



ISI BORUSU UYGULAMALARI VE SON GELİŞMELER

Heat Pipe Applications and Recent Developments

Fırat Özdemir
Özay Akdemir
Ali Güngör

ÖZET

Bu çalışmada enerji yönetimi konusunda önemli derecede etkin ve yaygın kullanım alanına sahip ısı borusu sistemleri detaylı olarak irdelenerek gerçekleştirilen literatür araştırmaları ile bu sistemlerin uygulamalarına yönelik çalışmalar ortaya konulmuştur. Isı borusu sistemleri pek çok farklı türde karşımıza çıkmakla birlikte çalışma şekilleri benzerlik göstermektedir. Çalışma kapsamında ısı borularının çalışma şekilleri aktararak farklı türlerinin incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile görülmektedir ki ısı borulu sistemler enerji konusunda daha uzun yıllar boyunca kendisine yer bulabilecek, geliştirilmeye açık, kullanışlı ve performanslı sistemler olarak uygulamalarda kullanılacaklardır.

Anahtar Kelimeler: Isı boruları, Nanoakışkanlar, Fıtil, Isı transferi

ABSTRACT

In this study, heat pipe systems, which are significantly effective and widely used in energy management, are examined in detail and literature researches and studies on the applications of these systems are revealed. Although the heat pipe systems come in many different types, they work similarly. Within the scope of the study, the working types of heat pipes were explained, and various types were examined. With this study, it is seen that heat pipe systems will be used in applications as systems that can find a place for many years in energy, open to development, useful and performance systems.

Key Words: Heat pipes, Nanofluids, Wick, Heat transfer

1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan insan nüfusu, teknolojik gelişmeler ve ilerleyen küreselleşme gibi etkenlerin katkısıyla enerji, insanlığın temel ihtiyaçları listesinde üst sıralara çıkmıştır. Günümüz dünyasında yeme, içme, barınma gibi temel ihtiyaçların arasında enerji de kendisine yer bulmuş durumdadır.

Yaşanan bu gelişmeler ışığında enerji üzerine yürütülen araştırmalar gün geçtikçe artmakta ve bu ihtiyaçların etkin bir şekilde karşılanabilmesi için pek çok çalışma yürütülmektedir. Resmi ve ticari kuruluşların büyük bir çoğunluğu fosil yakıt kullanmaktadır. Ancak günümüzde fosil yakıtların hem sınırlı olmaları hem de olumsuz çevresel etkileri açık ve net bir şekilde ortaya konmuş durumdadır. Bu nedenle enerji konusunda gerçekleştirilen ana akım araştırmalarında, yeni kaynak arayışları, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ve enerji tüketen sistemlerin verimliliğinin artırılması konularına yönelimler gerçekleşmektedir.

Enerji üzerine yürütülen çalışmalar incelendiğinde, enerjinin akılcı tüketiminin de yeni kaynakların araştırılması kadar yüksek öneme haiz bir konu olduğu görülmektedir. Enerji tüketiminde yaşanan kayıpların yoğun olduğu alanlardan biri de ısı transfer işlemleridir. Gerek ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinde gerekse diğer sistemlerde olsun ısı transfer işlemleri için enerji verimliliği önemli sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Isı transferi sırasında oluşan kayıplar sistemlerin toplam enerji verimliliğinde önemli etkiler oluşturmaktadır [1,2].

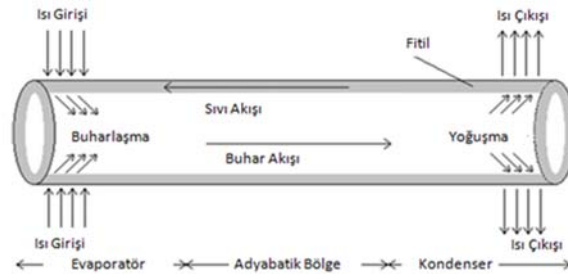
Bu çalışmada ısı transferinde yaygın olarak kullanılan sistemlerden ısı boruları üzerinde durulmuş ısı borusu türleri detaylı bir şekilde tanımlanarak literatürde bulunan güncel çalışmalara yer verilmiştir.

2. ISI BORULARI

Isı boruları, ısı enerjisi bir noktadan diğerine etkileyici özellikleri ile transfer eden cihazlardır. Bu yöntemle, yüksek miktarda ısı dışarıdan bir güç girdisine ihtiyaç duymaksızın ve neredeyse adyabatik bir biçimde aktarılabilir. Isı borularının tarihi incelendiğinde bu tip bir sistemin ilk olarak 1839 yılında patentlenen Perkin'in Hermetik Tüpü olduğu görülmektedir [3,4].

Isı boruları temelde evaporatör, kondenser ve adyabatik kısım olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Evaporatörde dış ortamdan alınan ısı ile buharlaşan çalışma akışkanı, oluşan buhar basıncı ile önce adyabatik bölgeye ardından kondensere ilerlemektedir. Kondenserde dış ortama ısı transferi gerçekleşmesi ile akışkan yoğunlaşmaktadır. Yoğuşma işlemi sonrasında sıvı faza geçen çalışma akışkanı yer çekimi etkisi ve fitil sayesinde önce adyabatik kısma ardından da evaporatör kısmına dönmektedir. Bu şekilde bir döngü tamamlanmakta ve ısı girdisi devam ettikçe döngü devam etmektedir. Şekil 1'de basit bir ısı borusu sisteminin şematik gösterimi verilmiştir [5].

Gerçekleştirilen literatür araştırmalarında ısı borusu sistemlerinin oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olduğu ve pek çok farklı uygulamaya olanak sağladığı görülmektedir. Isı borularının kurutma işlemlerinde kullanımını Doğan yaptığı çalışmada incelemiştir [6]. Yıldırım ve Özsoy çalışmalarında ısı borularından yararlanılarak kaldırım buzlanmasının önlenmesini hedefleyen bir çalışma yürütmüşlerdir [7]. Literatürde bulunan ısı borusu konusundaki uygulamalar takip eden bölümlerde değerlendirilmiştir.



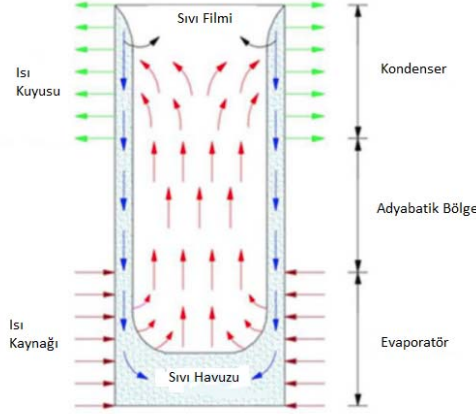
Şekil 1. Isı borusu şematik gösterimi [5].

2.1. Isı Borusu Türleri

2.1.1. Termosifonlar

Termosifon sistemleri dünya genelinde en yaygın kullanıma sahip pasif su ısıtma sistemleridir. Genellikle sıcaklığın 0°C değerinin altına düşmediği iklimlerde kullanımı uygun olsa da bu sınırlamayı aşabilen sistemler de mevcuttur. Bu sistemler geleneksel ısı borusu sistemlerine benzer şekilde; kondenser, evaporatör ve adyabatik bölgelerden oluşmaktadır, ancak bu sistemlerde iç içe geçmiş iki boru bulunmaktadır. Evaporatör bölgesinde dış ortamdan aldığı ısı ile buharlaşan iş akışkanı yoğunluk farkının etkisi ile iç borudan, sırsıyla adyabatik ve kondenser bölgelerine ilerler. Kondenserde dış ortama ısı vererek yoğunlaşan akışkan dış boru ile iç boru arasındaki kılcal boşluktan evaporatör bölgesine döner ve bu döngü sisteme ısı girişi çıkışı olduğu sürece devam eder. Sıcaklığın

0°C değerinin altına düştüğü iklim bölgelerinde ise ısı borusu sistemi içerisinde ihtiyaca uygun antifriz akışkanları kullanılabilir. Bu durumda ısıtılan katkılı su doğrudan kullanıma uygun olmayacağından ısı sistemden bir ısı değiştirici yardımı ile çekilir ve bu sistemler kapalı döngülü termosifon sistemleri olarak adlandırılır [8-10]. Termosifon sistemlerine ait şematik gösterim şekil 2.'de verilmektedir.



Şekil 2. Termosifon sistemlerin şematik gösterimi [9].

Sbaity ve diğerleri çalışmalarında sadece termosifon ve termosifon kondenselerinin deniz suyu pompalanarak soğutulduğu modlarda çalışan bir kombine pompalı termosifon sistemi geliştirmişler ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sistemin 23°C dış ortam sıcaklığında 1750 W, 10°C dış ortam sıcaklığında ise 2900 W ısı transfer kapasitesine sahip olduğu ve 23°C deniz suyu ile soğutma yapıldığında sistem kapasitesinin 3000 W değerine kadar çıkması ile birlikte yıllık bazda %54 enerji tasarrufu sağlandığı kaydedilmiştir [11].

Anand ve diğerleri yürüttükleri çalışmada termosifon sistemlerinde kanat eklentisinin performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır, sadece dıştan ve hem içten hem dıştan kanat entegrasyonlu sistemler geliştirmişler ve bu sistemleri R134a ile Al₂O₃-R134a (nanoakışkan) akışkanları ile deneysel olarak incelemişlerdir. Tek yüzeyli kanatlı sistemlerde geleneksel sistemlere kıyasla sırası ile %26.8 ve %44.8 oranlarında performans artışı gözlemlenmiştir. Nanoakışkan kullanımı ile çift yüzeyli kanatlı sistemin tek yüzeyli kanatlı ve geleneksel sistemlere göre sırasıyla %38.9 ve %55.3 daha yüksek performans değerleri sergilediğini ortaya koymuşlardır [12].

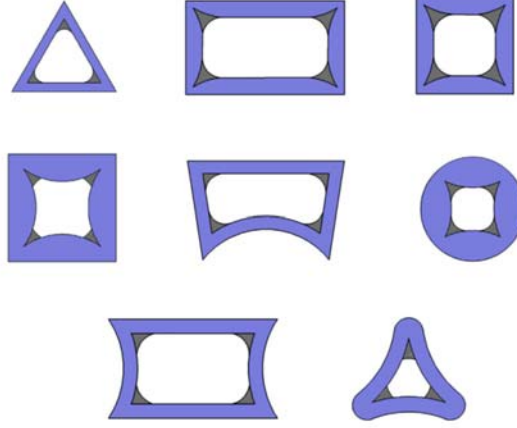
Ponomarev ve diğerleri geliştirdikleri termosifon destekli, kaynama akışkanı içermeyen soğutma sistemini kendinden yönlendirmeli bir ısı değiştirici olarak kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde iş akışkanı olarak su ve etanol kullanılmış ve %15-35 arasında değişen doluluk oranlarında yürütülen testler sonucunda en iyi sonuçların elde edildiği %25 doluluk oranı için sıcak yüzeyin 392.3 K değerinden su ile 375.8 K, etanol ile 365.9 K sıcaklığa düşürüldüğünü belirtmişlerdir [13].

2.1.2. Mikro Isı Boruları

Günümüz elektronik teknolojisinin büyük bir kısmında, çok küçük ölçülere sahip aşırı hassas bileşenler kullanılmaktadır. Bu bileşenlerin kullanım anında bileşenin çalışma performansını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi aşırı ısınma olarak karşımıza çıkmaktadır. Oldukça hassas olan bu cihazların doğru ve etkin bir şekilde soğutulmadığı durumlarda, yüksek maliyetli ve bazen geri dönülemez hasarlar oluşabilmektedir. Bu tarz cihazların yeterli ve doğru bir biçimde soğutulmasını amaçlayan mikro yapıllı soğutma sistemleri üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Mikro ısı boruları bu çalışmalar içerisinde ön plana çıkan sistemler arasında yer almaktadır.

Bir mikro ısı borusu, sıvı ve buhar fazındaki akışkanı eş zamanlı olarak bünyesinde barındıran, fittsiz ve dairesel olmayan bir kesit alanına sahip bir kanaldan oluşur, mikro ısı borularında kullanılan boru

kesitlerine ait görsel şekil 3.'te verilmiştir. Bu sistemlerde sıvı fazdaki akışkanın evaporatör bölgesine geri dönüşü, boru kesitinin sahip olduğu keskin köşelerden kaynaklanan kılcallık etkisi ile sağlanmaktadır. Bir mikro ısı borusu 100 mikrona kadar olan hidrolik çap ve birkaç santimetreye kadar olan uzunluk değerlerine sahip olabilmektedir [8,14].



Şekil 3. Mikro ısı borularına ait çeşitli kesit görselleri [14].

Zhao ve diğerleri geliştirdikleri 520 mm-20 mm – 20 mm ölçülerindeki ısı borusunda iş akışkanı olarak amonyak kullanmışlar ve sistemin 175 W ısı transfer değerine ve 7.06×10^5 W/mK ısı direnç değerinde çalıştığını ortaya koymuşlardır. Bu sistemin eğim açısının artması ile ısı transfer kapasitesinin arttığı ve 120°C, 92 bar şartlarına kadar güvenilir çalıştığı belirtilmiştir [15].

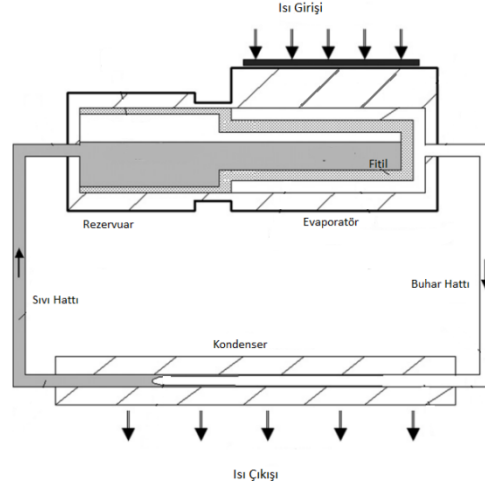
Liu ve diğerleri mikro ısı borusu üzerine kanat entegrasyonu gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada çeşitli kanat boyutlarını değerlendirmişler ve ideal değerlerin 15 mm yükseklik 10.1 mm kanat aralığı ve 0.25 mm kalınlık olduğunu ortaya koymuşlardır [16].

Ren ve diğerleri “u” şekilli mikro ısı boruları ile Li-ion bataryaların ön ısıtılmasını gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, ısı borusu entegrasyonu ile 32 W elektrik gücü ile sıcaklığın -20°C'den 0°C'ye 26 dakikada ısıtıldığı ve bu sayede bataryalarda meydana gelen kapasite ve voltaj düşüşlerinin önüne geçildiğini belirtmişlerdir [17].

Diao ve diğerleri yaptıkları çalışmada mikro ısı borusu demetinden oluşan bir gizli ısı depolama sistemi geliştirmişler ve sistemin şarj ve deşarj hızlarının sıcaklık ile değişimini incelemişlerdir. Sistemi şarj eden ısıtma suyu sıcaklıklarında meydana gelen 10°C'lik sıcaklık artışı ile sisteme giren ısı miktarında %41.3 artış ve soğutma suyunda 10°C'lik düşüş ile sistemden çıkan ısı miktarında %48 artış sağlandığı kaydedilmiştir [18].

2.1.3. Döngülü Isı Boruları

Döngülü ısı boruları, geleneksel ısı boruları ile benzer bir şekilde, iş akışkanının yoğuşma ve buharlaşma döngüsü ile bir ortamdan diğerine ısı transferi sağlayan cihazlardır. Bu sistemlerde akışkan hareketini tetikleyen kuvvet kılcal pompalama kuvvetleridir. Bir döngülü ısı borusu temel olarak altı bileşenden meydana gelir [8,19]. Bunlar; evaporatör, rezervuar, fitil, buhar hattı, sıvı hattı ve kondenserdür (şekil 4.. Rezervuar kısmı bir döngülü ısı borusu sistemindeki en büyük hacme sahip olan bölümdür ve iki görevi mevcuttur. Bunlar, sirkülasyonda aşırı akışkan dolaşımını engellemek amacı ile fazla akışkanı barındırmak ve evaporatör fitiline sürekli akışkan akışını sağlayacak akışkan kaynağını oluşturmaktır. Bu sistemlerde bir tanesi evaporatörde (birincil) bir tanesi ise rezervuarda (ikincil) olmak üzere iki adet fitil bulunur. Sistemdeki sıvı ve buhar hatları küçük çap değerlerine sahip kılcal kanallardan meydana gelir ve kondenser bölgesinde ısı kuyusuna doğru bir şekilde ısı transferini gerçekleştirecek bir ısı değiştirici bulunur. Döngülü ısı boruları hem geleneksel ısı borularının hem de kılcallık etkilerinin özelliklerinden eş zamanlı olarak faydalanabilmeleri yönü ile potansiyel gösteren sistemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar [8,19].



Şekil 4. Döngülü ısı borusu şematik gösterimi [19].

Shuailing ve diğerleri yardımcı kompresörlü ve pompa destekli bir döngülü ısı borusu sistemi geliştirmişler ve sistemi üç modda deneysel olarak test etmişlerdir. Dış ortam sıcaklığının 15°C olduğu deneysel çalışmalarda kombine sistemin yardımcı kompresörlü ve pompa destekli çalışma modlarına göre sırası ile %52.5 ve %78 daha iyi sıcaklık etkinliği gösterdiğini belirtmişlerdir [20].

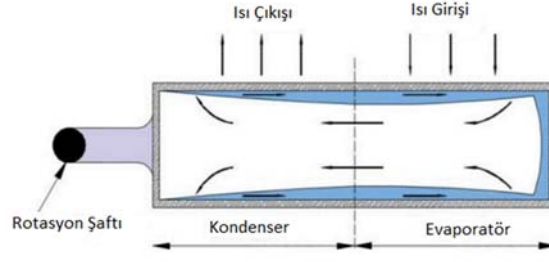
S. Liu ve diğerleri pompa tahrikli ısı borusu, ısı pompası ve entegre modlarda çalışabilen bir döngülü ısı borusu sisteminin deneysel incelenmesi sonucunda entegre modda her şartta daha iyi performans sergilendiği ve ısı pompalı sistemin 8.7-35.8°C şartlarında kabul edilir sonuçlar ortaya koyduğunu gözlemlemişlerdir [21].

C. Liu ve diğerleri 1m² evaporatör alanına sahip bir döngülü ısı borusu sistemini uzay teleskop lenslerinde sıcaklık dağılımını dengelemek amacı ile test etmişler ve sistemin 10 W ısı güç girdisi değerinde çalışmaya başladığını, dengesiz ısı kaynağı sıcaklıklarında bile evaporatör sıcaklık dağılımının çok az etkilendiğini, düşük ısı güç girdilerinde sistemin düşük ısı direnç değerlerine sahip olduğunu ve 80-120 K sıcaklık aralığında sistemin normal bir şekilde çalıştığını belirtmişlerdir [22].

L. Liu ve diğerleri geliştirdikleri buhar tahrikli enjeksiyon ve kaynama odası bileşenlerine sahip döngülü ısı borusu ile kompansasyon odasında meydana gelen ısı kayıplarının önüne geçerek sistemdeki ısı akısını artırmayı hedefleyen bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen bu sistem ile 238 W ısı güç girdisi ile kaynama havuzu ısısının 507 W, ısı akısının da 105 W/m² değerlerine ulaştığı belirtilmektedir [23].

2.1.4. Dönel Isı Boruları

Yaygın olarak bilindiği üzere ısı borusu türleri arasındaki temel farkı oluşturan parametre, iş akışkanının kondenserdan evaporatöre geri dönüşünü sağlayan işlemlerdir. Şekil 5.'te de görüleceği üzere dönel ısı boruları iş akışkanının geri dönüşünü sağlamak için merkezkaç kuvvetlerinin etkisinden faydalanan ısı borusu sistemleridir. Bu yönleri ile kılcallık kuvvetlerinin kullanımından kaynaklanan sınırlamaların ötesine geçebilen sistemler olarak gösterilebilmektedir. Dönel ısı boruları da geleneksel ısı borusu sistemlerinde olduğu gibi; evaporatör, adyabatik bölge ve kondenser bölümlerinden meydana gelmekle birlikte yaygın olarak kullanılan iş akışkanlarının da kullanımına uygun yapıdadırlar. Bu sistemler radyal ve eksenel dönel ısı boruları olarak iki gruba ayrılırlar. Bu sistemler uygun bir döndürme ekipmanı ile doğru bir şekilde birleştirildiklerinde ısı borularına dair pek çok sınırlamanın üstesinden gelinilmekte fakat dönme ekseninde meydana gelebilecek balans ve titreşim gibi olumsuz etkiler ise verim değerlerini oldukça düşük seviyelere getirebilmektedir [8,24].



Şekil 5. Dönel ısı borusu şematik gösterimi [24].

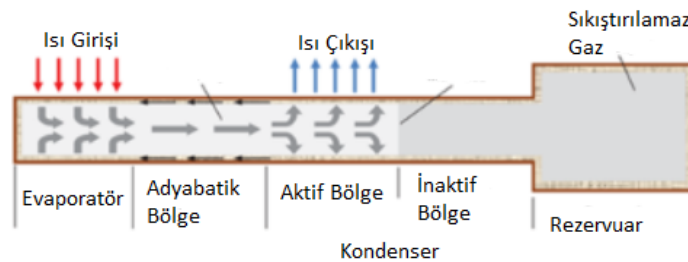
Wang ve diğerleri yürüttükleri deneysel çalışmalarda döngülü ısı borularında dönme hareketinin, sistemdeki sıcaklık dalgalanmalarını ve evaporatör ısı direncini düşürdüğünü göstermişlerdir. Çalışmada 0 rpm hızında yani dönme hareketi yokken sistemin oldukça kararsız olduğunu ancak dönme hareketinin başlaması ile sistem performansının gözle görülür ölçüde iyileştiğini deneysel olarak ortaya koymuşlardır [25].

Xie ve diğerleri çalışmalarında bir dönel ısı borusu ve boş boru ısı transfer sistemini eş ölçü ve ortam şartları altında deneysel olarak kıyaslamışlar ve gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlardan dönel ısı borusu sisteminde evaporatör kondenser sıcaklık farkının 4°C olduğunu belirlemişler ve bu değer diğer sistem için 27°C olduğunu belirtmişlerdir [26].

Hassan ve Harmand çalışmalarında değişen sıcaklık farkları ve dönme hızları için dönel ısı borusunun performansını ortaya koymak amacı ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde iş akışkanı olarak saf su ve saf suyun Cu, CuO, Al_2O_3 karıştırılmasıyla oluşturulmuş nanoakışkanları kullanmışlardır. Sistem performansının 20°C sıcaklık farkı ve 300 rpm dönme hızı şartlarında, 5 nm partikül boyutlu ve %0.04 derişimli Cu-Su nanoakışkan durumunun saf suya göre %56 arttığını gözlemlemişlerdir [27].

2.1.5. Değişken İletkenlikli Isı Boruları

Isı boruları ilk ortaya çıktıkları dönemde sabit iletkenlik değerine sahip cihazlar olduklarından dolayı belirli bir çalışma sıcaklığına ayarlanamamaktaydı. Isı borularının ihtiyaç duyulan çalışma ortamına göre kontrol edilmesini amaçlayan çalışmalar sonucunda değişken iletkenlikli ısı boruları (DİİB) ortaya çıkmıştır [28]. Şekil 6.'da şematik gösterimi verilen DİİB'lerinde kondenser kısmına bir miktar sıkıştırılmaz gaz eklenmesi ile ısı borusunun iletkenliği azaltılabilmektedir. Kondenser dış ortam sıcaklığının artması ile sıkıştırılmaz gaz hacminin azalması ve bu sayede yoğunlaşma hacminin artması ile ısı borusu iletkenliğinin artması sağlanabilmektedir. Aynı şekilde kondenser dış ortam sıcaklığının azaltılması sistem üzerinde yukarıdakinin tam tersi etki yaratmaktadır. Değişken iletkenlikli ısı borularında ısı borusu iletkenliği ve dolayısıyla çalışma sıcaklığı kontrolü kondenser dış ortam sıcaklığının değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Bu sistemlerde, çalışma prensipleri gereği, kontrol sınırları iş akışkanının doyma eğrisine, çalışma sıcaklığına, dış ortam sıcaklığına ve buhar-sıvı hacimlerinin oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sistemde sıkıştırılmaz gaz yerine akışkan kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Değişken iletkenlikli ısı borusu sistemleri yaygın olarak hava-uzay uygulamalarında kullanılmaktadır [29,30].



Şekil 6. Değişken iletkenlikli ısı borusu şematik gösterimi [30].

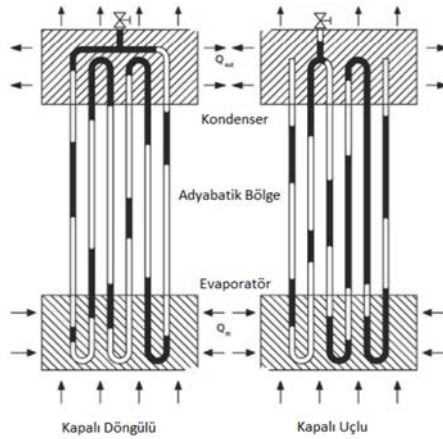
Law ve diğerleri çalışmalarında bir Stirling ısı-güç üretimi sisteminde DİIB entegrasyonu ile ısı salınımı kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Güç sisteminde ısı deposu olarak faz değiştiren malzeme kullanımı ve ısı borusu entegrasyonu ile sistem performansının yüksek derecede arttığını gözlemlemişlerdir [31].

Leriche ve diğerleri araç motorlarında ilk çalışma ardından motor yağının ısıtma soğutma döngüsünü düzenlemek amacıyla DİIB entegrasyonunu gerçekleştirmişler ve eğim açısının ısı borusu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. DİIB entegrasyonu ile geleneksel ısı borularına göre oldukça yüksek performans artışlarının olduğu gözlemlenirken ısı borusunun en iyi çalışma şartlarının da 45° ve 2° eğim açılarında gerçekleştiğini gözlemlenmişlerdir [32].

Shafii ve diğerleri ısı borusu evaporatör uzunluğu değişimini incelemek için bir demir bilya ve mıknatıs kullanılan bir DİIB sistemi tasarlamışlardır ve farklı ısı güç girdileri ve eğim açılarında deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda evaporatör uzunluğu azaldıkça sistem performansının azaldığını ve her bir uzunluk için ısı güç girdisi arttıkça performansın arttığını ve ideal eğim açısının 80° olduğunu belirlemişlerdir [33].

2.1.6. Titreşimli Isı Boruları

Titreşimli ısı boruları (TIB), bir kılcal boru içerisinde, akışkanın aynı anda hem sıvı hem de buhar fazında bulunduğu ısı transfer cihazlarıdır. Akışkan kılcal boru içerisinde farklı uzunluklarda bir sıvı tıkaçı ve bir buhar baloncuğu sıralaması ile bir zincir oluşturmaktadır. Bu sistemlerde iş akışkanı sisteme giren ısının etkisi ile buharlaşmaya başlamakta ve bu da kılcal borular içerisindeki buhar basıncının artması ile buhar baloncuklarının sıvı tıkaçlarını kondenser bölgesine doğru gitmesini sağlamaktadır. Isınarak kondenser bölgesine gelen iş akışkanı burada dış ortama ısı vermekte ve yoğunlaşarak düşen buhar basıncı sayesinde iş akışkanı tekrar evaporatör bölgesine dönmektedir. Akışkanın evaporatör bölgesine dönüşü ile tekrar buhar basıncı artmakta ve bu döngü sisteme ısı giriş çıkışı olduğu sürece devam etmektedir. Akışkanın kondenser ve evaporatör bölgeleri arasında yaptığı bu sürekli döngüsel harekete titreşim (osilasyon) hareketi denilmektedir ve sistem adını buradan almaktadır [35-37].



Şekil 7. Kapalı döngülü ve kapalı uçlu titreşimli ısı borusu şematik gösterimi [35].

Bir titreşimli ısı borusu evaporatör bölgesi, adyabatik bölge ve kondenser bölgeleri olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir.

Titreşimli ısı boruları temelde üç tip olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar; açık uçlu, kapalı uçlu ve kapalı döngülü titreşimli ısı boruları şeklindedir. Kapalı döngülü ve kapalı uçlu TIB sistemlerine ait şematik şekil 7.'de verilmektedir.

Açık uçlu titreşimli ısı borularında sistem iş akışkanının çevre basıncına açık olduğu bir şekilde çalışmaktadır ve bu tasarım, dolum öncesi vakumlama işlemine olanak tanımaması ve çalışma

şartlarını yüksek oranda sınırlaması yönüyle daha az tercih edilen bir tür olarak karşımıza çıkmaktadır. Kapalı uçlu TIB'larında ise bu tarz sınırlamalar azalırken titreşim hareketinin her bir kanalın kendi içinde titreşim döngüsünün gerçekleşmesi şeklinde ortaya çıkması bu sistemi sınırlayan temel özellik olarak görülmektedir. Kapalı döngülü TIB'larında bütün sistem tek bir kılcal kanalın bir döngü oluşturabileceği şekilde oluşturulması bütün kanal boyunca döngüsel bir akışa imkân sunmakta ve ısı transfer oranı arttıkça sistem sınırlamalarının da büyük ölçüde ortadan kalktığı görülmektedir [35-37].

Titreşimli ısı borularının yukarıda belirtilen üç temel tipine ek olarak; tek dirsekli, çok dirsekli, üç boyutlu, düzlemsel plakalı şekilde birçok farklı tipin uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir.

Kiritkumar ve diğerleri yaptıkları çalışmada kanal yapısının TIB performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 2 mm x 2 mm kare kesitli, 5 mm x 5 mm kare kesitli ve 2 mm çapında dairesel kesitli TIB'larında su, etanol, metanol ve aseton akışkanlarını iş akışkanları olarak kullanmışlar ve farklı doluluk oranlarında ısı güç girdilerini ve eğim açılarını deneysel olarak incelemişlerdir. En düşük ısı direnç değeri olan 0.39 °C/W değerinin %60 doluluk oranında aseton iş akışkanı ile 100 W ısı güç girdisi için 2 mm x 2 mm kesitli TIB için dikey yönlendirilmesi ile elde ettiklerini belirtmişlerdir [38].

Y. Zhou ve diğerleri tasarladıkları TIB sistemini hacimsel olarak farklı konsantrasyon oranlarına sahip grafen nanoakışkanı ile değişen doluluk oranları ve ısı güç girdileri için deneysel olarak incelemişler ve en iyi sonuçların %2 derişimde, %83.6 doluluk oranında ve 80 W ısı güç girdisinde elde ettiklerini belirtmişlerdir [39].

Ji ve diğerleri çalışmalarında titreşimli ısı borularında kullanılan Al₂O₃ nanoakışkanının, partikül boyutundaki değişimin ısı transfer kapasitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 50 nm, 80 nm, 2.2 mikrometre ve 20 mikrometre ortalama partikül boyutuna sahip nanoparçacıklar ile hazırlanan Al₂O₃-Su iş akışkanları çalışma kapsamında kullanılmıştır. Deneysel nanopartikül ilavesi ile titreşimli ısı borusu performansında çok ciddi değişimler gerçekleştiğini ortaya koymuşlar ve bütün parçacık boyutları için ilk çalışma performansının arttığını ancak en iyi performans değerlerinin 80 nm parçacık boyutunda elde edildiğini belirtmişlerdir [40].

Qu ve Wu farklı nanoakışkanların titreşimli ısı borusu performansı üzerindeki etkilerini yaptıkları deneysel çalışmayla araştırmışlardır. Çalışmada SiO₂-Su ve Al₂O₃-Su nanoakışkanlarının farklı derişimleri için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda ısı borusunun doluluk oranı %50 olarak ayarlanırken nanoakışkan derişiminin SiO₂-Su için %0-0.6 ve Al₂O₃-Su için %0-1.2 arasında değiştiği belirtilmektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, Al₂O₃ nanoakışkan kullanımı ile ısı borusu ısı direncinin %25.7 oranında azaldığı ancak SiO₂ nanoakışkan kullanımında ısı borusu performansının olumsuz etkilendiği görülmektedir [41].

Jamshidi ve diğerleri çalışmalarında geliştirdikleri titreşimli ısı borusu sisteminde gümüş-su, TiO-Su ve saf su iş akışkanları ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda ısı direnç değerleri TiO-Su nanoakışkanının %40 doluluk oranı için 0.8 K/W ve Ag-Su nanoakışkanının %50 doluluk oranı için 0.9 K/W ve saf suyun %40 doluluk oranı için 1.15K/W olarak belirtilmiştir [42].

3. ISI BORULARINDA KULLANILAN FİTİL YAPILARI

Bir ısı borusu sisteminde fitil yapısının başlıca görevleri kondenserde yoğuşan akışkanın evaporatöre dönüşünün sağlanması ve iş akışkanının evaporatör yüzeyini tamamen ıslatmasına olanak sağlamasıdır. Bir fitil yapısının bulundurulması gereken özellikler aşağıda verilmektedir.

Yüksek Kılcallık Etkisi: Isı borularında kullanılan fitillerin performans karakteristikleri sundukları gözenekli yapı ile oluşan kılcallık etkisiyle doğrudan ilişkilidir ve yüksek basınç değerleri ortaya koymalıdır.

Geçirgenlik: Sıvı akışına dik yönde geniş iç gözenekliliği sağlayarak sıvı akış direncini düşürmelidir,

Yüksek Isıl İletkenlik: Isı borusu sistemlerinde ısı iletkenliğinin yüksek olması her bileşende olduğu gibi fitil yapısında da yüksek öneme sahiptir [43, 3].

Isı borularında kullanılan fitil yapıları yukarıda belirtilen özellikler göz önünde bulundurularak çeşitli yapılarda karşımıza çıkmaktadır. Fitil yapıları genel olarak homojen ve kompozit fitiller olarak iki ana başlık altında ele alınmaktadır. Homojen fitil yapıları tek tip malzemedен üretilirken kompozit yapılar iki veya daha fazla malzemenin aynı anda kullanılması ile üretilirler. Homojen ve kompozit fitil yapı örnekleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Homojen ve Kompozit fitil yapıları [43-45].

Homojen Fitil Yapıları	Kompozit Fitil Yapıları
Elek Teli	Kompozit Elek
Metal Sinterleme	Elek Teli Kaplı Yiv
Eksenel Yiv	Levha
Paralel ve Yarım Ay	Tünel
Arter	

Literatürde ısı borularında kullanılan fitil yapılarının incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar sinterleme, kanal tipi, elek teli olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilmektedir [46].

Santos ve diğerleri seramik tozunun yüzeye sinterlenmesi ile 1-3 µm gözenek boyutlarına sahip 50 gözeneklilik değerine sahip fitil yapısı geliştirmişlerdir. Bu yapının geçirgenlik değerinin $3.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ olduğunu belirtmişlerdir [47].

Ma and Peterson üçgen kesitli kanal tipi fitil yapısını deneysel olarak incelemişlerdir. Tepe açısının 60° olarak ayarlandığı deneysel çalışmalar sonucunda, tepe açısının ısı transfer performansına doğrudan etki eden bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır [48].

Stroes and Cotton, çalışmalarında üçgen kesitli ve sinüsoidal kanal tipi fitil yapılarını karşılaştırmalı olarak incelemişler ve üçgen kesitin daha iyi kılcallık etkileri göstermesi karşısında sinüsoidal yapının ısı transfer yüzeyini artırarak daha yüksek ısı akısı değerleri sağlayabildiğini ifade etmişlerdir [49].

Brautsh and Kew paslanmaz çelik malzemedен ürettikleri elek teli fitil yapısı üzerine yürüttükleri çalışmada, ısı akısının artması ile fitil üzerinde baloncuklar oluştuğunu ve bu durumun da ısı borusu içerisinde bölgesel kurumalara sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Fitil kalınlığının artırılması ile bölgesel kurumaların engellenebildiğini ancak bu sefer de ısı iletkenliğinin düştüğünü belirtmişlerdir [50].

4. ISI BORULARINDA KULLANILAN AKIŞKANLAR

Isı borularında kullanıma uygun pek çok akışkan mevcut olmakla birlikte uygun akışkanın belirlenmesinde ilk olarak dikkat edilmesi gereken nokta çalışma sıcaklığı aralığıdır. Yaklaşık bir çalışma sıcaklık aralığı sistemin çalışma koşulları dikkate alınarak belirlenerek uygun akışkanlar belirlenmelidir [51]. Tablo 2'de ısı borularında kullanılan bazı akışkanlar ile ilgili termofiziksel özellikler verilmektedir. Çalışma sıcaklık aralıklarında farklı akışkanların uygunlukları durumunda aşağıda belirtilen durumlar dikkate alınarak diğer belirtilen özelliklerle ilgili uygunluklar belirlenmelidir [6].

Akışkan seçimlerinde dikkate alınması gereken özellikler:

Fitil ve ısı borusu malzemesinin uyumlu çalışması,

İyi derecede ısı kararlılık,

Fitil ve ısı borusu duvarının ıslatabilirliği,

Buhar basıncının çok yüksek ya da çalışma sıcaklığı aralığının altına inecek kadar düşük olmaması,

Yüksek gizli ısı,

Yüksek ısıl iletkenlik,

Düşük sıvı ve buhar viskozitesi değerleri,

Yüksek yüzey gerilimi,

Kabul edilebilir donma ve akma sıcaklıkları şeklinde özetlenebilir.

Tablo 2. Isı borularında kullanılan akışkanlar ve özellikleri.

İş Akışkanı	Donma Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Çalışma Aralığı (°C)
Helyum	-271	-261	(-271)-(-269)
Nitrojen	-210	-196	(-203)-(-160)
Amonyak	-78	-33	(-60)-(100)
Pentan	-130	28	(-209)-(120)
Aseton	-95	57	(0)-(120)
Metanol	-98	64	(10)-(130)
Flutek PP2	-50	76	(10)-(160)
Etanol	-112	78	(0)-(130)
Heptan	-90	98	(0)-(150)
Su	0	100	(30)-(200)
Toluen	-95	110	(50)-(200)
Flutek PP9	-70	160	(0)-(225)
Termeks	12	257	(150)-(350)
Civa	-39	361	(250)-(650)
Sezyum	29	670	(450)-(900)
Potasyum	62	774	(50)-(1000)
Sodyum	98	892	(600)-(1200)
Lityum	179	1340	(1000)-(1800)
Gümüş	960	2212	(1800)-(2300)

Tablo 3. Isı borularında kullanılan nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmalar.

Akışkan	Partikül Boyutu (nm)	Isı Transfer Artışı (%)	Ref.
Cu/EG	10	40	[58]
Cu/Su	75-100	23.8	[59]
Cu/ Su	100	78	[60]
Fe/EG	10	18	[61]
Ag/Toluen	60-80	16.5	[62]
Cu ₂ O/Su	200	24	[63]
Au/Etanol	4	1.3	[64]
Fe ₃ O ₄ / Su	10	38	[65]
TiO ₂ / Su	15	30-33	[66]
Al ₂ O ₃ / Su	20	20	[67]
CuO/ Su	33	11.5	[68]
SiC/ Su	25	15.9	[69]
NCTs/Motor Yağı	20-50	30	[70]
NCTs/PolyOil	25	160	[71]
NCTs/EG	15	19.6	[72]
Su/FC-72	9,8	52	[73]
Al ₂ O ₃ /Su	56	32.5	[74]
SiO ₂ /Su	10	20	[75]
Fe ₂ O ₃ /Kerosen	20	19	[76]
Diamond/Su	50	36	[77]

Son yıllarda nano-akışkanların iş akışkanı olarak kullanılması durumundaki sonuçları inceleyen birçok çalışma yapılmaktadır. Nano akışkan terim olarak nanometre boyutunda katı parçacıklar ihtiva eden katı-sıvı malzemeler olarak ifade edilmektedir. Carbidler, nitritler, saf metaller ve metal oksitler nano akışkan oluşturmada kullanılan katı malzemelere örnek gösterilebilirken su, etilen glikol ve motor yağı da baz akışkan örnekleri olarak verilebilmektedir. Nano akışkanlar; nükleer reaktörler, biyomedikal, ulaşım, gibi pek çok alanda kullanılmakla birlikte ilk çıkışları ısı iletkenlik artışı amacıyla yürütülen çalışmalarda görülmektedir [52-55].

Farklı partikül boyutlarına sahip nano akışkanların ısı borularında kullanılması durumunda baz akışkana göre ısı transfer miktarlarındaki artış oranları deneysel çalışmalarla belirlenmiştir [56,57]. Tablo 3'te ısı borularında kullanılan nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aktarılmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, ısı boruları ile ilgili genel değerlendirmeler yapılarak ısı borusu türleri, yapıları ve özellikleri hakkında detaylı incelemeler yapılmıştır. Gerçekleştirilen literatür araştırmaları ile ısı borusu uygulamalarındaki mevcut durum ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aktarılmıştır. Sonuç olarak enerji transferinde ısı borusu sistemlerinin birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan ve gelecekte kullanım potansiyelinin artacağı sistemler olacağı yapılan araştırma çalışmalarıyla görülmektedir.

Çalışma kapsamında elde edilen değerlendirmeler aşağıda verilmektedir.

Isı borusu sistemleri ısı geri kazanımı uygulamalarında yüksek verim değerlerine ulaşılmasını sağlayan cihazlardır.

Farklı akışkanların kullanımı ile farklı ihtiyaçların karşılanmasına imkân sağlayarak geniş bir alanda kendilerine yer bulabilmektedirler.

Değişken iletkenlikli ısı boruları tek bir sistemle farklı kapasitelerde kullanılabilmeleri ile zaman içinde meydana gelen ihtiyaçlarda tek bir sistem ile çözüm sunabilmektedirler.

Titreşimli ısı boruları üretim ve tasarım kolaylıkları ile uzay uygulamalarından kriyojenik uygulamalara kadar birçok alanda akılcı çözümler sunabilmektedirler.

Sonuç olarak ısı boruları sistemleri pek çok yönü ile enerji sistemlerinde gerçekleştirilen ısı transfer uygulamalarında uygun, tercih edilebilir çözümler sunabilmekte ve farklı uygulama alanlarında geliştirilmeye açık cihazlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ARSLAN, F., UZUN, A. Yenilenebilir Enerji Yatırımlarının Sosyal Kabul Boyutu. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 51, 95-116, 2016.
- [2] KILIÇ, F. Ç. Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 671, 28-40, 2015.
- [3] PETERSON, G. P. An Introduction to Heat Pipes Modelling Testing and Applications. John Wiley and Sons, USA, 368, 1994.
- [4] SILVERSTEIN, C. C. Design and Technology of Heat Pipes For Cooling and Heat Exchange. Hemisphere Publishing Corporation, USA, 378, 1992.

- [5] CHAN, C. W., SÍQUEİROS, E., LİNG-CHİN, J., ROYAPOOR, M., ROSKİLLY, A. P. Heat Utilisation Technologies: A critical Review of Heatpipes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 615-627, 2015.
- [6] DOĞAN, H. Isı Borulu Güneş Kolektörü ile Kurutma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (5), 921-925, 1999.
- [7] YILDIRIM, R., ÖZSOY, A. Toprak Kaynaklı Isı Borularıyla Kaldırımdaki Buzlanmanın Önlenmesinin Isıl Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(4), 591-596, 2018.
- [8] ZAHOURİ, B. *Heat Pipe Design and Technology*. Springer, USA, 513, 2016.
- [9] DİNG, T., CHEN, X., CAO, H., HE, Z., WANG, J., Lİ, Z. Principles of Loop Thermosyphon and Its Applications. *Renewable and Sustainable Energy*, 150, 2021.
- [10] ANAND, R. S., JAWAHAR, C. P., SOLOMON, B. A., BELLOS, E. A Review of Experimental Studies on Clyndrical Two-Phase Closed Thermosyphon Using Refrigerant for Low Temperature Applications. *International Journal of Refrigeration*, 120, 296-313, 2020.
- [11] SBAİTY, A. A., LOUAHLİA, H., MASSON, S. L. Performance of a Hybrid Thermosyphon Condenser for Cooling a Typical Data Center Under Various Climatic Constraints. *Applied Thermal Engineering*, 202, 2022.
- [12] ANAND, R. S., JAWAHAR, C. P., SOLOMON, B. A., DAVID, S., BELLOS, E., SAİD, Z. Experimental Investigations on Modified Thermosyphons Using R134a/ Al₂O₃ and Comparative Machine Learning Analysis. *Applied Thermal Engineering*, 212, 2022.
- [13] PONOMAREV, K. O., KUZNETSOV, G. V., ORLOVA, E. G., FEOKTİSTOV, D. V. Thermosyphon-assisted Cooling System Working in the Moderate Heat Flux Range. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32, 2022.
- [14] QU, J., WU, H., CHENG, P., WANG, Q., SUN, Q. Recent Advances in MEMS-based Micro Heat Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 294-313, 2017.
- [15] ZHAO, Y., WEİ, L., CAİA, J., LİANG, J. Experimental Performance of Ammonia-charged Micro Heat Pipe Array for Energy Saving. *Applied Thermal Engineering*, 186, 2021.
- [16] LİU, Z., QUAN, Z., ZHAO, Y., JİNG, H., YANG, M. Performance Optimization of Ice Thermal Storage Device Based on Micro Heat Pipe Arrays. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 134, 2022.
- [17] REN, R., ZHAO, Y., DİAO, Y., LİANG, L. Experimental Study on Preheating Thermal Management System for Lithium-Ion Battery Based On U-Shaped Micro Heat Pipe Array. *Energy*, 253, 2022.
- [18] DİAO, Y., QİN, Q., WANG, Z., ZHAO, Y., CHEN, C., REN, R. Numerical and Experimental Investigation on a Latent Heat Thermal Storage Device Featuring Flat Micro Heat Pipe Arrays With Offset Strip Fins. *Journal of Energy Storage*, 4, 2021.
- [19] LAUNAY, S., SARTRE, V., JOCELYN, B. Parametric Analysis of Loop Heat Pipe Operation: a Literature Review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 621–636, 2007.
- [20] SHUAİLİNG, L., GUOYUAN, M., XİAOYA, J., SHUXUE, X., GUOQİANG, W. Performance of a Mechanically-Driven Loop Heat Pipe Heat Recovery System. *Applied Thermal Engineering*, 207, 2022.
- [21] LİU, S., MA, G., XU, S., JİA, X., WU, G. Experimental Study of Ventilation System with Heat Recovery Integrated by Pump-Driven Loop Heat Pipe and Heat Pump. *Journal of Building Engineering*, 52, 2022.
- [22] LİU, C., CHEN, Y., FENG, D., ZHANG, H., MİAO, J., FENG, Y., YAN, Y., ZHANG, X. Experimental Study on Temperature Uniformity and Heat Transfer Performance of Nitrogen Loop Heat Pipe with Large Area and Multi-Heat Source. *Applied Thermal Engineering*, 210, 2022.
- [23] LİU, L., YUAN, B., YANG, X., CUI, C., WEİ, J. Experimental Study of a Novel Loop Heat Pipe with a Vapor-Driven Jet Injector and a Boiling Pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 184, 2022.
- [24] Lİ, S., LİU, Z. Parametric Study of Rotating Heat Pipe Performance: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 2020.
- [24] WANG, H., BAO, Y., LİU, M., ZHU, S., DU, X., HOU, Y. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Cylindrical Horizontal Axially Rotating Heat Pipe. *Applied Thermal Engineering*, 209, 2022.
- [25] XİE, M., XUE, Z., QU, W., Lİ, W. Experimental Investigation of Heat Transfer Performance of Rotating Heat Pipe. *Procedia Engineering*, 99, 746 – 751, 2015.
- [27] HASSAN, H., HARMAND, S. Effect of Using Nanofluids on the Performance of Rotating Heat Pipe. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 4445–4462, 2015.

- [28] BRENNAN, P. J., KROLICZEK, E. J. Heat Pipe Design Handbook. B&K Engineering, Maryland, 385, 1979.
- [29] MARCUS, B., D. Theory and Design of Variable Conductance Heat Pipes, NASA CR-2018, USA, 252, 1972.
- [30] GUO, Y., LIU, C., PAN, H., LYU, W., ZHANG, H., LIN, G., MIAO, J. Experimental Investigation and Multiparameter Analysis of Variable Conductance Heat Pipes. Applied Thermal Engineering, 202, 2022.
- [31] LAW, R., REAY, D. A., MUSTAFFAR, A., MCGLINC, R. J., UNDERWOOD, C., NG, B. Experimental Investigation into the Feasibility of Using a Variable Conductance Heat Pipe for Controlled Heat Release from a Phase-Change Material Thermal Store. Thermal Science and Engineering Progress, 7, 125–130, 2018.
- [32] LERICHE, M., HARMANDA, S., LIPPERT, M., DESMET, B. An Experimental and Analytical Study of a Variable Conductance Heat Pipe: Application to Vehicle Thermal Management. Applied Thermal Engineering, 38, 48-57, 2012.
- [33] SHAFİİ, B. M., AHMADİ, H., FAEGH, M. Experimental Investigation of a Novel Magnetically Variable Conductance Thermosyphon Heat Pipe. Applied Thermal Engineering, 126, 1–8, 2017.
- [34] DAVE, C., DANDALE, P., SHRIVASTAVA, K., DHAYGUDE, D., RAHANGDALE, K., MORE, N. A Review on Pulsating Heat Pipes: Latest Research, Applications and Future Scope. Journal of Thermal Engineering, 7(3), 387-408, 2021.
- [35] XU, Y., XUE, Y., QI, H., CAI, W. An Updated Review on Working Fluids, Operation Mechanisms, and Applications of Pulsating Heat Pipes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144, 2021.
- [36] NAZARİ, M. A., AHMADİ, H. M., GHASEMPOURA, R., SHAFİİ, M. B., MAHİAND, O., KALOGIROUF, S., WONGWISES, S. A Review on Pulsating Heat Pipes: from Solar to Cryogenic Applications. Applied Energy, 222, 475–484, 2018.
- [37] KHANDEKAR, S., CHAROENSAWAN, P., GROLL, M., TERDTON, P. Closed Loop Pulsating Heat Pipes Part B: Visualization and Semi-Emprical Modelling. Applied Thermal Engineering, 23, 2021-2033, 2003.
- [38] KİRİTKUMAR, M. K. Experimental Investigations of Flat Plate Oscillating Heat Pipe. PhD Thesis, Gujarat Technological University, Ahmedabad, 2020.
- [39] ZHOU, Y., CUI, X., WENG, J., SHI, S., HAN, H., CHEN, C. Experimental Investigation of the Heat Transfer Performance of an Oscillating Heat Pipe With Graphene Nanofluids. Powder Technology, 332, 371–380, 2018.
- [40] JI, Y., MA, H., SU, F., WANG, G. Particle Size Effect on Heat Transfer Performance in An Oscillating Heat Pipe. Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 724–727, 2011.
- [41] QU, J., WU, H. Thermal Performance Comparison of Oscillating Heat Pipes with SiO₂/water and Al₂O₃/water Nanofluids. International Journal of Thermal Sciences, 50, 1954-1962, 2011.
- [42] JAMSHİDİ, H., ARABNEJAD, S., SHAFİİ, M. B., SABOOHI, A., RASOULIAN, R. Experimental Investigation of Closed Loop Heat Pipe with Nanofluids. ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference, 19-23 June 2009, San Fransisco, California USA, 675-683, 2009.
- [43] ÇAYLIOĞLU, E., AKDEMİR, Ö. "Isı Borusu Uygulamaları.", Soğutma Dünyası, 51, 42-48, 2011.
- [44] CHİ, S. W. Heat Pipe Theory and Practice. Mc Grow Hill Book Company, USA, 242, 1976.
- [45] FAGHRİ, A. Heat Pipe Science and Technology, Taylor&Francis, USA, 874, 1995.
- [46] CHAN, C. W., SIQUEİROS, E., LİNG-CHİN, J., ROYAPOOR, M., ROSKİLLY, A. P. Heat Utilisation Technologies: A Critical Review of Heat Pipes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, 615–627, 2015.
- [47] SANTOS, P. H. D., BAZZO, E., BECKER, S., KULENOVİC, R., MERTZ, R. Development of LHPs with Ceramic Wick. Appl Therm Eng, 30, 1784-1789, 2010.
- [48] MA H B, PETERSON G P. "Experimental Investigation of The Maximum Heat Transport in Triangular Grooves". Journal of Heat Transfer, 118, 740-746.
- [49] STROES, G. R., CATTON, I. An Experimental Investigation of the Capillary Performance of Triangular Versus Sinusoidal Channels. Journal of Heat Transfer, 119, 851-853, 1997.
- [50] BRAUTSCH, A., KEW, P. A. Examination and Visualisation of Heat Transfer Processes During Evaporation in Capillary Porous Structures. Applied Thermal Engineering, 22, 815–24, 2002.
- [51] REAY, D., KEW, P., MCGLIN, R. J. Heat Pipes Theory, Design and Applications. Elsevier, UK, 251, 2014.
- [52] HUSSEİN, A. K., Lİ, D., KOLSİ, L., KATA, S., SAHOO, B. A Review of Nanofluid Role to Improve the Performance of the Heat Pipe Solar Collectors. Energy Procedia, 109, 417 – 424, 2017.

- [53] CHOİ, S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles Developments and Applications of Non-Newtonian Flows. *ASME FED*, 23,199-105, 1995.
- [54] Lİ, Y., ZHOU, J., TUNG, S., SCHNEIDER, E., Xİ, S. A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization. *Powder Technology*, 196, 89-101, 2009.
- [55] BEJAN, A., KARAUS, A. *Heat Transfer Handbook*. John WileyandSons. USA, 1481, 2003.
- [56] ALAWİ, O. A., SİDİK, N. A. C., MOHAMMED, H. A., SYAHRULLAIL, S. Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids in Heat Pipes: A Review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 56, 50–62, 2014.
- [57] NAZARİA, M. A., AHMADİB, M. H., GHASEMPOURA, R., SHAFİİ, M. B. How to Improve the Thermal Performance of Pulsating Heat Pipes: A Review on Working Fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 630–638, 2018.
- [58] EASTMAN, J. A., CHOİ, S. U. S., Lİ, A., YU, W., THOMPSON, L. J. Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.*, 78(6), 718–720, 2001.
- [59] LİU, M. S., LİN, M. C. C, TSAİ, C. Y., WANG, C. C. Enhancement of Thermal Conductivity with Cu For Nanofluids Using Chemical Reduction Method. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 49(17), 3028–3033, 2006.
- [60] XUAN, Y., Lİ, Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat Fluid Flow*, 21(1), 58–64, 2000.
- [61] HONG, T. K., YANG, H. S., CHOİ, C. J. Study of the Enhanced Thermal Conductivity of Fe Nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97, 064311-064311, 2005.
- [62] PATEL H. E., DAS, S. K., SUNDARARAJAN, T., NAİR, A. S., GEORGE, B., PRADEEP, T. Thermal Conductivities of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle Based Nanofluids: Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects. *Appl. Phys. Lett.*, 83, 2931–2933, 2003.
- [63] WEİ, X., ZHU, H., KONG, T., WANG, L. Synthesis and Thermal Conductivity of Cu₂O Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19), 4371–4374, 2009.
- [64] PUTNAM, S. A., CAHILL, D. G., BRAUN, P. V., GE, Z., SHIMMIN, R. G. Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions. *Journal of Applied Physics*, 99(8), 084308-084308, 2006.
- [65] ZHU, H., ZHANG, C., LİU, S., TANG, Y., YANSHENG, Y. Effects of Nanoparticle Clustering and Alignment on Thermal Conductivities of Fe₃O₄ Aqueous Nanofluids. *Appl. Phys. Lett.*, 89(2), 023123-023123, 2006.
- [66] MURSHED, S. M. S., LEONG, K. .C, YANG, C. Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂-Water Based Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4), 367–373, 2005.
- [67] XİE, H., WANG, J., Xİ, T., LİU, Y., Aİ, F., QİNGREN, W. Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles. *Journal of Applied Physics*, 91(7),4568–4572, 2002.
- [68] ZHANG, X., GU, H., FUJİİ, M. Experimental Study on The Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids”. *International Journal of Thermophysics*, 2 (2),) 569–580, 2006.
- [69] HUAQİNG, X., JİNCHANG, W., TONGGENG, X., YAN, L. Study on the Thermal Conductivity of SiC Nanofluids. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 29(4), 361–364, 2001.
- [70] LİU, M. S., LİN, M. C. C., HUANG, I. T., WANG, C. C. Enhancement of Thermal Conductivity with Carbon Nanotube for Nanofluids. *International Community Heat and Mass Transfer*, 32(9) ,1202–1210, 2005.
- [71] CHOİ, S. U. S., ZHANG, Z. G., YU, W., LOCKWOOD, F. E., GRULKE, E. A. Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions. *Appl. Phys. Lett.*, 79(14), 2252–2254, 2001.
- [72] XİE, H., LEE, H., YOUN, W., CHOİ, M. Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities. *Journal of Applied Physics*, 94 (8),) 4967–4971, 2003.
- [73] YANG, B., HAN, Z. H. Thermal Conductivity Enhancement in Water-in-FC72 Nanoemulsion Fluids”. *Appl. Phys. Lett.*, 88(26), 261914-261914, 2006.
- [74] QU, J., WU, H. Y., CHENG, P. Thermal Performance of an Oscillating Heat Pipe with Al₂O₃–water Nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2), 111–115, 2010.
- [75] JİA, H., JİA, L., TAN, Z. An Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of Nanofluid Pulsating Heat Pipe. *Journal of Therm Sciences*, 22(5), 484–490, 2013.
- [76] GOSHAYESHİ, H., GOODARZİ, M., DAHARİ, M. Effect of Magnetic Field on the Heat Transfer Rate of Kerosene/Fe₂O₃ Nanofluid in a Copper Oscillating Heat Pipe”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 663–668, 2015.



[77] WILSON, C., A. *Experimental Investigation of Nanofluid Oscillating Heat Pipes*. Phd Thesis, University of Missouri, Columbia, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Fırat ÖZDEMİR

1989 Adana doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamlamıştır. 2013 yılında Nğide Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuş ve aynı yıl Şırnak Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2014 yılında Ege Üniversitesine görevlendirilmiş ve 2017 yılında master derecesini Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamlamıştır. Halen Ege Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta ve doktora öğrenimine devam etmektedir.

Özay AKDEMİR

1975 yılı Ankara doğumlu, evli ve iki çocuk babasıdır. 1997 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Yüksek Lisans eğitimini 2001 yılında Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde ve doktora eğitimini 2007 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde tamamlamıştır. 1998-2007 yılları arasında Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2007 yılından beri Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

Ali GÜNGÖR

1955 Elazığ doğumlu, evli ve iki kız çocuk babasıdır. Ege Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1977 yılında Mühendis, 1978 yılında Yüksek Mühendis ve aynı Üniversitenin Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden 1985 yılında Doktor Mühendis derecelerini aldı. 1986 yılında Kanada'da Brace Research Institute'de altı ay araştırmalarda bulundu. 1989 yılında Isı ve Madde Transferi Bilim Dalında Doçent oldu. 1996 yılında Ege Üniversitesinde Profesör ünvanını aldı. 1997-2012 yılları arasında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Bölüm Başkanlığı yaptı. 27 Mayıs 2022 tarihinde emekli oldu. Halen güneş enerjisi, iklimlendirme, soğutma teknolojileri, titreşimli ısı boruları, ısı ve madde transferi uygulamaları, termodinamik konularında çalışmalarına devam ediyor.