

KAYNAMA VE YOĞUŞMADA ISI TRANSFERİ DENEYİ

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok mühendislik uygulamasında oldukça yüksek ısı akılarıyla karakterize edilen kaynama ve yoğuşma işlemleriyle karşılaşmaktadır. Örneğin kapalı devre bir güç çevriminde, basınçlı su önce bir buhar kazanında buhara dönüştürülür. Daha sonra, bir türbinde genişletilip yoğuşturucuda tekrar sıvı hale dönüştürülür ve bu halden de çevrime devam etmek üzere buhar kazanına pompalanır. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimlerinin ana elemanlarından olan buharlaştırıcılar ve yoğuşturucular, içerisinde kaynama ve yoğuşmada ısı transferinin gerçekleştiği diğer tipik örnekler olarak verilebilir. Yine günümüzde, gelişmiş elektronik cihazların ısı performanslarının iyileştirilmesinde, yüksek ısı taşınımı yeteneği nedeniyle kaynama işleminden yararlanılmaktadır. Bu tür sistemlerin akılcı bir şekilde tasarlanabilmesi için faz değişimi işlemlerinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Kaynama katı-sıvı ara yüzünde ve yoğuşma da katı-buhar ara yüzünde gerçekleşen faz değişimi işlemleri olup her iki işlem sırasında da gizli ısı etkisi önemli rol oynamaktadır. Kaynama yoluyla sıvının buhara dönüştürülmesi katı yüzeyden sıvıya ısı verilerek sağlanırken, yoğuşma yoluyla buharın sıvıya dönüştürülmesi buhardan katı yüzeye ısı verilmesi suretiyle gerçekleşir.

Kaynama ve yoğuşma işlemlerinin her ikisinde de akışkan hareketi söz konusu olduğundan, bu işlemler sırasında gerçekleşen ısı alış verişi taşıyım yoluyla ısı transferi kapsamında değerlendirilir. Ancak, bu işlemler sırasındaki faz değişimi nedeniyle katı yüzeyle akışkan arasındaki ısı alış verişinin akışkan sıcaklığını etkilemeden gerçekleşmesi ısı taşınımının diğer türlerine göre farklılık arz etmektedir. Kaynama ve yoğuşmayı gerçekte önemli ve özel kılan şey aslında çok küçük sıcaklık farkları altında yüksek mertebelerde ısı transferinin gerçekleşebiliyor olmasıdır. Kaynamada olsun yoğuşmada olsun faz değişimi işlemini karakterize etmede gizli ısı h_{fg} 'nin yanı sıra, sıvı-buhar ara yüzünde oluşan yüzey gerilmesi σ ve iki faz arasındaki yoğunluk farkı da önemli rol oynamaktadır. Akışkanın sıvı fazındaki yoğunluğu ile buhar fazındaki yoğunluğu arasındaki fark nedeniyle faz değişimi işlemi sırasında, $g(\rho_l - \rho_v)$ ile orantılı bir kaldırma kuvveti oluşur ve bu kuvvet de bir doğal taşınımın ortaya çıkmasına yol açar. Böylece, gizli ısı ve doğal taşınımın birleşik etkisiyle, kaynama ve yoğuşma işlemleri sırasındaki ısı taşınım katsayıları, faz değişiminin olmadığı durumlardaki ısı taşınım katsayılarına göre çok daha büyük değerler almaktadır.

2. KAYNAMADA ISI TRANSFERİ

Bir sıvının buharlaşması eğer bir katı-sıvı ara yüzünde gerçekleşiyorsa faz değişimi işlemi kaynama olarak adlandırılır. Kaynama işlemi, sıvının temas ettiği katı yüzeyin sıcaklığı T_s , sıvının bulunduğu basınçtaki doyma sıcaklığı T_{sat} değerini aştığında meydana gelir ve bu sırada katı yüzeyden akışkana, Newton soğuma yasasına göre

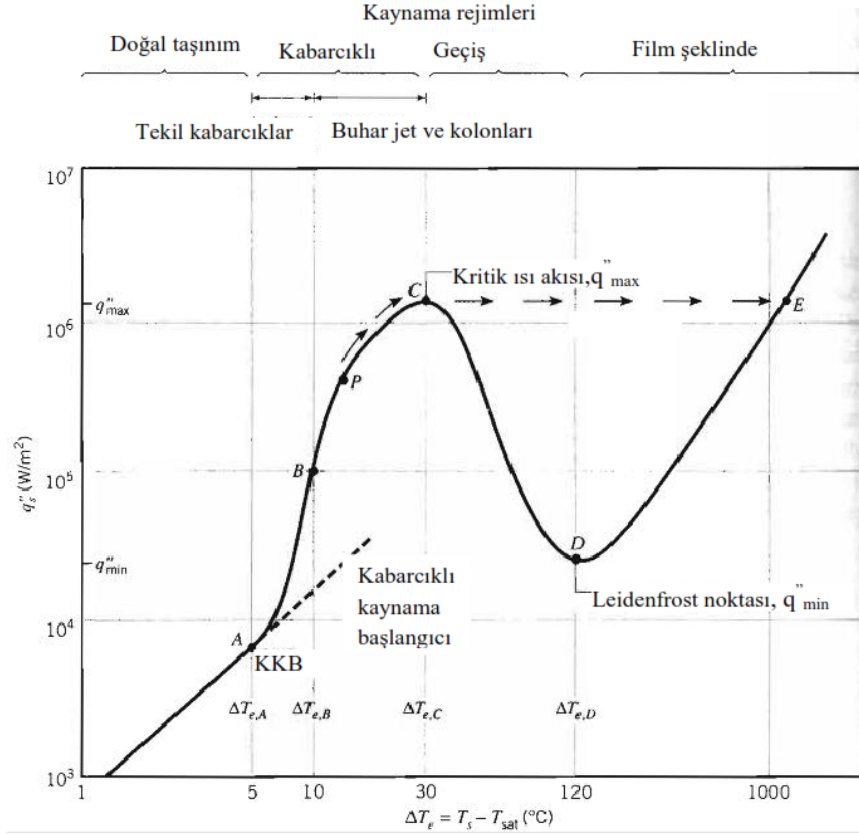
$$q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e \quad (1)$$

Bağıntısı ile verilen bir ısı geçişi gerçekleşir. Burada h (W/m^2K) ısı taşınım katsayısı ve $\Delta T_e \equiv T_s - T_{sat}$ da *aşkın sıcaklık* (yüzey sıcaklığı T_s 'nin doyma sıcaklığı T_{sat} 'i ne kadar aştığının bir ölçüsü olarak) diye adlandırabileceğimiz sıcaklık farkıdır. Kaynama mekanizması yüzeyde önce kabarcıkların oluşması ve daha sonra bu kabarcıkların yüzeyden ayrılması şeklindeki hareketlerle karakterize edilir. Yüzeyde kabarcıkların oluşması, büyümesi ve dinamiği ise *aşkın sıcaklık*, katı yüzeyin yapısı ve akışkanın yüzey gerilmesi gibi termofiziksel özelliklerine karmaşık bir biçimde bağlılık gösterir. Dolayısıyla buhar kabarcığı oluşum dinamiği, yüzey üzerindeki akışkan hareketini etkilemesi nedeniyle ısı transfer katsayısı üzerinde kuvvetli bir etkiye sahiptir.

Kaynama, gerçekleştiği koşullara göre *havuz kaynaması* ve *zorlanmış taşınımlı kaynama* olarak sınıflandırılırken, sıvının bulunduğu sıcaklığa göre de *aşırı soğutulmuş kaynama* ve *doymuş kaynama* şeklinde de sınıflandırılabilir. *Havuz kaynamasında*, ana sıvı kitlesi durgun haldeyken ısıtıcı yüzey yakınındaki akışkan hareketi, doğal taşınım birlikte kabarcık oluşumu ve ısıtıcı yüzeyinden ayrılıp sıvının serbest yüzeyine doğru hareket eden kabarcıkların oluşturduğu karışım nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, *zorlanmış taşınımlı kaynamada* akışkan hareketi, doğal taşınım ve kabarcık kaynaklı karışım hareketlerine ek olarak bir dış kuvvetin de kullanılmasıyla sağlanmaktadır. *Aşırı soğutulmuş kaynamada* sıvı sıcaklığı doyma sıcaklığından düşüktür ve bu tür bir kaynama sırasında ısıtıcı yüzey üzerinde oluşup yeterli büyüklüğe eriştikten sonra yüzeyden ayrılan kabarcıklar sıvı içerisinde tekrar yoğuşabilirler. Buna karşılık, *doymuş kaynamada* sıvı sıcaklığı doyma sıcaklığının biraz üzerindedir ve bu koşullarda ısıtıcı yüzeyinde oluşan kabarcıklar kaldırma kuvvetinin etkisiyle sıvının serbest yüzeyine doğru itilirler ve buradan da dışarıya çıkarlar.

Deney düzeneğimiz esas olarak tipik bir havuz kaynamasının gerçekleştiği bir sistemden ibarettir. Bu nedenle burada tipik bir havuz kaynaması sırasında karşılaşılan karakteristik kaynama bölgeleri ve bu bölgelere ilişkin ısı geçiş mekanizmaları, *kaynama eğrisi* olarak bilinen ve Şekil 1' de gösterilen *ısı akısı – sıcaklık farkı* ($q_s'' - \Delta T_e$) diyagramı üzerinden ele alınacaktır. Şekildeki eğri her ne kadar *1 atm* basınçtaki **suya ait** ise de diğer akışkanların da benzer karakterde bir kaynama eğrisine sahip oldukları bilinmektedir. Eşitlik 1'i de göz önüne alarak farklı bölgelerdeki ısı geçiş rejimlerini daha ayrıntılı bir biçimde ele alabiliriz. Söz konusu eşitliğe baktığımızda *ısı akısı* q_s'' 'nin, *aşkın sıcaklık* ΔT_e 'nin yanı sıra *ısı taşınım katsayısı* h 'ya da bağlı olduğunu görüyoruz.

Doğal Taşınımlı Kaynama: Şekildeki eğrinin A noktasına kadar olan kısmını kapsayan bu bölge, $\Delta T_{e,A} \approx 5^\circ C$ olmak üzere $\Delta T_e \leq \Delta T_{e,A}$ ile sınırlı olup, bu bölgede ısı geçişi büyük ölçüde ısıtıcı yüzeyde ısınıp genişleyen sıvının yükselmesiyle oluşan doğal taşınımla gerçekleşir. Aşkın sıcaklık biraz yükseltilip A noktası civarına gelindiğinde, ısıtıcı yüzeyi üzerinde buhar kabarcıkları oluşmaya başlar ki bu noktaya *kabarcıklı kaynama başlangıcı*, *KKB* adı verilir. Bu bölgede, deney elemanından akışkana geçen ısı ampirik olarak hesaplanmak istenirse, Eşitlik 1' de *ısı taşınım katsayısı* h için



Şekil 1. Su için tipik Havuz kaynaması eğrisi (PO 1 atm).

$$h = 0.14k_l \left[\frac{g\beta\Delta T_e \rho_l^2 Pr_l}{\mu_l^2} \right]^{1/3} \quad (2)$$

bağıntısından hesaplanan değer kullanılabilir. Burada l indisli büyüklükler doyma durumundaki sıvıya ait büyüklükleri göstermekte olup Pr_l de

$$Pr_l = \frac{\nu_l}{\alpha_l} \quad (3)$$

bağıntısıyla verilen *Prandtl sayısını* temsil etmektedir.

Kabarcıklı Havuz Kaynaması: Şekil 1' de A-B-P-C eğrisine karşılık gelen bu bölge su için $\Delta T_{e,C} \approx 30^\circ\text{C}$ olmak üzere $\Delta T_{e,A} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,C}$ aralığını kapsamaktadır. Bu bölgede birisi *ayrık kabarcıklı kaynama bölgesi* ve diğeri de *buhar jetli veya buhar kolonlu kaynama bölgesi* olmak üzere iki farklı akış rejimi gözlenmekte olup bunlar Şekil 1' de sırasıyla A-B ve B-C eğrilerine karşılık gelmektedir. A-B bölgesinde ısıtıcı yüzeyinde oluşan tekil buhar kabarcıkları yüzeyden ayrılırken akışkan içerisinde hatırı sayılır derecede bir karıştırma etkisi yaratmak suretiyle ısı taşınım katsayısı ve ısı akısının önemli derecelerde artmasına neden olur. Bu bölgede ısı geçişinin önemli bir bölümü ısıtıcı yüzeyinden doğrudan hareket halindeki sıvıya ısı verilmesi şeklinde gerçekleşir. *Aşkın sıcaklık* değerinin $\Delta T_{e,B}$ ' nin üzerine çıkarılmasıyla B-C bölgesine geçilmiş olunur ki bu bölgede, ısıtıcı yüzey üzerinde daha fazla buhar kabarcığı oluşur ve bu kabarcıklar birleşerek kolonlar halinde sıvı yüzeyine çıkmaya başlarlar. Bu bölgede ise ısının önemli bir bölümünü ısıtıcı yüzeyinden sıvı yüzeyine hızla çıkan buhar kolonları taşır. B noktasından itibaren ΔT_e artırılmaya devam edildiğinde önce hem h hem de q_s'' artarken P noktasına gelindiğinde h en büyük değerine erişir ve bu özel noktadan itibaren ΔT_e artışıyla q_s'' ' nin de artmaya devam etmesine karşılık h düşmeye başlar.

Bunun sebebi olarak, söz konusu bölgede ısıtıcı yüzeyin büyük bölümünün buharla temas ediyor olması gösterilebilir. *Aşkın sıcaklık* ΔT_e daha da artırılarak C noktasına gelindiğinde ise ısı akısı q_s'' maksimum değerine erişir ki bu noktaya **kritik nokta** bu noktadaki ısı akısı değerine de **kritik ısı akısı** denir ve $q_{s,kr}'' = q_{max}''$ sembolüyle gösterilir. Atmosferik şartlardaki su için kritik ısı akısının $1MW/m^2$ değerinin biraz üzerinde olduğu bilinmektedir.

Küçük *aşkın sıcaklık* değerlerinde yüksek ısı taşınım katsayıları ($h \approx 10^4$ mertebesinde) ve dolayısıyla yüksek ısı akıları elde edilebildiğinden çoğu mühendislik cihazının kabarcıklı kaynama bölgesinde bulunacak şekilde tasarlanıp çalıştırılması istenir. Hatta mümkünse çalışma noktasının P noktası civarında olmasında yarar vardır. *Kabarcıklı kaynama* bölgesindeki ısı akısı yaklaşık olarak

$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{c_{pl} \Delta T_e}{0.006 h_{fg} Pr_l} \right]^3 \quad (4)$$

ampirik bağıntısından hesaplanabilir. Bu eşitlikte de l indisi sıvıya ait, v indisi de buhar fazına ait büyüklükleri göstermek için kullanılmıştır ve h_{fg} buharlaşma entalpisini (gizli ısısını), σ da akışkana ait yüzey gerilmesini göstermektedir. Şekil 1' deki C noktasına karşılık gelen *kritik ısı akısının* değeri ise literatürde

$$q_{kr}'' = q_{max}'' = C h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad (5)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Eşitlikte yer alan C bir sabit olup değerinin, çoğu geniş yüzeyli ısıtıcı için $C = 0.131$ civarında olduğu belirtilmektedir. Küçük ısıtıcı yüzeyler içinse bir düzeltme çarpanının kullanılması önerilmektedir.

Geçiş Kaynaması: Şekil 1' de $C-D$ eğrisine karşılık gelen bu bölge, su için $\Delta T_{e,D} \approx 120^\circ C$ olmak üzere $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$ aralığını kapsamakta ve aynı zamanda *kararsız film kaynaması bölgesi* veya *kısmi film kaynaması bölgesi* olarak da isimlendirilmektedir. Bu bölgede, ısıtıcı yüzeyinde kabarcıklar o kadar hızlı üretilmektedir ki ısıtıcı yüzeyinin önemli bir kısmı adeta bir *buhar örtüsü (battaniyesi)* ile kaplanmış gibi gözükmektedir. Bunun sonucu olarak da, buharın ısı iletim katsayısının sıvının ısı iletim katsayısından çok daha küçük olması nedeniyle, bu bölgede ΔT_e artarken hem h hem de q_s'' azalır. Buhar örtüsünü oluşturan film zaman zaman yırtılıp serbest yüzeye doğru hareket ettiğinden buradaki film yapısı bir bakıma kararsız bir yapıdır. Bu bölgenin sonundaki D noktasına gelindiğinde, yüzeydeki buhar örtüsü kararlı bir hal alır ve bu noktada ısı akısı en küçük değerini alır. Çünkü, *Leidenfrost noktası* olarak adlandırılan bu noktada ısı, ısıtıcıyı kaplamış gibi gözükken buhardan sıvıya büyük ölçüde iletim yoluyla geçer. Isı akısının bu noktada eriştiği en küçük değerin yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için literatürde

$$q_{s,D}'' = q_{min}'' = 0.09 \rho_v h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad (6)$$

bağıntısı önerilmiştir.

Film Kaynaması: Şekil 1' de gösterilen kaynama eğrisi üzerindeki D noktasından itibaren ısı geçişinde ısı taşınım mekanizmasının önem kazanması nedeniyle, artan ΔT_e ile ısı akısı q_s'' tekrar artmaya başlar. Isıtıcı yüzeyinde çok hızlı bir şekilde buhar kabarcığı üretildiğinden yüzey adeta kararlı bir buhar örtüsü tarafından kaplanmış gibi gözükken bu bölge aynı zamanda *kararlı film*

kaynaması bölgesi olarak da isimlendirilir. Bu bölgedeki ısı geçişini hesaplamak üzere literatürde verilen ampirik bağıntılar diğer bölgeler için verilen bağıntılara göre biraz daha karmaşıktır. Bunlardan, $h_{i\varsigma} < h_{ta\varsigma}$ olması durumu için literatürde önerilen, kısmen basit bir bağıntı

$$h = h_{ta\varsigma} + \frac{3}{4} h_{i\varsigma} \quad (7)$$

şeklindedir. Burada $h_{ta\varsigma}$ ve $h_{i\varsigma}$ sırasıyla taşınım ve ışınım için ortalama ısı transferi katsayıları olup

$$h_{ta\varsigma} = \frac{0.62k_v}{D} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)h'_{fg}D^3}{v_vk_v(T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (8)$$

ve

$$h_{i\varsigma} = \frac{\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (9)$$

bağıntılarından hesaplanabilirler. Eşitlik (8)' deki h'_{fg} , $h'_{fg} = h_{fg} + 0.80C_{p,v}(T_s - T_{sat})$ şeklinde tanımlanmış olan *düzeltilmiş gizli ısı*' yı gösterirken, Eşitlik (9)' da yer alan ε ve σ sembolleri sırasıyla ısıtıcı yüzeyin yayma katsayısını ve Stefan-Boltzmann katsayısını göstermektedirler. Eşitlik (8) kullanılırken, buhar fazına ait özelliklerin $T_f = (T_s + T_{sat})/2$ olarak tanımlanan ortalama film sıcaklığında ve sıvı fazına ait yoğunluğun doyma sıcaklığı T_{sat} ' ta alınması tavsiye edilmektedir.

3. YOĞUŞMADA ISI TRANSFERİ

Bir buharın sıcaklığı doyma sıcaklığının altına düşürüldüğü zaman yoğuşma meydana gelir. Endüstriyel cihazlarda yoğuşma işlemi, buharın soğuk bir katı yüzeye temas etmesi sonucu gerçekleşir ki bu tür bir yoğuşma *yüzey yoğuşması* olarak isimlendirilir. Yoğuşma işlemi sırasında açığa çıkan buharın gizli enerjisi (ısısı) yüzeye geçer ve yüzeyde yoğuşuk oluşur. Bilinen diğer yoğuşma şekilleri *homojen yoğuşma* ve *doğrudan temas yoğuşması*' dir. Bunlardan birincisinde, buharın başka bir gaz içerisinde damlacıklar halinde yoğuşup asılı kalarak *sis* oluşturması söz konusu iken; ikincisinde, buharın soğuk bir sıvının serbest yüzeyi ile temas etmesi sonucu yoğuşması söz konusudur.

Yukarıda belirtildiği gibi, endüstriyel cihazlarda çoğunlukla karşılaşılan yoğuşma *yüzey yoğuşması* şeklindedir ve yüzey yoğuşması da *film şeklinde yoğuşma* ve *damlacık şeklinde yoğuşma* olmak üzere iki farklı şekilde oluşabilir. Film şeklinde yoğuşma genellikle temiz ve düzgün yüzeylerde meydana gelirken, damlacık şeklinde yoğuşma daha çok kirli veya kolay ıslanabilme özelliği taşıyan malzemelerle (silikon, teflon, çeşitli vakslar ve yağ asitleri gibi) kaplanmış özel yüzeylerde meydana gelir. Damlacık oluşumu yüzeydeki çatlak, oyuk ve çukurlarda başlayıp yer çekimi etkisiyle aşağıya doğru kümelenip akma şeklinde devam eder.

Yoğuşma ister film şeklinde isterse damlacık şeklinde olsun; yoğuşuk, buharla soğutucu yüzey arasında, yoğuşuk kalınlığıyla orantılı bir ısı direnç oluşturur. Yoğuşuk kalınlığı da, film yoğuşması halinde, akış doğrultusunda ilerledikçe büyüdüğünden endüstriyel uygulamalarda ya kısa düşey yüzeyler, ya da yatay silindir şeklinde yüzeyler tercih edilir. Bu yüzden çoğu yoğuşurucu, içerisinden bir soğutucu akışkan akan yatay boru demetleri şeklinde yapılır ve boruların dış tarafından da yoğuşurulacak buhar geçirilir. Isı transferi açısından damlacık yoğuşmasının daha

etkin olmasına karşılık, yüzeyin sürekli olarak damlacık yoğuşması rejiminde tutulması güç olduğundan, yoğuşturucu tasarım hesaplamaları çoğu zaman film yoğuşması esas alınarak yapılır.

Film yoğuşması, düşey konumlu düzlemsel yüzeylerde, yüzeyin giriş bölgesinde (üst kısımlarda) laminar film yoğuşması ve yüzey yeterince uzun ise ilerleyen kısımlarında türbülanslı film yoğuşması şeklinde olabilirken, bir küre veya yatay bir silindirin dış yüzeyinde laminar film yoğuşması şeklinde olmaktadır. Tek bir yatay borunun dış yüzeyindeki film yoğuşması durumundaki ısı taşınım katsayısı için literatürde

$$h_D = 0.729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4} \quad (10)$$

bağıntısı verilirken, deney düzeneğimizde olduğu gibi N tane borudan oluşan bir boru demeti için de

$$h_D = 0.729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{N \mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4} \quad (11)$$

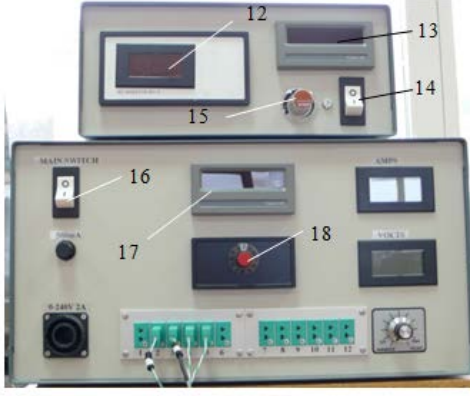
bağıntısının kullanılabileceği belirtilmektedir.

4. DENEY DÜZENEGİ

4.1 Deney Düzeneginin Tanıtılması

Havuz tipi kaynama ve film şeklinde yoğuşmada 4 adet farklı deney ve 4 adet de farklı gözlem yapma olanağı sunan deney düzeneği esas olarak birisi *Ana Panel* ve diğeri de *Kontrol Paneli* olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır. Ana panelin ve kontrol panelinin önden ve arkadan görünüş resimleri sırasıyla Şekil 2.a, Şekil 2.b, Şekil 3.a ve Şekil 3.b' de gösterilmiştir.

Kaynamada ısı transferi gözlem ve deneyleri ana panel üzerine monte edilmiş bulunan ve Şekil 2.a' da 1 ile gösterilen 300 kPa basınca dayanıklı cam kap içerisinde bulunan R-141b sıvısına, aynı şekil üzerinde 3 ile gösterilen silindirik ısıtıcı elemandan ısı verilmek suretiyle gerçekleştirilirken; yoğuşmada ısı transferi gözlem ve deneyleri cam kabın üst kısmında 2 ile gösterilen su soğutmalı sarmal yoğuşturucu üzerinde gerçekleştirilmektedir. İçerisine elektrikli bir ısıtıcı yerleştirilmiş bulunan 42 mm uzunlukta, 12.7 mm çapında ve 0.0018 m² ısıtma yüzey alanına sahip, bakırdan yapılmış ısıtıcı elemanda açığa çıkan Joule ısı, bir başka deyişle ısıtıcıdan sıvıya geçen ısı, kontrol paneli üzerindeki göstergeden doğrudan okunabilmekte ve değeri ayarlanabilmektedir. Çeşitli deneyler sırasında gerekli olan sıcaklık ölçümleri için düzeneğin değişik noktalarına yerleştirilmiş termoelemanlar bulunmaktadır ve bu elemanlarca algılanan sıcaklıklar yine kontrol paneli üzerinde bulunan dijital göstergeden doğrudan okunabilmektedir. Düzenek üzerinde ayrıca yoğuşturucuda dolaştırılan suyun debisini ölçmeye yarayan bir rotametre ve deney kabı içerisindeki basıncı ölçmeye yarayan bir manometre de yer almaktadır (Şekil 2.a' daki 4 ve 5 ile gösterilen elemanlar).



Şekil 3.a Kontrol panelinin önden görünüşü.

- 12. Wattmetre
- 13. T₁ termoeleman göstergesi
- 14. Şalter
- 15. Isıtıcı kontrol düğmesi
- 16. Ana şalter
- 17. T₂, T₃, T₄, T₅ termoeleman göstergesi
- 18. T₂, T₃, T₄, T₅ termoeleman kontrol düğmesi



Şekil 3.b Kontrol panelinin arkadan görünüşü

- 19. Güç kaynağı ucu
- 20. Veri kaydedici ucu
- 21. Isıtıcı ucu
- 22. Basınç anahtarı ucu
- 23. Isıtıcı silindir termoeleman ucu

4.2 Düzenek Kullanılarak Gerçekleştirilebilen Deney ve Gözlemler

Deney düzeneğinde gerçekleştirilebilen belli başlı deney ve gözlemler aşağıdaki gibidir:

1. Sabit basınçta kaynamada ısı transferi deneyi
2. Basıncın kritik ısı akısına etkisinin belirlenmesi deneyi
3. Saf maddenin doyma basıncı – doyma sıcaklığı ilişkisinin belirlenmesi deneyi
4. Film şeklinde yoğuşmanın gözlemlenmesi – toplam ısı geçiş katsayısının belirlenmesi
5. Yoğuşmaya kap içerisindeki havanın etkisinin belirlenmesi – gözlemlenmesi
6. Tipik havuz kaynaması evrelerinin gözlemlenmesi
7. Köpürme ve sıvı sürüklenmesinin gözlemlenmesi
8. Kısmi basınç kuralının gözlemlenmesi

4.3 Deney Raporları

Kabul edilebilir bir deney raporunun aşağıda belirtilen kısımları kapsamalıdır:

1. Kapak sayfası (deney adı ile birlikte öğrencinin numara, ad soyad, grup numarasını içermeli)
2. Deneyin amacının belirtilmesi
3. Deneyde hangi büyüklüklerin ne ile ve nasıl ölçüldüğünün belirtilmesi
4. Deneyde ölçülen ve hesaplanan değerlerin çizelgeler halinde verilmesi
5. Deneyle ilgili grafiklerin istenilen koordinatlarda çizilmesi
6. Deneysel sonuçların varsa ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması
7. Hesaplanan değerlerle ilgili belirsizlik analizlerinin yapılması
8. Sonuçların yorumlanması

5 DENEY VE GÖZLEMLERİN YAPILIŞI

Deneylere başlanmadan önce düzenek (H111S)' in H111 ile elektrik bağlantısı sağlanmalı ve H111 üzerindeki ana şalterler açık konuma getirilmelidir. Cam kap içerisindeki sıvı R-141b seviyesinin termoeleman kablolarının çıkış seviyesinin altına düşmemiş olmasına dikkat edilmeli, havalandırma ve sıvı doldurma-boşaltma vanaları kapalı konumda olmalıdır. Daha sonra soğutma suyu açılmalı ve kontrol paneli çalıştırılarak istenilen deney koşullarına ayar yapılmalıdır. Donanımın rejime gelmesi

için birkaç dakika beklendikten sonra; R-141b' nin doyma şartlarındaki basınç ve sıcaklık değerlerinde olup olmadığı, T_1 sıcaklık göstergesinin R-141b sıvı sıcaklığı ile aynı değerleri gösterip göstermediği (henüz ısıtıcı çalıştırılmadığından başlangıçta bu iki sıcaklık aynı olmalıdır) şeklindeki genel kontroller yapıldıktan sonra her bir deney ve gözlem için gerekli özel işlemlere geçilmelidir.

5.1 Sabit Basınçta Kaynamada Isı Transferi Deneyi

Bu deneyin amacını; elektrikle ısıtılan bir ısıtıcı elemandan kaynama noktasındaki sıvıya ısı geçişinin incelenmesi, elemandan sıvıya geçen ısının, ısıtıcı eleman sıcaklığıyla sıvı sıcaklığı arasındaki farkla değişiminin belirlenmesi ve tipik bir havuz kaynaması olayının bütün karakteristik bölgelerinin gözlemlenmesi oluşturmaktadır. Deney yapılırken sırasıyla şu adımlar izlenmelidir:

1. Kontrol panelinin çalışır vaziyette ve soğutma suyu devresinin açık durumda olduğundan emin olunmalıdır.
2. Isıtıcı gücü 30 – 50 Watt arasında bir değere ayarlandıktan sonra, kap içerisindeki basınç istenilen sabit basınç değerine erişinceye kadar soğutma suyu debisi rotametrenin gösterdiği değer esas alınarak ayarlanmalıdır.
3. Isıtıcı gücü q , kap içerisindeki basınç P , ısıtıcı eleman sıcaklığı T_1 ve sıvı sıcaklığı T_2 kaydedilmelidir.
4. Basınç sabit kalacak şekilde, ısıtıcı gücü belirli aralıklarla artırılarak, film şeklinde kaynama görülene kadar ölçümlere devam edilmelidir.
5. Film şeklinde kaynama görüldüğünde ısıtıcı gücü ani bir şekilde düşürülmeli ve ölçümlere ısıtıcı sıcaklığı $160\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye ulaşıncaya kadar devam edilmelidir.

Deney raporunun düzenlenmesi için, deneyde ölçülen değerler Çizelge 1' e işlenmeli ve bunlara bağlı olarak deney çıktısı değerler hesaplanarak aynı çizelgenin "hesaplanan değerler" kısmında verilmelidir. Hesaplanan değerler kullanılarak da $q_s'' - \Delta T$ ve $h - \Delta T$ eğrileri $\log - \log$ diyagramlar üzerinde gösterilmelidir. Isı akısının hesaplanmasında esas alınacak toplam ısıtıcı yüzey alanı $A=0.0018\text{ m}^2$ olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Sabit basınçta kaynamada ısı transferi deneyi için ölçülen ve hesaplanan değerler

Ölçüm No	Ölçülen Değerler			Hesaplanan Değerler		
	q (W)	T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T = T_1 - T_2$ ($^\circ\text{C}$)	$q_s'' = q/A$ (kW/m^2)	$h = q_s'' / \Delta T$ ($\text{kW/m}^2\text{K}$)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

5.2 Basıncın Kritik Isı Akısına Etkisinin Belirlenmesi Deneyi

Deney işlemi, sabit basınçta kaynamada ısı transferi deneyine benzer olarak yürütülür. Yalnız burada, ısı girişinin kontrol paneli üzerindeki ısıtıcı kontrolünden ve yoğuşturucudan geçen su debisinin de rotametreden dikkatli bir şekilde ayarlanması suretiyle; farklı basınçlardaki kabarcıklı kaynama – film kaynaması geçişi sınırındaki kritik ısı akısının hassas bir şekilde belirlenmesi ve ilgili basınç değerleri ile birlikte kaydedilmesi gerekmektedir. Deney raporunun düzenlenmesi için, deneyde ölçülen değerler Çizelge 2' ye işlenmeli ve bunlara bağlı olarak deney çıktısı değerler hesaplanarak aynı çizelgenin “hesaplanan değerler” kısmında verilmelidir. Hesaplanan değerler kullanılarak da $q''_{kr} - P_{mutlak}$ eğrisi milimetrik bir diyagram üzerinde gösterilmelidir.

Hatırlatma: Manometreden okunan basınç efektif basınç (ölçü basıncı) olup, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde $P_{mutlak} = P_{ef} + P_{atm}$ şeklinde hesaplanan mutlak basıncın kullanılmasının gerektiği hatırdan çıkarılmamalıdır.

Çizelge 2. Basıncın kritik ısı akısına etkisinin belirlenmesi deneyi için ölçülen ve hesaplanan değerler

Ölçüm No	Ölçülen Değerler		Hesaplanan Değerler
	P_{mutlak} (kN/m ²)	q (W)	$q''_{kr} = q/A$ (kW/m ²)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

5.3 Saf Maddenin Doyma Basıncı – Doyma Sıcaklığı İlişkisinin Belirlenmesi Deneyi

Deneyde ölçümler ısıtıcı gücü ortalama bir değerde (örneğin 220 W civarında) sabit tutularak yapılabilir. Isıtıcı gücü ayarlandıktan sonra, yoğuşturucudan maksimum su debisi geçirilerek kontrol panelinden okunan değerler sabitlendiğinde ilk basınç ve sıcaklık değerleri kaydedilmeli, daha sonra su debisi kademeli olarak azaltılmak suretiyle ölçümler tekrarlanmalıdır. Deney raporunun düzenlenmesi için, deneyde ölçülen değerler Çizelge 3' e işlenmeli ve bu değerler kullanılarak da $P_{mutlak} - T_{doyma}$ eğrisi milimetrik bir diyagram üzerinde gösterilmelidir.

Çizelge 3. Doyma basıncı – doyma sıcaklığı ilişkisinin belirlenmesi deneyi için ölçülen değerler

Ölçüm No	Ölçülen Değerler	
	P_{mutlak} (kN/m ²)	T_{doyma} (°C)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

5.4 Film Şeklinde Yoğuşmada Toplam Isı Geçiş Katsayısının Belirlenmesi Deneyi

Deneyin amacı, deney kabının alt kısmındaki kaynama işlemi sonucu oluşan buharın, kabın üst kısmındaki su soğutmalı yoğuşturucunun yüzeyinde film şeklindeki yoğuşması sırasında, buhar ile borunun içerisinden akan soğutma suyu arasındaki toplam ısı geçiş katsayısının belirlenmesidir. Buharın, yoğuşturucunun dış tarafında yoğuşması sırasında yüzeydeki yoğuşuk sıvı filmi, buharın yüzeye temasını önlediğinden buhar, sıvı filmi yüzeyinde yoğuşur. Bundan dolayı ısı geçişi film tabakasından sadece iletim yoluyla olur. Dolayısıyla buhar ile su arasındaki ısı alış verişi; buhar ile sıvı filmi yüzeyi arasında doğal taşınım, sıvı tabakasında ve boru cidarında iletim ve boru iç yüzeyi ile su arasında zorlanmış taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşir.

Deney, ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisi değişik koşullara ayarlanarak yapılabilir. Deney yapılmak istenilen değerler ayarlandıktan sonra sistemin sürekli rejime erişmesi beklenmelidir. Deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için, sürekli rejim haline erişildiğinde soğutma suyunun debisi (\dot{m}_{su}) ile birlikte giriş-çıkış sıcaklıkları (T_4 ve T_5), R-141b buharının sıcaklığı (T_3), ısıtıcı gücü (q) ve kap içerisindeki basınç (P_{mutlak}) ölçülerek not edilmelidir. İşlem sırasında suya geçen ısı bir taraftan yoğuşturucudan geçerken suyun entalpisindeki değişimden

$$q_{su} = \dot{m}_{su} C_{p,su} (T_5 - T_4) \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilirken, diğer taraftan buhardan suya toplam ısı geçişinden

$$q_{su} = U A_c \Delta T_{lm} \quad (13)$$

bağıntısından hesaplanabilmektedir. Burada A_c yoğuşturucu yüzey alanını ($A_c=0.032 \text{ m}^2$ olarak verilmekte) gösterirken ΔT_{lm} logaritmik sıcaklık farkını göstermekte ve değeri

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_{max} - \Delta T_{min}) / \ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right) \quad (14)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Deney düzeneğindeki yoğuşturucu düzenlemesi için ΔT_{max} ve ΔT_{min} sırasıyla, $T_3 - T_4$ ve $T_3 - T_5$ sıcaklık farklarını ifade etmektedir. Bu arada ısıtıcı gücü ile suya geçen ısının farkından çevreye kayıp olarak verilen ısı da

$$q_{kayıp} = q - q_{su} \quad (15)$$

olarak hesaplanabilir. Son olarak Eşitlik (12) ve (13)' ün birleştirilmesiyle toplam ısı geçiş katsayısı

$$U = q_{su}/(A_c \Delta T_{lm}) \quad (16)$$

olarak elde edilir.

Çizelge 4. Film şeklinde yoğuşmada ısı transferi deneyi için ölçülen ve hesaplanan değerler

Ölçüm No	Ölçülen Değerler						Hesaplanan Değerler			
	q (W)	\dot{m}_{su} (g/s)	P_{mutlak} (kN/m ²)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)	q_{su} (W)	$q_{kayıp}$ (W)	ΔT_{lm} (°C)	U (W/m ² K)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

PRESSURE v. TEMPERATURE RELATIONSHIP FOR R141b SHOWING
GAUGE ACCURACY OF $\pm 1\%$ FULL SCALE

