



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

ADYABATİK KILCAL BORUDA SOĞUTUCU AKIŞKAN OLARAK İZOBÜTAN(R600a) AKIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

**TOLGA APAYDIN
ARÇELİK**

**HASAN HEPERKAN
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

ADYABATİK KILCAL BORUDA SOĞUTUCU AKIŞKAN OLARAK İZOBÜTAN(R600a) AKIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tolga APAYDIN
Hasan HEPERKAN

ÖZET

Ev tipi buzdolaplarının soğutma sistemlerinde genişleme elemanı olarak kılcal borular sıklıkla kullanılmaktadırlar. Kılcal boru içinde gerçekleşen kısılma sırasında soğutkanın iki fazlı akım gelişimi olduğundan karmaşık bir akış yapısı mevcuttur. Literatürde R600a soğutkanı kullanılan küçük ölçekli soğutma sistemlerine yönelik deneysel çalışmalar yok denecek kadar azdır. Adyabatik kılcal boruda doğru bir sayısal model oluşturabilmek için özellikle kılcal boru çıkışına doğru gelişen iki fazlı akım tipini tespit etmek önemlidir. Bu çalışmada, soğutkanın farklı yoğuşma basınçları ve aşırı soğuma miktarları için dikey kılcal boru içindeki soğutkan akışının gelişimi hızlı kamera ile görüntülenmiş ve değişen parametrelerin soğutkan debisine olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adyabatik kılcal boru, kılcal boruda basınç kaybı, R600a, iki fazlı akım, akış görselleme

ABSTRACT

Capillary tubes are often used as an expansion component in the refrigeration systems of household refrigerators. The flow inside the capillary tube is complex due to fact that; during the throttling inside the capillary tube, the refrigerant flow occurs in two phases. In literature there are hardly any experimental studies on small scale refrigeration systems using isobutane (R600a) as the refrigerant. Determining the type of two phase flow that develops especially towards the capillary outlet is significant to derive a correct numerical model for adiabatic capillary tube. In this study, the refrigerant flows in the vertical capillary tube, under different condensation pressures and different degrees of subcooling, are recorded via high-speed camera; and the effect of different parameters on refrigerant mass flow is analyzed.

Key Words: Capillary tube, pressure loss in capillary, R600a, two phase flow, flow visualization.

1. GİRİŞ

Kılcal boru, çoğunlukla küçük ölçekli buhar sıkıştırımalı soğutma çevrimlerinde kısılma elemanı olarak kullanılmaktadır. Çapı 0.33-2.0 mm, boyu 2-6 m arasında tanımlanan bu eleman, buharlaştırıcı girişini yoğuşturucu çıkışına bağlamaktadır. Kılcal borunun hareketli bir parçası yoktur, basit ve ucuzdur. Kompresör durma periyotlarında yoğuşturucu ile buharlaştırıcı arasında basınçların dengelenmesine izin verir, böylece kompresör kalkış torku azalır [1].

Adyabatik kılcal boru hakkında birçok deneysel ve teorik araştırma çalışması mevcuttur. Literatürdeki deneysel çalışmaların birçoğunda kılcal borudan dışarıya olan ısı transferi ihmal edilmiştir. İlk araştırmalar daha çok R-12 ve R-22 soğutkanları üzerine olmuştur. 1990'dan sonra R-134a, R-600a, R-290 gibi yeni çevreci soğutkanlar, araştırmalarda kullanılmıştır.

Literatürde çeşitli soğutkanlar üzerine adyabatik kılcal boru üzerine yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Bolstad ve Jordan (1948) [2] yaptıkları çalışmada buharlaştırıcı basınç değişiminin soğutkan kütle debisi üzerinde önemsiz bir etki olduğunu bulmuştur. Ayrıca soğutkan aşırı soğuma değeri (subcool) ile soğutkan debisinin lineer olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bundan başka kılcal boruya yağ girişinin soğutkan kütle debisi üzerine etkisini çalışmışlardır. Soğutma sisteminde yağ ayırıcı kullanımının debi miktarını %8'in altına düşürdüğünü bulmuşlardır. Yağ karışımı soğutkan durumunda soğutkanın kaynama sıcaklığı düşüldüğü için debi artmaktadır. Bunun yanı sıra Bolstad ve Jordan'ın tersine Motta (2002) [3] %5.7 oranda yağ konsantrasyonu için R-404a soğutkanda debinin %6.3 düşüğünü gözlemlemiştir.

Araştırmacıların bir kısmı soğutkanın kaynamaya başladığı yeri gözlemek için cam tüpte akışı görüntülemişlerdir. Cooper(1957) [4], cam boru kılcal boru içinde akışın sis şeklinde olduğunu ve buharlaşmanın gecikerek gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Buna ek olarak soğutkanın iki fazlı akım boyunu hesaplamak için bir matematik model geliştirmiştir. Ayrıca debi ile kılcal boru girişindeki aşırı soğuma arasında lineer bir ilişkinin olduğu saptamıştır.

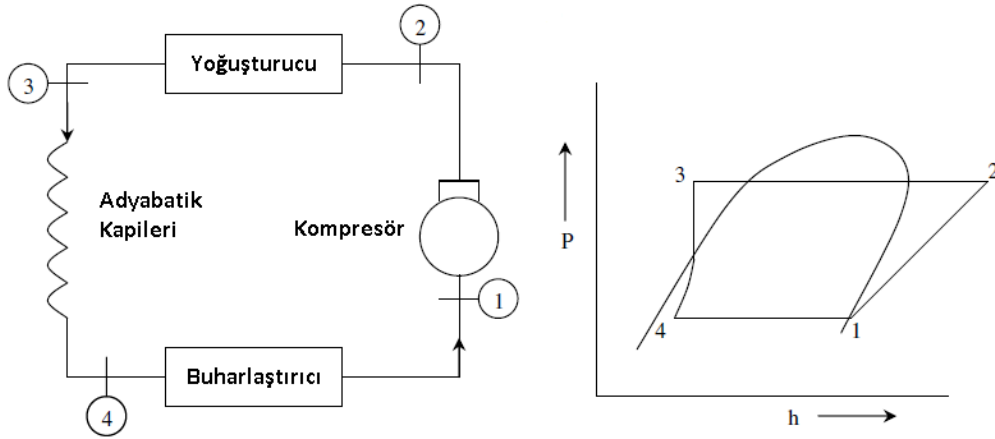
Çeşitli soğutkanların debi değerlerini tahmin eden korelasyonların önerildiği çalışmalar mevcuttur. Bansal ve Rupasinghe(1996) [5], adyabatik ve diyabatik kılcal borularını boyutlandırmak için ampirik olarak basit bir korelasyon geliştirmişlerdir. Bu korelasyon literatürdeki belirli aralıklar için verilen deneysel çalışma sonuçlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Melo(1999) [1], R-12, R-134a ve R-600a soğutkanlarında kılcal boru çapı, uzunluğu, aşırı soğutma değeri ve yoğunlaşma basıncının kütle debisine olan etkilerini sunmuştur. Çalışma aralıkları için her soğutkanın debi miktarlarını tahmin eden ayrı korelasyonlar önermiştir. Matthias Schenk(2014) [6], R600a soğutkanının 0.65-2.00 kg/h debi aralıklarındaki kılcal boru içindeki soğutkan akışını deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen deney sonuçları, literatürde yer alan numerik denklemlerin verdiği sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış ve en iyi sonucu Hermes'in (2010) geliştirdiği yarı cebirsel denklemin verdiği belirtilmiştir.

Yapılan inceleme sonucunda adyabatik kılcal boru içinde R600a soğutkan akışının deneysel olarak incelendiği iki adet çalışmaya rastlanmıştır. Melo'nun çalışmasında soğutma sistemi yoğunlaşma basıncı 9 ile 11 bar arasında olup bunlar küçük ölçekli soğutma sistemlerine göre büyük değerlerdir. Yeni yayınlanan Matthias'ın deney düzeneğinde soğutkan aşırı soğuma miktarının 8-13 °C olduğu durumlar için testler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kılcal boru iç çapı 0.61 ve 0.69 mm'dir.

Bildiride açıklanan çalışmada iç çapı 0.86 mm, uzunluğu 3750 mm olan kılcal borunun giriş yoğunlaşma basıncının 4.3 ile 5.3 bar, aşırı soğuma miktarının 2 ile 6 K olduğu aralık için kılcal boru içinde meydana gelen basınç kaybı ve soğutkan debi miktarı ölçülmüştür. Buna ek olarak iki fazlı akımın olduğu kılcal boru bölgesi, test düzeneğinde dikey cam boru olarak konumlandırılmıştır. Bu durumda dikey kılcal boru içinde iki fazlı akımın gelişimi hızlı kamera ile görüntülenmiştir.

2. ADYABATİK DÜZ KAPILARI BORULAR

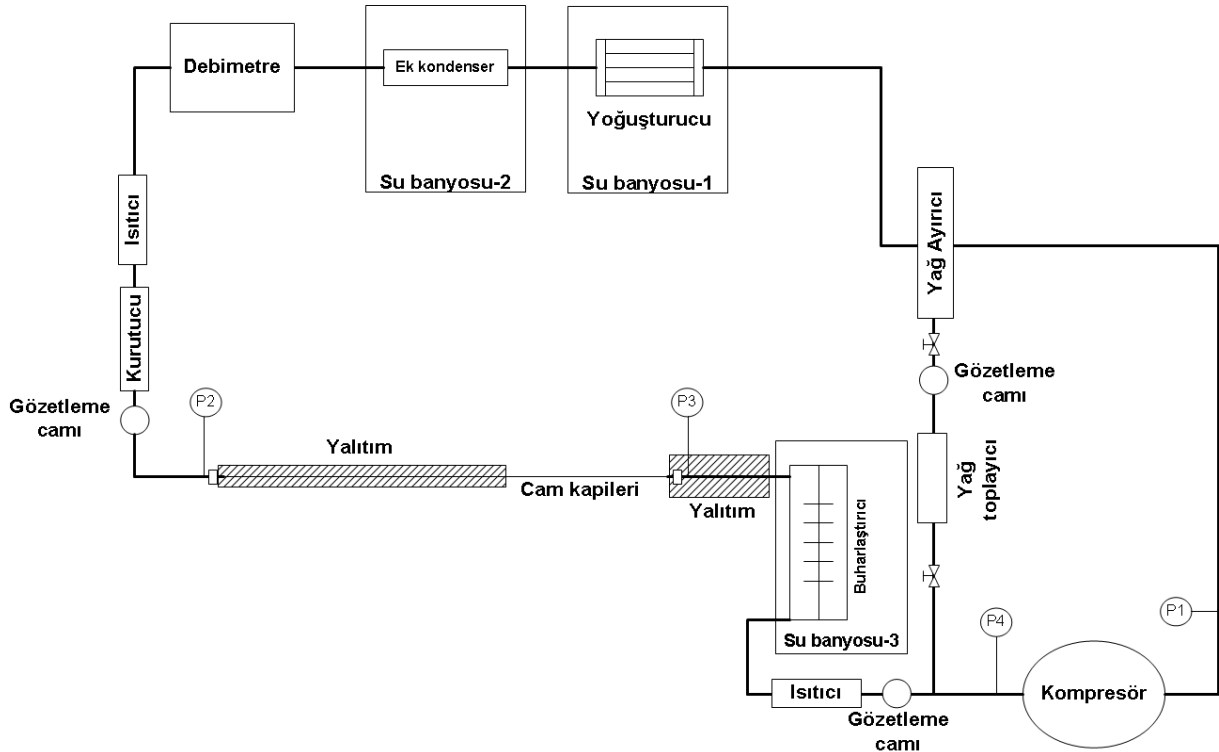
Şekil 1'de görüldüğü üzere adyabatik kılcal boru içinde, soğutkan yüksek basınçtan düşük basınca adyabatik olarak genişlemektedir. Soğutkan, sıvı fazda kılcal borudan girer ve sıcaklık sabit kalarak kılcal boru içerisinde akarken, basınç lineer olarak sürtünme etkisi ile düşer. Basınç, doyma basıncının altına düşerken, sıvının bir kısmı buhar içinde flaş olur ve buharlaşmasının başlangıcı ile birlikte kılcal boruda iki fazlı akım gelişir. Bu durum buharın kalitesi ve akışkan hızının etkisi ile ivmelenen bir basınç düşüşü başlamasına neden olur. Artan basınç düşüşü soğutkan sıcaklığını hızlı bir şekilde düşürür. Şekil 1'de 3-4 prosesleri arasında yüksek basınçtaki sıvının adyabatik genişlemesi görülmektedir. Bu proseste soğutkan içinde flaş oluşuncaya kadar entalpi sabit kalmaktadır. Flaşın sonucunda toplam enerjinin bir kısmı kinetik enerjiye çevrilmekte ve entalpi kılcal boru son kısmında düşmektedir.



Şekil 1. Adyabatik kılcal boru bulunan buhar sıkıştırımlı sistem (Şematik görünüm/P-h Diyagramı)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

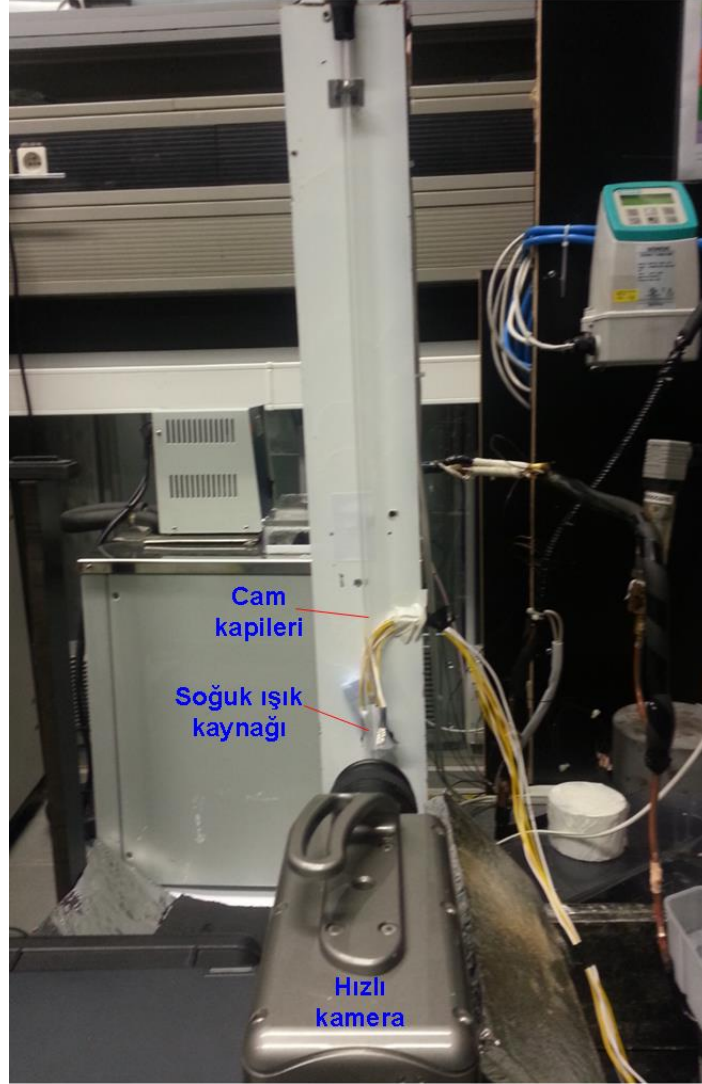
3.1. Deney Düzeneği



Şekil 2. Deney Düzeneği

Kurulan deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Deney düzeneği buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimini esas alarak kurulmuştur. Kompresörün bastığı soğutkan yağ karışımında bulunan yağın çok büyük bir kısmını ayıran ve soğutma sistemine sirküle olmasını önleyen yağ ayırıcı, kompresör çıkışına yerleştirilmiş olup ayırıcı altında biriken yağ, manuel vana ile ara ara kompresör emiş hattına yönlendirilmektedir.

Soğutma sistemi yoğuşma basıncı ve aşırı soğuma miktarını ayarlamak için 2 adet, buharlaştırıcı tarafı sıcaklık değişimini dengede tutabilmek için 1 adet su banyosu kullanılmıştır. Aşırı soğuma miktarının kontrol edildiği 2. su banyosunda bulunan ek kondenser çıkışına sistemdeki kütle debisini ölçmesi için bir adet hassas debi ölçer yerleştirilmiştir. Kılcal boru ve kompresör giriş sıcaklığını ayrı ayrı kontrol edebilmek için debi ölçer çıkışına ve kompresör girişine birer adet ısıtıcı yerleştirilmiştir. Elde edilmek istenen kılcal boru giriş sıcaklığı ve kompresör giriş sıcaklığına göre ısıtıcı dijital termostat ile kontrol edilmektedir. Soğutma sistemi içerisindeki istenmeyen nemleri ve partikülleri tutması için kılcal boru girişi öncesine bir adet kurutucu konulmuştur. Soğutma sistemi içindeki önemli yerlerdeki soğutkan akışını kontrol etmek için gerekli yerlere gözetleme camları bağlanmıştır.



Şekil 3. Cam boru içindeki soğutkanın görüntülenmesi

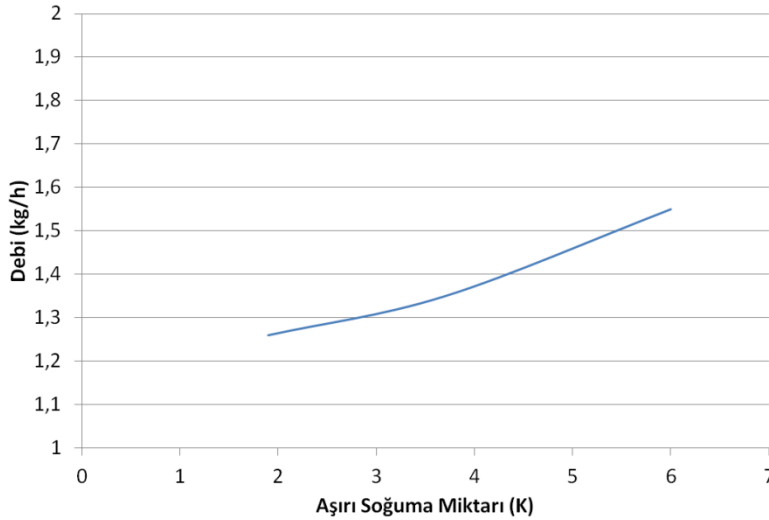
Kurutucu çıkışı ile buharlaştırıcı arasına 0.86 mm iç çapında 3750 mm boyunda kılcal boru yerleştirilmiştir. Kılcal boru iki kısımdan oluşmaktadır. Soğutkanın sıvı fazının bulunduğu kılcal boru giriş kısmı bakır kılcal borudur. İki fazlı akışın başladığı ve devam ettiği kısım ise cam kılcal borudan oluşmaktadır. Cam kılcal boru dışında kalan kılcal boru kısmı, çevre ile olan ısı transferini önlemek için içi oyuk sünger malzeme ile yalıtılmıştır. Çalışmada farklı koşullar altında dikey konumda bulunan cam kılcal boru içindeki iki fazlı soğutkan akışının başlangıcı hızlı kamera ile görüntülenmiştir. Şekil 3'te cam boru içindeki soğutkanın görüntülediği deney tesisatı görülmektedir. 64x200 çözünürlükte 28169 FPS (Frame Per Second)'de çekimler yapılmıştır. Daha iyi bir görüntüleme yapabilmek için cam kılcal boru arkasında noktasal yüksek güçte soğuk ışık kaynağı kullanılmıştır.

Soğutma sistemi üzerinde kompresör giriş/çıkış ve kılcal boru giriş/çıkış olmak üzere toplam 4 adet %0.10 doğrulukla ölçüm yapabilen basınç transdüserleri yerleştirilmiştir. Buna ek olarak soğutma sistemi üzerinde her komponent giriş çıkışına $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ hassasiyette okuyan T tipi termokupllar hassas bir şekilde bağlanmıştır. Ölçüm öncesinde tüm termokupl ve transdüserlerin kalibrasyonları yapılmıştır. Kullanılan debi ölçer, üretici firmadan kalibrasyon sertifikasıyla temin edilmiştir.

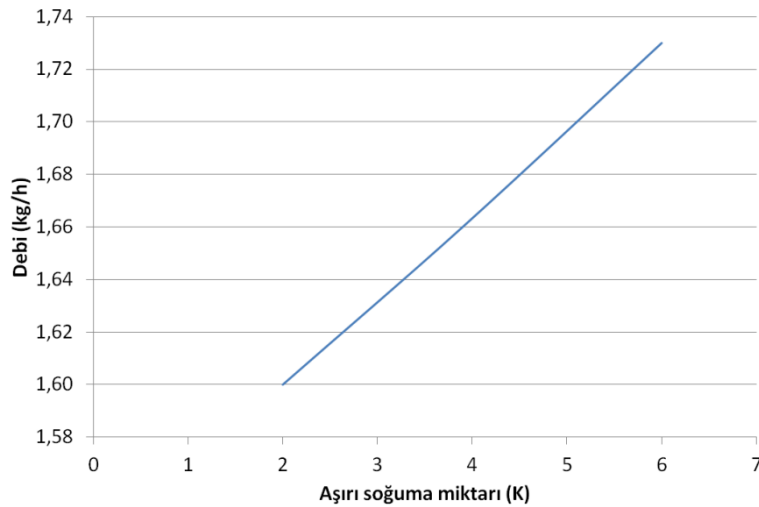
Kurulan deney düzeneği üzerinde ölçülen büyüklüklerin bilgisayar ekranında görüntülenmesi için data toplama sistemi kurulmuştur. Böylece eş zamanlı olarak ölçülen değerlerin değişimi bilgisayar ekranında zamana bağlı olarak izlenebilmiştir ve datalar analiz edilebilmiştir.

3.2. Deney Sonuçları

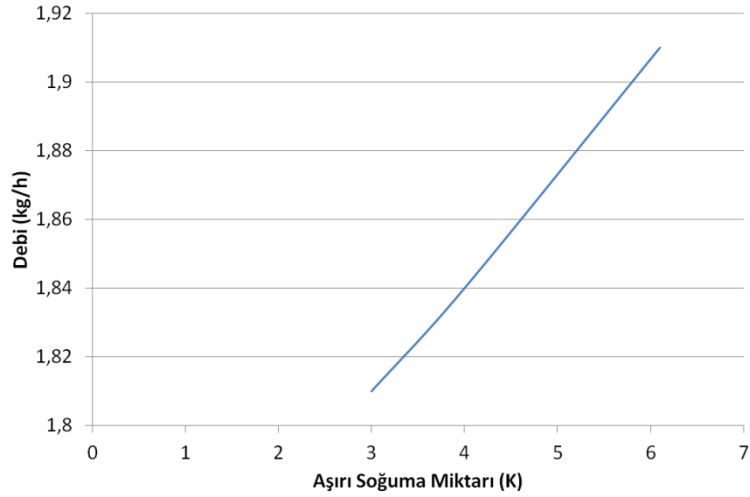
Soğutkanın farklı yoğuşma basınçları ve farklı aşırı soğuma miktarlarının, soğutkan debisine olan etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4, 5 ve 6'da sırasıyla 4.3, 4.7 ve 5.3 bar soğutkan yoğuşma basınçları durumunda 2 ile 6 K arasındaki aşırı soğuma miktarının soğutkan debisine olan etkisi görülmektedir. Bunlara göre aşırı soğuma miktarı artışı ile soğutkan debi miktarı lineere yakın bir şekilde artmıştır. Örneğin 4.3 bar yoğuşma basıncında aşırı soğuma miktarının 2 K'den 6 K'e yükselmesi durumunda soğutkan debi miktarı yaklaşık yüzde 23 artmıştır.



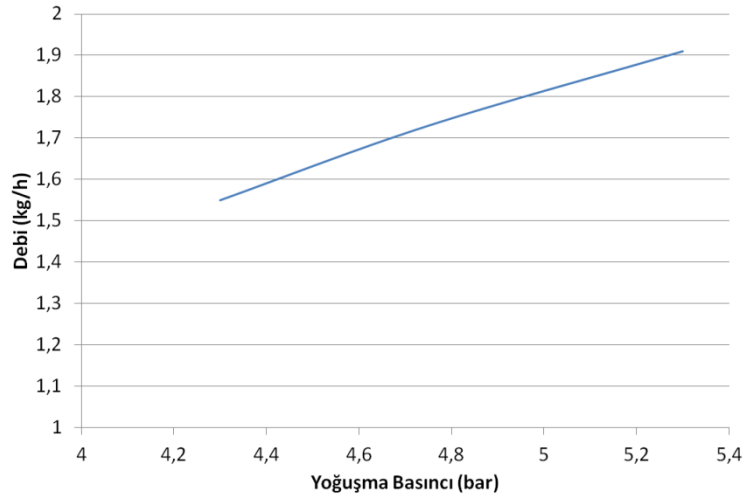
Şekil 4. 4,3 bar yoğuşma basıncında aşırı soğuma miktarının soğutkan debisine etkisi



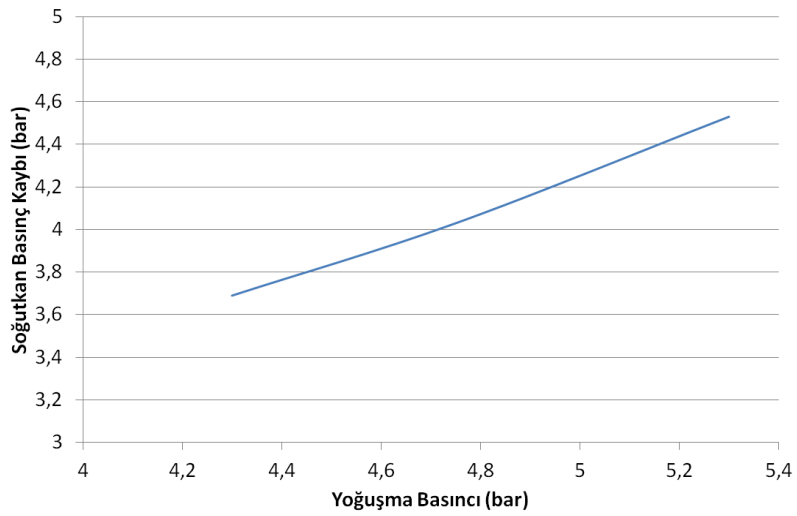
Şekil 5. 4,7 bar yoğuşma basıncında aşırı soğuma miktarının soğutkan debisine etkisi



Şekil 6. 5,3 bar yoğuşma basıncında aşırı soğuma miktarının soğutkan debisine etkisi

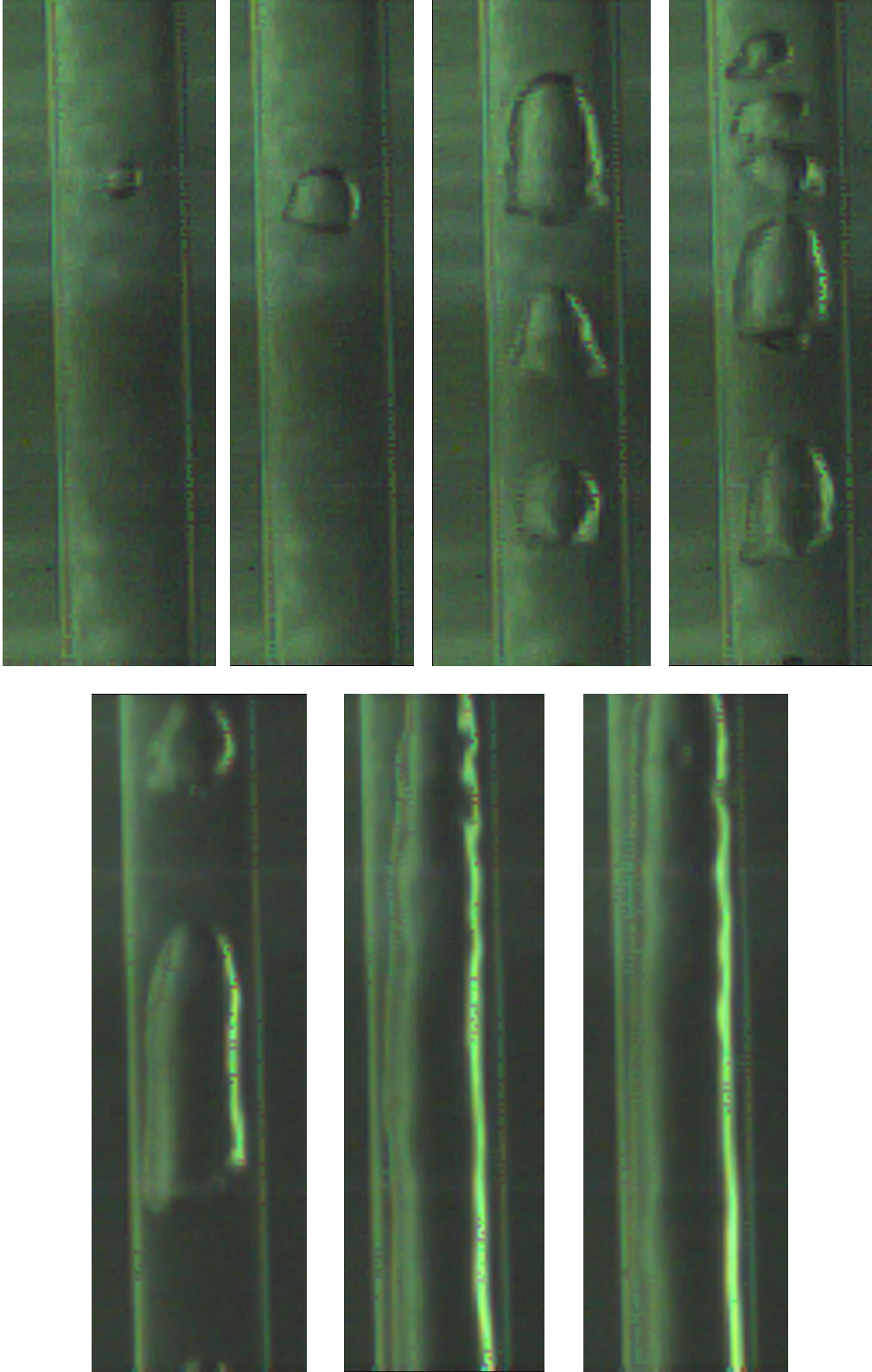


Şekil 7. Soğutkanın sabit aşırı soğuma sıcaklığında yoğuşma basıncının soğutkan debisine etkisi



Şekil 8. Soğutkanın sabit aşırı soğuma sıcaklığında yoğuşma basıncının soğutkan basınç kaybına etkisi

Şekil 7’de soğutkanının 6 K aşırı soğuma durumunda farklı yoğuşma basınçlarındaki soğutkan debi değişimi görülmektedir. Buna göre yoğuşma basıncı arttıkça çevrim içindeki soğutkan debisi artmıştır. Örneğin yoğuşma basıncının 4.3 bar’dan 5.3 bar’a yükselmesi durumunda sirküle olan debi miktarı yaklaşık %23 kadar artmıştır.



Şekil 9. Dikey cam boru içindeki soğutkanın iki fazlı görüntüsü

Şekil 8'de soğutkanın 6 K aşırı soğuma durumunda yoğuşma basıncının değişiminin kılcal boru giriş ve çıkış arasında gerçekleşen soğutkan basınç kaybına etkisi sunulmuştur. Bu durumda yoğuşma basıncının etkisi ile soğutkan debisindeki artış, kılcal boru içindeki soğutkan basınç kaybı artışını tetiklemiştir.

Soğutma sisteminin düşük yoğuşma basıncında (4.3 bar, 6 K subcool) dikey cam kılcal boru giriş-çıkışı arasında soğutkanın iki fazlı akış durumu incelenmiştir. Hızlı kamera ile çekilen videolardan elde edilen bazı anlık görüntüler Şekil 9'da paylaşılmıştır. Videolarda kılcal boru içindeki basınç düşüşünün etkisi ile öncelikle kabarcıklı akış başlamaktadır, ardından kabarcıklar sayı ve hacim olarak büyüyüp dalgalı akış görülmüştür. Ardından kurşun tipi büyük kabarcıklar birleşerek halkasal akış tipine dönüşmüştür. Görüntülerde halkasal akışa doğru geçerken, gaz fazındaki soğutkan hızının giderek arttığı görülmektedir.

SONUÇLAR

Sonuç olarak belirli sınır şartları içerisinde küçük ölçekli buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimlerinde kısımla elemanı olarak kullanılan adyabatik tipte dikey kılcal boru içinde iki fazlı R600a soğutkan akışının gelişimi görüntülenmiş ve 0.86 mm iç çapa sahip kılcal boruda R600a soğutkanı için literatürdeki aralıklardan farklı bir çalışma aralığında kılcal boru girişindeki basınç ve sıcaklık değişimlerinin soğutkan debisine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kılcal boru girişinde basınç artışı, soğutkanın daha hızlı bir şekilde yoğuşturucudan buharlaştırıcıya geçişini hızlandırmış ve dolayısıyla kılcal borudaki basınç kaybını artırmıştır. Kılcal boru girişi soğutkan sıcaklığı ile yoğuşma sıcaklığı arasındaki fark büyüdükçe, kılcal boru içindeki soğutkan sıvı boyu uzamakta ve iki fazlı akım boyu kısalmaktadır. Bu durumda boru boyunca akışa karşı koyan direnç azalmakta ve kılcal borudan geçen debi artmaktadır.

Dikey kılcal cam boru kısmında iki fazlı akımın gelişimi hızlı kamera ile görüntülenmiştir. Cam kılcal boru giriş kısmında meydana gelen kabarcıklı akış, basınç düşüşünün etkisi ile kuruluk derecesi artmakta ve kabarcık çapları büyüyerek akışın da etkisi ile mermi tipi ardından halkasal akış tipine dönüşmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] C. Melo, R.T.S. Ferreira, C.B. Neto, J.M. Goncalves, M.M. Mezavila, An experimental analysis of adiabatic capillary tubes, Appl. Thermal Eng. 19 (1999) 669-684.
- [2] M.M. Bolstad, R.C. Jordan, Theory and use of the capillary tube expansion device, Refrigerating Eng. 56 (1948) 577-583.
- [3] S.F.Y. Motta, J.A.R. Parise, S.L. Braga, A visual study of R-404A/oil flow through adiabatic capillary tubes, Int. J. Refrigeration 25 (2002) 586-596.
- [4] L. Cooper, C.K. Chu, W.R. Brisken, Simple Selection method for capillaries derived from physical flow conditions, Refrigerating Eng. (1957) 37-41.
- [5] P.K. Bansal, A.S. Rupasinghe, An empirical model for sizing capillary tubes, Int. J. Refrigeration 19 (1996) 497-505.
- [6] Matthias Schenk*, Lothar R. Oelrich, Experimental investigation of the refrigerant flow of isobutane (R600a) through adiabatic capillary tubes, Int. J. Refrigeration 38 (2014) 275-280.



ÖZGEÇMİŞ

Tolga APAYDIN

1985 yılı Gaziantep doğumludur. 2007 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü, 2008 yılında aynı üniversitenin İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü (çift lisans) bitirmiştir. Aynı üniversiteden 2009 yılında Makine Mühendisliği bölümü Termodinamik Anabilim Dalı Isı Proses Programında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Aynı üniversitede aynı bölümde doktora eğitimine devam etmektedir. 2007-2009 yılları arasında Arçelik Firması Merkez Arge Departmanın Termodinamik Teknolojileri Ailesinde proje yardımcısı olarak çalışmıştır. 2009'dan bu yana aynı departmanda Arge Uzmanı olarak görev yapmaktadır. Buzdolabı soğutma sistemleri, enerji verimliliği, ürün geliştirme ve soğutma teknikleri araştırma-geliştirme konularında çalışmaktadır.

Hasan HEPERKAN

1953 yılında İstanbul 'da doğmuş, 1970'te Ankara Fen Lisesi, 1974'te İTÜ Makina Fakültesi'nden mezun olmuştur. Fullbright ve TÜBİTAK şeref bursiyeri olarak ABD'ye giden Heperkan, 1976 da Syracuse University'de M.Sc. ve 1980'de University of California, Berkeley'de Ph. D. derecelerini elde etmiş, bu arada Lawrence Berkeley Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak çalışmıştır. Daha sonra ABD'de Union Carbide firması Araştırma Merkezi'nde bir yıl görev yaparak, Alexander Von Humboldt bursiyeri olarak (1981-1984) Almanya'da Universitaet Karlsruhe (TH)'ya gitmiştir. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ve Demirdöküm'de çalıştıktan sonra 1996'da Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi'ne geçerek 1997 de profesör unvanını almıştır. Aynı üniversitede Makina Fakültesi dekanı olarak görev yapmıştır; halen Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı'nda öğretim üyesidir. İki dil bilen Heperkan çeşitli ulusal ve yabancı ödüller kazanmış ve 100 ün üzerinde kitap, makale ve bildirisi yayınlanmıştır.

