi

Farklı ısı yük ve karışım oranlarında, ısı borusunun ısı performansı incelenmiştir. Şekil 21'de, $\%30$ dolum oranı için karışım oranının bir fonksiyonu olarak, buharlaştırıcı bölgesinin sıcaklığının ve ısı direncin ısı yük ile değişimi sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 22'de $E:P = 1:3$ iş akışkanı için $FR=\%30$ ve $IA=90^\circ$ koşullarında $25W$, $35W$ ve $45W$ ısı yük değerindeki görüntüleri verilmiştir.

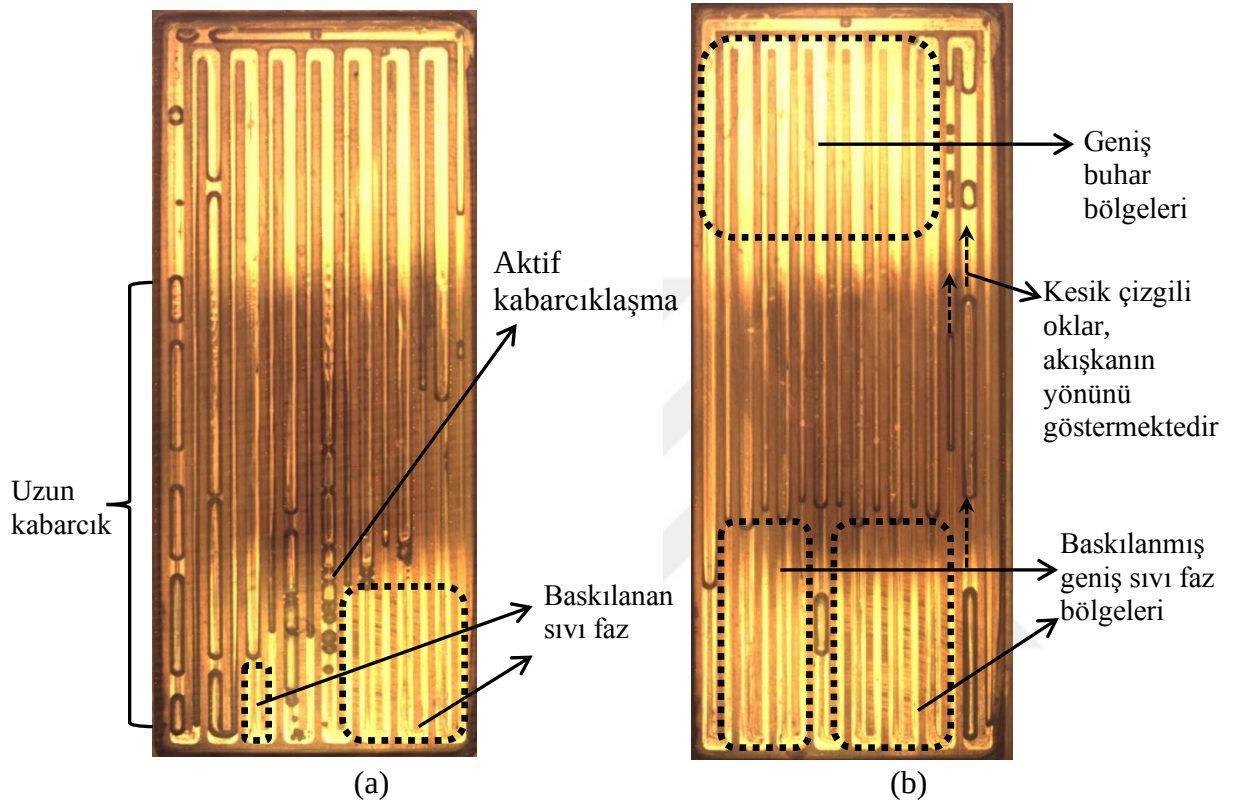


Şekil 21. $FR=\%30$ ve $E:P$ ikili karışımı ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısı direnci ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısı yük ile değişimi.

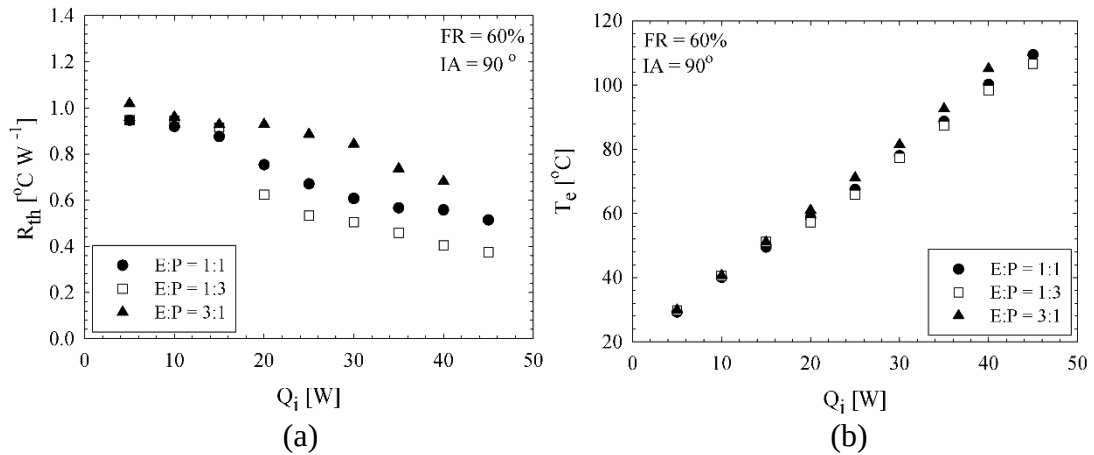


Şekil 22. $E:P=1:3$, $IA=90^\circ$ ve $FR=\%30$ koşulu için akış görüntüleri; (a) $HI=25W$, (b) $HI=35W$ ve (c) $HI=45W$.

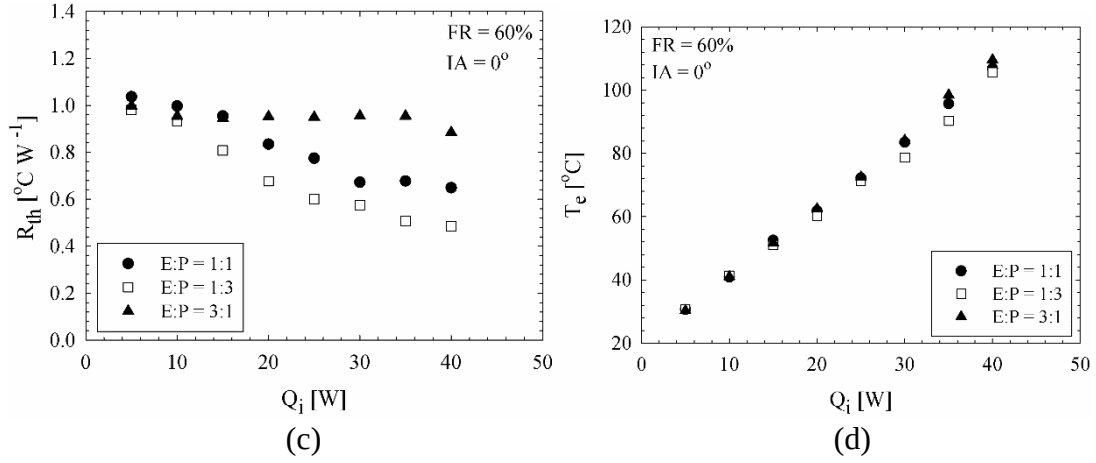
Şekil 23'te E:P=1:1 ve E:P=3:1 ikili karışımlarıyla yüklü FP-CLPHP'nin %30 dolum oranı, düşey konum (90°) ve 35W ısı yük koşulları altındaki akış görüntüleri verilmiştir. Şekil 24'te ise FR=%60 ve E:P ikili karışımları ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısı yük ile değişimi sunulmuştur.



Şekil 23. FR=%30, IA= 90° ve HI=35W için akış görüntüleri: E:P=1:1 (a) ve E:P=3:1 (b)

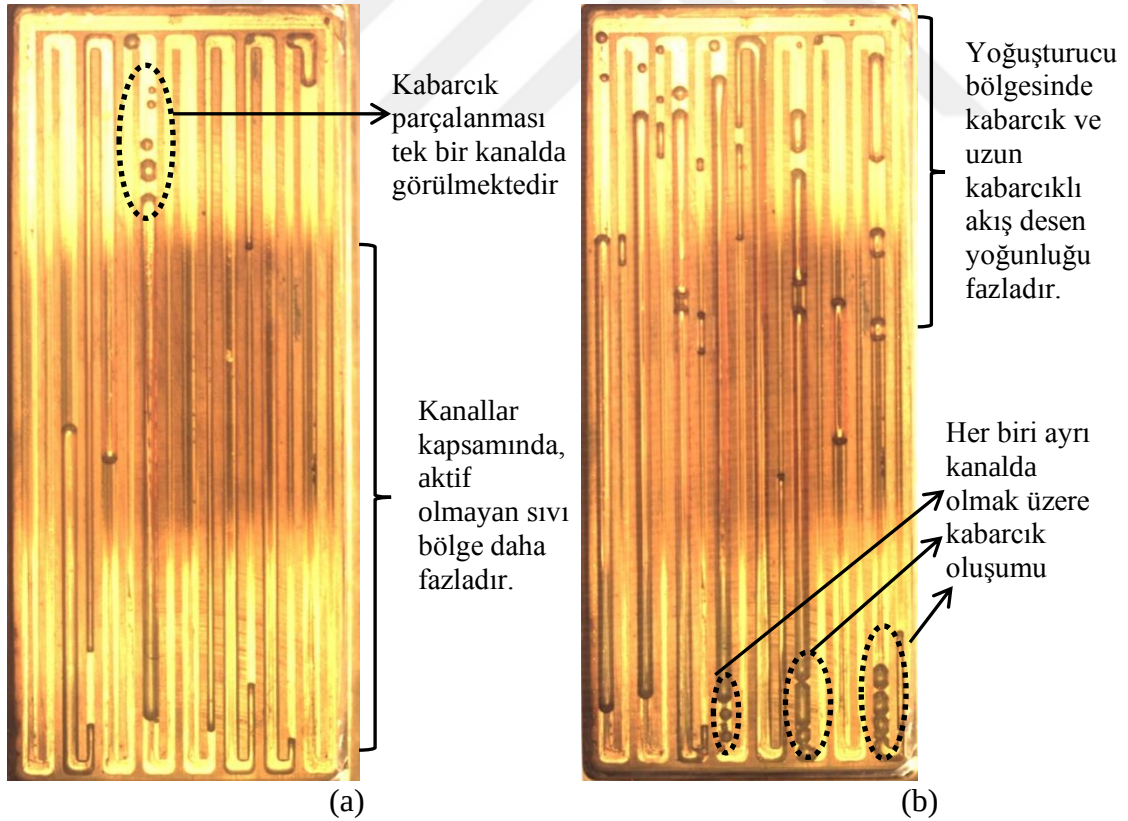


Şekil 24. FR=%60 ve E:P ikili karışımı ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısı yük ile değişimi.



Şekil 24 (Devam). FR=%60 ve E:P ikili karışımı ile yüklenen FP-CLPHP-1'in, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının karışım oranının bir fonksiyonu olarak ısı yük ile değişimi.

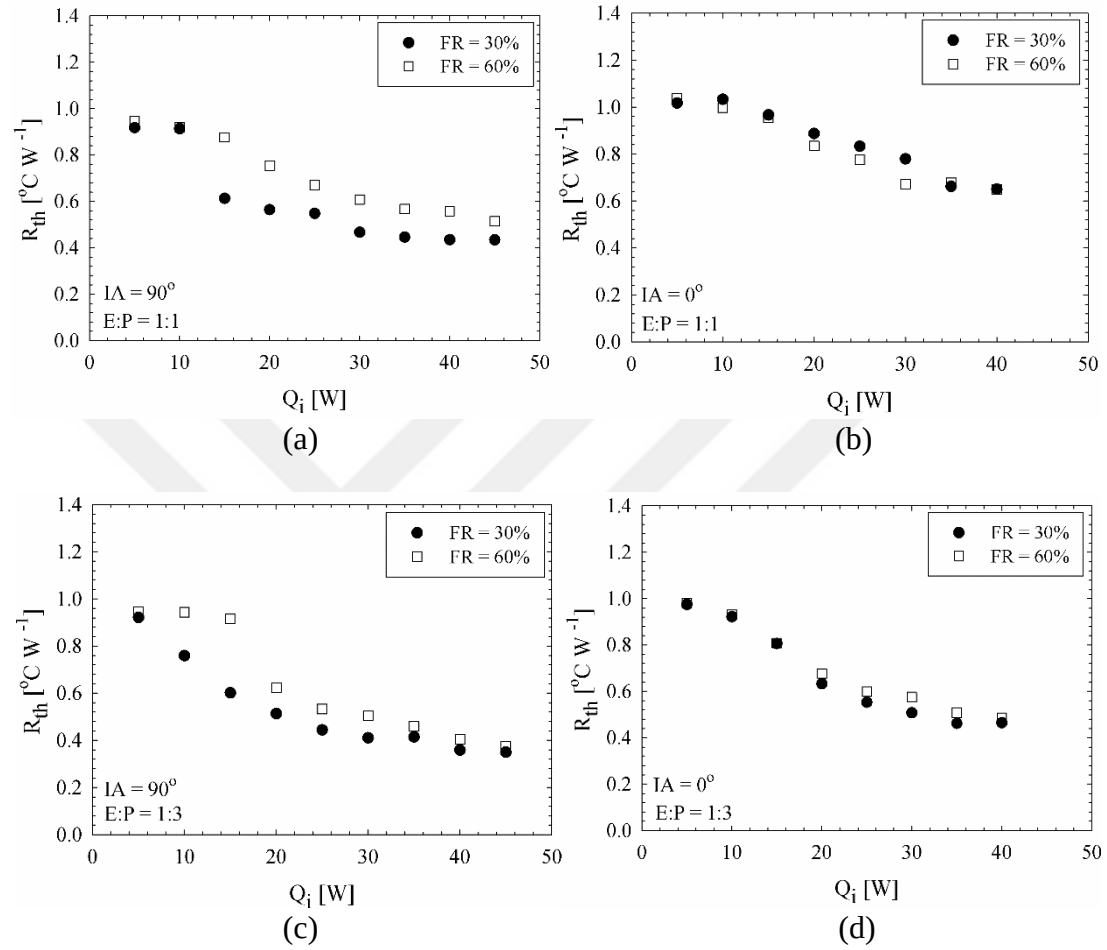
%60 dolum oranında, eğim açısı 0° ve ısı yük 35W çalışma koşullarında, E:P=3:1 ve E:P=1:3 karışım oranlarında FP-CLPHP-1'in akış görüntüsü Şekil 25'te sunulmuştur.



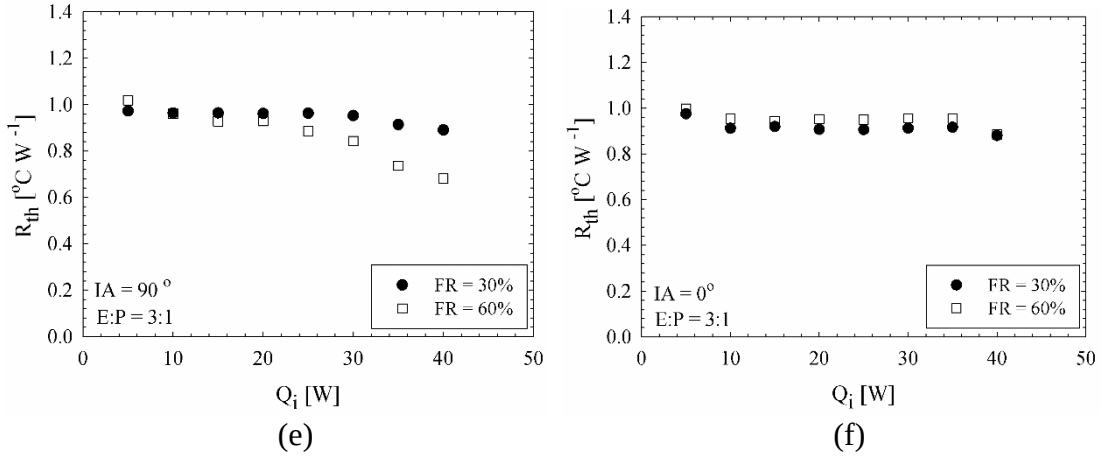
Şekil 25. FR=%60, IA= 0° ve HI=35W için akış görüntüleri: (a) E:P=3:1 ve (b) E:P=1:3

2.4.2.2. Eğim Açısı ve Dolum Oranının Etkisinin Detaylı Analizi

Bu bölümde eğim açısı ve dolum oranının etkisini gösteren şekiller sunulmuştur. Sonuçlar Şekil 26’da verilmiştir.

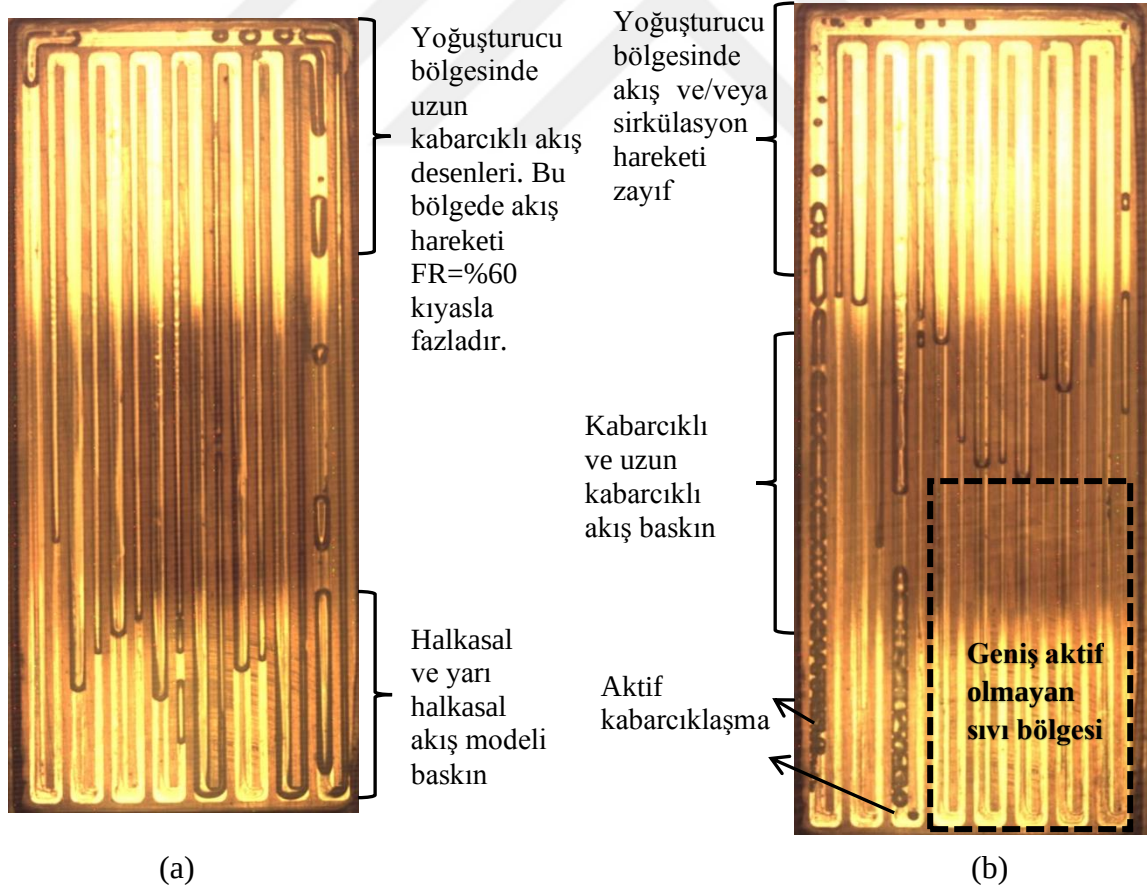


Şekil 26. FP-CLPHP-1 ile yüklü E:P iş akışkanının, farklı eğim açıları ve karışım oranları için dolum oranının fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi



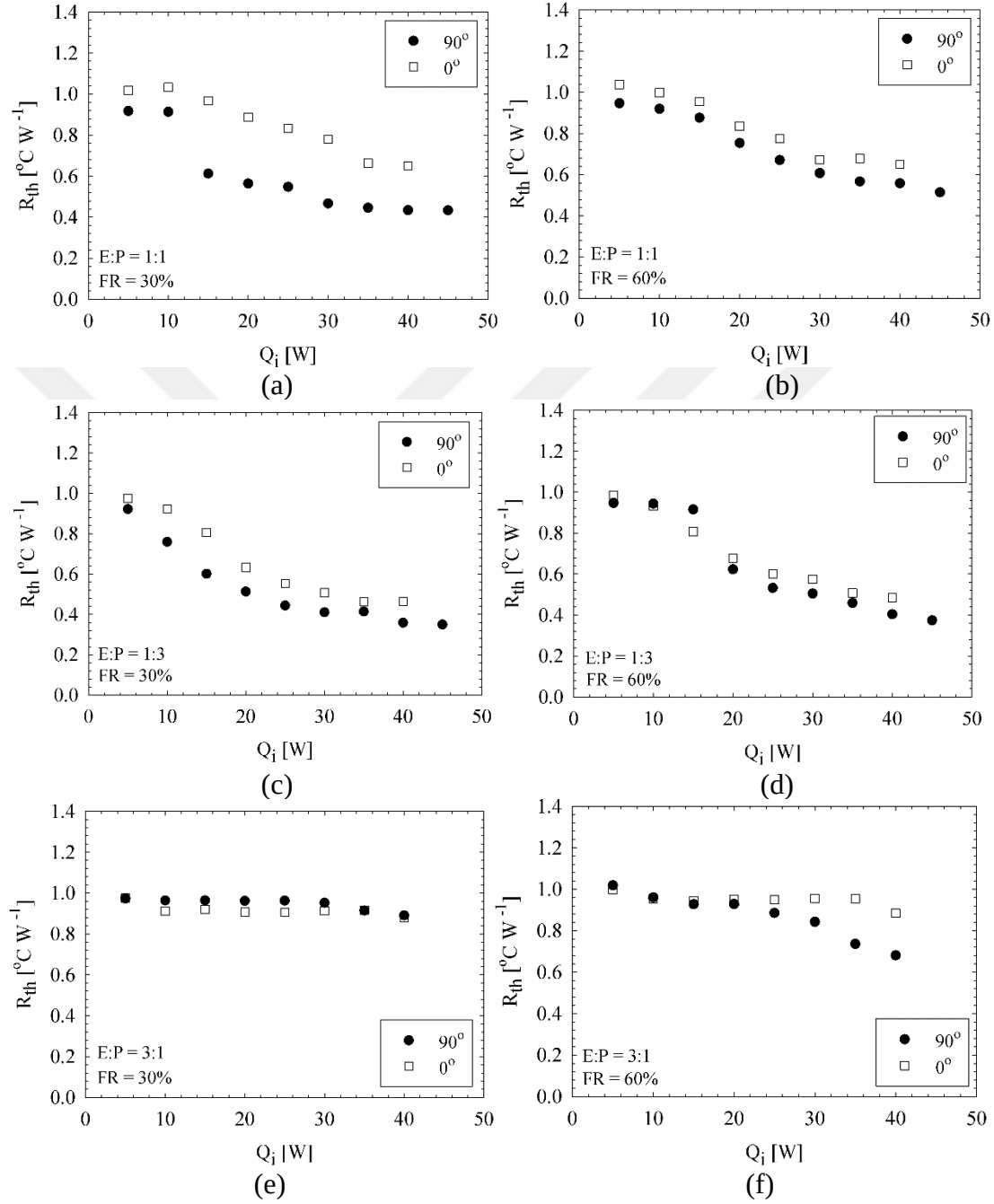
Şekil 26 (Devam). FP-CLPHP-1 ile yüklü E:P iş akışkanının, farklı eğim açıları ve karışım oranları için dolum oranının fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi

Farklı dolum oranına sahip (FR=%30 ve FR=%60) ve düşey olarak konumlandırılan ısı borusunda sabit ısıl yük (HI=20W) değerindeki akış görüntüleri Şekil 27’de sunulmuştur.



Şekil 27. E:P=1:1, IA=90° ve HI=20W için akış görüntüleri: FR=%30 (a) ve FR=%60 (b)

FP-CLPHP-1'in farklı dolun ve karışım oranında eğim açısına olan bağımlılığını gösteren detaylı grafikler Şekil 28'de sunulmuştur.



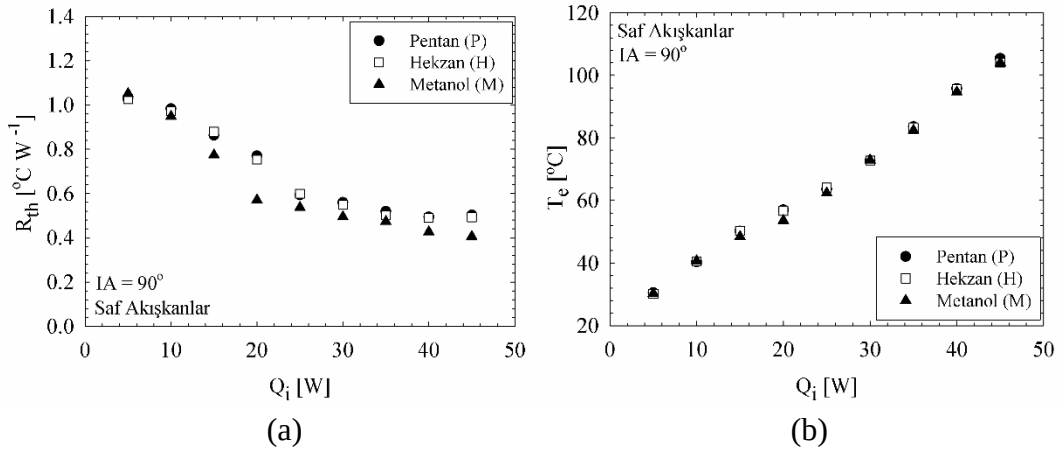
Şekil 28. FP-CLPHP-1, E:P karışımları ile farklı dolun ve karışım oranları için eğim açısının fonksiyonu olarak ısı direncin ısı yük ile değişimi

2.4.3. Birbiriyle Karışan ve Karışmayan Akışkan Çiftlerinin Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP) Isıl Performansı Üzerindeki Rolü

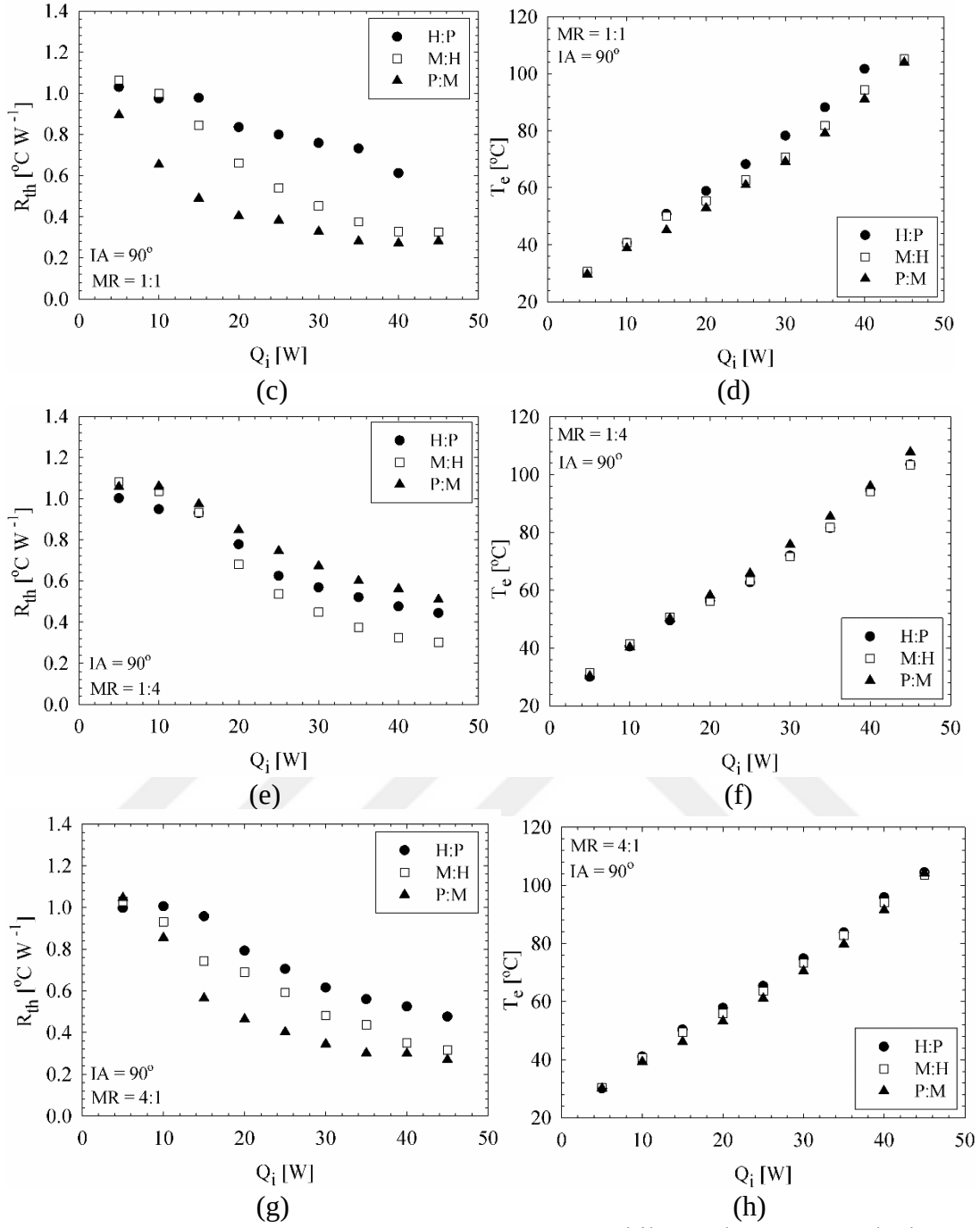
Bu bölümde, birbiriyle karışabilen ve karışamayan ikili akışkan çiftleri ile yüklenen ısı borusu için yapılan deneylere ait bulgular paylaşılmıştır. Kullanılan ısı borusu, Tablo 2’de geometrik özellikleri belirtilen ve FP-CLPHP-2 ile kodlanan ısı borusudur. Kullanılan saf akışkanlar metanol, pentan ve hekzan’dır. İlgili saf akışkanlar kullanılarak, birbiriyle karışabilen ve karışmayan özelliklere sahip ikili akışkan çiftleri oluşturulmuştur. Pentan-metanol (P-M) ve metanol-hekzan (M-H) birbiriyle karışmamaktadır. Hekzan-pentan ise birbiriyle karışabilmektedir. Deneyler kapsamında, sabit bir dolum oranı ($FR=\%50$), üç farklı karışım oranı (MR) (H:P, M:H ve P:M= 1:1, 1:4 ve 4:1) ve iki farklı eğim açısında (0° ve 90°) çalışılmıştır. Ayrıca akış görüntüsü eş zamanlı olarak alınmıştır

2.4.3.1. Farklı Akışkan Türleriyle Yüklü FP-CLPHP’nin Isıl Performansı

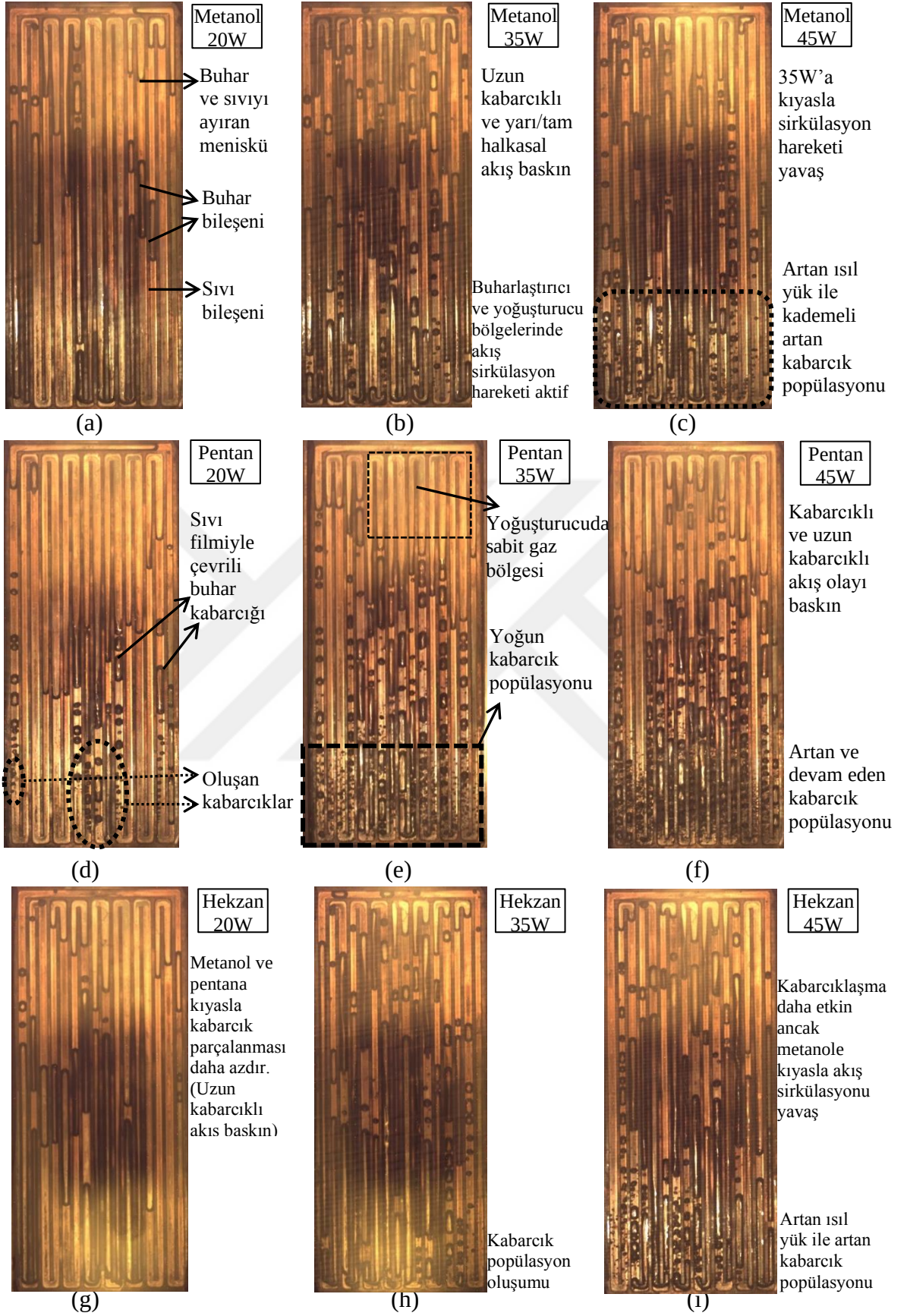
Şekil 29’da, $FR=\%50$ dolum oranındaki FP-CLPHP-2 için karışabilen ve karışmayan akışkan çiftlerinin ve saf akışkanların karşılaştırılmasına ait grafikler verilmiştir. Tablo 5’te akışkanların termo-fiziksel özellikleri detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca, ilgili durumlara karşılık gelen akış görüntüleri Şekil 30’da sunulmuştur.



Şekil 29. FP-CLPHP-2, $FR=\%50$, Karışabilen ve karışmayan akışkan çiftlerinin ve saf akışkanların karşılaştırılması



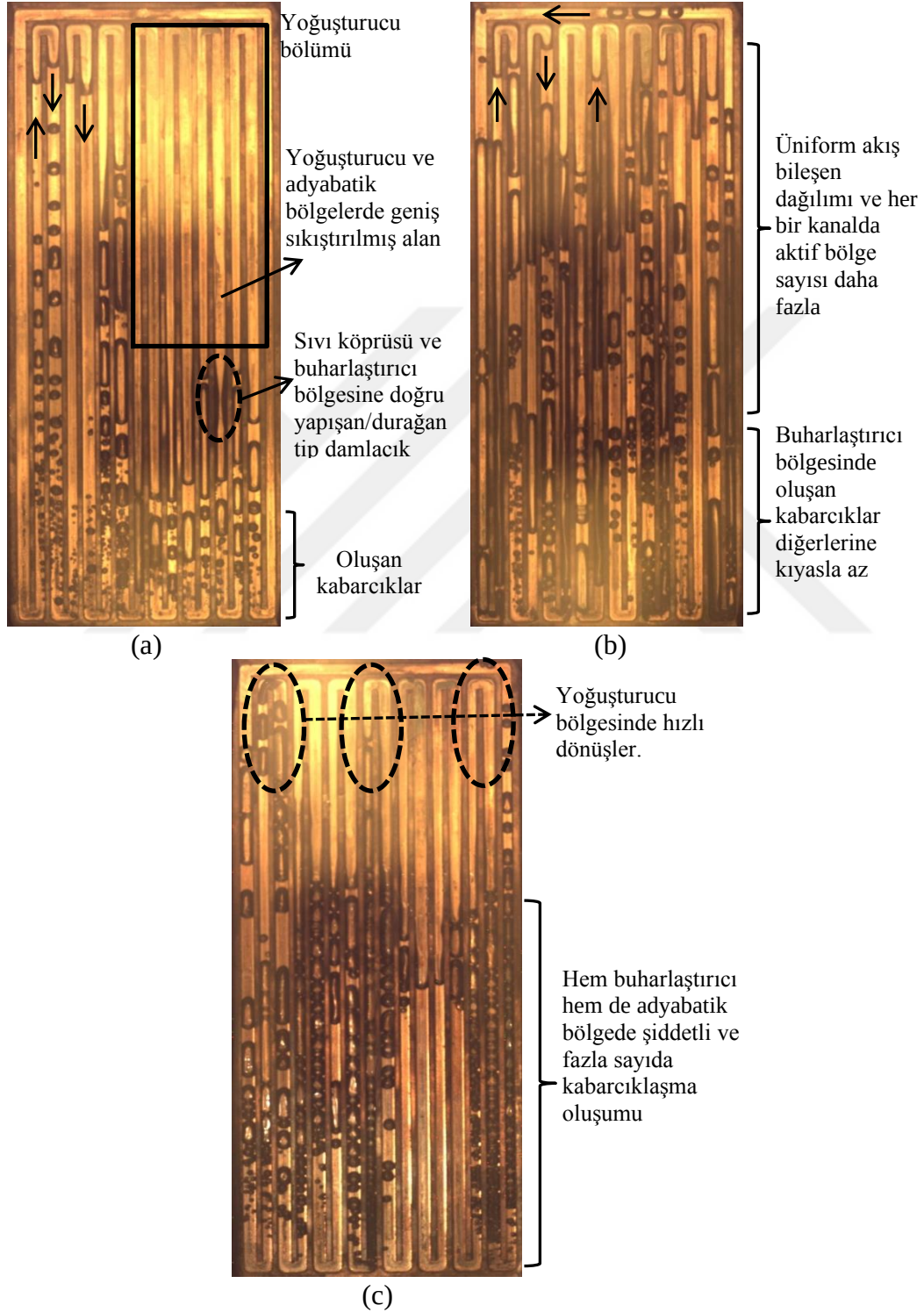
Şekil 29 (Devam). FP-CLPHP-2, FR=%50, Karışabilen ve karışmayan akışkan çiftlerinin ve saf akışkanların karşılaştırılması



Şekil 30. FP-CLPHP-2, FR=%50, IA=90°: Saf akışkanlar için artan ısı yüküne bağlı gelişen akış olayları

2.4.3.2. Karışımların Karakteristik Davranışları

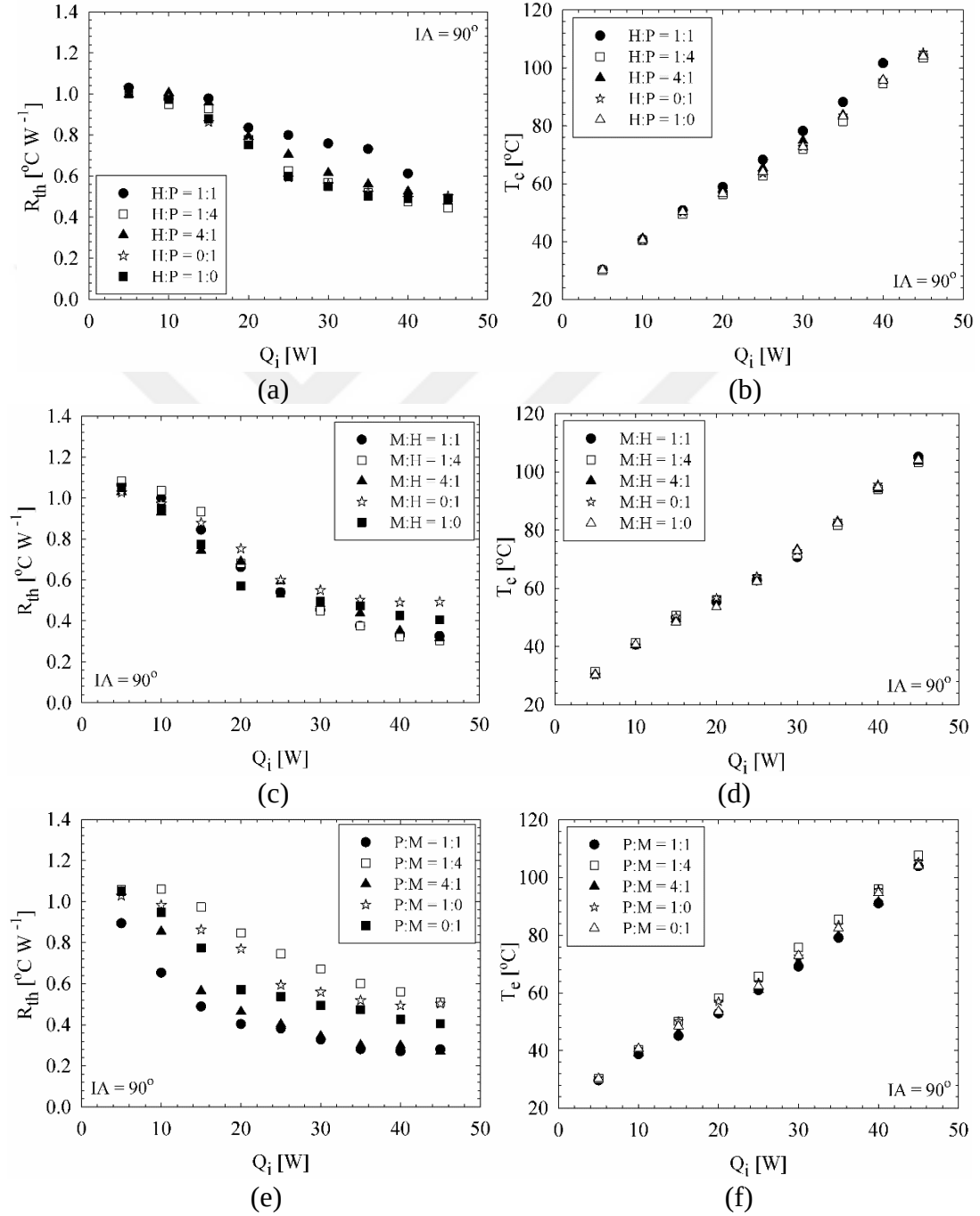
MR=1:1, IA= 90° ve HI=40W koşullarında, farklı ikili akışkan çiftlerinin akış görüntüleri Şekil 31’da gösterilmiştir.



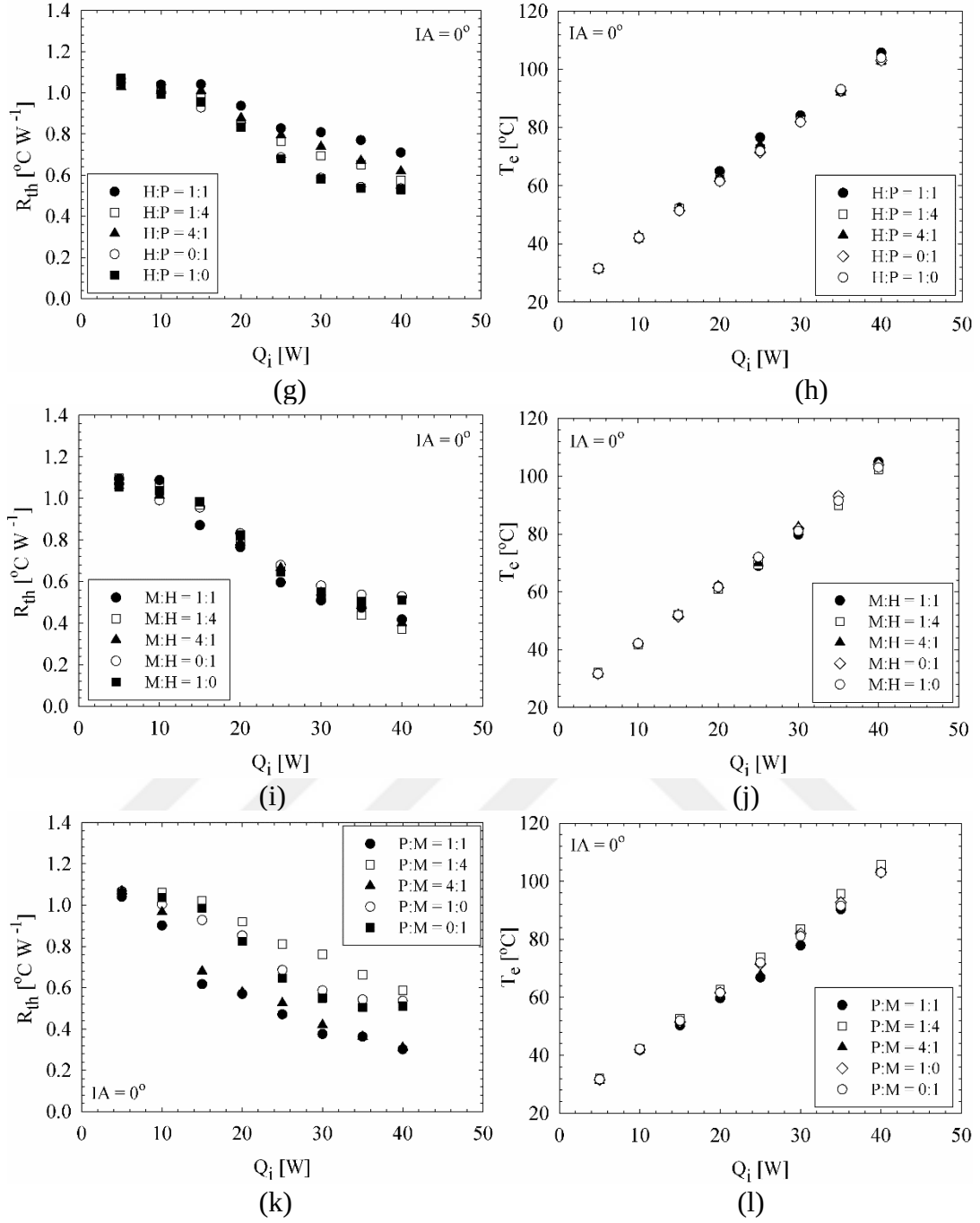
Şekil 31. FP-CLPHP-2, FR=%50, MR=1:1, IA= 90° ve HI=40W çalışma koşulları altında akış görüntüleri: H:P (a), M:H (b) ve P:M (c)

2.4.3.3. Karışım Oranı Etkisi

İlgili bölüm kapsamında, kullanılan iş akışkanlarının, her iki eğim açısında ($IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$) ısı direnç ve buharlaştırıcı bölümün sıcaklık değerleri üzerinden karışım oranının etkisini gösteren grafikler Şekil 32’de sunulmuştur.



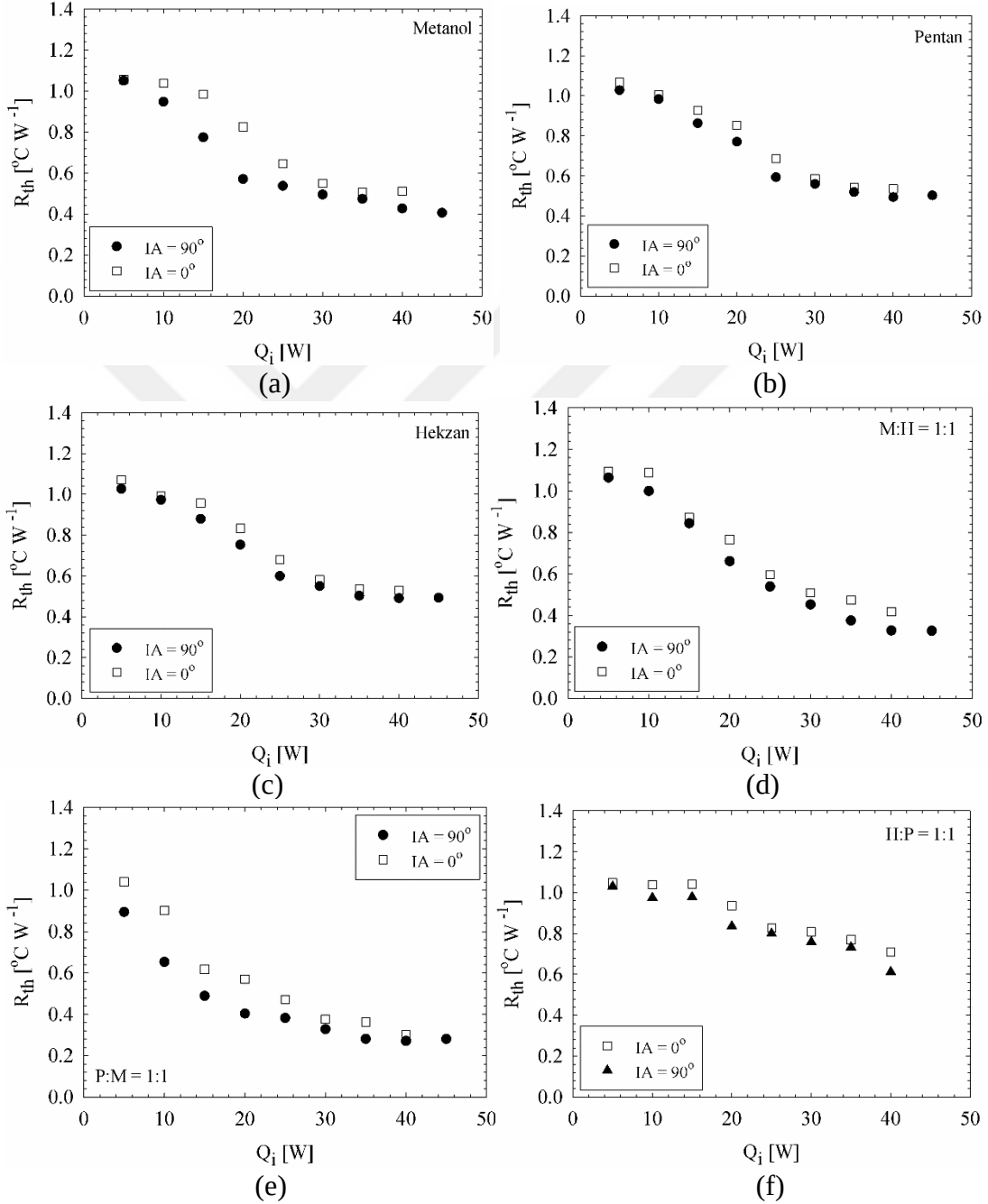
Şekil 32. Her bir iş akışkanın, $IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$ eğim açısında karışım oranı etkisi



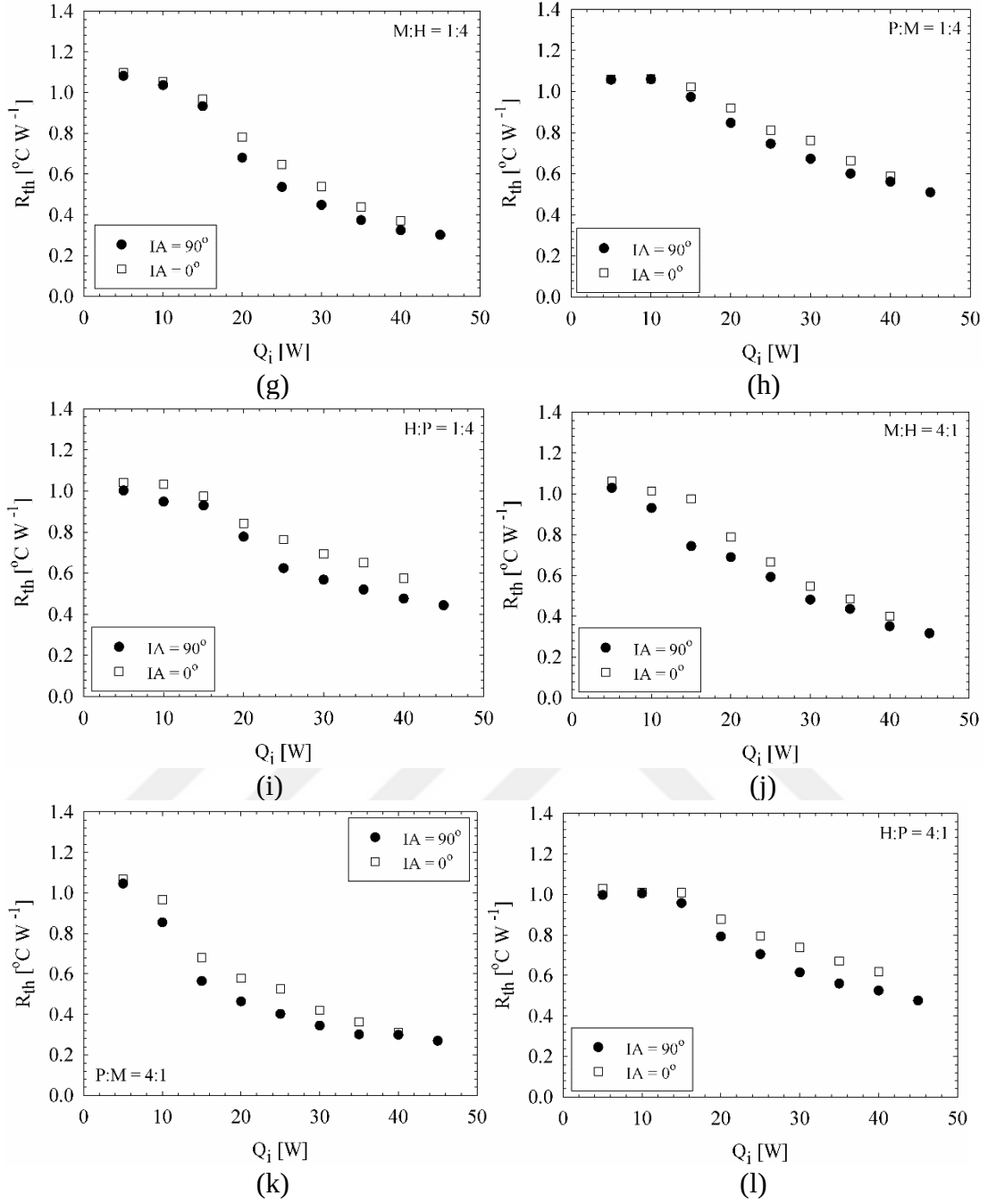
Şekil 32 (Devam). Her bir iş akışkanın, $IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$ eğim açısında karışım oranı etkisi

2.4.3.4. Eğim Açısının Etkisi

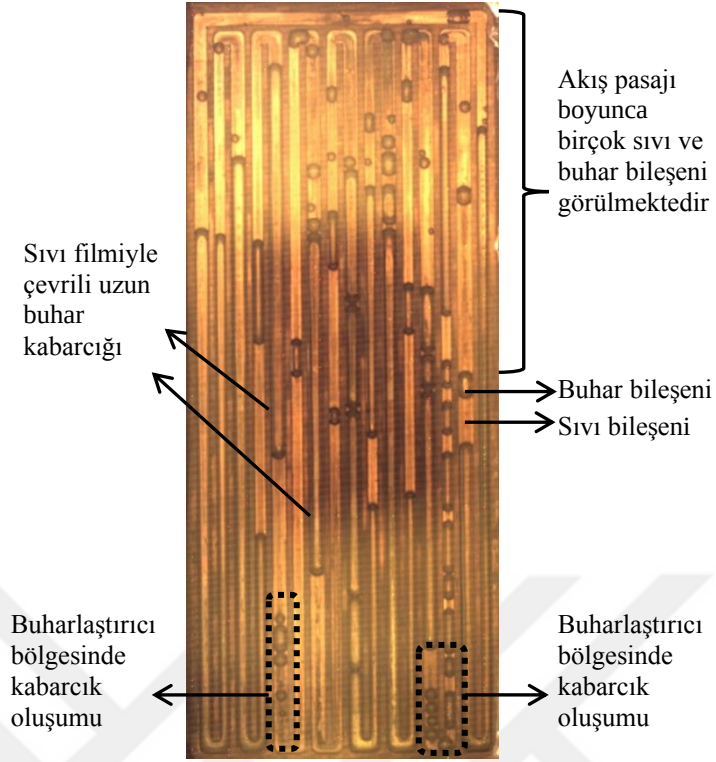
FP-CLPHP-2 için, eğim açısının etkisi Şekil 33'te gösterilmiştir. Ayrıca yatay konumda ($IA=0^\circ$) akış olayının görüntüsü Şekil 34'te ($HI=40W$, $M:H=4:1$ ve $FR=\%50$ koşulları altında) verilmiştir.



Şekil 33. Eğim açısının fonksiyonu olarak ısı direnci, ısı yükü ile değişimi tüm iş akışkanları için

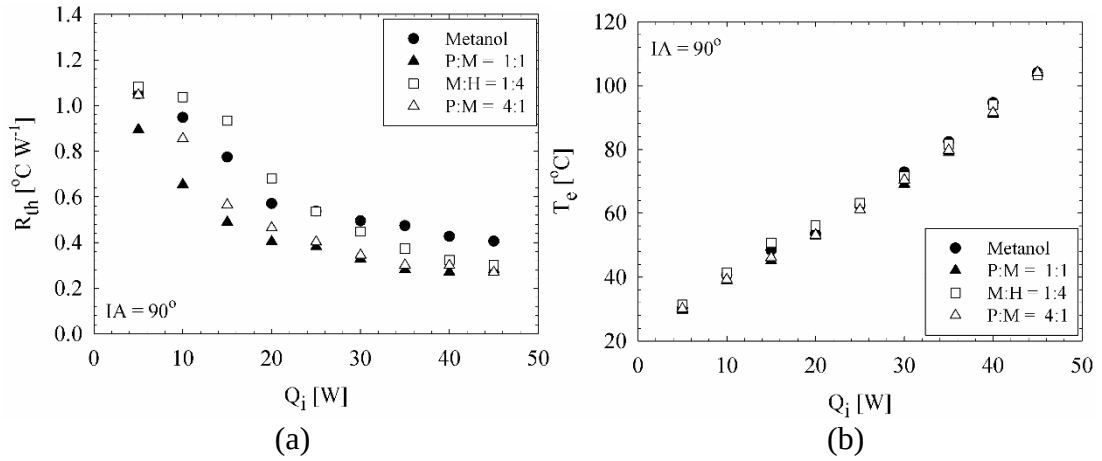


Şekil 33 (Devam). Eğim açısının fonksiyonu olarak ısıl direncin, ısıl yük ile değişimi tüm iş akışkanlarının



Şekil 34. $IA=0^\circ$, $HI=40W$ ve $M:H=4:1$ koşulları altında akış görüntüsü ($FR=\%50$, FP-CPHP-2)

Şekil 35'te Bölüm 3.3 kapsamındaki sonuçların optimizasyonuna ait veriler paylaşılmıştır.



Şekil 35. Bölüm 3.3 kapsamındaki sonuçların optimizasyonu

2.4.4. Üçlü Karışımlarla Yüklenen Düz Plakalı Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP-2) Deneysel Analizi

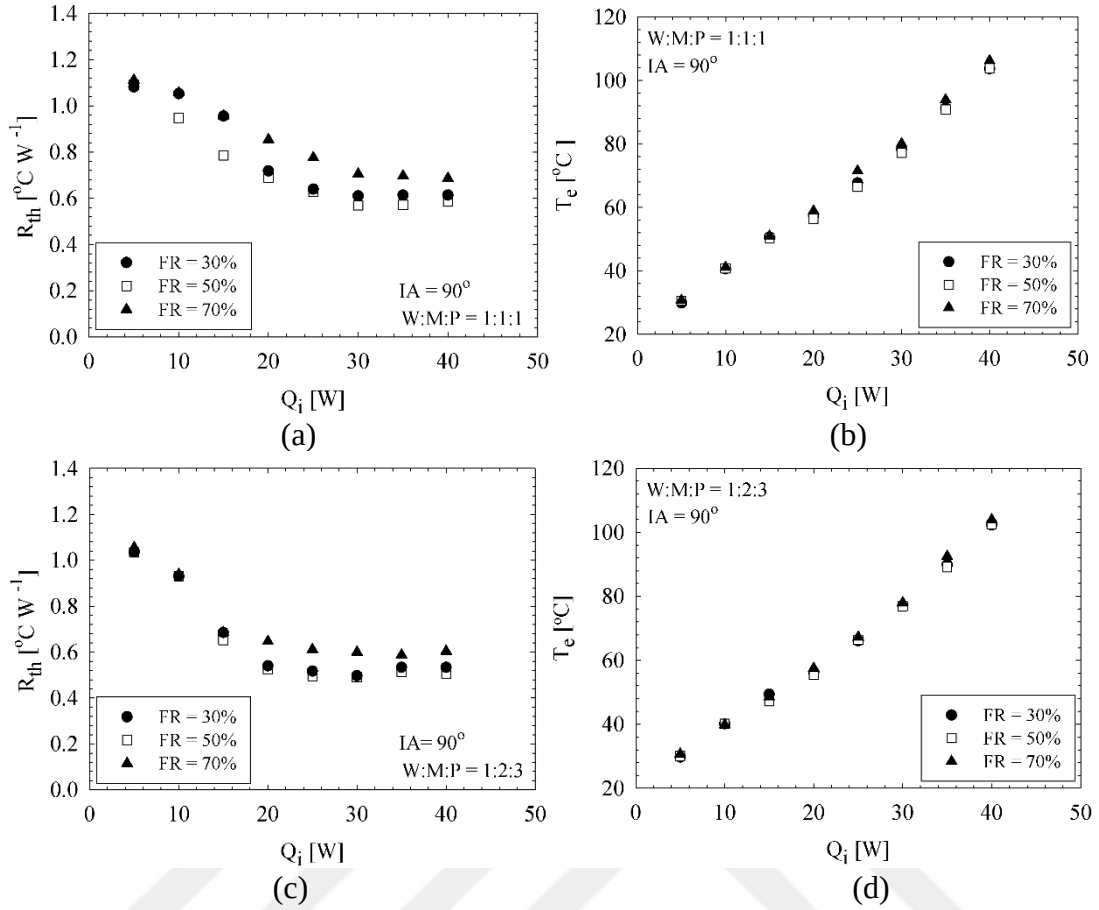
Bu çalışma kapsamında, farklı çalışma koşulları altında yapılan deneyler sonucunda üçlü karışımlarla yüklenen üniform olmayan FP-CLPHP'nin ısı transfer karakteristikleri ve karmaşık akış yapısına ait bulgular sunulmuştur. Tablo 2'de, FP-CLPHP-2 ile kodlanan ısı borusunun, geometrik özellikleri verilmiştir. Karışımlarda kullanılan saf iş akışkanları; su (W), metanol (M) ve pentandır (P). Bu akışkanlar, farklı hacimsel karışım oranlarında (W:M:P=1:1:1, 1:2:3 ve 1:3:2) karıştırılmış ve ilgili karışımlar iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Ek olarak saf akışkanların, birbiri ile karışabilir (Metanol ve su) ve karışamaz (Pentan) özelliklerine bağlı karakterleri de göz önünde tutulmuştur. Deneyler kapsamında, farklı dolum oranı (%30, %50 ve %70), eğim açısı ($IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$) ve ısıl güç değerleri dikkate alınmış ve sonuçlar bu parametrelerin etkilerini sunacak şekilde paylaşılmıştır. Diğer bölümlerde olduğu gibi akış görüntüleme sonuçları da irdelenmiştir.

2.4.4.1. Isıl Yük ve Dolum Oranı Etkisi

Bu bölümün temel amacı, iki farklı üç bileşenli (W:M:P=1:1:1 ve W:M:P=1:2:3) iş akışkanıyla yüklenen ısı borusunun ısıl performansını ve akış fiziğini incelemektir. İlgili bulgular farklı alt başlıklar altında verilmiştir.

2.4.4.1.1. Isıl Yük Etkisi

Şekil 36'da eğim açısı $IA=90^\circ$ konumunda, ısıl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının dolum oranının bir fonksiyonu olarak, ısıl yük ile değişimleri sunulmuştur.

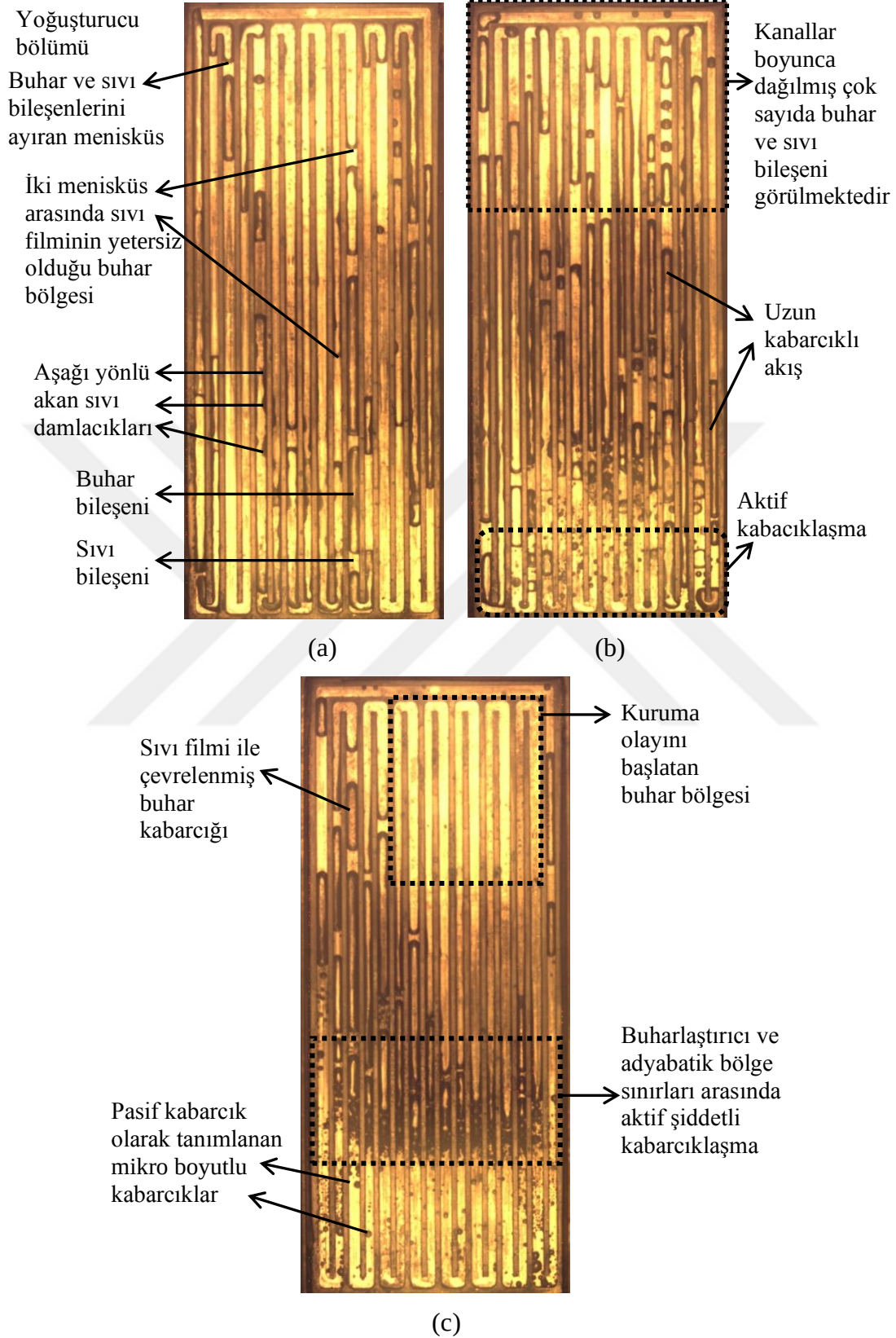


Şekil 36. $IA=90^\circ$ konumda, iki farklı üçlü karışım oranları için dolum oranının fonksiyonu olarak ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının ısıl yük ile değişimi

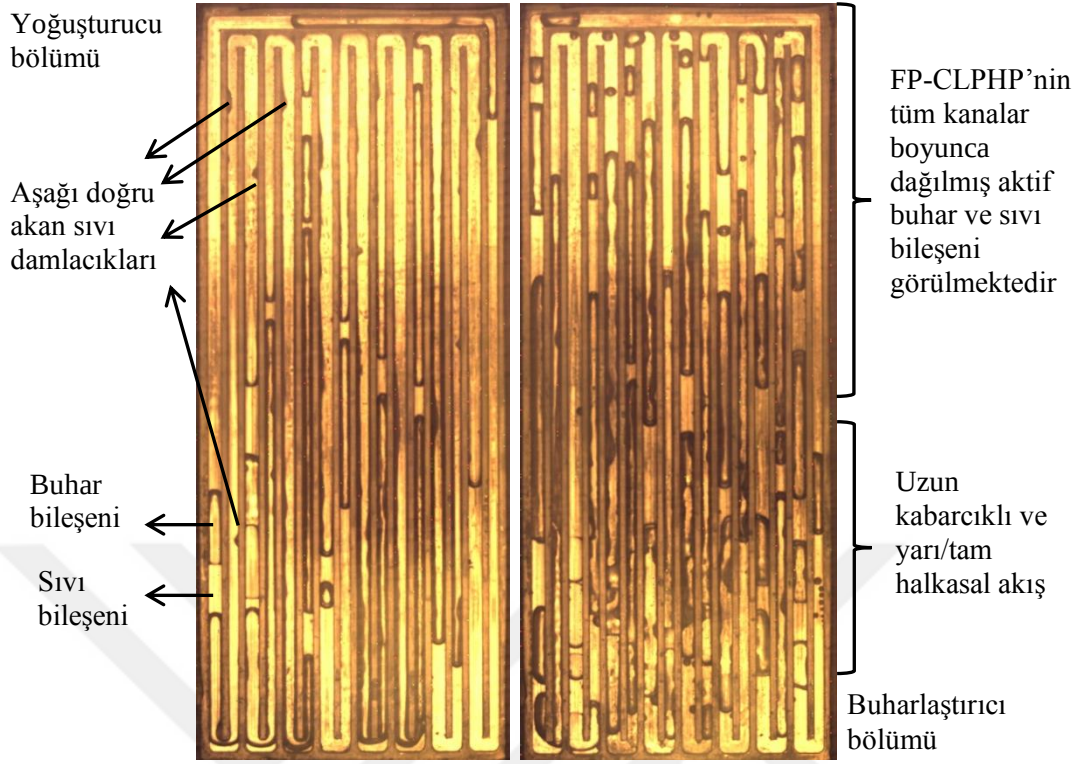
Ek olarak, $IA=90^\circ$, $W:M:P=1:2:3$ ve $FR=50\%$ çalışma parametreleri için, sırasıyla, 15W, 30W ve 40W ısıl yük değerleri için alınan akış görüntüleri Şekil 37’de sunulmuştur.

2.4.4.1.2. Optimum Dolum Oranı ve Dolum Oranı Etkisi

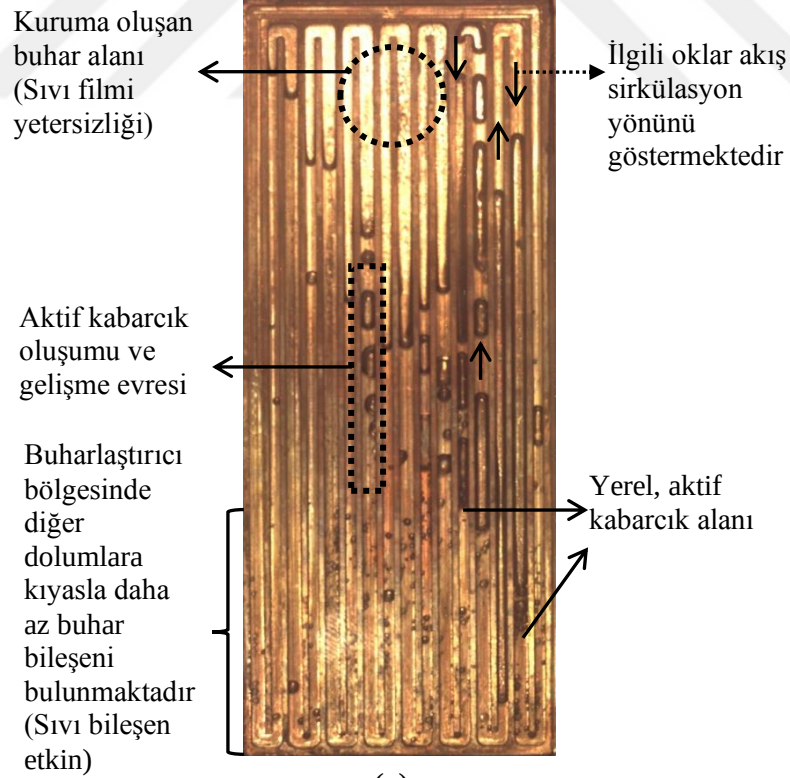
Şekil 36 ek olarak, dolum oranı etkisini incelemek ve böylece optimum dolum oranını belirlemek için kullanılmıştır. İlgili dolum oranına bağlı değişimleri gösteren, akış görüntüleri ($IA=90^\circ$, $W:M:P=1:1:1$ ve $HI=25W$ için, sırasıyla, $FR=30\%$, $FR=50\%$ ve $FR=70\%$) Şekil 38’te paylaşılmıştır.



Şekil 37. FP-CLPHP-2, $IA=90^\circ$, $W:M:P=1:2:3$ ve $FR=\%50$ akış görüntüleri: 15W (a), 30W (b) ve 40W (c)



(a) (b)

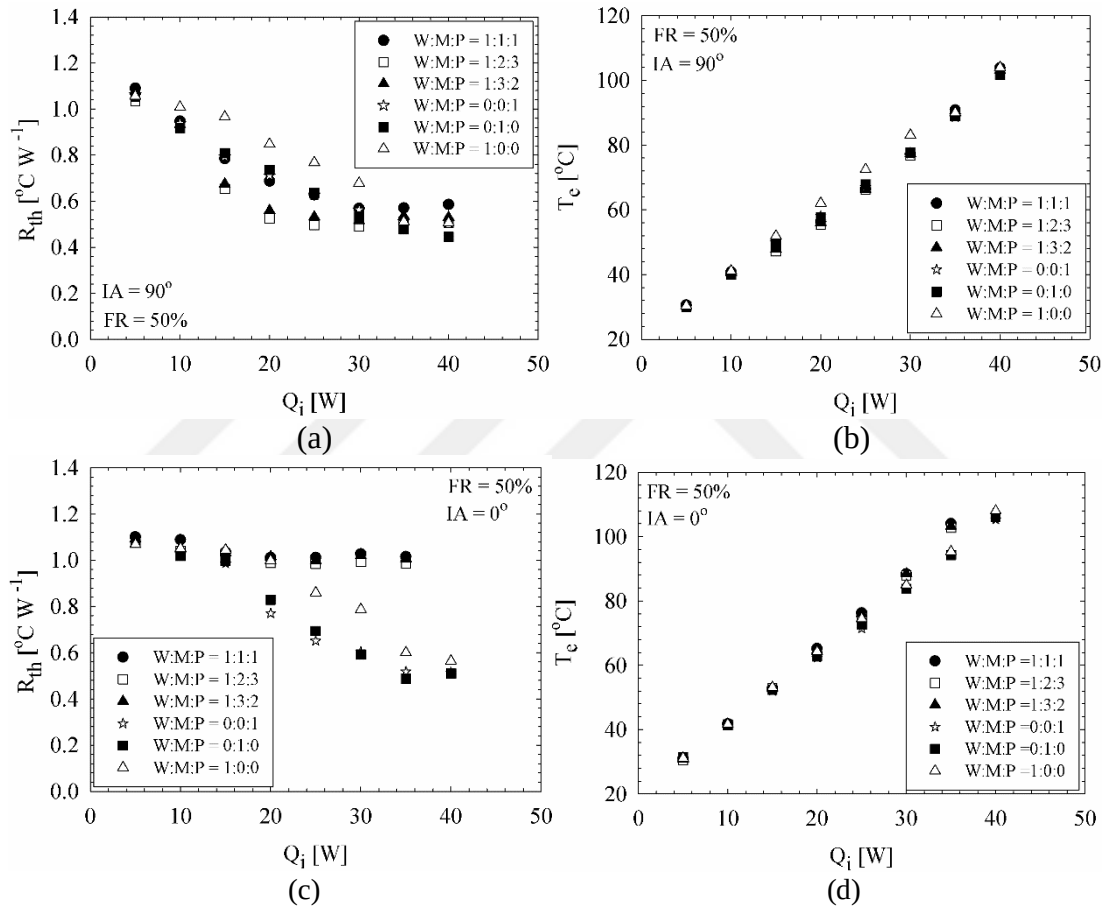


(c)

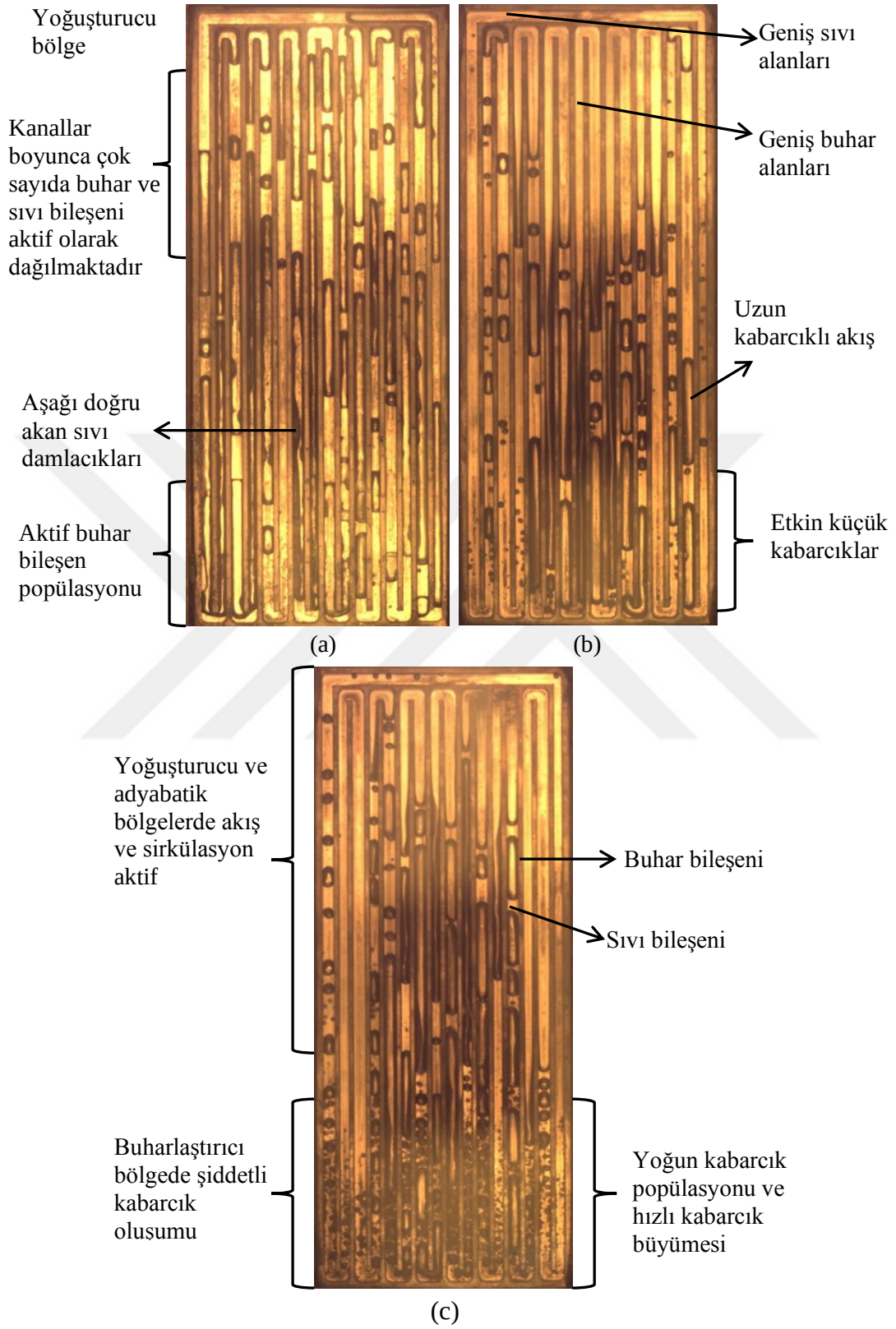
Şekil 38. FP-CLPHP-2, $IA=90^\circ$, $W:M:P=1:1:1$ ve $HI=25W$ akış görüntüleri: $FR=\%30$ (a), $FR=\%50$ (b) ve $FR=\%70$ (c)

2.4.4.2. Karışım Oranı Etkisi

Bir önceki bölüm kapsamında, optimum dolum oranı belirlenmiştir. Mevcut başlık altında ise ilgili optimum dolum oranında, üçlü karışımların ve üçlü karışımlardaki her bir saf akışkanın hacim oranının etkisini gösteren sonuçlar Şekil 39’da sunulmuştur. Ayrıca, üçlü karışım oranı (W:M:P=1:2:3) ve saf iş akışkanı (pentan) sabit ısı yükte (HI=20W) akış yapısı üzerinden karşılaştırılmış ve ek olarak HI=40W için pentana ait akış görüntüleri Şekil 40’da verilmiştir.



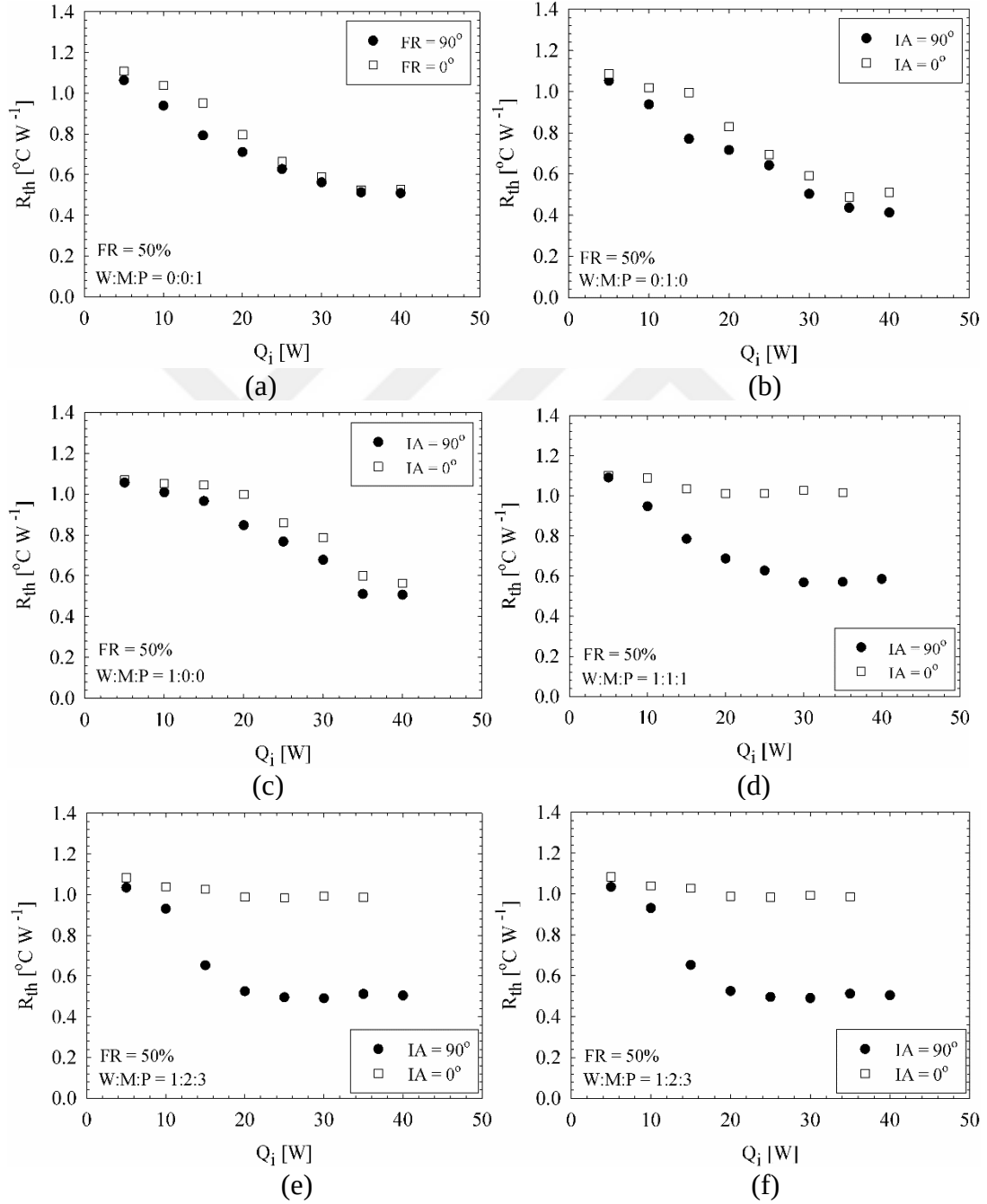
Şekil 39. FP-CLPHP-2, FR=%50 $IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$ için üçlü karışım ve saf akışkanların karışım oranı etkisi



Şekil 40. FP-CLPHP-2, $IA=90^\circ$ ve $FR=\%50$ için akış yapılarının kıyaslanması:
 $W:M:P=1:2:3$ ($HI=20W$) (a), $W:M:P=0:0:1$ ($HI=20W$) (b) ve
 $W:M:P=0:0:1$ ($HI=40W$) (c)

2.4.4.3. Eğim Açısının Etkisi

Optimum dolum oranında (FR=%50), üçlü karışım ve saf iş akışkanlar ile yüklü FP-CLPHP'nin eğim açısının fonksiyonu olarak, ısıl direnç değerlerinin ısıl yük ile değişimini gösteren sonuçlar Şekil 41'de sunulmuştur.



Şekil 41. FP-CLPHP-2, üçlü karışım ve saf akışkanlar için eğim açısının bir fonksiyonu olarak ısıl direncin ısıl yük ile değişimi

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, bir önceki bölümde, üç ayrı ana başlık altında detaylı verilmiştir. Burada, bulgular bölümünde sunulmuş olan verilerin (grafik ve akış görüntüleri) ilgili bölümdeki her bir başlığa karşılık gelecek şekilde, detaylı olarak tartışılmış ve sonuçlar özet halinde ifade edilmiştir.

3.1. Tartışma

3.1.1. Tekrarlanabilirlik Testler

Şekil 20’de deneyler kapsamında kullanılan farklı saf akışkanlar ve karışımlar için yapılan tekrar deneyleri sunulmuştur. Farklı koşullar altında yapılan tekrarlanabilirlik deneylerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle, ikili ve üçlü karışımlara rağmen, ısı direnç değerlerinde geniş ve bir ısı yük aralığında oldukça yakın sonuçların elde edilmiş olması hem karışımların hazırlanma sürecindeki hem de deneylerin yapılış sürecindeki başarıyı ortaya koymaktadır. Sonuçlar aynı zamanda, dolum oranının hazırlanmasındaki başarıyı da teyit etmektedir.

3.1.2. İkili Karışıma Sahip Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun Isıl İncelenmesi ve Akış Model Analizi

3.1.2.1. Isıl Yük ve Karışım Oranının Etkisi

Isıl direnç değeri ve/veya dağılımı, FP-CLPHP’nin çalışma özelliği hakkında doğrudan bilgi edinmemize yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada ise sadece ısı direnç değerindeki değişimlere bağlı kalınmamış, ısı borusunun çalışmasını kesin olarak kanıtlayan akış görüntülerine başvurulmuştur. Şekil 21a ve c’de görüldüğü gibi, artan ısı yük değerleri ile ısı direnç dağılımında birbirinden farklı üç ayrı eğilim görülmektedir: (1) artan ısı güç ile ısı direnç değerlerinde azalma, (2) artan ısı yük ile ısı direnç değerlerinde yatay eğilim ve (3) özellikle son birkaç ısı yük değerinde artan ısı güç ile ısı dirençte yavaşlayan hızlı azalma (hafif azalma). Artan ısı güç değerine bağlı olarak, ısı direncin ani azalması, FP-CLPHP’nin çalışmaya başladığının göstergesidir. Atımlı ısı borularında sürücü kuvvetlerin kaynağı ısı

yüktür Chien vd. (2012) ve Liu vd. (2020) tarafından da belirtildiği üzere ısı yük artışı ile sürücü kuvvetlerde iyileşme ve bunu takiben sirkülasyonlu akışın artarak atımlı ısı borularının daha etkili çalışması gerçekleşmektedir. Şekil 21a'da elde edilen sonuca bakılırsa, E:P=1:3 koşulu için HI=10W ısı yük altında, ısı direnç değerinde ani bir düşüş olduğu açık bir şekilde görülmektedir. E:P=1:3 ile yüklenen FP-CLPHP'nin, diğer karışım oranlarına kıyasla düşük ısı yükte çalışmaya başlamıştır. Bu erken çalışmaya başlama durumu, bir atımlı ısı borusu için çalışmaya başlama performansının görece daha etkin olduğu anlamına gelmektedir. FP-CLPHP'lerde, ısı yük etkilerine karşı akış davranışlarını detaylı gözlemlemek için, Şekil 22a ve c'de akış görüntüleri farklı ısı yükler altında sunulmuştur. Şekil 21 ve 22 eş zamanlı bakılırsa, E:P=1:3 akışkanı için, ısı yük arttıkça kanalların çoğunda sürekli salınımlı akış ve tek yönlü sirkülasyon meydana gelmiştir. Yoğuşturucu ve buharlaştırıcı bölgeleri arasında, uzun kabarcıklı akış hareketi vardır. Bu hareketin yönü, dar-geniş veya geniş-dar kanalları arasında oluşmaktadır. Isı borusu düşey konumda olduğundan, buharlaştırıcı bölgesinde sıvı bileşeni, yoğuşturucu bölgesinde ise buhar bileşeni daha baskındır. Bu olayın, birinci nedeni düşey konumdan dolayı yerçekimi kuvvetinin etkisi, ikinci nedeni ise faz değişimi-engelleme etkisi (Han vd., 2016) ile açıklanabilir. Tablo 5'te iş akışkanlarının 1 atm'de termo-fiziksel özellikleri verilmiştir. Burada, pentan ve etanolün $(dp/dT)_{sat}$ değerleri karşılaştırdığında, pentanın değeri oldukça yüksektir. Bu durumda, herhangi bir ısı yük uygulandığı zaman (kaynama noktası sıcaklığına yakın, ısı yük değeri), doyma basıncı düşük olan pentan hızla buharlaşır ve sistemin basıncını artırır. Artan sistem basıncı, diğer akışkan olan etanolünü daha yüksek bir sıcaklıkta kaynamaya zorlar. Ayrıca, bir diğer etken yerçekimi kuvvetidir. Atımlı ısı borusu düşey konumda olduğu için ve etanolün pentandan daha ağır olması (Tablo 5) özelliğinden dolayı, buharlaştırıcı bölgesinde daha fazla etanol bulunmaktadır. Aksine, pentan görece hafif olmasından dolayı (Tablo 5), kaldırma kuvveti etkisi ile yoğuşturucu bölgesine doğru hareket etmektedir. Şekil 22c'de, görüldüğü üzere meydana gelen hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı, mikrokannallarda kaynamalı akışa özgüdür ve bu durumda hızlı buharlaşmaya meydana gelerek, buhar kabarcığı her iki doğrultuda hızlı bir şekilde büyür. Ancak, buharlaştırıcı bölgesine uygulanan ısı gücünden dolayı, uzun kabarcıklı akış yoğuşturucuya doğru asimetric bir eksenel büyüme gerçekleştirir. Bu olay, akış

pasajlarında kararsızlığı artırır ve bu literatürde (Yang vd. 2009 ve Spinato vd. 2016) çalışma performansının artması anlamına gelen basınç çalkantısının artmasına yol açar. Şekil 21a ve 22b'deki bulgulara dikkat edilirse, artan ısı yük ile birbiri ardına dizilen sıvı-buhar bileşenlerin kanallar içerisinde meydana geldiği ve sistemin aktif çalıştığı (sirkülasyon olarak) görülmektedir. Böylece, ısı transferi iyileşmektedir. Şekil 21a'ya bakıldığında, yüksek ısı yük değerlerinde, ısı direnç değerlerinde yataya yakın bir eğri görülmektedir. Bu durum, FP-CLPHP'nin çalışma performansının azalması bir başka ifade ile sirkülasyon hızının yavaşlamasının bir göstergesidir. Şekil 22c'de, $HI=45W$ için akış görüntüsü verilmiştir.

İlgili çalışma kapsamında, ısı yükün sonuçlar üzerinde etkin rol oynadığı görülmüş olup, karışım oranındaki (Şekil 21) farklılığa bağlı olarak da sonuçlar önemli düzeyde değişmektedir. Genel olarak, ikili karışımlarda pentanın hacim oranının artması ile ısı performansın arttığı görülmektedir. Her iki açısal konumda da ($IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$), $E:P=1:3$ karışım oranının diğer karışım oranlarına kıyasla hem ısı direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklık değerleri daha düşüktür. Ayrıca, yer çekimi desteğinin bir etkisi olmadan bile $E:P=1:3$ iş akışkanı, $IA=0^\circ$ eğim açısında başarılı bir şekilde çalışabilmektedir. Bu kapsamda, Şekil 24c ve Şekil 25'e eş zamanlı incelendiği zaman, $E:P=1:3$ ve $E:P=3:1$ karışımları ile yüklenen FP-CLPHP'nin sabit ısı yük ($HI=35W$) altında, ısı direnç değerinin azalmasına ve ısı performansın artmasına sebep olan akış olayları açık bir şekilde görülmektedir. İlgili sonuçların, arka planında yatan sebepleri açıklamak için Şekil 21, Tablo 5 ve akış görüntüleri ile eş zamanlı değerlendirilmelidir. Tablo 5'te pentan ve etanolün termo-fiziksel özelliklerine bakılırsa, kaynama noktası, gizli ısı, yüzey gerilimi ve dinamik viskozitenin etanole kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, yukarıda bahsedildiği gibi pentanın $(dp/dT)_{sat}$ değeri, etanole kıyasla daha fazladır. Şekil 21'de, $E:P=1:3$ iş akışkanı ile yüklenen FP-CLPHP'nin, yatay ve dikey her iki konumda ve aynı çalışma koşulları altında, $HI=10W$ ısı yük değerinde çalışmaya başlayırken, $E:P=1:1$ ile yüklendiğinde sistemin çalışmaya başladığı ısı yük değeri $HI=15W$ 'tır. $E:P=1:3$ iş akışkanının, erken çalışmaya başlamasının sebebi karışım oranındaki pentan oranının fazla olmasıdır. Pentan düşük dinamik viskoziteye, düşük yoğunluk ve yüksek $(dp/dT)_{sat}$ değerine sahip olduğu için karışım oranı içindeki yüzdesel artışı sonuçları pozitif yönden etkilemiştir. İlgili çalışma koşullarına bağlı olarak, ikili karışımlarda, daha düşük dinamik viskozite,

daha düşük yoğunluk ve daha yüksek $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip saf iş akışkanların oranı arttıkça, atımlı ısı borusunun daha düşük ısı yüklerinde çalışmaya başladığı görülmektedir.

Düşük ısı yüklerinde, pentan akış kanalları içerisinde daha yüksek basınç kuvveti oluşmasını sağlar ve bu basınç kuvveti, sürücü kuvveti etkin kılar. Düşük dinamik viskozite akışın daha kolay hareketini, düşük yoğunluk ise özellikle düşük ısı yüklerinde sıvı bileşeninin daha kolay hareket etmesini sağlar. Ayrıca, düşük yoğunluğa sahip sıvı bileşenine (liquid slug) yerçekimi kuvveti görece daha az etki göstereceğinden, gelişen buhar bileşeni (vapor plug) tarafından uygulanan basınç, ilgili buhar bileşenin temas halinde olduğu sıvı bileşenini yoğunlaştırıcı bölgesine doğru hareket etmesini sağlar. Burada, faz değişimi-engelleme etkisinden bahsedilmelidir. Şekil 22 incelendiğinde, atımlı ısı borusunun bazı kanallarında hiçbir hareket olmaksızın sadece sıvı bileşenin olduğu bir alan görülmektedir. Bu olay yukarıda bahsedildiği gibi faz değişimi-engelleme etkisinin bir göstergesidir. Bu etki sebebiyle, etanolün yüksek yoğunluk değerine sahip olmasından dolayı, buharlaştırıcı bölgesinde sıvı faz halinde kalır. Bu gerçekleşen olay ısı borusu için hem avantaj hem de dezavantajdır. Eğer engelleme etkisine maruz kalan akışkan miktarı az ise, bu olay, akış kanallarının içerisinde atımlı hareketin sürdürülebilmesi için, yeterli alanın olduğu anlamına gelmektedir. İlgili alanın oluşması, bir avantaj olarak sıvı fazın varlığından dolayı sirkülasyon hareketinin devam etmesini sağlar ve bu durum kuruma sorununun önlenmesini sağlar. Bu doğrultuda, karışım içerisinde, yüksek kaynama noktasına, yüksek yoğunluğa ve düşük $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip bileşenin düşük oranda olması özellikle kuruma sorununu önler ve ısı performansını iyileştirir. Eğer, engelleme etkisine sahip akışkan miktarı fazla ise bu durumda akış hareketini sınırlar, hatta durma noktasına gelir. Bu durumda ise ısı performans düşer. İlgili durumu detaylı analiz etmek için Şekil 23a ve b’de sunulmuştur. Şekil 23a ve b’de görüldüğü gibi karışım içerisindeki etanol oranı arttıkça, hareketsiz bölge büyür ve bu olay akış hareketinin yavaşlamasına neden olmaktadır. Şekil 23b’ye bakıldığında, belli bir hacim oranının sınır değerine ulaştıktan sonra, sistem çökmekte ve ısı performans belirgin bir şekilde azalmaktadır. İkili karışımlar için, belli bir eşik karışım oranı değerinden sonra meydana gelen bu fiziksel durum sıvı fazlalığı olayı (flooding

phenomenon) olarak isimlendirilmektedir. Sıvı fazlalığı durumunda, kanallardaki akış geniş bir sanki-rijit bölge ile kaplanır ve akışın rahat hareketini engeller.

Şekil 24'te ise $FR=60\%$ 'da karışım oranının etkisini gösteren bulgular verilmiştir. Ayrıca, Şekil 25'te $FR=60\%$ 'ın tek ısı gücü (35W) ve $E:P=1:3$ (a) ile $E:P=3:1$ (b) iş akışkanlarının yatay konumdaki akış görüntüsü sunulmuştur. Şekil 21'de $FR=30\%$ 'da elde edilen bulgular ile karışım oranının etkisi karşılaştırıldığında, benzer sonuçlar görülmüş ve aynı ifadelerin geçerli olduğu saptanmıştır. Özetle, pentanın hacimsel oranı arttıkça ısı performansın iyileştiği ve $E:P=1:3$ iş akışkanı için, her iki dolum oranında da ($FR=30\%$ ve $FR=60\%$) en iyi ısı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

3.1.2.2. Eğim Açısı ve Dolum Oranının Etkisinin Detaylı Analizi

Bu başlık altında, dolum oranı ve eğim açısının etkilerini ele almak ve her iki koşulun da karışım oranı ile olan ilişkisini ortaya koymak için, dolum oranı ve eğim açısına göre düzenlenmiş bulgular/grafikler paylaşılmıştır. Bu doğrultuda, ilk olarak, Şekil 26'da dolum oranı fonksiyonu olarak, ısı direnç değerlerinin ısı yük ile değişimini gösteren grafikler, farklı eğim açıları ve karışım oranları için sunulmuştur. Şekil 26'da görüldüğü gibi, $IA=90^\circ$ konumunda, $E:P=1:1$ ve $E:P=1:3$ iş akışkanları için, $FR=30\%$ koşulundaki ısı boruları $FR=60\%$ koşulundaki ısı borularına kıyasla daha iyi ısı performans göstermektedir. $FR=30\%$ koşulunda ısı direnç değerleri daha düşük ve çalışmaya başlama performansı daha iyidir. $FR=30\%$ 'da $E:P=3:1$ ve $E:P=1:1$ için ısı borusu, sırasıyla, $HI=10W$ ve $HI=15W$ değerlerinde çalışmaya başlarken; 60% dolum oranında her iki karışım oranı içinde çalışmaya başlama ısı yük değeri $HI=20W$ 'tır. $IA=90^\circ$ konuma ek olarak, $E:P=1:3$ için, $IA=0^\circ$ konumda da benzer bir durum söz konusudur. Ayrıca ilgili durumda, $FR=30\%$ en iyi ısı karakteristikleri göstermektedir. Şekil 21'de belirtildiği gibi, $E:P=1:3$ iş akışkanı ile yüklü atımlı ısı borusu, $IA=0^\circ$ konumunda ve her iki dolum oranına sahip koşullarda verimli bir şekilde çalışmaktadır. Aslında, bu karakteristik özellikler sayesinde ilgili koşullarda ısı borusunun aktif olarak çalıştığı Şekil 26a, c ve d grafiklerinde görülmektedir. İlgili grafikler kapsamında, $FR=30\%$ oranının, $FR=60\%$ oranından daha iyi bir ısı performans gösterdiği ifade edilebilir.

Yukarıdaki açıklamalarda, $E:P=1:3$ 'ün ısı transfer özelliği açısından en iyi hacimsel karışım oranı olduğu ifade edilebilir. Şekil 26'da görüldüğü gibi, dolum oranına en az bağlılık, çalışan bir ısı borusu için, bu karışım oranında elde edilmiştir. Şekil 26e'den $E:P=3:1$ karışım oranındaki iş akışkanına sahip ısı borusunun her iki dolum oranında da aktif olarak çalışmadığı görülmektedir. $FR=\%60$ oranında, $E:P=3:1$ karışımı için ısı direnç değerleri sadece son birkaç ısı yük değerinde ($HI=25W<$) azalma eğilimi göstermektedir. Ancak, bu tür bir görece düşüş eğilimi rastgele başla-dur (start-stop) hareketlerini temsil etmektedir. Sonuç olarak, çalışan bir ısı borusu için, $FR=\%30$ 'dan $FR=\%60$ 'a artan dolum oranı çalışma performansında azalmaya yol açar. Bu azalmanın düzeyi ise karışım oranına şiddetle bağlıdır. Uygun ikili karışımlar kullanılarak, dolum oranına bağımlılık önemli düzeyde azaltılabilir. Dolum oranlarındaki artışa bağlı olarak performansta meydana gelen azalmanın temel sebebi, Yang vd. (2009) tarafından da belirtildiği üzere, basit bir şekilde kanallardaki akışkan fazlalığına atfedilebilir. Şekil 26a'nın ve ilgili şekle karşılık gelen Şekil 27'deki akış görüntüsünün, eş zamanlı değerlendirilmesi fiziksel mekanizma ile ilgili detayların kolay bir şekilde ifade edilmesini sağlar. Bu kapsamda, sırasıyla, $FR=\%30$ ve $FR=\%60$ için $IA=90^\circ$ ve $HI=20W$ koşullarındaki akış görüntüleri ve akış olayları Şekil 27a ve b'de verilmiştir. Şekil 27a'dan, çoğunlukla buharlaştırıcı ve kısmen adyabatik bölgelerdeki bazı kanallarda halkasal/yarı halkasal akışı temsil eden ince film buharlaşmasının aktif olduğu görülmektedir. İnce film buharlaşması en etkili ısı transfer mekanizmalarından biridir. Akış sirkülasyonu, genellikle dar kanallardan geniş kanallara doğru yönelir. Bu süreçte, dar kanallarda şiddetli kaynamayı takiben meydana gelen hızlı kabarcık büyüme olayı (Şekil 27b) aktif rol oynar. Mevcut ısı borusunun yapısı veya çalışma prensibi dikkate alındığında hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı asimetrik hızlı kabarcık büyüme olayı (asymmetrical rapid bubble growth phenomenon) olarak adlandırılabilir. Isı borusunun buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı olmak üzere, iki uç bölgesi vardır. Sınırlanan buhar bileşeni yoğunlaştırıcı bölgesine doğru daha etkin bir şekilde büyür. Bu nedenle, üniform olmayan yapıdaki PHP'ye bağlı olarak meydana gelen bu tür bir olay asimetrik hızlı kabarcık büyümesi olarak adlandırılabilir. FP-CLPHP'nin iç kısmında oluşan çalkantı ve/veya kararsızlığın artırılması ve atımlı akışın desteklenmesi açısından önemli bir fiziksel olaydır. Önceki bölümlerde akışın sürekli tek yönlü olarak gerçekleşmediğinin altı çizilmiştir. İlgili

koşullarda yüksek hızlı görüntüleme ile ters akış olayı görüntülenmiştir. Buna karşın Şekil 27b’de, $FR=\%60$ oranına ait görüntü verilmiştir. İlgili şekil incelendiği zaman, baskın akış desenleri kabarcıklı veya uzun kabarcıklı akıştır, ancak kanalların çoğu pasif haldeki sıvı bölge (hareketsiz sıvı) ile kaplıdır. Bu durum akışın esnekliğini veya hareket özelliğini önemli ölçüde sınırlandırır. Bu fiziksel olguya bağlı olarak, yoğunlaştırıcı bölgedeki akış hareketi veya aktivitesi de büyük ölçüde sınırlanır. Bazı kanallarda, asimetric hızlı kabarcık büyüme olayı vardır ve kabarcıklaşma aktiftir; ancak, bu tür olayların kısmi düzeyli katkısı sirkülasyon hızının artışı ve dolayısıyla ısı performans artışını sağlamak için yeterli değildir. Baskın olan fiziksel sebep kanallarda sıvı fazlalığına bağlı olarak akış hareketinin sınırlandırılmasıdır. Ek olarak, aktif olmayan sıvı bölgesinden dolayı faz değişimi-engelleme etkisi de performans düşümündeki bir sebep olarak gösterilmektedir.

Eğim açısının etkisini gösteren detaylı grafikler ise Şekil 28’de verilmiştir. Burada, iki kritik açı kullanılmıştır $IA=0^\circ$ ve $IA=90^\circ$ ’dir. Yatay konum ($IA=0^\circ$) yer çekimi desteğinin olmadığı durumu, düşey konum ($IA=90^\circ$, alttan ısıtma modu) ise yer çekimi desteğinin maksimum olduğu durumu karakterize etmektedir. Atımlı bir ısı borusunun açısal değişimden bağımsız olarak çalışabilmesi önemli bir özellik ve başarıdır. Bu kapsamda, Şekil 28 incelendiğinde, $E:P=1:3$ iş akışkanı ile yüklenen ısı borusunun mevcut deneysel parametreler kapsamında diğerlerine kıyasla en iyi ısı performansı sunduğu açıkça görülmektedir. Bu durum hem $FR=\%30$ hem de $FR=\%60$ oranları için geçerlidir. Diğer taraftan, $E:P=1:3$ ’ün açısal değişime karşı başarısına rağmen, $IA=90^\circ$ ’deki ısı performans nispeten $IA=0^\circ$ ’den daha iyidir. Şekil 28c ve d’den görüldüğü gibi düşey konumda ($IA=90^\circ$) maksimum ısı güç değeri daha yüksek ve çalışmaya başlama performansı daha iyidir. Şekil 27a’dan, $E:P=1:1$ iş akışkanı için $FR=\%30$ oranına sahip ısı borusu açısal değişime büyük ölçüde bağımlı olduğu görülmektedir. Öte yandan, Şekil 28b, e ve f’deki koşullar için eğim açısından neredeyse bağımsız bir çalışma gösterdiği ifade edilebilmektedir. Ancak, ilgili koşullar altında, ısı boruları ya çalışmamakta ya da sadece aralıklı atımlar göstermektedir.

3.1.3. Birbiriyle Karışan ve Karışmayan Akışkan Çiftlerinin Düz Plakalı Kapalı Döngülü Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP) Isıl Performansı Üzerindeki Rolü

3.1.3.1. Farklı Akışkan Türleriyle Yüklü FP-CLPHP'nin Isıl Performansı

. Şekil 29'da hem ikili karışımların hem de saf akışkanların ısı dirençleri ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının ısı yük ile değişimlerini gösteren bulgular verilmiştir. İlk olarak saf akışkanların davranışları hakkında bilgi verilmiştir. Şekil 29a'dan, hekzan ve pentanın benzer eğilim gösterdiği, diğer taraftan metanolün ısı direnç değerinin biraz farklı olduğu görülmektedir. Daha açık bir ifade ile $HI=20W$ yük değerinde, metanolün ısı direnci diğer saf akışkanlara kıyasla görece bir şekilde daha düşüktür. Bu durum da metanolün çalışmaya başlama performansının daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. $HI=15W$ değerinden maksimum ısı güç değerine kadar metanol için hem ısı direnç değerleri hem de buharlaştırıcı sıcaklıkları değerlerinden belirgin olarak daha düşüktür. Metanol ve hekzan üzerinden bir karşılaştırma yapılırsa, ilgili ısı yük aralığında, ısı dirençteki yüzdesel değişim %2.4 ile %24.2 arasında olup, buharlaştırıcı sıcaklıkları arasındaki fark $3.1^{\circ}C$ 'ye kadar çıkmaktadır (metanol için daha düşük sıcaklık). Özetle, saf hekzan ve pentan iş akışkanları benzer performans gösterirken, metanol onlardan daha iyi bir performans göstermektedir. Kapsamlı bir inceleme yapmak için, Şekil 30'da gösterilen akış görüntüleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Şekil 30 a-c'de metanol ile yüklü ısı borusunun farklı ısı yüklerde görüntüleri verilmiştir. Isı yük artışı ile hem kabarcık oluşumu hem de sıvı ve buhar bileşenlerinin sayısının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle, orta düzeyli ısı yüklerde ($HI=35W$ gibi) sirkülasyonlu akış hızlıdır, diğer taraftan kabarcıklaşma belirgin bir şekilde zayıftır. İş akışkanının yüksek yüzey gerilmesine sahip olması, kabarcıklaşma popülasyonunun ve yeteneğini azalmasına yol açabilir; ancak, oluşan kabarcıkların çökmeye karşı dirençli olmasını sağlar. Bu kapsamda, uzun kabarcık ve/veya halkasal akışların oluşumuna katkı sunmaktadır. Halkasal akış ince film buharlaşması ile karakterize edilir. İnce film buharlaşması da iki fazlı akışlarda en iyi ısı transfer mekanizmalarından biridir. Ayrıca, metanolün gizli ısının yüksek olması daha fazla ısının aktarılmasını sağlar. Sonuç olarak, ısı performansın iyileşmesine sebep olan durum, yüksek sirkülasyon hızı ve ona eşlik eden halkasal ve uzun kabarcıklı akış modellerinin aktif olmasıdır.

Şekil 30 d-f'ye saf pentan ile doldurulmuş atımlı ısı borusuna ait akış görüntüleri sunulmuştur. Kabarcıklı kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır. Bir başka ifade ile kabarcık popülasyonu artan ısı yük ile belirgin bir şekilde artar. Özellikle orta ve yüksek ısı güç değerlerinde kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akış baskındır. Yoğun kabarcıklaşmanın temel sebebi pentanın belirgin bir şekilde daha düşük yüzey gerilmesine sahip olmasıdır. Düşük yüzey gerilmesi daha küçük ve daha fazla sayıda kabarcık oluşumunu tetikleyen bir faktördür (Wang vd. 2016). Bir başka sebep ise pentanın doyma noktasının belirgin bir şekilde daha düşük olması ve böylece pentan, düşük ısı yük değerlerinde kaynamaya başlayabilir. Buharlaştırıcı bölgesindeki aktif kabarcıklaşma ısı enerjisinin absorbe edilmesinde etkin bir rol oynayabilir; ancak, atımlı ısı borusu için absorbe edilen ısınn buharlaştırıcı bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine aktarılması gerekmektedir. Buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya olan ısı transfer hızı atımlı ısı borusunun performansını belirler.

Şekil 30 g-i'de, hekzan ile yüklü ısı borusunun görüntüleri verilmiştir. Artan ısı yük ile kabarcıklaşma iyileşmektedir. Sirkülasyon pentana kıyasla daha hızlı; ancak, sirkülasyon hızı metanolden daha yavaştır. Düşük sirkülasyon hızının sebebi, düşük $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip olmasıdır.

3.1.3.2. Karışımların Karakteristik Davranışları

Her bir saf akışkan için yukarıda ifade edilen tekil davranış özelliklerine rağmen, ilgili akışkanlar karıştırıldıklarında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 29c-h'de, karışımlar arasındaki önemli değişimler görülmektedir. Ayrıca, karışım oranının sonuçları önemli derecede etkilediğinin de altı çizilmelidir. Şekil 29c ve d'de, MR=1:1 için pentan-metanol karışımının diğer karışım oranlarından görece bir şekilde daha iyi ısı karakteristikler sunduğu görülmektedir. P:M=1:1 karışımı ile yüklenen ısı borusunun, çalışmaya başlama performansı daha iyidir. O yüzden, P:M=1:1 ile yüklü FP-PHP HI=10W değerinde çalışmaya başlarken, hem H:P=1:1 hem de M:H=1:1 karışımları HI=20W değerinde çalışmaya başlamıştır. Ayrıca, çalışmaya başlama ısı yük değerinde, H:P=1:1 ve M:H=1:1'in ısı direnç değerleri P:M=1:1'e göre daha büyüktür. Buna karşın, tüm dağılım incelendiğinde hem ısı direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklıkları açısından karışmayan akışkan çiftleri (M:H ve P:M), karışan akışkan çiftine (H:P) kıyasla daha iyi ısı performans göstermiştir. Benzer sonuçlar,

MR=1:1'e ek olarak, MR=4:1 durumu için de geçerlidir. Özetle, MR=1:1 ve MR=4:1 için, karışmayan akışkan çiftlerinin ısı performans, karışabilen akışkan çiftine kıyasla daha iyidir. Karışmayan akışkan çiftleri içinde ise pentan-metanol karışımı görece olarak üstün ısı transfer performansı sunmaktadır. Detaylı inceleme/tartışma için akışkan özelliklerinin bulunduğu Tablo 5 ve mevcut koşullar için elde edilen akış görüntüleri dikkate alınacaktır. Bu kapsamda, $IA=90^\circ$, $HI=40W$ ve $MR=1:1$ koşullarında, H:P, M:H ve P:M akışkan çiftleri için alınan görüntüler Şekil 31a-c'de verilmiştir. Her bir akışkan çifti ayrı paragraflar halinde tartışılmıştır.

Pentan-Metanol Karışımı (P:M=1:1; karışmayan ikili akışkan): Şekil 29c'den P:M=1:1 iş akışkanının en iyi ısı performans sunduğu görülmektedir. Bunun olası sebebi, pentan ve metanolün ısı transferi açısından birbirini tamamlayıcı özellikleridir. Pentanın kaynama noktası ve $(dP/dT)_{sat}$ değeri metanole kıyasla yüksektir. Bu doğrultuda, bu karışım için erken çalışmaya başlama daha düşük ısı yük değerinde yani $HI=10W$ 'da meydana gelir. Ayrıca, pentanın viskozite değeri ve yüzey gerilimi ilgili akışkanlar arasında en düşük olandır. Düşük viskozite akışkanın kanallar içinde daha kolay akmasını sağlar. Düşük yüzey gerilmesi ise, kabarcıkların kolayca oluşmasını sağlar. Bu kapsamda, kabarcıklaşma süreci ısı transfer performansında etkin rol oynar. Şekil 31c'de, hem adyabatik hem de buharlaştırıcı bölgelerindeki kabarcıklaşma süreci daha detaylı belirtilmiştir. Ayrıca, döngülerde, buhar bileşenleri daha hızlıdır ve fazla sayıdaki salınlı/titreşimli kabarcık akışı itici kuvvet sağlayarak mikro taşınımı geliştirir. Pentan-metanol ikili akışkanının karışmayan özelliği akış davranışı ve ısı karakteristikler üzerinde kilit öneme sahiptir. Pentan metanol ile karışmadığı için faz değişim sürecine kolayca başlayabilir. İlgili sürecin gerçekleşmesini sağlayan sebep, düşük kaynama noktası ve yüksek $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip olmasıdır. Pentanın buhar bileşenleri ısı aktarımın iyileşmesine sebep olur ve metanol molekülleri arasında ısının daha iyi yayılmasını sağlar. Metanol molekülleri ayrıca, faz değişim sürecinde fazla ısıyı absorbe eder. Bu nedenle, P:M=1:1 karışımı oldukça başarılı ısı performans gösterir.

Metanol-Hekzan Karışımı (M:H=1:1; karışmayan akışkan çifti): her iki akışkan için Şekil 29c, Şekil 31b ve Tablo 5 bulgularına eş zamanlı bakıldığında, karışmayan akışkan çiftini (M:H) oluşturan bileşenlerin kaynama noktası birbirine yakındır ve ilgili kaynama noktalarının değeri pentana göre yüksektir. Ayrıca, her iki

akışkanın $(dP/dT)_{sat}$ değerleri pentana kıyasla düşüktür. Bu iki durumun birleşimi M:H=1:1'in belirgin olarak, P:M=1:1'e kıyasla kötü çalışmaya başlama performansının muhtemel sebebidir. Diğer fiziksel olay ise kabarcıklaşma ile ilgilidir. Şekil 31b'den görüldüğü gibi kabarcık popülasyonu sayısı özellikle de mikro kabarcıkların sayısı, M:H=1:1 için diğer karışımlara kıyasla görece azdır. Sebebi, hekzan ve metanolün, pentana göre yüzey gerilmesinin yüksek olmasıdır. Diğer taraftan, metanolün yüksek dinamik viskozite değerine sahip olması akış pasajlarındaki sirkülasyon hızını yavaşlatır ve bu diğer karışıma (P:M=1:1'e) kıyasla ısı performansın düşük olma sebebidir. Şekil 31b'ye dikkatli bakılırsa, ısı borusu boyunca buhar-sıvı dağılımları daha dengeli olduğu görülür. Bu durum, performans artışına sebep olur. Buhar-sıvı bileşenlerinin akış pasajı boyunca üniforma yakın dağılımları ve özellikle metanolün gizli ısının yüksek olması yukarıda belirtilen dezavantajları telafi eder. Bu doğrultuda, M:H=1:1'in ısı performansı P:M=1:1'e yakındır.

Hekzan-Pentan Karışımı (H:P=1:1; karışabilen akışkan çifti): Şekil 31a'da, hekzan-pentan karışımının (H:P=1:1) eşit hacim oranına sahip akış görüntüsü gösterilmektedir. Bu görüntüden, yoğunlaştırıcı bölümündeki akışkanın çoğunun ısıtıcı bölgesinde (buharlaştırıcı bölgesi) oluşan yüksek basınç sebebiyle engellendiği görülmektedir. Sonuç olarak, akış hareketi bloke edilir ve bu durum ısı performansın düşmesine sebep olur. Uzun buhar kabarcıklarının menisküslerine bakılırsa, bu bölgenin ağırlıklı olarak buhar ile kaplı olduğu anlaşılmaktadır. Bu olay yoğunlaştırıcı bölgesindeki yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşir ve buhar hapsetme olayı (vapor trapping phenomenon) olarak adlandırılabilir. İlgili koşullarda, yoğunlaştırıcı sıcaklığı yaklaşık olarak 81°C'dir. Bu durum, literatürde bahsedilen faz değişimi-engelleme olayına ters olarak kabul edilmektedir (Han vd. 2016; Shi vd. 20016). Buhar hapsetme olayı yığın akış sirkülasyonunu engeller; öyle ki, bu durumda, termosifon tipi çalışma hareketi (Yang vd., 2009) gözlemlenir. Hekzanın çoğu termo-fiziksel özellikleri (kaynama noktası ve $(dP/dT)_{sat}$ değerleri hariç), metanole kıyasla, pentana yakındır. Pentanın kaynama noktası daha düşük ve $(dP/dT)_{sat}$ değeri daha yüksek olduğu için, karışabilen özelliğine sahip akışkan çifti için pentan bileşeni daha erken buharlaşır ve sistem basıncını artırır. Ayrıca, her iki bileşenin yoğunlukları da birbirine yakındır. Bu kapsamda, buharlaşan pentan sıvı hekzan moleküllerini kolayca

sürükleyebilir ve bunları yoğunlaştırıcı bölgesine taşıyabilir. İlgili akışkan çiftinin karışabilir yapıda olması sürüklenme prosesinde önemli rol oynar ve ayrıca karışımındaki bileşenlerin etkileşimlerini de iyileştirir. Isı transferiyle ilgili olarak iyi bir karışmanın önemi Xu vd. (2019) tarafından da vurgulanmıştır. Keskin köşelerin sebep olduğu kılcallık etkisine ve daha soğuk yüzeylerin desteğine ek olarak, toplanan sıvı hekzan molekülleri yapışan/yüzeye yayılan (sessile) damlacıklar formunda aşağı doğru akar (düşey konumdan dolayı buharlaştırıcı kısmına). Bu fiziksel olay sıvı köprüleri oluşturur ve bir akış deseni olarak literatürde sıvı halka akış (liquid ring flow) olarak ifade edilir (Serizawa vd., 2002; Tuo ve Hrnjak, 2014). Bazı akış pasajlarında, sıvı filminin varlığı ve film buharlaşması, yüzeyin sıvı damlacıklar tarafından ıslatılması, kabarcık oluşumu ve kısmen gerçekleşen akış sirkülasyonu gibi ilgili fiziksel olaylar ısı performansın iyileşmesinde rol oynar. Buna rağmen, hapsedilen akışkan bölgesi tarafından akışın sınırlandırılması sirkülasyon hızını önemli ölçüde azaltır ve ısı aktarımını olumsuz etkileyerek performans düşümüne yol açar. Bu sebeple, eğer bir karışım belirgin olarak düşük gizli ısıya sahip iki akışkandan oluşmuş ise bütün etkisi fiziksel olaylar arasında, atımlı sirkülasyonlu akışın devamlılığı bakımında ısı performans için birincil öneme sahiptir.

3.1.3.3. Karışım Oranının Etkisi

Bu bölüm kapsamında, her bir iş akışkanının karışım oranının etkisini gösteren grafikler Şekil 32’de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında karışım oranının ısı özellikler üzerinde detaylı bir etkisi olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, karışım oranı kadar karışım türü de önemli bir etkiye sahiptir. Şeki 32 incelendiğinde, pentan-metanol karışımı ile yüklü ısı borusunun ısı performansı karışım oranına belirgin bir şekilde bağlıdır. Uygun karışım oranına sahip pentan-metanol ikili karışımları her iki konumda da (yatay ve düşey), saf akışkanlara kıyasla çok daha başarılı bir ısı performans göstermiştir. Bu kapsamda, pentan-metanol karışımları arasında, P:M=1:1 için; (1) düşük ısı yüklerde çalışmaya başlama performansı daha iyi, (2) ısı direnç değerleri daha düşük ve (3) buharlaştırıcı sıcaklıkları daha düşüktür. Diğer taraftan, pentan-metanol karışımının metanol bileşeninin fazla olan karışım oranında, ısı direnç değeri yüksektir. Bunun sebebi; (1) faz değişimi-engelleme etkisi, (2) yüksek metanol oranı ve (3) yüksek dinamik viskozite (metanol) değeridir. Pentan,

metanole kıyasla yüksek $(dP/dT)_{sat}$ ve düşük kaynama noktasına sahip olması ve bu doğrultuda, pentanın erken kaynamaya başlayıp iç basıncı arttırmasıdır. Artan basınç ile metanolün kaynama prosesini engeller ve düşük ısı performansına neden olur. Metanol-hekzan karışımında, karışım oranının etkisi görece olarak zayıftır. Olası sebep, iki saf akışkanında termo-fiziksel özelliklerinin nispeten birbirine yakın olmasıdır. Değerlendirme kapsamında, M:H=1:4'in en iyi ısı performansına sahip olduğu gösterilmiştir. Hekzan-pentan karışımı ise diğer karışım türlerine (Metanol-Hekzan ve Pentan-Metanol) kıyasla en kötü ısı performansı sunmaktadır. Ayrıca, karışım oranının belirgin bir etkisi görülmemiştir. Detaylı sebepler ve fiziksel olaylar önceki bölümde (4.3.2 bölümü kapsamında) bahsedilmiştir.

3.1.3.4. Eğim Açısının Etkisi

Şekil 33'de her bir iş akışkan için, iki farklı açısal konumda elde edilen değerler sunulmuştur. Bir atımlı ısı borusunun, herhangi bir açısal konumda başarılı bir şekilde çalışabilmesi istenilen birincil beklentidir. Şekil 33'te belirtilen hem saf akışkan hem de eşit orandaki ikili karışımlarla yüklü ısı boruları nispeten açıdan bağımsız olarak çalışmaktadır. Bir başka ifade ile yer çekimi kuvveti desteğinin yüksek olduğu konumda (düşey konum) ve yer çekimi kuvvetinin bir desteği olmaksızın (yatay konum) çalışabilmektedir. Özellikle, M:H=1:1, H:P=4:1 ve P:M=1:4 ile yüklü ısı boruları düşey veya yatayda birbirine çok yakın performans sunmaktadır. İlgili grafiklere ek olarak, $IA=0^\circ$ 'de tek bir ısı yükte ($HI=40W$) akış görüntüsü verilmiştir (Şekil 34). Görüntü kapsamında, buharlaştırıcı bölgesinde aktif kabarcıklaşma ve bazı akış pasajları boyunca sıvı ve buhar bileşeni bulunmaktadır. Bir diğer fiziksel olgu olarak da sıvı filmi ile çevrili uzun kabarcıklı akış vardır. Bu gibi akış olayların oluşması, ilgili ısı borusunun aktif olarak çalıştığını. Bir ısı borusunda paralel kanalların farklı çaplarda olması özellikle $IA=0^\circ$ konumda ilgili ısı borusunun çalışmasına büyük bir katkı sağlamaktadır.

Mevcut bölüm kapsamındaki tüm verilerin genel değerlendirmesinden sonra, en iyi iş akışkanını belirlemek için grafiklerde görece en iyi ısı performansı sunan akışkanlar seçilerek Şekil 35'te belirtilmiştir. Şekil 35 incelendiği zaman, P:M=1:1 ile yüklenen ısı borusu en iyi ısı performansı sunmaktadır. Sonuç olarak, üniform

olmayan bir FP-CLPHP için, eşit hacim karışım oranında pentan-metanol akışkan çifti kullanılarak ısıl performansı önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

3.1.4. Üçlü Karışımlarla Yüklenen Düz Plakalı Atımlı Isı Borusunun (FP-CLPHP-2) Deneysel Analizi

3.1.4.1. Isıl Yük ve Dolum Oranı Etkisi

3.1.4.1.1. Isıl Yük Etkisi

Şekil 36a ve c’den görüldüğü gibi, artan ısıl yük ile genel karakter olarak her iki karışım için ısıl direnç değerlerinin değişimi benzer eğilim göstermektedir. Isıl direnç değerleri öncelikle azalır ve devamında yaklaşık olarak yatay bir eğilim gösterir. Literatürde bu tür bir eğilim, sirkülasyon hızındaki artışa atfedilir (Chien vd., 2012; Tseng vd., 2014). Ancak, kapsamlı bir analiz yapmadan veya kesin yargılara varmadan önce akış mekanizmaları, ısıl karakteristikleri ve termo-akış davranışlarının sorgulanması çok önemlidir. Bu doğrultuda, $IA = 90^\circ$, $W:M:P = 1:2:3$ ve $FR = \%50$ çalışma koşulları için, sırasıyla, $HI=15W$, $HI=30W$ ve $HI=40W$ ısıl yük değerlerine karşılık gelen üç akış görüntüsü Şekil 37a-c’de verilerek eş zamanlı bir analiz yapılmıştır.

Düşük ısıl yük kapsamında, Şekil 37a’da belirtilen akış görüntüsü $HI=15W$ değerine karşılık gelmektedir. İlgili koşul için eş zamanlı olarak Şekil 36c’ye bakıldığında ısıl direnç değerinde ani bir düşüş olduğu görülmekte olup, bu ani düşüş FP-CLPHP’nin erken çalışmaya başlaması anlamına gelmektedir. Bu çıkarım aynı zamanda, akış görüntüleme ile desteklenmektedir. $HI=15W$ değerinde, kanallardan bazıları aktiftir; ilgili kanallarda ayrık buhar ve sıvı bileşenler oluşmuştur ve salınımlı/atımlı harekete sahip sirkülasyonlu akış başlamıştır. Buharlaştırıcı bölümünden yoğunlaştırıcı bölümüne ısı aktarımı başladığı için ısıl direnç aniden düşer. Bazı akış pasajlarında, aşağı doğru hareket eden sıvı damlacıkları vardır ve bunlar genellikle kanal köşeleri boyunca hareket ederler. Bu olayın iki faktörün birleşimi olarak meydana geldiği değerlendirilmektedir: (1) köşe etkisi ve (2) karışımı oluşturan bileşenlerin yoğunluk farkı. İlgili saf akışkanlar için, su yüksek yoğunluğa ve kaynama noktasına sahiptir. Bu kapsamla, kanallar arasında sıvı fazda kalabilir veya sıvı faza dönüşebilir ve yer çekimi kuvveti etkisi ile aşağı yönlü hareketi sağlar.

Şekil 37b’de $HI=30W$ ’a karşılık gelen ve orta düzeyli ısıl güç değerlerini karakterize eden görüntü sunulmuştur. Bu durumda, tüm kanallarda aktif bir sirkülasyon hareketi meydana gelmiştir. Genel olarak, buharlaştırıcı bölgesinde, akış dar kanaldan geniş kanala yönelir ve oluşan buhar kabarcıkları kanallarda yükselir. Kanalların asimetrik kesitli tasarımı tek yönlü akışı desteklemektedir. Ancak, akışın sürekli olarak tek yönlü bir harekete sahip olmadığı belirtilmelidir. Bazı kanallarda, karmaşık basınç çalkantıların meydana gelmesi sonucu, ters akış hareketi oluşmaktadır. Ters akış hareketi kapsamında, akış bileşenlerinin sayısı (sıvı-buhar bileşenleri) artar. Bu bileşenler duyulur ve gizli formda ısı aktarımına katkı sağlar. Mevcut bileşenlerin hızlı-çalkantılı davranışı taşınım ile ısı transferini de iyileştirir. Buhar kabarcıkları açısından, ince sıvı filmi ile çevrili buhar kabarcıklarının sayısının artması ayrıca ısı transfer yüzeyleriyle temas eden sıvı film uzunluğunun da artması anlamına gelmektedir. İnce film buharlaşması, ısıl performansı artıran en etkili mekanizmalardan biri olduğu Spinato vd. (2016) tarafından da belirtilmiştir. Ayrıca, yoğunlaştırıcı bölümündeki yoğunlaşma prosesi de eş zamanlı iyileşir.

Yüksek ısıl yük kapsamında, Şekil 37c’de sunulan akış görüntüsü $HI=40W$ değerine karşılık gelmektedir ve ısıl güç değeri daha fazla artırılsa farklı akış mekanizmaları meydana gelmektedir. Buharlaştırıcı bölgesi daha ağır olan bileşen ile kaplanır ve tek faz ve faz değişim aktiviteleri neredeyse durur. Adyabatik bölge, buharlaştırıcı bölgesinin görevini üstlenir ve şiddetli kabarcıklaşma bu bölgede meydana gelir. Kabarcıklaşma çok etkindir ve özellikle adyabatik bölge ile buharlaştırıcı bölge sınırında meydana gelen mikro kabarcıklardır. Bu mikro kabarcıkların aktiviteleri mikro taşınımı iyileştirir. Küçük buhar kabarcıkları meydana geldiğinde, sürekli ısıtma koşullarında birbirleriyle birleşerek büyürler ve uzun kabarcıklı akış modelini oluştururlar. Isı borusunun tüm kanalları boyunca, sirkülasyon hızı orta düzeydeki ısıl yük değerine ($HI=30W$, Şekil 37b) kıyasla azalır. Bunun sebebi, buharlaştırıcı bölgesinin görece sıvı faz ile kaplı olması ve ısı aktarımının sadece iletim mekanizması ile olmasıdır. Ayrıca, yoğunlaştırıcı bölümünde (yoğunlaştırıcunun U-döngüleri arasında) nispeten de olsa akışkanın atılım hareketi görünmektedir.

Aktif bir FP-CLPHP’de, ısıl güç değerinin düzeyine bağlı olarak yukarıda detaylı bir analiz yapılmıştır. Şekil 36b ve d incelendiği zaman, artan ısıl yük ile

buharlaştırıcı bölgesinin sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak basınçta meydana gelen artış sirkülasyon hareketinin başlama sebebidir (Jun ve Kim 2016). Ayrıca, yüksek basınç altında, kabarcık oluşumu, kabarcığın büyümesi ve çökmesi atım/salınım hareketini iyileştiren basınç farkını artırır. Ancak, ısıl yükteki artışa bağlı olarak, ısı borusunun performansında meydana gelen gelişme ve devamlılık sadece sirkülasyon hızına ve atım hareketine bağlı değildir. Akış desenleri, kabarcık dinamiği ve ince film davranışı da ısıl performans üzerinde etkin bir rol oynar. Sirkülasyon hızındaki azalma ve bu sebeple ısıl performansındaki düşüş, büyük ölçüde şiddetli kabarcıklaşma, mikro taşınım ve ince film buharlaşması mekanizmaları ile telafi edilebilir.

3.1.4.1.2. Optimum Dolum Oranı ve Dolum Oranı Etkisi

Şekil 36 ayrıca, dolum oranı etkisini tartışmak ve böylece optimum dolum oranını belirlemek için de kullanılmıştır. Şekil 36'daki dolum oranı değerleri, düşük ($FR=30\%$), orta ($FR=50\%$) ve yüksek ($FR=70\%$) değerlere karşılık gelmektedir. Hem $W:M:P=1:1:1$ hem de $W:M:P=1:2:3$ iş akışkanları için en iyi ısıl karakteristikler 50% dolum oranında elde edilmiştir. $FR=50\%$ 'de, karışımların hem ısıl direnci hem de buharlaştırıcı sıcaklığı diğer dolum oranlarındaki değerlere kıyasla daha düşüktür. Ancak, $FR=70\%$ için hem ısıl direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklıkları en yüksek değerdedir ve ısıl performans olarak kötü karakteristiğe sahiptir. Bu durum, özellikle, orta ve yüksek ısıl güç değerlerinde belirgindir ($> 15W$). Örnek olarak, Şekil 36a'ya göre, $HI=25W$ 'ta ve $FR=50\%$ 'den $FR=70\%$ 'e artırılınca ısıl dirençte yaklaşık 23.5% artış meydana gelir. Ek olarak, ilgili koşullarda, $FR=50\%$ 'deki buharlaştırıcı sıcaklığı, $FR=70\%$ 'ten yaklaşık $5.1\text{ }^{\circ}C$ daha düşüktür. $FR=70\%$ 'te ısıl direnç değerlerinin yüksek olmasının temel sebebi sıvı içeriğinin fazla olmasıdır. Sıvı içeriğinin fazla olması buharlaşma ve atım hareketini baskılar ve sirkülasyon hareketini sınırlandırır (Yang vd., 2009). Diğer taraftan her iki karışım değeri için $FR=30\%$ 'da elde edilen performans düzeyi $FR=50\%$ 'den görece daha düşüktür. Ancak, $FR=70\%$ ile kıyaslandığı zaman $FR=30\%$ koşulunda akış serbestliği çok daha fazladır. Başka bir ifadeyle, buhar ve sıvı bileşenleri kolayca meydana gelebilir ve hareket edebilir; ancak, ısı aktarımını sağlayan ortam iş akışkanıdır ve iş akışkanının miktarı ısı transfer

performansı üzerinde önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, mevcut deneysel koşullarda, FP-CLPHP için optimum bir dolum oranı değeri vardır ve bu değer $FR=50\%$ 'dir.

Şekil 38a-c'de dolum oranına bağlı değişimleri gösteren; $IA = 90^\circ$, $W:M:P = 1:1:1$ ve $HI = 25W$ için sırasıyla $FR=30\%$, $FR=50\%$ ve $FR=70\%$ değerlerine karşılık gelen akış görüntüleri verilmiştir. $FR=30\%$ 'da (Şekil 38a), ısı borusu başarılı bir şekilde çalışabilmekte olup, kanallar boyunca yarı halkasal akış deseni mevcuttur. Bu akış deseni efektif ince film buharlaşması ve ilgili yoğunlaşma prosesleri anlamına gelmektedir. Şekil 38a'dan görüldüğü gibi, $HI=90^\circ$ konumuna sahip FP-CLPHP için, alttan ısıtma modu avantajıyla sıvı damlacıkları aşağı yönde hareket eder. İş akışkanının, az olması ($FR=30\%$ da olduğu gibi) hem avantaj sağlar hem de dezavantaj oluşturur. Düşük akışkan miktarı sebebiyle hareket ettirilmesi gereken sıvı bileşenlerin kütlesi azalır ve böylece akış hareketi basitleşir. Az miktarda akışkana sahip ısı borusu için dezavantaj ise ısı transfer alanının daha büyük bir bölümünün buhar bölgesi ile kaplanmasıdır. Yukarıda belirtilen kombinasyonların bütünleşik etkisi, $FR=30\%$ değerinde ısı direnç değerinin $FR=50\%$ 'dekine kıyasla nispeten yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bunun dışında, Şekil 38b'de, optimum dolum oranında ($FR=50\%$) kanallar içerisinde çok sayıda buhar ve sıvı bileşeni bulunmaktadır ve bunlar akış pasajları boyunca homojen olarak dağılım göstermektedir. Her bir kanal aktif olarak çalışmaktadır. Uzun kabarcıklı akış ve kısmen yarı/halkasal akış baskın ısı transfer mekanizmalarıdır. Fazla sayıdaki sıvı ve buhar bileşenleri nedeniyle, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgeleri arasında duyulur ve gizli ısı biçiminde daha fazla ısı transferi gerçekleşir. $FR=70\%$ 'de ısı performans, karışım oranlarından bağımsız olarak, en düşük değerdedir. Şekil 37c'de görüldüğü gibi, yer çekimi kuvvetinin etkisiyle de ($IA = 90^\circ$), buharlaştırıcı bölgesinin tamamı ve adyabatik bölgenin büyük bir bölümü sıvı faz ile kaplıdır. İlgili iş akışkanı su, metanol ve pentan saf akışkanlarından oluşmaktadır ve belirgin olarak daha yüksek yoğunluk ve doyma noktası sebebiyle mevcut her iki bölgeyi kaplayan akışkanlar su ve metanoldür. Ayrıca, metanol ve suyun birbiri içerisinde karışabilen özelliğe sahip olması bir başka faktördür. Buharlaştırıcı bölgesinde, mikro veya küçük boyutlu kabarcıklar meydana gelmektedir. Ancak bunlar pasiftir ve/veya nispeten hareketsizdirler. Diğer yandan, bazı kanallarda sirkülasyon hareketi vardır ve bu kanallarda aktif kabarcıklaşma alanları oluşmaktadır (Şekil 38c). Ayrıca, bazı dar kanallarda hızlı kabarcık büyüme

kararsızlığı meydana gelir. Bu hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı, dar kanallar içerisinde hapsedilen buhar bileşeninin her iki yönde büyümesi anlamına gelmektedir. Doğrusu bu olay, belirgin yüksek sistem basınçları altında şiddetli kaynamanın (explosive boiling) bir sonucu olarak meydana gelir; ancak bu faydalı basınç farkı yerel olarak oluşur ve ısı borusu için görece bir avantaj olmaz. Kaldırma kuvvetlerinin bir sonucu olarak düşük yoğunluklu akışkan (buhar fazındaki pentan) düşey konum ve alttan ısıtma modu nedeniyle soğutucu bölgeye toplanır (yoğusturucu bölgesi). Ayrıca, ilgili koşullarda, pentan ısı borusunun basıncını artırır ve diğer akışkanları engeller. Bu durum, faz değişimini-engelleme etkisi (phase change inhibition effect) olarak literatürde (Han vd., 2016) tanımlanır. Diğer taraftan, buhar bileşenleri ile meydana gelen basınç ağır sıvı kütlelerini hareket ettirmeye yetmediği dikkat edilmelidir. Şekil 38c incelendiğinde, buhar fazındaki akışkan yoğusturucu bölümünde sıkışmış olup, sıvı filmi görülmediği için (geniş buhar alanı) kuruma meydana gelir.

3.1.4.2. Karışım Oranı Etkisi

Mevcut bölüm kapsamındaki deneysel parametrelere bağlı olarak, optimum dolum oranı belirlenmiş ve bir önceki başlık altında ifade edilmiştir. Şekil 39'da görüldüğü gibi, FR=%50 optimum değerinde, üçlü karışımların ve üçlü karışımlardaki her bir saf akışkanın hacim oranının etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karışımlar, W:M:P = 1:1:1, W:M:P = 1:2:3 ve W:M:P = 1:3:2'dir. Ayrıca, grafiklerde ilgili saf akışkanlar W:M:P = 1:0:0, W:M:P = 0:1:0 ve W:M:P = 0:0:1, olarak gösterilmiş olup; sırasıyla, saf su, metanol ve pentana karşılık gelmektedir.

Şekil 39'da belirtilen grafikler kapsamında ve özellikle $IA=90^\circ$ koşulunda, iş akışkanı türünün ısı performans üzerinde bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 39a'da görüldüğü gibi, üçlü karışımların saf akışkanlara kıyasla ısı direnç değerleri daha düşüktür. Daha ayrıntılı bir şekilde ifade edilirse, $HI=15 - 30W$ (orta düzeyli ısı yük) değerlerinde W:M:P=1:2:3 üçlü karışımı ile yüklü ısı borusu için en iyi ısı performans elde edilmiştir. Ancak, W:M:P=1:0:0 saf akışkana sahip ısı borusu için en kötü ısı performans elde edilmiştir. Şekil 39a ve b'de, W:M:P=1:0:0 saf akışkan ısı direncinin W:M:P=1:2:3 üçlü karışımının ısı direncinden ~ %61.4 daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, benzer koşullarda, saf suyun buharlaştırıcı sıcaklığı W:M:P=1:2:3'ün buharlaştırıcı sıcaklığından ~ 6.6 °C daha yüksektir.

W:M:P=1:3:2'ün ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklık değeri W:M:P=1:2:3'ün değerlerine yakındır. Bu durumda, saf su içerisine pentan veya metanol eklenmesi veya bu akışkanların (pentan ve metanol) hacimsel oranının artırılması ısı aktarım özelliklerini iyileştirmiştir. Metanol veya pentanın üçlü karışımlar içindeki bileşen bazındaki etkisini net olarak belirlemek için W:M:P=1:3:2 ve W:M:P=1:2:3 karışım oranına sahip karışımlar ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, karışım içerisindeki pentan oranının artması, ısı transfer performansını da artırmaktadır. Arka plandaki fiziksel mekanizmaları belirlemek için Tablo 5'de verilen akışkanların termo-fiziksel özellikleri ele alınarak eş zamanlı akış görüntüleri ile sonuçlar tartışılmıştır.

Şekil 40'da üç farklı akış görüntüsü verilmiştir. Şekil 40a, $IA = 90^\circ$, $FR = \%50$ ve $HI = 20W$ koşullarında W:M:P = 1:2:3 karışımını; Şekil 40b ise aynı koşullarda W:M:P = 0:0:1 karışımını içermektedir. Şekil 38a'da, $HI=15W$ 'tan sonrasına dikkat edilirse W:M:P = 1:2:3'ün ısı direnci W:M:P = 0:0:1'in ısı direncinden görece olarak daha düşüktür. Bu durumun sebebi, Şekil 40a ve b'nin karşılaştırılması ile açıklanabilir. Şekil 40a'da buharlaştırıcı bölgesinde aktif kabarcıklaşma süreci vardır. Fazla sayıda buhar ve sıvı bileşen meydana gelir ve bunlar tüm akış pasajları boyunca dağılmış vaziyettedir. Görüntüleme kapsamında, üçlü karışımın sirkülasyon hızının W:M:P = 0:0:1 iş akışkanına kıyasla daha yüksek olduğu bilinmektedir. Şekil 40a'da görüldüğü gibi, kanallarda aşağı doğru akan sıvı damlacıklar vardır (üçlü karışımlarda). Bu damlacıklar buharlaştırıcı bölgesinde toplanır ($IA=90^\circ$ olmasından) ve bu bölgedeki yüksek sıcaklığa sahip yüzeylerin ıslatılmasına sebep olur. İlgili yüzeylerin ıslatılması ısı performans üzerinde önemli bir rolü oynar. Bu doğrultuda, yüksek yoğunluğa sahip olan suyun ısı transfer performansını artırdığı ifade edilebilir. Pentanın en yüksek $(dP/dT)_{sat}$ değerine ve en düşük yoğunluk ve kaynama noktası değerlerine sahip olması, pentanın diğer akışkanlara kıyasla ısı borusunu daha erken çalıştırmasını sağlar. Ayrıca, karışımdaki suyun bir bölümünün yoğunlaştırıcı bölgesine doğru hareket etmesini sağlar. Ancak, buharlaştırıcı bölgesine doğru sıvı filmi yer çekimi etkisiyle hareket eder ve o bölgede toplanır.

Yukarıdaki bölümlerde bahsedilen, keskin köşelere dayalı kılcallık etkisi de (köşe etkisi) ısı performans üzerinde rol oynar. Kısaca, su ısı transfer yüzeylerini tekrarlı olarak ıslatır. Ayrıca, su ve pentanın birbiriyle karışmayan sıvılar olduğu vurgulanmalıdır. Şekil 40b'ye bakılırsa saf akışkanda, kabarcıklaşmanın daha aktif

olduğu ve kabarcıkların karışımdakilere kıyasla daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi pentanın yüzey geriliminin, diğer saf akışkanlara kıyasla belirgin düşük olmasıdır. Görece küçük kabarcıkların meydana gelmesinin sebebi direkt olarak düşük yüzey gerilime sahip olmasıdır. Çok sayıda küçük kabarcıkların olması, akışın karışmasını iyileştirir ve böylece konveksiyonla ısı transferini iyileştirir. Ancak, taşınım ısı transferi, akışı hareket ettirmek için gerekli olan kuvveti sağlayamaz. Bu sebeple, yoğunlaştırıcı bölümünde buhar ve sıvı bileşenlerinin hareketleri zayıftır. Bunun yanı sıra, farklı iş akışkanına sahip ve sabit ısı yük değerinde Şekil 40c, Şekil 37c'deki akış görüntülerini birlikte karşılaştırmalı olarak tartışılmalıdır. Şekil 40c'de, yani $W:M:P=0:0:1$ kullanıldığında, buharlaştırıcı bölgesinde yoğun kabarcık popülasyonu ve kabarcıklı kaynama görülmektedir. Şekil 40c'de küçük (mikro) boyutlu kabarcıkların oluşmasının nedeni, pentanın düşük yüzey gerilime sahip olmasıdır. İlgili kabarcıklar birleşerek ve/veya devam eden ısı etki ile büyür. Ancak, birçok kanalda kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akış aktiftir. Şekil 37c'de ise, aynı çalışma koşullarında buharlaştırıcı bölgesinin geniş bir bölümünde bir sıvı alanı oluşmuştur. Bunun sebebi, suyun yüksek yoğunluğa sahip olmasıdır. Ayrıca, pentanın saf akışkanlar arasında düşük kaynama noktası ve yüksek $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip olması, faz değişim-engelleme etkisinden dolayı suyun sıvı fazda kalmasını sağlar. Saf pentanın ısı borusu içerisinde rahat hareket etmesine rağmen, diğer üçlü karışımlara kıyasla ısı performansı zayıftır. Şekil 39a'da görüldüğü gibi. Bu doğrultuda, yüksek ısı yüklerde özgül ve gizli ısıların özellikle etkin rol oynadığı ifade edilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta $HI=35W$ veya $HI=40W$ (yüksek ısı yüklerde) değerlerinde, tüm iş akışkanlarının ısı direnç değeri görece birbirine yakındır. Fakat, $W:M:P=0:1:0$ ile yüklü ısı borusu en düşük ısı dirence sahiptir. Yüksek ısı yüklerde ve herhangi bir akışkan türü için, ısı borusundaki eksenel ve yanal iletim, yoğunlaştırıcı bölgesindeki sıcaklığı artırır. Dolayısıyla, tüm iş akışkanlar için yüksek ısı yüklerde direnç azalmaktadır. Bu durum, özellikle düz plaka tipi atımlı ısı boruları (FP-PHP) için sorundur.

Şekil 39a kapsamında, $W:M:P = 1:3:2$ ve $W:M:P = 1:2:3$ 'nin çalışmaya başlama karakteristikleri diğer iş akışkanlarına kıyasla daha iyidir. $HI=15W$ değerinde, $W:M:P = 1:3:2$ ve $W:M:P = 1:2:3$ üçlü karışım oranlarına sahip iş akışkanları, diğer iş akışkanlarına kıyasla daha düşük ısı dirence sahiptir. Açık bir ifade ile dirençteki en

belirgin ani düşüş bu iki iş akışkanıdır. Bir başka iş akışkanı, $W:M:P = 1:0:0$ ise $HI=35W$ değerine kadar yüksek ısıl direnç değerine sahiptir ve bu durumda, ısı borusu zayıf bir ısıl performans karakteristiği göstermiştir. Şekil 39a'daki grafikler daha kapsamlı incelendiğinde, $HI=35W$ değerine kadar, iş akışkanı $W:M:P = 1:0:0$ (saf su) değerlerinin eğimi diğer iş akışkanlara göre görece yatay görünüme sahiptir. $HI=15W$ 'tan sonra $W:M:P = 1:0:0$ için, ısıl direnç değerlerinin eğiminde hafif bir düşüş görülürken, $HI=35W$ 'ta hızlı ve/veya ani bir düşüş meydana gelmektedir. Bu çıkarım sonucu, $HI=15W-30W$ aralığında $W:M:P = 1:0:0$ ile yüklü atımlı ısı borusu kararlı bir halde çalışamaz. İlgili sonuçların sebebi, değişken başla-dur (start-stop) hareketleri veya bazı kanallardaki yerel atılımdır.

3.1.4.3. Eğim Açısının Etkisi

Isı borusu yatay konuma alındığı zaman, farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 39c'de görüldüğü gibi, üçlü karışımlar ile yülü ısı borularının ısıl direnç değerlerinin dağılımı yatay bir eğilim almıştır. Burada, şu çıkarım yapılabilir herhangi bir üçlü karışım ile yüklenen FP-CLPHP yatay konumda çalışmamaktadır. Ancak saf akışkanlar ile yüklü ısı boruları ise yatay konumda görece başarılı bir performans göstermiştir. Özellikle, $W:M:P = 0:0:1$ ve/veya $W:M:P = 0:1:0$ iş akışkanları düşük ısıl direnç değerlerine sahiptir. Tek bir dolun oranına sahip ($FR=50\%$) ısı borusunun, her bir iş akışkanı için eğim açılarının etkisini içeren grafikler Şekil 41'de verilmiştir. İlgili grafikler incelendiği zaman, $IA=90^\circ$ (düşey) ve $IA=0^\circ$ (yatay) konumları için üçlü karışımların ısıl direnç değerleri arasında büyük bir fark vardır. Yatay bir dağılım gösteren ısıl direnç değerleri, sistemin çalışmadığı veya çöktüğü anlamına gelmektedir. Ancak, saf akışkanlar için bu olay gerçekleşmemiştir aksine, ısıl direncin ısıl yük ile değişimi neredeyse açısal konumdan bağımsız olarak belirtilmiştir. Özellikle saf pentan ile yüklü ısı borusu, açıdan bağımsız bir çalışma sunmuştur (Şekil 41a'ya bakınız). Yatay konumda yerleştirilen bir ısı borusunda yer çekimi kuvveti etki etmez. Ancak, saf akışkanlarla yüklü PHP'lerin başarılı bir performans gösterme sebebi, üniform olmayan kanal dağılımının sağladığı ek kuvvetlerdir. Bir başka ifade ile PHP'nin geometrik özelliğinden dolayıdır.

3.2. Sonuç

Bu tez kapsamında, iş akışkanlarının tekil formu ve ikili ve üçlü karışımlarıyla yüklenen, değişken kesit alanlarına sahip paralel kanallardan oluşan düz plakalı atımlı ısı borularında, farklı çalışma koşulları altında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her bir çalışma çıktı odaklı sınıflandırılmış ve farklı başlıklar altında detaylı olarak sunulmuştur. Farklı dolum oranları, eğim açıları, ısı yükler, akışkan türleri ve hacimsel karışım oranlarında deneyler yapılarak, literatüre geniş bir veri tabanı sunulması amaçlanmıştır. Mevcut deneylerde ölçümlerle senkronize olarak, akış görüntüleme yapılmıştır ve bu doğrultuda ısı ve akış karakteristikleri görüntülerle desteklenerek irdelenmiştir. Bu doğrultuda, her bir başlık için elde edilen sonuçlar ayrı olarak maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Bölüm 3.1.2 Kapsamındaki Sonuçlar

- Düzgün çalışmakta olan bir ısı borusunda, akış görüntüleme sonucunda, daima tek yönlü akışın oluşmadığı ve akış hareketinin anlık değişime maruz kalabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bazı kanallarda eş zamanlı olarak zıt yönlü akış (ters akış) gözlemlenmiştir. Bu sebeple, FP-CLPHP'lerin çalışma sırasında sanki-tek yönlü akış hareketi gerçekleştiği belirtilebilir.
- Isıl yükün artması ile ısıl direncin azalmasına sebep olan temel fiziksel nedenler şunlardır: (1) ısı kaynaklı itici kuvvetin artması ile sirkülasyon hızının iyileşmesi ve (2) oluşan akış desenleri ve kabarcık dinamiği etkisi.
- Artan ısıl yük ile ısıl dirençte azalma görülmesi FP-CLPHP'nin düzenli olarak çalışması anlamına gelmektedir. Burada düzenli olarak çalışma ifadesinden kasıt, periyodik atımların/salınımların ve sanki-tek yönlü akış sirkülasyonunun meydana gelmesidir. Isıl yük artışı ile ısıl direnç verilerinin, tüm ısıl yük aralığı için yatay dağılım göstermesi FP-CLPHP'nin çalışmaması anlamına gelmektedir. Bu durumda başla-dur (start-stop) hareketi bile görülmez. Ancak, özellikle son birkaç ısıl yük değerinde, ısıl direnç verilerinde görülen görece (kısmen) azalma durumu FP-CLPHP'nin düzgün çalışmamasına rağmen bazı kanalların aktif olduğunu ve/veya başla-dur hareketinin gerçekleştiğini gösterir.

- Akış desenleri, bir ısı borusunun performansı üzerinde önemli rol oynar. Genel olarak, artan kabarcık popülasyonunu karakterize eden etkin kabarcıklaşma süreci ve uzun kabarcıklı (slug flow) akış ve ince film buharlaşmasını karakterize eden halkasal/yarı halkasal akış gibi akış desenleri ısı performansın iyileşmesi açısından etkilidir. Ayrıca, paralel kanalların kesit alanı farklılığından kaynaklanan ve ısı borusunun çalışmasını ve performansını olumlu yönde etkileyen fiziksel olaylar da vardır. En dar kanalda kabarcığın aniden büyümesi ve döngülerdeki geçişler esnasında ani genişleme/daralma gibi iç çalkantılar ısı performans açısından artışa sebep olur.
- Karışım oranındaki değişimin sonuçlar üzerinde önemli etkisi vardır. Ancak, karışım oranının etkisi, yer çekimi kuvvetinin etkisinin olup olmaması ile yakından ilgilidir. Bir başka ifade ile ısı borusunun yatay veya düşey olarak konumlandırılmasına bağlı olarak karışım oranının etkisi değişmektedir. Karışım içerisinde pentanın hacim oranı arttıkça ısı performans artmıştır. E:P=1:3 karışım oranı için elde edilen ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklıkları hem yatay hem de düşey konum için ($IA=90^\circ$ ve $IA=0^\circ$), diğer karışım oranlarına kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür. Ayrıca, ilgili iş akışkanı (E:P=1:3) ile yüklü ısı borusu yer çekimi desteğinin olmadığı durumda ($IA=0^\circ$) bile başarılı bir şekilde çalışmıştır.
- $IA=90^\circ$ konumunda ve $FR=\%30$ değerinde, E:P=1:3 iş akışkanıyla yüklü ısı borusu düşük ısı yüklerinde çalışmaya başlamıştır ve ayrıca, genel olarak ısı performansı E:P=1:1'e kıyasla daha iyidir. E:P=1:3 ile yüklü ısı borusunun erken çalışmaya başlamasının nedeni, pentanın düşük dinamik viskoziteye, düşük yoğunluğa ve yüksek $(dP/dT)_{sat}$ değerine sahip olmasıdır. Düşük ısı yüklerinde, pentan akış pasajları içinde (diğer saf akışkanlara kıyasla) daha yüksek basınç oluşmasına sebep olur. Bu basınç sürücü kuvvetin kaynağıdır. Düşük viskozite, akışkanın kanallar içerisinde daha rahat hareket etmesini sağlar. Ayrıca, düşük ısı yüklerinde, yoğunluğun düşük olması sıvı bileşenlerin nispeten kolay yer değiştirebilmesine (veya itilebilmesine/hareket ettirilebilmesine) sebep olur.
- Sonuçlar üzerinde bir diğer etki, faz değişimi-engelleme etkisidir. $IA=90^\circ$ konumunda, bazı kanallarda, sanki-rijit yapıdaki sıvı alanları meydana

gelmiştir. Bu etki hem avantaj hem de dezavantaj sunabilir. Eğer ilgili etkiye maruz kalan akışkan miktarı az ise, akış pasajları içerisinde sirkülasyonlu akışın devam etmesi için yeterli alan bulunur ve bu sayede hem akış sürdürülebilmiş olur hem de kuruma problemi önlenmiş olur. Ancak, eğer ilgili bölgede sıvı fazındaki akışkan miktarı fazla ise akış hareketi sınırlanır ve hatta durur. Sonuç olarak, ısı performans ciddi bir şekilde düşer.

- İkili karışım içerisinde, yüksek kaynama noktasına sahip olan bileşenin (bu bölüm için etanol) hacimsel oranı artırılırsa, hareketsiz olan sıvı alanı artar. Bu durum akış hareketinin yavaşlamasına ve performansın düşmesine sebep olur. İkili karışımlar için kritik bir karışım oranı değerinden sonra meydana gelen bu tür bir fiziksel olay sıvı fazlalığı (flooding phenomenon) olarak tanımlanmıştır. Bu olay, meydana gelince geniş bir alan hareketsiz yığın sıvı ile kaplanır ve akışın serbestliği engellenir.
- E:P=1:3 karışım oranındaki iş akışkanı ile yüklü ısı borusu, hem düşük (FR=%30) hem de yüksek (FR=%60) dolum oranları için en iyi ısı karakteristikleri sunmaktadır.
- Atımlı ısı borularının kararlı olarak çalıştığı koşullarda ise, FR=%30'daki ısı performans, FR=%60'takinden çok daha iyidir. Genel anlamda, FR=%30'da en etkili ısı transfer mekanizmalarından ince film buharlaşmasını temsil eden halkasal ve/veya yarı halkasal akış baskındır ve şiddetli kabarcıklaşma aktiftir.
- Mevcut ısı borusunun yapısı ve çalışma prensibi dikkate alındığı zaman, hızlı kabarcık büyüme kararsızlığının asimetric hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı (asymmetrical rapid bubble growth phenomenon) olarak adlandırılabilceği ifade edilebilir. Bu durum, daha çok üniform olmayan atımlı ısı borularına özgüdür ve iç yapıdaki basınç farkını arttırarak atım hareketini desteklemek için etkili bir faktördür.
- Bir ısı borusunun açıdan bağımsız çalışabilmesi, ilgili ısı borusunun performansı ve etkinliği açısından kritik öneme sahiptir.
- Bu bölüm kapsamında, elde edilen bulguların hepsi birlikte değerlendirildiği zaman, özetle üniform olmayan ısı borularının çalışma karakteristikleri veya performansı üzerinde dört temel kuvvetin kilit rol oynadığı belirlenmiştir. Bu

kuvvetler; (1) yüzey gerilme kuvveti, (2) yerçekimi kuvveti, (3) kayma kuvveti ve (4) buharlaşma momentum kuvvetidir.

3.2.2. Bölüm 3.1.3 Kapsamındaki Sonuçlar

- Saf akışkanlar arasında, hekzan ve pentan benzer ısı performans sunmaktadır. Ancak metanol bu iki saf akışkana kıyasla daha iyi bir performans göstermektedir.
- Düşük yüzey gerilimi ve düşük kaynama noktasına sahip olan saf pentan için, kabarcıklı kaynama baskındır ve ayrıca artan ısı yük değerlerinde uzun kabarcıklı akış aktif olarak görülmüştür.
- MR=1:1 ve MR=4:1 için, birbiriyle karışmayan akışkan çiftlerinin (metanol-hekzan ve pentan-metanol) ısı performansı birbiriyle karışan akışkan çiftinin (hekzan-pentan karışımı) ısı performansından daha yüksektir. Ayrıca, birbiriyle karışmayan akışkan çiftleri arasında ise pentan-metanol ikili akışkanı görece olarak daha iyi ısı performans göstermiştir.
- İkili karışımlarda genel olarak, hekzan-pentan karışımları zayıf ısı performans sunar. Ana sebep, buhar hapsedme olayı olarak ifade edilmektedir (vapor trapping phenomenon). İlgili olay bileşenlerin (yığın) akış sirkülasyonunu engeller. Mevcut koşulda, termosifon tipi çalışma modu gerçekleşir.
- En iyi ısı performans, P:M=1:1 iş akışkanı ile yüklü ısı borusunda gözlemlenmiştir. Bu ikili akışkan için ısı performans üzerindeki en etkili faktör ise birbiriyle karışmama özelliğidir. Pentan, kaynama noktasının düşük olması sebebiyle kolayca faz değişimine başlar. Ayrıca $(dP/dT)_{sat}$ değeri görece büyüktür. Pentanın buhar kabarcıkları taşınımın iyileşmesine ve metanol molekülleri arasında ısının daha iyi yayılmasına sebep olur. Metanol molekülleri faz değişimi esnasında fazla miktarda ısıyı absorbe eder. Ek olarak, metanol bileşeninin saf iş akışkanları arasında (bu bölümdeki) en iyi ısı performansı göstermesi, ikili karışım için uygun olduğu anlamı taşımaktadır.
- Karışım oranındaki değişim sonucu pentan-metanol ikili iş akışkanı için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu doğrultuda, pentan-metanol karışımı, karışım oranına belirgin bir şekilde bağlıdır. Ancak, metanol-hekzan gibi ikili karışımlarda ise karışım oranının etkisi görece olarak zayıftır. Bu durumun,

muhtemel sebebi bazı termo-fiziksel özelliklerin (kaynama noktası, yoğunluk ve yüzey gerilimi) benzer olmasıdır.

- Saf metanol, diğer saf akışkanlara kıyasla başarılı performans göstermesine rağmen, hacimsel olarak artan metanol oranına sahip ikili karışımlar için ($P:M=1:4$), en kötü ısı performansını elde edilmiştir. İlgili sonucun olası iki temel sebebi vardır: (1) metanolün yüksek yoğunluğa ve viskoziteye sahip olması ve (2) faz değişimi engelleme etkisi oluşmasıdır.

3.2.3. Bölüm 3.1.4 Kapsamındaki Sonuçlar

- $IA=90^\circ$ konumunda, genel olarak, üçlü karışımlar saf akışkanlara kıyasla daha iyi ısı performans gösterirler. $W:M:P=1:2:3$ üçlü karışımı en yüksek ısı performansını sunarken; en düşük ısı performans $W:M:P=1:0:0$ (saf su) için elde edilmiştir.
- $IA=90^\circ$ ’de, üçlü karışımlar için, genellikle kanal köşelerinden aşağı doğru sıvı damlacıkların hareket ettiği gözlemlenmiştir. İlgili sıvı damlacıklarının, yüksek sıcaklıktaki yüzeyi tekrar ıslatması (periyodik ıslatma süreci, “rewetting phenomenon”), ısı performansı iyileştirme bakımından önemlidir.
- Bir atımlı ısı borusunda şiddetli kabarcıklaşma, mikro taşınım ve ince film buharlaşması gibi ısı transfer mekanizmaları ısı transfer performansının yüksek olmasında öneme sahiptir. Bu mekanizmaların oluşması için düşük yüzey gerilim ve düşük kaynama noktasına sahip akışkanlar ile çalışılabilir.
- $IA=90^\circ$ konumunda, $W:M:P=1:1:1$ ve $W:M:P=1:2:3$ ’ün her ikisi için de en iyi ısı karakteristikler $FR=\%50$ ’de elde edilmiştir. $FR=\%30$ ’daki ısı performans $FR=\%50$ ’dekinden kısmen daha kötüdür. En kötü ısı performans ise $FR=\%70$ ’de görülmüştür. Bu doğrultuda, $HI=25W$ ’da, (dolum oranı) $FR=\%50$ ’den $FR=\%70$ ’e artırılınca ısı direnç yaklaşık $\%23.5$ oranında artar. Ancak, mevcut koşulda, $FR=\%50$ ’deki buharlaştırıcı sıcaklığı $FR=\%70$ ’dekinden yaklaşık olarak $5.1^\circ C$ daha düşüktür.
- Pentan veya metanolün saf suya karıştırılmasıyla veya bu bileşenlerin hacim oranlarının artırılmasıyla ısı karakteristikler iyileşir; ancak, pentanın hacim oranındaki artış ısı transferinin iyileşmesine daha çok katkı sunar.

- $IA=90^\circ$ 'de, $W:M:P=1:3:2$ ve $W:M:P=1:2:3$ ile yüklü ısı boruları için çalışmaya başlama performansı diğer iş akışkanlarına kıyasla görece daha iyidir.
- Üniform olmayan kanallar için çalışma mekanizmasına etki eden dört önemli kuvvet tanımlanmıştır: (1) buharlaşma momentum kuvveti, (2) yüzey gerilme kuvveti, (3) kayma kuvveti ve (4) yer çekimi kuvveti.
- Isı borusu üniform olmayan yapıda olmasına rağmen, bir başka ifade ile bir önceki maddede belirtilen kuvvetler etkin olmasına rağmen hiçbir üçlü karışım ile yüklenen FP-CLPHP, $IA=0^\circ$ 'de çalışmamıştır. Bu sebeple, yer çekimi desteğinin üçlü karışımlar açısından önemli bir faktör olduğu belirtilmelidir.
- Tablo 5'te tanımlanan akışkan özelliklerinin çoğu atımlı ısı borusunun çalışması bakımından kritik öneme sahiptir. Ancak, ilgili özelliklerin hiçbiri mükemmel bir ısı performans elde etmek için tekil olarak vazgeçilmez değildir. Çalışma parametrelerine göre değişen etkiler söz konusudur.

3.3. Öneriler

Gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

1. Değişken kanallara sahip (üniform olmayan) atımlı ısı boruları için yeni akışkan türleri (farklı karışım oranları ve yeni akışkanlar) ile karışımlar yapılarak sonuçlar incelenebilir.
2. Karışımlarla yüklenen PHP'lerin, geometrik yapılarında farklı düzenlemeler yapılarak çalışmalar yapılabilir. Örneğin, paralel kanallar arasında ekstra bir bağlantı koyulabilir.
3. Mevcut çalışmada, iki farklı eğim açısında ($IA=0^\circ$ ve $IA=90^\circ$) çalışılmıştır. İlgili iş akışkanlarıyla (tekli, ikili ve üçlü karışımlar) yüklü PHP'nin, farklı eğim açılarında ($IA=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ \dots$ vb.) deneyler yapılarak daha geniş bir veri aralığı elde edilebilir.
4. Sayısal çalışmalar yapılabilir

KAYNAKÇA

- Akachi, H. (1990). Structure of a heat pipe, U.S., Patent No. 4921041.
- Ayel, V., Slobodeniuk, M., Bertossi, R., Romestant, C., and 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>
- Bastakoti, D., Zhang, H., Li, D., Cai, W., and Li, F. (2018). An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 141, pp. 305–332). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121>
- Caihang, L., Zhuang, H., Yongwang, Y., and Si, Z. (2015). Experimental study on thermal performance of pulsating heat pipe with ethanol-acetone mixtures. *International Journal of Heat and Technology*, 33(4), 185–190. <https://doi.org/10.18280/ijht.330424>
- Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., and 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)
- Charoensawan, P. and 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>
- Chen, Y., He, Y., and Zhu, X. (2020). Non-contact monitoring on the flow status inside a pulsating heat pipe. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1–11. <https://doi.org/10.3390/s20205955>
- Cheng, P., Thompson, S., Boswell, J., and Ma, H. (n.d.). *IHTC14-22706 An Investigation Of Flat-Plate Oscillating Heat Pipes*. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/ihtc14/72319/>
- Chien, K. H., Lin, Y. T., Chen, Y. R., Yang, K. S., and 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>
- Clement, J. and Wang, X. (2013). Experimental investigation of pulsating heat pipe performance with regard to fuel cell cooling application. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.017>

- Cui, X., Qiu, Z., Weng, J., and Li, Z. (2016). Heat transfer performance of closed loop pulsating heat pipes with methanol-based binary mixtures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 76, 253–263.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.005>
- Czajkowski, C., Nowak, A. I., Błasiak, P., Ochman, A., and 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.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114534>
- Dave, C., Dandale, P., Shrivastava, K., Dhaygude, D., Rahangdale, K., and More, N. (2021). A Review On Pulsating Heat Pipes: Latest Research, Applications And Future Scope. In *Journal of Thermal Engineering* (Vol. 7, Issue 3). Yildiz Technical University Press.
- Deshpande, A. M., Nemlekar, H. S., Patil, R. D., and Patil, R. R. (n.d.). *Theoretical Design and Analysis of Gravity Assisted Heat Pipes*. <http://www.ijert.org>
- Faghri, A. (2012). Review and advances in heat pipe science and technology. In *Journal of Heat Transfer* (Vol. 134, Issue 12). <https://doi.org/10.1115/1.4007407>
- Faghri, A. (2014). Heat Pipes: Review, Opportunities And Challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1). <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
- Fumoto, K., Kawaji, M., and Kawanami, T. (2010). Study on a pulsating heat pipe with self-rewetting fluid. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 132(3). <https://doi.org/10.1115/1.4001855>
- Gaugler, R. S. (1944). Heat transfer device, U.S. Patent No. 2350348. (n.d.).
- Grover, G. M., Cotter, T. P., and Erickson, G. F. (1964). Structures of very high thermal conductance. *Journal of Applied Physics*, 35(6), 1990–1991.
<https://doi.org/10.1063/1.1713792>
- Gaugler, R. S. (1944). Heat transfer device, U.S. Patent No. 2350348.
- Han, H., Cui, X., Zhu, Y., and Sun, S. (2014). A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP). *International Journal of Thermal Sciences*, 82(1), 138–147.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.04.003>
- Han, H., Cui, X., Zhu, Y., Xu, T., Sui, Y., and 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., and Chen, G. (2016). Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 59, pp. 692–709). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.350>

- Jang, D. S., Lee, J. S., Ahn, J. H., Kim, D., and Kim, Y. (2017). Flow patterns and heat transfer characteristics of flat plate pulsating heat pipes with various asymmetric and aspect ratios of the channels. *Applied Thermal Engineering*, 114, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.189>
- Jun, S., and 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>
- Kang, S. W., Wang, Y. C., Liu, Y. C., and Lo, H. M. (2017). Visualization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1044–1050. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.051>
- Khandekar, S., Dollinger, N., and 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., and Kim, S. J. (2020). Experimental investigation on working fluid selection in a micro pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112462>
- Kline, S. J., and Mc Clintock, F. . (1953). Describing uncertainties in single sample. In *Mechanical engineering* (Vol. 75, pp. 3–8).
- Krambeck, L., Baptista Nishida, F., Marrone De Aguiar, V., Dias Dos Santos, P. H., and Antonini Alves, T. (2019). Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling. *Thermal Science*, 23(2), 1151–1160. <https://doi.org/10.2298/TSCI170610300K>
- Kwon, G. H. and 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>
- Lin, Y. H., Kang, S. W., and 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>
- Liu, X., Han, X., Wang, Z., Hao, G., Zhang, Z., and Chen, Y. (2020). Application of an anti-gravity oscillating heat pipe on enhancement of waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112404>
- Ma, H. (2015). Oscillating heat pipes. In *Oscillating Heat Pipes*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2504-9>

- Mameli, M., Manno, V., Filippeschi, S., and 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>
- Nazari, M. A., Ghasempour, R., Ahmadi, M. H., Heydarian, G., and Shafii, M. B. (2018). Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 91, 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.006>
- Nazari, M. A., Ahmadi, M. H., Ghasempour, R., and 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* (Vol. 91, pp. 630–638). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.042>
- Pachghare, P. R. and Mahalle, A. M. (2013). Effect of pure and binary fluids on closed loop pulsating heat pipe thermal performance. *Procedia Engineering*, 51, 624–629. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.088>
- Patel, V. M., Gaurav, and 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>
- Pradeep, G. V., and Rama Narasimha, K. (2018). Experimental investigations on the thermal performance of a vertical closed loop pulsating heat pipe using binary mixture of fluids. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 31(5), 805–811. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.05b.16>
- Qu, J., and 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., Wu, H., and Cheng, P. (2012). Start-up, heat transfer and flow characteristics of silicon-based micro pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), 6109–6120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.024>
- Rajale, M. J., Prasad, P. I., and Rao, B. N. (2022). A review on the heat transfer performance of pulsating heat pipes. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1080/14484846.2021.2024340>
- Reay, D. A., and Kew, P. A. (2006). Heat Pipes. *Elsevier*, 5. Edition, ISBN: 978-0-7506-6754-8, 0-7506-6754-0.
- Reay, D. A., Kew, P. A. and McGlen, R. J. (2014). Heat Pipes Theory, *Design and Applications*. *Elsevier*, 6. Edition, ISBN: 978-0-08-098266-3, 175-202.

- Serizawa, A., Feng, Z., and Kawara, Z. (n.d.). *Two-phase flow in microchannels*. www.elsevier.com/locate/etfs
- Shi, S., Cui, X., Han, H., Weng, J., and Li, Z. (2016). A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.014>
- Spinato, G., Borhani, N., and 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>
- Srikrishna, P., Siddharth, N., Reddy, S. U. M., and Narasimham, G. S. V. L. (2019). Experimental investigation of flat plate closed loop pulsating heat pipe. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02607-z>
- Tseng, C. Y., Yang, K. S., Chien, K. H., Jeng, M. S., and Wang, C. C. (2014). Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.01.019>
- Trefethen, L., (1962). On the surface tension pumping of liquids or a possible role of the candlewick in space exploration. *G.E. Tech. Info.*, 615, D114.
- Tuo, H., and Hrnjak, P. (2014). Visualization and measurement of periodic reverse flow and boiling fluctuations in a microchannel evaporator of an air-conditioning system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 639–652. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.024>
- URL-1, (2021), <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (20 Mart 2021).
- Wan, Z., Wang, X., and 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, J., Xie, J., and Liu, X. (2019). Investigation on the performance of closed-loop pulsating heat pipe with surfactant. *Applied Thermal Engineering*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113998>
- Wang, J., Xie, J., and Liu, X. (2020). Investigation of wettability on performance of pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119354>
- Wang, S., Lin, Z., Zhang, W., and Chen, J. (2009). Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22), 5276–5279. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.033>

- Wang, W., Cui, X., and Zhu, Y. (2017). Heat transfer performance of a pulsating heat pipe charged with acetone-based mixtures. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(6), 1983–1994. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1958-3>
- Wyatt, T. (1964). Satellite Temperature Stabilization System, U.S., Patent No. 3152774.
- Xing, M., Wang, R., and Xu, R. (2018). Experimental study on thermal performance of a pulsating heat pipe with surfactant aqueous solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 903–909. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.130>
- Xu, R., Zhang, C., Chen, H., Wu, Q., and 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., and 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>
- Yang, H., Khandekar, S., and 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., and 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., and Shyu, J. C. (2015). Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths. *Applied Thermal Engineering*, 83, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.020>
- Zhang, D., He, Z., Jiang, E., Shen, C., and Zhou, J. (n.d.). *A review on start-up characteristics of the pulsating heat pipe*. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02998-4>/Published
- Zhang, X. M., Xu, J. L., and Zhou, Z. Q. (2004). Experimental study of a pulsating heat pipe using fc-72, ethanol, and water as working fluids. *Experimental Heat Transfer*, 17(1), 47–67. <https://doi.org/10.1080/08916150490246546>
- Zhang, Y., and Faghri, A. (2008). Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Heat Transfer Engineering*, 29(1), 20–44. <https://doi.org/10.1080/01457630701677114>
- Zhu, Y., Cui, X., Han, H., and 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.042>

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

