

# LİFLERİN ISLANMASI\*

David QUERE ve Alain DE RYCK  
Tercüme: Prof.Dr.Güngör BAŞER

Banyodan çıkıldığında saç ne kadar su taşır? Collège de France'in iki araştırmacısı, özellikle cam liflerinin ıslanması sırasında ortaya çıkan bu ıslanma problemini incelemiştir.

## LE MOUILLAGE DES FIBRES

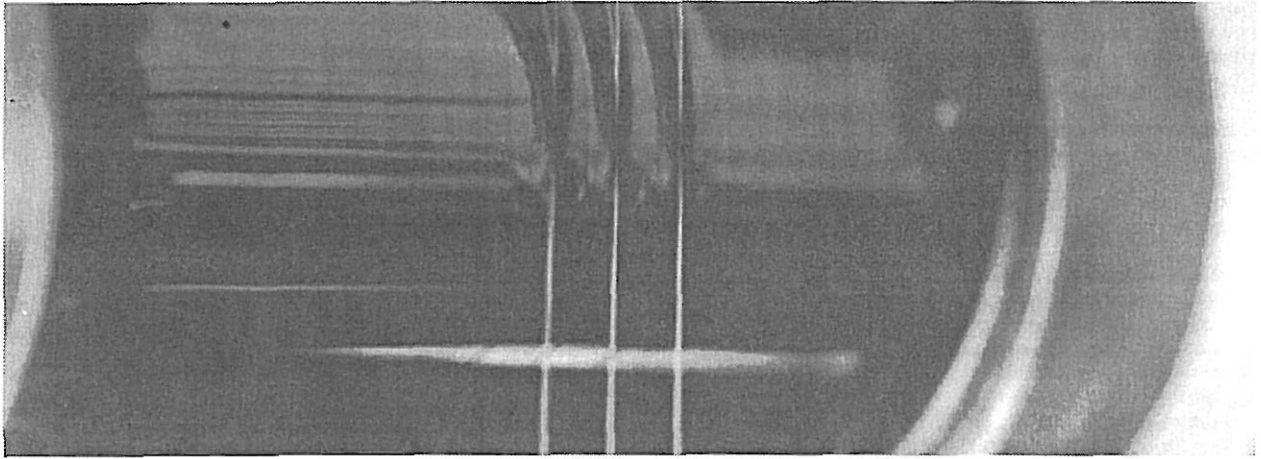
Quelle quantité de liquide entraîne un cheveu que l'on tire d'un bain? Deux chercheurs du Collège de France ont étudié ce phénomène de mouillage qui intervient notamment dans le traitement des fibres de verre

Bir banyodan çekilen bir obje (ya da birey) az ya da çok ıslak çıkar. İşte fizikçiler sıvının doğasına, objeyi oluşturan materyale ya da sürecin hızına bağlı olan bu "az ya da çok"u kesinleştirmeye uğraşmaktadırlar. En genel olarak ıslanma olayları bugün geniş ölçüde incelenmektedir: Ani ıslanma (bir damlanın nasıl yayıldığı için bakınız La Recherche, Ocak 1990'da "Damladan halkaya: X ışınları altında nemlenme) veya,

burada olduğu gibi, zorlanmış yayılma (bir sıvı dinamik olarak bir katı üzerinde nasıl yayılmaya mecbur olmaktadır?) ile ilgilenebilmektedir. Şimdi kendimizi objenin bir saç kılı kalınlığında, birkaç on mikron incelikte olduğu silindirik bir lif olduğu durumla sınırlayalım. Şekildeki durum Saint-Gobain veya Vetrotex'tekiler gibi cam lifi ile ilgili sanayicilerin öncelikli uğraşlarını örneklemektedir. Gerçekte, çekimden hemen

sonra lifler bir demet halinde bir araya getirilir ve aynı zamanda demete yapışma özelliği (kohezyon) vermek ve bobinleme sırasında kopmasını önlemek için bir sıvı eriyik içinde yağlanırlar (Şekil 1). Bu işleme liflerin yağlanması adı verilir. Saint-Gobain'deki mühendislerin ısrarıyla, yakın zamanda hangi parametrelerin yağlayıcı ortamın kalınlığını belirlediğini aydınlatmak için araştırma yaptık.

Büyük Rus fizikçisi Lev Landau



Şekil 1. Fotoğraf Saint-Gobain tarafından cam liflerinin terbiyesinde kullanılan bir işlemi göstermektedir. Sıvı bir çözelti içine daldırılmış olan silindirik dönerken bir sıvı tabakasını üzerine alır. Lifler bu ince tabakayı yukarıdan aşağıya doğru sarılırken geçerler ve ona kohezyon sağlayarak dolayısıyla lif demetini koruyan bir ince tabaka ile kaplanmış olarak çıkarlar. Makalenin yazarları bu kalınlığın, özellikle liflerin hızlarına bağlı olarak davranışını incelemiştirlerdir. Hız yüksek olduğunda gözlemlenen kurallar, elli yıldan bu yana Landau ve arkadaşları tarafından öngörülenden önemli ölçüde sapma gösterirler (Fotoğraf: P.Chartier ve E.Dallies, Saint Gobain Recherche'den)

\*La Recherche 271 Décembre 1994 Volume 25

ve iki meslekdaşı, Benjamin Levich ve Boris Deryaquin 1942'lerde bu problemi teorik bir bakış açısından incelemişlerdi (1, 2). Hesapları lifin banyodan çıktığı bölgenin tanımlanmasına dayanıyordu. Bu bölgede, sıvı birbirine karşı koyan iki etkiye uğrar. Bir yandan viskozitesi nedeniyle liften ayrılma eğilimi içindedir; ancak aynı zamanda çıktığı banyo tarafından yüzey gerilimi sebebiyle çekilmektedir. Gerçekte bu, sıvı yüzeyinin bütün artışlarına karşı koyar; öyle olunca da banyodan çıkan lif bu ara yüzeyi deforme eder ve onu bir miktar büyütür ki bu da bir emme yaratır: Sıvı, çekilen kalınlığı sınırlayıcı biçimde depoya doğru geri götürülür. Bizim üçlünün sonuçta vardığı kanun, ya da kısa yoldan Landau kanunu dediğimiz, kalınlığı artırıcı viskoz (sönümleyici) kuvvet ile inceltici kapiler etki arasında bir uzlaşmayı ifade eder. Kalınlığın sıvının viskozitesi ile arttığını gösterir ki bu da sağduyuya uyar: Bir kaşık, bir bal kavanozundan bir su bardağından daha fazla yüklenmiş olarak çıkar. Diğer yandan sıvı filminin kalınlığı sıvının yüzey gerilimi ile azalır. Sıvı geriliminin sıvının depo tarafından emilişini tahrik ettiği görülür: Büyüdükçe bu emiş

etkinleşir ve bunun sonucu sıvı filmi inceler. Son olarak, çekilen sıvı miktarı lifin çıkış hızı ile büyür. Bu son davranış şüphesiz en az tahminlenebilir olanıdır. Basit bir açıklama deneyelim: Sözü ettiğimiz banyodan çıkarken oluşan emiş sıvının liften banyoya doğru akması ile kendini gösterir: Çıkış daha hızlı oldukça, bu akış ortaya çıkmak için daha az zaman bulur; dolayısıyla katman daha kalın olur. Buna karşın kalınlık ağırlığa bağlı değildir. Lifin yatay ya da düşey olarak çekilmesi hiçbir biçimde sonucu değiştirmez. Bunun sebebi deponun kapiler emişinin en azından bu basamakta yerçekiminden daha güçlü olmasıdır (film-lif bileşimi her zaman milimetre altı bir düzeyde kalır).

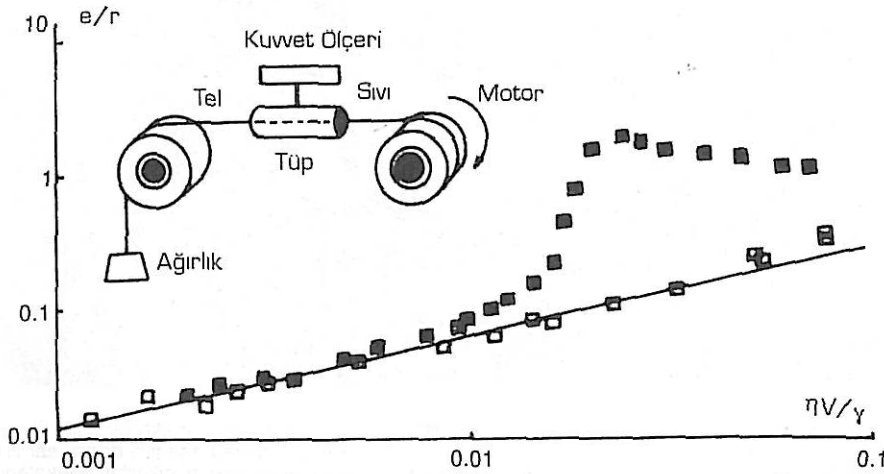
Gerçekleştirdiğimiz deney bir su ya da yağ banyosundan bir kaç yüz mikrometre çapında metalik bir lifi çıkarmaktan ibarettir(3). Güçlük sürüklenen filmin kalınlığının (birden yüz mikrometreye varan) duyarlı biçimde saptanmasında yatmaktadır. Düzenek yatay olarak yerleştirilmiş, bir tarafta bir kurşun ağırlıkla tutulmuş, diğer tarafta bir motorla çekilen bir metalik telden oluşmaktadır (Şekil 2A). Tel birkaç milimetre uzun-

lukta bir Teflon tüp içine yerleştirilmiş büyük bir sıvı (banyo) damlasını geçmektedir. Bu tüp bir terazinin kolu üzerinden sarkıtılmakta ve lif geçerken ard arda tartı yapılmaktadır. Damlanın kütlelerinin azaldığı (lifle beraber ayrılan sıvı yüzünden) kabul edilir ve buradan çekilen filmin kalınlığı elde edilir.

Sudan yüz kere daha kıvamlı olan silikonlu bir yağla Landau kanunu ile uyuşan deneysel noktalar elde edilmektedir (Şekil 2B).

Buna karşın bir tel su banyosundan (ve genel olarak daha az kıvamlı bir sıvıdan) çekildiği zaman Landau kanunu yalnızca kapiler sayı adı verilen bir parametrenin çok zayıf değerleri için sağlanır (grafiğe bakınız). Yaklaşık  $1 \text{ m/sn}$ 'nin üstünde bir hıza karşılık gelen 0.01 kapiler sayının ötesinde deneysel davranış tuhaflaşmaktadır. Filmin kalınlığı sıçrama yapmaya başlar (iki kat hız artışı olduğunda on kat artar).

Landau kanunundan bu önemli sapmayı nasıl açıklamalı? Bir dizi denemelerden sonra aşağıdaki açıklamaya ulaştık. Şimdiye kadar iki zıt faktör, viskoz sürüklenme ve kapiler emiş filmin kalınlığını belirliyordu. Şimdi ise, yüksek hızlarda sıvının ataleti, bir başka deyişle



Şekil 2. Yazarlar tarafından gerçekleştirilen deneyde bir tel bir A sıvısı içeren bir tüp içinde yatay olarak çekilmektedir. Aynı anda tüp, tel tarafından taşınan sıvının kalınlığını saptamayı sağlayacak biçimde tartılmaktadır. Sonuçlar film kalınlığı e'nin tel kalınlığı r'ye bölümünün kapiler sayı olarak isimlendirilen boyutsuz  $\eta V/\gamma$  sabitinin fonksiyonu olarak gösterildiği B'de özetlenmiştir. ( $\eta$  sıvının viskozitesi,  $\gamma$  yüzey gerilimi ve V lifin hızıdır) Düz olarak çizilmiş doğru Landau'nun teorik kanununa karşılık gelmektedir. Biri su ile elde edilmiş (beyaz kareler), diğeri yüz kez daha kıvamlı bir yağla elde edilmiş (siyah kareler) olan iki seri sonuç gösterilmektedir. Su ile gerçekleşen ölçümler Landau kanunu açısından dikkat çekici sapmaların gözlemlendiği önemli sarım hızlarına karşılık gelmektedir. Bunlar sırasıyla önce sıvının ataleti, daha sonra da lif tarafından banyo içinden harekete geçirilen sıvı tabakası olan limit viskozite tabakasını hesaba katarak açıklanmaktadır.

sıvıyı kapiler emişe karşı az çok duyarlı kılan kinetik enerjisi artık ihmal edilemez. Hızla giden bir taşıtın aynı zamanda çok kısa bir uzaklıkta durmayı ve geri gitmeyi denediğini düşünelim: *Bunu ancak eğer ataleti çok büyük değilse başarabilir.* 1 m/sn de sıvı banyodan tekrar emilemeyecek kadar yüksek bir hızla çıkmakta ve *Landau kanununa kıyasla sıçrama yapan film kalınlığını artık sınırlamamaktadır* (4). Sıçramanın yağ ile gözlemlenmediğine dikkat edelim: Bu çok yüksek viskozitede olduğundan aynı kapiler sayılara bizi ulaştıran hızlar su için olanlardan çok daha düşüktürler: Tümü 5 cm/sn'den düşüktürler, zira sıvının ataleti hala daha ihmal edilebilir.

Şimdi suya dönelim: Daha da büyük olan hızlar (5 m/sn ye kadar) için, kalınlık hız ile küçülmeye başlar. Bu yeni davranışı anlamak için telin banyonun içerisindeki sıvıyı nasıl sürüklediğini kendimize sormamız gerekir. Buna yanıt 1904'te Alman fizikçi L. Prandtl tarafından verilmiştir. Damla içine girişinden sonra tel sıvıyı viskozitesinden dolayı sarsmaya başlar. Prandtl lif tarafından harekete geçirilen -limit viskozite tabakası adı verilen- küçük bir sıvı tabakasının kalınlığının, lifin banyo içinde kaldığı sürenin kare kökü ile orantılı olarak büyüdüğünü ortaya koymuştur. Sonuç olarak lif daha hızla çıktıkça, limit viskozite tabakası daha ince olur. Sürüklenmeye izin veren sıvının viskozitesi olduğuna göre, tel banyodan çıkarken oluşan limit tabakadan daha fazlasını taşıyamaz. Düşük hızda *Landau kanununu* ve ondan sap-

mayı anlamak için ileri sürülen savları geçerli kılmaya yeterli ölçüde kalındır. Ama çok büyük hızlarda limit tabaka filmin kalınlığını sınırlayan faktöre dönüşmektedir. Bir tel parçasının geçirdiği zaman, hızı ile ters orantılı olduğundan, bu son koşuldaki kalınlık, dolayısıyla, deneysel sonuçların da kanıtladığı gibi, hızın kök karesinin tersi oranında azalır.

Bu son durum, liflerin 10 m/sn'nin üstünde ya da ona eşit hızlarda yağlandığı endüstriyel terbiye koşullarına karşılık gelir. Bizim düzeneğimiz gerçeğin büyük bölümünü sergilemektedir - bir tel yerine, lif, karmaşık bir sıvı çözelti (yağları, polimerleri ve yüzey aktif maddeleri içeren) yerine saf su ve oldukça basitleştirilmiş bir terbiye geometrisi. Buna karşın limit tabakayı hesaba katarak elde edilen kural, Saint-Gobain'deki terbiye silindiri ile elde edilen deneyimleri oldukça yeterli biçimde açıklamaktadır. Bunun sebebini kendimize sormak ilginç olacaktır. Düşük hızda film kalınlığının Landau kanununa uyduğu görülmüştür. Yalnızca sıvının yüzey gerilimine bağlıdır ve bunun sonucu banyodan çıkışta yüzeyde ne olup bittiğiyle belirlenir. Dolayısıyla ıslatma banyonun kompozisyon ayarına ve özellikle yüzey aktif maddelerin varlığına karşı duyarlıdır: Düşük hızda bir telin bir saf su banyosundan veya sabun çözeltisinden çekilmesi farklı sonuçlara götürür. Buna karşın yüksek hızda, terbiye işleminde söz konusu olduğu gibi, yalnızca sıvının hacim özellikleri (büyüklükleri sınır tabakayı etkileyen viskozite ve

yoğunluk) filmin kalınlığını belirler: Bir bakıma problem basitleşmektedir.

### Landau Kanunu

Eğer e lif tarafından taşınan sıvı filminin kalınlığı,  $V$  lifin hızı,  $r$  çapı,  $\eta$  sıvının viskozitesi ve  $\alpha$  onun yüzey gerilimi ise, Landau kanunu şöyle yazılır:  $e = 1.34 r (\eta V / \alpha)^{2/3}$

Parantez içinde görünen boyutsuz büyüklük "Kapiler Sayı" olarak adlandırılır.

Eğer incelenen obje bir saç telinden daha büyükse formüldeki çap  $r$  yerine, zayıf bir biçimde sıvının niteliğine dayanan, ama genelde milimetre mertebesinde kalan ve kapiler uzunluk denen bir sayının konulması gerekir. Öyleyse, bir telefon çağrısıyla banyosundan 1 m/sn'de çıkarılan bir şahıs, yaklaşık milimetrenin iki onda biri kalınlığında bir sabunlu su filmi ile kaplanmış olarak çıkar [  $\alpha$  yaklaşık 35 mN/m ve  $\eta$  0.001 Pa civarında değer alır] ve dolayısıyla 0.2 litre kadar bir suyu beraberinde sürükler. Herkes kullanımdan önce ve sonra bir havlu peçeteyi tartarak bu hacmin kabaca ölçümünü deneyebilir.

### KAYNAKÇA

L. Landau ve B. Levich, Acta Physicochimica, 17, 42, 1942

B. Deryaguin, Acta Physicochimica, 20, 349, 1943.

A de Ryck ve D. Quéré, Europhysics Letters, 25, 187, 1994.

A. Koulago ve ar., Physics of Fluids A, baskıda, 1994.