T.C.

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

KAYNAMA
DENEY FÖYÜ

© Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, BURSA

1. DENEYİN AMACI

Farklı havuz kaynama rejimlerinde ısı transferlerinin gösterilmesi.

2. DENEYİN ÖĞRENME ÇIKTILARI

Havuz kaynama mekanizmasının deneysel olarak incelenip kavranması, bir deney sisteminin yüksek doğruluklu ve emniyetli olarak yürütülmesi, deneysel verilerin amaç doğrultusunda analizi ve raporlanması

3. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR

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,

$$q_s^{"} = h * (T_s - T_{sat}) = h * \Delta T_e \qquad (1)$$

bağıntısı ile verilen bir ısı geçişi (ısı akısı- W/m^2) gerçekleşir. Burada h (W/m^2K) ısı taşınım katsayısı ve $\Delta T_e = T_s - T_{sat}$ da aşkın sıcaklık (yüzey sıcaklığı T_s'nin doyma sıcaklığı T_{sat}'ı 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.

Sıvı-buhar ara yüzeyindeki moleküllerde, sıvı faza doğru çekim kuvvetinden doğan yüzey gerilmesi sebebiyle kabarcıklar oluşur. Sıcaklık arttıkça yüzey gerilmesi azalır ve kritik sıcaklıkta sıfır olur. Bu durum, kritik üstü basınç ve sıcaklıklarda kaynama sırasında neden kabarcık oluşmadığını açıklamaktadır.

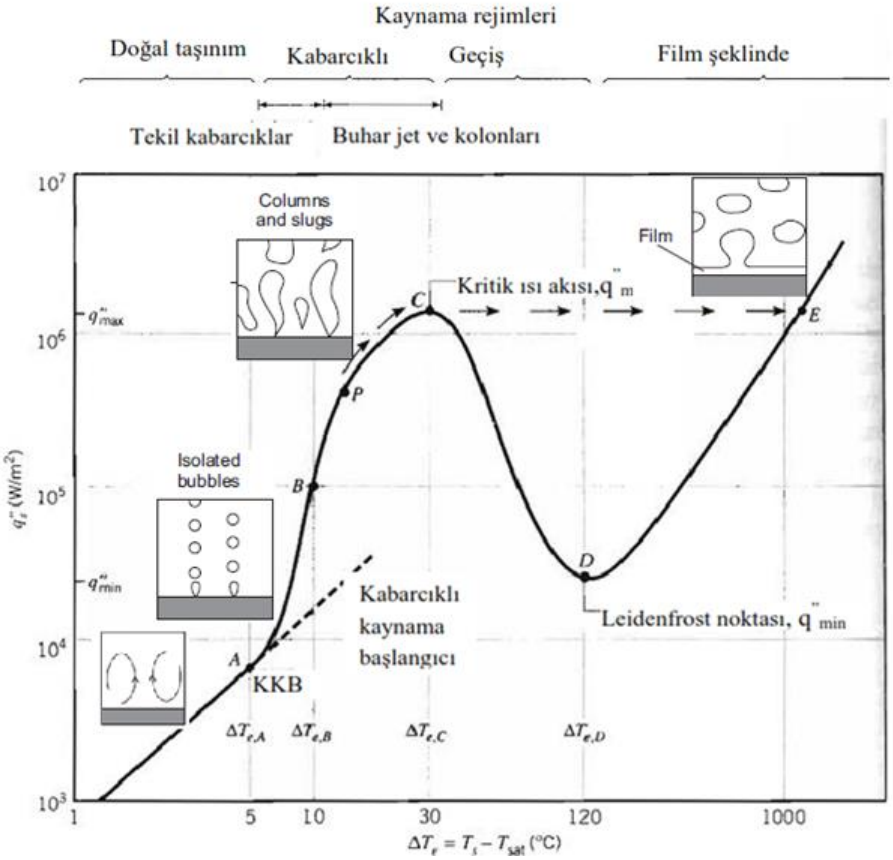
Kaynama işlemi uygulamada denge şartlarında gerçekleşmez ve normal olarak kabarcıklar çevredeki sıvı ile termodinamik dengede değildirler. Yani kabarcığın içindeki buhar basıncı ve sıcaklığı genellikle sıvınınkinden farklıdır. Sıvı ile buhar arasındaki basınç farkı, ara yüzeydeki yüzey gerilmesi ile dengelenir. Sıvı, kabarcıktan daha düşük sıcaklıkta olduğu zaman ısı, kabarcığın içerisindeki bir kısım buharın yoğuşmasına ve nihayet kabarcığın sönmesine yol açacak şekilde kabarcıktan sıvıya aktarılır. Sıvı, kabarcıktan daha yüksek sıcaklıkta olduğu zaman ısı, kabarcığın büyümesine ve kaldırma kuvvetinin etkisiyle yukarı yükselmesine yol açacak şekilde sıvıdan kabarcığa aktarılır.

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 sınıflandırılabilmektedir. Havuz kaynamasında, ana sıvı kitlesi durgun haldeyken ısıtıcı yüzey yakınındaki akışkan hareketi, doğal taşınımla 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.

3.1.Doğal taşınımlı kaynama

Şekildeki eğrinin A noktasına kadar olan kısmını kapsayan bu bölge, $\Delta T_{e,A} \approx 5°C$ 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.



Şekil-1: Su için tipik havuz kaynaması eğrisi (P0 1 atm)

Bu bölgede, deney elemanından akışkana geçen ısı ampirik olarak hesaplanmak istenirse, Eşitlik 1' de *ısı taşınım katsayısı h* için,

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

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

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

bağıntısıyla verilen *Prandtl sayısın*ı temsil etmektedir.

3.2.Kabarcıklı havuz kaynaması

Şekil 1' de *A-B-P-C* eğrisine karşılık gelen bu bölge su için $\Delta T_{e,C} \approx 30°C$ 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 qs'' 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*≈104 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;

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

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 akısı*nın değeri ise,

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

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.

3.3.Geçiş kaynaması

Şekil 1' de *C-D* eğrisine karşılık gelen bu bölge, su için $\Delta T_{e,D} \approx 120°C$ 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 gözüken buhardan sıvıya büyük ölçüde iletim yoluyla geçer. Isı akısının bu noktada eriştiği en küçük değerin yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için literatürde aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

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

3.4.Film kaynaması

Şekil 1' de gösterilen kaynama eğrisi üzerindeki D noktasından itibaren ısı geçişinde ışınım 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 gözüken 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, $h_{ış} < h_{taş}$ olması durumu için literatürde önerilen, kısmen basit bir bağıntı,

$$h = h_{taş} + \frac{3}{4} h_{ış} \tag{7}$$

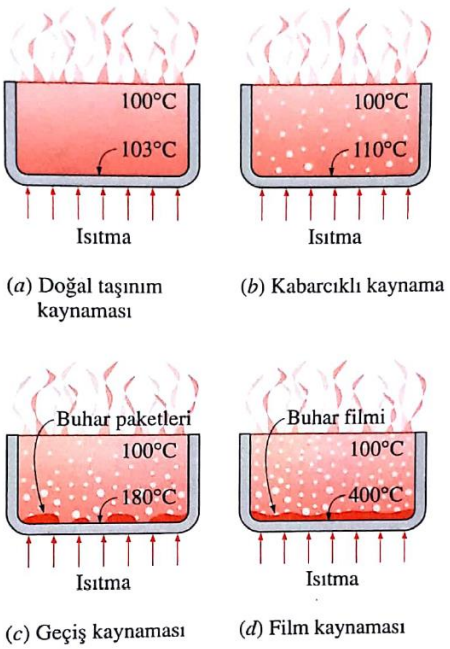
şeklindedir. Burada $h_{taş}$ ve $h_{ış}$ sırasıyla taşınım ve ışınım için ortalama ısı transferi katsayıları olup,

$$h_{taş} = \frac{0.062 k_\vartheta}{D} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_\vartheta) h'_{fg} D^3}{v_\vartheta k_\vartheta (T_s - T_{sat})}\right]^{1/4} \tag{8}$$

ve,

$$h_{ış} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - {T_{sat}}^4)}{T_s - T_{sat}} \tag{9}$$

bağıntılarından hesaplanabilirler. Eşitlik (8)' deki h'_{fg} , $h'_{fg} = h_{fg} + 0.80 C_{p,v}(T_s - T_{sat})$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 özeliklerin $T_f = (T_s + T_{sat})/2$ olarak tanımlanan ortalama film sıcaklığında ve sıvı fazına ait yoğunluğun doyma sıcaklığı T_{sat}' ta alınması tavsiye edilmektedir.



Şekil-2: Havuz kaynamasında farklı kaynama rejimleri

4. DENEYİN YAPILIŞI

Deneydeki işlem adımları şu şekildedir;

1. Deney setini çalıştırdıktan sonra öncelikle ısıtıcıyı (heater) açınız.
2. Haznedeki saf su kaynamaya başlayınca "Heater" butonunu kapatıp "Specimen" butonunu açınız (Şekil 3).
3. Şekil 3'de görülen Specimen voltaj düğmesini kullanarak voltajı, 0.1 Volt'luk artışlar sağlayacak şekilde kademeli olarak ekranda 140 A'e karşılık gelen gerilime ulaşana kadar artırınız. (Not: Bu kademeli artış işlemini, tel sıcaklığının stabil hale gelmesi için 30'ar saniye aralıklarla gerçekleştiriniz.)
4. Deney dikkatli şekilde gerçekleştirildiğinde tel çevresindeki baloncuklar tel çevresini düzgün şekilde saracak ve stabil film kaynama (Stable film boilng) elde edilecektir, daha düzgün olmayan baloncuklar elde edilmiş ise stabil olmayan film kaynama (Unstable film boilng) oluştuğu anlaşılabilecektir.

NOT: Baloncuklar tel çevresini tamamen sardığında, telden suya olan ısı transferini engellemiş olacaktır ve tel turuncu bir renk alacaktır, eğer güç artışı sürdürülürse telde yanma görülecektir. Bu noktada telde yanmayı önlemek için ısıtıcı gücü ani bir şekilde düşürülmelidir.

Şekil-3: Kaynama deney düzeneği ve kontrol ünitesi

4.1.Hesaplarda kullanılacak teorik bilgiler

4.1.1. Isı akısı

Birim zamanda belirli bir alan boyunca enerji akışı ısı akısı olarak tanımlanabilir.

Aşağıdaki Şekil 4'te gösterilen tel numunedeki birim zamandaki enerji üzerlerinden akan akım ve voltajın bir ürünü olan elektrik enerjisidir. Aşağıdaki denklemle ifade edilebilir;

$$q_s'' = q = \frac{I*V}{A_s} \ [\mathrm{W/m^2}] \tag{10}$$

A_s: Tel numunenin yüzey alanı

4.1.2. Elektrik direnci

Ohm yasalarına göre bir malzemenin elektriksel direnci, içinden geçen belirli bir akım için onun üzerinde oluşan voltajı belirler. Bu sebeple, direnci voltaj ve akımı kullanarak hesaplamak mümkündür.

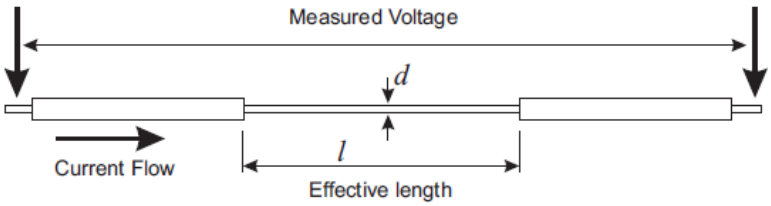
$$R = \frac{V}{I}\ [\Omega - \text{ohms}] \tag{11}$$

4.1.3. Elektriksel özdirenç

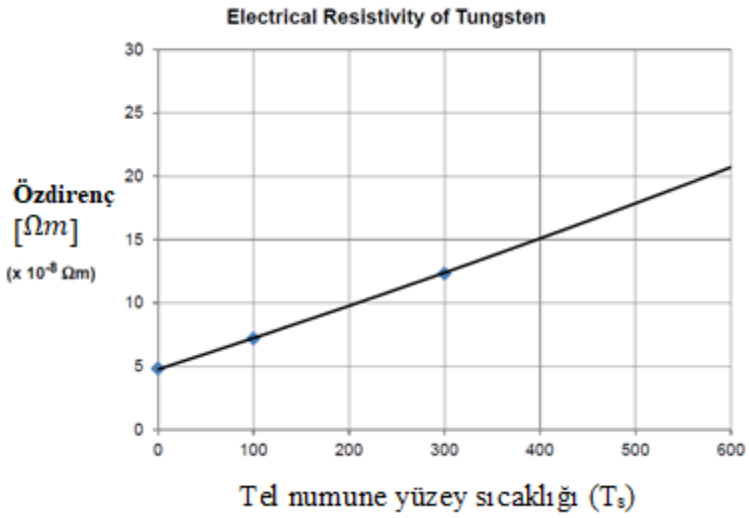
Elektriksel özdirenç, malzemenin birim uzunluğundaki dirençtir. Aşağıdaki bağıntıyla (12) hesaplanabilmektedir.

$$\rho = \frac{R*A_c}{l}\ [\Omega m] \tag{12}$$

A_c; Tel numunenin kesit alanı



Şekil-4: Tel numunedeki ısı akısı

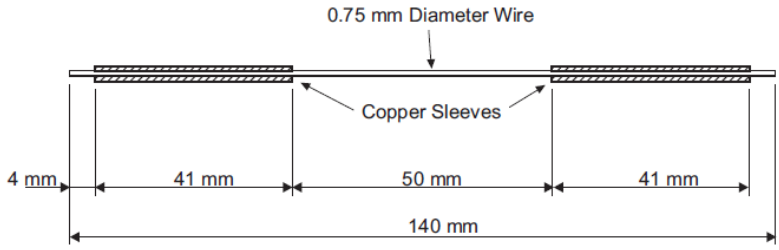


Şekil-5: Tungsten'in elektriksel öz direnci

4.1.4. Sistemin teknik özellikleri

Tablo-1: Ana ünitelerin teknik özellikleri

Item	Specification	
The Main Unit		
Dimensions	Height:	800 mm
	Width:	850 mm
	Depth (Front to Back):	400 mm
Weight	55 kg	
Heater coil	2750 W	
Thermocouples	4 off	K -type
Water Needed	De-Ionized 3.5 Litres for the Boiling Heat Transfer Experiment 6.5 Litres for the Condensing Heat Transfer Experiment	
The Control and Instrumentation Cabinet		
Dimensions	Height:	240 mm
	Width:	550 mm
	Depth (Front to Back):	400 mm
Weight	15 kg	
Electrical Power Needed	3 kW	
Electrical Supply	230 V 50/60 Hz single phase	
Circuit Protection	Main Protection - Miniature Circuit Breaker (MCB) - 16 A type B Heater - 16 A MCB Pump - 1 A MCB Specimen - 5 A MCB	



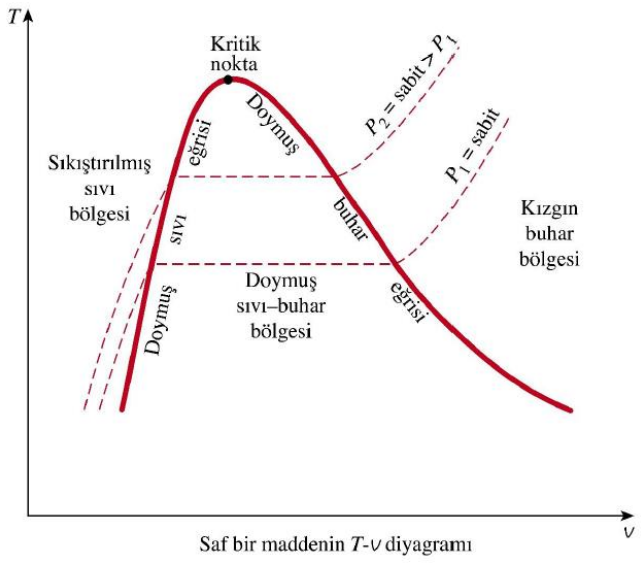
Şekil-6: Tel Numunenin boyutları

Tablo-2: Tel numunenin teknik özellikleri

Wire Specimens	0.75 mm Nominal Diameter Tungsten	
	Maximum Current	Approximately 150 A
	Maximum Wire Voltage	5 V

5. RAPOR İÇİN İSTENENLER

1. Deney esnasında 0.1 Voltluk gerilim artışlarına denk gelen Amper değerleri deney cihazından okunmuş ve föyde yer alan Tablo 3'e kaydedilecektir. Ölçülen bu voltaj ve amper değerlerini kullanarak ve "Hesaplamalarda Kullanılacak Teorik Bilgiler" bölümündeki denklemler yardımıyla ısı akısı (q), öz direnç gibi parametreleri her bir ölçüm için hesaplayınız ve Tablo 3'ün kalan kısımlarını doldurunuz. (Tungsten öz direnç değerlerini Şekil 5'ten okuyarak telin yüzey sıcaklığına ulaşınız.) (Tel numune yüzey sıcaklığı (T_s), suyun doyma sıcaklığı (T_{sat})'dir. Suyun doyma sıcaklığı (T_{sat}) atmosferik basınç için 100 ^oC'dir.)
2. 1.maddede yapılan çözümlemeler tek bir satır için detaylı bir şekilde yapılacaktır.
3. Deney esnasında ölçülüp Tablo 3'e kaydedilen voltaj ve amper değerlerini kullanarak ısı akısı (q) – aşkın sıcaklık ($T_s - T_{sat}$) eğrilerini çiziniz. (x ekseni sıcaklık, y ekseni ısı akısı olmalı)
4. Sabit hacimli kapalı bir kapta bulunan su ve buhar karışımının sıcaklığı arttırıldığı zaman, ilk durumda ve son durumda kapta bulunan akışkan hangi bölgelerde yer alabilir? Nedenini şekil çizerek açıklayınız.



Şekil-7: Saf maddenin T-v diyagramı

NOT: Tel numunenin yüzey sıcaklığı, Şekil-5'teki doğru denklemi çıkarılarak hesaplanmalıdır.

Tablo-3: Deneyde ölçülen değerler

Volt (V)	**Amper (A)**	**Isı Akısı (W/m^2)**	**Direnç (Ω)**	**Özdirenç (Ωm)**	**Yüzey Sıcaklığı (°C)**	**Aşkın Sıcaklık (°C)**
0,1						
0,2						
0,3						
0,4						
0,5						
0,6						
0,7						
0,8						
0,9						
1						
1,1						
1,2						
1,3						
1,4						
1,5						

6. KAYNAKLAR

1. Çengel, Y. A. (2011). *Isı ve Kütle Transferi - Pratik Bir Yaklaşım*, İzmir Güven Kitabevi (Vedat Tanyıldızı: Çeviri Editörü)
2. TecQuipment, TE78 Boiling and Condensing Heat Transfer Apparatus User Guide.
3. Yalova Üniversitesi, Deney No 7: Kaynama Ve Yoğuşma Deney Föyü http://www.yalova.edu.tr/Files/UserFiles/156/Enerji_Lab_2_deney_foyu/2018_Enerji_lab2_deney_foyleri/Deney_7.pdf
4. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Laboratuvarı II Dersi, Kaynama Ve Yoğuşmada Isı Transferi Deney Föyü. http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/makina_e9686.pdf