

BİLİM ve TEKNİĞE KATKILAR



DAMLALI YOĞUŞMAYA BİR BAKIŞ VE BİR ARAŞTIRMA



Y. Doç. Dr. Gönenç ARIN
Kimya Müh. Böl.
GÜ-ANKARA

Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Kimya Mühendisliği Eğitimi görerek 1962'de B.S., 1964'de M.S. derecelerini aldı. Azot Sanayii TAŞ ve Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatında mühendis olarak geçen dört yılın dışında, ODTÜ, Hacettepe Üniversitesi, EÜ, MM. Yüksek Okulu ve ADMM Akademisi'nde öğretim görevlerinde bulundu. 1983'de AÜ, Fen Fakültesi Kimya Bölümü'nde doktora çalışmalarını tamamladığından bu yana Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent olarak görev yapmaktadır.

SUMMARY

The literature, contending the variables and their limits effecting the dropwise condensation, was reviewed and a research with two 1/2 inch horizontal copper tubes (one is rough and the other is Cr-Ni plated, bright copper) was made by condensing a 90 kPa, 98°C steam over those surfaces. It was found that the heat transfer coefficients increased as the flowrates of cooling water increased and for the tested maximum flow rates of cooling water, the maximum heat transfer coefficients were determined as 4.5 kW/m²K and 37.5 kW/m²K and were classified as film and dropwise condensation respectively. After comparison of the conditions and surface properties of the tested materials with those in the literature reviewed, it was realized that each test is individually a new and an original case.

ÖZET

Damlalı yoğuşmanın değişkenlerini ve değişim sınırlarını içeren kaynaklar gözden geçirilmiş ve biri ham diğeri Cr-Ni kaplı parlak bakır olan 1/2"lik iki yatay boru yüzeyinde 90 kPa, 98°C'da subuharı yoğuşturulmuştur. Buna göre soğutma suyunun akış hızları ile kondensat ısı aktarım katsayılarının (h_k) birlikte arttığı ve bulunan h_k 'ların en yüksek denenen soğutma suyu hızlarında 4.5 kW/m²K ve 37.5 kW/m²K gibi film ve damlalı yoğuşma denebilecek katsayılarla ulaştığı bulunmuştur. Sonuçların taranan kaynaklara uyan ve uymayan koşullar kıyaslanmasından her düzeneğin ve her koşulun yepyeni sonuçlara götürdüğü anlaşılmıştır.

GİRİŞ

Isı değiştiricilerine yönelik çalışmaların temel amacı ısı aktarımını hızlandırmak, ısı aktarım katsayılarını artırmak, dolayısıyla da ısı değiştiricisinin boyunu kısaltmaktır.

Isı değiştiricilerinde yoğuşma söz konusu olduğunda da yoğuşmanın nasıl daha etkin ola-

bileceği araştırılmıştır. Önce biçimsel olarak üç tip yoğuşma fark edilmiştir [1]. Schmidt ve arkadaşlarının 1930'daki ilk gözlemleri ile ortaya çıkan damlalı yoğuşmanın, film tipi ve karışık yoğuşma tiplerine kıyasla ısı aktarım katsayısı ve ısı akışı yönünden ikisinden de çok daha güçlü bir yoğuşma tipi olduğu görülmüştür. Nitekim bu olaya duyulan teknolojik ilgi damlalı yoğuşmanın film tipi yoğuşmaya göre

30-40 [1] kez daha hızlandırılmış bir ısı aktarımı ya da 10-20 kat daha büyük bir ısı aktarım katsayısı [2,3] getirmesindendir.

Damlalı yoğuşmanın fiziksel görünümü, çeşitli nedenlerle yoğuşma yüzeyine dağılmış çekirdek merkezi denilen mikroskobik çıkıntı ya da çukurlarda başlayan primer damlalar üzerinde, buharın hızla ve yoğun bir biçimde yoğuşmasından oluşan, gözle farkedilecek fakat belli bir boyutu geçmeden yüzeyden ayrılacak tek tek damlaların serpiştirilmiş şeklidir.

Damlalı yoğuşmayı sağlayan ya da bozan özellikler araştırılırken ortaya çıkan değişkenler aşağıda verilmiştir:

1. Yüzey aşırı soğuma derecesi: $\Delta T_o = T_v - T_s$: Buhar sıcaklığı ile soğuk yüzey sıcaklığı arasındaki fark.
2. Damla iriliği: Primer damla çapı, karakteristik damla çapı, damlanın yüzeyden ayrılma çapı.
3. Ayrılan damlanın yüzeyle yaptığı açı.
4. Aktif ve inaktif damlalar, aktif ve adyabatik alanlar.
5. Nükleik merkezler.
6. Buhar tipi ve yüzey malzemesi ile arasındaki bağlar (yüzeyin ıslanma özelliği).
7. Buharın yüzeyden lineer akış hızı, buhar basıncı.
8. Yoğuşmayan gazlar.
9. Soğutucu akış hızı.
10. Duvar yapı malzemesi:
 - a) Pürüzlülük ya da parlaklık,
 - b) Isıl iletkenlik,
 - c) Organik hızlandırıcılar.
11. Hızlandırıcılar:
 - a) Yoğuşan buhara yine buhar olarak katılan, çoğunlukla organik olan maddeler.
 - b) Yüzeye sürülenler.

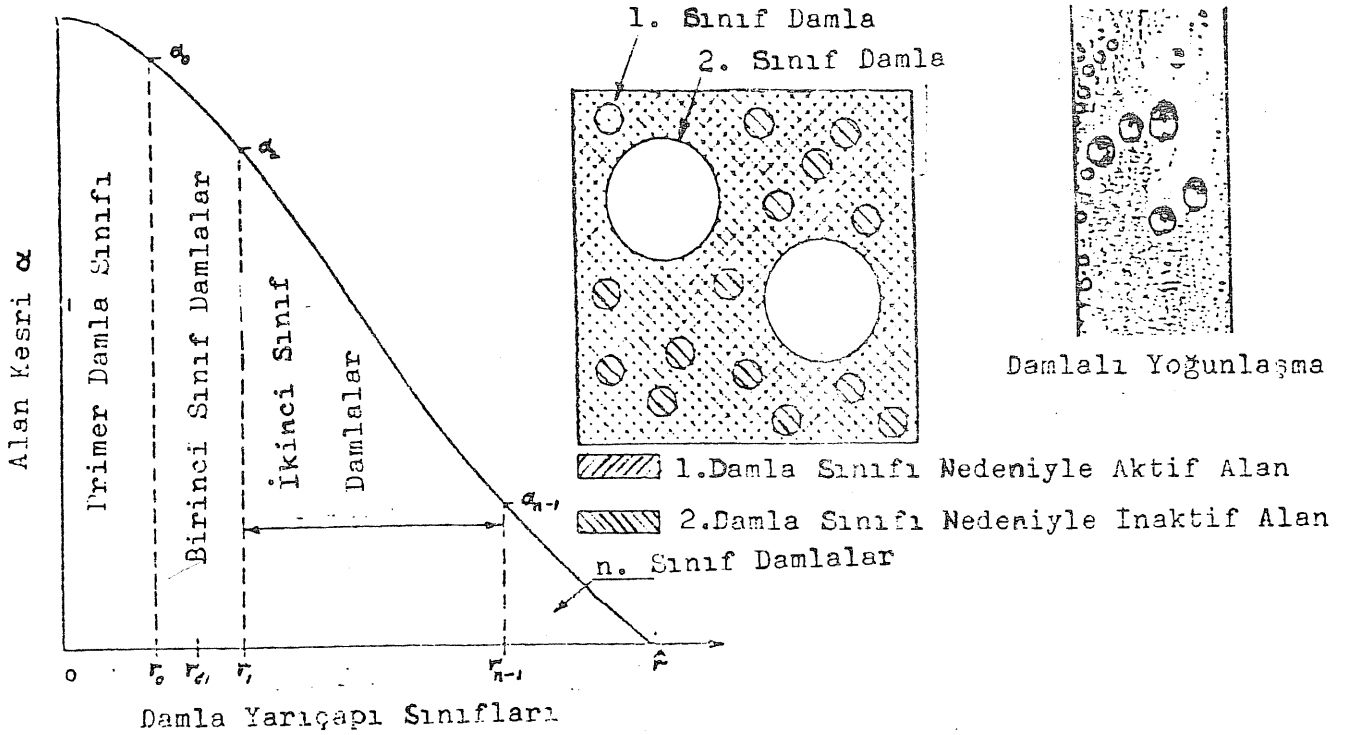
Damlalı yoğuşma ile başlayan bir yoğuşmada, yüzey aşırı soğuması arttırıldıkça yoğuşma tipinin değişime uğradığı, belli bir sıcaklık farkının (örneğin 11 ya da 20 K'in) ötesinde karma ve sonra da film tipi yoğuşmaya geçtiği belirlenmiştir [2,4,5]. Yüzey sıcaklığının buhar sıcaklığına göre aşırı soğuması, damlalı yoğuşmanın olmaması ya da bozulması üzerinde etken olabildiği gibi [2,4,5], film tipi yoğuşma gerçekleştiğinde (iri, birleşik damlaların ısı dirençleri nedeniyle) de büyük ΔT_o yüzey soğumaları ortaya çıkmaktadır [1,4,5,6,7,8]. Yüze-

yin aşırı soğuması; kondensat sıcaklığını, sıvının yoğunluğunu ve viskozitesini etkilerken yüzeyde oluşan damlanın iriliğini, yüzeyin ıslanmasını, damlanın büyüüp kopması için geçen süreyi ve kopma yarıçapını da etkilemektedir (Şekil 1). Araştırmacıların bir kısmı damlalı yoğuşmada yüzeyde başlayan primer damlalara eğilmişler ve asıl yoğuşmanın bu damlalar üzerinde gerçekleşen ısı ve kütle alışverişine dayandığı tezini savunarak mikroskobik damla büyüklükleriyle ilgilenmişlerdir [1,2,3,6,8,9]. Hızla büyüüp her yüzeyde, her yüzey geometrisinde, her buhar basıncı ve her tip buhar yoğuşmasında, yüzey soğuma derecesine de bağlı olarak, farklı bir karakteristik çapta görülen damlaların, damlaların yoğunluğunu temsil etmesi gerekmektedir. Bu çap ya da yarıçaptan başka damlanın yüzeyden ayrılma çapı ve ayrılan damlanın yüzeyle yaptığı dokunum açısı da ısı aktarım katsayısının hesaplanışında önemli olmuştur [1,2,6,7,10]. ΔT_o yüzey aşırı soğuması artarken karakteristik ve ayrılan damla çaplarının küçüldüğü, dokunum açısının da büyüdüğü belirlenmiştir [1,2,5,7,8,10]. Stylianou ve Rose [2] damlalı yoğuşmaya geçilen aşırı soğuma aralıklarını araştırırken anilin ve nitrobenzenin 386 K (3.8 Pa) ve 440 K (35.6 kPa)'daki ayrılan damla yarıçapları, buhar sıcaklığına da bağlı olarak, 0.013 mm ile 0.27 mm arasında değişim göstermiştir. Yüzeyden ayrılan damlalar geride ısıl direnci ihmal edilebilecek mikro damlaların yeniden oluşumu için boş alan bırakmaktadırlar. Bir damlanın ayrılma yarıçapından R_{max} şeklinde söz edilmektedir.

Burada incelenen kaynaklardan, [6]'da 1 kPa'daki subuharının altın yüzeylerden ayrılma yarıçapı 1.5 mm, kondensat ısı aktarım katsayısı $32 \text{ kW/m}^2\text{K}$ - $200 \text{ kW/m}^2\text{K}$ arasında, θ açısı 90 derece ve yüzey aşırı soğuma dereceleri 1-1.8 K arasında bulunmuştur. Hannemann ve Mikic [1] çeşitli iletkenliği olan yüzeylerde subuharının damlalı yoğuşmasını analiz ederek primer damla yarıçapını 0.0005 cm'den küçük, ayrılan damla yarıçapını 0.125 cm ve ulaşılan en yüksek yüzey ısı aktarım katsayısını (h_d) $2.27 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bulmuşlardır (Şekil 1). Sadhal ve Plesset [10] 373 K'deki subuharını yoğuşturduklarında karakteristik damla çapının 10 μm 1 μm arasında değiştiğini, ısı aktarım katsayısının da $7.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğunu bulmuşlardır.

Ayrılan damlanın yüzeyle yaptığı açı özellikle [9] ve [10] numaralı çalışmalarda ele alınmıştır.

İri damlaların büyük ısıl direnci nedeniyle tabanlarında adyabatik alanlar oluşturduğunu, asıl yoğuşmanın ve kütle aktarımının mikroskobik boyutlu primer damlalar üzerinden gerçekleştiğini ve ısıl direnci küçük olan bu damla-



Şekil 1 Damla yarıçaplarına göre sınıflar, aktif ve inaktif alanlar ve bir damlalı yoğuşma resmi.

lara aktif damlalar denildiğini Mikic [1]'de ortaya koymaktadır.

Damlalı yoğuşmayı hızlandıran nedenler arasında yüzeyde bulunan çekirdek merkezlerin çokluğu ve onların yüzeye dağılımının (seyrekliğinin) önemi belirtilmektedir [1,2,6,8]. Yüzeyde herhangi bir nedenle bulunan çıkıntı ya da çukurlar çekirdek merkezlerini oluşturabiliği gibi bu etkiyi yüzeye sürülen bazı hızlandırıcılar da yapabilmektedir. Damlalı yoğuşmanın başlaması ve sürdürülmesi için gerekli olan bu merkezler nükleik merkez olarak da anılır. Az sayıdaki çekirdek merkezi yetersiz kalabilirdiği gibi çok sayıda çekirdek merkezi de damlaların çok sık oluşup birleşmesine ve sonuçta film tipi yoğuşmaya yol açabilmektedir. McCormic ve Westwater [8] üzerine benzilmerkaptan sürülmüş 1 m^2 'lik bir yüzeyde, damlalı yoğuşma esnasında 10^9 çekirdek merkezi belirlemişlerdir.

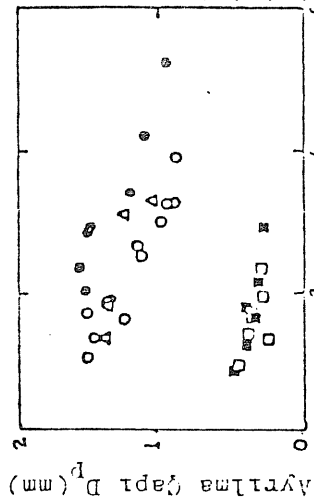
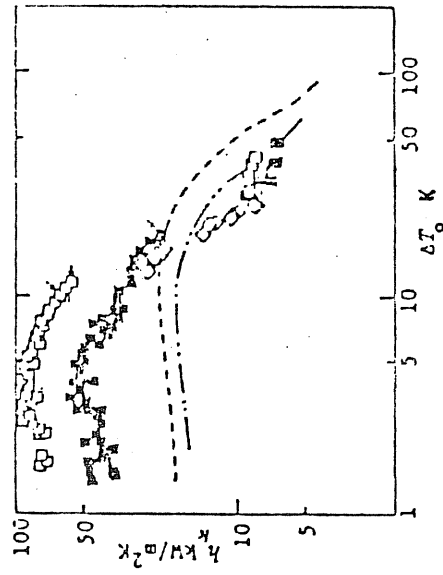
Yoshia Utaka ve arkadaşları [5] triloril-tritiyofosfit hızlandırıcısının ultra ince tek tabaka halinde sürüldüğü bakır yüzeylerde çeşitli organik buharları yoğunlaştırarak, farklı aşırı soğuma derecelerinde damlalı yoğuşmadan film tipine geçiş noktalarını araştırmışlardır. Yoğuşan buharın fiziksel özelliklerinin yoğuşma tipini belirlediğini vurgulamışlardır. Buhar basınç-

ları yükseldikçe ve $\Delta T_0 > 10 \text{ K}$ farktan büyük yüzey aşırı soğumalarıyla çalıştıkları propilen glikol, etilen glikol ve gliserol buharlarının giderek artan ısı aktarım hızı eğrilerinde kesikli ve ani atlamalı düşüş veren çizgilerle damlalı yoğuşmadan film tipine geçtiklerini görmüşlerdir. 6.5 kPa'daki propilen glikol buharı ile 10

K'lık yüzey aşırı soğumasında en çok $90 \text{ kW/m}^2\text{K}$; 24.5 kPa'daki etilen glikol buharı ile 20-30 K farkta $100 \text{ kW/m}^2\text{K}$; 0.6 kPa'daki gliserol buharıyla 30 K farkta $30 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ısı aktarım katsayılarını bulmuşlardır (Şekil 2,3,4). Stylianou ve Rose'un da [2] yaptıkları çalışmada subuharı yerine organik buharlar kullandıkları ve yine damlalı yoğuşmayı hızlandırmak için yüzeye organik maddeler sürdükleri görülmektedir. Bu şekilde oluşturulan hidrofobik yüzeylerde [3] düşük yüzey soğuma derecelerinde iyi birer damlalı yoğuşma görülebilmektedir (Şekil 5).

Shigeo Hatamiye [6]'nın 1 kPa'a kadar düşük basınçlı subuharı ile çalışmasında görüldüğü gibi buharın basıncı düştükçe yoğuşma sıcaklığı da alçalmış ve ayrılan damla çapı irileşmiştir. Hatamiye [6] bu çalışmasında 1 kPa'daki subuharı ile, 1 atm'dekinin $(1/6)$ 'sı kadar olan 30-35 $\text{kW/m}^2\text{K}$ ısı aktarım katsayısını elde etmiştir.

Propilen Glikol Buharlarıyla Deney Koşulları

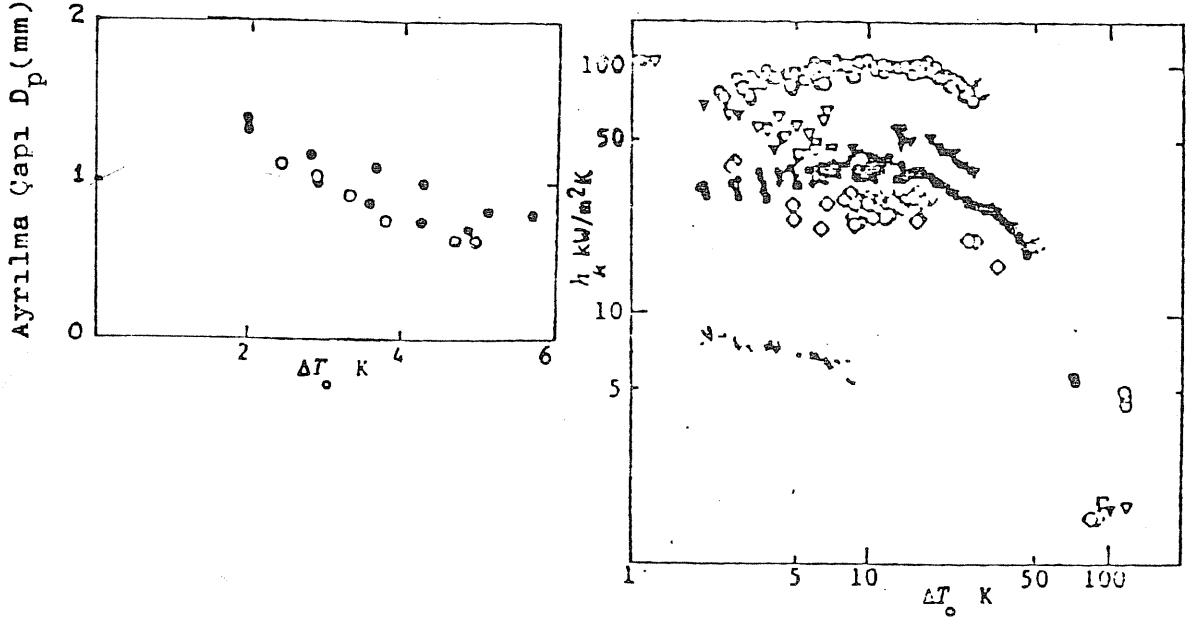


	P kPa	T _s K	m k _s /m ² s	D mm	
△	16.0	408	3.1	0.9	Hannemann ve Mikic (1)
○	6.5	388	2.1	0.9	
⊙	1.9	363	0.8	0.2	
□	6.5	383	8.1	0.2	Utaka ve Arkadaş ları (PıFE Yüzeyinde)
◇	1.9	363	5.2	0.7	
—	6.5	388	3.0	0.7	
---	1.9	363	1.6	0.2	
----	6.5	383	6.8	0.2	
-----	1.9	363	3.2	0.2	

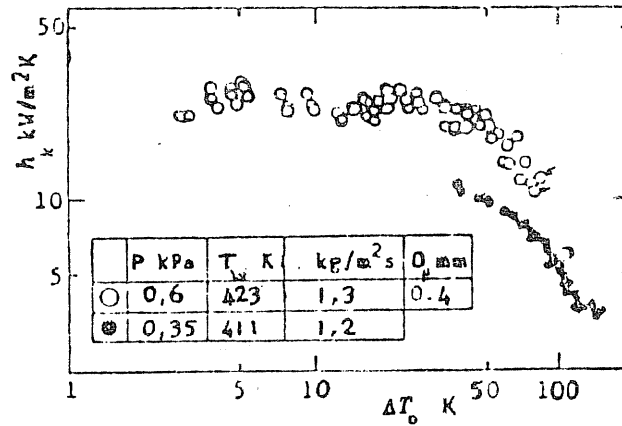
Şekil 2 Propilen glikol buharıyla belirlenen h_k eğrileri

Etilen Glikol Buharlarıyla Deney Koşulları

	P kPa	T_w K	$\dot{m}$ kg/m ² s	D mm	
○	24,5	428	3,1	0,7	Hannemann ve Mikic (1)
●	1,6	368	0,6		
▽	19,5	424			Stylianou ve Rose (Oleik Asitle)
∇	11,5	411			
◇	3,8	386			

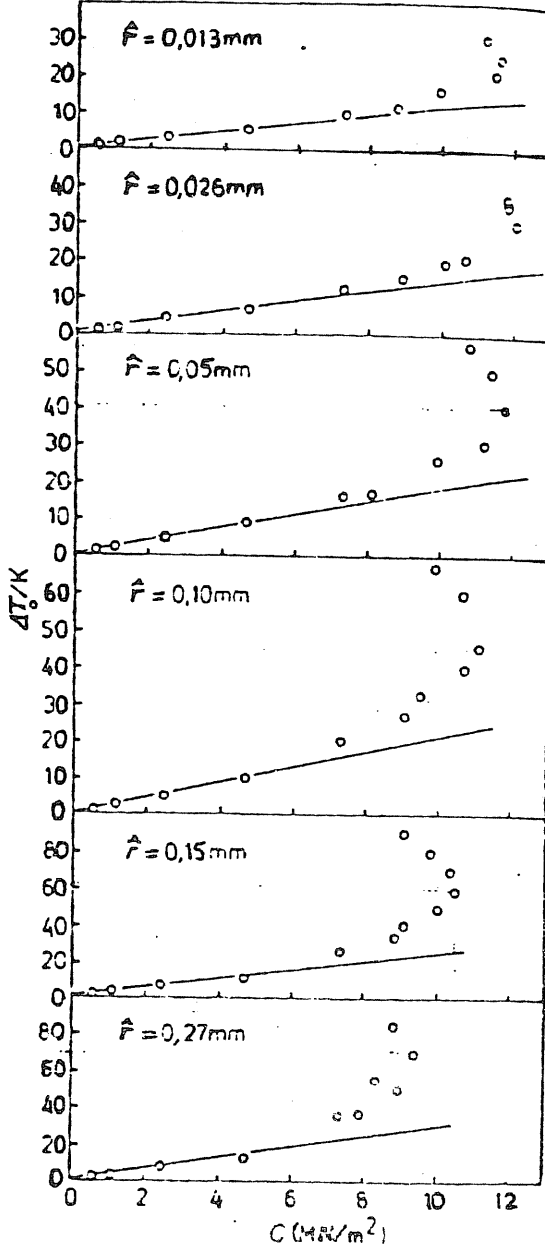


Şekil 3 Etilen glikol buharıyla belirlenen h_k eğrileri



Şekil 4 Gliserol buharıyla belirlenen h_k eğrileri

	T_v (K)	Q_{max} (MW m ⁻²)
anilin	332	0,15
	387	0,35
	424	0,40
nitrobenzen	335	0,10
	363	0,15
	386	0,25



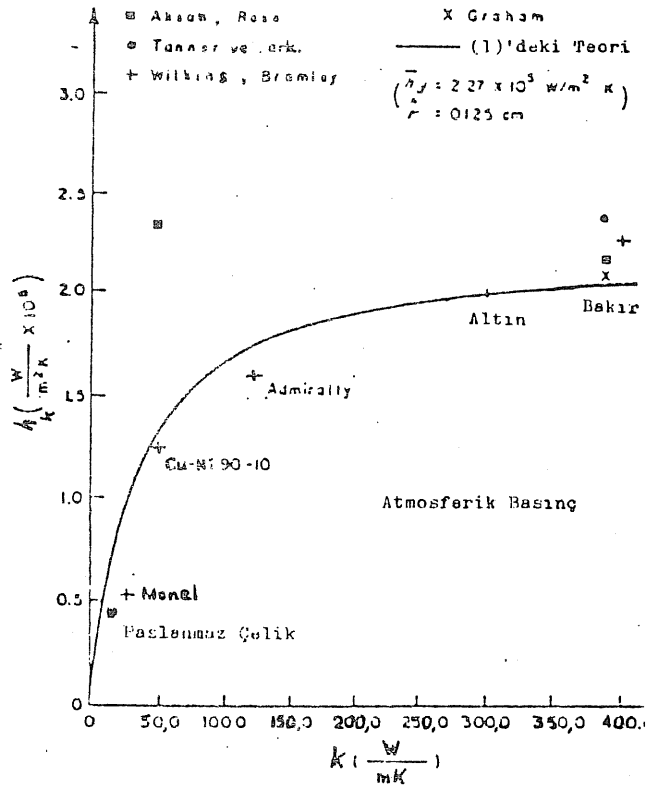
Şekil 5 Atmosferik basınçta subuharının yoğunlaşması, o Tanasawa ve Utaka, -Le Fevre ve Rose'un damlalı yoğunlaşma teorisi

Buharın soğuk yüzeyden akış hızı da damlaların yüzeyden kısa sürede ayrılmasına, dolaşısıyla damlalı yoğunlaşmanın gerçekleşmesine etken olmuştur [6,7,8]. Buharın akış hızı aynı zamanda yoğunlaşmayan gazların ortamda kalması ya da ortamdan uzaklaştırılmasına sebep olmaktadır. Bu yönde Shigeo Hatamiya ve Hiroaki Tanaka'nın [6] yaptığı çalışmalarda buhar akış hızı, buharın ortalama hızına kıyasla 4 Pa'lık dinamik basınca ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. Örneğin Tanasawa ve Utaka [7] 1983' de subuharının hız aralığını 27 m/s'ye kadar geniş tutmuşlar ve en yüksek ısı aktarım katsayısını da bu buhar hızıyla bulmuşlardır. Yine bu hızın yoğunlaşmayan gazları da ortamdan sürüklediğini belirlemişlerdir. Hiroaki Tanaka [8] subuharı besleme hızını, yoğunlaşmanın sebep olduğu vakumun emiş hızının 10 kat yukarısında tutarak ortamın daima çok miktarda buharla dolu olmasını sağlamıştır. Holden ve arkadaşları [3] 2 m/s buhar hızında çalışmışlardır. Tutomu Hosokawa ve arkadaşları ise [9] ortalama 11 cm/s buhar hızları kullanarak, damlalı yoğunlaşmada önemi olan, damlanın oluşum ve yüzeyi terk etme süresini kısaltmayı denemişlerdir.

Yoğuşma türlerinde, ısıl direnci en büyük olanı film tipidir fakat burada dahi ısı aktarım katsayısı çok yüksektir. Yoğuşmanın damlalıya dönüştürülmesinin toplam ısı aktarım katsayısını arttırabilmesi için, ısı değiştiricisindeki diğer dirençlerin de küçük olması ya da kondensatınki ile kıyaslanabilir küçüklükte olması gerekmektedir. Böylece yoğunlaşma yüzeyini soğutan soğuk akışkanın direncini küçültecek önlemler alınmalı [2,3], onun akış hızı arttırılmalıdır. Bu nedenle Holden ve arkadaşları [3] soğuk akışkan hızlarını 0-4.3 m/s aralığında değiştirerek onun direncini küçültebilmeyi denemişlerdir. Yalnız bu şekilde yüzey aşırı soğuması da bundan etkilenip yoğunlaşmayı film tipine götürebileceğinden olayın bu yönü de kontrol edilmelidir. Holden [3] dışındaki araştırmacılar ise soğuk yüzeyin belli bir sıcaklıkta sabit tutulduğunu belirtmekle yetinmişler, kondensat kesitindeki sıcaklığı çok hassas ölçebildiklerinden toplam ısı aktarım katsayısı ve soğuk akım direncinden söz etmemişlerdir.

Duvar yapı malzemesi, metalin ısıl iletkenlik katsayısı, duvarın kondens ile oluşturduğu yüzey bağlarının enerjisi, yüzeye sürülebilecek hızlandırıcılar, yüzeyin pürüzlü ya da parlatılmış olması ve yüzeyin geometrisi yoğunlaşma tipi üzerinde etkili bulunmuşlardır [1,2,3,4,5,6,7,8,9,12,13,14]. Shigeo Hatamiya ve Hiroaki Tanaka [6] 5 çeşit yüzeyde subuharının damlalı yoğunlaşmasını gerçekleştirmişlerdir. Biri Ni-Cr kaplı bakır, diğerleri altın kaplı bir bakır, ultra parlatılmış altın bir disk, altın buharı biriktirilmiş bir silikon disk ve Ni-Cr kaplı bir bakır

blok olan yüzeylerde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden altın ya da altın uharı biriktirilmiş yüzeylerde çok başarılı damlalı yoğuşmalar elde edilmiş, krom kaplı yüzeylerdekiye kıyasla da daha yüksek ısı aktarım katsayıları (1 kPa subuharı ile $35 \text{ kW/m}^2\text{K}$) bulmuşlardır. Burada altının ısıl iletkenlik katsayısı çok daha yüksek olduğu gibi silikonunki de (84 W/mK) saf demirinkinden daha büyüktür. R.J. Hannemann ve B.B. Mikic'in [1] yaptığı çalışmada da yüzeyin ısıl direnci, pürüzlülüğü, düşen damlanın yüzeyden ayrılma çapı ve dokunum açısının önemi vurgulanmaktadır. Metal yüzeylerin iletkenliklerinin arttığı yönde yoğuşma ısı aktarım katsayısının da artışı gösteren sonuçlar Şekil 6'da verilmişlerdir. Bu şekilde yer alan yüzey malzemeleri ısıl iletkenlik sıralamasına da uygun olarak paslanmaz çelik, monel, Cu-Ni 90-10, Admiralty, altın ve bakırdır, deneyler 1 atm basınçtaki subuharı ile yapılmıştır. S.S. Sadhal ve M.S. Plesset [10], yoğuşma yüzeyinin ısıl iletkenliğine önem vermekle beraber damlalı yoğuşmanın olup olmaması üzerine, buhar ile kondensat damlası arasındaki direncin damla içindeki direncinden daha etkin olduğunu iddia etmişlerdir. S.S. Sadhal [11]'de yoğuşturucu yüzeyinin ısıl iletkenliğinin $Bi > 1000$ olduğu durumlarda daha etkin olduğunu yazmaktadır. S.A. Stylianou ve J.W. Rose [2] damlalı yoğuşmadan film yoğuşmaya geçişi incelemişler ve farklı yüzeylerin özelliklerindeki farklılığın geçiş bölgesindeki yoğuşma mekanizması üzerinde önemli bir rol oynadığını ifade etmişler, aktarılan ısı hızının $q_w(k_w k_1)^{1/2}$ bağıntısındaki gibi duvar ve kondensat ısıl iletkenliklerinin çarpımlarının kare köküyle orantılı olduğunu önermişlerdir. Biri oleik asitle hızlandırılmış parlak bakır, diğeri teflon (kimyaca ptfe) ile kaplanmış iki yüzeyde çalışmışlar, ikinci yüzeyde film yoğuşmaya geçişin çok yavaş ve geç olduğunu belirtmişlerdir. S.A. Stylianou ve J.W. Rose [4], kendilerinden önceki araştırmacıların bir kısmının yüzey malzemesi ısıl iletkenliğine önem verdiğini diğerlerinin ise bunu ısı aktarım katsayısı üzerinde etkili görmediğini belirtmişler ve bu ilişkiyi bir kez daha araştırmışlardır. Wilkins ve Bromley [12]'in 1 atm'deki subuharını yoğuşturmalarının sonucunda, yüzey ısıl iletkenliğinin azaldığı yönde ısı aktarım katsayılarının da azaldığı ortaya konulmaktadır. Kullandıkları yüzeyler uzun düzey bakır, altın, Admiralty, Cu-Ni 90-10, monel'dir. Stylianou ve Rose [4] yatay duran bakır, pirinç, alüminyum, paslanmaz çelik gibi metal borular üzerinde dioktadekildisülfid hızlandırıcı eşliğinde 1 atm'deki subuharını yoğuşturmuşlardır. Alüminyum ve paslanmaz çelik üzerindeki yoğuşturmanın ısı aktarım katsayısı, bakır ve pirinç için bulunandan yaklaşık 1/20 kadar küçük çıkmıştır. Fakat alüminyum ve paslanmaz çelik



Şekil 6 Teori ile deneylerin kıyaslanması

boru yüzeyleri $\sim 9 \mu\text{m}$ kalınlığında bakırla kaplandıktan sonra, hızlandırıcı sürülerek yoğuşma gerçekleştiğinde toplam ısı aktarım katsayılarında olağanüstü artışlar gözlenmiştir. Nitekim, Graham, C [13] ve Wilnhurst ve Rose [14]'da bakırın ısıl iletkenliğinin 1/1500 kadar küçük iletkenliği olan yüzeylerde sırasıyla $1.5 \mu\text{m}$ ve $10 \mu\text{m}$ kalınlıklarındaki bakır kaplama ile yoğuşma yaptıklarında yeniden yüksek ısı aktarım katsayılarına ulaşmışlar ve buldukları değerler dioktadekildisülfid ile hızlandırılmış bakır yüzeylerine çok yakın çıkmıştır. Bu her üç çalışmada varılan sonuca göre [4]; kimyasal bakımdan benzer olan yüzeylerdeki yoğuşma ısı aktarım katsayılarına ısıl iletkenliklerdeki farklılığın etkilerinin, kimyasal farklılığın yanında küçük kaldığını göstermiştir.

Hiroaki Tanaka ve Takaharu Tsuruta [8] $2.5 \mu\text{m}$ kalınlığındaki krom ve sonra $5 \mu\text{m}$ nikel ile kaplanmış metal yüzeylerde yaptıkları damlalı yoğuşmada daha ziyade damla çapı ve yoğuşma hızları arasındaki fizikokimyasal bağıntılara, h_k ile buhar basıncı arasındaki ilişkilere ağırlık vermişlerdir.

K.M. Holden ve arkadaşları [3] 25 mm^2 alanı olan pirinç, bakır, bakır-nikel ve tıtan- yum yüzeyler üzerine 14 organik polimer kaplama yaparak bu hızlandırıcıların damlalı yoğuşmaya olan etkilerini, yüzeye kolayca sürüle-

bilmelerini ve yüzeyde kalıcı olabilmelerini değerlendirmişlerdir. Bazı hızlandırıcıları da buhar olarak asıl yoğunlaştırulan subuharına enjekte etmişler ve ısı aktarım katsayılarındaki artışları belirlemişlerdir. Yüzey hızlandırıcılarının kullanıldığı koşullarda ısı aktarım katsayılarının 5-10 kat daha yukarılara çıkabildiğini, hem de yüzeyde uzun süre kalabilen perylene N (Cu-Ni) üzerinde fluoroakrilik hızlandırıcılarla bu artışın 5-6 kat civarında kaldığını görmüşlerdir. Hidrofobik oluşları, 1 µm'lik ultra incelikte kolayca sürülebilmesi ve yüzeyde uzun süre kalabilmesi nedeniyle fluoroepoksi- len ve fluoroakrilikler, fluorokarbon yüzeyler için en iyi hızlandırıcılar olarak bulunmuşlardır. No-Stik maddesi uzun süre kalabilmesine rağmen çok kalın sürülerek denendiği için ısı aktarım katsayısı düşük çıkmıştır. Bu sonuçların dışında bu organik kaplamaların subuharını absorplaması, havanın oksijenini alıp metal yüzeye ileterek korozyona yol açması da araştırmacıların [3] önemle üzerinde durulmasını önerdikleri konular olmuştur. [3]'de de belirtildiği gibi hızlandırıcıların uygulanması üç yolla başarılmaktadır: Yüzeye ince tabaka halinde sürerek, yoğunlaştırulan buharın içine püskürtülerek, düşük yüzey enerjili bir polimer ya da soy metal kaplama yaparak.

T. Hosokawa ve arkadaşları [9], diğer araştırmacıların düz yüzeylerde çalışmış olduklarını kendilerinin ise pratik önemi olan yatay bakır tüpler üzerinde çalışarak damlaların sürüklenen ve sürüklenmeyenlerini ayırtetmeyi ve yüzey biçiminin sürüklenmeye etkilerini incelemişlerdir. Damla oluşum süresi, ortalama damla çapı ve ayrılan damla çapını, ampirik bağıntılarla öngörmeye çalışmışlardır.

Hannemann [1]'a göre 0.005 cm'den iri damlalara makroskopik damla denilmekte ve damla üzerinden salt kondüksiyonla ısı aktarımı yer almaktadır.

$$h_d = \frac{4k_1}{r_d} \quad (1)$$

Burada;

k_1 kondensatın ısı iletkenliği,

r_d damla yarıçapı,

h_d bir damlanın tabanındaki yüzeyin gördüğü ortalama ısı aktarım katsayısı.

Böylece iri bir damlanın altındaki inaktif alanda h_d hesaplanırken iri damlanın dışındaki aktif alanda, küçük damlaların üzerinde etkin h_c (constriction) sıkışma direnci düşünülmüştür.

Stylianou [2]'de belli bir damla boyutunda damlaların oluşup damlama süresinin değişmediğini, ancak yeni boşalan aktif alanlar çoğaldıkça yoğunlaşma hızının da arttığını belirtmiştir.

Tanaka [8]'da karakteristik damla yarıçapı ile sıvı-buhar ara yüzey ısı aktarım katsayısı h_1 arasında Denklem (1)'dekine benzer bir bağıntı kullanmaktadır:

$$r_1 = \frac{2k_1}{h_1} \quad (2)$$

Burada;

r_1 karakteristik damla yarıçapını,

k_1 kondensatın ısı iletkenliğini

göstermektedir. O çalışmada 1.55-1.18 kPa arasındaki buhar yoğunlaştırularak 1.2 mm'ye ulaşan damla ayrılma yarıçapları bulunmuştur. Buhar basıncı düşürüldükçe h_1 küçülmekte, r_1 karakteristik damla yarıçapı da büyümektedir. Bir damla, r_1 'den daha büyük ya da daha küçük oluşuna göre sırası ile inaktif ya da aktif kabul edilir. Yine o çalışmaya göre,

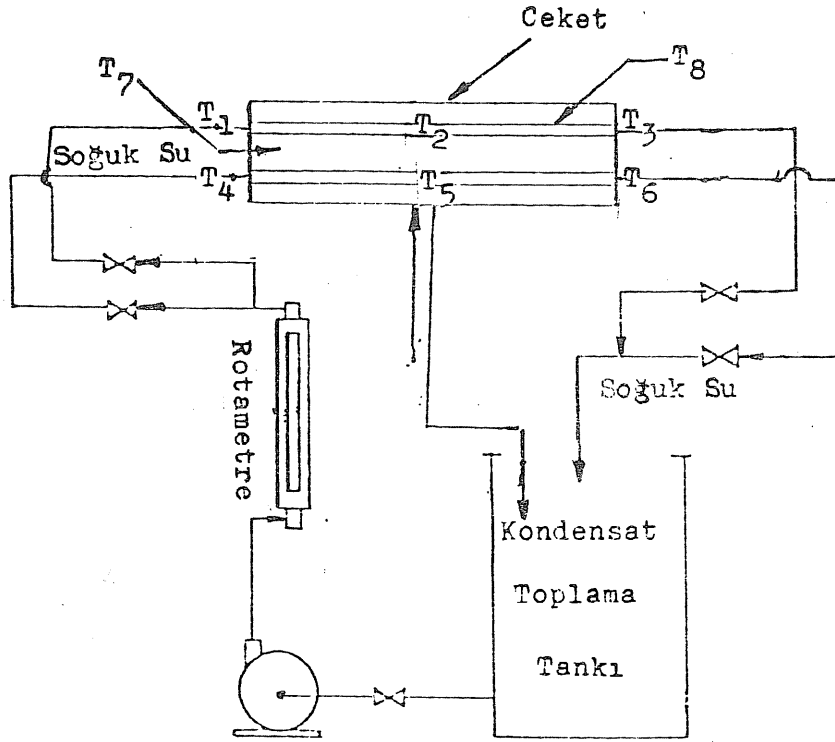
$$N_{Bi} = \frac{h_1 R_{max}}{k_1} = \frac{2R_{max}}{r_1} \quad (3)$$

Holden ve arkadaşları [3], türlü hızlandırıcılarla kaplanmış yüzeylerde ayrılan damla yarıçapını 3 mm, 4 mm, 5 mm bulmuşlardır.

Utaka ve arkadaşları [5], propilen glikolle $\Delta T_o = 2$ K yüzey soğumasında 0.9 mm'lik R_{max} ; 4 K yüzey soğumasında 0.2 mm'lik R_{max} bulmuşlardır.

Birçok araştırmacının damla yarıçaplarına dayalı analizlerinde Denklem (3)'deki gibi Biot sayısı (N_{Bi})'nı kullandıkları görülmektedir [1,8,10,11].

Yüzey aşırı soğuması arttıkça karakteristik damla yarıçapı da, ayrılan damla yarıçapı da küçülmekte [1,2,5,7,8,9,10], damlanın yüzeyden ayrılma süresi kısaltmakta [2,9], yeni boşalan aktif alanlar çoğaldıkça yoğunlaşma hızı da artmaktadır [2]. Ancak, yeni açılan alanlar, belli bir ΔT_o 'dan daha büyük yüzey soğumalarında giderek artan yoğunlaşma hızına yetmemekte, daha çok merkezin aktif hale gelmesi sonucu sıklaşan, birleşip irileşen ve yüzeyden taşan damlalar yüzeyi bir film tabakası ile örterek yoğunlaşmayı da film tipine dönüştürmektedir.



Şekil 7. Deney düzeneği

DENEYLER

G.U.M.M.F. Makina Mühendisliği Bölümü'nün Isı Laboratuvarında bulunan damlalı yoğunlaşma deney aleti üzerinde subuharı yoğunlaştırularak yoğunlaşma tipleri gözlemlenmiş ve kondensat tarafı ısı aktarım katsayıları hesaplanmıştır. Soğuk akışkan olarak kullanılan suyun hızı değiştirilerek bunun yoğunlaşma tipine ve ısı aktarım katsayılarına olan etkileri ve yüzey yapı malzemesinin katkıları araştırılmıştır.

Deney aleti Şekil 7'de görüldüğü gibi her biri 1/2 inç (1.36 cm iç çap, 1.5875 cm dış çap) iki boruyu içine alan bir ceketten oluşmaktadır. Biri ham bakır diğeri ise yüzeyi Cr-Ni ile kaplanmış parlak yüzeyli bir bakır olan boruların uzunlukları 36 inç'tir. Borulardan değişik hızlarda soğuk su geçirilirken ceket bölgesine 98°C'da, 30 cm su sütunu kadar atmosfer basıncının üzerinde subuharı gönderilmekte ve soğuk boru yüzeylerindeki yoğunlaşma tipleri gözlenirken soğuk suyun sıcaklığındaki değişimlerle kondensatın dışarı alınan miktarları ölçülmek suretiyle ısı aktarım katsayısı hesapları çıkarılmıştır (Tablo 1, 2). Ceket bölgesi yan ve arka duvarları 7/8 inç kalınlığında paslanmaz çelikten, ön duvarı ise 3 mm kalınlığında camdan olan ceketin boyutları 7.5"x7.5"x36"dir. Subuharı ceket bölgesine 1/4" çaplı bir boru ile tabandan girmekte, boruların arkasında bulunan şaşırtma perdesinin etrafını

dolandıktan sonra her tarafa dağılmış olarak boru yüzeylerine ulaşmaktadır. Sekiz noktanın sıcaklıkları ısı çiftleriyle okunmaktadır. 1-2-3 noktalarından parlak boruya giren suyun girişte, ortada ve çıkıştaki sıcaklıkları, 4-5-6 noktalarından ham bakır boruya giren soğuk suyun sıcaklıkları okunurken 7'den buhar sıcaklığı 8'den ceket içindeki boru duvar sıcaklığı okunmaktadır. Bu çalışmada borulara aşağı besleyen sisteme takılmış bulunan rotametre kalibre edildikten sonra herbir borudan rotametrinin 0.5-0.6-0.7 değerlerindeki su hızları için subuharı yoğunlaştırulmuştur. Bu hızlar kalibrasyon eğrisine göre sırasıyla 31.5 ml/s; 38 ml/s; 45 ml/s'lerdeki akış hızlarını temsil etmektedir. Ceketin taban ortasından başlayıp aşağı inen bir boru ile de yoğunlaşma sırasında oluşan kondensat dışarı alınabilmekte ve zaman zaman akış hızları ile sıcaklıkları ölçülebilmektedir. Çevreye olan ısı kayıplarını en aza indirebilmek için bütün ceket campamuğu ile sarılmıştır. Ceket ve borular yataydır. Uç etkilerden korunmak için boru boyları uzatılmaktadır.

SONUÇLAR

Deney aletinde başka değişiklik yapılmadan (hızlandırıcı kullanımı, nükleik merkezler vb.) hesaplanan deney ölçümlerine göre ham bakır boruda, ılımlı soğuk su akış hızlarında film tipi yoğunlaşma olmuş ve (Tablo 1'den) yoğunlaşma bölgesi ısı aktarım katsayısı 4-4.5

$\text{kW/m}^2\text{K}$ belirlenmiştir. Böyle düşük bir katsayı da ancak film yoğuşmada görülebilir.

Aynı alette, üzeri 30 μm kalınlığında Cr-Ni kaplanmış parlak bakır borudan aynı subuharı ve soğuk su hızları ile (Tablo 2'den) 19.5 $\text{kW/m}^2\text{K}$ ile 39.5 $\text{kW/m}^2\text{K}$ arasında değişen h_k değerleri hesaplanmıştır. Çekilen resimlerde de damlalı bir görüntüsü olan yoğuşma, taranan

kaynakların damlalı yoğuşma için belirlediği ısı aktarım katsayılarının alt sınırlarındadır.

TARTIŞMA VE YORUMLAR

1. Ham bakır boruda belirlenen ısı aktarım katsayısı yaklaşık 4.5 $\text{kW/m}^2\text{K}$ civarında kalmış ve bu düşük değeri ile de film tipi yoğuşmaya girmiştir (Tablo 1).

Tablo 1 Ham Bakır Borudaki Ölçümler ve Sonuçlar

R	$\dot{q}_c$ (ml/s)	u (m/s)	T_5	T_6	ΔT_c	T_w $^{\circ}\text{C}$	T_v	T_i	$\Delta \bar{T}_L$	q_c (W)	U_{O_2K} ($\text{W/m}^2\text{K}$)	h_c ($\text{W/m}^2\text{K}$)	h_{k2K} ($\text{W/m}^2\text{K}$)
0.5	31.5	0.21	29	40	11	95.5	98	96	61.3	1442	1367.5	1766	3825
0.6	38.0	0.25	26	37	11	95.3	98	96	64.1	1663	1204.5	1906	4474
0.7	45.0	0.30	24	34	10	95.0	98	96	66.9	1876	1302.8	2160	4308

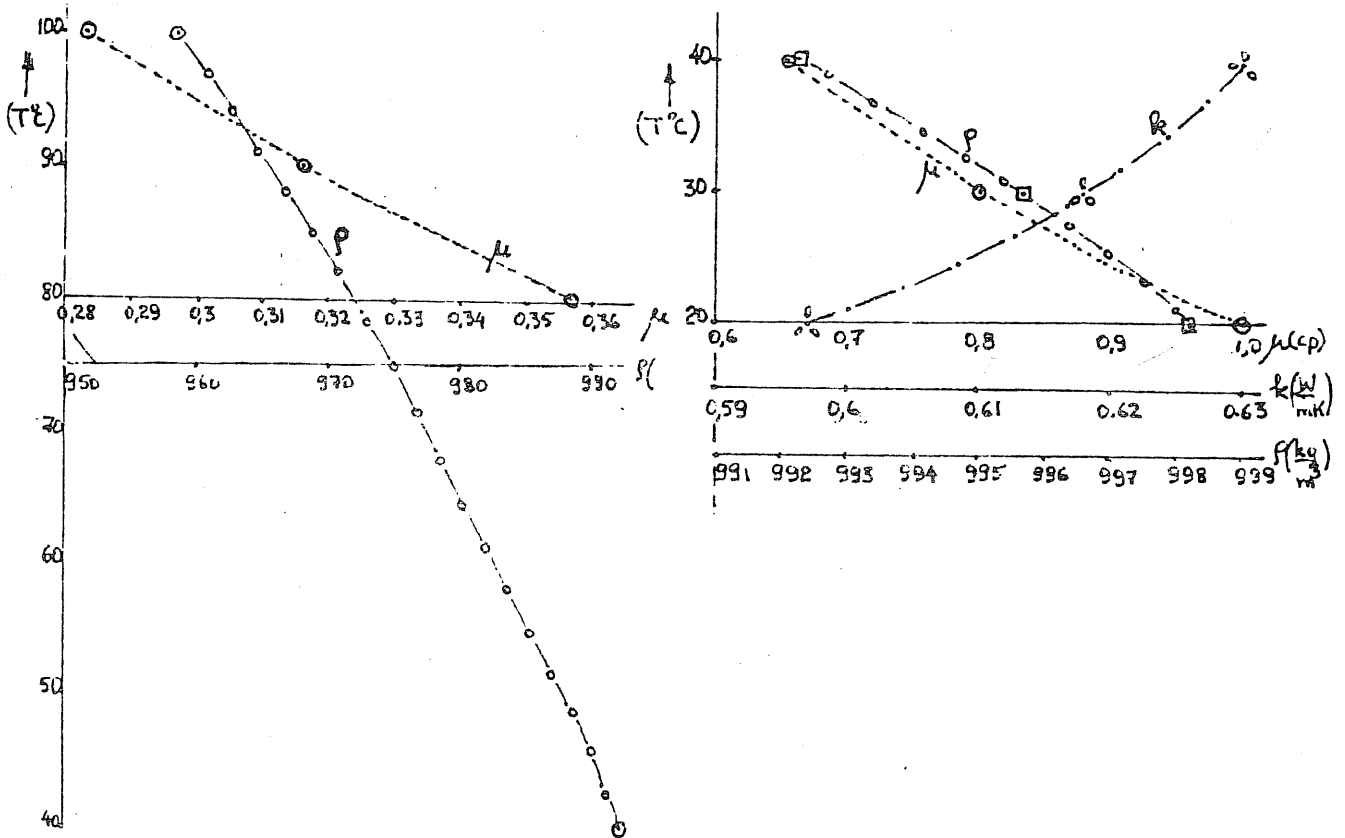
NOT: Aşağıda verilen boru özellikleri için dış alana göre duvarda,

$$R_w = 2.948 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{K/W} \text{ alınmıştır.}$$

Boru Özellikleri: $D_o = 0.015875 \text{ m}$, $D_i = 0.0138 \text{ m}$, $L = 0.8636 \text{ m}$, $k = 377 \text{ W/mK}$

Soğuk Akışkan İçin: $h_c = 0.023 (k/D_i)(N_{Re})^{0.8} (N_{Pr})^{0.4} (\mu/\mu_w)^{0.14}$

Soğuk suyun özellikleri aşağıdaki grafiklerden alınmıştır.



2. Diğer araştırmacıların [2,3,4,5,6,7,9] en iyi damlalı yoğuşma elde ettikleri bakır yüzeyde bu çalışmanın film tipi olması, onlardan ayrılan özelliklerindendir.

3. Parlak boruda da aynı subuharı ve soğuk akış hızları ile 19.5–37.5 kW/m²K arasında değişen h_k ısı aktarım katsayıları hesaplanmıştır (Tablo 2). Bunlar ham bakırdakinin yaklaşık 4–9 katına varmakta ve görünür büyüklükteki damlalar, çekirdek merkezlerine saçılmış durumdadır. Gerek katsayı gerekse görüntü, damlalı ile karışık yoğuşma sınırında kabul edilebilir.

4. Yoğuşma bölgesinin manometreden okunan basıncı atmosferik basınca eşit okunduğundan hesaplamalara temel alınan ΔT_L yaklaşımları için sıvı–buhar ara yüzey sıcaklığı 96°C(*) alınmıştır. Küçük sıcaklık farklarında ısı çiftlerinin hassasiyetinin yetersiz kalabileceği düşüncesiyle değerlendirmelerde duvar sıcaklığına bağlı kalınmamağa çalışılmıştır. Ayrıca, hidrodinamik sınır tabaka gelişiminin getireceği uç etkilerden kurtulmak için soğuk suyun giriş sıcaklığı yerine ortadaki sıcaklığı alınmıştır.

5. Parlak borudaki kondensat ısı aktarım katsayısı, soğuk akışkanın hızı arttıkça artmaktadır. Bu da, soğuk akışkanın direncinin azalmasından başka yaklaşımların (ΔT_L) artması gibi bir etkiyi getirmektedir. Zira akış hızı artan soğuk akışkanın giriş çıkış sıcaklıkları da birbirine yaklaşmaktadır. Akımların dirençlerinin birbirine yaklaştığı durumlarda yüzey aşırı soğumasının arttığı, bunun damla çapını küçültüp ayrılma süresini kısalttığı [2,9], yeni boşalan alanlar çoğaldıkça yoğuşma hızının da arttığı [2] görülmüştü. Yine çok büyük ΔT_o larda açılan aktif alanların yoğuşma hızına yeterli olamadığı ve kondensatın yüzeyde film oluşturarak taşıdığı görülmüştür [2]. Bu çalışmadaki soğuma sınırının bu sınıra yaklaştığı fakat damlalı yoğuşma bölgesinde kaldığı anla-

şılmaktadır. Bu nedenle yüzey soğumalarıyla beraber h_k 'lar artmaktadır (Tablo 2).

6. Bu çalışmada 90 kPa, 98°C'ta giren subuharının cekete yayılma hızı 2–10 cm/s arasında değişmektedir. Bununla elde edilebilen en yüksek h_k , Utaka'nın [5] 1.9 kPa, 363 K'deki propilen glikol buharıyla bakır yüzeylerde elde ettiği ($\Delta T_o = 2$ K) h_k 'ya eşittir. Propilen glikol hızlandırıcı olarak da kullanılabilecek özelliklere sahip olup, bu çalışmadaki parlak yüzey hızlandırıcısızdır. Ne var ki propilen glikolün buhar basıncı düşük, buradaki subuharının basıncı yüksektir. Aynı basınçtaki subuharı ile çok daha yüksek h_k 'lar bulunmalıdır, zira basınç arttıkça h_k artar [7].

Yine bu çalışmada damlalı yoğuşma ile bulunan en yüksek h_k , Shigeo Hatamiya [6]'nın 1 kPa (280 K)'deki subuharı ile altın kaplı bakır yüzeylerde bulduğuna da eşittir. Ancak altın kaplama da bir çeşit yüzey hızlandırıcıdır [6].

İlk bakışta buhar hızının çok düşük olduğu görülmektedir. Tanassawa [7]'de 27 m/s buhar hızlarıyla ve onu değiştirerek çalışmıştır.

O halde bu çalışmayı diğerlerinden ayıran ya da onlara yaklaştıracak olan özellikler araştırılmalıdır.

7. Damlalı ve film yoğuşma h_k 'larının en çok (sıra ile) 37.5–4.5 kW/m²K olduğu koşullarda soğuk suyun h_c değerleri 2 kW/m²K gibi kıyaslanabilir çıkmıştır.

8. Damla çapları üzerine Hosokawa'nın [9] yaptığı araştırmaya göre tüp çapı büyüdükçe düşük ısı akıları için gereken ısı aktarım katsayısı büyümektedir. Bu çalışmada da 1" tüp çapı kullanılmış, ileride daha farklı tüp çapları da kullanılmalıdır.

Tablo 2 Cr–Ni Kaplı Parlak Bakır Borudaki Ölçümler ve Sonuçlar

R	$\dot{q}_c$ (ml/s)	u (m/s)	T ₂	T ₃	ΔT_c	T _w °C	T _v	T _i	$\Delta \bar{T}_L$	q _c (W)	U _o (W/m ² K)	h _c (W/m ² K)	h _{k2} (W/m ² K)
0.5	31.5	0.21	32	45	13	95	98	96	57.3	1703	1380.0	1716	19693
0.6	38.0	0.25	29	42	13	95	98	96	60.3	2056	1584.0	1961	23963
0.7	45.0	0.30	27	40	13	95	98	96	62.3	2436	1817.0	2209	37524

NOT: 30 µm kalınlığında Cr–Ni kaplamadan gelebilecek duvar direnci ilavesi, 5.26x10⁻⁷ m²K/W ve toplam R_w=3.466x10⁻⁶ m²K/W'tır. Soğuk suyun h_c ısı aktarım katsayısı yukarıdaki gibi hesaplanmıştır.

9. Cr-Ni kaplı bakır borunun, bu ilave dirence rağmen damlalı yoğunlaşma ve ham bakırdakinden daha yüksek ısı aktarım katsayısı (h_c) elde edilebilmiştir. Bu da Hannemann'ın [1]^k grafiğine, Şekil 6'ya ters düşen bir durumdur.

10. Her deney düzeneğinin en az bir özelliğinin farklı olmasının farklı h_k 'lar getirdiği ortaya çıkmaktadır.

ÖNERİLER

1. Hem hambakır hem de parlatılmış bakır yüzeye çeşitli hızlandırıcılar sürülerek h_k 'lardaki değişiklikler araştırılmalıdır.

2. Ham ve parlak yüzeylerde yapay çekirdek merkezleri ve etkileri denenmelidir.

3. Daha yüksek soğuk su akış hızlarında da denemeler yapılmalıdır.

4. Aynı yüzeylerde farklı maddelerin buharları yoğunlaştırarak yeni h_k 'lar aranmalıdır.

5. Daha yüksek buhar hızlarında çalışılmalıdır.

6. Buharın içine girebilecek yoğunlaşmayan gazlar giderilmeye çalışılmalıdır.

7. Hızlı çekim yapabilen kameralarla damla çapları ölçülmeye çalışılmalıdır.

SEMBOLLER

α	alan kesri
$\propto$	orantılıdır
$\sim$	yaklaşık
D_i, D_o	sıra ile borunun iç ve dış çapları
h	ısı aktarım katsayısı, (W/m^2K)
h_c	soğuk akım ısı aktarım katsayısı, (W/m^2K)
h'_c	damla tabanında sıkışma (constriction) ısı aktarım katsayısı (W/m^2K)
h_i	buhar-kondensat ₂ arayüzey ısı aktarım katsayısı, (W/m^2K)
h_d ya da h_k	kondensat ısı aktarım katsayısı (W/m^2K)
k	ısı iletkenlik katsayısı, (W/mK)
k_L	kondensat sıvısının ısı iletkenlik katsayısı, (W/mK)

k_w	duvarın ısı iletkenlik katsayısı, (W/mK)
μ	viskozite, (cp)
μ_w	duvar sıcaklığındaki viskozite, (cp)
q	ısı akış hızı, (W)
$\dot{q}_c$	soğuk akımın akış hızı, (ml/s)
q_c	soğuk akımın aldığı ısı hızı
ρ	yoğunluk, (kg/m^3)
r, r_d	damla yarıçapı, (μm -mm)
r_1	1. sınıf (primer) damla yarıçapı, (mm)
$\bar{r}$	karakteristik damla yarıçapı, (mm)
R_{max}	en iri (ya da yüzeyden ayrılan) damla yarıçapı, (mm)
R	rotametre değeri
R_w	duvar ısı direnci, (m^2K/W)
T	sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_i	arayüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_s	yüzey sıcaklığı
T_v	buhar sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
ΔT_o	yüzey aşırı soğuması, ($^{\circ}C$)
ΔT_c	soğuk akımın ısınma aralığı, ($^{\circ}C$)
$\Delta \bar{T}_L$	logaritmik ortalama yaklaşım, ($^{\circ}C$)
u	linear hız, (m/s)
U_o	borunun dış alanına göre hesaplanmış toplam ısı aktarım katsayısı, (W/m^2K)

* Ankara'daki atmosferik basınçta su $96^{\circ}C$ 'ta kaynar

KAYNAKLAR

1. Hannemann, R.J., Mikic, B.B., "An Analysis of the Effect of Surface Thermal Conductivity on the Rate of Heat Transfer in Dropwise Condensation", Int. J. Heat & Mass Transfer, 19, pp.1299-1307, Printed in Great Britain, 1976.
2. Stylianou, S.A., Rose, J.W., "Drop-to-Filmwise Condensation Transition: Heat Transfer Measurements for Ethanediol", Int. J. Heat & Mass Transfer, 26, pp.747-760, Printed in Great Britain, 1982.
3. Holden, K.M., Wanniarachchi, A.S., Marto, P.J., Boone, D.H., Rose, J.W., "The Use of Organic Coatings to Promote Dropwise Condensation of Steam", Transaction of the ASME, 109, pp.769-774, New Orleans, 1987.

4. Stylianou, S.A., Rose, J.W., "Dropwise Condensation on Surfaces Having Different Thermal Conductivities", *J. Heat Transfer*, 102, pp.477-482, 1980.
 5. Utaka, Y., Saito, A., Ishikawa, H., Yanagida, H., "Study on Dropwise Condensation Curves", *Bulletin of JSME*, 29, pp.4228-4234, 1986.
 6. Hatamiya, S., Tanaka, H., "Dropwise Condensation of Steam at Low Pressures", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 30, pp.497-507, *Prtd in Great Britain*, 1987.
 7. Tanasawa, I., Utaka, Y., "Measurement of Condensation Curves for Dropwise Condensation of Steam at Atmospheric Pressurs", *J. Heat Transfer*, 105, pp.633-638, 1983.
 8. Tanaka, H., Tsuruta, T., "A Microscopic Study of Dropwise Condensation", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 27, pp.327-333, *Prtd. in Great Britain*, 1984.
 9. Hosokawa, T., Kawai, T., Fujio, A., Komatu, G., "Dropwise Condensation Heat Transfer on a Horizontal Tube", *Bulletin of JSME*, 29, pp.2570-2575, 1986.
 10. Sadhal, S.S., Plesset, M.S., "Effect of Solid Properties and Contact Angle in Dropwise Condensation and Evaporation", *Trans. ASME*, 101, pp.48-54, 1979.
 11. Sadhal, S.S., "Further Developments of Dropwise Condensation Theory", *Trans. ASME*, 102, pp.394-396, 1980.
 12. Wilkins, D., Bromley, L., "Dropwise Condensation Phenomena", *AIChE Journal*, 19, pp.839-845, 1973.
 13. Graham, C., "The Limiting Heat Transfer Mechanisms of Dropwise Condensation", Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1969.
 14. Wilmshurst, R., Rose, J.W., "Dropwise Condensation-Further Heat Transfer Measurements", *Proceedings of the Fourth International Heat Transfer Conference*, 6, 1970.
-