





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Düşük Dolum Oranında İkili Karışımlarla Yüklü Üniform Olmayan Atımlı Isı Borusunun Deneysel İncelenmesi

 Burak MARKAL ^{a,*},  Ramazan VAROL ^b

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, TÜRKİYE

^b Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: burak.markal@erdogan.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.879662

ÖZ

Bu çalışmada, düşük bir dolum oranında ikili karışımlarla yüklü, üniform olmayan kanal profiline sahip düz plakalı kapalı döngülü atımlı bir ısı borusunun ısı performans ve akış davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler kapsamında iş akışkanı olarak, etanol (E) ve metanolün (M) farklı hacim oranları (E:M = 1:1, 1:2 ve 2:1) için elde edilen ikili karışımları kullanılmıştır. Dolum oranı %20 olarak sabit tutulmuş olup; 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı eğim açısında çalışılmıştır. Akış davranışı yüksek hızlı kamera ile elde edilen eş zamanlı görüntüler üzerinden irdelenmiştir (saniyede 1000 görüntü). Yapılan çalışma sonucunda; karışım oranının çalışmaya başlama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu; artan metanol oranı ile ısı performansın arttığı ve ısı borusunun, tüm karışım oranlarında, yer çekimi desteği olmadan da çalışabildiği belirlenmiştir. Isı transfer karakteristiklerinde artan eğim açısıyla iyileşme gözlemlenmiştir. Akış görüntüleri aracılığıyla, akış pasajları içerisindeki fiziksel olaylar tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İkili Karışım, Isıl performans, Atımlı ısı borusu

Experimental Investigation of a Non-Uniform Pulsating Heat Pipe Charged by Binary Mixtures at a Low Filling Ratio

ABSTRACT

In this study, thermal performance and flow behavior of flat-plate closed loop pulsating heat pipe having non-uniform channel profile and being charged by binary mixtures at a low filling ratio are experimentally investigated. In the experiments, binary mixtures of ethanol (E) and methanol (M) obtained at different volume mixing ratio (E:M = 1:1, 1:2 and 2:1) are used as working fluid. The filling ratio is kept constant as 20%; while it is studied three different inclination angles as 0°, 45° and 90°. Flow behavior is investigated via simultaneous images obtained by a high speed camera (1000 fps). It is concluded that the volume mixing ratio has a great importance on startup performance, the thermal performance increases with increasing methanol ratio, and the heat pipe can operate at all mixing ratios without the aid of gravity. It is observed that the heat transfer characteristics improve with increasing inclination angle. Through the flow images, physical phenomena in the flow passages are defined.

Keywords: Binary mixture, Thermal performance, Pulsating heat pipe

I. GİRİŞ

Gittikçe dijitalleşen dünyada, teknolojik ilerlemenin önündeki engellerden birisi de atık ısı problemi. Sistemlerden etkin bir şekilde uzaklaştırılmayan atık ısı, performansın düşmesine, güvenlik sorunlarına, ısıl gerilmelere ve dolayısıyla deformasyonlara yol açabilmektedir. Hassas mikro/nano ölçekli üretim tekniklerinin gelişmeye devam ettiği günümüzde, elektronik sistemlerin kapasiteleri artarken, hem kendi hem de yerleştirildikleri hacimlerin boyutları ise küçülmektedir. Dolayısıyla, küçük hacimlerden atık ısıyı etkin bir şekilde uzaklaştırabilecek, gelişmiş ısıl kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, en popüler ve gelecek vadeden tekniklerden biri atımlı ısı borularıdır (PHP). Atımlı ısı boruları, Akachi [1] tarafından 1990 yılında literatüre tanıtıldıktan sonra, özellikle klasik ısı borularından farklı olarak, fitil kullanımı gerektirmemeleri ve sürüklenme ve kılcallık limiti gibi çalışmayı olumsuz etkileyen fiziksel mekanizmalara maruz kalmamaları sebebiyle ön plana çıkmıştır. Üretim kolaylığı, pasif karaktere sahip olmaları ve yüksek ısı aktarım kapasitesi gibi avantajlar, atımlı ısı borularına birçok alanda kullanım potansiyeli sunmaktadır. Uzay uygulamaları (uzay ve havacılık elektroniği) [2], [3]; LED çiplerin soğutulması [4]; elektrikli araç bataryalarının soğutulması [5]; faz değiştiren madde (PCM) destekli güneş enerjili damıtıcılarda PCM’de depolanan ısının, tuzlu suya aktarımı [6], ilgili potansiyel kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir. Üretim, kullanım alanı potansiyeli ve üstün ısı transfer karakteristikleri gibi avantajlarından dolayı PHP’ler, güncel ve popüler araştırma konularından biridir.

Atımlı ısı boruları, iş akışkanı ve birbiriyle bağlantılı paralel akış kanalları formunda üretilen konteynir olmak üzere, sadece iki temel bileşenden oluşmaktadır. Temel geometrik yapıdaki bu basitliğe rağmen, atımlı ısı borularının akış yapısı; kaynamalı akış ve yoğunlaşma süreçleri, atım/salınım hareketleri yapan akış bileşenleri (sıvı yığınlar ve buhar kabarcıkları) ve zaman bağımlı değişiklikler gibi olayları içermesi sebebiyle oldukça karmaşıktır. Dolayısıyla, genel olarak, yapılan çalışmalar, geometri modifikasyonu, akışkan türü ve akışın fiziksel mekanizmasının irdelenmesi (farklı çalışma koşulları altında) ile ilgilidir.

Charoensawan vd. [7] döngü sayısı (5 – 23), açısal yerleşim ($0^\circ - 90^\circ$) ve iş akışkanı (R-123, su ve etanol) türünün kılcal boru formundaki atımlı ısı borularının ısıl performansına olan etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Yer çekimi kuvvetinin ısıl performans üzerinde baskın bir rol oynadığını ve ısı borusunun yatay konumda çalışabilmesi için belirli bir sayıdan fazla döngüye sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. Kendi çalışma koşulları kapsamında gerekli olan minimum döngü sayısı 16 olarak ifade edilmiştir. Benzer problem Khandekar vd. [8] tarafından da rapor edilmiştir. Beş döngülü kılcal boru tipi atımlı ısı borusu için R-123, su ve etanol kullanarak yaptıkları deneylerde, ısı borusunun yatay konumda çalışmadığını ifade etmişlerdir. Jun ve Kim [9] iş akışkanı olarak etanol kullanmış ve 5, 10, 15 ve 20 olmak üzere farklı döngü sayılarına sahip kapalı ve açık döngülü PHP’ler ile çalışmışlardır. Kapalı döngülü PHP’lerin açısal yerleşimden ($0^\circ - 90^\circ$) bağımsız çalışabilmesi için 20 kadar döngüye ihtiyaç duyduklarını belirtmişlerdir. Az döngü sayıları için ortaya çıkan bu durumun sebebi, akış pasajlarındaki akış kararsızlıkları ve basınç pertürbasyon düzeyindeki yetersizliğe atfedilmektedir [7, 10]. İlgili problemi çözmek için Chien vd. [11] tarafından üniform olmayan atımlı ısı borusu geometrisi önerilmiştir. Bu geometride, her bir döngü, farklı kesite sahip paralel kanal çiftinden oluşmaktadır (2 mm x 1 mm ve 2 mm x 2mm). Saf su kullanarak yaptıkları çalışmalar sonucunda %50’den büyük doluluk oranlarında (%60 ve %70), üniform olmayan ısı borusunun yatay konumda bile çalışabildiğini belirtmişlerdir. Chien vd. [11]’den sonra, farklı araştırmacılar da döngülerinde farklı kesite sahip kanallar bulunan üniform olmayan PHP’lerle ilgili çalışmalar yapmıştır. Kwon ve Kim [12], [13] hem tek hem de çok döngülü (beş döngü) üniform olmayan PHP’lerde farklı iş akışkanları (etanol ve/veya FC-72) kullanarak deneysel çalışmalar yürütmüşler ve farklı kesit alanlı paralel kanalların sirkülasyonlu akışı iyileştirdiği, böylece ısıl dirençte %45’e varan azalmanın meydana gelebildiğini belirtmişlerdir. Isıl dirençteki azalmayı, akışkan hareketinin iyileşmesi; akışkan hareketinin iyileşmesini ise kılcallık basınç farkının sürtünme basınç düşüşüne baskın gelmesi ile açıklamışlardır. Wan vd. [14] yaylı çek valf kullandıkları on döngülü atımlı ısı borusunda, yer çekimi, asimetrik ısıtma ve çek valf olmak üzere üç faktörün bütünlük etkisini incelemişlerdir. %70 doluluk oranında çalışmışlar ve iş akışkanı olarak de-iyonize su kullanmışlardır.

Belirtilen üç faktörden herhangi ikisinin kullanımının, ısı borusu performansında artış sağladığı; ancak üçünün birlikte kullanımının ısıl direncin artması gibi olumsuz sonuçlara yol açtığı ifade edilmiştir. Çek valf tarafından yapılan yönlendirme, asimetrik ısıtma sonucu oluşan akış hareketine ters olduğu zaman konvansiyonel atımlı ısı borusundan daha yüksek ısıl direnç değerleri elde edildiği belirtilmiştir.

Geometrik özelliklerin; PHP performansı, akış yapısı ve çalışma limitleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmaların yanı sıra, bazı araştırmacılar tarafından PHP'yi oluşturan diğer bileşen olan akışkan türü üzerine odaklanılmıştır. Özellikle, son yıllarda, farklı karışımların PHP'lerin ısıl karakteristikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda temel amaç, saf akışkanlar üzerine yapılan çalışmalarda ortaya çıkan etkili (sistem performansını artıran) termo-fiziksel özellikleri, akışkanları karıştırarak bir araya getirmektir. Çalışma koşullarına bağlılık, atımlı ısı borularının akış doğasının karmaşıklığı ve akışkanlar arası etkileşimler geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Zhu vd. [15] düşey olarak konumlandıkları (alttan ısıtma modu) kılcal boru tipi PHP'de, iş akışkanı olarak farklı hacimsel karışım oranlarında (13:1, 4:1, 1:1, 1:4, 1:13) su-aseton akışkan çifti kullanmıştır. Farklı ısıl yükler ve dolun oranlarında (%35-%70) deneysel olarak çalışmışlardır. Karışım içerisindeki suyun, kurumanın önlenmesi konusunda önemli bir rol oynadığını; düşük dolun oranlarında (%35 ve %45) su-aseton karışımlarının, genel anlamda, ilgili karışımı oluşturan saf akışkanlara kıyasla daha yüksek ısı transfer performansı sunduğunu, yüksek dolun oranlarında (%62 ve %70) ise karışım performansının saf akışkanlara kıyasla düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Han vd. [16] kılcal boru türündeki beş döngülü atımlı ısı borusunda, su bazlı ikili karışımlar (su – etanol, su – aseton ve su – metanol) üzerine odaklanmışlardır. Karışımlar için elde edilen sonuçları etkileyen ve faz değişimi sönümlenme etkisi (yüksek kaynama noktasına sahip bileşenin, diğer bileşenin yüksek buhar basıncı sonucu sıvı fazda kalması) olarak adlandırılan önemli bir fiziksel olay üzerinde durmuşlardır. İkili karışımların düşük (%35 ve %45) veya orta düzeyli (%55) dolun oranlarında daha etkin bir performansa yol açtığını ve faz değişimi sönümlenme etkisinin kurumanın önlenmesinde rol oynadığını belirtmişlerdir. Cui vd. [17] farklı karışım oranlarına (2:1, 4:1 ve 7:1) sahip metanol bazlı ikili karışımlarla (metanol-aseton, metanol-etanol ve metanol-de-iyonize su) yüklü beş döngülü PHP'nin ısıl direnç davranışını, %45 – %90 arasındaki dolun oranları ve 10W – 100W arasındaki ısıl yükler için deneysel olarak incelemiştir. Hem kuruma olayının ötelenmesi hem de daha düşük ısıl dirençlerin elde edilmesi sebebiyle, en etkili karışım %45 dolun oranındaki (ilgili çalışmadaki en düşük dolun oranı) metanol-su karışımı olarak belirlenmiştir. Temel fiziksel sebepler, faz değişimi engelleme etkisi ve düşük dolun oranı sebebiyle kütle transferiyle ilişkili direncin akış sürücü kuvvetine kıyasla zayıf olması olarak açıklanmıştır. Wang et al. [18], 2:1, 4:1 ve 7:1 hacimsel karışım oranları için aseton-su, aseton-etanol ve aseton-metanol ikili karışımları ile yüklü PHP'nin ısı transfer performansını %45, %55, %62 ve %70 olmak üzere dört farklı dolun oranı için incelemiştir. Diğer çalışmalarla [15]–[18] benzer olarak, nispeten düşük dolun oranında (%45), zeotropik özelliklerin (bileşenlerin farklı kaynama noktaları) ısıl performans üzerinde etkili olduğunu; nispeten yüksek dolun oranlarında (%62 ve %70) ise yoğunluk ve viskozitenin ısıl performans üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir (düşük akış direnci – yüksek ısıl performans ilişkisi). Xu vd. [19] de-iyonize su ve HFE-7100'ün karıştırılmasıyla elde ettikleri zeotropik bir ikili karışımı, iş akışkanı olarak kullanmışlar ve farklı karışım oranları (4:1, 2:1, 1:1, 1:2 ve 1:4), eğim açıları (30° – 90°) ve ısıl yüklerde, düz plaka tipi atımlı ısı borusunun ısı transfer performansını incelemiştir. %50 olarak tek bir dolun oranında çalışmışlardır. Her iki akışkanın eşit oranlı karışımında, akışkanların emülsiyon oluşturduğunu ve bu sayede daha fazla etkileşim halinde olduklarından, ısıl karakteristiklerin önemli düzeyde iyileştiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, yer çekimi kuvvetinin de (özellikle düşük ısıl yüklerde) ısı borusunun çalışmasını etkileyen önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Atımlı ısı borularının (PHP) birçok avantajı olmasına rağmen, az döngü sayısına sahip üniform kanallı PHP'lerin yatay konumda çalışmaması, gittikçe minyatürleşen sistemlerin ve uzay-havacılık elektroniği ve dizüstü bilgisayarlar gibi potansiyel kullanım alanlarının önündeki en büyük engellerden birisidir. Bu kapsamda, yukarıda belirtildiği gibi, farklı kesit alanlarına sahip paralel kanal dizisi tasarımı, önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, PHP'lerin performansında, belirleyici rol

oynayan bir diğer bileşen ise iş akışkanıdır. Atımlı ısı borusunun düşük ısı yüklerde çalışmaya başlaması, geniş bir ısı güç aralığında kabul edilebilir sıcaklık düzeylerinde kalabilmesi ve çalışma esnasında buharlaştırıcı bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine daha fazla ısı aktarılabilmesi, uygun iş akışkanı seçimiyle sağlanabilir. Dolayısıyla, iş akışkanı türü, PHP'nin performansı üzerinde son derece belirleyicidir. Bu doğrultuda, yukarıda özetlendiği gibi, son yıllarda, sadece sınırlı sayıdaki çalışmada, ikili karışımlar üzerine odaklanıldığı görülmektedir. Karışım kullanımındaki temel amaç (PHP'lerin çalışma mekanizması açısından) farklı akışkanların üstün özelliklerini bir araya getirmektir.

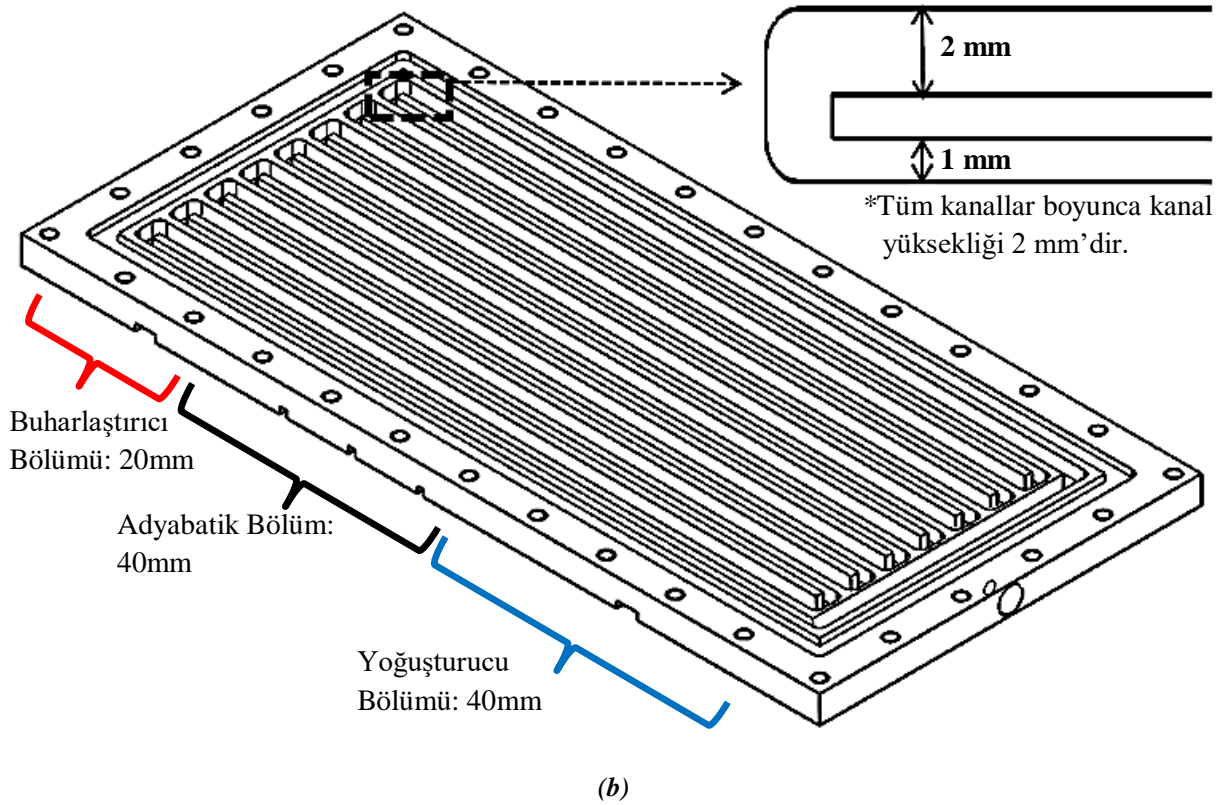
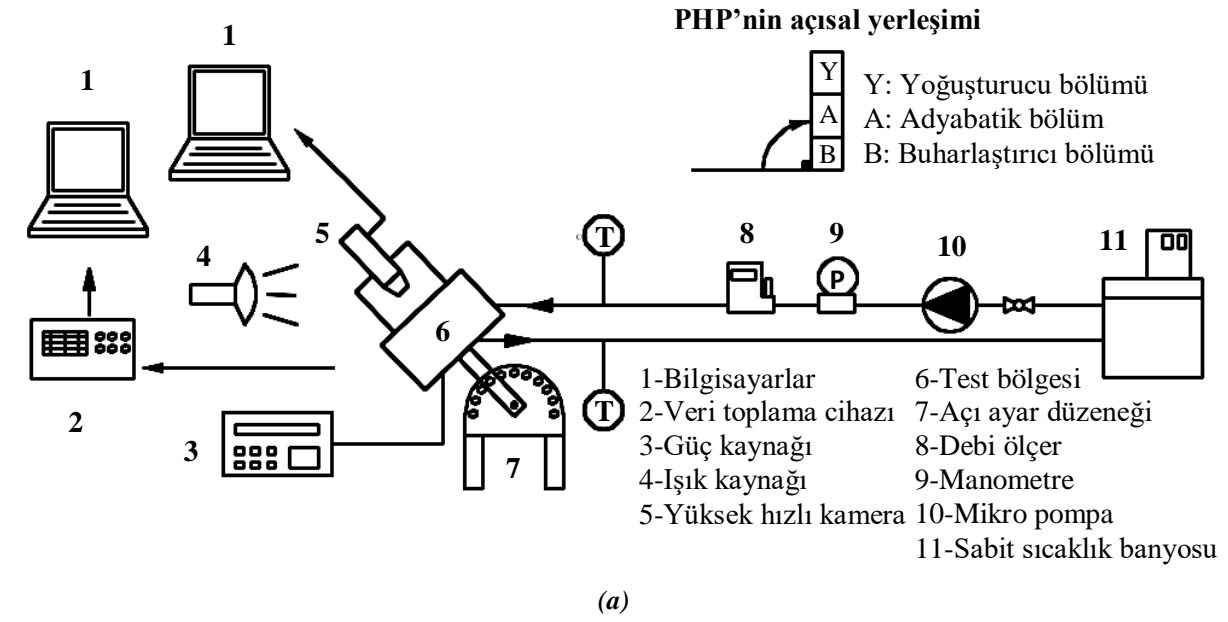
Farklı kesit alanına sahip paralel kanallardan oluşan düz plaka tipi atımlı ısı borularında (üniform olmayan PHP), iş akışkanı olarak karışım kullanılmasına yönelik ilk deneysel çalışmalar yazarlar tarafından (Markal ve Varol [20], [21]) yapılmıştır. Böylece, yukarıda özetlenen iki yaklaşım bir araya getirilmiştir. Buna karşın, atımlı ısı borularındaki güçlü ısı-hidrolik ve geometrik etkileşimler sebebiyle, akış yapısı veya çalışma mekanizması oldukça karmaşık/kompleks bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, özellikle üniform olmayan PHP'lerde farklı akışkan çiftleri kullanılarak yeni çalışmaların yapılmasına ve yeni veri tabanlarının literatüre kazandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, karışımlara yönelik çalışmalarda, %30'dan büyük doluluk oranlarına odaklanılmıştır. İş akışkanına olan bağımlılığın azaltılması için daha düşük doluluk oranlarındaki ısı ve hidrodinamik davranışın da analiz edilmesi gerekmektedir. Literatürdeki mevcut eksiklikleri giderecek şekilde, bu çalışmanın amacı, bir döngüsünde iki farklı kesite sahip paralel kanal içeren ve düşük doluluk oranında ikili karışımlarla yüklenen düz plaka tipi atımlı ısı borusunun ısı transfer performansını ve akış yapısını (akış görüntüleme desteğiyle) deneysel olarak incelemektir. Bu çalışma ile literatürde ilk kez, bir döngüsünde iki farklı kesite sahip kanal bulunan ve etanol (E) – metanol (M) ikili karışımı ile yüklü düz plaka tipi atımlı ısı borusunda, düşük bir doluluk oranında deneysel olarak çalışılmıştır. Doluluk oranı %20 olup, toplam sekiz döngüden oluşan ısı borusunda, her bir döngüdeki kanal kesitleri (genişlik x yükseklik) 2 mm x 2 mm ve 1 mm x 2 mm'dir. Ayrıca, farklı hacimsel karışım oranlarında (E:M = 1:1, 1:2 ve 2:1) çalışılmış ve yüksek hızlı kamera ile saniyede 1000 görüntü alınarak anlık akış görüntüleri sunulmuştur.

II. DENEY DÜZENEĞİ, TEST BÖLGESİ ve VERİ İŞLEME

A. DENEY DÜZENEĞİ ve TEST BÖLGESİ

Çalışmalar; test bölgesi, akış sirkülasyon hattı ve görüntüleme ve veri toplama sistemi içeren bir deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. İlgili düzeneğe ait şematik gösterim ve kullanılan ısı borusuna ait üç boyutlu çizim, sırasıyla, Şekil 1a ve b'de sunulmuştur. Deney düzeneği, yukarıda da ifade edildiği üzere, üç temel bölüm üzerinden incelenebilir: (1) Akış görüntüleme ve veri toplama bölümü; yüksek hızlı kamera (ve kendi yazılımı), ışık kaynağı, veri toplama sistemi (sıcaklık ölçümleriyle ilişkili) ve bilgisayarlardan oluşmaktadır. (2) Test bölgesi; atımlı ısı borusu, ısı borusunun yoğunlaştırıcı bölgesiyle irtibatlı ısı alıcı, buharlaştırıcı bölgesiyle ilişkili ısıtıcı plaka, ilgili parçaların montajını sağlayan teflon parça ve ısıtıcı plakaya yerleştirilen kartuş ısıtıcıların bağlı olduğu güç kaynağından oluşmaktadır. (3) akış sirkülasyon hattı ise yoğunlaştırıcı bölümünün hemen altına yerleştirilen ısı alıcıyla irtibatlı ve ısı alıcıdaki soğutma suyu akışını sağlayan borulama hattıdır. İstenilen debi ve sıcaklıkta akışkanın sürekli akışını sağlayacak şekilde; sabit sıcaklık banyosu, mikro pompa, akış ölçer ve sıcaklık ölçüm elemanlarından (T-tipi termoelemanlar) oluşmaktadır. Deney düzeneği ve sistemdeki cihazlara ait detaylı bilgiler için yazarların önceki çalışmalarına bakılabilir [20]–[22]. Deneylerin yapılışı ve test bölgesine ait detaylar aşağıda belirtilmiştir.

- Deneylere başlamadan önce, atımlı ısı borusunun vakumlama işleminin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda bir vakum pompası ile PHP'nin iç hacmi vakumlanır.



Şekil 1. (a) Deney düzeneğinin şematik resmi ve (b) kullanılan ısı borusuna ait üç boyutlu çizim

- Akış döngü hattı aktif hale getirilir: Şekil 1b'de görüldüğü gibi PHP; buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu olmak üzere üç farklı bölümden oluşur. Yoğuşturucu bölümü, akışkanın, buharlaştırıcı bölümünden aldığı ısıyı dışarıya aktardığı bölümdür. Burada dışarıdan kasıt bir ısı alıcıdır. Isı alıcı olarak iki parçalı bir yapı kullanılmıştır. 10 mm kalınlığındaki polikarbon bir plakaya akış kanalları açılmış ve 2 mm kalınlığındaki bakır bir plaka ile montajı yapılmıştır. Isı alıcının bakır yüzeyi, PHP'nin yoğuşturucu olarak adlandırılan bölümünün altına yerleştirilmiştir. Böylece, etkin bir ısı alıcı tasarlanabilmiştir. Isı alıcı, teflon gövdenin içine açılan yuvaya yerleştirilmiş olup, sistemin montajlı halinde, PHP sadece bakır yüzey ile

temas etmektedir. Isı alıcı borulama hattı içinde yer almaktadır. Borulama hattında, Şekil 1a'da görüldüğü gibi, sirkülasyon suyunun sıcaklık ve debisini kontrol edebilecek cihazlar bulunmaktadır. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümünden aktarılan ısıyı belirlemek için ısı alıcı içinden geçen akışkanın debisinin ve giriş-çıkış sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ısı alıcı içerisinden sabit debide (20ml/dk) ve giriş sıcaklığında (20°C) sirkülasyon suyu geçirilmektedir. Isı alıcının giriş ve çıkışına birer adet T-tipi termoeleman yerleştirilmiştir. Bu termoelemanlar veri toplama sistemine bağlıdır.

- İstenilen dolum oranındaki iş akışkanını PHP içerisine doldurulur: İş akışkanını olarak, farklı hacimsel oranlarda karıştırılan metanol-etanol akışkan çiftleri kullanılmıştır.
- Isı borusu istenilen eğim açısına ayarlanır: Test bölgesi, 15 derecelik açılarla hareket ettirelebilen bir düzenek üzerine konumlandırılmıştır. Bu sayede, bu çalışma kapsamında incelenen 0° (yatay konum), 45° ve 90° (buharlaştırıcının altta yer aldığı düşey konum) eğim açıları kolay bir şekilde ayarlanabilmektedir.
- Güç kaynağı aktif edilerek, PHP'ye ısı gücü uygulanır: Yukarıda da belirtildiği üzere PHP'nin bölümlerinden birisi de buharlaştırıcı bölümüdür. PHP'nin buharlaştırıcı bölümü, bakırdan imal edilmiş bir ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiştir. İlgili plaka içerisine iki adet kartuş ısıtıcı yuvası açılmış ve buralara kartuş ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Kartuş ısıtıcılar, bir güç kaynağı ile bağlantılı olup, PHP hassas bir şekilde istenilen ısı gücü değerine maruz bırakılabilmektedir. Burada, uygulanan ısı gücü açısından, bir sıcaklık üst limiti (110°C) kabul edilmiştir. Isıl gücün ilk değeri 5W'tır. 5W değerinde sistem kararlı hale gelene kadar beklenir. Sonra sıcaklık ölçümleri ve eş zamanlı akış görüntüleri alınır. Isıl güç 5W artırılarak benzer işlemler tekrarlanır. Her bölümde 3 termoeleman vardır. Buharlaştırıcı bölümündeki ortalama sıcaklık değeri yaklaşık 110°C olduğu zaman ilgili deney sonlandırılır. Bu aşamada çıkan ısı gücü değeri, üst sıcaklık limiti kabulümüz doğrultusunda, ilgili çalışma koşulları altındaki maksimum ısı gücü değerine karşılık gelir.
- Diğer bir çalışma koşuluna geçilerek, yukarıda belirtilen prosedür tekrarlanır. Bu çalışmada, üç farklı eğim açısında, üç farklı hacimsel karışım oranında, tek bir dolum oranında ve farklı ısı yükleri altında çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılan ısı borusu; 4 mm kalınlığında ve toplam uzunluğu 116 mm, genişliği ise 55.5 mm olan bakır bir plaka üzerine açılan 2 mm derinliğinde birbiriyle bağlantılı kanallar içermektedir. Kanalların olduğu bölgenin toplam uzunluğu ve genişliği ise, sırasıyla, 100 mm ve 39.5 mm'dir. Isı borusu hem sızdırmaz bir iç hacim içermeli, hem de akış görüntülemeye olanak sunmalıdır. Bu nedenle, belirtilen bakır plakanın üzeri şeffaf cam kapak ile kapatılmıştır. Hem sıcaklık ölçüm elemanlarının yerleştirilebilmesi hem de akış görüntüleme için gerekli olan yapının sağlanabilmesi için bakır plakanın toplam kalınlığı, genişliği ve uzunluğu akış kanal bölgesine kıyasla daha fazladır. Bu çalışmada kullanılan ısı borusu, asimetrik kanal formuna sahip düz plaka tipi kapalı döngülü atımlı ısı borusudur. Isı borusu toplam sekiz döngü veya bir başka ifade ile birbiriyle bağlantılı on altı paralel kanaldan oluşmaktadır. Bir döngüde yer alan kanal çiftlerinden biri 2 mm genişliğinde, diğeri ise 1 mm genişliğinde olup, paralel kanalların kesit alanları birbirinden farklıdır (Şekil 1b). Deney düzeneği ve test bölgesine ait detaylar, yazarların önceki çalışmalarında kapsamlı bir şekilde sunulmuştur [20]–[22].

B. HESAPLAMA YÖNTEMİ ve DENEYSEL BELİRSİZLİK DÜZEYLERİ

DeneySEL hesaplama adımları, atımlı ısı borusu literatüründe [11], [23], genel kabul gören ve yazarların önceki çalışmalarında da [20]–[22] belirtilen formda sunulmuştur. Bu kapsamda, bir PHP'nin en önemli ısı performans göstergelerinden biri toplam ısı direnç veya sadece ısı direnç olarak adlandırılan terimdir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{th} = \frac{(T_e - T_c)}{Q} \quad (1)$$

Burada, T_e ve T_c , sırasıyla, buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki termoelemanlardan okunan sıcaklıkların ortalamasını, bir başka ifade ile ortalama buharlaştırıcı ve yoğusturucu sıcaklıklarını temsil etmektedir. Paydada yer alan Q terimi ise, güç kaynağı ile uygulanan ısı güç ile soğutma suyu (ısı alıcıdan geçen) tarafından uzaklaştırılan bir başka ifade ile yoğusturucu bölgesinden ısı alıcıya aktarılan ısı gücün ortalama değerini ifade etmekte olup, aşağıdaki gibi gösterilir:

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

Burada, güç kaynağı ile uygulanan ısı güç Q_i ; yoğusturucu bölgesinden ısı alıcıya aktarılan ısı güç ise Q_r ile gösterilmiştir. Eşitlik 2'nin kullanılmasıyla, ısı direnç hesabında ısı kayıplar da dikkate alınmıştır [10]. Güç kaynağı ile uygulanan ısı güç değeri, ilgili cihazın dijital ekranından hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Isı alıcıya aktarılan ısı güç ise, ısı alıcı giriş ve çıkışındaki su sıcaklığı ve suyun debisi kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenir:

$$Q_r = \dot{m} c_p (T_{ho} - T_{hi}) \quad (3)$$

Burada; T_{ho} ve T_{hi} , sırasıyla, soğutma suyunun ısı alıcıdan çıkış ve ısı alıcıya giriş sıcaklıkları; \dot{m} ve c_p ise, sırasıyla, soğutma suyunun kütleli debi ve özgül ısısını ifade etmektedir.

Isıl direnç yönelik ifadeler, yukarıda verilmiştir; ancak açıkça belirtilmelidir ki PHP'ler için ısı performans göstergesi sadece ısı direnç değildir. Atımlı ısı borusunun çalışmaya başlama performansı, buharlaştırıcı sıcaklığı ve (tanımlı üst sıcaklık limiti dahilinde) maksimum ısı güç değeri de diğer performans göstergeleri olarak değerlendirilmelidir.

Çalışma kapsamında belirsizlik analizi de yapılmıştır. Belirsizlik analiziyle ilgili tüm detaylar ve formüller yazarların önceki çalışmasında [21] belirtilmiştir. Burada, bu çalışmaya özgü veri tabanı üzerinden, sadece belirsizlik değerleri sunulacaktır. Hesaplama prosedüründen de görüldüğü üzere, türetilen tek parametre ısı dirençtir ve Kline ve McClintock [24] tarafından tanımlanan belirsizlik analizine göre, ısı direnç için hesaplanan belirsizlik düzeyi aralığı $\pm\%4.1 - \%5.6$ 'dır.

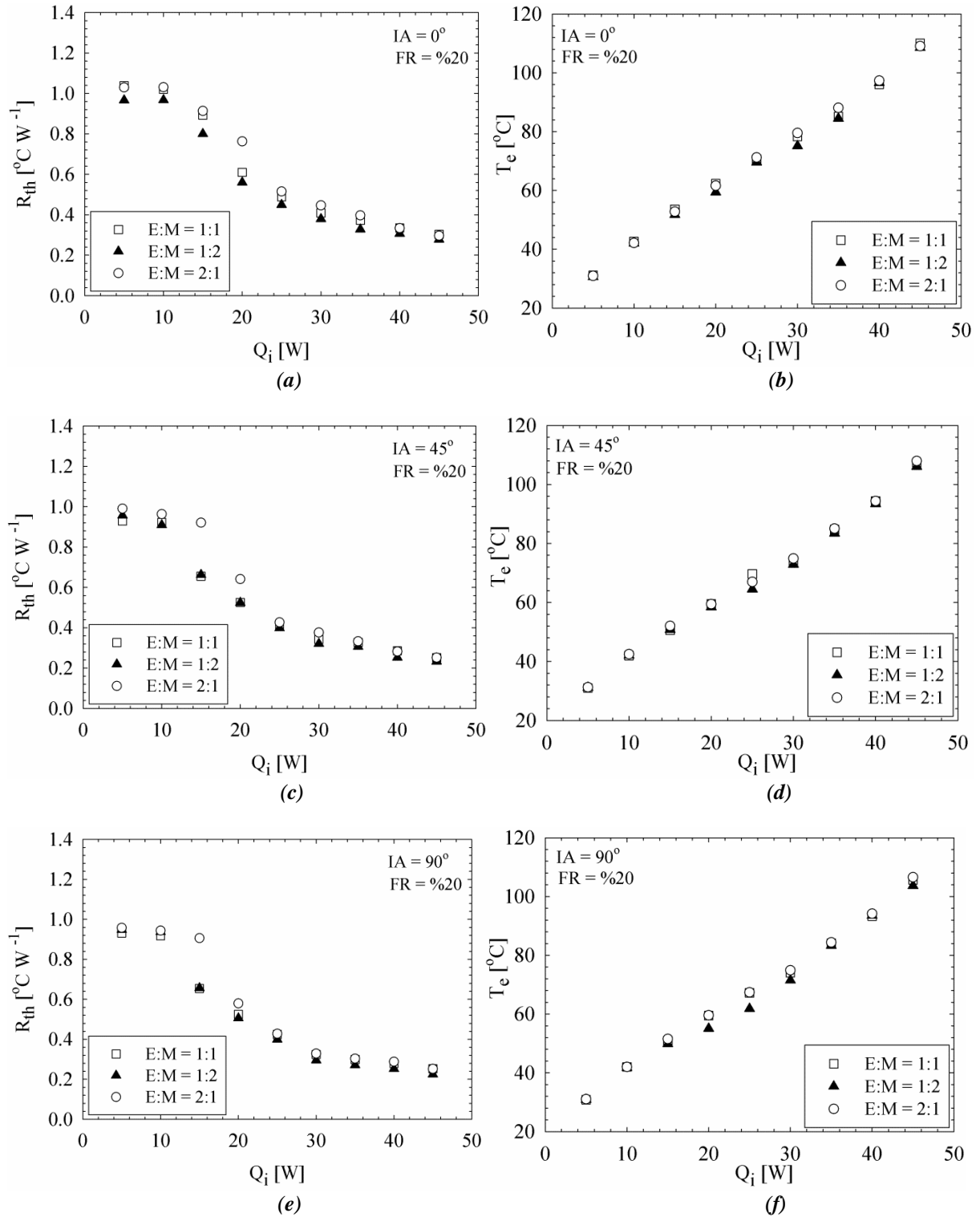
III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında; iş akışkanı olarak etanol ve metanol karışımının kullanıldığı, farklı kesit alanına sahip paralel kanallardan oluşan (bir döngüde farklı kesite sahip kanal çifti) düz plaka tipi atımlı ısı borusunda farklı hacimsel karışım oranları (E:M = 1:1, 1:2 ve 2:1), eğim açıları (0° , 45° ve 90°) ve ısı yükleri altında deneyler yapılarak; karışım oranı, ısı yük ve eğim açısının PHP performansı üzerindeki tekil ve/veya bütünlük etkileri incelenmiştir. Dolum oranı %20 olacak şekilde sabit tutulmuş olup, akış davranışı ve temel fiziksel mekanizma, yüksek hızlı akış görüntüleri (1000 görüntü/saniye) aracılığıyla analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular ve ilgili tartışma aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur.

A. ISIL GÜÇ ve KARIŞIM ORANI ETKİSİ

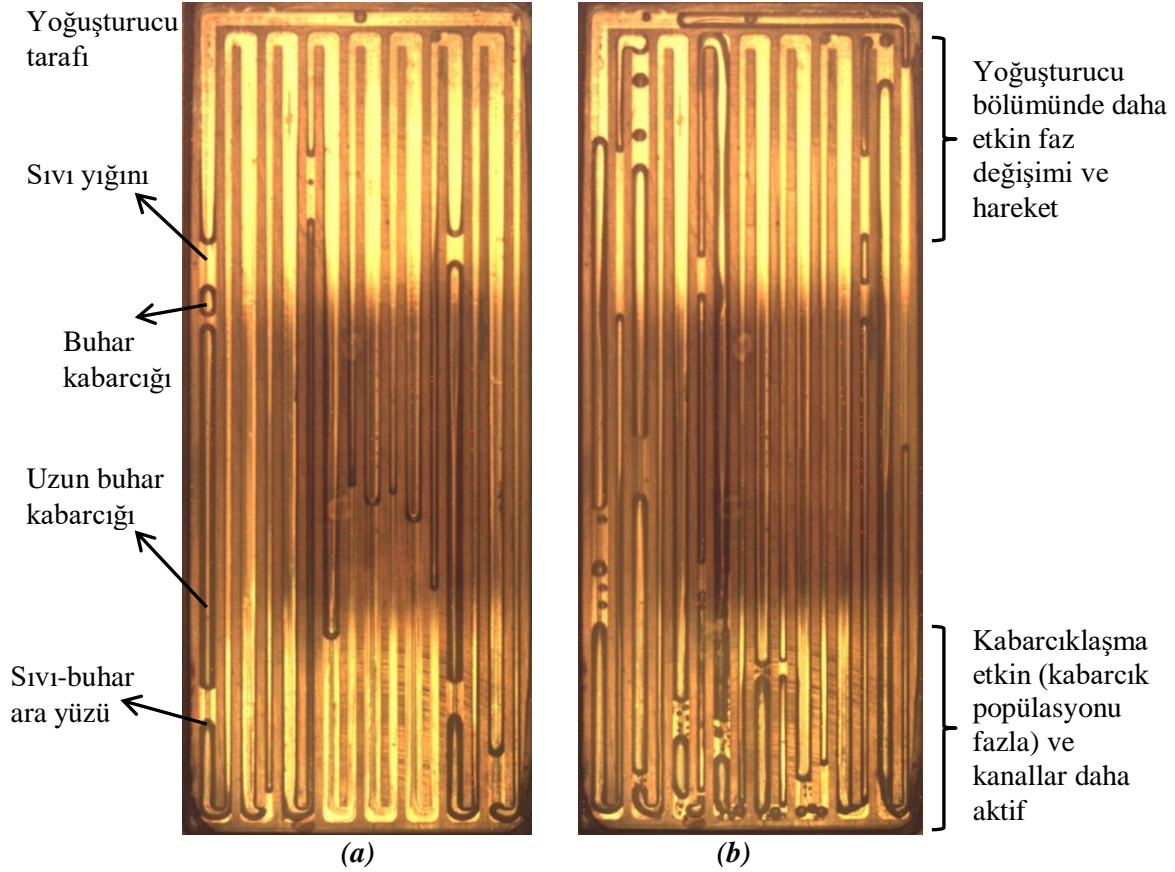
Şekil 2a-f'de, PHP'nin ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının farklı hacimsel karışım oranları için ısı güç ile değişimi verilmiştir. İlgili grafikler, 0° (Şekil 2a, b) 45° (Şekil 2c, d) ve 90° (Şekil 2e, f) eğim açıları için sunulmuştur. Öncelikle ısı güç etkisi üzerinde durulacaktır. Bu kapsamda, genel bir davranış olarak, belli bir ısı güç değerine kadar yatay eğilim gösteren ısı dirençte, ani bir azalma meydana gelmekte ve devamında ısı direnç değerleri artan ısı güç ile azalmaktadır. Isıl dirençte görülen ani azalma, PHP'nin çalışmaya başladığının göstergesidir. Ani düşüşün görece daha erken gerçekleşmesi veya bir başka ifade ile daha düşük ısı güç değerinde meydana gelmesi, bir PHP için çalışmaya başlama performansının görece daha iyi olduğu anlamına gelir. Burada, altı çizilmesi

gereken noktalardan birisi, PHP'nin çalışmasıyla ilgili veya daha açık bir ifade ile nasıl çalıştığı ile ilgili kesin yargıya varabilmek için akış görüntüleme çalışmalarının yapılması gerektiğidir. Özellikle, literatürde başla-dur hareketi [11, 25] olarak tanımlanan fiziksel olaylar sebebiyle, akışı görüntülemekten salt veri değişiminden çıkarılacak sonuçlar hatalı yorumlara yol açabilir.



Şekil 2. PHP'nin ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının farklı karışım oranları için ısı güç ile değişimi: (a) R_{th} , 0° , (b) T_e , 0° , (c) R_{th} , 45° , (d) T_e , 45° , (e) R_{th} , 90° ve (f) T_e , 90°

Yukarıda, genel karakter olarak, ısı direncin artan ısı güç ile azaldığı belirtilmişti. Basit bir şekilde ifade etmek gerekirse, atımlı ısı boruları, ısı olarak tetiklenen cihazlardır ve ısı etkiler sonucu açığa çıkan basınç farkları ve basınç çalkantıları sonucu çalışırlar (atım, salınım ve kısmi sirkülasyon hareketinin kaynağı). Dolayısıyla, literatürde de belirtildiği üzere [11], [14], [26], bu sonuç, artan ısı yük ile sürücü kuvvetin iyileşmesi ve buna bağlı olarak sirkülasyon hızının artması ile açıklanabilir. Buna karşın, atımlı ısı borularında salt tek fazlı bir akışın olmadığı vurgulanmalıdır. Bu sebeple, ısı güç artışıyla, akışkan ve geometrik özelliklerin bütünleşik etkisinin sonucu olarak ortaya çıkan kabarcık dinamiği ve akış desenleri de sonuçlar üzerinde etkin rol oynar. Bu kapsamda, Şekil 2e ve f'deki $IA=90^\circ$ ve $E:M=1:1$ koşulu için, 20W ve 45W için elde edilen görüntüler Şekil 3a ve b'de verilmiştir.



Şekil 3. $IA=90^\circ$ ve $E:M=1:1$ koşulları için akış görüntüleri: (a) 20W ve (b) 45W

Şekil 3'teki görüntülerde üst bölüm yoğuşturucu tarafını, alt bölüm ise buharlaştırıcı (ısı gücün uygulandığı bölüm) tarafını göstermektedir. Isıl yükün 20W'tan 45W'a artırılmasıyla akış yapısında belirgin fiziksel değişimler meydana gelmektedir. Buharlaştırıcı bölgesinde kabarcıklı kaynama olayı iyileşmekte ve çok daha fazla sayıda buhar kabarcığı oluşmaktadır. Ayrıca, daha yüksek sıcaklık altında oluşan buhar kabarcıkları sıvı içerisinde sönmülmeyen veya diğer buhar kabarcıklarına karışmadan varlığını sürdürebilmektedir. Şekil 3b'de, iki buhar kabarcığı arasında bulunan sıvı yığını içindeki mikro kabarcıklar, bu durumu net olarak göstermektedir. Kabarcık popülasyonunun artması ve ayrık (nispeten daha küçük) buhar kabarcıklarının kanallar içinde daha hızlı ve bağımsız hareket edebilmesi; (1) buharlaştırıcı bölümünden ısının daha etkin bir şekilde alınması, (2) akışın daha etkin bir şekilde karıştırılarak taşınımın iyileştirilmesi ve (3) buharlaştırıcı bölgesinden alınan ısının yoğuşturucu bölgesine daha etkin bir şekilde aktarılmasını sağlar. İnce sıvı filmiyle çevrili ayrık buhar kabarcıklarının yoğuşturucu bölgesinde daha fazla bulunması veya bir başka ifade ile daha aktif bir şekilde yoğuşturucu bölgesinde hareket etmesi, yoğuşturucu bölümdeki faz değişim proseslerini ve dolayısıyla ısı alıcıya olan ısı geçişini daha etkin hale getirmektedir. Dolayısıyla yukarıda da

belirtildiği üzere, artan ısı güç sonucu akışın hızlanmasına ek olarak; akış desenleri ve kabarcık dinamiği de ısı direncin azalmasında ve ısı performansının artmasında önemli rol oynamaktadır.

Şekil 2'den görüldüğü üzere, saf akışkanların karışım içindeki hacimsel oranı da sonuçlar üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yatay konumda (Şekil2a-b) daha belirgin olmakla birlikte, karışım içindeki metanol oranının artması ile ısı performansının arttığı görülmektedir. Buradaki değerlendirme, ısı direnç, çalışmaya başlama performansı ve buharlaştırıcı sıcaklığı üzerinden yapılmıştır. Tüm açışal yerleşimlerde, genel karakter olarak, en düşük ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığı değerleri E:M=1:2 için elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığı değerleri ise E:M=2:1 karışımı kullanıldığında elde edilmiştir. Ayrıca E:M=1:2 ve E:M=1:1 karışımları ile yüklenen ısı borusu 15W ısı yük altında çalışmaya başlarken; E:M=2:1 akışkanı ile yüklü ısı borusu 20W'ta çalışmaya başlamaktadır. İlgili ısı güç değerleri, belirtilen koşullar için kritik ısı güç değerleri olarak adlandırılabilir. Sonuçların altında yatan fiziksel mekanizmayı tam olarak açıklayabilmek için akışkan özellikleri ve akış görüntülerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, öncelikle, Tablo 1'de karışımı oluşturan her iki akışkana ait önemli termo-fiziksel özellikler sunulmuştur.

Tablo 1. Karışımı oluşturan akışkanlara ait önemli özellikler.

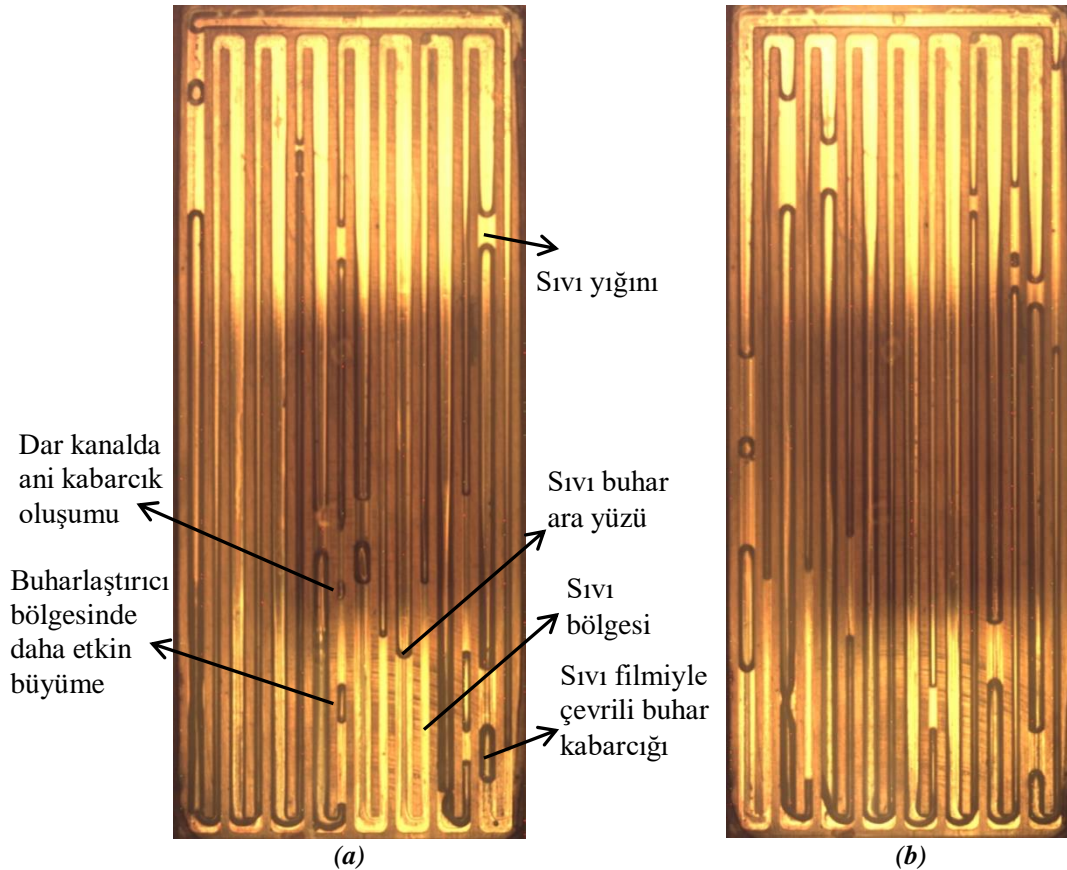
Özellikler (1 atm'de)								
Akışkan	Kaynama Noktası (°C)	Dinamik viskozite (x10 ³) (Pa s)	Buharlaştırma gizli ısısı (kJ kg ⁻¹)	Yüzey gerilmesi (x10 ³) (N m ⁻¹)	Isıl iletkenlik (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Yoğunluk (kg m ⁻³)	Özgül ısı (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	(dP/dT) _{sat} (x10 ³) (Pa °C ⁻¹)
Etanol	78.3	1.15	846	22.8	0.172	789	2.39	4.2
Metanol	64.7	0.6	1101	22.6	0.212	791	2.48	6.5

Açıklamalar:

(dP/dT)_{sat} 80°C için; diğer tüm özellikler ise 20°C için yazılmıştır [27].

Tablo 1'den görüldüğü üzere, metanolün buharlaştırma gizli ısısı, (dP/dT)_{sat} değeri ve ısı iletkenliği etanole kıyasla yüksekken; dinamik viskozitesi ve kaynama noktası düşüktür. Buna karşın, her iki akışkanın da yüzey gerilmesi, yoğunluk ve özgül ısı değerleri birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, etanol ve metanol birbiriyle karışabilir ve çalışma koşulları altında zeotropik özellikte (kaynama noktası sabit olmayan) bir karışım oluştururlar. Dolayısıyla, Han vd. [16] tarafından da belirtildiği üzere, zeotropik karışımlar için ısı transfer mekanizması ve akış yapısı çok daha karışıktır. Bileşenler arasındaki moleküler etkileşimler ve tekil olmayan termo-fiziksel özellikler bu durumda önemli rol oynamaktadır. Ancak, saf akışkanların termo-fiziksel özellikleri, sonuçların niteliksel olarak değerlendirilmesinde güvenilir bir araçtır. Dinamik viskozitenin düşük olması, mekanik enerji kaybının azalması ve dolayısıyla performansın artması anlamına gelir. Atımlı ısı boruları, temelde basınç farkı prensibine göre çalışan cihazlardır. Bu sebeple, (dP/dT)_{sat} değerinin yüksek olması, görece düşük sıcaklıkta, yüksek basınç farkı anlamına geleceği için PHP performansını artırıcı yönde etki edecektir. Zhu vd. [15] tarafından da ifade edildiği üzere, buharlaştırma gizli ısısının yüksek olması, buharlaştırıcı bölgesinde ısının daha iyi absorbe edilmesi anlamına gelir. Dolayısıyla, yüksek gizli ısı, hem daha düşük buharlaştırıcı sıcaklığı, hem de daha fazla miktarda ısı enerjinin yoğunlaştırıcı bölgesine aktarımı anlamına gelir (akışkanın yoğunlaştırıcı bölgesine hareketi sonucunda). Isı iletim katsayısının artması, iletimle ısı transferinin iyileşmesi anlamına gelir. Termo-fiziksel özelliklerin yukarıda belirtilen katkılarından dolayı, karışım içerisindeki metanol oranının artışı ile ısı performansının iyileşmesinin temel sebepleri büyük ölçüde anlaşılmaktadır. Buna karşın, akış görüntüleri ile fiziksel mekanizmanın daha detaylı incelenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, Şekil 4a ve b'de, IA=90° ve 25W koşulları altında, sırasıyla, E:M=1:2 ve E:M=2:1 karışımlarına ait akış görüntüleri sunulmuştur. Akış desenlerinin genel görünümü, belirtilen koşullar için, birbirine yakındır. Buradaki temel faktörlerden biri, her iki akışkanın yüzey gerilmesi değerinin, dolayısıyla da, kabarcık yoğunluğunun birbirine yakın olması şeklinde ifade edilebilir. Genel olarak, uzun kabarcıklı akış deseninin ve/veya kısmi halkasal akış deseninin baskın olduğu görülmektedir. Şekil 4'te görülen koyu çizgilerle çevrili bölümler, buhar kabarcıklarını göstermektedir. Koyu çizgiler, ilgili buhar kabarcığını çevreleyen sıvı filmidir. Dolayısıyla, etkin olan ısı transfer mekanizmalarından birisi de

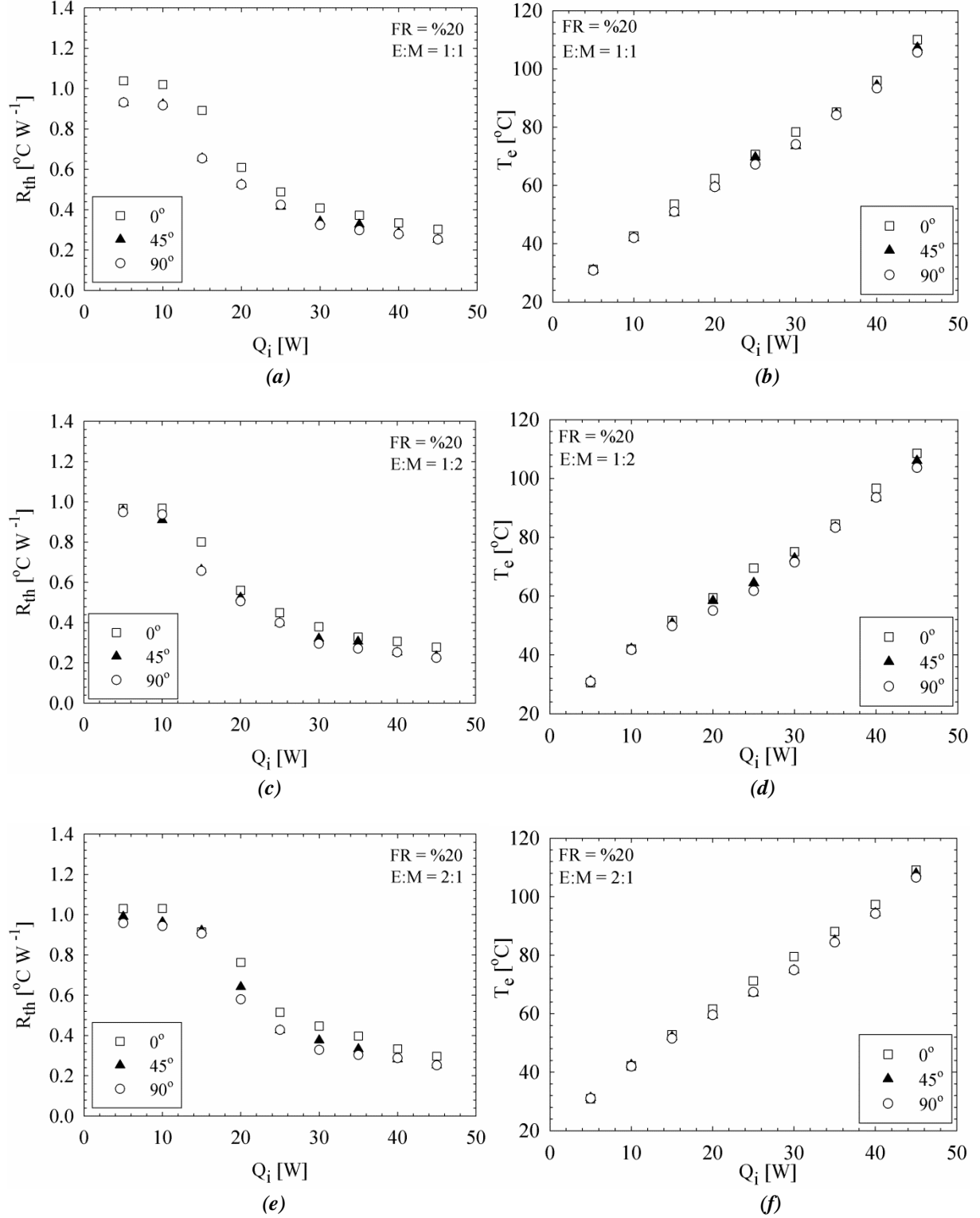
ince film buharlaşmasıdır. Şekil 4'teki koşullarda, ısı borusunun düşey olarak konumlandırılmış olması sebebiyle (yer çekimi kuvvetinin etkisiyle) sıvının bir miktarının buharlaştırıcı bölgesinde (alt bölüm) toplandığına ve üst bölgelerin çoğunlukla buharla kaplı olduğuna dikkat edilmelidir (dolum oranının %20 gibi oldukça düşük bir değerde olduğu önünde bulundurulmalıdır). Buna karşın, diğer önemli termo-fiziksel özelliklerin farklılıklarının sebep olduğu fiziksel olaylar, sonuçlar üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Metanolün fazla olduğu koşulda (Şekil 4a), dar kanallarda, daha baskın bir şekilde hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı oluşmaktadır. Bu olay, temelde buharlaştırıcı bölümü olmak üzere, aksel iletim ve akış bileşenlerinin ısı aktarımı sonucu adyabatik bölgede de gerçekleşmektedir. Oluşan kabarcık, aniden genişlemekte ve kanal kesiti küçük olduğu için sıkışarak her iki yönde de büyümeye çalışmaktadır. Böylece, hem buharlaştırıcı hem de yoğunlaştırıcı tarafına doğru farklı oranlarda basınç kuvveti uygulanır (yoğunlaştırıcı tarafına daha yüksek düzeyde). Metanolün kaynama noktasının etanole kıyasla düşük olması ve $(dP/dT)_{sat}$ değerinin ise belirgin bir şekilde yüksek olmasının, hızlı kabarcık büyüme kararsızlığı olayının daha etkin gerçekleşmesi üzerindeki rolü büyüktür. Atımlı ısı borularına özgü olarak, kanal içerisinde, yerel basınç değerlerinin zaman bağımlı olarak ani şekilde değiştiği de (artıp/azaldığı) göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, metanolün $(dP/dT)_{sat}$ değerinin yüksek olması, buharlaştırıcı bölümünde oluşan buhar kabarcıklarının, verilen bir sıcaklık değeri için (doymuş koşullarda) daha yüksek basınç kuvveti uyguladığı anlamına gelir. Buna ek olarak, metanolün dinamik viskozitesinin, etanolün dinamik viskozite değerinin yaklaşık %50'si kadar olması sebebiyle, buhar kabarcıkları arasında kalan sıvı yığınlar, kanallar içerisinde daha kolay hareket eder (mekanik enerji kaybı azalır). Metanolün hem kaynama noktasının düşük olması, hem de buharlaşma gizli ısısının yüksek olması sebebiyle, daha erken ve etkin oluşan buhar kabarcıkları, buharlaştırıcı bölgesinde daha fazla ısıyı absorbe eder. Ayrıca, dinamik viskozite ve $(dP/dT)_{sat}$ değerleriyle ilgili avantajlarının da etkisiyle, birim zamanda yoğunlaştırıcı bölgesine doğru daha fazla miktarda ısı aktarılabilir. Bu detaylı analizlerden dolayı, Şekil 4'te verilen koşullar için, E:M=1:2'nin ısı direnci ve buharlaştırıcı sıcaklığı, E:M=2:1'e kıyasla, sırasıyla, yaklaşık %7 ve 5.6°C daha düşüktür. Çalışma kapsamındaki tüm veri tabanı üzerinden değerlendirildiğinde ise E:M=1:2'nin ısı direnci E:M=2:1'e kıyasla yaklaşık %39'a kadar daha düşük değer alabilmektedir.



Şekil 4. $IA=90^\circ$ ve $IG=25W$ koşulları için akış görüntüleri: (a) E:M=1:2 ve (b) E:M=2:1

B. EĞİM AÇISI ETKİSİ

Eğim açısı etkisini gösterecek formda düzenlenen grafikler Şekil 5'te sunulmuştur. Çalışma kapsamında, 0° , 45° ve 90° olmak üzere üç farklı eğim açısında çalışılmıştır. Burada, en kritik açı değerleri, yatay (0°) ve dikey konumu (90° , alttan ısıtma) temsil eden PHP yerleşimleridir.



Şekil 5. PHP'nin ısı direnci ve buharlaştırıcı sıcaklığının farklı eğim açıları için ısı güç ile değişimi: (a) R_{th} , E:M=1:1, (b) T_e , E:M=1:1, (c) R_{th} , E:M=1:2, (d) T_e , E:M=1:2, (e) R_{th} , E:M=2:1 ve (f) T_e , E:M=2:1

Düşey konum, fiziksel olarak, yer çekimi kuvveti desteğinin maksimum düzeyde olduğu; yatay konum ise yer çekimi desteğinin olmadığı koşulu tanımlamaktadır. Yer çekimi kuvveti ise, üniform kanallı atımlı ısı borularında, iç basınç pertürbasyonların en önemli kaynaklarından biri olup; giriş bölümünde de özetlendiği üzere, bu kuvvetin eksikliği, az döngü sayısına sahip atımlı ısı borularının yatay konumda çalışmamasının birincil sebebidir. Buna karşın, Şekil 5'te verilen ısı direnç-ısı güç değişim grafikleri incelendiği zaman, tüm karışım oranları için, çalışma kapsamında kullanılan ısı borusunun, tüm eğim açısı değerlerinde başarılı bir şekilde çalışabildiği görülmektedir.

Isı borusunun, tüm karışım oranları için, neredeyse açıdan bağımsız şekilde çalışabilmesinin birincil sebebi, kullanılan ısı borusunun geometrisi ve bu geometriye bağlı olarak ortaya çıkan farklı sürücü kuvvetlerdir. Isı borusu, farklı kesite sahip paralel kanalların ardışık olarak sıralandığı değişken kesitli bir yapıdadır. Paralel kanalların farklı kesitlerde olması; kılcallık kuvveti, kayma kuvveti ve buharlaşma momentum kuvvetinin dengelenmemiş formlarının oluşumuna yol açar ve basınç çalkantılarını destekler. Böylece, az döngü sayısına sahip atımlı ısı borusu, yer çekimi desteği olmadan da çalışabilmektedir.

Yukarıda belirtildiği üzere, ikili karışımla yüklenen PHP, tüm karışım oranlarında çalışabilmektedir; ancak, Şekil 5'ten de görüldüğü üzere, açısal değişime bağımlılık karışım oranıyla da ilişkilidir. Açısal bağımsızlık açısından en iyi performans da, ısı performansında olduğu gibi, E:M=1:2 için elde edilmiştir. Sonuç olarak, hacimsel karışım oranı veya bir başka ifade ile ikili karışım içerisinde yer alan akışkanların oranı değiştiğinde, açıdan bağımsız çalışabilme performansı iyileştirilebilir.

IV. SONUÇ

Bu deneysel çalışmada, düşük bir doluluk oranında ikili karışımlarla yüklü, üniform olmayan kanal profiline sahip düz plakalı kapalı döngülü atımlı bir ısı borusunun ısı performansını ve akış davranışını incelenmiştir. Bir önceki bölümde detaylı olarak yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, önemli sonuçlar, aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Tüm çalışma koşullarında, genel bir davranış olarak, belli bir ısı güç değerine kadar yatay eğilim gösteren ısı dirençte, ani bir azalma meydana gelmekte ve devamında ısı direnç değerleri artan ısı güç ile azalmaktadır. Isı dirençte görülen ani azalma, PHP'nin çalışmaya başladığının göstergesidir.
- Akışın artan ısı güç sonucu hızlanmasına ek olarak, akış desenleri ve kabarcık dinamiği de ısı direncin azalmasında ve ısı performansının artmasında önemli rol oynamaktadır.
- Karışım içindeki metanol oranının artması ile ısı performansının arttığı görülmektedir. Tüm açısal yerleşimlerde, genel karakter olarak, en düşük ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığı değerleri E:M=1:2 için elde edilmiştir. Buna karşın, en yüksek ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığı değerleri ise E:M=2:1 karışımını kullanıldığında elde edilmiştir. Ayrıca E:M=1:2 ve E:M=1:1 karışımları ile yüklenen ısı borusu 15W ısı yük altında çalışmaya başlarken; E:M=2:1 akışkanı ile yüklü ısı borusu 20W'ta çalışmaya başlamaktadır. Çalışma kapsamındaki tüm veri tabanı üzerinden değerlendirildiğinde, E:M=1:2'nin ısı direnci, E:M=2:1'e kıyasla yaklaşık %39'a kadar daha düşük değer alabilmektedir.
- Isı direnç-ısı güç değişim grafikleri incelendiği zaman, tüm karışım oranları için, çalışma kapsamında kullanılan ısı borusunun, tüm eğim açısı değerlerinde başarılı bir şekilde çalışabildiği görülmektedir.
- Isı borusu, farklı kesite sahip paralel kanalların ardışık olarak sıralandığı değişken kesitli bir yapıdadır. Paralel kanalların farklı kesitlerde olması; kılcallık kuvveti, kayma kuvveti ve buharlaşma momentum kuvvetinin dengelenmemiş formlarının oluşumuna yol açar ve basınç çalkantılarını destekler. Böylece, az döngü sayısına sahip atımlı ısı borusu, yer çekimi desteği olmadan da çalışabilmektedir.
- İkili karışımla yüklenen PHP, tüm karışım oranlarında çalışabilmektedir; ancak, açısal değişime bağımlılık, karışım oranıyla da ilişkilidir. Açısal bağımsızlık bakımından, en iyi

performans E:M=1:2 için elde edilmiştir. Sonuç olarak, hacimsel karışım oranı değiştirilerek, açıdan bağımsız çalışabilme performansı iyileştirilebilmektedir.

- Çalışma kapsamında ortaya çıkan önemli sonuçlardan birisi de %20 gibi oldukça düşük bir dolum oranında, atımlı ısı borusunun, açıdan bağımsız olarak ve yüksek performansla çalışabildiğinin gösterilmiş olmasıdır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 217M341).

V. KAYNAKLAR

- [1] H. Akachi, "Structure of a heat pipe," U.S. Patent 4 921 041, May, 1, 1990.
- [2] M. Mameli, L. Araneo, S. Filippeschi, L. Marelli, R. Testa, and M. Marengo, "Thermal response of a closed loop pulsating heat pipe under a varying gravity force," *International Journal of Thermal Science*, vol. 80, pp. 11–22, 2014.
- [3] V. Ayel, L. Araneo, A. Scalambra, M. Mameli, C. Romestant, A. Piteau, M. Marengo, S. Filippeschi, and Y. Bertin, "Experimental study of a closed loop flat plate pulsating heat pipe under a varying gravity force," *International Journal of Thermal Science*, vol. 96, pp. 23–34, 2015.
- [4] L. Lv, J. Li, and G. Zhou, "A robust pulsating heat pipe cooler for integrated high power LED chips," *Heat Mass Transfer*, vol. 53, pp. 3305–3313, 2017.
- [5] M. Cheng, and J. Li, "Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles," *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020, Art. no. 101715.
- [6] P. Khalilmoghdam, A. Rajabi-Ghahnavieh, and M. B. Shafii, "A novel energy storage system for latent heat recovery in solar still using phase change material and pulsating heat pipe," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 2115–2127, 2021.
- [7] P. Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, and P. Terdtoon, "Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametric experimental investigations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 2009–2020, 2003.
- [8] S. Khandekar, N. Dollinger, and M. Groll, "Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: An experimental study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 707–719, 2003.
- [9] S. Jun, and S. J. Kim, "Comparison of the thermal performance and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, pp. 890–901, 2016.
- [10] G. Spinato, N. Borhani, and J. R. Thome, "Operational regimes in a closed loop pulsating heat pipe," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 102, pp. 78–88, 2016.
- [11] K. H. Chien, Y. T. Lin, Y. R. Chen, K. S. Yang, and C. C. Wang, "A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 5722–5728, 2012.
- [12] G. H. Kwon, and S. J. Kim, "Operational characteristic of pulsating heat pipes with a dual-diameter tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 184–195, 2014.

- [13] G. H. Kwon, and S. J. Kim, "Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 817–828, 2015.
- [14] Z. Wan, X. Wang, and C. Feng, "Heat transfer performances of the capillary loop pulsating heat pipes with spring-loaded check valve," *Applied Thermal Engineering*, vol. 197, 2020, Art. no. 114803.
- [15] Y. Zhu, X. Cui, H. Han, and S. Sun, "The study on the difference of the start-up and heat-transfer performance of the pulsating heat pipe with water-acetone mixtures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 77, pp. 834–842, 2014.
- [16] X. Han, X. Cui, Y. Zhu, T. Xu, Y. Sui, and S. Sun, "Experimental study on a closed-loop pulsating heat pipe (CLHP) charged with water-based binary zeotropes and the corresponding pure fluids," *Energy*, vol. 109, pp. 724–736, 2016.
- [17] X. Cui, Z. Qiu, J. Weng, and Z. Li, "Heat transfer performance of closed loop pulsating heat pipes with methanol-based binary mixtures," *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 76, pp. 253–263, 2016.
- [18] W. Wang, X. Cui, and Y. Zhu, "Heat transfer performance of a pulsating heat pipe charged with acetone-based mixtures," *Heat Mass Transfer*, vol. 53, pp. 1983–1994, 2017.
- [19] R. Xu, C. Zhang, H. Chen, Q. Wu, and R. Wang, "Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 137, pp. 31–41, 2019.
- [20] B. Markal, and R. Varol, "Thermal investigation and flow pattern analysis of a closed-loop pulsating heat pipe with binary mixtures," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, vol. 42, 2020, Art. no. 549.
- [21] B. Markal, and R. Varol, "Experimental investigation and force analysis of flat-plate type pulsating heat pipes having ternary mixtures," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 121, 2021, Art. no. 105084.
- [22] B. Markal, and K. Aksoy, "The combined effects of filling ratio and inclination angle on thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe," *Heat and Mass Transfer*, 2020. Available: <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02988-6>
- [23] K. S. Yang, Y. C. Cheng, M. C. Liu, and J. C. Shyu, "Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths," *Applied Thermal Engineering*, vol. 83, pp. 131–138, 2015.
- [24] S. J. Kline, and F. A. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *Mechanical Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 3–8, 1953.
- [25] H. Yang, S. Khandekar, and M. Groll, "Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 815–824, 2009.
- [26] X. Liu, X. Han, Z. Wang, G. Hao, Z. Zhang, and Y. Chen, "Application of an anti-gravity oscillating heat pipe on enhancement of waste heat recovery," *Energy Conversion and Management*, vol. 205, 2020 Art. no. 112404.
- [27] S. Shi, X. Cui, H. Han, J. Weng, and Z. Li, "A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 1219–1227, 2016.