

BİR ISI BORULU NÜKLEER REAKTÖRDE ISI LİMİTASYONLARININ ANALİZİ

Gizem BAKIR*

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, 58140,
Türkiye. Geliş Tarihi/Received Date: 30.11.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.01.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1212192

ÖZ

Son zamanlarda, daha güvenli ısı çekilmesini sağlayan pasif güvenlik sistemi olan ısı borulu nükleer reaktörlere olan ilgi artmıştır. Isı boruları kullanılırken en önemli konulardan biri ısı limitasyonlarının belirlenmesidir. Bu makalede 900 K’de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları hesaplanmıştır. Isı borusunun çalışma sıvıları olarak potasyum, sodyum ve lityum ayrı ayrı ele alınmıştır. Isı borusu limitasyonlarının hesaplamalarında en uygun korelasyonlar kullanılmıştır. Üç farklı çalışma sıvısının ısı limitasyonları birbirleriyle kıyaslanmıştır. 900 K için potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılı ısı boruları için en yüksek ısı çekimleri sırasıyla 35, 110 ve 24 kW olarak bulunmuştur. Isı limitasyonları kıyaslandığında 900 K için en yüksek ısı çekimi sodyum soğutuculu ısı borusu olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı borulu nükleer reaktör, ısı borusu, ısı borusu limitleri

ANALYSIS OF HEAT LIMITATIONS IN A HEAT PIPE NUCLEAR REACTOR

ABSTRACT

Recently, interest in heat pipe reactors which have passive safety systems that provide safer heat extraction, has increased in the World. One of the most important issues when using heat pipes is the determination of heat limitations. In this article, heat limitations are calculated for a heat pipe reactor operating at 900 K. Potassium, sodium and lithium are examined separately as the working fluids of the heat pipe. Optimum correlations were used to calculate heat pipe limitations. The heat limitations of three different working fluids were compared with each other. The highest heat extractions were found as 35, 110 and 24 kW for the potassium, sodium, and lithium working fluid heat pipes, respectively. When the heat limitations were compared, the highest heat extraction for 900 K was found as the sodium coolant heat pipe.

Keywords: Heat pipe reactors, heat pipe, heat pipe limitations

1. Giriş

Güvenilir bir elektrik şebekesinden uzaktaki uzak konumlarda güç ihtiyacı için, nükleer enerji önemli bir kaynaktır. Isı borulu reaktörler, yapıları gereği mobil uygulamalar için mükemmel şekilde uygundur. Bir ısı borusu reaktörü, doğası gereği geleneksel reaktörlerden daha basit, daha küçük ve daha güvenilirdir. Isı borulu reaktörlerin kilit kısmı, reaktör korunu soğutmak için kullanılan ısı borularıdır. Isı borusu, çalışma akışkanının faz değişiminden yararlanır ve çok küçük sıcaklık düşüşleriyle evaporatörden yoğunlaşma ucuna büyük miktarda ısı taşır. Bu özellik, ısı borusunu bir nükleer reaktörden termal güç elde etmek için ideal bir araç haline getirir. Termal gücü çıkarmak için pompalı döngüden yararlanan geleneksel nükleer reaktör sisteminin aksine, ısı borulu reaktörler, termal gücü pasif olarak çıkarmak için yüzlerce ısı borusunu kullanır [1]. Bu sayede, reaktör sisteminin güvenilirliği ve güvenliği önemli ölçüde iyileştirilebilir. Isı boruları ısıyı çok küçük bir ısı kaybıyla ileten, termal verimliliği yüksek küçük cihazlardır [2]. Isı borusu kullanılırken ısı çekilmesinde en çok dikkat edilmesi gereken

*e-posta: gbakir@cumhuriyet.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2406-6376> (Sorumlu Yazar)

konulardan biri ısı borusu limitasyonlarıdır. Nükleer reaktörlerde ısı borularının ısı limitasyonlarını aşması sonucunda ısı borusu ısıyı çekemeyebilir ve bu durumda kazaya sebep olabilir.

Taşınabilir güç sistemi, modern enerji kullanımının gelişmesiyle birlikte basit yapılı, daha uzun ömürlü ve daha yüksek güç kapasitesi gerektirir. Geleneksel kimyasal veya güneş enerjisinin yerini almak için, ısı borusu soğutmalı nükleer reaktör en iyi seçeneklerden biridir. Isı borusunun nükleer reaktörde kullanımı ısı kayıplarının azalmasını sağlamakla birlikte pasif ısı transferini de sağlar. Birçok araştırmacı ısı borulu nükleer reaktör sistemi üzerine çalışmaktadır. Panda ve ark. [3] yüksek sıcaklıklı reaktörde sodyum soğutuculu ısı borusu üzerine çalışmışlardır. Isı borusunun üç boyutlu sayısal ağ modelini geliştirmişlerdir ve kullanıcı tanımlamalı hesaplamalı akışkanlar analiz kodu kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları ile deneysel verileri karşılaştırmışlardır ve aralarındaki maksimum farkı %1,25 olarak bulmuşlardır. Ayrıca deneysel sonuçlarda, minimum sıcaklık düşüşü elde etmişlerdir. Zhang ve ark. [4] yüksek sıcaklıklı sodyum-potasyumlu ısı borulu reaktöründe başlangıç karakteristiği üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Başlangıç şartlarını analiz ve simüle etmek için nümerik bir kod geliştirmişlerdir. Hernandez ve ark. [5] ısı borulu mikroreaktör olan eVinci reaktörünün yakıt ve nötronik analizleri üzerine çalışmışlardır. Tasarlanan reaktörün 10 yıl yakıt yenilemesi olmadan çalışabileceğini ve reaktörde az miktarda nükleer atığın üretildiğini görmüşlerdir. Laubsher ve Dobson [6] yüksek sıcaklıklı ısı borulu ısı eşanjörlü nükleer reaktörde teorik ve deneysel modelleme yapmışlardır. Isı borulu ısı eşanjörünün teorik modelini ve tasarımını doğrulamak için çalışma akışkanı olarak Dowtherm-A kullanarak 2 kW'lık bir deneysel model oluşturmuşlardır. Uygun kaynama ve yoğunlaşma ısı transfer katsayılarının kullanılması koşuluyla, daha yüksek sıcaklıktaki sodyum soğutuculu ısı borulu ısı eşanjörünün performansını tahmin etmek için teorik modelin kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Jeong ve ark. [7] ileri nükleer reaktörlerde soğutma sistemi için hibrit ısı borusu kullanmışlardır. Analizler için HAD (Hesaplamalı Akış Dinamiği) kullanmışlardır. Sonuç olarak, hibrit ısı borusu konseptinin çubuk başına 18,20 kW ısıyı çıkardığını bulmuşlardır. Guo ve ark. [8] ısı borulu soğutmalı reaktörler üzerine gelişmiş bir model olan ağ modeli uygulamıştır. Çalışma sonucunda ağ yöntemine dayalı olarak, geliştirilmiş bir model önerilmişlerdir. Bu sayede daha gerçekçi sıcaklık dağılımlarını hesaplayabilmişlerdir. Ayrıca sistemde basınç dağılımı sonuçlarını alabilmişlerdir.

Isı borularında ısı limitasyonlarının çalışılması ısı borularının kullanımında en önemli konulardan biridir. Nemec ve ark. [9] -30 °C ile 140 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışan çeşitli çalışma sıvılarıyla fitilli ısı boruları için ısı limitasyonlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, ısı borusunun ısı taşınımı sınırlamalarını hesaplamak için bir matematiksel model önermişlerdir. Sınırlama değerlerinin, ısı borusu parametrelerine, fitil yapı parametrelerine ve çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Sonuçlarda, bu limitlerin ısı borusunun soğutma gücüne etkisini değerlendirmişlerdir. Tian ve ark. [10] ısı borulu nükleer reaktöründe ısı borusu limitlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı doldurma oranlarına sahip ısı boruları için çeşitli ısı transfer limitlerini test etmişlerdir. Yang ve ark. [11] 1 mm ve 2 mm iç çapa sahip toplam 40 adet bakır borudan oluşan kapalı döngü titreşimli ısı borularının operasyonel sınırlaması üzerine deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Çalışma akışkanı olarak R123 akışkanını, %30, %50 ve %70 dolun oranları ile kullanmışlardır. Dikey alttan ısıtılmalı, yatay ısıtılmalı ve dikey üstten ısıtılmalı yönler olmak üzere üç operasyonel yönelim araştırmışlardır. 2 mm çaplı ısı borusunun için en iyi performansın alttan ısıtılmalı dikey yönlendirmede olduğunu, 1 mm ısı borusu için ise yönlendirmenin neredeyse hiçbir rol oynamadığını bulmuşlardır. Melnyk ve ark. [12] LED soğutma için kullanılan ısı boruları için limitasyon hesaplamaları yapmışlardır. Çalışmalarında, 60°C sıcaklık değeri için maksimum ısı akısı olduğunu görmüşlerdir. Oluklu ısı borusu için ana ısı limitasyonunun, amonyak soğutma sıvısı için kaynama sınırı ve R141b için sürüklenme sınırı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, metal fiber kılcal yapıya sahip ısı borularında ise su, etanol ve R141b soğutucuları için ana ısı transferi sınırlamasının kılcal sınır olduğunu görmüşlerdir. Mansour, [13] farklı buhar sıcaklıklarında bir bakır-aseton ısısı için ısı taşınımı sınırlamalarını ve toplam ısı aktarım katsayısını araştırmışlardır. Genel ısı transfer katsayısı için yeni bir korelasyon elde etmişlerdir. Tüm ısı transferi limitleri üzerine gizli ısı buharlaşması, boru çapı ve Reynolds sayısının etkili olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca buhar sıcaklığının artmasıyla sonik, kılcal ve sürüklenme sınırları artarken, kaynama sınırının azaldığını gözlemlemişlerdir.

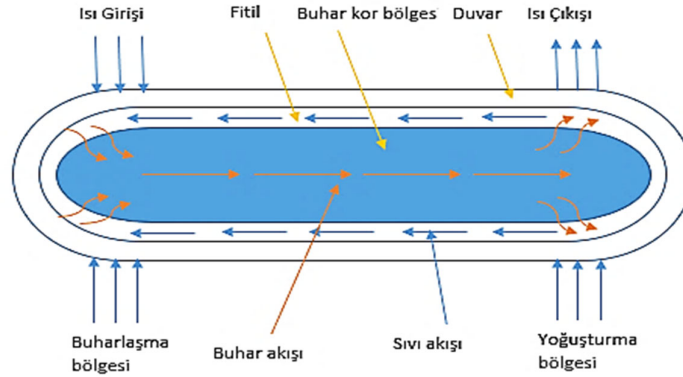
Bu çalışmanın amacı, pasif güvenlik sistemlerini arttırmak amacıyla kullanılan ısı borulu reaktörlerde ısı limitasyonlarını belirlemektir. 900 K'de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları

hesaplanmıştır. Nükleer ısı borusu için potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılarının kullanılma sebebi hem 900 K'de çalışabiliyor olmaları hem de nötron soğurma oranları küçük olması sebebiyle nükleer reaktör için kullanıma uygun olmalarıdır. Literatürden farklı olarak nükleer reaktörde ısı borusu için üç farklı çalışma sıvısı değerlendirilmiş ve bu çalışma sıvıları için ayrı ayrı ısı borusu limitasyon değerleri ve toplam ısı çekilim miktarları hesaplanmıştır.

2. Isı Borusu ve Isı Borulu Reaktörler

2.1. Isı Borusunun Yapısı

Isı borusu ısıyı iletme kapasitesi çok yüksek olan bir cihazdır. Şekil 1'de ısı borusunun yapısı görülmektedir. Geleneksel bir ısı borusu, buharlaşma, adyabatik (taşıma) ve yoğunlaştırma kısımlarına sahiptir. İlk olarak ısı, ısı borusu duvarı ve fitil tarafından ısı iletim yoluyla buharlaşma bölgesine aktarılır ve çalışma sıvısını buharlaştırır. Daha sonra buhar adyabatik bölge boyunca buhar basıncı etkisiyle yoğunlaştırma bölgesine doğru hareket eder. Kondenserde, buhar yoğunlaşır ve gizli buharlaşma ısını soğutucuya bırakır. Fitil yapısının oluşturduğu kılcal basınç etkisiyle yoğunlaşan sıvı evaporatöre geri döner. Böylece ısı borusu buharlaşmanın gizli ısını evaporatörden kondansatöre sürekli olarak taşıyabilir.



Şekil 1. Isı borusunun genel yapısı

2.2 Isı Borulu Reaktörler

Isı borulu reaktör, koru soğutmak için ısı borusu elemanlarını kullanan yeni tip bir reaktördür. Geleneksel reaktöre kıyasla kor yapısı, soğutma sıvısı ve malzeme açısından büyük farklılıklara sahiptir. Sistemin yapısı, ana boru hattı, sirkülasyon pompası ve yardımcı ekipmanların çıkarılmasıyla büyük ölçüde basitleştirilmiştir. Böylece düşük maliyetli bir sistem elde edilmiştir [14]. Filyon ısı, yapısal malzeme aracılığıyla ısı borularına aktarılır ve daha sonra ısı boruları, ısıyı enerji dönüşüm sistemine taşır.

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, kullanılan ısı borusunun ölçüleri ve malzemeleri [15] çalışmasından alınmış ve ısı borusu ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir.

Bu ısı borulu nükleer reaktörün çalışma ısı yaklaşık olarak 900 K alınarak; çalışma sıvılarının nihai sonuçları 900 K'e göre değerlendirilmiştir. Bu sıcaklıkta çalışmaya uygun olarak potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvıları ele alınmıştır [16, 17]. Ayrıca, nükleer reaktörde bir malzeme

seçilirken önemli etkenlerden biri de nötron soğurma değerleridir. Sodyum, potasyum ve lityum için nötron soğurma değeri yüksek olmadığından dolayı bu malzemeler nükleer reaktörde kullanılabilirler.

Tablo 1. Isı borusunun ölçüleri [15].

Buharlaştırma bölgesi uzunluğu	1,0 m
Adyabatik bölge uzunluğu	0,5 m
Yoğuşturucu bölge uzunluğu	0,3 m
Buhar bölgesi çapı	0,06 m
Duvar kalınlığı	0,07 m
Fital kalınlığı	0,065 m

Bir ısı borulu nükleer reaktörde ısı çekilim değerinin doğru hesaplanabilmesi için en uygun ısı limitasyon korelasyonları literatürden alınmıştır. Bu denklemler viskoz, sonik, kılcal, sürüklenme ve kaynama limitleri olup aşağıda verilmiştir. Bu denklemlerde kullanılan ısı borusu parametreleri Tablo 1’de belirtilen değerlerden alınmıştır. Ayrıca potasyum, sodyum ve lityumun termofiziksel özellikleri Ref [18-21]’den faydalanılarak hesaplanmıştır.

Viskoz limiti [22]

$$Q_v = \frac{\pi \cdot r_v^4 \cdot L_v \cdot \rho_v \cdot P_v}{12 \cdot \mu_v \cdot l_{eff}} \quad (1)$$

Burada r_v , buhar kor bölgesinin (m) kesit yarıçapıdır, L_v buharlaştırma gizli ısıdır (J/kg), μ_v buharlaştırma bölgesindeki viskozitesi ($N \cdot s/m^2$), P_v buhar basıncı (Pa) ve ρ_v buhar yoğunluğudur (kg/m^3). l_{eff} ısı borusunun etkin uzunluğudur (m) ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$L_{eff} = \frac{L_{buharlaştırıcı}}{2} + L_{adyabatik} + \frac{L_{yoğuşturucu}}{2}$$

Burada $L_{buharlaştırıcı}$ buharlaştırma bölgesi uzunluğu (m), $L_{adyabatik}$ adyabatik bölge uzunluğu (m) ve $L_{yoğuşturucu}$ yoğunlaştırma bölgesi uzunluğudur (m).

Sonik limitasyon [22]

$$Q_s = 0,474 \cdot L_v \cdot \sqrt{\rho_v \cdot P_v} \quad (2)$$

Kılcal sınırlama [22]

$$Q_k = \frac{\sigma \cdot L_v \cdot \rho_l}{12 \cdot \mu_l} \cdot \frac{K \cdot A_w}{l_{eff}} \cdot \left(\frac{2}{r_{eff}} - \frac{\rho_l \cdot g \cdot \cos \psi \cdot l_t}{\sigma} \right) \quad (3)$$

Bu denklemde, K fitil geçirgenliği (m^2), A_w fitil kesit alanı (m^2), ρ_l sıvı yoğunluğu (kg/m^3), μ_l sıvı viskozitesi ($N \cdot s/m^2$), r_{eff} evaporatördeki fitil kılcal yarıçapı (m), g yerçekimi kuvveti ($9,8 m/s^2$) ve l_t borunun toplam uzunluğudur (m). Burada, ψ sıvı-fitil arasındaki temas açısıdır. Temas açısı, sıvının fitil yapısı üzerindeki ıslanabilirlik derecesinin bir ölçüsüdür. Burada bu açı 90° olarak alınmıştır. r_{eff} yüzey gözeneginin hidrolik yarıçapıdır (m) ve bu değer literatüre uygun olarak [23] alınmıştır. Ayrıca fitil geçirgenliği değerleri de literatüre uygun olarak alınmıştır [23].

Sürüklenme sınırlaması [23]

$$Q_{sr} = A_v \cdot L_v \cdot \sqrt{\frac{\rho_v \cdot \sigma}{2 \cdot r_c}} \quad (4)$$

Burada r_c yüzey gözeneginin hidrolik yarıçapıdır (m) ve bu değer literatüre uygun olarak [23] alınmıştır.

Kaynama limiti [23]

$$Q_k = \frac{4\pi\sigma\lambda_{eff}T_v l_{eff}}{L_v \rho_l \ln \frac{r_i}{r_e}} \cdot \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (5)$$

burada, λ_{eff} kompozit fitilin ve çalışma sıvısının etkin termal iletkenliği (W/m K), T_v buhar doyma sıcaklığı (K), r_i iç kap yarıçapı (m), r_n kabarcık yarıçapıdır. r_i ve r_n değerleri literatüre uygun olarak [23] alınmıştır.

4. Sayısal Sonuçlar

4.1. Isı Borusu Limitasyonları

Isı borusunun çalışması ve performansı, borunun boyutuna ve şekline, fitil yapısına, çalışma sıvısına, doldurma oranına, eğim açısına ve çalışma sıcaklığına bağlıdır [24, 25].

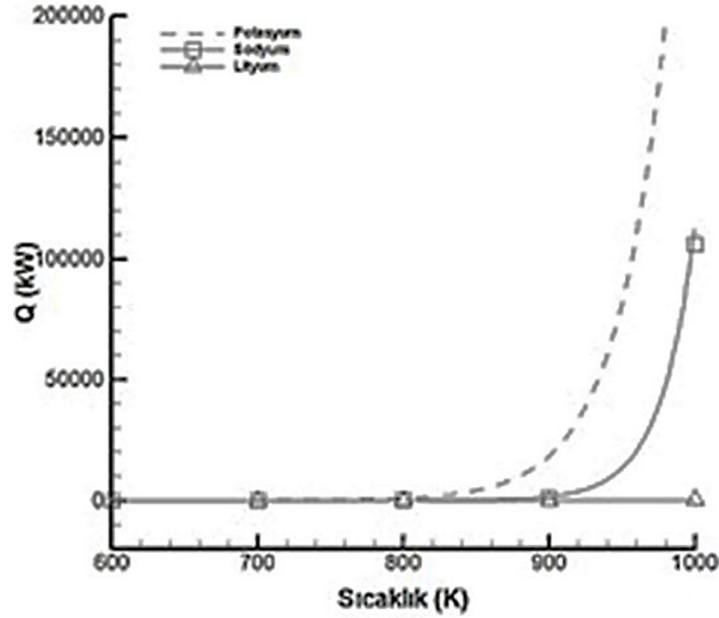
Isı borusundaki ısı aktarımı bazı koşullarla sınırlıdır. Bu nedenle, ısı borusu uygulamasına bağlı olarak bu parametrelerin doğru şekilde kullanılmaması, verimliliğini sınırlayan ve azaltan kısıtlamalara neden olabilir [24, 25].

Isı borularında ısı aktarımı sınırları şu şekilde sınıflandırılır; viskoz, sonik, kılcak, sürüklenme ve kaynama [25]. Bu çalışmada viskoz, sonik, kılcak, sürüklenme ve kaynama limitleri üç ayrı soğutucu için ele alınmıştır.

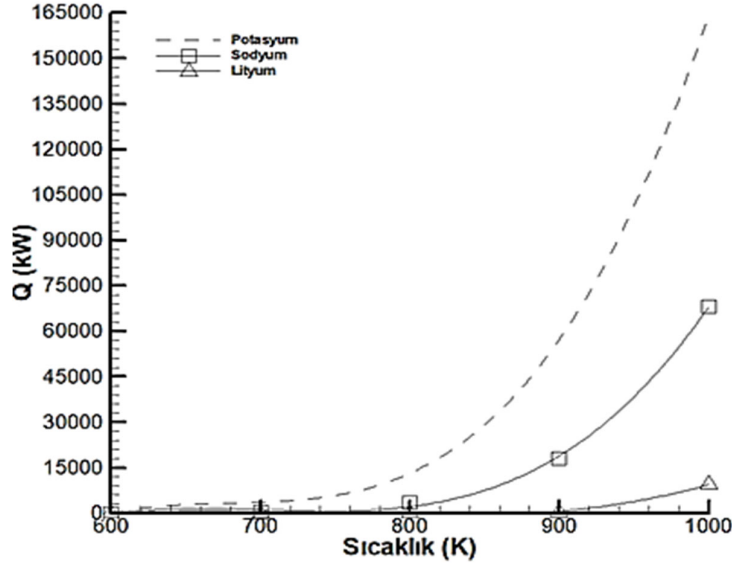
4.1.1. Viskoz Limiti

Isı borusunun performansını belirleyen değişkenlerden biri, çalışma akışkanının termofiziksel özellikleridir. Bu nedenle termal potansiyelinin artırılması, ısı transfer yüzeyini genişletmeden (eklenen kanatlar) ısı transferinin artmasına neden olur, bu da ısı borusu düşük sıcaklıklarda çalışırken maliyeti artırır. Doyma basıncı, buharın buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya ilerlemesi için gereken basınç gradyanı ile aynı büyüklükte olabilir. Bu durumda toplam buhar basıncı, buhar kanalındaki zıt viskoz kuvvetler tarafından dengelenecektir. Bu nedenle, buhar bölgesindeki toplam buhar basıncı, artan bir akışı sürdürmek için yetersiz kalabilir. Buhar bölgesindeki bu düşük akış durumu viskoz limiti olarak adlandırılır.

Viskoz limiti hesapları için Denklem 1 [22] kullanılmıştır. Şekil 2’de potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla viskoz limitlerinin değişimi görülmektedir. Her üç değer içinde viskoz limitinde 800 K’e kadar değerler çok düşük olurken, 800 K’den sonra viskoz limit değerleri artmaktadır. Bu artış 900 K’den sonra daha fazladır. 900 K sıcaklık değerinde, her üç çalışma sıvısı için viskoz limiti kıyaslandığı zaman en düşük viskoz değeri lityumda en yüksek viskoz değeri ise potasyumda gözlenmiştir.



Şekil 2. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla viskoz limitlerinin değişimi



Şekil 3. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sonik limitlerinin değişimi

4.1.2. Sonik Limiti

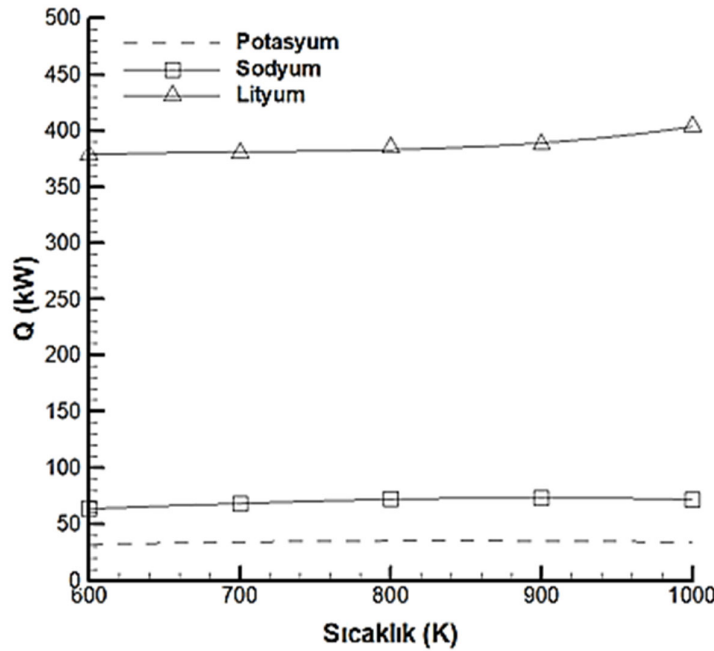
Sonik sınır, sıvı metal ısı borularında çok düşük buhar yoğunlukları olması halinde başlangıç durumunda veya düşük sıcaklıktaki çalışma şartlarında meydana gelir. Buhar hızı buharlaşma bölgesi boyunca artar ve bu bölgenin son kısmında maksimuma ulaşır. Bu şekilde olan bir akış düzeninin sınırlandırılması, sabit bir kütle akış hızına sahip yakınsayan-uzaklaşan bir nozulunkine benzerdir. Bu sınırlandırma buharlaştırıcı çıkışının boğazına tekabül ettiği yerdir. Bu sebeple, bu noktadaki buhar

hızının lokal ses hızını aşmaması beklenir. Bu akış koşuluna sonik sınırlama denir. Sonik limit genellikle ya ısı borusunun başlatılması sırasında ya da kararlı durum çalışması sırasında yoğunlaştırıcıdaki ısı transfer katsayısı yüksek olduğu durumda ortaya çıkar. Sonik limit, genel olarak yüksek buhar hızları ve düşük yoğunluklara sahip olmaları sebebiyle sıvı metal ısı borularıyla ilişkilendirilir. Kılcal sınırın aksine, sonik sınır aşıldığında önemli bir sorun oluşturmaz. Sonik sınırlama, belirli bir buharlaşma bölgesinin sonundaki sıcaklığına karşılık gelir. Buharlaşma bölgesinin uç kısmında sıcaklığının artırılması, bu limiti yeni bir yüksek sonik limite yükseltecektir. Sınırlama durumunda, yoğunlaştırıcı bölgesinde sıcaklık düşecek ve ısı transfer hızı artmayacaktır. Bu nedenle, sonik sınıra ulaşıldığında, ısı transfer oranındaki daha fazla artış ancak buharlaşma bölgesindeki sıcaklık arttığında gerçekleştirilebilir. Isı borularının sonik sınıra yakın veya sonik sınırda ısı oranı ile çalıştırılması, ısı borusu boyunca önemli bir aksel sıcaklık düşüşüne neden olur.

Şekil 3’de potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sonik limitlerinin değişimi verilmiştir. Sonik limit değerleri Denklem 2 [22] kullanılarak hesaplanmıştır. Her üç çalışma sıvısı sonik limitleri de sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Her üç değer için de 900 K’ den sonra artış diğer sıcaklık değerlerine göre çok fazladır. Bütün sıcaklık durumlarında sonik sınırlamanın en yüksek olduğu durum potasyumdur.

4.1.3. Kılcal Limit

Belirli bir kılcal yapının, belirli bir çalışma sıvısı için dolaşımı sağlama yeteneği sınırlıdır [26, 27]. Bu sınıra genel olarak kılcal veya hidrodinamik sınırlama denir. Kılcal sınır, düşük sıcaklıklı ısı borularında en sık karşılaşılan limitasyondur. Bu durum pompalama hızı, buharlaşma kısmına yeterli sıvı sağlamak için yeterli olmadığına ortaya çıkar. Bunun sebebi, sıvı ve buhar basıncı düşüşlerinin toplamının, fitilin direnebileceği maksimum kılcal basıncı geçmesidir. Isı transferini kılcal sınırın üstüne çıkarmaya yönelik herhangi bir durum, buharlaşma bölümünde kurumaya neden olacaktır ve buharlaşma bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine ısı transferini durdurur.



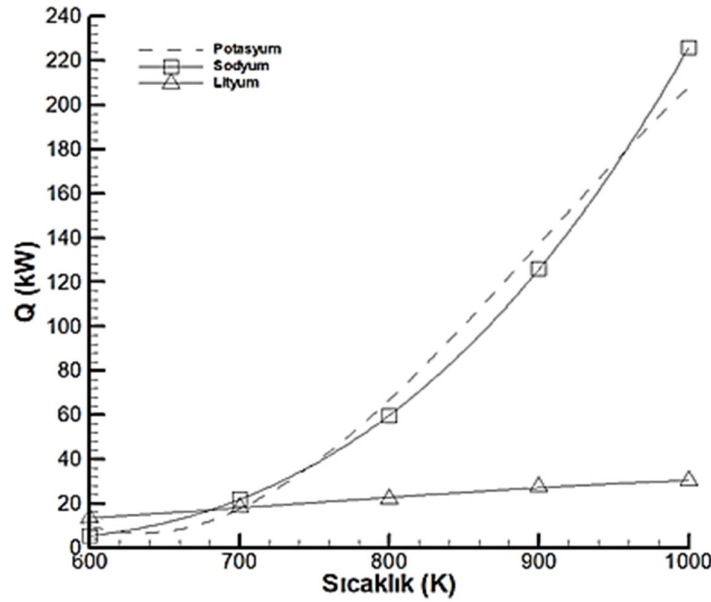
Şekil 4. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kılcal limitlerinin değişimi

Şekil 4’te potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kılcal limitlerinin değişimi görülmektedir ve bu değerler Denklem 3 [22] kullanılarak hesaplanmıştır. Kılcal limit tüm çalışma

sıvıları için sıcaklıkla belli belirsiz bir değişim göstermektedir. Tüm sıcaklık değerleri için kılcal limitin en düşük olduğu değerler potasyum olurken en yüksek olduğu değerler lityum olarak bulunmuştur.

4.1.4. Sürüklenme Limit

Buhar ve sıvı zıt yönlerde hareket ettiğinden dolayı sıvı-buhar ara yüzeyinde bir kesme kuvveti vardır. Yüksek bağıl hızlarda, sıvı damlacıkları fitil yüzeyinden kopabilir ve yoğunlaştırıcı bölümüne doğru akan buharın içine girebilir. Sürüklenme çok büyük olursa, buharlaşma bölgesi kuruyacaktır. Bunun meydana geldiği ısı transfer hızı, sürüklenme sınırı olarak adlandırılır. Sürüklenme, ısı borusunun yoğunlaştırıcı ucuna çarpan damlacıkların sesleriyle saptanılır. Sürüklenme sınırı, genel olarak düşük veya orta sıcaklıktaki küçük çaplı ısı boruları veya buharlaştırıcı bölgesinde ısı girişi yüksek olduğunda yüksek sıcaklıklı ısı boruları ile ilişkilendirilir.



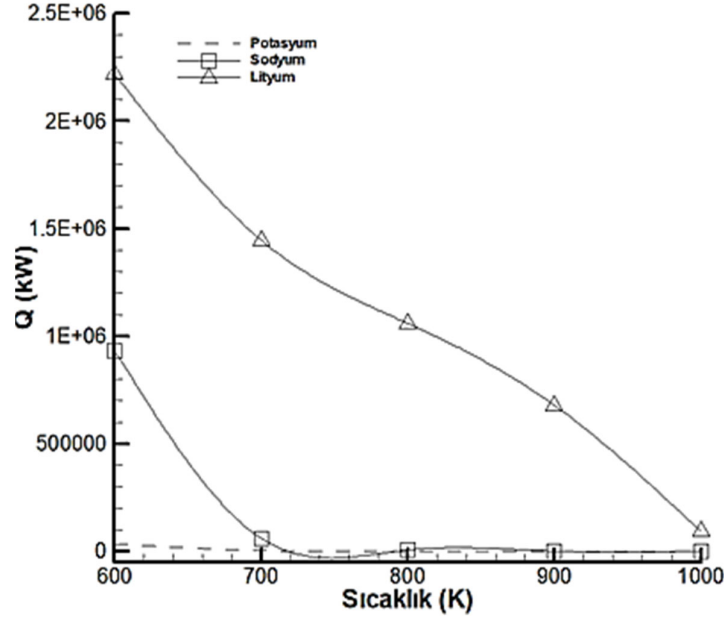
Şekil 5. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sürüklenme limitlerinin değişimi

Şekil 5'te potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sürüklenme limitlerinin değişimi gösterilmiştir. Sürüklenme limitleri hesaplamaları için Denklem 4 [23] kullanılmıştır. 800 K üzerindeki sıcaklıklarda potasyum ve sodyum için sürüklenme değerlerinde artış diğer sıcaklıklara karşılık gelen değerlere göre daha fazladır. Aynı sıcaklık değerlerinde sürüklenme limiti değerleri potasyum ve sodyum için birbirine yakındır ve en düşük sürüklenme limiti değerleri lityumdadır.

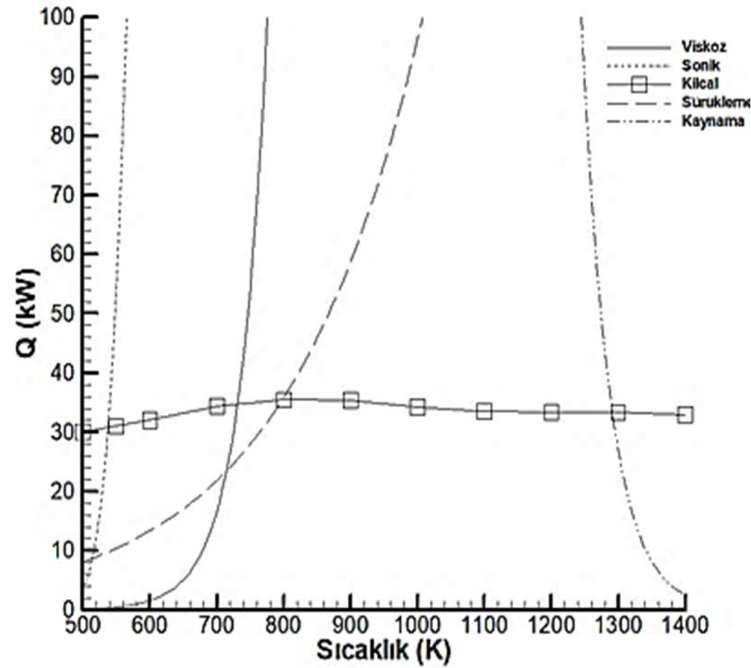
4.1.5. Kaynama Limit

Buharlaşma bölümündeki radyal ısı akışı çok yükselirse, buharlaşma bölgesi fitili içindeki sıvı kaynar ve duvar sıcaklığı aşırı yükselir. Fitilde meydana gelen buhar kabarcıkları, sıvının boru duvarını ıslatmasını engeller ve sıcaklık artışına sebep olur. Bu kaynama şiddetli ise kaynama sınırı olarak tanımlanır ve buharlaşma bölgesindeki fitili kurutur. Fakat, düşük veya orta seviyeli bir radyal ısı akışında, kurumaya neden olmadan düşük yoğunluklu kararlı kaynama mümkün olmaktadır. Kaynama sınırlamasının, diğer ısı borusu sınırları için bir eksenel ısı akışı sınırlamasına kıyasla bir radyal ısı akışı sınırlaması olduğuna dikkat edilmelidir. Ancak, buharlaşma bölgesi yüzey alanı ile ilgili olduklarından, maksimum radyal ısı akışı sınırlaması, maksimum eksenel ısı aktarımını da belirtir. Kaynama sınırı genellikle metalik olmayan çalışma sıvılarının ısı boruları ile ilişkilidir. Sıvı metal ısı boruları için kaynama sınırı nadiren görülür.

Şekil 6'da potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kaynama limitlerinin değişimi görülmektedir ve bu değerler Denklem 5 [23] kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm çalışma sıvılarında sıcaklığın artışıyla kaynama limitinin azalmıştır. Tüm sıcaklık değerleri için kaynama limitinin en düşük olduğu değerler potasyum olurken en yüksek olduğu değerler lityum olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kaynama limitlerinin değişimi

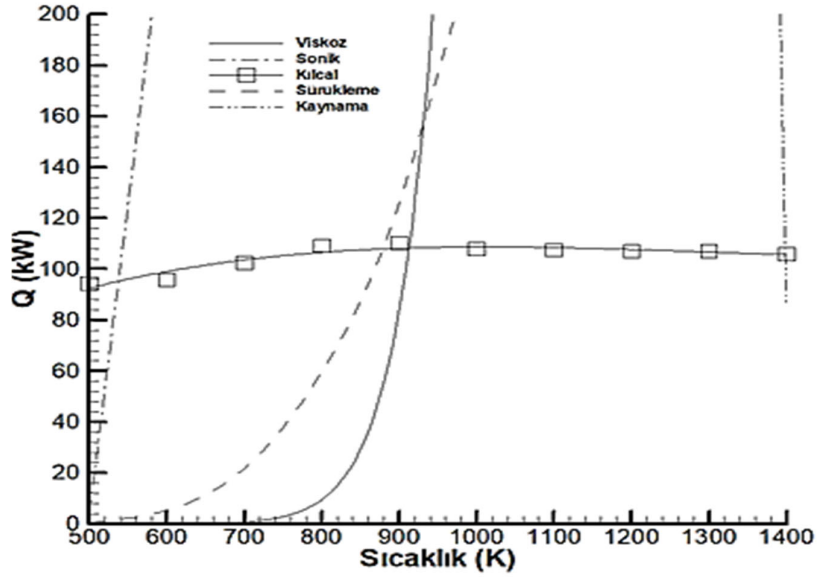


Şekil 7. Potasyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi

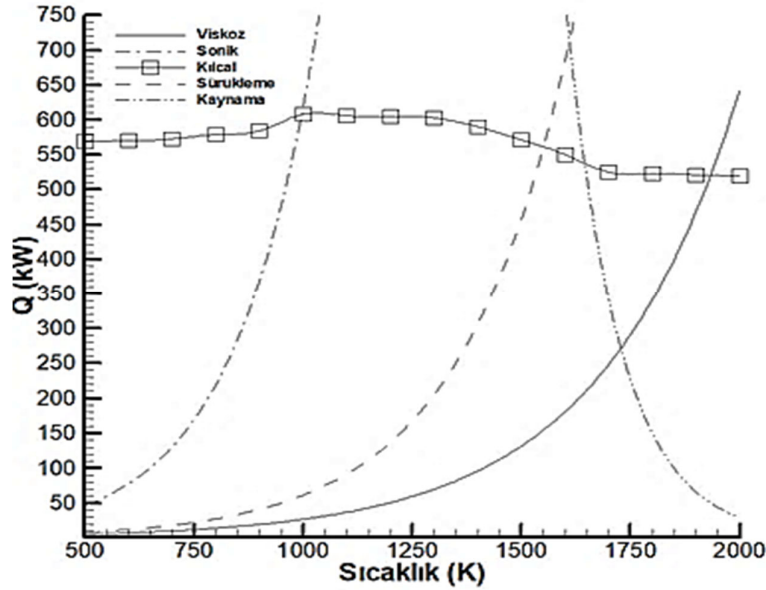
4.1.6. Tüm Limitasyonların Değerlendirilmesi

Çalışma sıvılarının tüm limitasyon değerlerine bakılarak, çalışma sıcaklığında ne kadar ısı çekilebileceği karar verilmektedir. Şekil 7’de potasyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Şekil 7’den görüldüğü gibi 900 K’de en düşük limitasyon değeri kılcal limitasyon değeridir. Buna göre potasyum soğutuculu ısı borusunun maksimum ısı çekme değeri yaklaşık 35 kW olarak bulunmuştur.

Şekil 8’de sodyum çalışma sıvılı ısı borusunun bütün limitasyon değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. 900 K’de sodyum ısı borusu için en düşük limitasyon değeri de kılcal limitasyon değeridir. Sodyum soğutuculu ısı borusunun maksimum ısı çekme değeri yaklaşık 110 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 8. Sodyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi



Şekil 9. Lityum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi

Şekil 9'da lityum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi en düşük ısı limitasyonu viskoz limitindedir ve maksimum ısı değeri yaklaşık 24 kW'tır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 900 K'de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları hesaplanmıştır. Isı borusunun çalışma sıvıları olarak, potasyum, sodyum ve lityum ayrı ayrı ele alınmıştır. Literatüre uygun olarak seçilen korelasyonlar, ısı borusu limitasyonlarının hesaplamalarında kullanılmıştır. Üç farklı çalışma sıvısının ısı limitasyonları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- 900 K sıcaklık değeri için viskoz değeri incelendiğinde lityumun basınç ve buhar yoğunluğu diğer çalışma sıvılarına göre daha küçük olduğu için en düşük viskoz değeri lityumdur. 900 K'de potasyumun basınç ve buhar yoğunluğu diğer çalışma sıvılarına göre daha büyük olduğu için ise en yüksek viskoz değeri ise potasyumda elde edilmiştir.
- Üç çalışma sıvısının 900 K'de sonik sınırlama değerleri kıyaslandığında viskoz limitte olduğu gibi lityumun basınç ve buhar yoğunluğu değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha küçük olduğu için en düşük limit değeri lityumdur. Potasyumun 900 K'de basınç ve buhar yoğunluğu değeri diğer çalışma sıvılarına göre daha büyük olduğu için ise en yüksek sonik limit değerine sahip olduğu görülmüştür.
- Kılcal limiti değerleri 900 K sıcaklık için üç çalışma sıvısı kıyaslandığında gizli ısı ve yüzey gerilme değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha düşük olduğu için en düşük değerler potasyumdur. Gizli ısı ve yüzey gerilme değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha yüksek olduğu için en yüksek kılcal limiti lityumda bulunmuştur.
- 900 K sıcaklık için üç çalışma sıvısının sürüklenme limiti kıyaslandığında potasyum ve sodyum değerleri birbirine yakındır. 900 K'de lityumun buhar yoğunluğu diğer çalışma sodyum ve potasyuma göre düşük olduğu için en düşük sürüklenme limiti değeri lityumdur.
- Tüm sıcaklık değerleri için 900 K'de üç çalışma sıvısının kaynama limiti kıyaslandığında, yüzey gerilmesi sodyum ve potasyumdan daha düşük olduğu için en düşük değerler potasyum çalışma sıvısında bulunmuştur. Lityumun yüzey gerilme değeri diğer çalışma sıvılarından daha büyük olduğu için en büyük kaynama limiti ise lityum olduğu görülmüştür.
- 900 K sıcaklık için, potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılı ısı boruları için en yüksek ısı çekimleri sırasıyla 35, 110 ve 24 kW olarak bulunmuştur.
- Sonuç olarak; en yüksek ısının sodyum çalışma sıvılı nükleer reaktörde olacağı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Ray MP, Poston DI, Dasari VR, Reid RS. Design of megawatt power level heat pipe reactors: Los Alamos National Lab. (LANL). Los Alamos, NM, United States; 2015.
- [2] Alizadehdakhel A, Rahimi M, Alsairafil AA. CFD modelling of flow and heat transfer in a thermosyphon. International Communications in Heat Mass Transfer 2010; 37: 312–318.
- [3] Panda KK, Dulera IV, Basak A. Numerical simulation of high temperature sodium heat pipe for passive heat removal in nuclear reactors. Nuclear Engineering and Design 2017; 323: 376–385.

- [4] Zhang Z, Chai X, Wang C, Sun H, Zhang D, Tian W, Qiu S, Su GH. Numerical investigation on startup characteristics of high temperature heat pipe for nuclear reactor. *Nuclear Engineering and Design* 2021; 378: 1–16.
- [5] Hernandez R, Todosow M, Brown NR. Micro heat pipe nuclear reactor concepts: Analysis of fuel cycle performance and environmental impacts. *Annals of Nuclear Energy* 2019; 126: 419–426.
- [6] Laubsher R, Dobson RT. Theoretical and experimental modelling of a heat pipe heat exchanger for high temperature nuclear reactor technology. *Applied Thermal Engineering* 2013; 61: 259–267.
- [7] Jeong YS, Kim KM, Kim IG, Bang IC. Hybrid heat pipe based passive in-core cooling system for advanced nuclear power plant. *Applied Thermal Engineering* 2015; 90: 609–618.
- [8] Guo Y, Su Z, Li Z, Wang K, Liu X. An improved model of the heat pipe based on the network method applied on a heat pipe cooled reactor. *Frontiers in Energy Research* 2022; 10: 1–16.
- [9] Nemeč P, Čaja A, Malcho M. Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe. *Mathematical and Computer Modelling* 2013; 57: 126–136.
- [10] Tian Z, Zhang J, Wang C, Guo K, Liu Y, Zhang D, Tian W, Qiu S, Sua GH. Experimental evaluation on heat transfer limits of sodium heat pipe with screen mesh for nuclear reactor system. *Applied Thermal Engineering* 2022; 209: 1–12.
- [11] Yang H, Handekar S, Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering* 2008; 28: 49–59.
- [12] Melnyk RS. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components, In: *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, Ukraine; 2017.
- [13] Mansour M. Heat transport limitations and overall heat transfer coefficient for a heat pipe. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 2016; 5: 119-123.
- [14] Levinsky A, Wyk JJ, Arafat Y ve ark. Westinghouse eVinci reactor for off-grid markets transactions of the American nuclear society, Orlando, Florida, November 11-15, 2018.
- [15] Hu G, Hu R, Zou L. Development of heat pipe reactor modeling SAM. Nuclear Science and Engineering Division. Argonne National Laboratory; 2019.
- [16] Peterson G. An overview of micro heat pipe research and development. *Journal Applied Mechanics Review* 1992; 45: 175–189.
- [17] Karabulut K, Alnak DE. Investigation of heat transfer and flow properties in separated flow and reattachment regions for liquid sodium flow at fast reactors. *Nuclear Engineering and Design* 2021; 379: 1–5.
- [18] Faghri A, Zhang Y. *Transport phenomena in multiphase systems*, Elsevier, Burlington, MA, 2006.
- [19] Faghri A, Zhang Y, Howell J, *Advanced heat and mass transfer*, 1st ed., Global Digital Press, Columbia, MO, 2010.
- [20] Ivanovskii MN, Sorokin VP, Yagodkin IV. *The physical principles of heat pipes*, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1982.
- [21] Vargaftik NB. *Handbook of physical properties of liquids and gases*, Hemisphere, New York, NY, 1975.
- [22] Busse CA. Theory of the ultimate transfer of cylindrical heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1973; 16: 169–186.
- [23] Chi W. *Heat pipe theory and practice*. Hemisphere Publishing Corporation, New York; 1976.
- [24] Kumaresan G, Venkatachalapathy S. A review on heat transfer enhancement studies of heat pipes using nanofluids. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)* 2012; 3: 1–8.
- [25] Mahdavia M, Tiaria S, Schamphelreieb SD, Qiu S. Experimental study of the thermal characteristics of a heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2018; 93: 292–304.
- [26] Faghri A. *Heat pipe science and technology*. 1st ed. Taylor & Francis. Washington, D.C; 1995.
- [27] Faghri A, Thomas S. Performance characteristics of a concentric annular heat pipe: Part I-experimental prediction and analysis of the capillary limit. *Journal of Heat Transfer* 1989; 111: 844–850.