

Yüksek ısı akılı elektronik uygulamalar için mikro-oluklu ısı borularının geliştirilmesi ve üretimi

Proje Kodu: 1001

Proje No: 213M351

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Zafer Dursunkaya

Araştırmacı:

Doç. Dr. Barbaros Çetin

Bursiyer:

Serdar Taze

Hossein A. Alijanvad

Mobin Alipour

Mohammad Rezaeimoghaddam

Doktora öğrencisi:

Gülnihal Odabaşı

Şubat 2017
Ankara

Önsöz

Proje çerçevesinde mikro-oluklu bir ısı borusunun analitik modellenmesi, deney düzeneği tasarımı için sayısal modellenmesi, üretim reçetesinin geliştirmesi, deney düzeneğinin tasarlanması, prototipinin geliştirilmesi ve üretimi, deney protokollerinin oluşturulması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üretilen ısı borusu ile yapılan deneyler, tasarım parametrelerinin ısı performansına olan etkileri değerlendirilmiştir ve mikro-oluklu ısı borularının optimum çalışma noktaları belirlenmiştir. Proje TÜBİTAK 1001 programı (Proje No: 231M351) çerçevesinde desteklenmiştir.

İçindekiler

Önsöz	ii
Şekil Listesi	iv
Tablo Listesi	vi
Özet	vii
Abstract	viii
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ	2
2.1 Kanal Geometrisi	4
2.2 Üretim Teknikleri ve Malzeme	4
2.3 Akışkan	5
3 YÖNTEM	6
3.1 Sayısal Model	6
3.1.1 Birim Oluklu Isı Borusu Modellemeleri	6
3.1.2 Deneysel Düzenek Analizi Çalışmaları	7
3.1.3 Kanatçık Üzeri Yoğuşma Modellemesi Çalışmaları	9
3.1.4 Buharlaşma Modellemesi Çalışmaları	15
3.2 Ön Üretim Denemeleri	18
3.2.1 Kimyasal Aşındırma	19
3.2.2 Minyatür İşleme	20
3.2.3 Mekanik Kesme	21
3.2.4 Değerlendirme	22
3.3 Ön Deneysel Çalışmalar	24
3.4 Deneysel Çalışmalar	25
3.4.1 Birinci Nesil (G0) Metal Isı Borusu	25
3.4.2 İkinci Nesil (G1) Metal Isı Borusu	30
3.4.3 İkinci Nesil (G1) Silikon Isı Borusu	33
4 DENEYSEL SONUÇLAR	37
4.1 Metal (G0)	37
4.2 Metal (G1)	39
4.3 Silikon (G1)	43
5 SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	47
5.1 Proje Çıktıları	51
5.2 Öneriler	54
Kaynakça	54

Şekil Listesi

Şekil 1	Isı-borusunun çalışması	2
Şekil 2	Tercih edilen oluk geometrileri (Zaghdoudi vd. (2011) çalışmasından adapte edilmiştir) . .	5
Şekil 3	Birim hücre modellemesinde kullanılan çözüm bölgesi (Odabaşı, 2014)	6
Şekil 4	(a) Mikro-oluk üzerindeki ısı taşınım katsayıları, (b) birim hücre modelinden ve COMSOL'dan elde edilen duvar sıcaklıkları	8
Şekil 5	(a) 3B mikro-oluklu ısı borusu, (b) kullanılan sınır şartları	8
Şekil 6	(a) Oluk içerisindeki sıcaklık dağılımı, (b) ısı borusu ön ve arka yüzeyindeki sıcaklık dağılımı	9
Şekil 7	Yoğuşmanın olduğu kanatçık geometrisi	10
Şekil 8	Model (1), Model (2) and VOF yöntemi ile hesaplanan film profilleri	12
Şekil 9	Kullanılan modeller için δ_{kenar} 'ın ters açıyla değişimi	13
Şekil 10	Film kalınlığının ters açıya göre değişimi	13
Şekil 11	δ_{kenar} 'ın ters açıyla değişimi	14
Şekil 12	1°C sıcaklık farkında Model (1) de ısı akısının ters açıyla değişimi	14
Şekil 13	Buharlaştırma bölgesinde kullanılan koordinat sistemi	15
Şekil 14	Buharlaştırma bölgesinde (a) film kalınlığının ve (b) ısı akısının değişimi	18
Şekil 15	Deneyisel çalışmada kullanılacak olan ısı-borusu	19
Şekil 16	(a) Foto-litografi işleminin temsili resmi, (b) Bosch prosesinin temsili resmi	19
Şekil 17	DRIE prosesi ile elde edilen mikro-oluklar	20
Şekil 18	Minyatür işleme sonucu elde edilen mikro-oluklar (4. deneme, uzunluk ölçüleri μm)	21
Şekil 19	Elmas kesici ucun mikroskop görüntüleri	22
Şekil 20	PCD kesici ucun mikroskop görüntüleri	22
Şekil 21	Kademeli kesme sonucu mekanik kesme ile elde edilen mikro-oluklar	23
Şekil 22	Tek ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları	24
Şekil 23	G0 ısı borusu düzeneği	26
Şekil 24	Metal taban üretim basamakları (G0)	27
Şekil 25	(a) Termokupl, ısıtıcı ve soğutucu pozisyonları, (b) üretilen metal tabanlar (G0)	28
Şekil 26	Doldurma düzeneğinin temsili resmi	30
Şekil 27	G0 deneylerinde kullanılan deney düzeneği	30
Şekil 28	G0 deneylerinde zamana bağlı alınan bir deneysel veri	31
Şekil 29	G1 metal ısı borusu düzeneği	32
Şekil 30	Metal taban üretim basamakları (G1)	33
Şekil 31	Üretilen metal tabanlar (G1)	33
Şekil 32	G1 deneylerinde kullanılan deney düzeneği	34
Şekil 33	G1 deneylerinde zamana bağlı alınan bir deneysel veri	34

Şekil 34	G1 silikon ısı borusu düzeneği	35
Şekil 35	Üretilen silikon altlık	36
Şekil 36	G1 silikon deneylerinde kullanılan deney düzeneği	36
Şekil 37	Metal ısı borularında maksimum sıcaklık değerleri	38
Şekil 38	Metal ısı borularında ısıtma ve soğutma bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı: (a) 200 μm , (b) 400 μm , (c) 800 μm , (d) 1600 μm	40
Şekil 39	Metal ısı borularında maksimum sıcaklık değerleri: (a) 200 μm , (b) 400 μm , (c) 800 μm , (d) 1600 μm	41
Şekil 40	Metal ısı borularındaki sıcaklık dağılımı: (a) 200 μm , (b) 400 μm , (c) 800 μm , (d) 1600 μm	42
Şekil 41	IPA kullanılan 400 μm oluklu silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri ve (c) sıcaklık dağılımları	43
Şekil 42	Çift ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri	44
Şekil 43	Çift ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları	44
Şekil 44	Silikon ısı borusunun ısıtma ve soğutma bölgelerinin çizimi	45
Şekil 45	Tek ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri	46
Şekil 46	Tek ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları	46
Şekil 47	Isı borusu çalışırken alınan mikroskop görüntüleri	47
Şekil 48	Deneylerde gözlemlenen pleksiglas hasarları	49

Tablo Listesi

Tablo 1	2005 yılı sonrası mikro-oluklu ısı borusu çalışmalarının karşılaştırılması	3
Tablo 2	Farklı bölgelerdeki ısı transferi değerleri	10
Tablo 3	G0 metal oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu	26
Tablo 4	IPA'nın termo-fiziksel özellikleri.	29
Tablo 5	G1 metal oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu	31
Tablo 6	G1 silikon oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu	35
Tablo 7	G0 deneylerindeki numunelerin ısı performansları	39
Tablo 8	G1 metal deneylerindeki numunelerin en yüksek akısı değerindeki ısı performansları . . .	43

Özet

Bu proje kapsamında, elektronik işlemcilerin soğutulması gibi güncel uygulamalarda kullanılacak bir mikro-oluklu ısı borusu analitik ve deneysel yöntemlerle incelenmiş, üretilmiş ve bu amaca yönelik bir entegre tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Öncelikle mikro-oluklu ısı borusunun içinde olan ısı ve akışkanlar mekaniği problemleri teorik olarak incelenerek modellenmiştir. Geliştirilen sayısal model çok oluklu bir ısı borusunun modellenmesinde kullanılmış ve çok-oluklu ısı borusunun üretimini takiben proje kapsamında tasarlanan ve üretilen deney düzeneğinde farklı doldurma oranları, farklı ısı akısı değerleri, farklı oluk ölçülerinde ve farklı akışkanlar için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Proje kapsamında hem metal hem de silikon tabanlı çok oluklu ısı boruları için deneysel sonuçlar elde edilmiş ve prototip mikro-oluklu ısı borularının ısı performansı karakterize edilerek optimum çalışma noktaları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı borusu, mikro-oluk, buharlaşma, yoğuşma, kapiler etki

Abstract

In this project, micro-groove heat pipes that can be used in cooling of the electronic equipments were investigated through analytical and experimental techniques, and fabricated. Furthermore, a computational model was developed to model an integrated micro-grooved heat pipe architecture starting with the theoretical modeling of heat transfer and fluid flow problems occurred within the heat pipes. Following the 3D modeling, the micro-grooved heat pipes were fabricated and tested through an experimental setup which was developed as a part of the project. The heat pipes were tested for different filling ratio, different heat flux values, different groove sizes and different working fluids. Both metal heat pipes and silicon heat pipes were tested, the thermal performance of the heat pipes were characterized, and the optimum operating conditions were indicated.

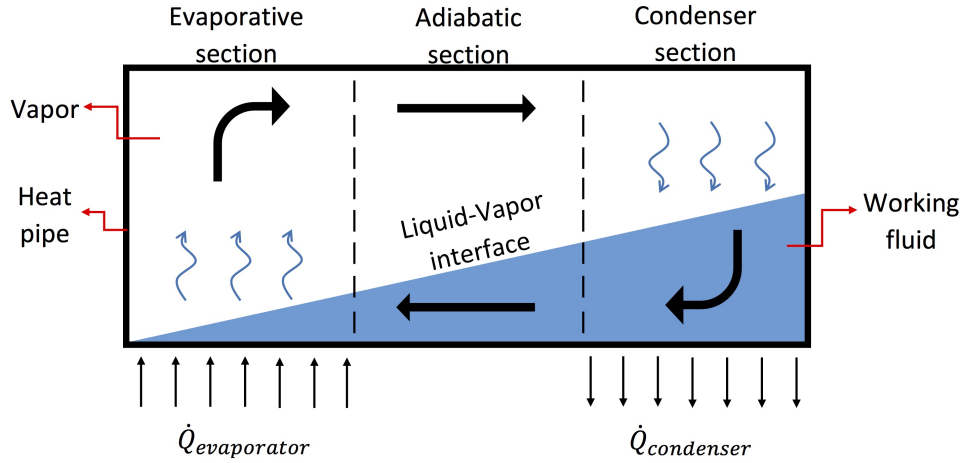
Keywords: Heat pipe, micro-grooved, evaporation, condensation, capillary effect

1 GİRİŞ

Küçük ısı transferi alanları ve düşük sıcaklık farkları ile yüksek ısı akılarının çekilmesini gerektiren güncel uygulamalar hızla artmaktadır. Bu amaca yönelik olarak faz değişimi ısı transferi mekanizmalarının kullanılması avantaj sağlamaktadır. Bunun nedeni de sıvı ile gaz arasındaki faz değişiminin olabilmesi için açığa çıkması ya da soğurulması gereken yüksek miktarda ısıdır. Bir örnek vermek gerekirse, 100°C'da sıvı fazındaki suyun gaz fazına geçmesi için gerekli olan ısı miktarı, aynı miktarda sıvı fazdaki suyun 0°C'dan 100°C ısıtılması için gerekli olan ısının yaklaşık 5 katıdır. Bu da faz değişimi ile ısı transferi yapılabildiği takdirde, eşdeğer bir ısı transferi için çok yüksek sıcaklık farklarının ya da çok geniş yüzey alanlarının gerektiğini gösterir.

Son yıllarda MEMS ve elektronik teknolojisinde yaşanan gelişmeler sonucunda başta savunma sanayi olmak üzere birçok farklı uygulamada elektronik yapıların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için çok küçük alanlardan çok yüksek miktarda ısının çekilmesi gerekmektedir. Bu yüzden mikro-kanallı yapıların soğutma işlemlerinde kullanılması yaklaşık 30 yıl önceki akademik çalışmalarla başlamıştır (Tuckerman ve Pease, 1982). Benzer yapıların Türkiye'de de kullanımı mevcuttur. Ancak özellikle sıvı-fazlı sistemlerin çekebildiği ısı akısı 100 W/cm² mertebesindedir. Kullanılacak nano-akışkan uygulamaları ile bu miktarın %20-25 civarında arttırılabileceği öngörülmektedir. Ancak MEMS teknolojisindeki gelişmeler ışığında bu ısı değerinin birkaç yıl içinde 500 W/cm² mertebesine çıkacağı öngörülmektedir. Bu değerlerdeki bir ısı transferi için mikro yapılarda tek-fazlı soğutmadan iki-fazlı soğutmaya geçilmesi kaçınılmazdır. Bu noktada hem yüksek akıda ısı transferinin daha az sıcaklık farkı ile gerçekleştirme kabiliyetleri hem de hareket eden parçalarının olmaması ve güvenilirliklerinin yüksek olmasından dolayı ısı borularının kullanım alanları genişlemekte ve havacılık gibi lider endüstrilerde elektronik ekipmanların soğutulmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Hatta yerçekiminin olmadığı uzay uygulamalarında da kullanım bulmaktadırlar.

Şekil 1'de bir mikro-oluklu ısı borusunun çalışması şematik olarak açıklanmıştır. Şeklin sol tarafından (evaporatör) boruya iletilen ısı, mikro-oluklarda yüzey gerilimi nedeniyle (kapiler etki) ortaya çıkan basınç farkı ile gazın sağ tarafa (kondensör) doğru ve sıvının da soğuk bölgeden (kondensör) sıcak bölgeye (evaporatör) iletilmesini sağlar. Günümüzde ısı-borusu uygulamalarının büyük çoğunluğunda gözenekli yapıya sahip "fitil"ler kullanılmaktadır. Mikro-oluklu ısı borularının kullanımı daha az yaygındır. Ancak özellikle 2000 yılından sonra mikro-oluklu ısı boruları ilgili birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Mikro-oluklu ısı borularını makro-boyutlu olanlardan ayıran özellik makro-boyutlardaki ısı borularında akışkanın kapiler kuvvet ile yürümesini sağlayan gözenekli ortamın yerini içinde gözenekli ortam ihtiva etmeyen mikro-kanal yapılarının almasıdır. Buradaki akışkanı yürüten kapiler etkiyi 200-400 mikron ölçülerindeki mikro-kanalların yüzeylerinde (özellikle köşelerde) oluşan yüzey gerilimi kuvvetleri yaratmaktadır. Bu duvarlarda oluşan ka-



Şekil 1: Isı-borusunun çalışması

piller kuvvetler kullanılan akışkanın cinsine ve mikro-kanal geometrisine göre farklılık göstermektedir. Farklı kesit geometrisindeki kanalların ısı borusu performansını incelemek üzere dikdörtgen (Suman ve Kumar, 2005, Suman vd., 2005), üçgen (Lee vd., 2003, Launay vd., 2004, Suman vd., 2005), çok-kenar (Moon vd., 2004), V-kesit (Anand vd., 2002), yıldız (Kang ve Huang, 2002, Huang ve Seng, 2011) ve rombus (Kang ve Huang, 2002) kesitli mikro-oluklu ısı boruları ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ısı borusunun performansını etkileyen en önemli parametre olarak mikro-kanalların köşelerinin keskinliği görülmüştür. Keskin köşeli yapıların duvarlarda oluşan kapiler kuvvete olumlu yönde etki yaptığı ve ısı borusunun performansını arttırdığı gözlemlenmiş, özellikle yıldız kesitli mikro-ısı borusunun diğer yapılara göre üstün olduğu gösterilmiştir (Huang ve Seng, 2011).

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Isı borularının literatürde önerilmesinden yıllar sonra 1984 yılında Cotter (1984) tarafından mikro-oluklu ısı borusu kavramı ortaya atılmış ve mikro-oluklu ısı borularının performanslarının iyileştirilmesi ve performans parametrelerinin anlaşılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Ticari ısı boruları genellikle uzay ve savunma gibi stratejik sanayi kollarında kendilerine yer bulmuşlardır. Ancak yakın zamanda elektronik soğutma, işlemci soğutması, LED televizyonların soğutulması gibi sivil endüstrilerde de tercih edilmeye başlanmışlardır. Cotter (1984), mikro-oluklu ısı borularının sıvı-gaz ara yüzeyinin eğrilik çapının kanal hidrolik çapı ile ayıt edilebilir olduğu mikro-oluklar içeren ısı boruları olarak tanımlamıştır. Farklı çalışma koşullarına ve uygulamaya göre birçok farklı akışkan, geometri ve malzeme üzerine birçok çalışma yapılmıştır. 2005 yılına kadar yapılmış olan mikro-oluklu ısı boruları çalışmaları 2007 yılında Sohban vd. (2007) tarafından hazırlanan bir derleme makalede özetlenmiştir.

Tablo 1: 2005 yılı sonrası mikro-oluklu ısı borusu çalışmalarının karşılaştırılması

Kaynak	Kanal Geometrisi/Boyut	Üretim Tekniği ve Malzeme	Akışkan
Chen vd. (2007)	Dikdörtgen / W: 200, 300, 500 μm , H: 200, 300, 500 μm	Kimyasal aşındırma ve bakır plaka üzerine hassas frezeleme	Saf su
Liu vd. (2007)	Dikdörtgen / W: 500 μm , H: 800 μm	** & Bakır plaka	CuO nanoparçacıklı saf su
Jiao vd. (2007)	Yamuk / W: 262 μm , H: 195 μm	Bakır plaka (Matematiksel model)	Saf su
Lim vd. (2008)	V-şeklinde / W: 150 μm , H: 300 μm	Lazer ile işlenmiş bakır plaka	Saf su
Do vd. (2008)	Dikdörtgen / W: 200 μm , H: 420 μm , W: 203 μm , H: 839 μm	Bakır plaka (Matematiksel model)	Saf su
Yang vd. (2008)	Dikdörtgen / W: 250 μm , H: 200 μm	** & Bakır plaka	CuO nanoparçacıklı saf su
Qu vd. (2008)	Eşkenar üçgen / W: 300 μm	**	Bilgi yok
Sugumar vd. (2008)	Eşkenar üçgen / W: 1000 μm	** (Matematiksel model)	Water, heptane, ammonia, methanol, ethanol
Revellin vd. (2009)	Dikdörtgen / W: 400 μm , H: 380 μm	Bakır plaka üzerine işleme	Metanol
Wang vd. (2009)	Dikdörtgen (on tube) / W: 240 μm , D: 150 μm	Extrusion-ploughing process on copper	Aseton
Lips vd. (2010)	Dikdörtgen / W: 400 μm , H: 400 μm	Machining on copper plate	n-Pentan
Lefevre vd. (2010)	Dikdörtgen (radially oriented)	Etching on silicon wafer	Methanol
Hung vd. (2010)	Eşkenar üçgen / W: 1040 μm W: 200 μm , H: 420 μm , W: 203 μm , H: 839 μm	Copper, nickel and monel (Matematiksel model)	Saf su
Hung ve Seng (2011)	Yıldız kesit (4, 6, 8 köşeli), Eşkenar üçgen	Silikon (Matematiksel model)	Pure water
Lips vd. (2011)	Dikdörtgen / W: 400 μm , H: 400 μm	Machining on copper plate	n-Pentane
Hung ve Tio (2012)	Eşkenar üçgen / W: 1040 μm	Bakır (Matematiksel model)	Saf su
Qu vd. (2012)	Yamuk (pulsating) / D_h : 251, 352, 394 μm	Islak aşındırılmış silikon plaka	Saf su, etanol, FC-72, R-113
Liu vd. (2013)	Eşkenar üçgen / W: 300, 500, 700 μm	** (Matematiksel model)	metanol, etanol aseton, amonyak
Tang vd. (2013)	Dikdörtgen / W: 150 μm , H: 300 μm	Bakır plaka ekstrüzyon ve tel çekme	Saf su
Li vd. (2013)	Yamuk W: 300 μm , D: 250 μm	Bakır tüpten tel çekme ile copper tube	Saf su
Tio ve Hung (2015)	Eşkenar üçgen / W: 1040 μm	Bakır ve Nikel (Matematiksel model)	Saf su

** Üretim bilgisi verilmemiş, W: En, H: Yükseklik, D: Çap, D_h : Hidrolik çap

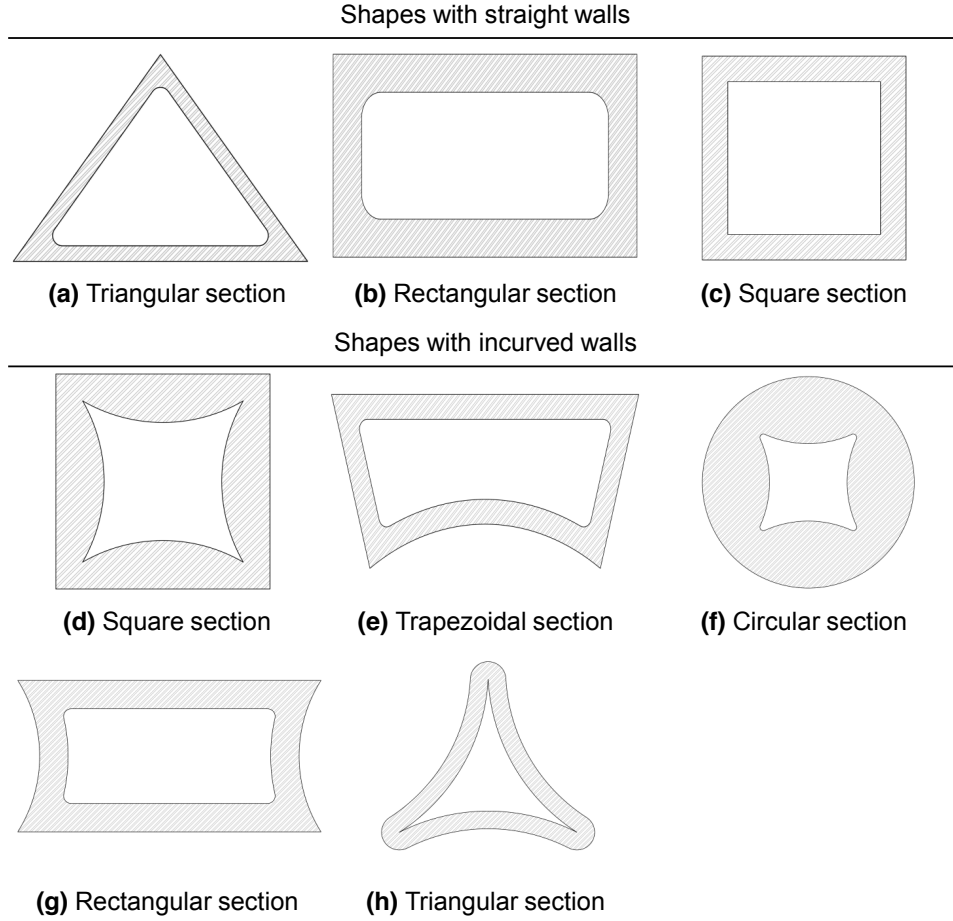
Bu proje kapsamındaki literatür taramasında daha ziyade 2005 yılı sonrası çalışmalara odaklanılmıştır. Yine 2005 yılı sonrası çalışmalarda da birçok farklı geometri, akışkan ve malzeme için yapılmış ve tüm bu çalışmaların özeti Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmaların kapsamı farklı başlıklar altında aşağıda incelenmiştir.

2.1 Kanal Geometrisi

Konvansiyonel ısı borularında yoğunlaştırucudan buharlaştırıcıya olan akış fitil yapısı üzerinde oluşan kapiler kuvvetler ile sağlanmaktadır. Ancak bu kapiler basınç farklı MIOB’larında keskin köşeli kanallar veya oluklar sayesinde sağlanmaktadır (Rahmat vd., 2010). Keskin köşelerin mikro-oluklu ısı boruları çalışmalarında önemli bir rolü vardır. Kesit alanındaki köşe sayısı, köşelerin keskinliklerini etkilemektedir. Poligon bir kesitin köşe sayısı arttıkça köşe tepe açısı da artmaktadır, bu da köşenin keskinliğini azaltmakta ve dolayısıyla kapiler pompalamanın azalmasına neden olmaktadır (Hung ve Seng, 2011). Bu nedenle üçgen ve V-kesitli oluk geometrileri de göz ardı edilmemiştir (Odabaşı, 2014). Hatta yıldız kesitli mikro-oluklu ısı borularının keskin köşeye imkan verecek şekilde tepe açısının ayarlanabilmesi sayesinde çok üstün bir kapiler pompalamaya imkan verdiği gözlemlenmiştir (Hung ve Seng, 2011). Ancak yıldız kesitli bir mikro-oluklu ısı boruları üretim açısından bazı zorlukları da beraberinde getirdiği için literatürde üretim kolaylığından ötürü dikdörtgen, kare ve üçgen kesitli MIOB’ları ile ilgili çalışmalara daha sıklıkla rastlanmaktadır. Literatürde tercih edilen oluk geometrileri Şekil 2’de verilmiştir. Literatürde birçok farklı kanal geometrisi çalışılmış ve 2005 yılı sonrası çalışmalar için kullanılan geometriler Tablo 1’de belirtilmiştir. Bu çalışmalarda kanal ölçülerini etkileyen en önemli faktör üretim tekniğiyle ilgili kısıtlar ve doldurma oranı olmuştur.

2.2 Üretim Teknikleri ve Malzeme

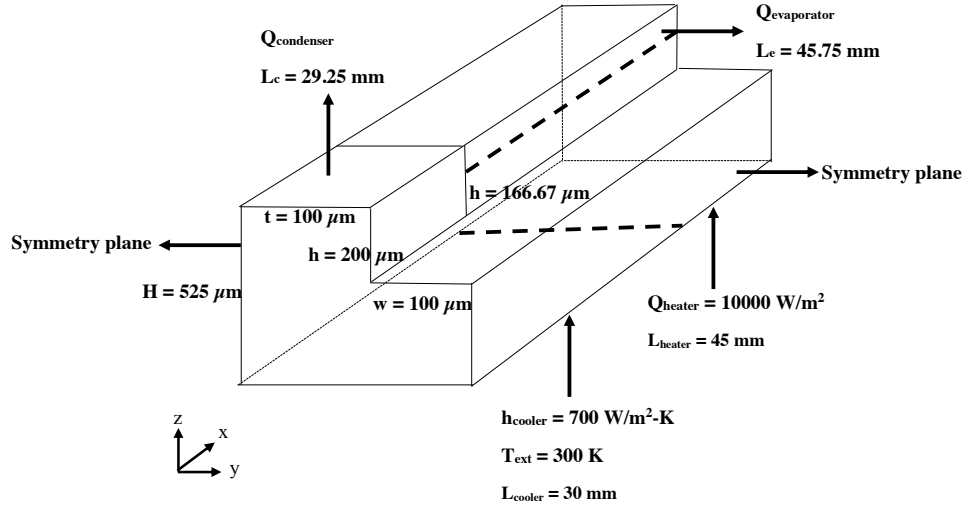
mikro-oluklu ısı boruları üretiminde mikro-olukların üretimi kritik bir noktadır. Mikro-oluk üretimi için bir kaç farklı alternatif mevcuttur. Mikro-oluk ölçüleri, mikro-oluk sayısı, ısı borusu malzemesi gibi bir çok nokta göz önüne alınarak üretim tekniğine karar verilmektedir. Yüksek ısı iletkenlik katsayısının mikro-oluklu ısı borularının ısı performansını arttırmasından ötürü ısı iletkenliği yüksek olan malzemeler tercih edilmektedir. (Chang vd., 2014). Özellikle elektronik devre endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan silikon ve ısı iletkenliği yüksek olan metaller (metaller arasından da bakır ön plana çıkmaktadır) en çok tercih edilen malzemelerdendir. Silikon tabanlı mikro-oluklu ısı boruları üretimi için ıslak ve kuru aşındırma gibi mikro-üretim teknikleri tercih edilmekle beraber metal tabanlı mikro-oluklu ısı boruları için mekanik kesme tabanlı teknikler tercih edilmektedir. Literatürdeki 2005 yılı sonrası yapılan çalışmalarda kullanılan üretim teknikleri ve kullanılan malzemeler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2: Tercih edilen oluk geometrileri (Zaghdoudi vd. (2011) çalışmasından adapte edilmiştir)

2.3 Akışkan

Kullanılan akışkanın buharlaşmanın verimli olması için fitil yapısını güzelce ıslatabilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda akışkanın buharlaşma entalpisinin de görece yüksek olması düşük akışkan hızlarında dahi anlamlı ısı uzaklaştırma karakteristiğine sahip olmasına imkan vermektedir. Akışkanın yüksek ısı iletkenliğe sahip olması da radyal yöndeki sıcak değişiminin az olmasına ve fitil duvar arayüzünde kabarcıklı kaynamaya imkan vermektedir. Aynı zamanda akışkanın yüzey geriliminin yüksek olması akışkan üzerinde yüksek kapiler kuvvetler oluşmasına ve yer çekimine karşı dahi ısı borusunun etkin bir şekilde çalışmasına imkan vermektedir. Bir diğer önemli faktör de akışkanın buhar basıncıdır. Bu basıncın yüksek olması boru cidarının daha kalın tercih edilmesine neden olmaktadır (Reay vd., 2014). Tüm bu özellikler göz önüne alındığında birçok farklı akışkan ile çalışmalar yapılmıştır. 2005 yılına kadar olan çalışmalarda kullanılan akışkanların listesi Sobhan vd. (2007) yaptığı çalışmada özetlenmiştir. 2005 yılı sonrası çalışmalar Tablo 1’de verilmiştir. 2005 yılına kadar olan çalışmalarda tercih edilen akışkanların saf su, metanol (genellikle silikon ısı boruları için), n-pentan, etanol ve amonyak olduğu görülmektedir. 2005 yılı sonrası çalışmalarda



Şekil 3: Birim hücre modellemesinde kullanılan çözüm bölgesi (Odabaşı, 2014)

her ne kadar aseton, metanol, etanol, n-pentan, FC-72 ve R-134 gibi birçok akışkan tercih edilse de saf suya doğru bir eğilim olduğu görülmektedir. Liu vd. (2013) yaptıkları çalışmada farklı akışkanların ısı borusunun zamana bağlı performansına etkisini incelemişler ve etanol en hızlı tepkiyi, metanolün ise en yavaş tepkiyi verdiğini gözlemlemişlerdir. Yine başka bir çalışmada 20 – 100°C aralığındaki çalışma sıcaklığında, kullanılan akışkanın mikro-oluklu ısı borularının ısı transferi kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Amonyanın 50°C'nin altında, saf suyun 50°C'nin üzerinde daha iyi bir ısı transferi kapasitesi olduğu gözlemlenmiştir (Sugumar vd., 2008). Bazı çalışmalarda da bakır-oksit nanoparçacıkların mikro-oluklu ısı boruları performansına etkisi incelenmiş ve ısı borusunun performansının optimum bir nanoparçacık konsantrasyonu kullanılarak arttırılabileceği gösterilmiştir (Liu vd., 2007, Yang vd. 2008).

3 YÖNTEM

3.1 Sayısal Model

3.1.1 Birim Oluklu Isı Borusu Modellemeleri

Projeden önce çalışmaları başlamış ve ilerlemiş olan bir Doktora tezi (Odabaşı, 2014) çerçevesinde yapılan çalışmalar ile bir birim oluklu ısı borusundaki tüm fiziksel olayların tek tek modellerinin geliştirildiği ve entegre olarak paketlenildiği bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan çözüm bölgesi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu çalışmada ısı borusundaki yoğuşma ve buharlaşmanın mikro ve makro bölgede modellenmesi, ısı borusundaki sıvı-gaz yüzeyinin şeklinin hesaplanması, ısı borusundaki akışın modellenmesi ve bu alt modelleri kullanarak birim oluklu ısı borusunun sayısal modellenmesi ve çözümü gerçekleştirilmiştir.

Birim oluklu ısı borusunun sayısal modellenmesi ve çözümü için kullanılan yazılım ile deneysel düzeneğinin boyutlandırılması çalışmalarına veri üretilmiştir. Deneysel düzende kullanılması planlanan ısı borusu ile aynı kanal derinliğine, kanal genişliğine, aynı kullanım sıvısına, ısı kaynağı ve dış atmosfere ısı kaybeden uzunluklara sahip bir birim kanallı ısı borusu modeli hazırlanmıştır. Bu model değişik ısı akılarında ve dış ortam sıcaklıklarında denenerek sonuçlar alınmıştır. Çok-oluklu ısı borusu modellenmesi için gereken iki veri, buharlaşma ve yoğuşma bölgelerinde geçerli olan eşdeğer ısı taşınımı katsayıları hesaplanmıştır.

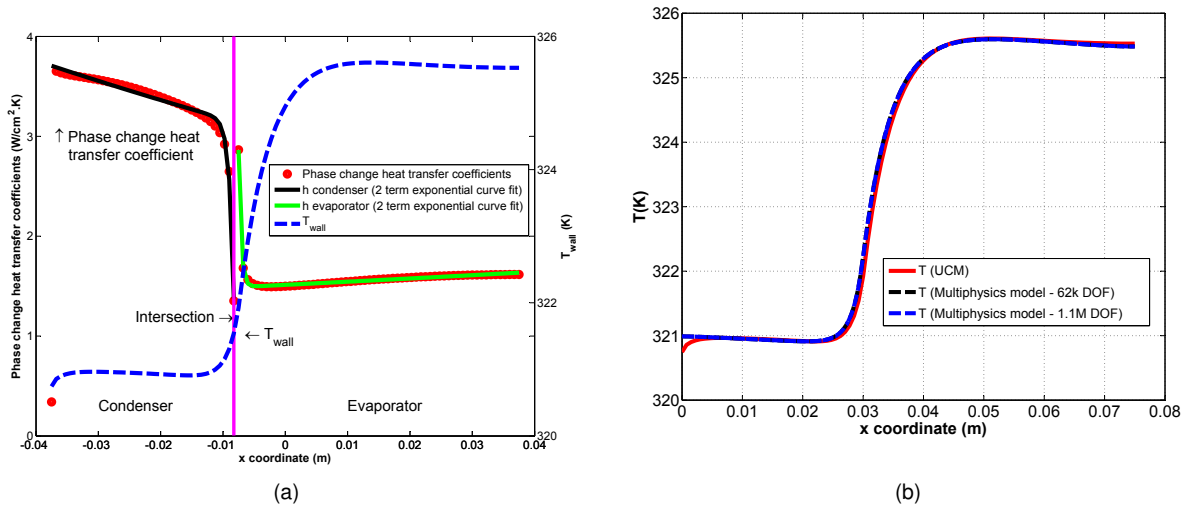
3.1.2 Deneysel Düzenek Analizi Çalışmaları

Deneysel düzeneğin tasarlanmasının ilk aşaması olarak deneysel düzenden beklenecek performansın hesaplanması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda aşağıda sıralanan konuların analizleri COMSOL Multi-physics yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

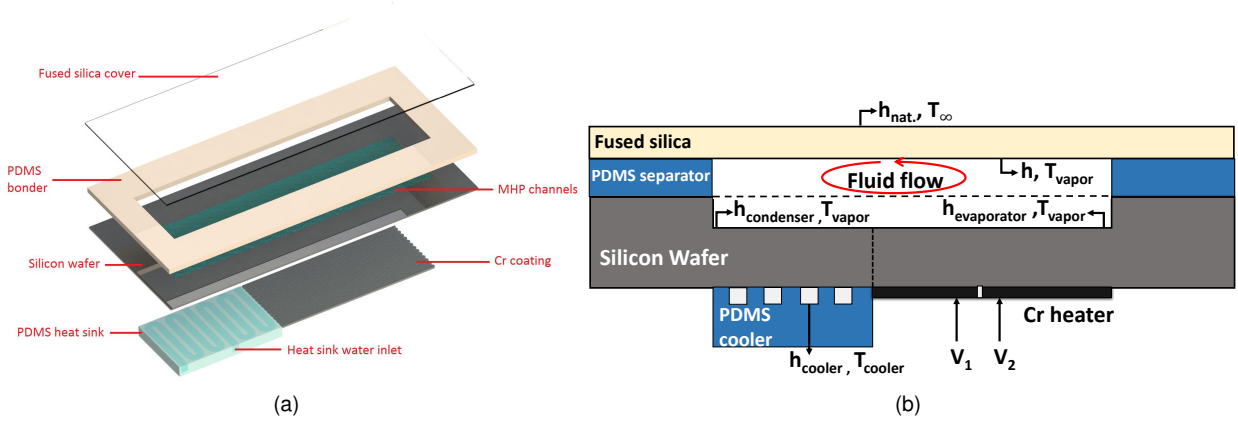
- Deneysel düzeneğinin geometrik boyutlarının belirlenmesi
- Isıtıcı yükünün belirlenmesi ve bu yükü karşılayacak ısıtıcı karakterizasyonunun yapılması
- Soğutma yüklerinin hesaplanması ve bu yükleri karşılayacak soğutma kanallarının tasarımı
- Çok oluklu ısı borusunun modellemesi
- Deney düzeneği tasarımı

Çok-oluklu ısı borusu modellemesi için yukarıda açıklanan ayrıntılı birim oluklu ısı borusu modelinden elde edilen sonuçlar ile kanal duvarı üzerindeki yoğuşma ve buharlaşma bölgelerindeki ısı akısı değerlerine uygun şekilde duvardaki eşdeğer ısı taşınım katsayıları elde edilmiş, daha sonra bu ısı transferi değerleri COMSOL'da duvara taşınım ile ısı transferi sınır şartı koşulu olarak tanımlanmıştır. Burada taşınımın gerçekleştiği ortam sıcaklığı da olukların içerisindeki buhar sıcaklığı alınmıştır. Öncelikle COMSOL modellemesini doğrulamak amacıyla tek bir kanalda birim oluklu ısı borusu model sonuçları ile taşınım ısı transferiyle gerçekleştirilen COMSOL modeli karşılaştırılmıştır. Birim oluklu model ile hesaplanan sıcaklık dağılımı ile COMSOL ile bulunan sıcaklık dağılımları başarılı bir şekilde tutturulmuştur. Elde edilen ısı taşınım katsayılarının mikro-oluk üzerindeki dağılımı ve birim hücre modelinden elde edilen duvar sıcaklığı ile COMSOL'dan elde edilen duvar sıcaklıkları Şekil 4'da gösterilmiştir.

Birim hücrede yapılan çalışmaları takiben çok-oluklu model ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır (Çetin vd., 2015). Simülasyonu yapılan mikro-oluklu ısı borusu ve kullanılan sınır şartları Şekil 5'de verilmiştir. Bu modelde her bir malzeme içerisinde ısı iletim denklemi çözüldü ve iki fazlı ısı transferinin modellenmesi için oluk üzerinde birim hücreden elde edilen ısı taşınım katsayıları tanımlanmıştır. Isıtıcı olarak 800nm

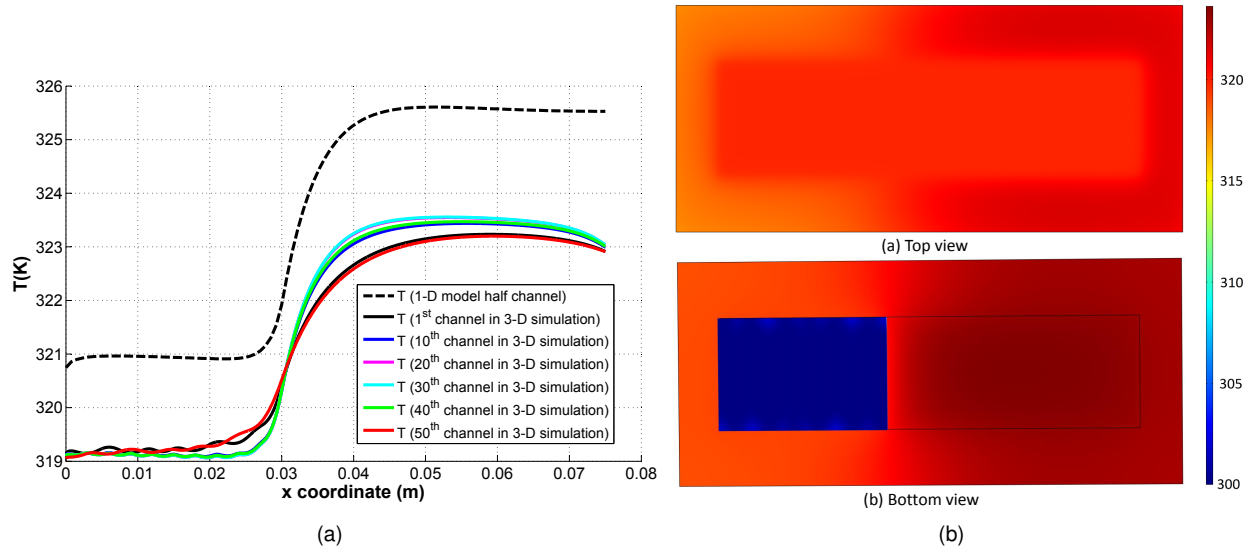


Şekil 4: (a) Mikro-oluk üzerindeki ısı taşınım katsayıları, (b) birim hücre modelinden ve COMSOL'dan elde edilen duvar sıcaklıkları



Şekil 5: (a) 3B mikro-oluklu ısı borusu, (b) kullanılan sınır şartları

kalınlığında silikon depozit edilmiş krom ısıtıcılar kullanılmıştır. Buradaki ısınmanın modellenmesi için ısıtıcı üzerinde elektrik alan denklemi çözülmüştür. Ancak bu kadar ince bir yapı üzerinde ağ yaratmak yerine COMSOL'un elektriksel kabuk modülü kullanılarak sadece 2B bir modelleme yapılmıştır. Yine sayısal modeldeki serbestlik derecesini çok fazla arttırmamak için kanal içerisindeki akış ve ısı transferini 1-D modelleyen COMSOL'un "Pipe Flow" modülü kullanılmış, ancak daha sonra bu modelin bizimki gibi mikro seviye problemlerine uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Teorik modelde soğutucu tarafında 300K'deki sabit ortam sıcaklığına ısı transferi yapıldığı için, yapılacak deneylerde soğutucu suyun sıcaklığının yaklaşık 300K'de sabit olacağı bir tasarım yapılmış ve kanal içerisindeki akış ve ısı transferini modellemek yerine, soğutucu kanalın yüzeyinde yine taşınım ile ısı transferi katsayısı tanımlanmıştır. Taşınım ile ısı transferi katsayısı tam gelişmiş laminer kanal akışı için geçerli olan Nusselt sayısı yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 6: (a) Oluk içerisindeki sıcaklık dağılımı, (b) ısı borusu ön ve arka yüzeyindeki sıcaklık dağılımı

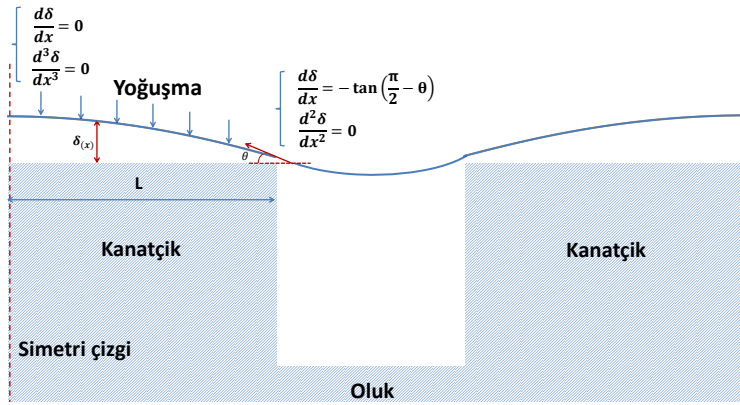
Her yapılan hesaptan sonra suyun çıkış sıcaklığı duvardan geçen ısı transferi yardımıyla hesaplanmış ve giriş-çıkış sıcaklığı farkının 1K'den az olacağı şekilde soğutucu suyun debisine karar verilmiştir. Yine her yapılan sayısal analiz sonucunda mikro-oluklu ısı borusunda bütüncül (overall) enerji dengesi kontrol edilmiştir. Bütün katmanların dahil edildiği modelde 3-B ısı transferi etkileri nedeniyle enerji dengesinin tutturulması mümkün olamamıştır. Enerji dengesini tutturmak için içerideki faz değiştiren sıvının yeni bir denge sıcaklığına ulaşacağı öngörüsü ile oluk içerisindeki buhar sıcaklıkları, bütüncül enerji dengesinin sağlanacağı şekilde değiştirilmiştir. Bu simülasyon çalışmaları sonucunda farklı mikro-oluklarda elde edilen sonuçlar Şekil 6–(a)'da verilmiştir. Görüldüğü gibi 3B etkiler sonucunda mikro-oluklar içerisinde aynı sıcaklık dağılımı elde edilememiştir. Böyle bir dağılımı birim oluk modellemesi ile öngörmek mümkün değildir. Geliştirilen 3B sayısal model sayesinde bu sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi mümkün olmuştur. Şekil 6–(b)'de de mikro-oluklu ısı borusu ön ve arka yüzeyindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere mikro-olukların üzerinde düzgün bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Buhar sıcaklığında yapılan farklı deneyler sonucunda ısı borusu üzerindeki global enerji dengesinin tuttuğu durumdaki ısı transferi değerleri de Tablo 2'de verilmiştir. Birim oluk modelindeki buhar sıcaklığı 321,8K iken 3B model de bu değer 319,9K olarak bulunmuştur. 3B model sayesinde mikro-oluklu ısı borusudan kaybedilen ısının da modellenmesi mümkün olmuştur.

3.1.3 Kanatçık Üzeri Yoğuşma Modellemesi Çalışmaları

Birim oluklu ısı borusunda yapılan çalışmalara ek olarak, yoğuşma ve buharlaşma olaylarının daha iyi anlaşılması ve tasarım çalışmalarını yönlendirmesi için faz değişimi konuları daha ayrıntılı olarak çalışılmıştır.

Tablo 2: Farklı bölgelerdeki ısı transferi değerleri

	Birim Oluk Modeli ($T_{\text{buhar}} = 321.8 \text{ K}$)	Global Model ($T_{\text{buhar}} = 319.9 \text{ K}$)
Q_{evap}	8,11 W	7,48 W
Q_{cond}	8,10 W	7,47 W
Q_{heater}	9,0 W	9,0 W
Q_{cooler}	8,98 W	8,29 W
Q_{loss}	—	0,69 W



Şekil 7: Yoğuşmanın olduğu kanatçık geometrisi

Kanal ve kanatçık genişliklerinin ısı borusu performansına olan etkilerinin değerlendirilebilmesi için kanatçık üzerindeki yoğuşma modellenmiş ve tasarım parametrelerinin yoğuşmaya olan etkisi değerlendirilmiştir.

Hidrodinamik model: Şekil (7)'de bir oluk ve kanatçıktan oluşan geometri gösterilmiştir. Çalışma sıvısının buharı oluklu yapının kanatçıklarının üzerinde yoğunlaşır. Ancak denklem (1) nedeniyle yoğuşma film kalınlığının tersi ile orantılı olduğundan yoğuşmanın çoğunluğu, sıvı filmi kalınlığının en az olduğu kanatçığın oluk ile birleştiği bölgede gerçekleşir. Sıvı filminin geometrisinin doğru olarak modellenmesi, ısıl modelin de gerçekçi olması için gereklidir. Şekil (7)'de gösterilen geometride buhar ve sıvı fazlar arasındaki basınç farkı için Young-Laplace denklemi (2) geçerlidir. Bu farkı oluşturan iki etki kılcal (capillary) ve ayrılma (dispersion) basınçlarıdır.

$$\dot{m}'' = \frac{a\Delta T + b\Delta P}{1 + a\delta h_{fg}/k} \quad (1)$$

$$P_v - P_l = P_c + P_d \quad (2)$$

Kılcal basınç, sıvı filmin profili ile ilişkili olarak formüle edilir ve denklem (3) yazılır. Film profilinin eğimi yüksek olduğunda, bunun etkisini içeren terimler de katıldığında ayrılma basıncı ise denklem (4) de verildiği gibi türetilir (Wee vd., 2005).

$$P_c = \frac{\sigma \frac{d^2\delta}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (3)$$

$$P_d = \pm \frac{B}{\delta^3} \left[\alpha^4 - \frac{2}{3} \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2 - \frac{2\left(\frac{d\delta}{dx}\right)^4}{3\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{2\left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2}{3\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{1/2}} + \frac{2}{3} \delta \frac{d^2\delta}{dx^2} - \frac{\delta \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^4 \frac{d^2\delta}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{5/2}} + \frac{5\delta \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2 \frac{d^2\delta}{dx^2}}{3\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} - \frac{2\delta \frac{d^2\delta}{dx^2}}{3\left(1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right)^{1/2}} \right] \quad (4)$$

Bu denklemde

$$B = \frac{3\pi n_f^2 \beta_{ff} (1 - \rho)}{16}, \alpha = \left[\frac{8(1 - \lambda)}{9(1 - \rho)} \right]^{\frac{1}{4}}, \lambda = \frac{n_s \beta_{fs}}{n_f \beta_{ff}}, \rho = \frac{n_g \beta_{fg}}{n_f \beta_{ff}}$$

Kanatçık üstündeki sıvı akışı, eylemsizlik terimlerini ihmal ederek bir boyutlu tam gelişmiş akış olarak kabul edilebilir. Sıvı basıncı ve akış hızı arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{dP_l}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dy^2} \quad (5)$$

Kütle akış hızı, hız dağılımını akışa dik yönde entegre ederek ve yoğunlukla çarparak hesaplanır

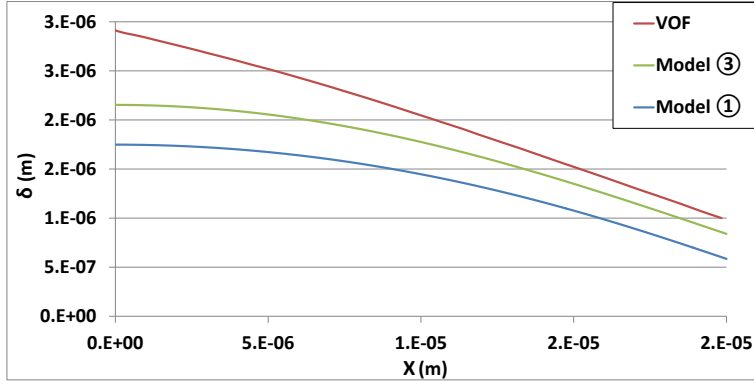
$$m' = -\frac{1}{3\nu} \frac{dP_l}{dx} \delta^3 \quad (6)$$

Ara-yüzeydeki kütle akışı, Moosman ve Homsy (1980) tarafından katı duvar ve buhar sıcaklıkları arasındaki sıcaklık sıçramasının bir fonksiyonu olarak, Wayner (1976) denkleminin modifiye edilmiş şeklinin kullanımı ile modellenmiştir. Girilen yoğunlaşma akısı ile sıvı akışının kütle akısı arasında kütle dengesinin uygulanmasıyla film profilinin bir fonksiyonu olan bir diferansiyel denklem elde edilir.

$$-\frac{1}{3\nu} \delta^3 \frac{d^2P_l}{dx^2} - \frac{\delta^2}{\nu} \frac{d\delta}{dx} \frac{dP_l}{dx} = -\frac{a(T_w - T_v) - b(P_c + P_d)}{1 + a\delta h_{lv}/K_l} \quad (7)$$

$$a = \left(\frac{M}{2\pi R_u T_l V} \right)^{1/2} \frac{P_v M h_{lv}}{R_u T_v T_l V} \quad (8)$$

$$b = \left(\frac{M}{2\pi R_u T_l V} \right)^{1/2} \frac{P_v V_l}{R_u T_l V} \quad (9)$$



Şekil 8: Model (1), Model (2) and VOF yöntemi ile hesaplanan film profilleri.

Çözüm metodolojisi: Yoğuşma filminin profilini veren 4. dereceden lineer olmayan diferansiyel denklemi çözmek için Runge–Kutta sayısal çözüm yöntemi kullanılmıştır. Karmaşık türevlerin olduğu kılcal ve ayrılma basıncı ifadeleri literatürde çeşitli sadeleştirmelerle kullanılmıştır. Gerek ayrılma basıncının çözüme olan etkisini değerlendirmek, gerekse literatürde yaygın olarak kullanılan ve sıvı filminin profilini 4. dereceden bir polinom kullanarak benzetimleyen model de kıyaslama amacıyla kullanılmıştır.

Model (1): Kılcal ve ayrılma basınçlarının ikisinin de kullanıldığı model

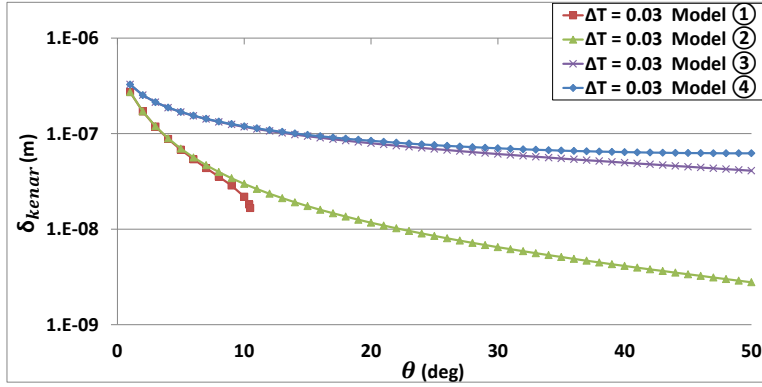
Model (2): Yalnız kılcal basıncın kullanıldığı model

Model (3): 4. dereceden profilin ve kılcal basıncın basitleştirilmiş ifadesinin kullanıldığı, ayrılma basıncının olmadığı model

Model (4): 4. dereceden profilin ve birinci türevin kılcal basınca olan etkisinin kullanıldığı model

Dördüncü dereceden polinomun kullanıldığı modellerin çözümünde tüm denklem film kalınlığının fonksiyonu olarak diskretize edilmiş ve momentum dengesi sekant yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sınır koşulları problemin fiziğine dayanarak belirlenmiştir. Şekil (7)'de gösterildiği gibi, kanatçık tavanında akış için dört sınır şartı mevcuttur. Bunlardan ikisi simetrik çizgide, diğer ikisi kanatçığın olukla birleştiği noktada bulunur. Film kalınlığı kanatçığın olukla birleştiği noktadaki ters açıyla bağlantılı olarak tanımlanmıştır.

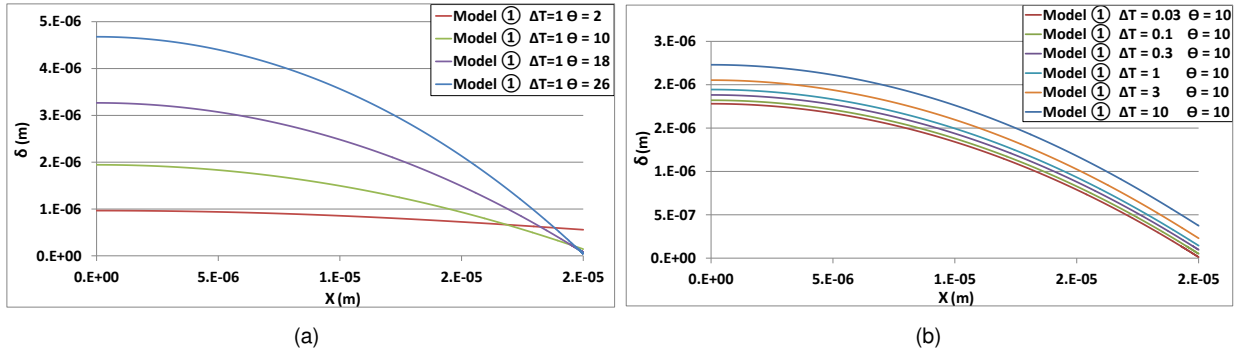
Sonuçlar: Yapılan modellemelerde çalışma sıvısı olarak su kullanılmış ve karşılaştırma amaçlı olarak termodinamik özellikler Faghri ve Zhang (2001) tarafından yapılan çalışmadaki değerler ile aynı alınmıştır. Faghri ve Zhang (2001) tarafından VOF metodu kullanılarak sunulan sonuç ile Model (1) ve Model (3) sonuçları Şekil (8)'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada ters açı ve sıcaklık farklarının değerleri $\theta = 6$ ve $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 'ya eşittir. Şekilde görüldüğü gibi, Model (1) diğerleriyle kıyaslandığında daha alçak bir profil hesaplamaktadır, bu da daha fazla yoğunlaşan buhar kütlesi ve buna bağlı olarak daha yüksek ısı akısı anlamına gelir. VOF metodu ile hesaplanan profil simetri çizgisindeki film profilini doğru hesaplamamak-



Şekil 9: Kullanılan modeller için δ_{kenar} 'ın ters açıyla değişimi

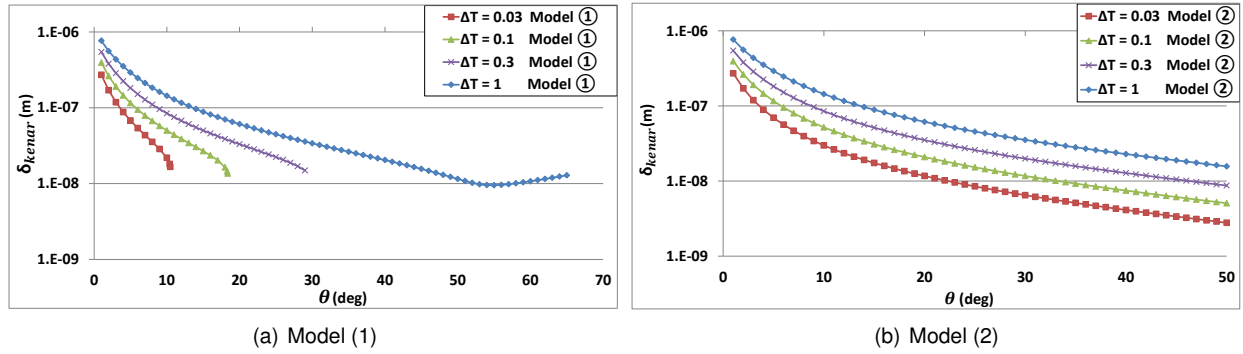
tadır. Dördüncü dereceden profil kullanılan (3) ve (4) numaralı modeller integral enerji ve kütle dengesini tutturmakla birlikte bu denklemler noktasal olarak sağlanmamaktadır.

Değişik modeller tarafından hesaplanan kanatçık–oluk buluşma noktasındaki film kalınlıkları Şekil 9'de verilmiştir. Burada dikkati çeken noktasal geçerliliği olan Model (1) ve Model (2)'nin bulgularının birbirlerine yakın, integral geçerliliği olan Model (3) ve Model (4)'ün de bulgularının gruplanmış olduklarıdır. Hem kılcal hem de ayrılma basınçlarının etkilerinin olduğu Model (1) 10° ters açıdan sonra sonuç bulamazken, yalnız kılcal basıncın kullanıldığı Model (2) 50° ters açılarda çözüm vermektedir. Bu kıyaslamalar sonucunda değişik modellerin farklı sonuçlar verdiği gözlemlendiğinden, en gerçekçi benzetimlemeyi veren Model (1)'in oldukça karmaşık formülasyonuna rağmen kullanılmasına karar verilmiştir.



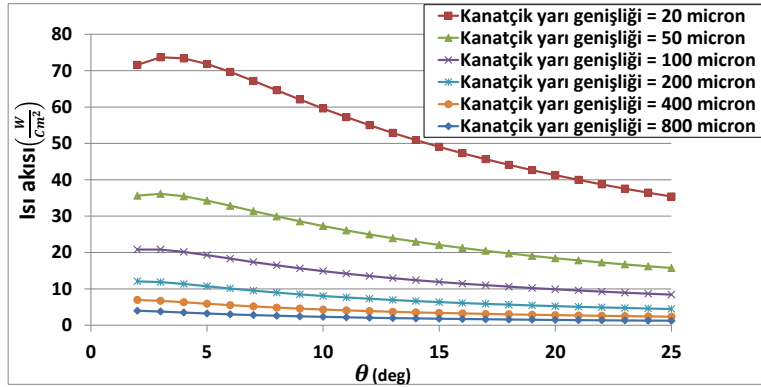
Şekil 10: Film kalınlığının ters açıya göre değişimi

Film profilinin farklı ters açılara ve sıcaklık farklarına göre değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10–(a) incelendiğinde kanala ulaşılan noktadaki arayüz açısının düşük olduğu değerlerde film kalınlığının kanatçık boyunca fazla değişmediğini, bu açının yükselmesi ile film kalınlığının kanatçığın ucunda azaldığı, kanatçık boyunca ilerledikçe de arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 10–(b)'de sıcaklık farkının azalması ile film yüksekliklerinin de düştüğünü ancak sıvı-buhar arayüz şeklinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



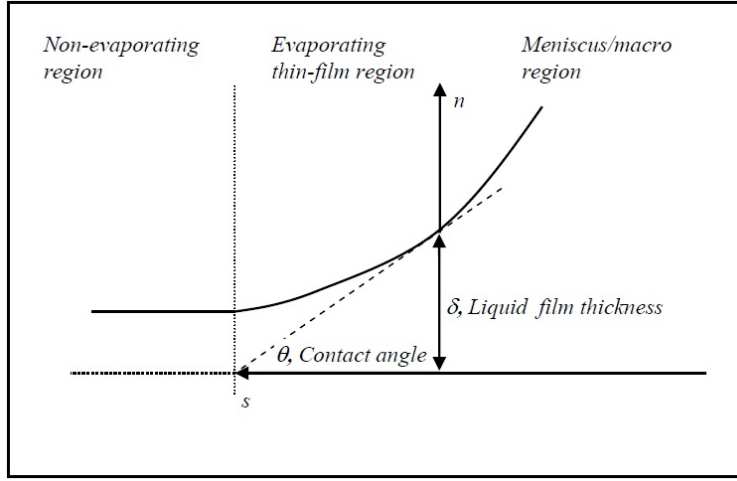
Şekil 11: δ_{kenar} 'ın ters açıyla değişimi

Şekil 11–(a)'da Model (1) için kanatçıkla oluğun kesişme noktasındaki film kalınlığının ters açı ile değişimi gösterilmektedir. Burada dikkat çeken konu sıcaklık farkının azalması ile çözüm bulunan ters açı değerlerinin azalmasıdır. Yükselen sıcaklık farkları ile daha yüksek ters açılarda da sonuç alınmaktadır. Aynı sonuçlar ayrışma basıncı hesaba katmayan Model (2) için hesaplandığında (Şekil 11–(b)), verilen her sıcaklık farkı için yüksek ters açılarda sonuç almanın mümkün olduğu görülmektedir.



Şekil 12: 1°C sıcaklık farkında Model (1) de ısı akısının ters açıyla değişimi

Projede kullanılan ısı borularının optimizasyonu amacıyla kanatçık ve oluk genişliklerinin performansa olan etkisi gözlemleneceğinden kanatçık genişliğinin ısı transferine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Model (1) in kullanıldığı bu çalışmanın sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi kanatçık uzunluğunun azalması ile birim alandan olan ısı transferi artmaktadır. Bu sonuç analizi yapılan her kanatçık genişliği için geçerlidir. Bu analizin yönlendirmesiyle deneylerde küçülen kanatçık genişlikleri için daha iyi ısı borusu performansı beklenmektedir.



Şekil 13: Buharlaşma bölgesinde kullanılan koordinat sistemi

3.1.4 Buharlaşma Modellemesi Çalışmaları

İnce bir sıvı filminden gerçekleşen buharlaşma nedeniyle uzaklaşan sıvının yerine gelen sıvı, menisküs boyunca gerçekleşen bir basınç değişimi ile hareket eder. Bu basınç değişikliği de sıvı-buhar arayüzünün şekil değiştirmesi ile sağlanır. Sıvıdaki bu basınç değişimini ifade etmek için Young–Laplace denkleminin Denklem (10)'da verilen şekli kullanılır.

$$P_v - P_l = P_c + P_d \quad (10)$$

Bu denklemde P_d ayrılma basıncını, P_c ise kılcal basıncı ifade eder. Sıvı filmin kalınlığı ile ayrılma ve kılcal basınçlar arasındaki ilişki Denklem (11) ve (12) ile gösterilebilir.

$$P_d = \frac{A_d}{\delta^3}, \quad P_c = \frac{\sigma}{R} \quad (11)$$

Bu denklemde R film yüzeyinin yarıçapını gösterir.

$$R = \frac{(1 + \delta^2)^{3/2}}{d^2 \delta / ds^2}. \quad (12)$$

Sıvı filminin kalın olduğu bölgede basıncı sağlayan etki kılcal etkidir. Ancak film kalınlığı incelidikçe ayrılma basıncının etkisi artar ve baskın etki haline gelir. Sıvı filmdeki basınç gradyanını bulmak için Denklem (10)'da verilen Young–Laplace denkleminin türevi alınır. İnce sıvı film bölgesinin sonunda kılcal ve ayrılma basınçlarının ters etkisi ile sıvı akışının durduğu ve buharlaşmanın sona erdiği bir bölgeye ulaşılır. Denklem (11)'de verilen kılcal ve ayrılma basınçlarının türevleri alındığında basınç gradyanı Denklem (13)'de verildiği gibi film kalınlığı cinsinden ifade edilir.

$$\frac{dP_l}{ds} = 3 \frac{A_d}{\delta} \frac{d\delta}{ds} - \sigma \frac{d^3\delta/ds^3}{(1 + \delta'^2)^{3/2}} + 3\sigma \frac{(d^2\delta/ds^2)^2}{(1 + \delta'^2)^{5/2}}. \quad (13)$$

Akış sırasında basınç nedeniyle oluşan kuvvetlerin kayma gerilmesi kaynaklı kuvvetlerle dengelendiği basitleştirilmesiyle, hareket yönündeki momentumun korunması ile Denklem (14) elde edilir.

$$\frac{dp_l}{ds} = \mu \frac{d^2u_l}{dn^2} \quad (14)$$

Bu denklem için sınır şartları

$$n = \delta, \text{ noktasında } \frac{du_l}{dn} = 0; \quad n = 0 \text{ noktasında } u_l = 0. \quad (15)$$

şeklinde verilir. Her bir kesit alanda sıvının kütle debisi ise hız profili integre edilerek bulunur (Denklem (16)).

$$\dot{m}_e = \int_{\delta}^0 u_l dn = \frac{\delta^3}{3\mu} \left(\frac{-dP_l}{ds} \right) \quad (16)$$

Denklem (13) ün akış yönünde türevini alıp kütle debisi ile birleştirince Denklem (17) elde edilir.

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{\delta^3}{3\mu} - \left(\frac{dP_l}{ds} = 3 \frac{A_d}{\delta} \frac{d\delta}{ds} - \sigma \frac{d^3\delta/ds^3}{(1 + \delta'^2)^{3/2}} + 3\sigma \frac{(d^2\delta/ds^2)^2}{(1 + \delta'^2)^{5/2}} \right) \right) \quad (17)$$

Akış yönündeki birim alanda oluşan buharlaşma (Wayner et al., 1976, Moosman ve Homsy, 1980) film kalınlığı ve duvar ile buhar sıcaklığı farkının fonksiyonu olarak Denklem (18) da verilmiştir.

$$m_e'' = \frac{a(T_{lv} - T_v) + b(P_l - P_v)}{(1 + a\delta h_{lv}/k_l)} \quad (18)$$

önceki bölümde açıklanan yoğuşma modelinde olduğu gibi burada da a ve b sabitleri,

$$a = \left(\frac{M}{2\pi R_u T_{lv}} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{R_u T_v T_{lv}} \right), \quad b = \left(\frac{M}{2\pi R_u T_{lv}} \right)^{1/2} \left(\frac{P_v V_l}{R_u T_v T_{lv}} \right) \quad (19)$$

ile ifade edilir. Bu iki ifade birleştirilince, buharlaşma ve sıvı filminin kalınlığını birbirine bağlayan dördüncü dereceden bir diferansiyel denklem bulunur.

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{\delta^3}{3\mu} - \left(\frac{dP_l}{ds} = 3 \frac{A_d}{\delta} \frac{d\delta}{ds} - \sigma \frac{d^3\delta/ds^3}{(1 + \delta'^2)^{3/2}} + 3\sigma \frac{(d^2\delta/ds^2)^2}{(1 + \delta'^2)^{5/2}} \right) \right) = \frac{a(T_{lv} - T_v) + b(P_l - P_v)}{(1 + a\delta h_{lv}/k_l)} \quad (20)$$

Bu denklemin dört sınır şartı aşağıda verilmiştir.

$$s = 0 \text{ noktasında } \delta = \delta_0 \text{ ve } \frac{d\delta}{ds} = \tan \theta \quad (21)$$

$$s = t \text{ noktasında } \frac{d^2\delta}{ds^2} = \frac{(1 + \delta'^2)^{3/2}}{R\sigma} \text{ ve } \frac{d^3\delta}{ds^3} = \text{ilk tahmin ve iterasyon.} \quad (22)$$

Sayısal çözüm: Sıvı filmin kalınlığı ile buharlaşma arasındaki ilişkiyi veren 20 numaralı diferansiyel denklem “predictor–corrector” yöntemiyle çözülmüştür. Bu noktaya gelene kadar farklı yöntemler denenmiş (örneğin Runge–Kutta, Fehlberg gibi) ancak buharlaşma bölgesinin sonuna yakın ısı akısının ani artışı sayısal yöntemlerin yakınsamasını olanaksız hale getirmiştir. Bu amaçla yazılan Fortran programında “quad-precision” kullanılmıştır. Diferansiyel denklemin aşırı “stiff” olması nedeniyle eksplisit metodların çözümün stabilitesini bozduğu ve çözümü için implisit metodların gerektiği görülmüştür. Problemin sayısal olarak çözümü için literatürde yaygın olarak kullanılan ve dördüncü dereceden doğruluğu olan Adams-Bashforth ve Adams-Moulton formülleri kullanılmıştır (Chapra ve Canale, 2015).

$$y_{s+1} = y_s + \frac{h}{24} [55f_i - 59f_{i-1} + 37f_{i-2} - 9f_{i-3}] \quad (23)$$

$$y_{s+1} = y_s + \frac{h}{24} [9f_{i+1} + 19f_i - 5f_{i-1} + f_{i-2}] \quad (24)$$

burada

$$\frac{dy}{ds} \Big|_i = f_i \quad (25)$$

Bir diferansiyel sistem denklemler seti olarak ifade edildiğinde,

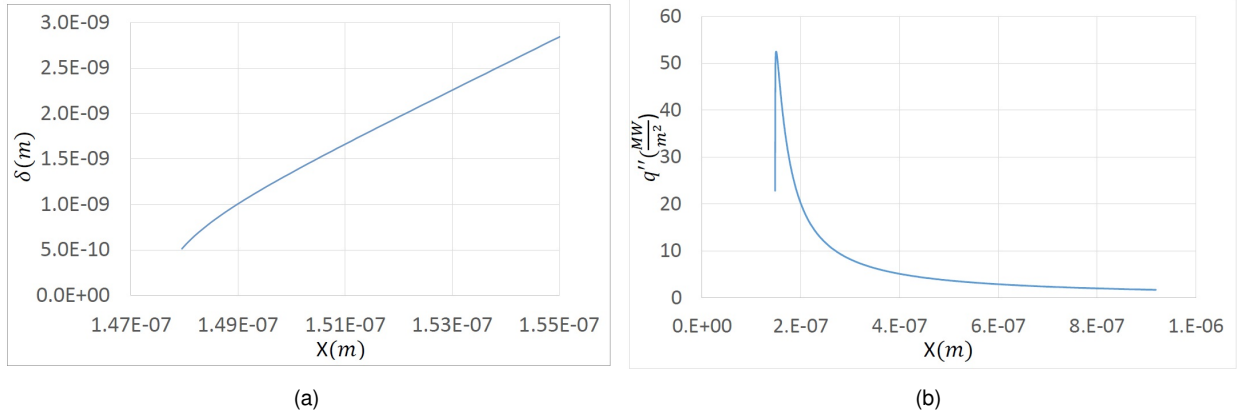
$$\frac{d\delta}{ds} = f_1(s, \delta, \delta', \delta'', \delta''')$$

$$\frac{d^2\delta}{ds^2} = \frac{du}{ds} = f_2(s, \delta, \delta', \delta'', \delta''')$$

$$\frac{d^3\delta}{ds^3} = \frac{d^2u}{ds^2} = \frac{dv}{ds} = f_3(s, \delta, \delta', \delta'', \delta''')$$

$$\frac{d^4\delta}{ds^4} = \frac{d^3u}{ds^3} = \frac{d^2v}{ds^2} = \frac{dw}{ds} = f_4(s, \delta, \delta', \delta'', \delta''')$$

Bu denklem setinin çözümüne başlanabilmesi için başlangıç noktasındaki üçüncü türevin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir ilk tahmin yapılarak problem çözülür. Çözüm bölgesinin sonunda bölgeye giren sıvının tümünün buharlaşarak tükenmesi gerektiğinden, başlangıçta verilen üçüncü türev değeri bu şartı sağlayana kadar çözüm yenilenerek bulunur. Şekil 14–(a)’da buharlaşma bölgesindeki sıvı filmi kalınlığının

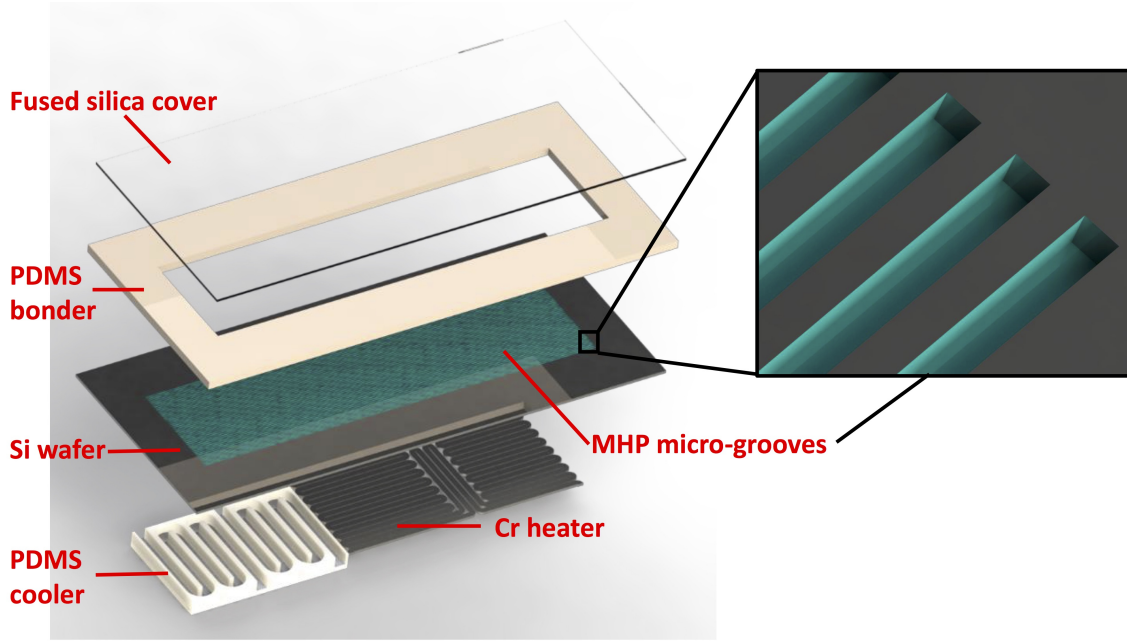


Şekil 14: Buharlaştırma bölgesinde (a) film kalınlığının ve (b) ısı akısının değişimi

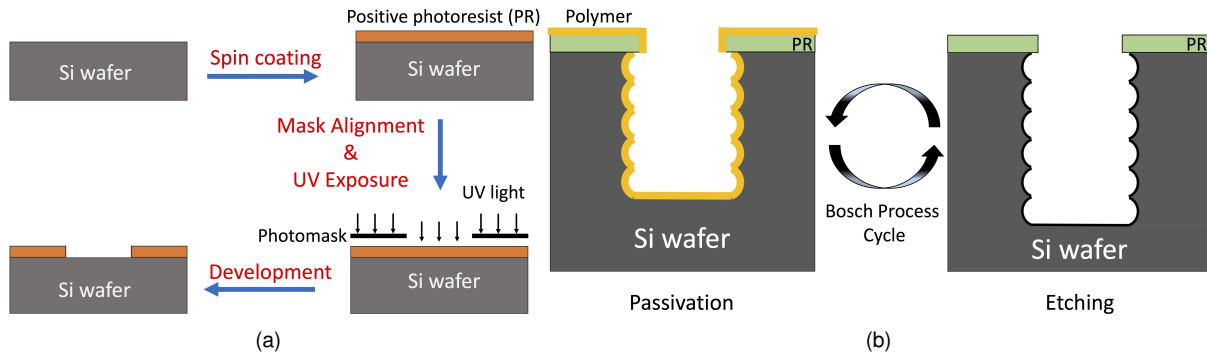
değişimi görülmektedir. Film kalınlığının yüksek olduğu ve kılcal basıncın etkin olduğu bölgeden film kalınlığının düşük olduğu bölgeye gelindiğinde filmin eğimi yön değiştirmekte ve bölgenin sonunda basınç gradyanı sıfır değerine ulaşarak dışarıya sıvı çıkmamaktadır. Bu noktada buharlaştırma miktarı da sıfır değerine ulaşmaktadır. Şekil 14–(b)'de buharlaştırma bölgesinde ısı akısının değişimi verilmiştir. Bu çalışma buharlaşmanın çoğunun olukun köşesindeki çok küçük bir bölgede olduğunu göstermektedir ve oluk genişliğinden bağımsızdır. Verilen bu sonuçlar literatürde rastlananlarla (Akkuş ve Dursunkaya, 2016; Stephan ve Busse, 1992) uyum içindedir. Bu çalışmanın ışığında, oluk genişliğini azaltıp, oluk sayısını artırmanın ısı borusundaki buharlaştırma miktarını da artıracığı çıkarımına ulaşılmıştır.

3.2 Ön Üretim Denemeleri

Mikro-oluklu ısı-borusu üretimindeki en önemli ve zahmetli basamak mikro-oluk yapısının üretilmesidir. Bu çalışmada hedeflenen mikro-oluk yapısının silikon substrat üzerinde üretilmesidir. Proje kapsamında öncelikle silikon üzerine mikro-oluk yapılarının üretilmesi için ön üretim deneyleri yapılmıştır. Üretim yöntemi olarak literatürde de sıklıkla kullanılan kimyasal aşındırma (Anand vd., 2002, Kang ve Huang, 2002, Lee vd., 2003, Launay vd., 2004, Moon vd., 2004, Suman vd., 2005, Suman ve Kumar, 2005, Huang ve Seng, 2011) yöntemine alternatif olarak daha çok metal ısı-boruların üretiminde kullanılan minyatür işleme ve mekanik kesme yöntemleri de değerlendirilmiştir. Projenin bu aşamasında üretimi hedeflenen yapı, daha önceki bölümde modelleme çalışmaları yapılmış olan ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan mikro-oluklu ısı borusudur. Modelleme çalışmaları ışığında üretilmesi hedeflenen yapı Şekil 15'de gösterilmiştir. Bu yapı içerisindeki silikon substratın üst yüzeyinde 200 μ m genişliğinde, 200 μ m derinliğinde ve oluklar arasında 200 μ m mesafe bulunan 50 adet oluk bulunmaktadır. Bu mikro-olukların üretimi için litografi tabanlı kimyasal aşındırma ve mekanik işleme tabanlı minyatür işleme ve mekanik kesme yöntemleri ile



Şekil 15: Deneysel çalışmada kullanılacak olan ısı-borusu



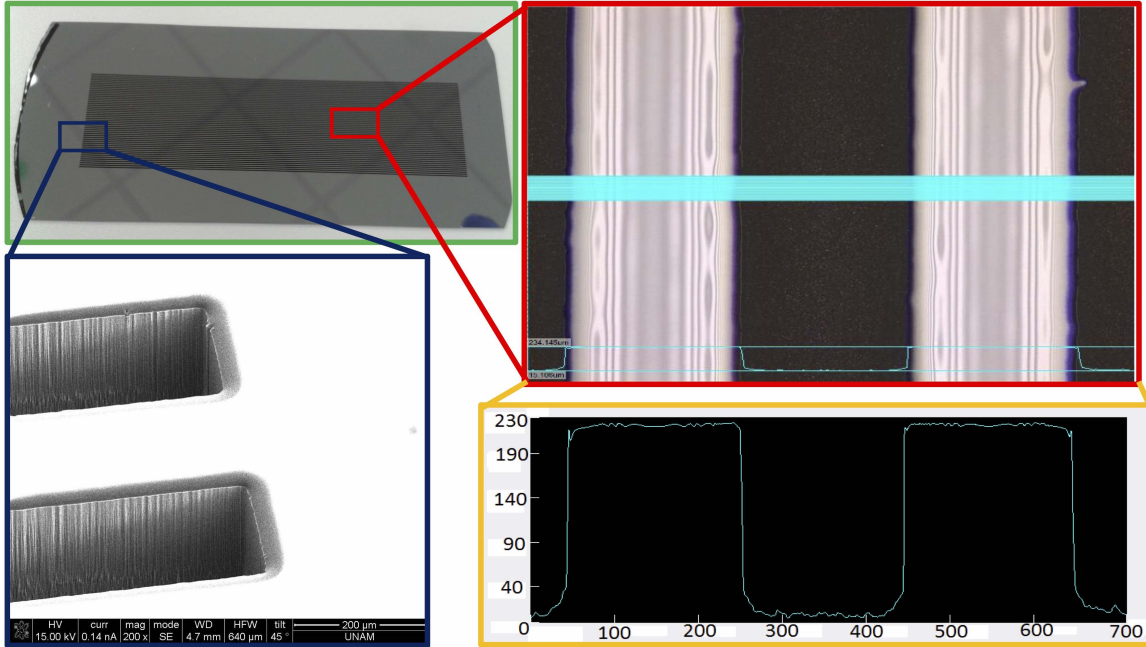
Şekil 16: (a) Foto-litografi işleminin temsili resmi, (b) Bosch prosesinin temsili resmi

denemeler yapılmıştır. Mikro-oluk üretimdeki en önemli başarı kriteri, olabildiğince dik yan duvarları olan yüzey pürüzlülüğü olabildiğince az olan oluklar üretebilmektir.

3.2.1 Kimyasal Aşındırma

Litografi tabanlı kimyasal aşındırma işlemi için kuru aşındırma prosesi kullanılmıştır (Taze, 2015). Kuru aşındırma prosesinde, aşındırıcı kimyasal, gaz fazında sisteme beslenerek aşındırma işlemi yapılmaktadır, ancak aşındırma işlemi öncesinde aşındırılacak örüntünün silikon alttaşa (substrate) işlenmesi için fotolitografi yapılması gerekmektedir. Foto-litografi işleminin temsili resmi Şekil 16-(a)'da verilmiştir (bu işlemin detayları Taze'nin (2015) tamamladığı tez çalışmasında verilmiştir). Foto-litografiyi takiben kuru aşındırma işlemi yapılmıştır. Kuru aşındırma işlemi silikon alttaş üzerine dik duvarlı yapılar elde etmeye olanak vermek-

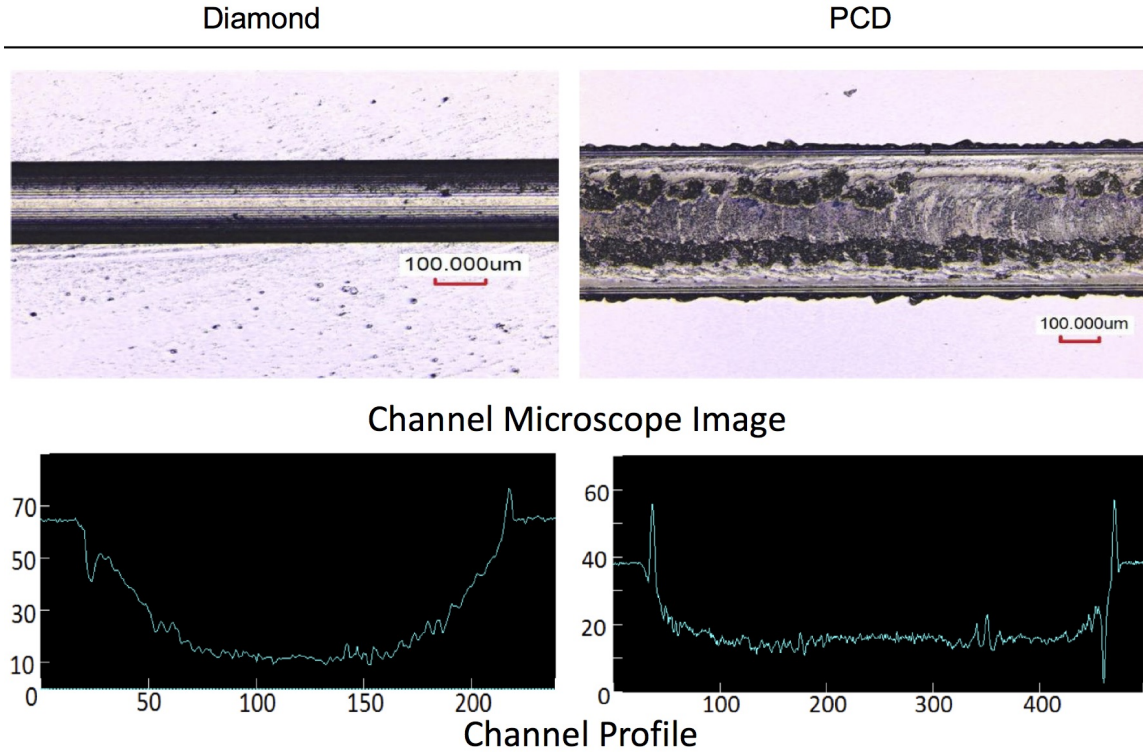
tedir. Derin Reaktif İyon Aşındırma (DRIE) en-boy oranı yüksek yapıların üretiminde tercih edilen bir kuru aşındırma yöntemidir (Quero vd., 2014). DRIE ilk olarak Robert Bosch GmbH tarafından keşfedildiği için literatürde Bosch process adı ile de bilinmektedir (Zhang ve Hoshino, 2014). Bosch prosesinin temel olarak iki basamağı vardır. Bu basamaklar aşındırma ve pasivasyondur. Aşındırma basamağında SF₆ reaktif gazı ile aşındırma işlemi yapılırken, pasivasyon basamağında C₄F₈ gazı kullanılarak yanal aşındırmayı önlemek için fluro-polimer bir pasivasyon tabakası elde edilmektedir. Bosch prosesinin temsili resmi Şekil 16-(b)'de gösterilmiştir. DRIE prosesinde yüksek aşındırma hızını yakalama adına yüksek yoğunluktaki plazmayı yaratmak için iki tane RF güç kaynağı kullanılmaktadır. Prosesin başarı ile tamamlanması için bir çok proses parametresinin optimizasyonu gereklidir. Bu parametreler sırası ile: RF gücü, bias voltaj, proses basıncı ve sıcaklıktır. Proses parametrelerinin optimizasyonu Taze (2015)'nin tez çalışmaları kapsamında tamamlanmış ve Şekil 18'te görülen mikro-oluklar elde edilmiştir.



Şekil 17: DRIE prosesi ile elde edilen mikro-oluklar

3.2.2 Minyatür İşleme

Mikro-oluk üretiminde elmas ve PCD kesici uçlar kullanarak yüksek-hassasiyetli mekanik işleme yöntemi de denemiştir. Yüksek hassasiyetli üretim için 3-eksenli CNC freze (DECKEL MAHO HSC55, Almanya) kullanılmıştır. Farklı kesme derinliği (1 μ m, 2 μ m), besleme hızı (30mm/dak, 10 mm/dak) ile denemeler yapılmıştır. Denemeler esnasında 50mm boyunda tek bir oluk ve 30 μ m/50 μ m derinlik için ve 25000rpm dönüş hızı ile kesme işlemi yapılmıştır. Toplam dört deneme yapılmış ve her kesme denemesinden sonra ke-

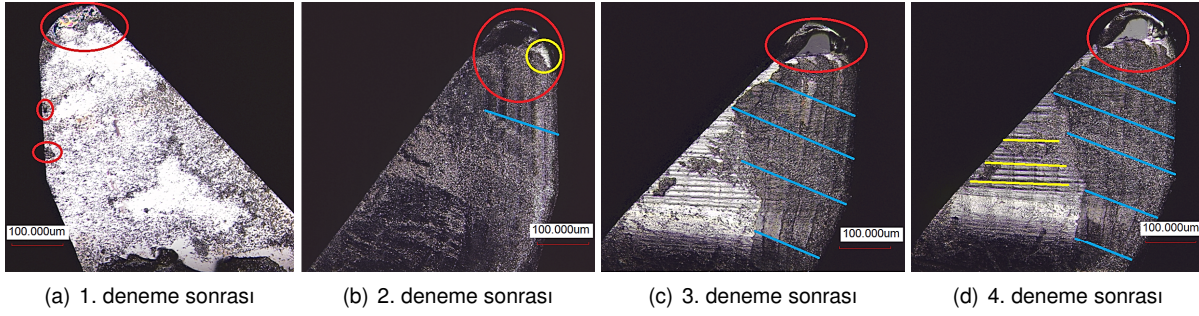


Şekil 18: Minyatür işleme sonucu elde edilen mikro-oluklar (4. deneme, uzunluk ölçüleri μm)

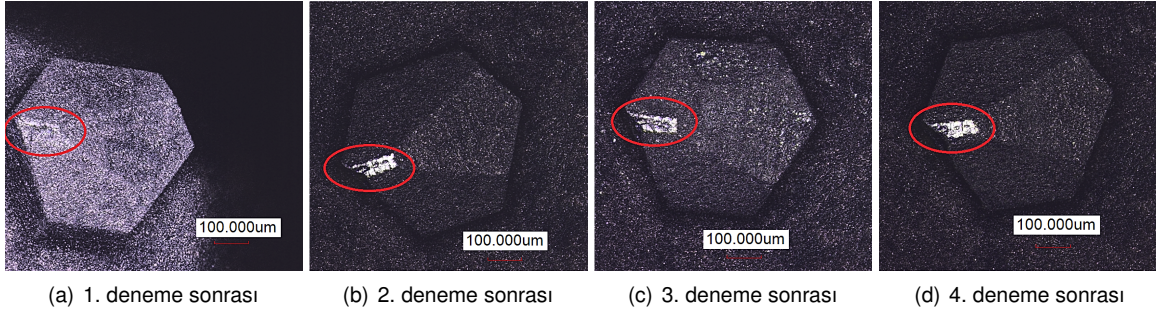
sici takımlar dijital mikroskop altında incelenmiştir. Kesme sonucu hem yan duvarların dikliği hem de istenilen yüzey pürüzlülüğü yakalanamamış ve kesici uçların hızla aşındığı gözlemlenmiştir. Dördüncü denemeye ait kanal görüntüleri Şekil 18’te, denemeler sonucundaki kesici uçların görüntüsü Şekil 19 ve Şekil 20’de verilmiştir.

3.2.3 Mekanik Kesme

Üretiminin en son basamağında, üretilen yapının çip halinde silikon altlıktan ayrılması işleminde kullanılan elmas testere (Disco DAD3220) ile kesme işlemi yapılmıştır. Öncelikle alttaşın boydan boya kesme işlemi denenmiştir. 30000rpm hız ile kesme işlemi gerçekleştirilmiş ve duvarları dik ve çok pürüzsüz 200 μm derinliğinde oluklar Şekil 21’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Daha sonra boydan boya kesme yerine 75mm’lik 50 μm derinliğinde oluklar için kesme işlemi gerçekleştirilmiş, ancak oluk kenarlarının kırıklar olduğu gözlemlenmiştir. Isı borusunda buharlaşma yan oluk duvarında ve üst yüzeye yakın bir bölgede gerçekleştiği için oluk üst kenarındaki kırıklar ısı borusu üretimi için kabul edilebilir değildir. Ancak üçüncü bir denemede testerenin tüm oluk derinliğini kademeli olarak kestiği bir reçete denenmiştir. Testere 200 μm ’luk derinliği 10 adımda kesmiştir. Bu şekilde üretilen oluklarda çok düzgün ve dik kanallar elde edilmiştir. Elde edilen oluklar Şekil 21’de görülebilir. Ancak testerenin dairesel bir geometriye sahip olmasından dolayı olukların başında



Şekil 19: Elmas kesici ucun mikroskop görüntüleri



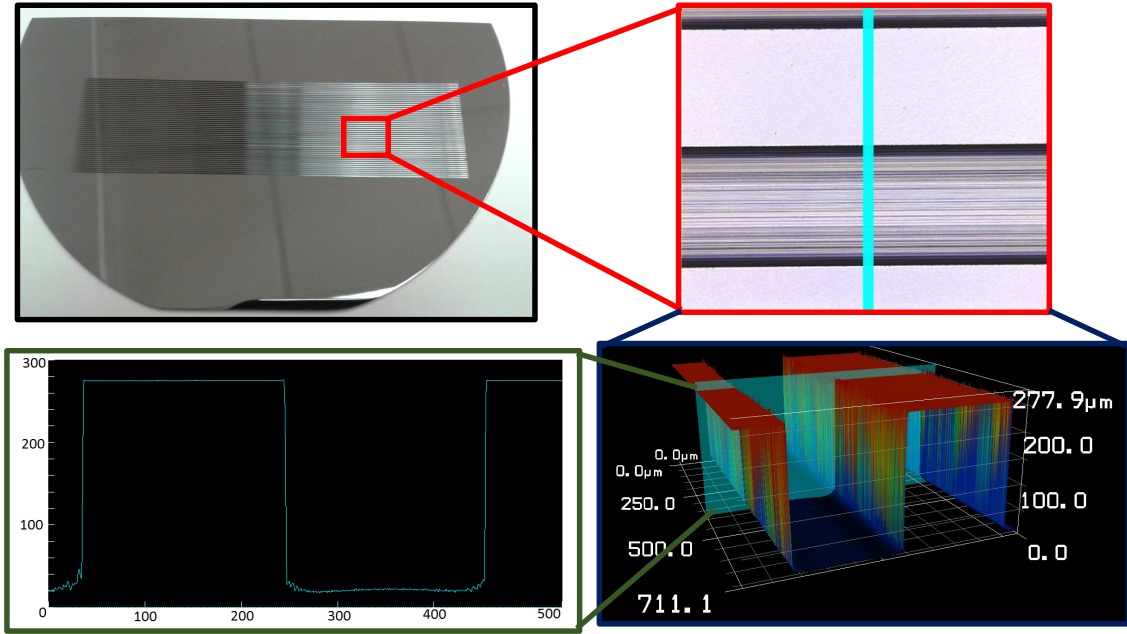
Şekil 20: PCD kesici ucun mikroskop görüntüleri

ve sonunda 2 mm'lik kısımlarında geometri oval olarak elde edilmiştir. Bu tür bir ovalliğin ısı transferine performansına nasıl bir etki edeceği bu aşamada öngörülememektedir.

3.2.4 Değerlendirme

Bu çalışmada silikon bir ısı-borusu yüzeyindeki mikro-olukların üretimine yönelik farklı üretim teknikleri ile üretimler yapılmıştır. Kullanılan üretim teknikleri kuru aşındırma, minyatür işleme ve mekanik kesmedir. Isı-borusundaki mikro-oluklar için en önemli nokta duvarlarının dik ve mümkün olduğunca yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasıdır. Bu iki parametrenin buharlaşma dinamiğine etkisi olabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle mikro-olukların yüksek kalitede ve tekrarlanabilirliği yüksek bir şekilde üretilebilmesi bu çalışmanın devamında yapılacak olan deneysel çalışma için önem arz etmektedir. Yapılan çalışma sonucunda şu sonuçlara varılmıştır:

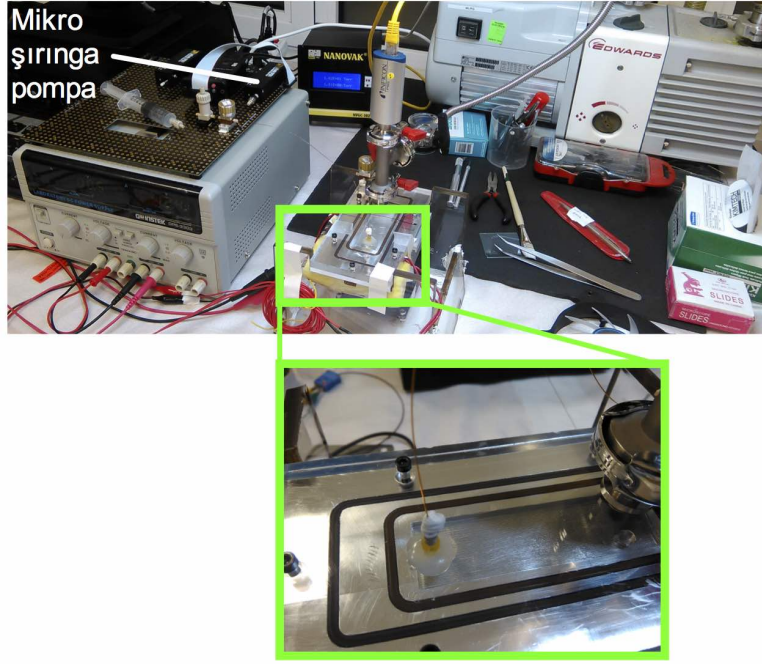
- DRIE yöntemi literatürde sıklıkla kullanılan ve yüksek yüzey kalitesi, en-boy oranı yüksek yapılarda dik duvarlar elde edilmesine olanak veren bir yöntemdir. Ancak birçok proses parametresinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyon süreci birçok deneme-yanılma gerektirse de bir kere reçete çıkartıldıktan sonra tekrarlanabilirliği yüksek bir prosestir.
- Kimyasal aşındırmanın öncesinde foto-litografi yapılması gerekmektedir. Foto-litografi ile elde edilebi-



Şekil 21: Kademeli kesme sonucu mekanik kesme ile elde edilen mikro-oluklar

lecek oluk geometrileri esneklik göstermektedir. Birkaç mikrondan milimetre ölçeğine kadar geometrilerin üretimi mümkündür.

- Kimyasal aşındırma birkaç basamak içermekte ve bu işlemlerin temiz oda ortamında yapılması gerekmektedir. Toplam işlem süresi 5 saat civarında olmaktadır (foto-litografi işlemi dahil).
- Minyatür işleme yöntemiyle hem istenilen duvar dikliği hem de istenilen yüzey pürüzlülüğü elde edilememiştir. Sadece 50 mikron derinliğinde tek bir olukta yapılan denemelerde dahi ciddi bir kesici uç aşınması görülmüştür. Kullanılan kesici uçların maliyeti 2000\$ mertebesindedir. Ayrıca mikro mertebedeki kesici uçlar ile kesme işleminin yapılabilmesi için yüksek hızlı mile sahip özel CNC freze tezgahı gerekmektedir. Sadece 1 oluk için yapılan çalışmalardan yapılacak tahmin (uygun duvar dikliği ve yüzey pürüzlülüğü durumunda dahi) 50 oluklu bir yapının ancak 200 saatlik bir işleme zamanında elde edilebileceğini öngörmektedir.
- Elmas testere ile yapılan mekanik kesme işlemi hem dik duvar hem de çok düşük yüzey pürüzlülüğü sağlanmıştır. 50 olukun üretimi yaklaşık 3 saatte tamamlanmaktadır.
- Mekanik kesme sadece tek basamaklı bir işlemdir ve temiz oda kullanılması şart değildir.
- Mekanik kesme işlemi ile ancak düz kanalların üretilmesi mümkündür, testere geometrisinden dolayı olukların başlangıç ve bitiş bölgelerinde testere çapı ile orantılı şekilde oval geometriye sahip bölgeler oluşmaktadır.



Şekil 22: Tek ısıtıcılı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları

- Üretilcek olukların genişliği kullanılan elmas testere ile sınırlıdır. En küçük $100 \mu\text{m}$ 'luk testere mevcuttur. Testerenin aşınması yüzünden belirli aralıklarla testerenin yenilenmesi gerekmektedir. Ancak testerenin maliyeti 25\$ mertebesindedir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında silikon tabanlı bir ısı borusunun üretimi için kimyasal aşındırma veya mekanik kesme yönteminin kullanılması uygun bulundu. Ancak, deney düzeneğinin kurulumu aşamasında mikro-oluklu ısı borusunun sistemi entegrasyonu aşamasında yapılacak olan deneme yanılmalarında silikon tabanlı bir yapının gerekli esnekliğe sahip olamayacağı proje ekibi tarafından değerlendirilerek, ilk olarak metal tabanlı bir mikro-oluklu ısı borusu üretilmesi ve deney düzeneği kurulumu aşamasında deneme yanılmaların bu metal tabanlı ısı boruları üzerinde yapılmasına karar verilmiştir.

3.3 Ön Deneysel Çalışmalar

Deneysel düzeneğin kurulmasının ilk aşaması olarak mikro olukların üretim yöntemleri üzerine yapılan çalışmalardan sonra deneysel düzeneğin kurulması çalışmalarına başlanmıştır. Bu amaçla ilk vakum sistemi ve doldurma denemeleri yapılmak üzere bir silikon ısı borusu üretimi gerçekleştirilmiş ve vakum altında sıvı ile doldurma ön deneyleri yapılmıştır. Bu işlemler sırasında sisteme konulan çalışma sıvısının miktarının ölçülerek doldurma işleminin yapılması hedeflenmiş ve bu amaçla Şekil 22'de gösterilen ve ölçülü mik-

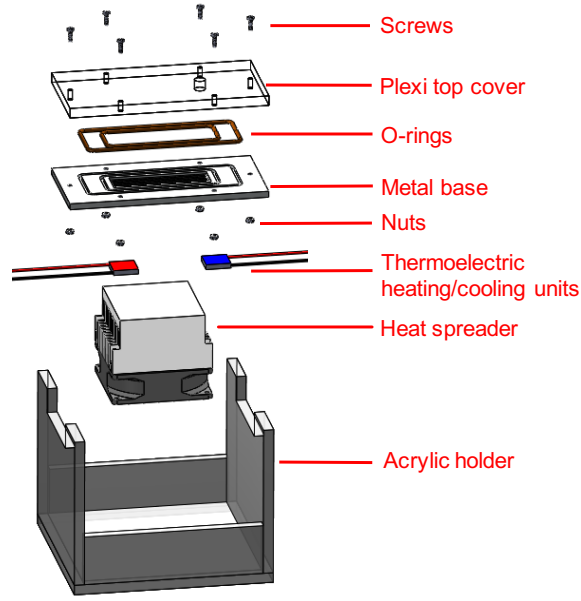
tarda sıvı pompalama işlevi olan mikro şırınga pompalar kullanılmıştır. Bu ön deneylerde vakum sisteminde ortaya çıkan kaçaklar ve mikro şırınga pompaları ısı borusuna bağlayan mikro borularda oluşan sorunların giderilerek daha güvenilir bir sistemin yapılması gereği ortaya çıkmıştır. Bu aşamada vakum sisteminin geliştirilmesi, ısıtma soğutma birimlerinin entegrasyonu çalışmalarında hızla ve düşük maliyetle üretimi gerçekleştirilebilecek, montaj ve demontaj sırasında mukavemeti yüksek bir ısı borusunun kullanımının daha doğru olacağı görüşüne ulaşılmıştır. Üretim çalışmalarında yapılan denemelerin de yönlendirmesiyle geliştirme çalışmalarının metal bazlı bir ısı borusunda sürdürülmesi ve en son aşamada silikon ısı borusunun üretilmesine karar verilmiştir. Kullanılacak ısı borusunda yüksek ısı iletkenliği, üretim kolaylığı ve maliyet avantajı nedeniyle Alüminyumun kullanılması kararlaştırılmıştır.

3.4 Deneysel Çalışmalar

Proje kapsamında çalışılacak olan mikro-oluklu ısı borularının ısı performans karakterizasyonlarının yapılabilmesi için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinin en önemli bileşeni ısı borusunun içerisindeki havanın çekilip içeriye sadece çalışacak akışkanın yüklenmesine imkan veren doldurma düzeneğidir. Bu noktada ısı borusunu çalışır hale getirmek projemiz için çok önemli bir basamağı oluşturmaktadır. Deney düzeneğinin kurulumu ve deney protokolünün belirlenmesi adına öncelikle metal tabanlı ısı boruları ile deneylere başlanmıştır. Bu aşamada da öncelikle ısı girdisi ile oynamaya izin vermeyen ancak fazla bir ekipmana ihtiyaç duymadan sistemin ısıtılmasını ve soğutulmasına imkan veren termo-elektrik ısıtıcı ve soğutucular içeren bir düzenek kurulmuştur (Birinci nesil ısı borusu, G0). Daha sonra G0 ile elde edilen tecrübe ile ikinci nesil deney düzeneği (G1) tasarlanmıştır. G1'de artık ısı girdisinin de kontrol edilebildiği ısıtıcılar sisteme dahil edilmiştir. En son basamakta ise G1 düzeneği silikon tabanlı ısı boruları üzerinde çalışmalar yapılabilir hale getirilmiştir. Tüm yapılan çalışmalarda oluk geometrisinin ısı borusu performansını irdelemek üzere farklı oluk ölçülerine sahip ısı boruları üretilmiştir. Metal tabanlı ısı borularındaki oluklar minyatür işleme yöntemiyle üretilmiştir. Bu bölümde hem metal hem de silikon tabanlı ısı boruları için tasarlanan deney düzenekleri, deneylerde kullanılan ısı borularının üretim ve montaj basamakları ve deneylerde kullanılan farklı parametreler anlatılmıştır.

3.4.1 Birinci Nesil (G0) Metal Isı Borusu

G0 ısı borusu düzeneği Şekil 23'de gösterilmiştir. Isı borusu düzeneği pleksiglas üst kapak, 2 o-ring, metal taban, termo-elektrik ısıtıcı ve soğutucu, fan entegre edilmiş ısı dağıtıcı ve pleksiglas taşıyıcıdan meydana gelmektedir. Metal taban üzerinde iki adet o-ring kanalı ve ısı borusu göreve göreceği olan oluklar bulunmaktadır. Üst kapak için yukarıdan görüntü alabilmeyi sağlayan saydam bir malzeme olan pleksiglas



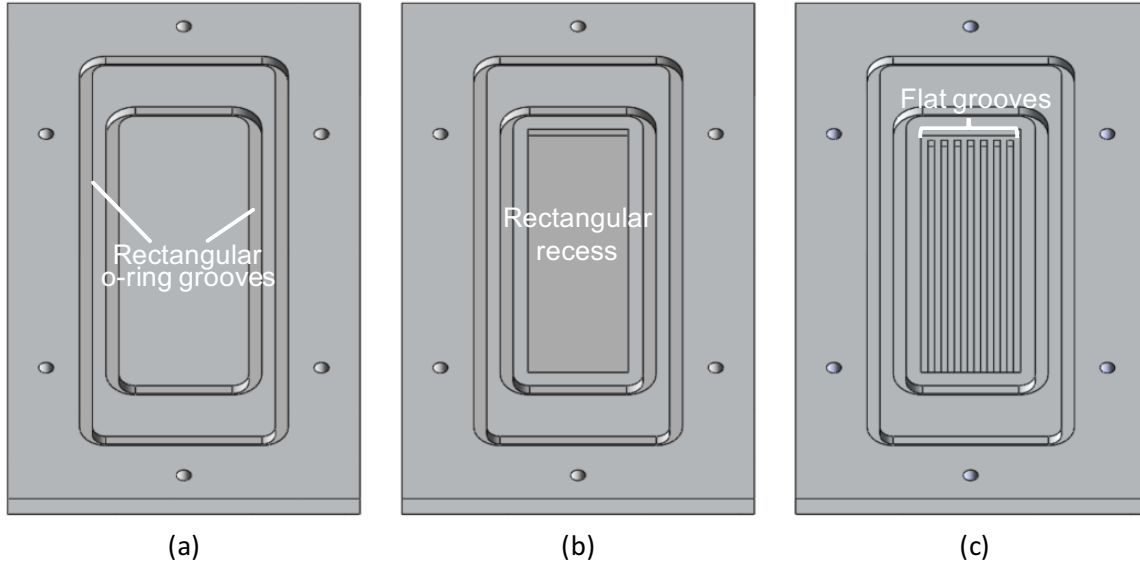
Şekil 23: G0 ısı borusu düzeneği

Tablo 3: G0 metal oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu

Numune	Oluk Sayısı	Oluk Genişliği [μm]	Oluklar Arası [μm]	Oluk Derinliği Mesafe [μm]	Oluk Yoğunluğu Oluk sayısı/mm
G0-01	50	200	200	200	2.50
G0-02	25	400	400	400	1.25
G0-03	7	1500	1500	2000	0.33

kullanılmıştır. Böylelikle buharlaşma, yoğunlaşma, kuruma ve ısı borusu içerisindeki sıvı miktarının gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Sistemin sızdırmazlığını sağlamak amacıyla 2 adet o-ring kullanılmıştır. Ayrıca üst kapak ile metal tabanın birbirine montajı ve yine sızdırmazlığı arttırmak için 6 adet civata kullanılmıştır. Bu civata yuvaları ayrıca metal tabanı minyatür işleme merkezine parçanın bağlanması için de kullanılmıştır. Oluşturulan düzenek ile termo-elektrik ısıtıcı ve soğutucunun metal tabanın alt yüzeyine temas halinde olmaları sağlanmıştır. Soğutucu termo-elektrik elemanın sıcak yüzeyindeki ısının uzaklaştırılması için bir ısı dağıtıcı ve fan sisteme entegre edilmiştir. Tüm sistem pleksiglas bir taşıyıcı üzerine konumlandırılmıştır.

Deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı oluk ölçüsüne karar verilmiştir. Bu ölçüler Tablo 3'de verilmiştir. Metal tabanın üretimi öncelikle o-ring kanallarının üretimi ile başlamıştır (bakınız Şekil 24–(a)). Daha sonra metal parçanın tabanının ortasına, olukların üzerine işleneceği 78 mm \times 23 mm ebatlarında ve 2,5 mm derinliğinde dikdörtgen bir girinti (bakınız Şekil 24–(b)) ve metal tabanın alt yüzeyinde 0,4 mm derinliğinde termokupl yerleştirmek için dikdörtgen yuvalar işlenmiştir. Bu basamaklar hassas CNC işleme ile yapılmıştır.

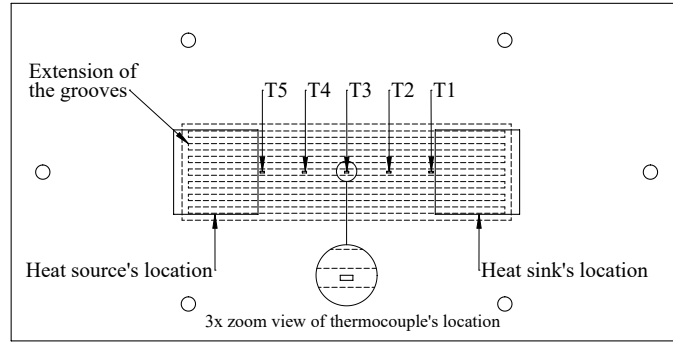


Şekil 24: Metal taban üretim basamakları (G0)

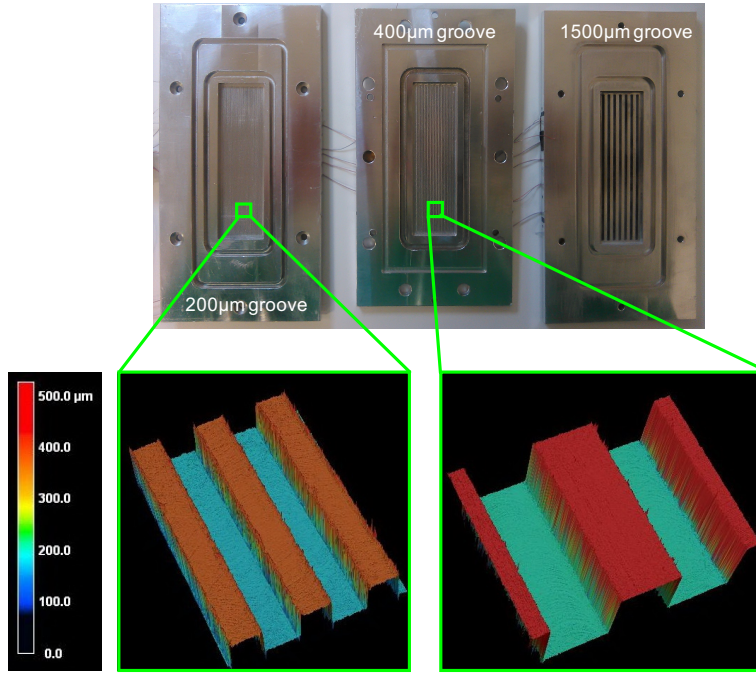
Daha sonra mikro-oluklar 3-eksenli minyatür işleme merkezinde (PROINO Z3X Micro Maker) $\pm 1\mu\text{m}$ hassasiyetle işlenmiştir (bakınız Şekil 24–(c)). Olukların üretimi 3 ana basamaktan oluşmaktadır. Öncelikle, dikdörtgen girintinin yüzeyine işleme yapılmıştır (1,2 mm kesici uç, 2,5 mm/min besleme hızı ve 25000 rpm dönüş hızı). Sonrasında olukların hassas işlenmesine geçilmiştir. Hassas işleme işleminde aşağıdaki üretim parametreleri kullanılmıştır:

- **G0-1:** 0,2 mm kesici uç, 1,0 mm/min besleme hızı ve 30.000 rpm dönüş hızı
- **G0-2:** 0,4 mm kesici uç, 1,0 mm/min besleme hızı ve 30.000 rpm dönüş hızı
- **G0-3:** 1,2 mm kesici uç, 2,5 mm/min besleme hızı ve 25.000 rpm dönüş hızı

En son basamakta, kalan çapakların temizlenmesi için cilalama amaçlı işleme yapılmıştır. Mekanik işlemeyi takiben numuneler ultrasonik havuza konuşmuştur. Numuneler son olarak izopropil alkol (IPA) ve devamında saf su ile yıkanmış ve basınçlı hava ile kurutulmuştur. Son olarak montaj öncesi T-tipi termokuplolar ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) metal tabanın alt yüzeyine tutturulmuştur. Termokupl, termo-elektrik ısıtıcı ve soğutucu pozisyonları Şekil 25-(a)'da gösterilmiştir. Üretilen metal tabanlar ve oluk geometrileri Şekil 25-(b)'de gösterilmiştir. Mikroskop görüntüleri Bilkent Üniversitesi Mikro Sistem Tasarım ve Üretim Merkezi bünyesindeki lazer mikroskobu (3D Laser Scanning Confocal Microscope, VK-X100, KEYENCE Corporation) ile alınmıştır. G0 düzeneğinde $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ boyutlarında termo-elektrik elemanlar (TEC1-03106T125) kullanılmıştır. Bu elemanlar ile metal taban arasındaki ısıl temas direncini azaltmak için termal macun kullanılmıştır. Alüminyumun su ile uyumu iyi olmadığı için (Supowit, 2016 ve Faghri, 2014) G0 deneylerinde (genel olarak



(a)



(b)

Şekil 25: **(a)** Termokupl, ısıtıcı ve soğutucu pozisyonları, **(b)** üretilen metal tabanlar (G0)

metal deneyleri için de geçerli) akışkan olarak IPA kullanılmıştır. IPA'in termo-fiziksel özellikleri Tablo 4'da verilmiştir.

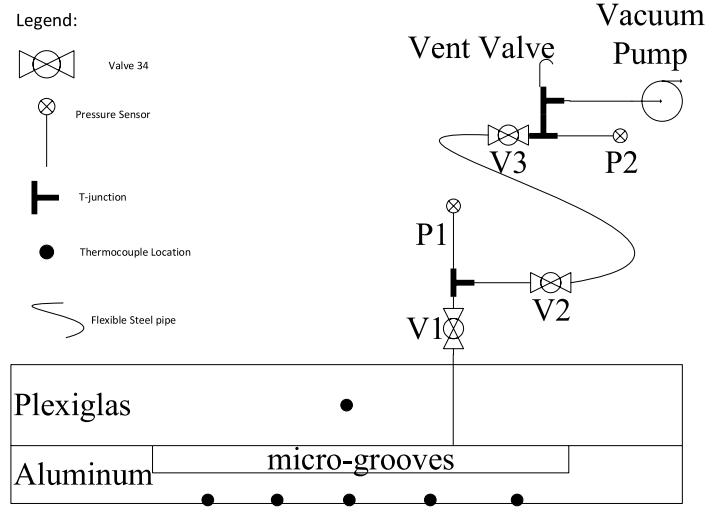
Isı borusunun doldurulması ve vakumlu ortamın sağlanması için yapılan ve 3.3 Ön Deneysel Çalışmalar bölümünde açıklanan çalışmaların yönlendirmesiyle yüksek vakum altında çalışma becerisi olan komponentlerden oluşan bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte Bilkent Üniversitesi Mikro-akışkanlar-dinamiği ve Çip-üstü-laboratuvar Araştırma Grubu bünyesinde mevcut olan yüksek kapasiteli bir vakum pompası kullanılarak 20mTor mertebesinde basınç ortamı sağlayabilen bir düzenek geliştirilmiştir. Kullanılan doldurma düzeneğinin temsili resmi Şekil 26'da verilmiştir. Ön deneysel çalışmalar sürecinde kullanılan mikro şırınga pompalarla sıvı yükleme yönteminden iki nedenle vazgeçilmiştir. İlk olarak bu yöntemle sıvı yüklemde kullanılan mikro boruların sisteme entegrasyonu ve sızdırmazlığının uzun süre sağlanmasındaki

Tablo 4: IPA'nın termo-fiziksel özellikleri (Haynes vd., 2014)

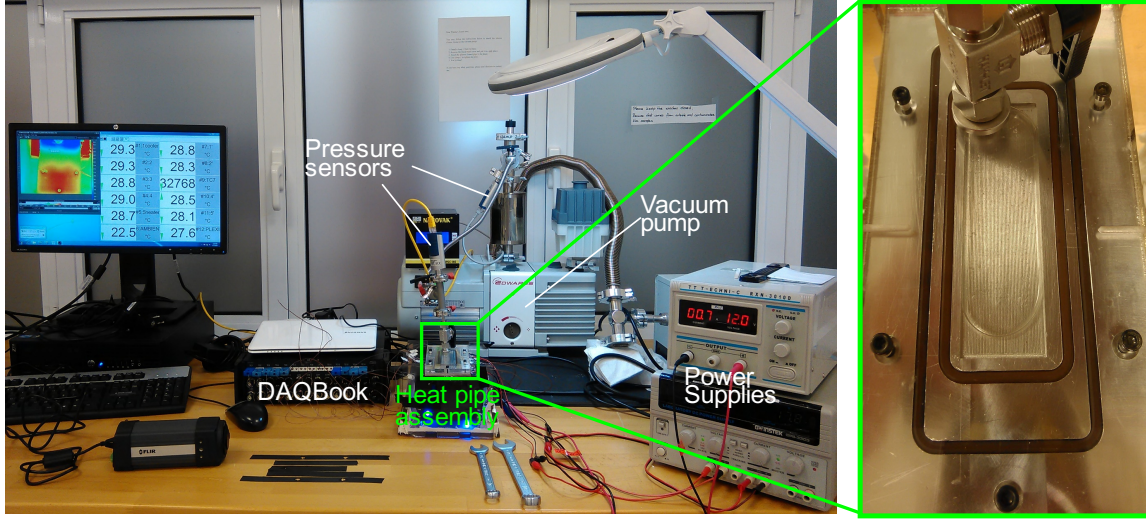
Property	Value	Units
Isıl iletkenlik (25°C)	0,135	W/m·K
Yüzey gerilimi (25°C)	20,93	mN/m
Viskozite (25°C)	2,038	mPa·s
Kaynama noktası	82,3	°C
Buharlaşma enerjisi	0,76	kJ/kg

zorlukların güvenilir deney yapmaya uygun olmadığına görüşüne varılmıştır. İkinci olarak Alüminyum malzeme ile uyumlu olarak çalışabilecek IPA ve amonyak gibi sıvıların mikro şırınga pompalar ve mikro borularla reaksiyona girerek hem komponentlere zarar vermesi hem de ısı borusunun içine istenmeyen reaksiyon ürünlerinin girmesine neden olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle sistemi sıvı ile doldurmak için farklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Isı borusu ilk olarak tüm hacmi kaplayacak şekilde çalışma sıvısı ile doldurulmaktadır. Ardından vakum pompası kullanılarak basınç düşürülmekte, bu da sıvının kaynamaya başlayarak buhar fazında ısı borusundan tahliye edilmesine olanak sağlamaktadır. Sıvı tahliyesi işlemi, değişik miktardaki doluluk oranlarında deneyler yapılabilmesi için aşama aşama gerçekleştirilmektedir. Her tahliyeden sonra borunun içinde kalan sıvı miktarı ısı borusunun sıvı ile dolu olan bölümü ölçülerek hesaplanmaktadır. Her tahliyeden ve sıvı miktarının ölçümünden sonra önceden saptanan ısı akıları verilerek deneye başlanmakta, bu sırada ısı borusunun üzerinde ve soğutma suyunda sıcaklık ölçümleri yapılmakta; kanalların içindeki ve üstündeki sıvının hareketi gözlemlenmekte, mikroskop altında sıvı-gaz arayüzü görüntülenmektedir. Sıcaklık ölçümlerinden sistemin sürekli rejime ulaştığı görülünce ısıtma bir sonraki ısı akısı değerine getirilerek deneyler yinelenmektedir. Yüksek ısı akılarında sistemde ölçülen sıcaklıklar ısı borusu için tehlikeli olan değerlere ulaşırsa deneyler durdurularak bir sonraki çalışma noktasında yeni veriler alınmaktadır. G0 deneyleri için kullanılan deney düzeneğinin resmi Şekil 27'da verilmiştir.

Şekil 28'da bir deney çalışması sırasında alınan zamana bağlı veriler gösterilmektedir. Burada T_1 , T_2 , T_3 , T_4 ve T_5 ölçülen sıcaklıkları göstermektedir. Deneyin başlangıcında ısı borusunun tüm hacimleri çalışma sıvısı ile doludur. Bu durumda sistem çalıştırılarak veri alınmış ve yaklaşık 50. dakikada sistem sürekli rejim-deyken ısı borusundan IPA çekilmiştir. Bu işlem 72., 95., 145. ve 159. dakikalarda da yinelenerek öngörülen tüm doldurma oranlarında deneyler tamamlanmıştır.



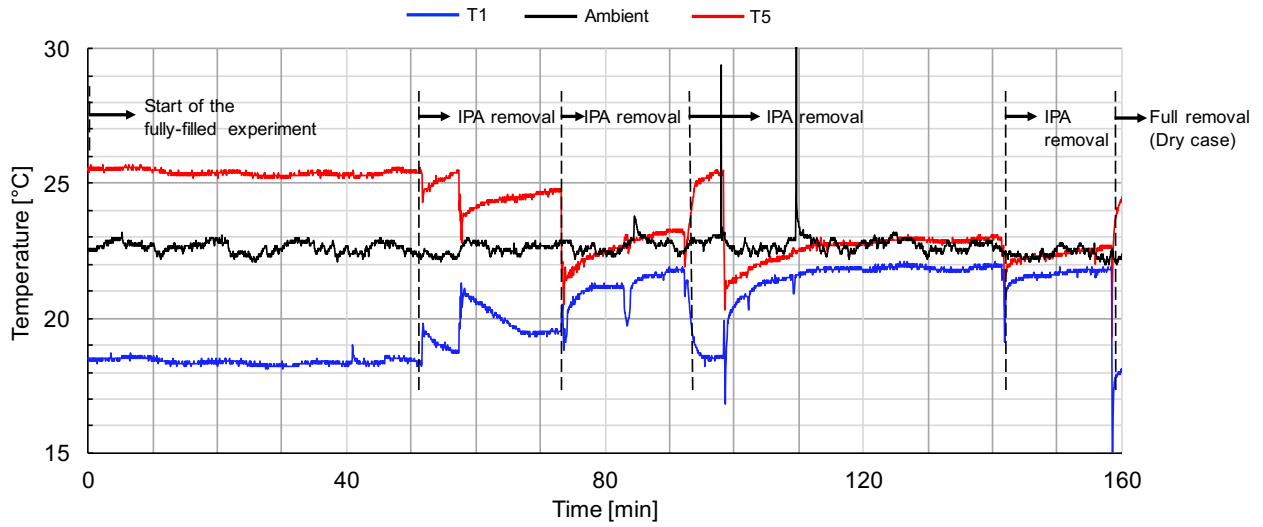
Şekil 26: Doldurma düzeneğinin temsili resmi



Şekil 27: G0 deneylerinde kullanılan deney düzeneği

3.4.2 İkinci Nesil (G1) Metal Isı Borusu

G1 ısı borusu düzeneği Şekil 29'de gösterilmiştir. G0'dan farklı olarak ısıtma için hassas bir şekilde kontrol edilebilen ısıtıcılar ve soğutma işlemi için de soğutma suyu kullanılmıştır. Ayrıca metal tabanın geometrisinde tasarım iyileştirmesi yapılmış ve sızdırmazlık elemanı olarak tek o-ring kullanılmıştır. Yine görüş alanını arttırmak için sıvı yükleme portu oluklarının üzerinden kenara taşınmıştır. Bu değişiklik deney esnasında mikroskop altında da rahat görüntü alınmasına imkan vermiştir. G1 düzeneği plexiglas üst kapak, tek o-ring, metal taban, bakır blok, su havuzu ve plexiglas taşıyıcıdan meydana gelmektedir. G1 deney-



Şekil 28: G0 deneylerinde zamana bağlı alınan bir deneysel veri

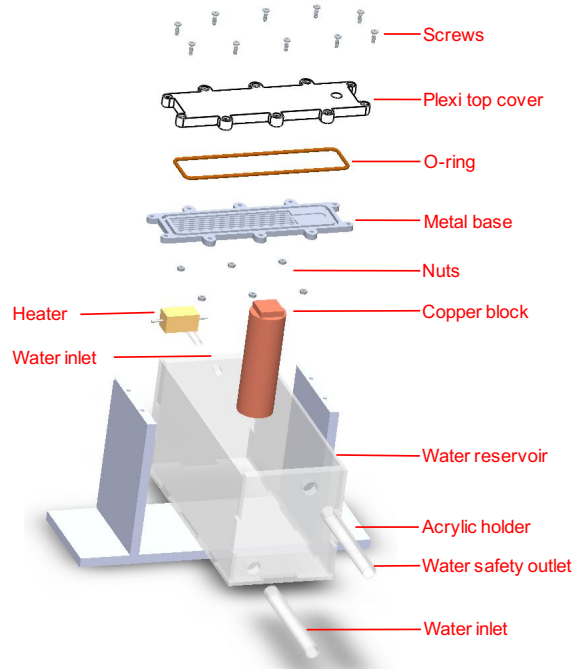
Tablo 5: G1 metal oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu

Numune	Oluk Sayısı	Oluk Genişliği [μm]	Oluklar Arası [μm]	Oluk Derinliği Mesafe [μm]	Oluk Yoğunluğu Oluk sayısı/mm
G1-M1	50	200	200	200	2,50
G1-M2	25	400	400	400	1,25
G1-M3	13	800	800	800	0,65
G1-M4	7	1600	1600	1600	0,33

leri için 4 farklı oluk ölçüsüne karar verilmiştir. Bu ölçüler Tablo 5'de verilmiştir. Metal tabanın üretimi yine o-ring kanalının ve yükleme portu altındaki girintinin üretimi ile başlamıştır (bakınız Şekil 30). Daha sonra metal parçanın tabanının ortasına, olukların üzerine işleneceği G0 düzeneğindeki ile aynı ölçüde dikdörtgen bir girinti açılmıştır. Daha sonra mikro-oluklar 3-eksenli minyatür işleme merkezinde hassas bir şekilde işlenmiştir. Hassas işleme işleminde aşağıdaki üretim parametreleri kullanılmıştır:

- **G1-M1:** 0,2 mm kesici uç, 1,0 mm/min besleme hızı ve 30.000 rpm dönüş hızı
- **G1-M2:** 0,4 mm kesici uç, 1,0 mm/min besleme hızı ve 30.000 rpm dönüş hızı
- **G1-M3:** 0,4 mm kesici uç, 1,0 mm/min besleme hızı ve 30.000 rpm dönüş hızı
- **G1-M4:** 1,2 mm kesici uç, 2,5 mm/min besleme hızı ve 25000 rpm dönüş hızı

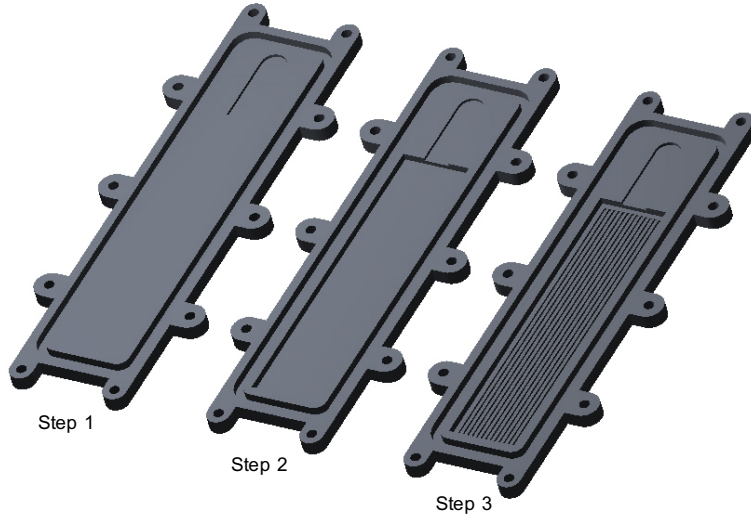
Olukların üretimi sonrası G0 numunelerin üretiminde izlenen basamaklar tekrarlanmıştır. Üretilen metal tabanlar, oluk geometrileri ve olukların mikroskop görüntüleri Şekil 31'de verilmiştir.



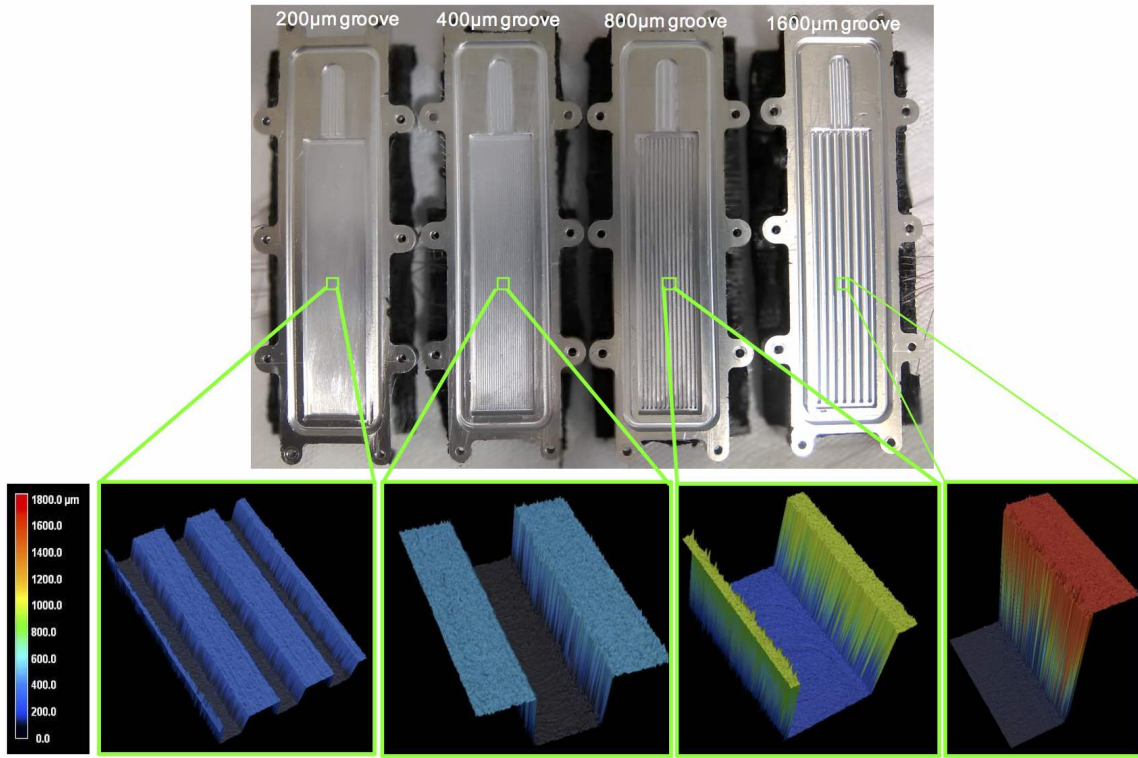
Şekil 29: G1 metal ısı borusu düzeneği

G1 numuneleri ile yapılan deneylerde kullanılan düzenek Şekil 32'de verilmiştir. Bu düzenede G0 deneylerinden farklı olarak ısı akısının hassas kontrolüne imkan veren mini-ısıtıcı elemanlar kullanılmıştır. Soğutucu olarak da su havuzunun içerisine yerleştirilmiş bakır bir silindir blok kullanılmıştır. Su havuzuna besleme yapılarak suyun sıcaklığının sabit kalması ve dolayısıyla bakır bloğun sıcaklığının olduğunca sabit tutulması mümkün olmuştur. Burada su sıcaklığını sabit tutulması için gerekli su debisi elle ayarlanmıştır. Isıtıcıya beslenen güç deneyler boyunca gözlemlenmiştir. G1 düzeneği ile farklı ısıtıcı güçlerinde deneyler yapılması mümkün olmuştur. Bu düzeneğin ısıl performansı COMSOL Multi-physics yazılımı üzerinde geliştirilen bir model ile kontrol edilmiştir.

Şekil 33'de G1 numuneleri ile yapılan deney sırasında zamana bağlı olarak alınan 315. ve 445. dakikalar arasındaki veriler gösterilmektedir. Burada T_1 , T_2 , T_3 , T_4 ve T_5 ölçülen sıcaklıkları göstermektedir. Deney verisi alınmaya başlandığında ısı borusunun tüm hacimleri çalışma sıvısı ile doludur. Isıtmanın başlaması ile sıcaklıklar artmakta ve 330. dakikada sistem sürekli rejime geldiğinde ısı akısı artırılarak bir sonraki çalışma noktasına geçilmektedir. Bu işlem 365. ve 405. dakikalarda yinelenerek öngörülen tüm ısı akılarında deneyler tamamlanmıştır. Bu deneyin ardından bir sonraki deney seti için sistemden sıvı çekilerek bir önceki sıra ile tüm ısı akılarında deneyler tekrarlanmıştır.



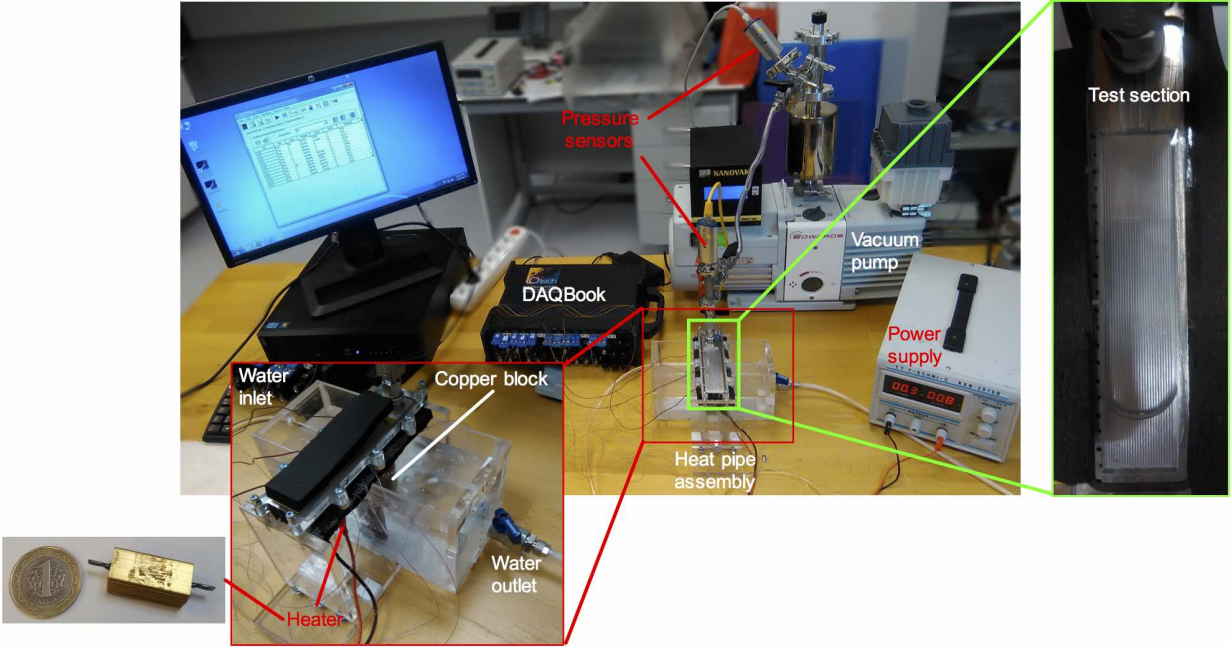
Şekil 30: Metal taban üretim basamakları (G1)



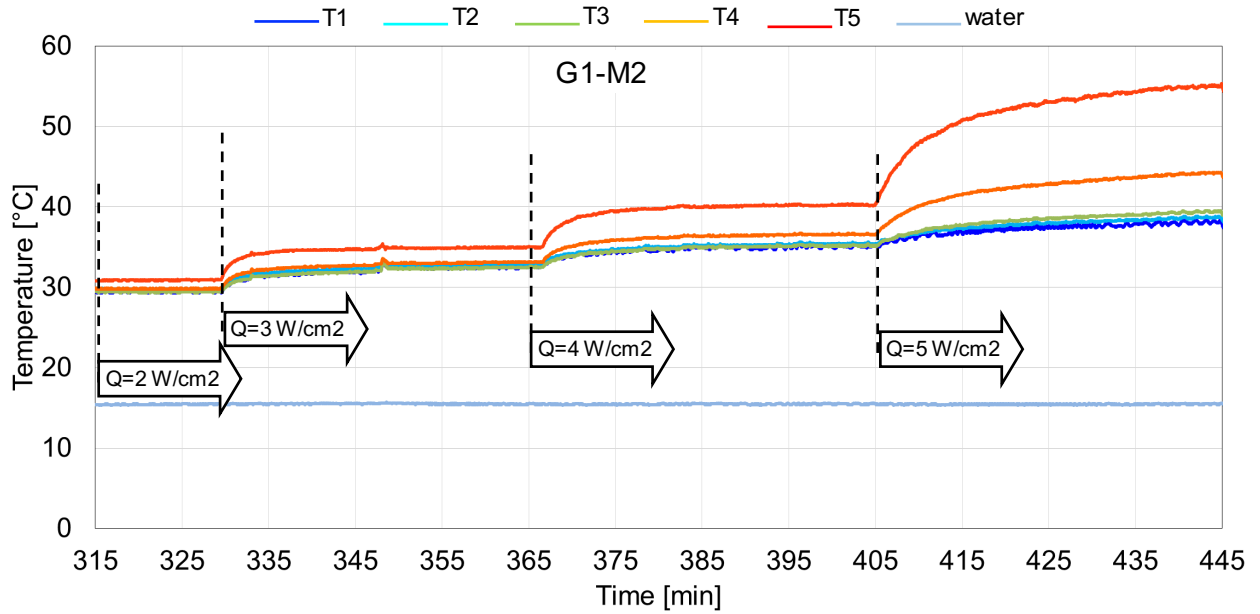
Şekil 31: Üretilen metal tabanlar (G1)

3.4.3 İkinci Nesil (G1) Silikon Isı Borusu

G1 silikon ısı borusu düzeneği Şekil 34'de gösterilmiştir. Metal düzeneğinden farklı olarak ısıtıcı olarak Si altlığın alt yüzeyinde büyütülmüş (sputter) krom elektrotlar kullanılmıştır. Soğutucu olarak da yine Si altlığın alt yüzeyine yerleştirilen PDMS soğutucu kanallar içerisinde akıtılan su kullanılmıştır. Mikro-oluklar

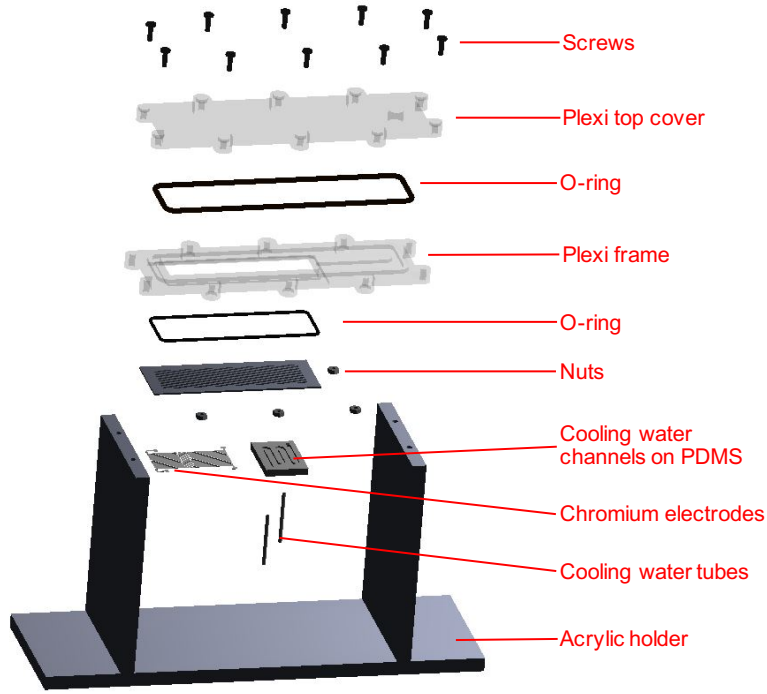


Şekil 32: G1 deneylerinde kullanılan deney düzeneği



Şekil 33: G1 deneylerinde zamana bağlı alınan bir deneysel veri

Si altlığın üst yüzeyine DRIE prosesi ile üretilmiştir. Üretilen Si parça pleksiglasdan üretilen çerçevenin içerisine oturtulmuştur ve üst yüzeyi yine pleksiglass üst kapak ile kapatılmıştır. G1 silikon düzeneği pleksiglas üst kapak, tek o-ring, pleksiglas çerçeve, krom elektrotlar ve soğutma kanallarından oluşmaktadır. İki farklı tip Si altlık üretilmiştir. Bu iki farklı numune için kullanılan ölçüler Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 34: G1 silikon ısı borusu düzeneği

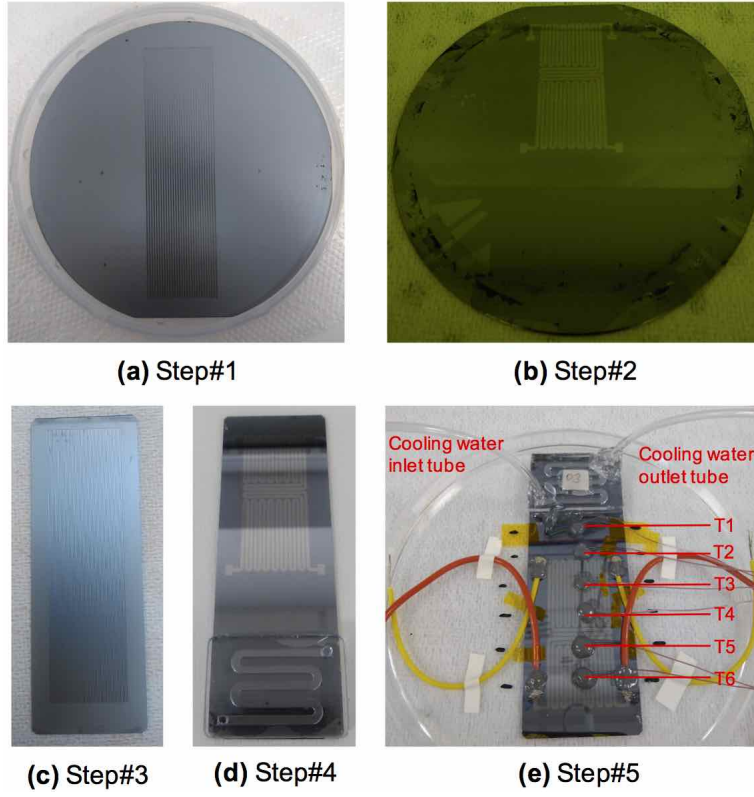
Tablo 6: G1 silikon oluk ölçüleri ve oluk yoğunluğu

Numune	Oluk Sayısı	Oluk Genişliği [μm]	Oluklar Arası [μm]	Oluk Derinliği Mesafe [μm]	Oluk Yoğunluğu Oluk sayısı/mm
G1-Si01	50	200	200	200	2.50
G1-Si02	25	400	400	400	1.25

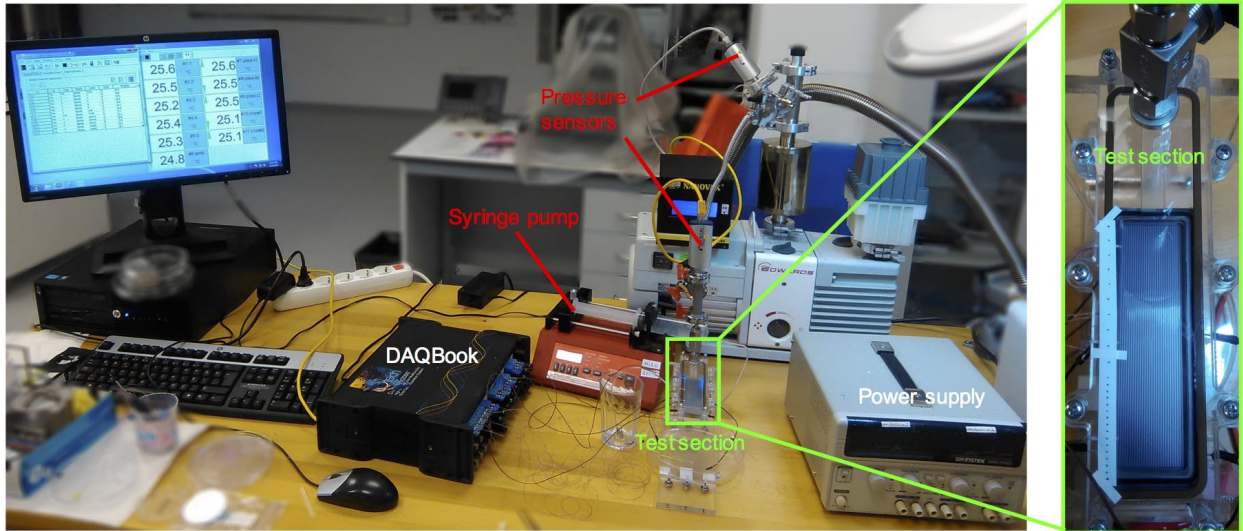
Mikro-oluklu Si ısı borusunun üretim basamakları şu şekilde özetlenebilir:

- **Step#1:** Mikro-oluk üretimi: Fotolitografi ve DRIE (bakınız Şekil 35–(a))
- **Step#2:** Elektrot üretimi: Fotolitografi ve krom büyütme (bakınız Şekil 35–(b))
- **Step#3:** Silikon altlığın istenilen ölçülerde kesilmesi (bakınız Şekil 35–(c))
- **Step#4:** Soğutma kanallarının plazma yapıştırma ile alt yüzeye tutturulması (bakınız Şekil 35–(d))
- **Step#5:** Soğutma suyu borularının, elektrot kablolarının ve termokuplların montajı (bakınız Şekil 35–(e))

G1 Si numunelerinin deneylerinde kullanılan düzenek Şekil 36’da gösterilmiştir. Bu düzende temel sistem güç ünitesi, veri toplama sistemi, G1 numunelerinde kullanılan düzenek ile aynıdır. Metal numune



Şekil 35: Üretilen silikon altlık



Şekil 36: G1 silikon deneylerinde kullanılan deney düzeneği

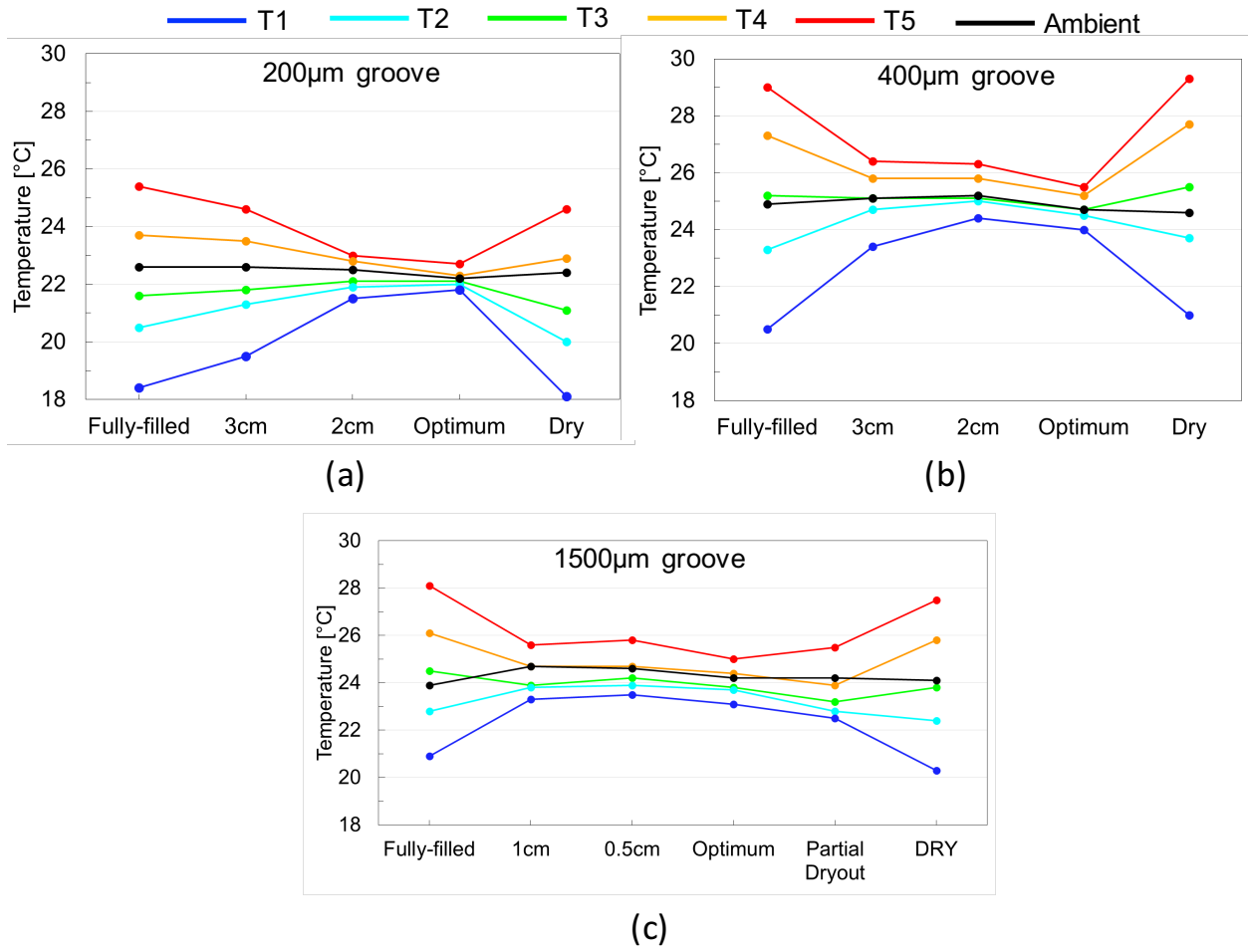
deney düzeneğinden farklı olarak soğutma suyunun dolaşmasını sağlayan bir şırınga pompası mevcuttur.

4 DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Metal (G0)

3 farklı oluk boyutlu ısı borusu için deneyler yapılmıştır: 200 μm (G0-1), 400 μm (G0-2) ve 1500 μm (G0-3). Deneyler tüm doluluk oranı spektrumunu tarayacak şekilde ısı borusunun içinin tamamen sıvı (ıslak durum) ile doldurulduğu durumdan içerisinde tamamen vakumlandığı duruma (kuru durum) kadar 5 farklı doluluk oranında yapılmıştır. Tüm sıcaklıklar sistem kararlı duruma geldiği zaman okunmuştur. Deneyler sonucunda ısı borularının farklı noktalarındaki sıcaklık değerleri ve ortam sıcaklığı Şekil 37'de gösterilmiştir. 5 değişik sıcaklık değeri ölçümlerinin yapıldığı noktalar Şekil 25-(a)'da belirtilmiştir. Her 3 numune için de ısıtıcı ve soğutucu bölge arasındaki sıcaklık farkı ıslak ve kuru durum için benzerlik göstermektedir. Bunun nedeni her iki durumda da ısı borusu içerisinde herhangi bir taşınım ve iki fazlı ısı transferi etkisi olmasından ve ısı transferinin ağırlıklı olarak ısı iletimi yoluyla yapılmasındandır. Islak durumda az da olsa bir taşınım etkisi olabileceği düşünülmektedir, ancak alüminyumun ısı iletim katsayısı göz önüne alındığında ısı transferinin büyük bir bölümünün alüminyum üzerinden ısı iletimi yoluyla aktığı değerlendirilmiştir. Islak deneyler sonrası sistemden yavaş yavaş IPA çekilmesi ile beraber ısı borusunun içerisinde faz değiştirme ve yavaş da olsa bir akışkan hareketinin başlaması ile beraber hem ısıtıcı ve soğutucu bölge arasındaki sıcaklık farkı hem de bu bölgelerin ortam sıcaklığı ile olan farkları azalmaya başlamaktadır. Bu eğilim içerisinde optimum miktarda IPA kalan çalışma noktasına kadar devam etmektedir. Sıcaklık farkı minimum bir değere ulaştıktan sonra çekilecek daha fazla miktardaki IPA içerisinde kısmi olarak da olsa kurumanın başlamasına neden olmaktadır. Kurumanın başlaması ile beraber ısı borusu, ısı borusu olma özelliğini kaybetmektedir. IPA çekilmesinin devam etmesi ile beraber sıcaklık farkı artmaya başlamaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere optimum çalışma noktası kuru duruma çok yakın bir yerde gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, G0-1 numunesi için ısıtıcı ve soğutucu bölge arasındaki sıcaklık farkının ıslak durum için $6,9^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ 'den kademeli olarak optimum nokta için $0,9^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ 'ye düştüğü ve daha sonra kuru durum için tekrar $6,5^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ dereceye yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlara bakarak, IPA'ın sistemden çekilmesi ile beraber sistemin bir ısı borusu gibi çalışmaya başladığı, daha sonra çok fazla IPA'ın çekilmesi ile ısı borusu gibi çalışmaya son verdiği ve kuru durumda ısı transferinin ısı iletimi yapıldığı görülmüştür. Benzer bir durum G0-1 ve G0-3 numuneleri için de sırasıyla ıslak durumda $8,5^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ ve $7,2^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ olan sıcaklık farkının kademeli olarak $1,5^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ ve $1,9^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ 'ye düştüğü ve sonra tekrar kuru durum için $8,3^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ ve $7,2^{\circ}\text{C} (\pm 0,2^{\circ}\text{C})$ 'ye yükseldiği görülmüştür.

Isıtıcı ve soğutucu bölge arasındaki sıcaklık farkının değeri aslında ısı borusunun ne kadar verimli (efektif) çalıştığı konusunda bir fikir vermektedir. Bu nedenle bu sıcaklık farkları Tablo 3'de 3 numune için de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak, farklı oluk boyutlarına sahip ısı borularının ısı performansını hakkında



Şekil 37: Metal ısı borularında maksimum sıcaklık değerleri

yorumlar yapmak mümkün olmaktadır. Buharlaşmanın büyük bir kısmı oluk içerisinde temas hattında (contact line) gerçekleşmektedir. Bu nedenle ısı borusu içerisindeki oluk sayısının veya bir başka deyişle oluk yoğunluğunun artırılması faz eğişimli ısı transferinin yüksek olmasına neden olmaktadır ve sıcaklık farkı G0-1 numunesi için en düşük değerde gözlemlenmektedir. Bu sonuç hem literatürde (Akkuş ve Dursunkaya, 2016) hem de proje kapsamında yapılan buharlaşma modellemesi çalışmalarında ön görülmektedir.

Deneysel sonuçlar hakkındaki diğer bir önemli nokta G0-1 ve G0-2 numuneleri için optimum noktadan sonra çok kısıtlı bir sıvı çekilmesi ile birlikte ısı borusunun doğrudan kuruma (dry-out) şartlarına girmesi, ancak G0-3 için optimum nokta sonrası kısmi kuruma çalışma şartları ısı borusunun çalıştıktan sonra daha fazla IPA çekilmesini takiben kuruma bölgesine girmesidir. Bunun nedeni, G0-3'ün görece büyük oluk mimaarisinden dolayı optimum çalışma noktasında bile içeride görece fazla miktarda akışkanın bulunması ve bu miktarın birkaç seferde çekilebilmesidir. Dolayısıyla oluk ölçüleri küçüldükçe içeriye yüklenmesi gereken sıvı miktarının hassas kontrolü çok daha önemli hale gelmektedir. Buradan da yola çıkarak ısı borusundan iyi bir

Tablo 7: G0 deneylerindeki numunelerin ısı performansları

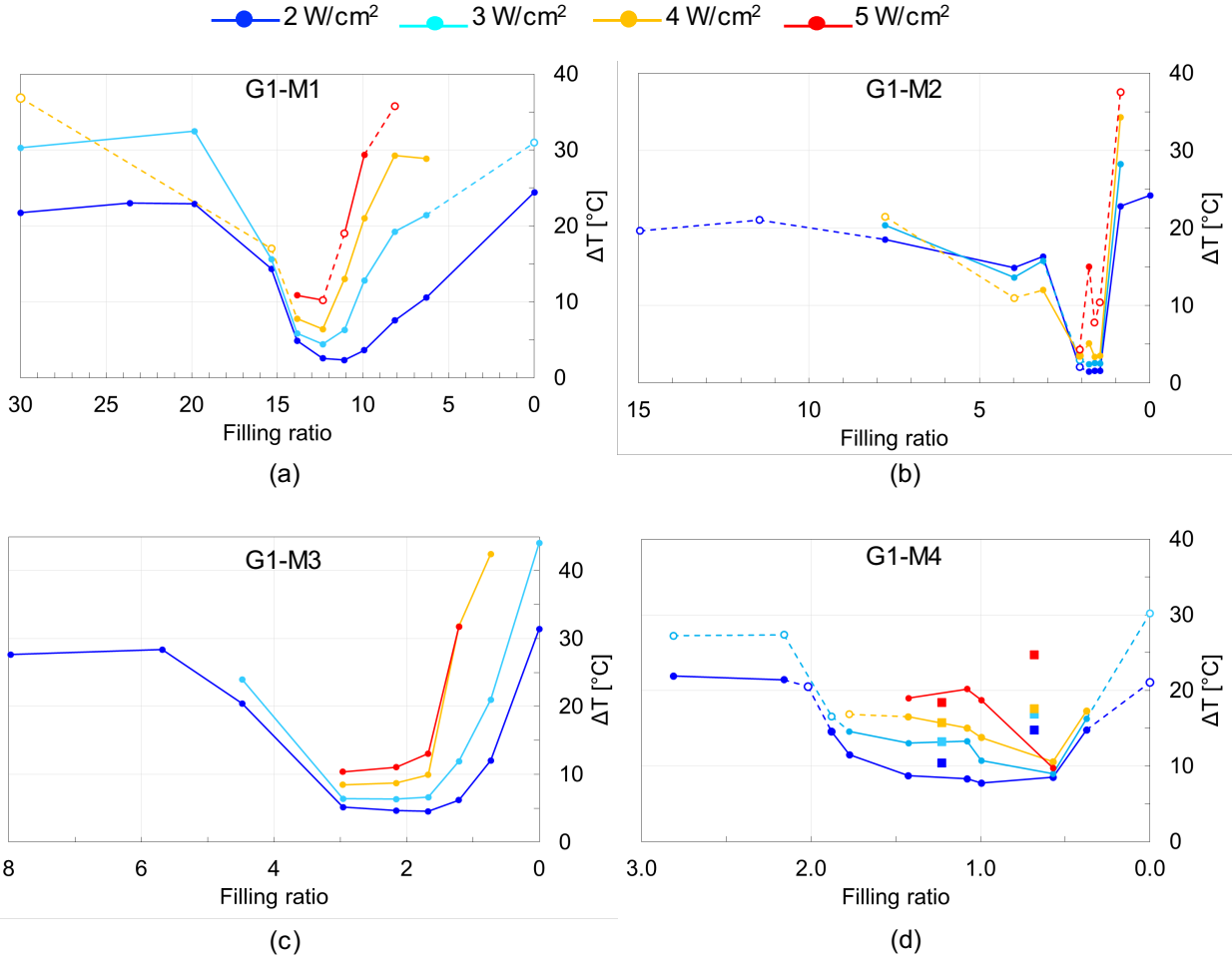
Numune	Minimum ΔT [$^{\circ}\text{C}$]
G0-1	0,9 ($\pm 0,2$)
G0-2	1,5 ($\pm 0,2$)
G0-3	1,9 ($\pm 0,2$)

ısı performans elde edilebilmesi için içerisindeki akışkan miktarının çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar bu ısı borusu teknolojisi literatüründe genel olarak bilinen ve sıklıkla dile getirilen bir nokta olmakla beraber sisteme yüklenmesi gereken sıvı miktarı hakkında niceliksel bir bilgiye çok fazla rastlanmamaktadır. Yapılan deneylerle hem bu nokta doğrulanmış hem de üretilmiş olan ısı borularının içerisine konulacak olan sıvı miktarı hakkında niceliksel bir sonuca varılmıştır. G0 deneylerinde doluluk oranını çok hassas ölçmemekle beraber, bunun devamında yapılan G1 deneyleri için doluluk oranını daha hassas bir şekilde ölçülecek bir deney düzeneği ve test protokolü bu basamakta geliştirilmiştir.

4.2 Metal (G1)

Ölçüm, doldurma ve vakum sistemlerini geliştirme amaçlı ilk prototip, G0, ısı borusu ile yürütülen başarılı deneylerden sonra performans ölçümleri için ilk nesil G1–Metal ısı borusu üretilmiştir. Bu ısı borusu ile yapılan deneylerde sisteme ısı kontrollü olarak verilmiş ve ölçülmüştür. Sisteme ısı izolasyon uygulanmış ve sistemden atılan ısı ölçülmemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ısı borusunun performansı verilen ısı akısı ve ısı borusundaki sıvının doluluk oranının fonksiyonu olarak ölçülen sıcaklıklarla değerlendirilmiştir.

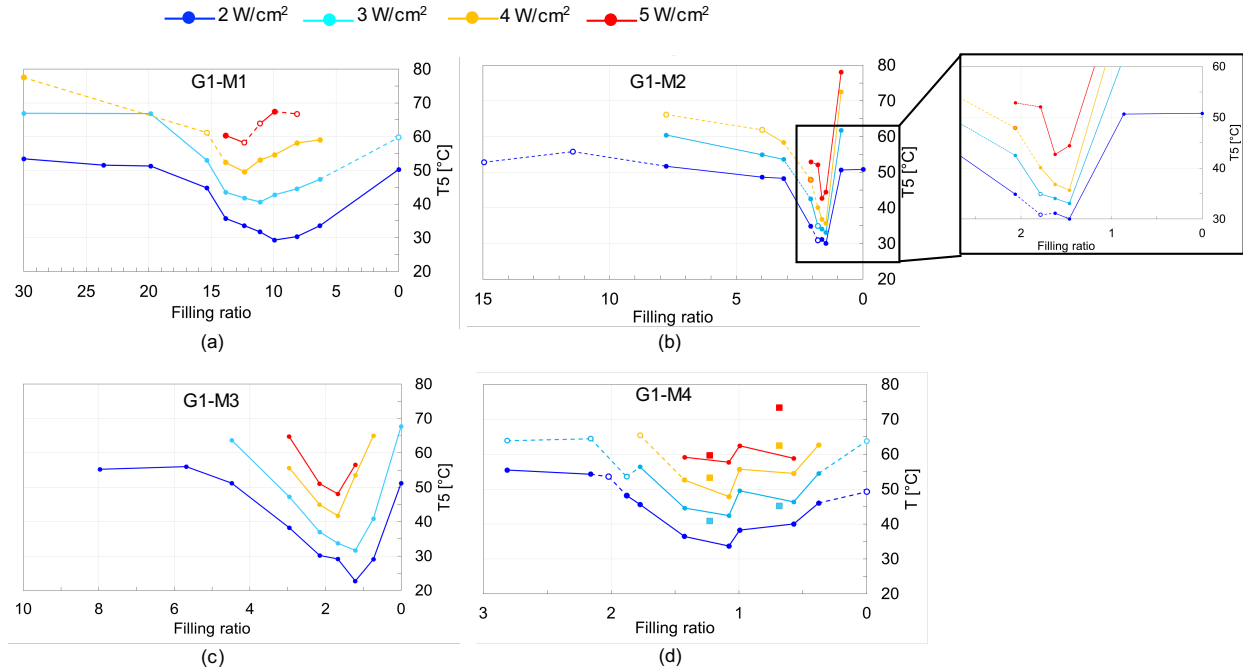
Deneyler Tablo 5’de verilen dört değişik oluk genişliği için gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sisteme dört değişik ısı akısı verilmiştir. Bunlar, 2, 3, 4, ve 5 W/cm² değerindedir. Herbir ısı borusu tüm hacmin çalışma sıvısı ile dolu olduğu durumdan, ısı borusunun tümüyle kuru olduğu ve yalnızca ısı iletimi ile çalıştığı noktaya kadar çalışma sıvısı eksiltilecek çalıştırılmışlardır. Sonuçlar ısı borusunun sıvı doluluk oranının fonksiyonu olarak verilmiştir. Sıvı doluluk oranı, ısı borusunun içindeki toplam sıvı hacminin, olukların toplam hacmine oranı olarak tanımlanmıştır. Değişik oluk kesit alanı olan ısı borularının toplam oluk hacmi farklı olduğundan, aynı doluluk oranları değişik oluk genişliği olan ısı boruları için farklı değerlerdedir. Isı borusunun performans göstergesi olarak iki değer kullanılmıştır. Bunlardan birincisi ısıtılan bölge ile soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkı, diğeri de ısı borusunda karşılaşılan en yüksek sıcaklığın değeridir. Anılan sıcaklıklar, faz değişiminin olmadığı ve ısının yalnız ısı iletimi ile transfer edildiği sistemlerde daha yüksek olmakta; faz değişimi ve ısı borusunun devreye girmesi ile bu değerler düşmektedir. Bu sıcaklık farklarının ve sıcaklık değerlerinin en aza indiği nokta, o durumdaki ısı akısı için sistemin “optimum” çalışma



Şekil 38: Metal ısı borularında ısıtma ve soğutma bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı: **(a)** 200 μm , **(b)** 400 μm , **(c)** 800 μm , **(d)** 1600 μm

noktası olarak değerlendirilmiştir.

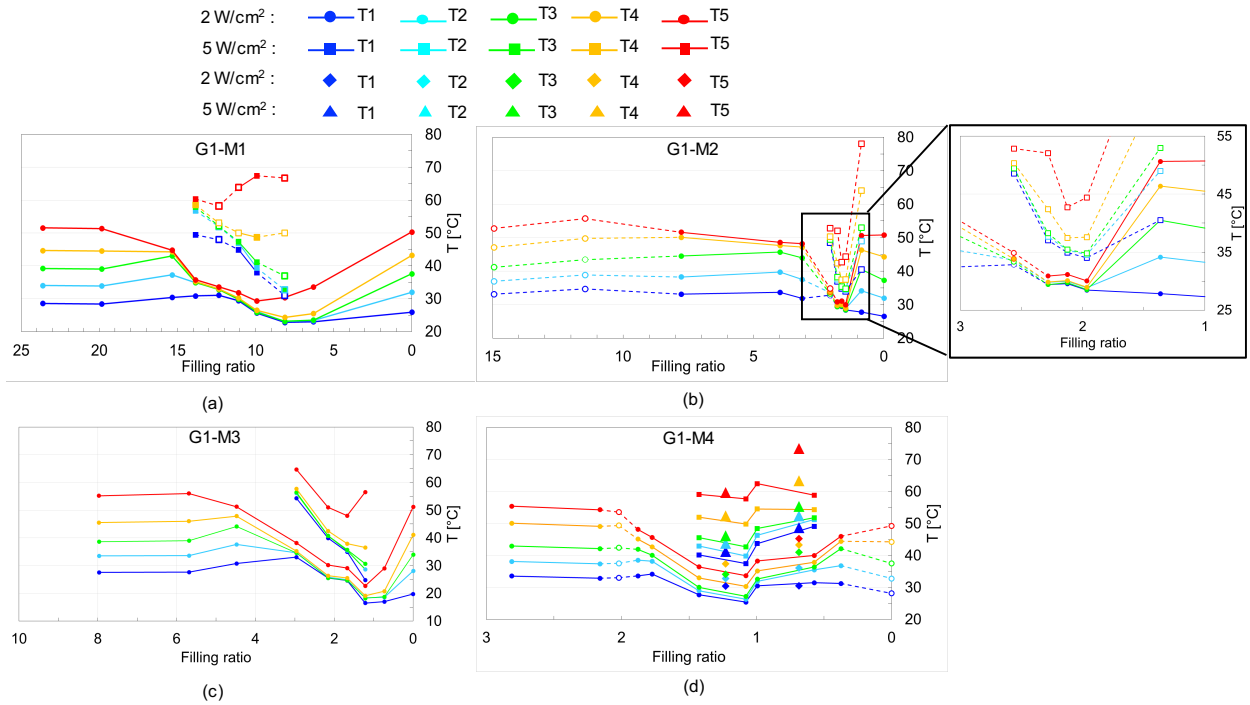
Şekil 38 sırasıyla 200, 400, 800 ve 1600 μm oluk genişliğindeki ısı borularının ısıtma ve soğutma bölgesi arasında ölçülen sıcaklık farklarını, değişik ısı akılarında doluluk oranının fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu içi boş olarak verilen verilerde sıcaklıkların artışı sürdüğünden ve sürekli rejime ulaşmadan sıcaklıkların sisteme zarar verecek yüksekliklere geleceği görüldüğünden deneyler durdurulmuştur. Kesik çizgilerle gösterilen veriler iki farklı durumu göstermektedir. İlk olarak sürekli rejime ulaşmadan durdurulan deney noktalarını birleştirmede kesik çizgiler kullanılmıştır. İkinci olarak deneyler durdurulup yeniden başlatıldığında, bazı deneylerde üst kapak görevi gören pleksiglasın üzerinde çalışma sıvısının yoğunlaştığı ve etkin olarak kanallarda daha sıvının bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda verilen doluluk oranları gerçekte kanal içindeki sıvının miktarını göstermemektedir. Bu nedenle bu noktalar kesik çizgilerle birleştirilmiştir. Şekil 39 ise sırasıyla 200, 400, 800 ve 1600 μm oluk genişliğindeki ısı borularında ölçülen en yüksek



Şekil 39: Metal ısı borularında maksimum sıcaklık değerleri: (a) 200 μm , (b) 400 μm , (c) 800 μm , (d) 1600 μm

sıcaklıkları, değişik ısı akılarında doluluk oranının fonksiyonu olarak göstermektedir.

Şekil 38–(a) incelendiğinde doluluk oranının en yüksek olduğu noktada 2 W/cm² akısı için sıcaklık farkının 20°C dolaylarında olduğu, doluluk oranının azalmasıyla bu sıcaklık farkının azalarak doluluk oranının 11 olduğu noktada en düşük değeri olan 2,3°C değerine kadar indiği görülmektedir. Doluluk oranının daha da azaltılması bu en düşük sıcaklık değerinin artmasına ve sistemin kuru çalıştığı (doluluk oranının sıfır olduğu) noktada 25°C değerine ulaşmasına neden olmaktadır. Isı akısının artırılması ile sıcaklık farkları da artmakta ve tam doluluk oranının düşük olduğu kısmi ya da tam kuru çalışma koşullarının olduğu durumlarda sıcaklıklar yükselerek sürekli rejime ulaşılmadan deneyin durdurulmasını gerektirmektedir. Daha yüksek ısı akılarında da doluluk oranının yaklaşık 12–13 arasında olduğu değerlerde minimum sıcaklık farklarına ulaşılmaktadır. Bu doluluk oranı, ısı borusunun aynı ısı akısını en az sıcaklık farkıyla ilettiği değer olduğu için 200 μm oluklu ısı borusunun optimum çalışma değeri olarak değerlendirilmiştir. Isı borusunun etkinliğinin bir başka göstergesi de verilen ısı akısında ulaştığı en yüksek sıcaklık değeridir. Bu değer ne denli düşükse ısı borusunun o denli etkin olduğu değerlendirilebilir. Şekil 39–(a)'da ısı borusunda ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri verilmiştir. Bir önceki şekilde olduğu gibi doluluk oranı yüksek ya da tam kuru çalışma şartlarında 2 W/cm² ısı akısı için en yüksek sıcaklıkların 50°C dolaylarında olduğu, faz değişimi mekanizmasının etkin olduğu düşük doluluk oranlarında ise en yüksek sıcaklığın 30°C dolaylarına düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum doluluk oranının 10 dolaylarında olduğu noktada gözlemlenmiştir.

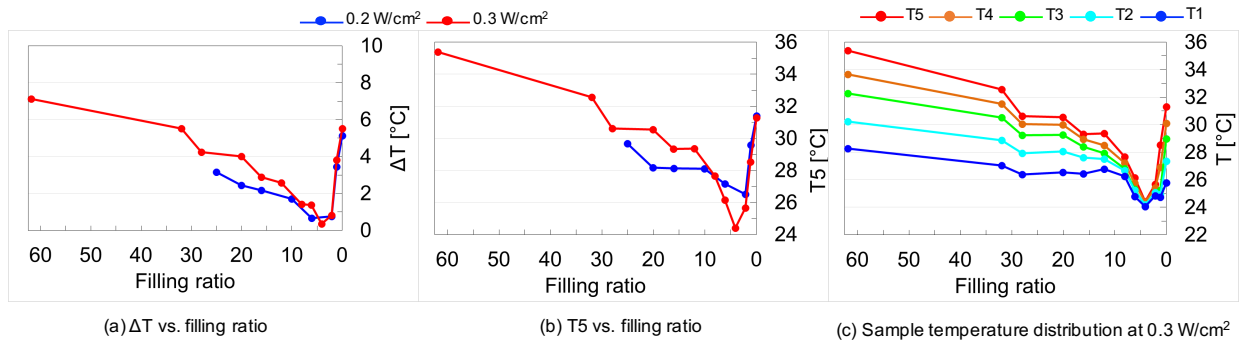


Şekil 40: Metal ısı borularındaki sıcaklık dağılımı: (a) 200 μm , (b) 400 μm , (c) 800 μm , (d) 1600 μm

Isı akısının arttığı durumlarda en yüksek sıcaklığın en düşük değeri de yükselmekte ve 60°C değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu ısı akısında tam kuru ya da yüksek doluluk oranlarında sıcaklıklar sürekli rejime ulaşılmadan sisteme zarar verecek derecelere yükseldiğinden deneyler durdurulmuştur. Şekil 38–(b) ve Şekil 39–(b) yukarıda açıklanan deneylerin $400\mu\text{m}$ oluk genişliği olan ısı borusunda yapılanlarını vermektedir. Bu boruda en düşük sıcaklık farkları ve en düşük maksimum sıcaklıklar doluluk oranının 1,5–2,0 olduğu değerler arasında rastlanmaktadır. $400\mu\text{m}$ oluk genişliği olan ısı borusunun kesit alanının $200\mu\text{m}$ oluk genişliği olan ısı borusunun dört katı olduğu düşünülürse optimum çalışma noktasındaki sıvı miktarlarının yakın olduğu görülmektedir. Aynı deneyler oluk genişliği $800\mu\text{m}$ ve $1600\mu\text{m}$ olan ısı boruları için de tekrarlanmış ve sonuçlar Şekil 38–(c) ve (d) ile Şekil 39–(c) ve (d)'de verilmiştir. Bu boruların performansının da yukarıda ayrıntılı açıklanan oluk genişliği $200\mu\text{m}$ olan boru gibi olduğu görülmektedir. Tablo 8'de sistem performansının bir göstergesi olarak değerlendirilen ısıtıcı ve soğutucu bölgeler arasındaki minimum sıcaklık farkları verilmiştir. Bu sonuçlar incelediğinde sürekli rejimde veri almakta zorlanılan $5\text{W}/\text{cm}^2$ ısı akısı değeri dışında, G0 deneylerinde gözlemlendiği gibi artan ısı akısı ile sıcaklık farkının arttığı, daralan oluk genişliği ile de sıcaklık farkının azaldığı görülmüştür. Ancak $200\mu\text{m}$ oluklu ısı borusu için değerlerin bu yönde olmadığı görülmektedir. Deneysel sonuçların ayrıntıları irdelendiğinde $200\mu\text{m}$ oluklu ısı borusu ile yapılan deneylerde pleksiglas üst kapakta çalışma sıvısının damlacık şeklinde biriktiği ve bu nedenle ölçülen doluluk oranından farklı çalıştığı değerlendirilmiştir. Bu deneylerin daha dikkatli bir şekilde tekrar-

Tablo 8: G1 metal deneylerindeki numunelerin en yüksek akısı değerindeki ısı performansları

Numune	Minimum ΔT [$^{\circ}\text{C}$]			
	2 W/cm ²	3 W/cm ²	4 W/cm ²	5 W/cm ²
G1-M1	2,3 ($\pm 0,2$)	4,4 ($\pm 0,2$)	6,4 ($\pm 0,2$)	10,2 ($\pm 0,2$)
G1-M2	1,5 ($\pm 0,2$)	2,4 ($\pm 0,2$)	3,4 ($\pm 0,2$)	4,3 ($\pm 0,2$)
G1-M3	4,6 ($\pm 0,2$)	6,4 ($\pm 0,2$)	8,5 ($\pm 0,2$)	10,4 ($\pm 0,2$)
G1-M4	7,8 ($\pm 0,2$)	9,0 ($\pm 0,2$)	10,6 ($\pm 0,2$)	9,8 ($\pm 0,2$)



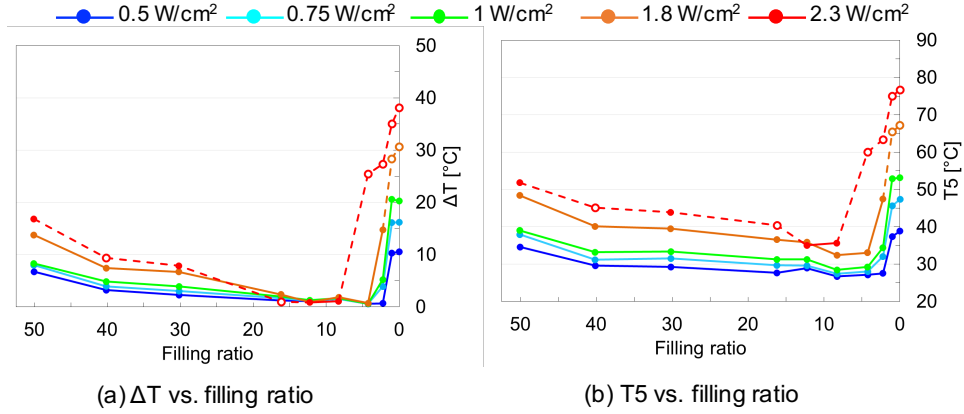
Şekil 41: IPA kullanılan 400 μm oluklu silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri ve (c) sıcaklık dağılımları

lanması planlanmaktadır.

4.3 Silikon (G1)

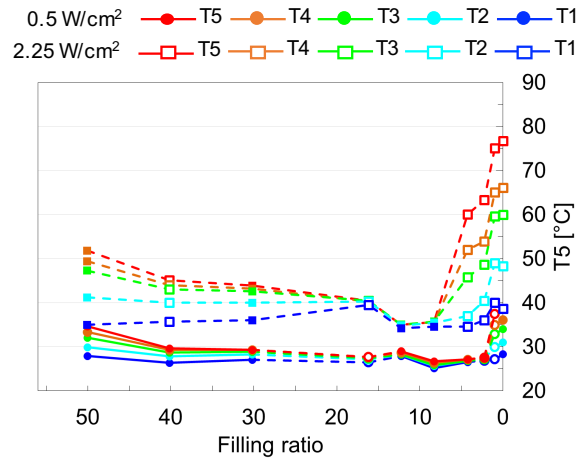
Metal ısı borularında edinilen deneyim ve gözlemler sonucunda silikon ısı borusu deney düzeneği geliştirilmiştir. Şekil 36'de verilen düzenele ısı borularının performansının değerlendirilmesinde önemli olan ve metal ısı borularında denenmemiş olan tasarım parametrelerinin de etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda IPA'den başka ikinci bir çalışma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Ayrıca ısı borusuna entegre olarak üretilmiş olan iki ısıtıcıdan birinin kullanılmadığı deneyler de yapılmıştır. Bu deneyler üç amaçla gerçekleştirilmiştir: (i) ısıtılan ve soğutulan bölgeler arasında bir adiabatik bölge oluşturarak bunun performansa olan etkisini görmek, (ii) tek ısıtıcıya daha yüksek ısı akısı vererek, çalışılabilir maksimum sıcaklığı aşmadan daha yüksek ısı akısı değerleri ile ısı borusunu denemek ve (iii) proje önerisinde öngörülen gerçek devre mimarisini benzetimleyen bir örnek yaratmaktır.

Deneylerde oluk ve kanatçık genişliği 400 μm olan ısı borusu kullanılmıştır. Şekil 41'de çalışma sıvısı olarak IPA'ün kullanıldığı deneylerde ölçülen sıcaklıklar verilmiştir. Metal ısı borusundan farklı olarak silikon



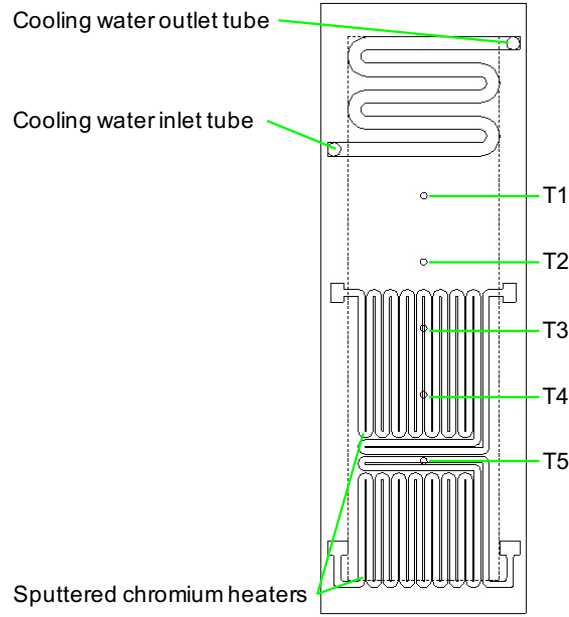
Şekil 42: Çift ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri

ısı borusu deneylerinde ısı borusunu boşluklarını tam olarak doldurmak mümkün olmamıştır. Bunun nedeni yaklaşık $500\mu\text{m}$ kalınlığındaki silikon tabanın vakumlanması ve hermetik olarak kapatılabilmesi için metal ısı borusundan farklı bir yöntem kullanma zorunludur. Ancak Şekil 41’de görüleceği gibi yapılan deneylerde ısı borusu doldurma oranlarını 60’ın üzerinde gerçekleştirmek mümkün olmuştur.



Şekil 43: Çift ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları

Şekil 41–(a) iki değişik ısı akısı, $0,21\text{ W/cm}^2$ ve $0,30\text{ W/cm}^2$ için ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farklarını göstermektedir. Daha düşük ısı akısında sıcaklık farklarının, beklendiği gibi, daha düşük olduğu görülmektedir. Daha düşük ısı akısında da en düşük sıcaklık farkı doldurma oranının yaklaşık 5 olduğu çalışma koşulunda gerçekleşmektedir. Aynı deneylerde kaydedilen en yüksek sıcaklıklar da Şekil 41–(b) numaralı şekilde verilmiştir. Bu sonuçlarda ısı akısının $0,30\text{ W/cm}^2$ olduğu durum için ölçülen en yüksek sıcaklığın, ısı akısının $0,21\text{ W/cm}^2$ olan durumdan daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum beklentilere uygun değildir. Bunun iki nedeni olduğu düşünülmektedir: (i) yüksek akısında doldurma oranının 5’e

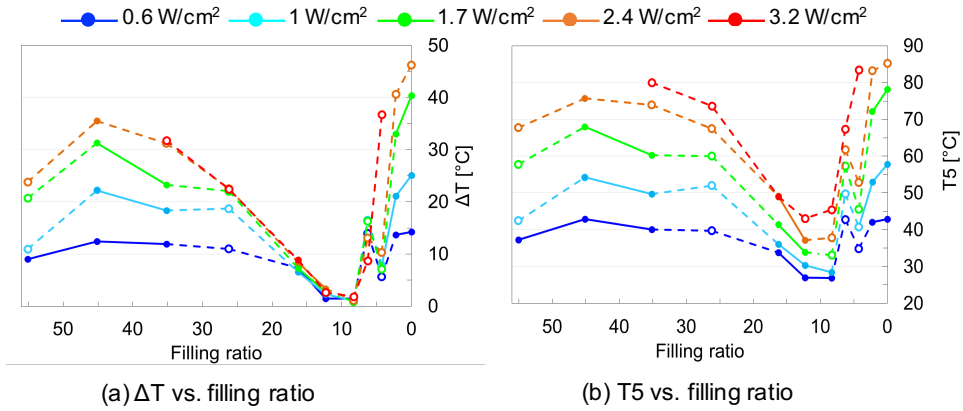


Şekil 44: Silikon ısı borusunun ısıtma ve soğutma bölgelerinin çizimi

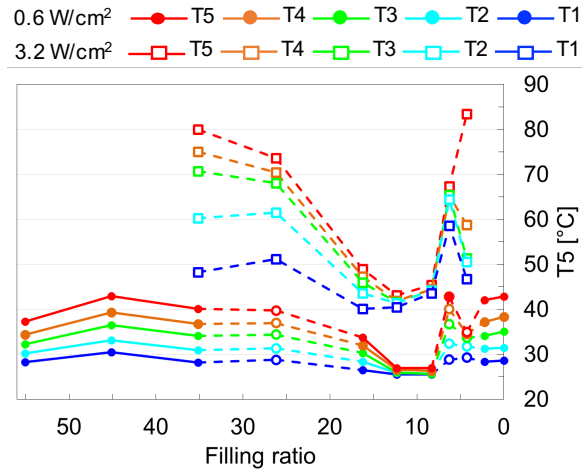
eşit olduğu noktada ilave bir ölçüm alınmıştır, buna karşılık gelen değer düşük akısı için mevcut değildir, (ii) deney verilerinin ayrıntıları incelendiğinde her iki ısı akısı için soğutma suyu debisinin sabit tutulamadığı görülmüştür. Şekil 41–(c)’de ısı akısının $0,3 \text{ W/cm}^2$ olduğu durumda ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımları verilmiştir. Doldurma oranlarının düşmesi ile faz değişimi ısı transferini etkisi görülmekte ve doldurma oranı 15’in altına düştüğünde sıcaklıklar hızla düşmektedir. Sonuçlar, doldurma oranı yaklaşık 5 iken sıcaklıkların en düşük düzeye indiğini göstermektedir. Daha fazla sıvı eksiltilmesi ile sıcaklıklar yükselmekte ve kuru çalışma şartlarında en yüksek sıcaklık 32°C ’ye yaklaşmaktadır.

Şekil 42’de çalışma sıvısı olarak su kullanılan ve çift ısıtıcılı ısı borusundaki sıcaklıklar verilmiştir. Bu deneylerdeki ısı akıları $0,5 \text{ W/cm}^2$ ile $2,25 \text{ W/cm}^2$ arasında değişmektedir. Isı akısının artması ile sıcaklıkların ve sıcaklık farklarının arttığı gözlemlenmektedir. Isıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farklarının en düşük değerinin (optimum çalışma noktası) 1°C ’nin altında olduğu ve bu değerlerin doldurma oranlarının 1,0 ile 15 arasındaki değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir. Literatürde özellikle doldurma oranı 1,0’ın üstünde olan deneysel veriler görülmemektedir ve optimum çalışma değerlerinde yüksek sıcaklıklara rastlanmaktadır. Proje kapsamında yapılan deneyler ile optimum çalışma noktasının doldurma oranı 1,0’ın üzerinde olduğu durumlarda elde edildiği ilk defa gösterilmiştir. Benzer şekilde sistemde rastlanan en yüksek sıcaklık değerleri de artan ısı akısı ile yükselmektedir.

Şekil 43’de çift ısıtıcılı ısı borusunun en yüksek ve en düşük ısı akılarında kaydedilen sıcaklık dağılımları verilmektedir. Görüleceği gibi $2,25 \text{ W/cm}^2$ olan ısı akısında kuru çalışma şartlarındaki sıcaklıklar 80°C ’ye yaklaşırken en düşük ısı akısında bu değer 40°C ’nin altında kalmaktadır. Optimum çalışma noktası olarak



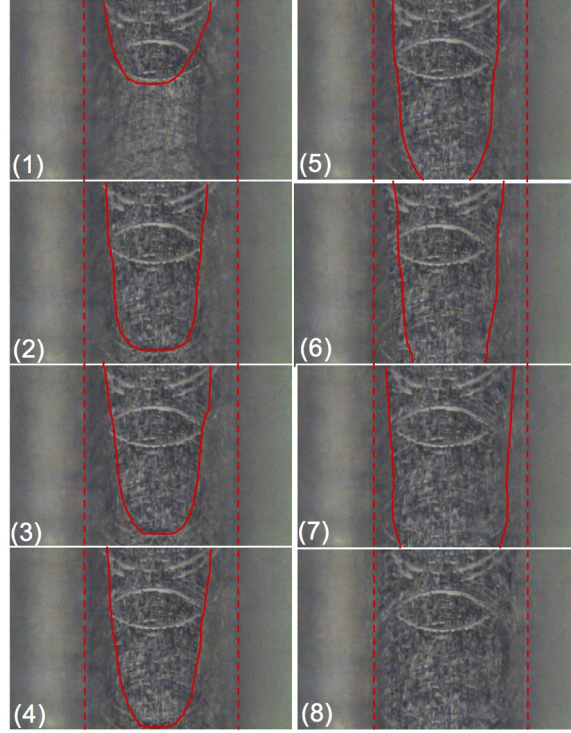
Şekil 45: Tek ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki (a) ısıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farkları ve (b) maksimum sıcaklık değerleri



Şekil 46: Tek ısıtıcı ve su kullanılan silikon ısı borusundaki sıcaklık dağılımları

değerlendirilen doldurma oranının yaklaşık 8,0 olduğu noktada ise sistemdeki en yüksek sıcaklık, en düşük ısı akısı için 25°C en yüksek ısı akısı için 35°C dolaylarındadır.

Silikon ısı borusunun ısıtma ve soğutma bölgelerini gösteren Şekil 44'de görüleceği gibi birbirinden bağımsız iki tane ısıtıcı vardır. Bu deneyler sırasında bu ısıtıcılardan ikincisi (soğutma kanallarına yakın olan) çalıştırılmamış, buna karşılık çalıştırılan ısıtıcı daha yüksek ısı akısı üretmiştir. Bu şekilde lokal ısı üreten ve ısı akısının daha yüksek olduğu bir elektronik devre elemanı benzetimlenmiştir. Şekil 45'de tek ısıtıcı ısı borusundaki sıcaklıklar verilmiştir. Bu deneylerdeki ısı akıları 0,6 W/cm² ile 3,2 W/cm² arasında değişmektedir. Bu ısı borusunda da ısı akısının artması ile sıcaklıkların ve sıcaklık farklarının arttığı gözlemlenmektedir. Isıtılan ve soğutulan bölge arasındaki sıcaklık farklarının en düşük değerinin (optimum çalışma noktası) 2°C'nin altında olduğu ve bu değerlerin doldurma oranlarının 8,0 ile 15 arasındaki değerlerinde gerçekleştiği görülmektedir. Sistemde rastlanan en yüksek sıcaklık değerleri de artan ısı akısı ile yüksel-



Şekil 47: Isı borusu çalışırken alınan mikroskop görüntüleri

mektedir. Şekil 46'de tek ısıtıcı ısı borusunun en yüksek ve en düşük ısı akılarında kaydedilen sıcaklık dağılımları verilmektedir. Görüleceği gibi $3,2 \text{ W/cm}^2$ olan ısı akısında kuru çalışma şartlarındaki sistemin çok yüksek sıcaklara erişmesi sebebiyle sistemi korumak amacıyla veri alınmamıştır. Kuru çalışma duruma en yakın olarak yaklaşık doldurma oranının 5,0 olduğu durumda veri alınabilmiş ve $50 - 80^\circ\text{C}$ arasında sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Bu deneylerin de dikkatli bir şekilde tekrarlanması planlanmaktadır.

5 SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Proje kapsamında düz oluklu ısı borularının ısı performansını değerlendirmek için prototip ısı boruları üretilmiştir. Bunun için analitik modelleme, deney düzeneği tasarım için sayısal modelleme, üretim reçetesi geliştirme, deney düzeneği tasarlama, prototip geliştirme ve üretme, deney protokollerinin oluşturulması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında yapılan deneylerde birçok farklı zorluklar ile karşılaşmıştır. Bu zorluklar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

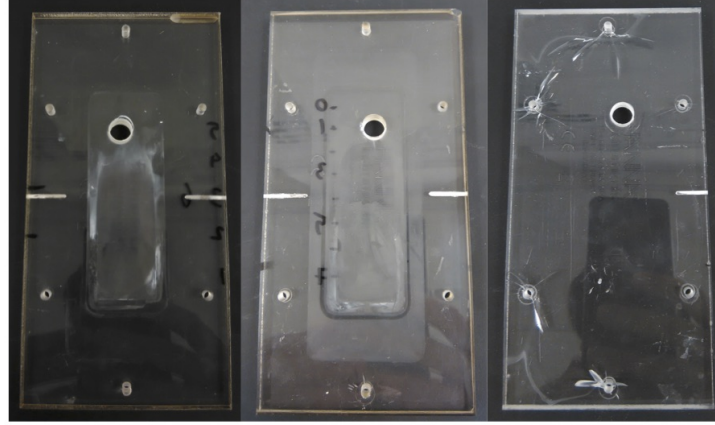
- Öncelikle ısı borusunun doldurması basamağında birçok farklı senaryo denenmiş ve yapılacak deneylere en uygun protokole karar verilmiştir. Ayrıca proje kapsamında oluklar içerisindeki kurumanın görülmesi amacıyla alınan mikroskop ile ilk denemeler yapılmıştır. Özellikle $800 \mu\text{m}$ 'lik oluklarda ku-

ruma esnasındaki ara-yüzeyin hareketi çok güzel bir şekilde görüntülenebilmiştir. Ara-yüzey hareketini gösteren örnek bir mikroskop görüntüsü Şekil 47'de verilmiştir. Ancak yapılan deneylerde çok fazla donanım kullanılması ve soğutma suyunun sistemde döndürülmesi nedeniyle mikroskop altında deneylerin yapılması büyük bir zorluk teşkil ettiği için sistem mikroskop altından çıkarılarak deney düzeneği mikroskoptan bağımsız yapılmıştır. Kurumanın başlamasının yerleştirilen termokupplardan alınan sıcaklık değerleri ile tespit edileceği anlaşılmıştır.

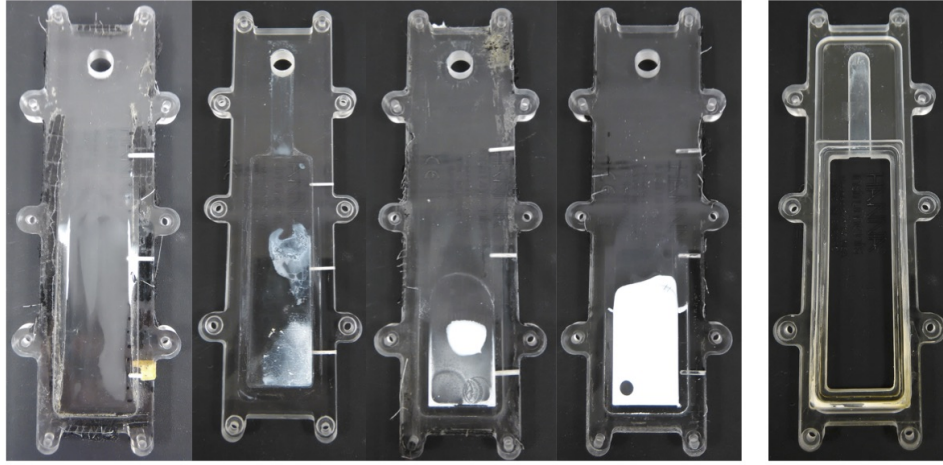
- Deneyler esnasında görsel olarak ısı borusunun içinin incelenebilmesine olanak verecek şekilde ısı borusunun üst kapağı pleksiglastan yapılmıştır. Ancak metal deneylerinde IPA kullanılmasından ötürü ve deneyler esnasında oluşan ısıl yorgunluk yüzünden birçok kez üst kapak üzerinde hasar oluşmuş ve kapağın değiştirilmesi gerekliliği doğmuştur. G1 silikon deneylerinde ise G1 metal deneylerine benzer sıcaklıklara ulaşılmasına rağmen 80°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üst kapağın renk değiştirdiği gözlemlenmiş ve o durumda deney sonlandırılmış ve yeni üst kapak ile deneylere devam edilmiştir. Deneyler sırasında görülen pleksiglas hasarlarının bir kısmı Şekil 48'da gösterilmiştir.

Proje hakkındaki değerlendirmeler ve kazanımlar da şu şekilde özetlenebilir:

- Mikro-oluklu ısı borularının sayısal modellenmesinde bir çok fiziksel olayın bir arada olmasından dolayı zorluklar yaşanmaktadır. Tüm bu fiziksel olayların etkisinin çok-oluklu bir mimari için modellenmesi günümüz bilgisayarların kapasitesinden dolayı mümkün değildir. Dr. Odabaşı'nın doktora tez çalışmalarında birim oluklu ısı borusu için geliştirdiği kapsamlı entegre sayısal modellerin sonuçları kullanılarak proje kapsamında geliştirilecek olan ısı borularının boyutlandırılmasına yönelik bir model geliştirilmiştir. Bu model mikro-oluklu ısı borusu üzerindeki sıcaklık dağılımını öngörebilmekte ve 3B etkileri modelleyebilmektedir. Bu kapsamda bir model literatürde bulunmamaktadır.
- Kanal geometrisinin ısıl performansa olan etkisini değerlendirmek için gerekli olan iki alt model (yoğuşma ve buharlaşma) proje kapsamında geliştirilmiştir. Bu konularda literatürde çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte bu çalışmalar görece basit ancak hassas olmayan varsayımlara dayanmaktadır. Yoğuşma ile ilgili geliştirilen modelde literatürde olduğu gibi yalnız kılcal basıncın değil, yoğuşmada önemli rol oynayan ayrılma basıncının etkisi de göz önüne almaktadır. Bu etkinin yoğuşma debilerini önemli ölçüde etkilediği ve kanatçık genişliğinin daralması ile birim alandaki yoğuşma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Benzer çıkarımlara literatürde rastlanmamıştır. Buharlaşma için geliştirilen model de daha önce yapılan bir doktora tezindeki ilk kez ortaya çıkan bulguları doğrulamış ve buharlaşma için de kanatçık ve oluk genişliğinin azaltılarak oluk sayısının artırılmasının birim alandaki buharlaşma miktarını arttırdığını ortaya koymuştur.



(a) G0



(b) G1 metal

(c) G1 Si

Şekil 48: Deneylerde gözlemlenen pleksiglas hasarları

- Mikro-oluklu ısı borusu üretimine yönelik farklı üretim tekniklerinin irdelendiği detaylı bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda farklı üretim tekniklerinin avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Yapılan çalışmalar ile oluk üretimine yönelik en uygun üretim reçetelerine karar verilmiş ve bu reçetelerin geliştirilmesi araştırma grubumuz ve ülkemiz için önemli bir bilgi birikimi oluşturmuştur.
- Isı borusu çalışmalarındaki en kritik nokta çalışma sıvısının vakum ortamında ısı borusunun içerisine yüklenmesi ve tutulmasıdır. Bu basamak uygulaması tek bir doldurma oranı için görece kolay olsa da, geliştirilen düzeneğin bir deney düzeneği olması ve farklı doldurma oranlarını kullanma gereksinimi nedeniyle doldurma basamağının tekrarlanması ciddi teknolojik bir zorluk yaratmıştır. Buna ek olarak yapılacak deneylerde silikon kullanılacak ve değişik doldurma oranlarında çalıştırılacak olmasından dolayı silikon ısı borusunun hasar görme olasılığı ortaya çıkmıştır. Bu noktada deneysel düzeneğin geliştirilmesi için, proje önerisinde öngörülmemen, metal ısı boruları ile çalışmalara başlanmıştır. Bu sayede hızlı bir şekilde test düzeneği geliştirilmiş, ön deneyler yapılmış,

düzeneğin faz değişimi ile ısı borusu olarak çalıştığı görülmüş ve test protokollerine karar verilmiştir. Metal ısı borusuna bir zorunluluk nedeniyle geçilmiş olmakla birlikte elde edilen sonuçlar alüminyum ısı borularının üretim ve kullanım açısından avantajlarını ortaya çıkarmış, bu da projenin başlangıçta öngörülmemiş ciddi bir kazanımı olmuştur.

- Metal ısı borusunda yapılan deneylerde farklı ısı akısı değerlerinde doldurma oranının ısı performansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda ısı borusunun optimum çalışma noktasına doldurma oranının etkisinin çok önemli olduğu ve bunun ısı akısı değerlerindeki değişime çok hassas olmadığı gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında doldurma oranı tam doludan tam boşa kadar kademeli olarak değiştirilmiştir. Literatürde, bu projedeki yapılan deneylerdeki gibi doldurma oranının tüm spektrumunda ısı performans ölçümü ve değerlendirmesi bulunmamaktadır. Bu sonuçlara ulaşılmasında proje kapsamında geliştirilen deney düzeneklerinin tüm spektrumda deney yapılmasına imkan vermesinin büyük katkısı vardır.
- Projenin son basamağında elde edilen tüm bilgi birikimi ve deneyim ile silikon ısı boruları geliştirilmiş ve denenmiştir. Isıtıcıların silikona entegre bir şekilde üretilmiş olması nedeniyle sisteme verilen ısının sadece ısı borusuna gittiği garanti edilerek kontrollü bir şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan ısıtıcı tasarımın esnekliği sayesinde sistemi tek veya çift ısıtıcılı kullanarak aynı toplam ısı miktarında daha düşük ve yüksek ısı akılarında çalıştırmak mümkün olmuştur. Değişik doluluk oranları kullanarak sistem sıcaklığının izin verilen maksimum sıcaklığın altında tutmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu da gelecekte yapılacak deneylerde farklı elektronik mimariye sahip elemanların soğutulmasına yönelik ısı borusu tasarlanmasının önünü açmaktadır.
- Silikon ile yapılan deneylerde de ısı borusunun en iyi ısı performansını gösterdiği doldurma oranları bulunmuştur. Deneylerde hem IPA hem de saf su kullanılarak farklı ısı akılarında deney verileri üretilmiştir. Literatürde mikro-oluklu ısı borularının ısı performansı bu kadar farklı çalışma parametresi için incelenmemiştir.
- Şu ana kadar elde ettiğimiz veriler bu rapor kapsamında sunulmaktadır, ancak deneysel çalışmalarımız proje bursiyeri Hossein A. Alijanvad'ın yüksek lisans tezi çalışmaları çerçevesinde devam etmektedir. Bu bağlamda hem raporun içerisinde bahsedilen doğruluğu konusunda kuşku olan deneylerin tekrarlanması hem de tamamlamak istediğimiz ancak proje raporu tarihine yetişmeyen 200 μ m oluklu ısı borusu deneylerinin yapılması planlanmaktadır. Bunların da sonuçları hazırlanacak olacak bilimsel yayınlarda literatüre sunulacaktır.
- Projemizin sayısal modelleme kısmında bursiyerler Serdar Taze, Mobin Aliapour, Mohammad Reza-

eimoghaddam görev almışlardır. Ayrıca Dr. Gülnihal Odabaşı'nın doktora tez çalışmaları kapsamında yaptığı, birim oluklu ısı borusu üzerinde geliştirdiği kapsamlı entegre model ile proje kapsamında geliştirilen modele girdi sağlamıştır. Projemizin üretim aşamalarında bursiyerler Serdar Taze ve Hossein A. Alijanvad görev almıştır. Ayrıca UNAM araştırmacılarından Dr. Mehmet Yılmaz DRİE prosesinin reçetesinin çıkartılmasında projemize destek vermiştir. Projenin deneysel çalışmaları bursiyer Hossein A. Alijanvad tarafından yürütülmüştür. Deneysel çalışmalarda Dr. Yiğit Akkuş'ta projemize destek vermiştir.

- Projemizde öneride planlandığı şekilde bir sayısal model geliştirmiş, bu model çok oluklu bir ısı borusuna uygulanmış, ısı borularının üretimi ve deneyleri yapılmıştır. Öneride planlandığından çok daha fazla deneysel veriler proje kapsamında üretilmiştir. Proje önerisinde gerçek devre mimarisi için yapılması planlanan deneyler tasarlanan tek ısıtıcılı silikon ısı borusu ile yapılmıştır. Her ne kadar geliştirilen sayısal model deneysel ünitenin tasarımında kullanılsa da öneride planlandığı üzere deneysel verilerin sayısal sonuçlarla birebir karşılaştırılması yapılamamıştır. Ancak bu konudaki çalışmalar proje bursiyeri Hossein A. Alijanvad'ın tez çalışmaları kapsamında yapılacaktır. Tüm bu noktalar göz önüne alındığında projemizin %95 başarı ile tamamlandığını değerlendirmekteyiz.

Proje kapsamında elde edilen çıktılar ve bu çıktıların projenin iş paketleri ile olan ilişkileri bir sonraki bölümde verilmiştir.

5.1 Proje Çıktıları

Proje kapsamında aşağıdaki çıktılar elde edildi:

- (1) Birim hücreden elde edilen sonuçların çok-oluklu ısı borusuna girdi teşkil etmesi ile geliştirilen sayısal model ve mikro-olukların farklı üretim teknikleriyle üretimi konularını içeren “**Modeling and fabrication of silicon micro-grooved heat pipes**” başlıklı bir yüksek lisans tezi proje araştırmacısı ve yürütücüsünün danışmanlığında İ.D. Bilkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamlandı. Bu çalışma 1, 2 ve 3 numaralı iş paketi faaliyetleri kapsamında yapıldı.
- (2) Çok-oluklu ısı borusunun 3B modellenmesi çalışmaları “**Multi-physics modeling of micro-grooved heat pipe**” başlıklı bir bildiri ile *8th Int. Conf. on Comput. Heat Mass Transfer (25–28 Mayıs 2015, İstanbul, Turkey)* konferansında sunuldu. Bu çalışma 1 ve 2 numaralı iş paketi faaliyetleri kapsamında yapıldı.
- (3) Mikro-oluk üretimi için farklı üretim tekniklerinin karşılaştırılmasını konu alan “**Mikro-oluklu ısı borusu üretimi için farklı mikro-üretim yöntemlerinin irdelenmesi**” başlıklı bir bildiri *20th Ulusal Isı Bilimi*

Tekniği Konferansı (ULIBTK'15) (2–5 Eylül 2015, Balıkesir) konferansında sunuldu. Bu çalışma 3 numaralı iş paketi faaliyetleri kapsamında yapıldı.

- (4) Metal ısı borusu çalışmaları kapsamında yapılan ön deneyler ve deney düzeneğinin kurulması ile ilgili çalışmaları kapsamında “**Experimental investigation of thermal performance of aluminum-grooved micro heat pipe**” başlıklı bir bildiri *5th Micro and Nano Flows Conference (11–14 September 2016, Milan, Italy)* konferansında sunuldu. Bu çalışma 4 numaralı iş paketi faaliyetleri kapsamında yapıldı.
- (5) 7 Ekim 2016 tarihinde İ.D. Bilkent Üniversitesi’nde proje ekibi tarafından yaklaşık 90 katılımcının katıldığı, 2 oturum ve 8 konuşmadan oluşan *Isı Borusu ve Yüksek Isı Akısı Teknolojileri-Uygulamaları Sempozyumu* düzenlendi. Bu sempozyum kapsamında proje ekibi tarafından “**Mikro-oluklu düz ısı borularında güncel araştırma konuları**”, “**Mikro-oluklu silikon ısı borusunun çoklu-fizik modellemesi ve üretimi**” ve “**Alüminyum-oluklu mikro ısı borusunun ısıl performansının deneysel olarak incelenmesi**” başlıklı 3 adet sunum yapıldı. Bu sunumlar 1, 2, 3 ve 4 numaralı iş paketi faaliyetleri kapsamında yapıldı.
- (6) İş paketi 4 kapsamında yapılan G0 numunelerine ait deneysel çalışmalar “**Experimental thermal performance characterization of flat grooved heat pipes**” başlıklı bir makale ile alanın saygın dergisi *Heat Transfer Engineering* dergisine gönderildi ve şu anda hakem değerlendirmesindedir.
- (7) İş paketi 4 kapsamında yapılan G1 metal numunelerinin ait deneysel çalışmalar “**Experimental thermal performance characterization of flat grooved metal heat pipes: Effect of different heat flux and filling ratio**” başlıklı bir makale ile alanın saygın dergisi *Applied Thermal Engineering* dergisine gönderilmek üzere hazırlanma aşamasındadır.
- (8) İş paketi 4 kapsamında yapılan G1 silikon numunelerinin ait deneysel çalışmalar “**Experimental thermal performance characterization of silicon micro-grooved heat pipes**” başlıklı bir makale ile alanın saygın dergisi *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering* dergisine gönderilmek üzere hazırlanma aşamasındadır.
- (9) İş paketi 3 ve 4 kapsamında yapılan çalışmalar kapsamında “**Experimental performance characterization of micro-grooved heat pipes**” başlıklı bir yüksek lisans tezi proje araştırmacısı ve yürütücüsünün danışmanlığında İ.D. Bilkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde tamamlanacaktır.
- (10) İş paketi 1 kapsamında yapılan yoğuşma modellemesi ile ilgili çalışmalardan “**Condensation modeling on the fin top of a micro-grooved heat pipe**” başlıklı bir bildiri *26th Canadian Congress of Applied Mechanics (28 Mayıs – 1 Haziran 2017, Kanada)* konferansında sunulmak üzere gönderilmiştir.

(11) İş paketi 1 kapsamında yapılan yoğuşma modellemesi ile ilgili çalışmalar kapsamında “**Condensation modeling on the fin top of a micro-grooved heat pipe**” başlıklı bir yüksek lisans tezi proje yürütücüsünün danışmanlığında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde tamamlanacaktır.

Proje kapsamında yapılan yayınların tam listesi aşağıda verilmiştir:

- [1] S. Taze (Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Barbaros Çetin, Yard. Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer Dursunkaya), Modeling and fabrication of silicon micro-grooved heat pipes, Y. Lisans Tezi, İ.D. Bilkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2015
- [2] S. Taze, B. Çetin, Z. Dursunkaya (2015). Multi-physics modeling of micro-grooved heat pipe. **8th Int. Conf. on Comput. Heat Mass Transfer**, May 25–28, İstanbul, Turkey, Paper No: 139
- [3] S. Taze, B. Çetin, M. Yılmaz, Z. Dursunkaya (2015). Mikro-oluklu ısı borusu üretimi için farklı mikro-üretim yöntemlerinin irdelenmesi. **20th Ulusal Isı Bilimi Tekniği Konferansı (ULIBTK’15)**, 2–5 Eylül, Balıkesir, Bildiri No: 138
- [4] H. A. Alijanvand, B. Çetin, Z. Dursunkaya (2016). Experimental investigation of thermal performance of aluminum-grooved micro heat pipe. **5th Micro and Nano Flows Conference**, September 11–14, Milan, Italy
- [5] Z. Dursunkaya (2016). Mikro-oluklu düz ısı borularında güncel araştırma konuları, **Isı Borusu ve Yüksek Isı Akısı Teknolojileri-Uygulamaları Sempozyumu**, 7 Ekim, İ.D. Bilkent Üniversitesi, Ankara
- [6] B. Çetin (2016). Mikro-oluklu silikon ısı borusunun çoklu-fizik modellemesi ve üretimi, **Isı Borusu ve Yüksek Isı Akısı Teknolojileri-Uygulamaları Sempozyumu**, 7 Ekim, İ.D. Bilkent Üniversitesi, Ankara
- [7] H. A. Alijanvand, B. Çetin, Z. Dursunkaya (2016). Alüminyum-oluklu mikro ısı borusunun ısı performansının deneysel olarak incelenmesi, **Isı Borusu ve Yüksek Isı Akısı Teknolojileri-Uygulamaları Sempozyumu**, 7 Ekim, İ.D. Bilkent Üniversitesi, Ankara
- [8] H. A. Alijanvand, B. Çetin, Y. Akkuş, Z. Dursunkaya (2017). Experimental thermal performance characterization of flat grooved heat pipes, **Heat Transfer Engineering** (Hakem değerlendirmesinde)
- [9] M. Alipour, Z. Dursunkaya (2017). Condensation modeling on the fin top of a micro-grooved heat pipe. **26th Canadian Congress of Applied Mechanics**, May 28–June 1, Victoria, British Columbia, Canada

5.2 Öneriler

- Proje kapsamında üretim kolaylığı açısından alüminyum seçilmiş olsa da alüminyum saf su ile çalışmak üzere uygun bir malzeme değildir. Termo-fiziksel özellikleri nedeniyle saf suyun IPA'le göre daha avantajlı olduğu görüldüğünden suyun kapiler açıdan uyumlu olduğu bakırın ısı borusu malzemesi olarak kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca pleksiglas üst kapağın yüzeyinde yoğuşan çalışma sıvısının gerek doluluk oranını etkilemesini gerekse ani yoğuşma buharlaşma ile ısı borusunun performansını değiştirmesi nedeniyle bu sorunla karşılaşılacak ve yoğuşma/buharlaşma ile ısı transferi alanlarını iki katına çıkaracak çift taraflı ısı borusunun geliştirilip denemesi düşünülmektedir.
- Projemizin asıl hedefi silikon altlık üzerinde entegre devrelerin soğutulmasını yönelik olsa da, proje sırasında geliştirilen metal ısı boruları ile elde edilen tecrübe ve bilgi birikimi ile savunma ve uzay sanayinde kullanılan elektronik teçhizat kutularının kasasına entegre bir şekilde tasarlanıp/üretilecek ısı borularının, bu sistemlerin etkin bir şekilde soğutulmasında kullanabileceği öngörülmektedir.
- Yapılan deneylerde soğutma suyunun debisi ve sıcaklığı ile ortam sıcaklığının deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği üzerinde etkili olduğu görüldüğünden bazı deneyler daha kontrollü bir şekilde tekrarlanacaktır.

Kaynakça

- Y. Akkuş, 2015. "Multi-Dimensional modeling of evaporation in the micro region of a micro grooved heat pipe", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- S. Anand, S. De, S. DasGupta, 2002. "Experimental and theoretical study of axial dryout point for evaporation from V-shaped microgrooves", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 1535–1543.
- S. Chapra, R. Canale, 2015. "Numerical methods for engineers for engineers", Mac Graw Hill, 7. Baskı.
- K. H. Do, S. J. Kim, and S. V. Garimella, 2008. "A mathematical model for analyzing the thermal characteristics of a flat micro heat pipe with a grooved wick," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 4637–4650.
- S.-W. Chen, J.-C. Hsieh, C.-T. Chou, H.-H. Lin, S.-C. Shen, and M.-J. Tsai, 2007. "Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of micro-grooves made by different processes," *Sensors and Actuators A: Physical*, 139, 78–87, 2007.
- A. Faghri, Y. Zhang, Y. 2001. "Numerical Simulation of Condensation on a Capillary Grooved Structure", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 39(3), 227-243.
- Y. M. Hung and K.-K. Tio, 2010. "Analysis of micro-heat pipes with axial conduction in the solid wall," *Journal of Heat Transfer*, 132, 071301.
- Y. M. Hung and Q. Seng, 2011. "Effects of geometric design on thermal performance of star-groove micro-heat pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1198–1209.
- Y. M. Hung and K.-K. Tio, 2012. "Thermal analysis of optimally designed inclined micro heat pipes with axial solid wall conduction," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (8), 1146–1153.

- A. J. Jiao, H. B. Ma, and J. K. Critser, 2007. "Evaporation heat transfer characteristics of a grooved heat pipe with micro-trapezoidal grooves," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2905–2911.
- S.-W. Kang, D. Huang, 2002. "Fabrication of star grooves and rhombus grooves micro heat pipe", *J. Micromech. Microeng.*, 12, 5, 525–531.
- F. Lefevre, R. Rulliere, S. Lips, and J. Bonjour, 2010. "Confocal microscopy for capillary film measurements in a flat plate heat pipe," *Journal of Heat Transfer*, 132, 6.
- S. Launay, V. Sartre, M. Lallemand, 2004. "Experimental study on silicon micro-heat pipe arrays", *Applied Thermal Engineering*, 24, 2-3, 233–243.
- M. Lee, M. Wong, Y. Zohar, 2003. "Characterization of an integrated micro heat pipe", *J. Micromech. Microeng.*, 13, 1, 58–64.
- H. T. Lim, S. H. Kim, H. D. Im, K. H. Oh, and S. H. Jeong, 2008. "Fabrication and evaluation of a copper flat micro heat pipe working under adverse-gravity orientation," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 105013.
- Z.-H. Liu, J.-G. Xiong, and R. Bao, 2007. "Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface," *International Journal of Multiphase Flow*, 33 (12), 1284–1295.
- X. Li, J. Wang, Q. Hu, L. Bao, and H. Zhang, 2013. "Experimental and theoretical research on capillary limit of micro heat pipe with compound structure of sintered wick on trapezium-grooved substrate," *Heat and Mass Transfer*, 49, 381–389.
- S. Lips, F. Lefevre, and J. Bonjour, 2010. "Combined effects of the filling ratio and the vapor space thickness on the performance of a flat plate heat pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 694–702.
- S. Lips, F. Lefevre, and J. Bonjour, 2011. "Physical mechanisms involved in grooved flat heat pipes: Experimental and numerical analyses," *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1243–1252.
- X. Liu and Y. Chen, 2013. "Transient thermal performance analysis of micro heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, 58, 585–593.
- S. H. Moon, G. Hwang, S. C. Ko, Y. T. Kim, 2004. "Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon", *Microelectronics Reliability*, 44, 2, 315-321.
- S. Moosman, G. M. Homsy, 1980. "Evaporating menisci of wetting fluids", *Journal of Colloid and Interface Science*, 73, 212–223.
- G. Odabaşı, 2014. "Modeling of multidimensional heat transfer in a rectangular grooved heat pipe", *Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü*
- J. Qu, H. Wu, and P. Cheng, 2008. "Effects of functional surface on performance of a micro heat pipe," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 523–528.
- J. Qu, H. Wu, and P. Cheng, 2012. "Start-up, heat transfer and flow characteristics of silicon-based micro pulsating heat pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6109–6120.
- M. Rahmat and P. Hubert, 2010. "Two-phase simulations of micro heat pipes," *Computers & Fluids*, 39, 451–460.
- R. Revellin, R. Rulliere, F. Lefevre, and J. Bonjour, 2009. "Experimental validation of an analytical model for predicting the thermal and hydrodynamic capabilities of flat micro heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, 29, 1114–1122.
- C. B. Sobhan, R. L. Rag, and G. P. Peterson, 2007. "A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes," *International Journal of Energy Research*, 31, 664–688.
- P. C. Stephan, C. A. Busse, C.A., 1992, "Analysis of the heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35, 383–391.
- D. Sugumar and K.-K. Tio, 2008. "The effects of working fluid on the heat transport capacity of a microheat pipe," *Journal of Heat Transfer*, 131, 012401.
- B. Suman, S. De, S. DasGupta, 2005. "A model of the capillary limit of a micro heat pipe and prediction of the dry-out length, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, 3, 495–505.
- B. Suman, P. Kumar, 2005. "An analytical model for fluid flow and heat transfer in a micro-heat pipe of polygonal shape, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4498–4509.
- X. Wang, T. Yong, and C. Ping, 2009. "Investigation into performance of a heat pipe with micro grooves fabricated by extrusion–ploughing process," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, 1384–1388.

P. C. Wayner Jr., Y. K. Kao, L. V. Lacroix, 1976. "The interline heat-transfer coefficient of an evaporating wetting film", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19,487–492.

Q. Wu, H. A. Wong, 2004. "A slope-dependent disjoining pressure for non-zero contact angles", *Journal of Fluid Mechanics*, 506, 157-185.

X. F. Yang, Z.-H. Liu, and J. Zhao, 2008. "Heat transfer performance of a horizontal micro-grooved heat pipe using CuO nanofluid," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 8, 035038.

Y. Tang, Z. Hu, J. Qing, Z. Xie, T. Fu, and W. Chen, 2013. "Experimental investigation on isothermal performance of the micro-grooved heat pipe," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47, 143–149.

K.-K. Tio and Y. M. Hung, 2015. "Analysis of overloaded micro heat pipes: Effects of solid thermal conductivity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, pp. 737–749.

D. B. Tuckerman, R. F. Pease, 1982. "Optimized convective cooling using micromachined structure", *Journal of Electrochemical Society*, 129, 3, C98

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ZAFER DURSUNKAYA
Proje No:	213M351
Proje Başlığı:	Yüksek Isı Akıllı Elektronik Uygulamalar için Mikro-Oluklu Isı Borularının Geliştirilmesi Ve Üretimi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	BARBAROS ÇETİN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2014 - 15/12/2016
Onaylanan Bütçe:	349830.0
Harcanan Bütçe:	300085.66
Öz:	<p>Bu proje kapsamında, elektronik işlemcilerin soğutulması gibi güncel uygulamalarda kullanılabilen bir mikro-oluklu ısı borusu analitik ve deneysel yöntemlerle incelenmiş, üretilmiş ve bu amaca yönelik bir entegre tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Öncelikle mikro-oluklu ısı borusunun içinde olan ısı ve akışkanlar mekaniği problemleri teorik olarak incelenerek modellenmiştir. Geliştirilen sayısal model çok oluklu bir ısı-borusunun modellenmesinde kullanılmış ve çok-oluklu ısı borusunun üretimini takiben proje kapsamında tasarlanan ve üretilen deney düzeneğinde farklı doldurma oranları, farklı ısı akısı değerleri, farklı oluk ölçülerinde ve farklı akışkanlar için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Proje kapsamında hem metal hem de silikon tabanlı çok oluklu ısı boruları için deneysel sonuçlar elde edilmiş ve prototip mikro-oluklu ısı borularının ısı performansını karakterize edilerek optimum çalışma noktaları belirlenmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Isı borusu, mikro-oluk, buharlaşma, yoğuşma, kapiler etki
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır