



NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİNİN ISI TRANSFERİ UYGULAMALARINDA KULLANILMASI

Nevin ÇELİK *, Haydar EREN

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, ELAZIĞ
Tel: 0 424 2370000 e:mail: ncelik1@firat.edu.tr , haydar@firat.edu.tr

(Geliş Tarihi : 04.11.2002)

Özet: En iyi bilinen kütle transfer metodu şüphesiz iyi geliştirilmiş naftalin süblümleşme tekniğidir. Bu teknikte kütle transferi ile ısı transferi arasındaki analogiden faydalanarak ısı transfer katsayısı kolaylıkla tespit edilir. Bu yöntemle en karmaşık geometrilerde bile ölçüm yapılabilir, örneğin bir borunun iç yüzeyinde, bir deliğin kenarında, bir yüzeyin uç köşelerinde v.s. Bu çalışmada ısı transferi uygulamalarında sık rastlanan naftalin süblümleşme tekniğinin özellikleri, avantajları, dezavantajları ve uygulama şekli üzerine derleme bir rapor sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Naftalin Süblümleşme Tekniği, Isı/Kütle Transferi, Analoji.

USING NAPHTHALENE SUBLIMATION TECHNIQUE IN HEAT TRANSFER APPLICATIONS

Abstract: One of the most convenient mass transfer methods is the well-developed naphthalene sublimation technique. In this technique, by the help of analogy between heat and mass transfer; heat transfer coefficient can be determined easily. With this technique one can make measurements even in the most complex geometry; such as inner side of a pipe, near a hole, at the corners of a surface, etc. In this study, a review report is presented about the properties, advantages- disadvantages, and application style of naphthalene sublimation technique.

Key Words: Naphthalene Sublimation Technique, Heat/Mass Transfer, Analogy.

SEMBOLLER

D_{naf}	Naftalinin difüzyon katsayısı (m^2/s)
h	Isı transfer katsayısı ($W/m^2/^\circ C$)
h_m	Kütle transfer katsayısı (m/s)
L	Karakteristik uzunluk (m)
Nu	Nusselt sayısı, (-)
$\dot{m}$	Birim alandaki naftalin kütle akısı, (kg/m^2s)
$P_{v,w}$	Naftalinin buhar basıncı (Pa)
Pr	Prandtl sayısı (-)
R	İdeal gaz sabiti ($J/kg^\circ C$)
Re	Reynolds sayısı (-)
Sc	Schmidt sayısı (-)
Sh	Sherwood sayısı (-)
St	Stanton sayısı (-)
T_w	Cidar sıcaklığı ($^\circ C$)

T_∞	Akışkan sıcaklığı ($^\circ C$)
q_w	Isı akısı (W/m^2)
V_∞	Serbest akım hızı (m/s)
α	Isıl difüzyon (m^2/s)
δ_z	Naftalinin süblümleşme derinliği (m)
δ_m	Kütle kaybı (kg/m^2s)
δ_t	Her bir ölçümde geçen süre (s)
$\rho_{v,\infty}$	Naftalinin serbest akımdaki buhar yoğunluğu, (kg/m^3)
$\rho_{v,w}$	Naftalinin yüzeydeki buhar yoğunluğu, (kg/m^3)
ρ_s	katı naftalinin yoğunluğu (kg/m^3)
τ	Boyutsuz zaman, (-)
ν	Kinematik viskozite, (m^2/s)

* İletişim kurulacak yazar

GİRİŞ

Naftalin süblimleşme tekniği 1950'lerden bu yana çeşitli deneylerde sıkça kullanılmaktadır. Deneyler, yüzeydeki ortalama ve yerel kütle transferini bulmayı amaçlar. Ortalama katsayılar tartma ile, yerel katsayılar ise özel ağıtlarla derinliğin ölçülmesi şeklinde yapılır.

Goldstein ve Cho (1995), Nusselt-Reynolds ödüllü bir derleme çalışmalarında naftalin süblimleşme tekniğini en ince detayına kadar incelemişlerdir. Çalışmada naftalinin fiziksel özellikleri, havadaki difüzyonu gibi genel bilgiler verilmiş, ardından da tekniğin uygulanışı detaylı bir şekilde sunulmuştur. Çalışmada literatürde yapılmış birçok naftalin süblimleşme uygulamaları hakkında bilgi de verilmiştir. Ayrıca bu tekniğin kullanılmasındaki sınırlamalar belirtilmiş, kullanılacağı yerler hakkında tavsiyelerde bulunulmuştur. Bu raporda da Goldstein 'ın çalışmalarından sıkça yararlanılmıştır.

Goldstein vd., (1985), bir başka çalışmalarında, naftalin kaplı bir düz plaka üzerinde eksene dik yerleştirilmiş üzeri çıkıntılı bir silindirin ısı transferini araştırmışlardır. Isı-kütle transferi analogisini kurarken, serbest akımdaki naftalin buhar konsantrasyonunu sıfır alarak yüzeyde sabit konsantrasyon sınır şartı oluşturmuşlardır. Bu da ısı transferindeki sabit sıcaklık sınır şartına benzer. Böylece Sherwood sayısından gidilerek Nusselt sayısı tespit edilebilmiştir.

Schmidt (1994), IBM şirketi için hazırladığı bir çalışmada yazılım devre kartları üzerine monte edilmiş elektronik modüllerin ısı transfer katsayılarını elde etmekte kullanılan naftalin süblimleşme tekniğini, ölçüm aşamalarıyla beraber detaylı bir şekilde anlatmıştır. Schmidt yerel ölçümler yapmamıştır. Yalnızca ortalama ısı transfer katsayısını bulmuştur, bunun için de tartma metoduyla kütle transferini tespit etme yöntemini kullanmıştır.

Cho vd. (1997), düz plaka üzerine açılmış basit bir deliğin civarında ve içinde oluşan kütle/ısı transferini naftalin süblimleşme tekniğiyle tespit etmişlerdir. Çalışmada deliğin farklı açıları için yerel ve ortalama Sherwood sayıları bulunmuştur.

Naftalin süblimleşme tekniğinin geniş kullanım alanını jetler oluşturmaktadır. Sparrow ve Lovell (1980) tarafından yapılan deneysel çalışmada, dairesel bir hava jeti dik ve eğik açılarda naftalin kaplanmış yüzeye çarptırılarak, kütle transferi ölçülmüş ve uygun bir analogi ile ısı transfer oranına geçilmiştir. Jet eğim açısının değişmesi, durma noktasının yerini değiştirmiştir. Maksimum ısı ve kütle transfer oranının jet eğim açısına büyük oranda duyarlı olmadığı görülmüştür.

Sparrow ve Wong (1975), başlangıçta laminar olan tam gelişmiş slot jetten su ve hava geçirmez sınırsız düzlem levhaya çarpma olayını naftalinin süblimleşmesi tekniğini kullanarak araştırmışlardır.

Ward ve Mahmood (1982), türbülanslı dönen ve çarpan jetler üzerinde yaptıkları deneysel bir çalışmada, düz bir düzlem üzerine dik olarak çarpan dönen hava jetlerinin kütle ve ısı transfer oranlarını incelemişlerdir. Kütle transfer verileri ince bir film halinde naftalin buharlaşma (süblimleşme) tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Kütle transferinden yararlanarak ısı transfer oranlarını belirlemek için ise Chilton-Calburn analogisi kullanılmıştır. Bu analoginin jet çarpma sistemlerine uygulanabilirliği yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir.

Popiel ve Baguslowski (1988), düz bir yüzey üzerine çarpan dairesel jetin oluşturduğu ısı/kütle aktarımına ait akım şekillerini incelemişlerdir. Radyal yönde oluşan kütle transfer katsayısı naftalin süblimleşme tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucu akım karakteristikleri kütle transferinin radyal dağılımı, durma noktasındaki kütle transfer ölçümleri ve korelasyonlar verilmiştir.

Chen vd. (1998), dönen diske çarpan dairesel jetin, ısı (kütle) transferini araştırmak üzere yaptıkları deneysel çalışmada naftalin süblimleşme tekniğinden yararlanmışlardır. Deneylerin sonucunda ısı (kütle) transferi alanının; çarpmanın baskın olduğu bölge, karışım bölgesi ve dönmeyen baskın olduğu bölge olmak üzere üç bölgeye ayrıldığı bulunmuştur.

Li vd. bir çalışmada (1997), ince bir borunun iç yüzeyine yerleştirilen kanatçıkların çapraz akışa maruz bırakılması sonucu oluşan yerel ve ortalama ısı transfer katsayıları tespit etmiştir. Analogi kolaylığından faydalanmak amacıyla naftalin süblimleşme tekniğine başvurulmuş, neticede bu teknik kanatçık üzerinde ve boru yüzeyinde çeşitli değerler tespit edilebilmiştir.

NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİNİN ÖZELLİKLERİ

Isı transfer deneylerinde, küçük bir bölge üzerinde sıcaklık çok hızlı değişiyorsa yerel ısı transfer katsayısını tespit etmek zordur. Bu tür ölçümler yüksek oranda cidar-iletim hataları içerirler. Ancak kütle transfer teknikleriyle benzerlik durumlarında kütle transfer katsayıları rahatlıkla okunabilir. Kütle transfer ölçümleri ısı transfer ölçümlerine bir ısı/kütle transferi analogisi yardımıyla dönüştürülür. Analogi Schmidt ve Prandtl sayılarının birbirlerine eşit olmasını gerektirir. Bu metot yerel transfer katsayılarını yüksek hassasiyetle tespit etmek için geliştirilmiştir. Kütle transfer

katsayılarını tespit etmenin aşamalarını şöyle sıralayabiliriz:

- Numuneleri naftalinle kaplamak,
- Naftalinin yüzey profilini ya da ağırlığını ölçmek,
- Naftalinle kaplanmış numune deneylerini yürütmek,
- Tekrar naftalin yüzey profilini veya ağırlığını ölçmek,
- Ağırlıktan giderek kütle transfer katsayısını ve Sherwood sayısını bulmak ve akabinde ısı/kütle analojisiyle ısı transfer katsayısını ve Nusselt sayısını bulmak.

Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Avantajları

Isı transferi deneylerinde genellikle iletim ve radyasyon kayıpları mevcuttur. Netice olarak izotermal ve adyabatik sınır şartları yaklaşıktır. Ancak naftalin süblimleşme tekniğiyle hatasız ya da çok az hatayla bu sınır şartı problemi giderilebilir. Naftalinle kaplanmış yüzey; ısı transferindeki izotermal sınır şartına, çözülmeyen yüzey ise adyabatik duvar şartına benzemektedir.

Eğer test yüzeyi uniform sıcaklıkta ve basınçta tutulursa, naftalin buharlaşma basıncı ve konsantrasyonu yüzeyde uniform olacaktır. Bu da ısı transferi problemlerindeki izotermal yüzey şartına benzerlik göstermektedir. Difüzyon ve konveksiyondan dolayı yüzeyde sürekli olarak kütle kaybı olacaktır. Konsantrasyon gradyeni, sıcaklık gradyenine ve kütle akısı, ısı akısına benzetilebilir. Zaman ortalamalı yerel kütle transfer oranları süblimleşme derinliği ölçülerek elde edilir.

Bir kütle transferi deney sistemi kolaylıkla imal edilebilir ve taşınabilir. Ayrıca karmaşık bir ısıtma veya ölçme sistemine ihtiyaç yoktur. Örneğin malzemeyi yalıtma veya termokupol aparatları gibi ek işlemlere gerek yoktur. Naftalin süblimleşme tekniğinde yalnızca dökümle elde edilebilecek bir naftalin kaplı numuneye ihtiyaç vardır. İstenilen sınır şartlarında tam temsil etme ile kompleks hareketli parçalar içeren bir geometride bile ölçüm yapmak mümkündür.

Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Dezavantajları ve Sınırlamaları

Naftalin süblimleşme tekniği geniş alanda uygulanır ve rahatlıkla kullanılabilir. Ancak bu metodun kullanılamayacağı yerler de vardır. Düşük hızlı akımlarda ölçüm yapılacak zamanı uzun tutmak gerekir. Uzun sürede ise sıcaklık değişimlerini kontrol etmek zorlaşır. Uygulamada 2 saatin üzerinde ölçüm süresinden kaçınılır. Süre uzadıkça doğal konveksiyon kayıpları artacaktır. Bu problemi

çözmek için bazen test levhası küçültülür ki (dolayısıyla Rayleigh sayısı küçülür) eşit Reynolds sayısında akış hızı da arttırılabilir (Goldstein ve Cho, 1995).

Aerodinamik/viskoz ısıtmadan dolayı yüksek hız sınırlaması vardır. Yüzeyde doymuş naftalinin buhar basıncı sıcaklık değişimine karşı hassastır. Bu nedenle yüksek hızlı akışlarda geri dönüş etkisinden kaynaklanan sıcaklık artışı kritik değerdedir. Deneyler yüksek hızlarda yapıldığı zaman viskoz kayıptan kaynaklanan ısı enerjisi büyük olacaktır.

Yüksek kaymalı akışlarda difüzyon veya konveksiyondan daha ziyade mekanik erozyondan dolayı naftalin yüzeyinde uçma yada aşınma olabilir. Bu da yüksek transfer oranlarını azaltır. Bu özellik genellikle çarpan jet akımları hakkındadır.

Ölçüm alma süresi boyunca naftalin test yüzeyinin şekli süblimleşmeden dolayı kademe kademe bozulur. Ortaya çıkma süresi, test numunesi ölçüsündeki değişikliklerin akım üzerinde olan etkilerini minimize edecek şekilde seçilir. Uygulamada maksimum süblimleşme derinliği 0.2 mm 'yi geçmez, bu da yaklaşık 25.4 mm ölçüsündeki test numunesinde %0.8'lik bir bozulma yapar. Genelde maksimum derinlik değişimi 0.2 mm 'den azdır.

Naftalin süblimleşme tekniğinde elde edilen sonuçlar zaman-ortalamalı değerlerdir. Geçiş değerleri büyük bir skalada daha önceden anlatılan görüntüleme tekniğiyle elde edilebilir. Bu geçici metotlar hızla değişen şartlarda kullanılamaz.

Dökümü veya imali zor olan bazı kompleks geometrilerde metodun kullanılması uygun değildir. Döküm yönteminde kalıplar numuneden çıkartılırken bir kesme hareketi gereklidir. Karışık geometriler spreyle kaplanabilir, ancak pürüzlü yüzey oluşacağından bu sefer de yerel ölçüm yapmak zorlaşacaktır.

Naftalin deneyleri için açık devreli hava tüneline serbest akım elde etmek esastır. Emici tip hava tüneline test numunesi üfleyicinin üst akım tarafına yerleştirilirse test kesitinde sabit akım sıcaklığı sağlamak kolaylaşır.

Cidar yakınındaki buhar sıcaklığı (ya da katı naftalin sıcaklığı) naftalinin süblimleşmesinden dolayı oluşan serbest akımdakinden farklıdır. Bu da hatalara sebebiyet verir.

Bu metotla ısı transferinin izotermal ve adyabatik duvar sınır şartı analojisi elde edilir. Ancak ısı akısı sınır şartı sağlamak mümkün değildir. Sonuçlar yalnızca bir Schmidt sayısında elde edilir ($Sc=2.28$).

Naftalinin Özellikleri

Naftalin süblimleşme metodu çok doğru ölçümler elde etmemizi sağlar ve ısı transfer

metoduyla kıyaslandığında sınır şartlarını elde etmede oldukça avantajlıdır. Bununla beraber bu metodun başarısı naftalin özelliklerinin doğru tespit edilmesine bağlıdır. Bu basit özellikler katı naftalinin yoğunluğu, doymuş buhar yoğunluğu (ya da doymuş buhar basıncı) ve havadaki kütle difüzyon katsayısıdır (Goldstein ve Cho, 1995; Goldstein vd., 1985; Ambrose vd., 1975; Cho vd., 1992; Kudchaker vd., 1978). Katı naftalinin yoğunluğu ve ısı özellikleri birçok araştırmacı tarafından ölçülmüştür. Tablo 1'de Kudchaker ve arkadaşlarının (1978) verileri listelenmiştir.

Tablo 1. Naftalinin özellikleri (Kudchaker vd., 1978).

	Açıklama	Birim
Kimyasal formül	$C_{10}H_8$	-
Molekül ağırlığı	128.17	kg/kmol
Erime noktası	80.2	°C
Donma noktası (havada 1.01325 bar)	80.285	°C
Üçlü sıcaklık noktası	80.28	°C
Normal kaynama noktası (havada 1.01325 bar)	217.993	°C
Süblimleşme entalpisi	70.36	kJ/mol
Kritik sıcaklık	472.5	°C
Kritik basınç	40.51	Bar
Kritik hacim	413×10^{-6}	m^3/mol
Sıvı yoğunluğu		
1.01325 bar, 80.23 °C	0.978	kg / m^3
1.01325 bar, 120 °C	0.946	"
1.01325 bar, 130 °C	0.938	"
Katı halde ısı iletim kat.	0.333	W/mK
Katı halde yoğunluk 20°C	1175.0	kg/ m^3

Naftalinin havadaki doymuş buhar basıncı ile ilgili birçok deneysel ampirik bağıntı elde edilmiştir, bunlardan en geçerli olanı Ambrose vd.'nin (1975) basınç-sıcaklık bağıntısıdır. Bu bağıntı bulunan diğer denklemlerle yaklaşık %7 oranında uyum sağlamaktadır.

$$T \log P = 1/2 a_0 + \sum a_s E_s(x) \quad (1)$$

Buradaki sabitler; $a_0=301.6247$; $a_1=791.4937$; $a_2=-8.2536$; $a_3=0.4043$; $x=(2T-574)/114$, $E_1(x)=x$; $E_2(x)=2x^2-1$; $E_3(x)=4x^3-3x$ şeklindedir (sıcaklık Kelvin (K), basınç Pascal (Pa) cinsinden seçilmiştir).

Naftalinin havadaki difüzyon katsayısı ile ilgili olarak ise, yine Ambrose vd.'in (1975) verileri en güvenilir veriler olarak kabul edilebilir. Bu verilere göre 290 K sıcaklıkta 4.918 Pa naftalin buharlaşma basıncında, naftalinin kinematik viskozitesi $\nu=14.811 \times 10^{-6} m^2/s$, difüzyon katsayısı $D_{naf}=6.455 \times 10^{-6} m^2/s$, Sc sayısı ise 2.290 değerdedir. Bu değerlerin dışında çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Her bir korelasyonu diğeriyle gösterdiği uyuma göre değerlendirmek gerekir.

NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİNİN UYGULANIŞI

Naftalinin Yüzeyi Kaplaması

Test numunelerinin üzerine naftalinin kaplanması makinede imalat, daldırma, püskürtme, döküm gibi işlemleri ve bu işlemlerin kombinasyonunu içerir (Goldstein ve Cho, 1995; Schmidt, 1994; Ganzavles ve van der Geld, 1998; Cho vd., 1997).

1) *Makineyle işleme* metodunda sıradan bir torna tezgahı veya freze tezgahı kullanılarak döküm veya daldırma ile elde edilmiş naftalin bloklarından test numuneleri elde edilir. Çabamız aynı tipte çok sayıda ürün elde etmek ve numunelerin üzerinin pürüzsüz olmasını sağlamaktır.

2) *Daldırma*, bu metotlar içerisinde belki de en kolay olanıdır. Test parçasını sıvı naftalin fırınına daldırarak kaplama yapılır. Alternatif olarak bir test numunesini sıvı naftalinle boyayabilirsiniz. Ancak bu metotla tekrarlanabilirlik ve kalınlığın uniformluğu gibi problemler ortaya çıkar.

3) *Püskürtme* metoduyla eritilmiş naftalin püskürtülerek bir alt tabaka şekillendirilir. Kaplama yaklaşık olarak 0.015-0.115 mm kalınlığında ince bir tabakadır.

4) *Dökme* metodu, en çok bilinen ve en uygun metottur. Bu metot basit ve başarıyla tekrarlanabilen bir metottur (Goldstein vd., 1985). Bu yöntemde erimiş naftalin kalıbın içine dökülür. Daha sonra katılaşmaya bırakılır ve en sonunda numune modelden çıkartılır. İlk önce numunenin üzerinde kalan naftalin, eritilerek giderilir. Kalıp, test numunesinden ve iyice cıllanmış alüminyumdan oluşur. Alüminyum kalıp, alüminyum tozu ile cıllanmıştır. Cıllanmış yüzeyler izopropil alkollü pamukla temizlenir. Girintili yüzeyler ve naftalin

eritme fırını da alkolle temizlenir. Kalıbın iç boyutları istenilen test numunesinin boyutlarıdır. Test numunesinin ağırlığı deliklere bir kanal yerleştirilir ve hava girişi için birkaç maça deliği açılır. Naftalin tozunun yeterli bir miktarı elektrik ısıtıcısıyla yaklaşık 1 kW kapasitede kaynayınca ya da kaynaması (kabarması) durana kadar bekletilir. Kısa bir süre sonra (~30 s) oda sıcaklığında kalıba dökülür (Goldstein ve Cho, 1995).

Bu metot basit olmasına rağmen dökmeye (boşaltmaya) başlamadan önceki sıcaklık ve bekleme zamanı oldukça önemlidir. Çok yüksek bir sıcaklık naftalinin döküm yüzeyinde küçük kabarcıklara sebep olur ve beyaz tabakadan daha şeffaf olan bir renkli tabaka ortaya çıkarır. Düşük naftalin sıcaklığında ise test yüzeyinde doldurma işlemi boyunca dalgalı izler ortaya çıkar. Bazen kalıp tamamen dolmayabilir. Büyük bir test numunesi için, kalıp erimiş naftalinle doldurulmadan önce yeniden ısıtılmalıdır. Daha sonra tam katılaşmanın sağlanması için kalıp yaklaşık 2 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Test numunesini kalıptan çıkarmak için; maça, hava boşluk tüpleri ve civatalar söküldükten sonra bir keçiçe keskin bir şekilde vurmak gerekir. Yeterli kesme kuvveti olmazsa naftalin yüzeyinin bir kısmı kalıba yapışabilir.

Naftalinli Yüzeyin Ağırlık Ölçümleri

Kütle transfer oranını ölçmek için iki genel metot vardır. Bunlar ortalama transfer katsayıları ölçmede kullanılan tartma metodu ve yerel katsayılar için özel ölçü aygıtı kullanılarak yapılan yerel ölçüm metodudur.

Tartma Metodu: Test numunesini ölçümden önce ve sonra tartarak ortalama bir katsayı elde edilir. Bu metot için yüksek hassasiyetli tartıya gerek duyulur. Tartma metodunda ölçüm süresince doğal konveksiyon yerel ölçümlerden daha düşüktür. Çünkü ölçme süresi 5 saniye gibi kısa bir süredir. Doğru sonuçlar elde etmek için test zamanı en az 10 mg naftalinin süblimleşmesi kadar olmalıdır. Bu da yaklaşık 50 µm derinlik gerektirir.

Yerel Ölçüm Metodu: Yerel ölçme metodu iyi geliştirilmiştir, öyle ki; düz yüzeyler, dairesel silindirler ve basit eğri dış hatlı yüzeyler ve iç delikler üzerinde ölçüm yapmak mümkündür. Yerel ölçüm yapmak için, üzerinde referans noktaların belirlendiği dökümden çıkmış naftalin numunesinin

etrafındaki süblimleşmeyen çerçeveler (metal parçalar) yeni bir yüzey oluştururlar. Çerçeve gerilmelere dayanabilecek kalınlıkta olmalıdır. Çerçeveler köşelerde tümseklerin oluşmasını engeller ki; bu tümsekler köşe bölgelerde yüksek kütle transfer oranlarına neden olurlar.

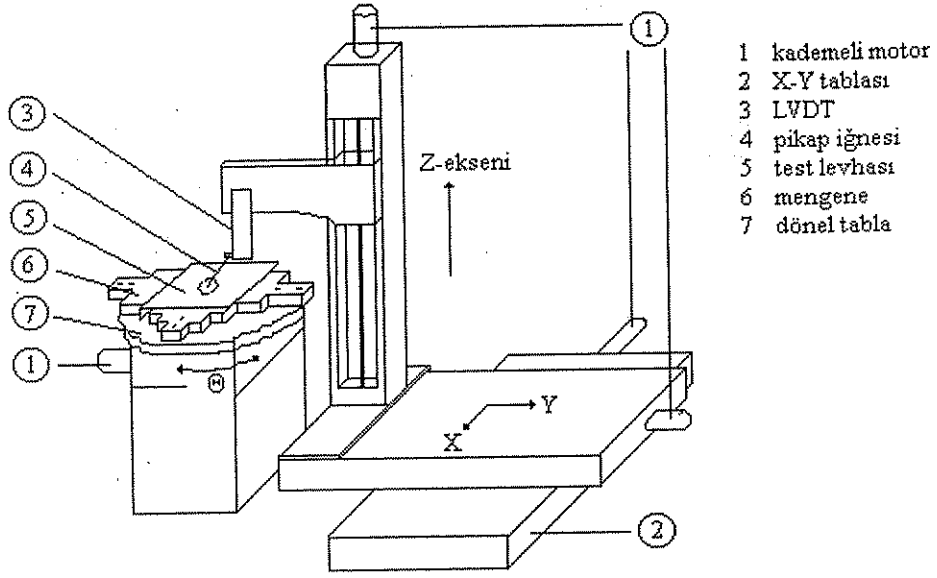
Naftalin yüzeyinin profilini taramak için otomatik bir yüzey-ölçme sistemi kullanılabilir. Naftalin yüzeyinin gerekli yerel süblimleşme derinliğini elde etmek için birkaç önemli faktör vardır;

- Akışa maruz kalmadan önce ve sonra numuneyi tam yerleştirmek,
- Derinlik ölçümünü doğru tespit etmek,
- Doğal konveksiyon kayıplarını minimize edecek hızlı data okumayı yapmak (Goldstein ve Cho, 1995).

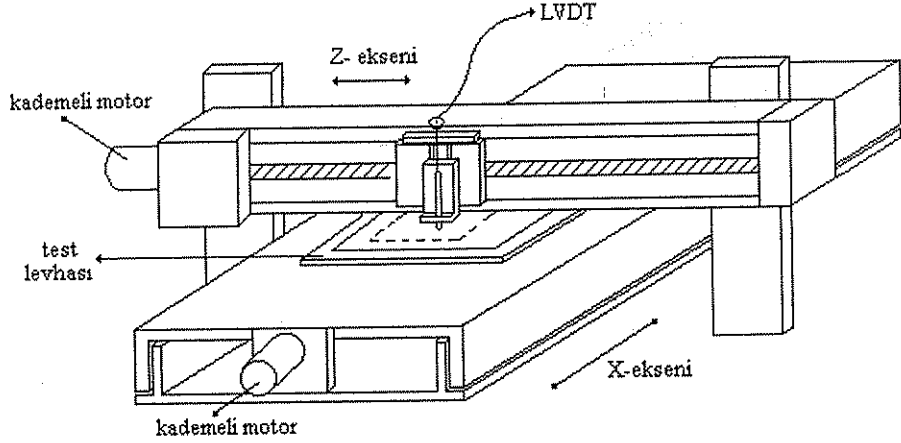
Bu hedefleri sağlamak üzere son 10 yılda bilgisayar kontrollü ölçme sistemleri geliştirilmiştir. Üç farklı sistem vardır, bunlar; XY tablası, döner tabla ve dört eksenli tabladır. Bu sistemler aracılığıyla düzlem levhalar, dairesel silindirler ve eğri kontör yüzeyler veya iç delik yüzeylerde ölçme başarıyla yapılır. Ölçme sistemi bir derinlik ölçer, bir lineer sinyal dönüştürücüsü (LVDT), bir kademeli motor ve kişisel bilgisayardan ibarettir. Şekil 1'de iç deliklerde ölçüm yapabilen bir dört eksenli (x,y,z,θ) tabla düzeni verilmiştir. Şekil 2'de ise iki eksenli (x,y) derinlik ölçme sistemi verilmiştir.

Yerel kütle transfer katsayılarını tespit etmek için naftalin yüzeyi yükselme profili her testten önce ve sonra ölçülür. Yüzey yükseltileri arasındaki Yerel yüzey profilini en güzel şekilde elde etmek için dört önemli faktöre dikkat etmek gerekir. Bunlar;

- * Doğal konveksiyondan kaynaklanan dış süblimleşme kayıplarını minimize edecek kadar kısa ölçüm süresi ayarlamak,
- * Kademe hareketi ile sinyal okuma arasındaki gecikme süresinin yeterli derecede olması.
- * Her bir noktada ortalama olabilecek kadar çeşitli sinyal almak.
- * Her bir kademede naftalin yüzeyinin eğimini verebilecek kadar bir artış yapmak,



Şekil 1. Dört eksenli derinlik ölçme sistemi (Goldstein ve Cho, 1995).



Şekil 2. İki eksenli derinlik ölçme sistemi (Goldstein vd., 1985).

Ölçüm sistemi ve data okuma test numunesine bağlıdır. Kademe artışları bölgeden bölgeye değiştirilebilir. Küçük artışlar ölçüm süresi ile sınırlandırılmıştır. Ölçüm süresi; bir kademe hareketinden sonra gecikme zamanının değiştirilmesiyle ve bir noktada alınan ölçüm sayısının değiştirilmesiyle değişir. En iyi sonuç uzun gecikme zamanında elde edilir ve ortalama değer en fazla ölçüm yapıldığı zaman elde edilir.

Deneyisel çalışmanın sürekliliği süblimleşme derinliğiyle sağlanır. Derinlik, ölçüm hatalarını ve doğal konveksiyon hatalarını en küçük yapacak şekilde olmalıdır ve derinlik, akış modelini etkileyecek kadar büyük olmamalıdır. Her bir deney süresi naftalin yüzeyinin ortalama süblimleşme

derinliği yaklaşık 0.038-0.05 mm olacak şekilde seçilir. Doğal konveksiyon kayıpları genelde %5'den daha azdır. Bazı noktalarda bu oran en fazla %10'a yaklaşabilir. Süblimleşme oranı Reynolds sayısına, naftalinin yüzey sıcaklığına ve test geometrisine bağlıdır. 24°C oda sıcaklığında deney süresi 30-120 dakika civarındadır ve bazen Reynolds sayısına ve geometriye bağlı olarak değişebilir. Yapılacak herhangi bir deneyde en uzun deney süresi 2 saati aşmamalıdır. Çünkü sabit yüzey sıcaklığı elde etmek artık imkansız olacaktır. Ayrıca uzun deney sürelerinde doğal konveksiyon önem kazanacaktır ve sonuçlar elde edilirken hesaplara katılması gerekecektir (Schmidt, 1994).

ISI / KÜTLE TRANSFERİ ANALOJİSİ

Naftalin süblimleşme metodu kullanılarak elde edilen kütle transfer sonuçları, ısı ve kütle transferi arasında geliştirilmiş olan analojiden yararlanılarak ısı transferine uygulanır. Analoji çok iyi tespit edilmiş ve geliştirilmiştir. Eğer oda sıcaklığında elde edilen yüzey sıcaklığı uniform ise naftalin kaplı test numunesi yüzeyde sabit buharlaşma basıncına ve konsantrasyonuna sahip olacaktır. Bu sınır şartı ısı transferindeki sabit duvar sıcaklığı sınır şartına benzetilmektedir. Aktif olmayan duvar, yani kütle transferinde geçirgen olmayan duvar adyabatik duvar sınır şartına benzerdir. Analojideki denklemler sabit özellikli akım kabulüyle elde edilmiştir. Kütle transfer deneylerinde test numunesinin sıcaklığı yaklaşık olarak oda sıcaklığına eşittir ve uniformdur. Böylece naftalin kaplı test numunesi yüzeyde sabit buhar basıncına ve konsantrasyonuna sahiptir.

Isı transferi olayındaki ısı transfer katsayısı hatırlanacak olursa:

$$h = q_w / (T_w - T_\infty) \quad (2)$$

Buna uygun olarak kütle transfer katsayısı:

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s (\delta_z / \delta_\tau)}{\rho_{v,w}} \quad (\text{yerel için}) \quad (3)$$

$$h_m = \frac{\delta_m / \delta_\tau}{\rho_{v,w}} \quad (\text{ortalama için}) \quad (4)$$

şeklinde. Burada naftalinin serbest akımdaki buhar yoğunluğu $\rho_{v,\infty} = 0$ dir. Denklem (2) ve (3) arasındaki mukayesede görülüyor ki; ısı transferindeki h , q_w ve $(T_w - T_\infty)$ kütle transferinde sırasıyla h_m , $\dot{m}$ ve $(\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty})$ 'a tekabül etmektedir. Bu uyum ısı-kütle transferi analojisinden gidilerek yapılmıştır. Naftalinin yüzeydeki doymuş buhar basıncı (buhar yoğunluğu) sabit olduğundan cidar sınır şartı ısı transfer yöntemindeki izotermal sınır şartına benzetilebilir. Naftalinin yüzeydeki buhar yoğunluğu ($\rho_{v,w}$), ideal gaz kanunundan buhar basıncı ve yüzey sıcaklığı kullanılarak tespit edilir.

$$\rho_{v,w} = P_{v,w} / RT_w \quad (5)$$

Son olarak kütle transferinin niceliğini ölçmede etkili olan Sherwood sayısı kütle transfer katsayısına ve difüzyon katsayısına bağlı olarak şöyle yazılır:

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{naf}} \quad (6)$$

Görüldüğü gibi Sherwood sayısı oranı belirsiz bir difüzyon katsayısına bağlı. Kütle transfer katsayısı olan Stanton sayısı difüzyon katsayısının belirsizliğini ortadan kaldırıyor. Stanton sayısı;

$$St_m = \frac{Sh}{Re Sc} = \frac{h_m}{U_\infty} \quad (7)$$

şeklinde verilir. Görüldüğü gibi kütle transferiyle tespit edilen Sh sayısından gidilerek ısı transfer katsayısı bulunabilmektedir. Burada ısı ve kütle transfer analojisinde Schmidt sayısı devreye girer. Schmidt sayısından bahsederken söz konusu analoji de kısaca özetlenmelidir. Bilindiği gibi:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{naf}} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

şeklinde verilen iki boyutsuz sayı birbirlerine benzerlik gösterir. Schmidt sayısı momentum difüzyonunun kütle difüzyonuna oranı iken, Prandtl sayısı momentum difüzyonunun ısı difüzyonuna oranıdır. Isı transferinde Prandtl sayısının bir fonksiyonu olarak Stanton sayısı yazıldığı gibi kütle transferi de aynı boyutsuz sayı Schmidt sayısının bir fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$St = \frac{Nu}{Re^m Pr^n} = \frac{h}{\rho C_p U_\infty} \quad (9)$$

$$St_m = \frac{Sh}{Re^m Sc^n} = \frac{h_m}{U_\infty}$$

$$Nu = c Re^m Pr^n \quad (10)$$

$$Sh = c Re^m Sc^n$$

Bu iki denklemin oranı kütle transfer sonuçlarının ısı transfer sonuçlarına dönüştürülebileceğini gösterir.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^n \quad (11)$$

Burada n üssü ampirik bağıntılarda 1/3 ila 0.4 aralığında bulunmuştur (laminar akımda düz bir plaka üzerinde akışta 1/3). Eğer $Pr = Sc$ ise bağıntı, laminar akımda olduğu gibi türbülanslı akımda da geçerlidir. Ancak akış şekilleri değiştikçe n sayısı da değişecektir.

Doğal Konveksiyon Kayıplarının Tespiti

Süblimleşme derinliği ölçümleri boyunca test numunesinin kurulması aşamasında ve depolanma anında doğal konveksiyondan kaynaklanan

süblimleşme ihmal edilemez. Örneğin bir delik boyunca doğal konveksiyon kaybı 24 °C 'deki toplam ölçümün %10'u kadardır, oysa bunun normali %5'den az olmalıdır.

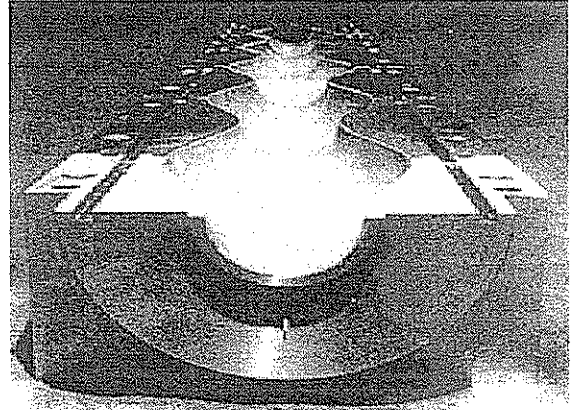
Doğal konveksiyon kayıplarını tespit etmek için tüm işlem basamaklarını içeren bir deney yapılmalıdır. Ancak ölçümden, kurmadan, birleştirmeden ve sökmeden, yeniden ölçmelerden kaynaklanan doğal konveksiyon kayıpları ölçüm tablası üzerindeki kayıplara dahildir. Doğal konveksiyon kayıpları, test numunesi ölçüm tablası üzerinden uzaklaştırılırken deneysel olarak tespit edilir. Başlangıçta görünen doğal konveksiyon oldukça yüksektir; daha sonra kararlı bir değere ulaşır. Ortalama kütle transfer oranı yaklaşık 1 saat sonra değişir. Doğal konveksiyon oranı düşük iken kısa deney süreleri için hata daha da büyür. Bundan dolayı doğal kütle transfer oranı sık sık uzun dönemli periyodik testlerle tespit edilir (ör. 10 saatlik). Naftalin süblimleşme derinliği yüzey sıcaklığına ve havayla olan sıcaklık farkına bağlı olarak değişir. Doğal konveksiyon oranı aynı zamanda test numunesinin şekline ve metal yüzeyin uzunluğuna bağlıdır. Oran her bir test numunesi için ayrı ayrı tespit edilmelidir. Naftalin plastik torbalarda depolandığında kayıp süblimleşme oranı da azalacaktır. Eğer kısa bir süre torbada kalıyorsa depolanmadan kaynaklanan süblimleşme ihmal edilebilir.

NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİNİN KULLANILIŞINA DAİR GÖRÜNTÜ ÖRNEKLERİ

Şekil 3'de sinüsoidal eğri bir boru iç yüzeyinde ısı transferi ve akış alanı araştırılmıştır (Russ ve Beer, 1997). Eksenden itibaren karşılıklı simetri olduğundan borunun yarı parçası alınmıştır. Bu parçanın üzerine döküm yöntemiyle naftalin kaplanmıştır. Bilgisayar kontrollü bir mikrometre seviyeli hareketli tabla sinüsoidal yüzeyi tarayarak derinlik ölçmüştür. Elde edilen verilerden yararlanarak yerel Sherwood sayıları tespit edilmiştir. Uygun analogiden yararlanarak Nu sayısı değişimi tespit edilebilmiştir.

Şekil 4'te üç boyutlu yüzeyin, çıkıntılı elemanların ısı transferi incelenmiştir (Chyu ve Natarajan 1996). Beş farklı elemanın (silindir, küp, elmas piramit ve yarıküre) eşit Re sayısında ısı transfer yüzey alanındaki pürüzlülük etkisi, naftalin süblimleşme tekniği kullanılarak araştırılmıştır (a-naftalin kaplı yüzeye silindirik bir geometri bırakıldığı anda ısı transferi b-naftalin kaplı yüzeye yarı küp bir geometri bırakıldığı anda ısı transferi c-prizmatik (elmas) bir geometri bırakıldığı anda ısı

transferi, d-naftalin kaplı yüzeye yarı küre şeklinde bir cisim bırakıldığı andaki naftalin süblimleşme görüntüleri).

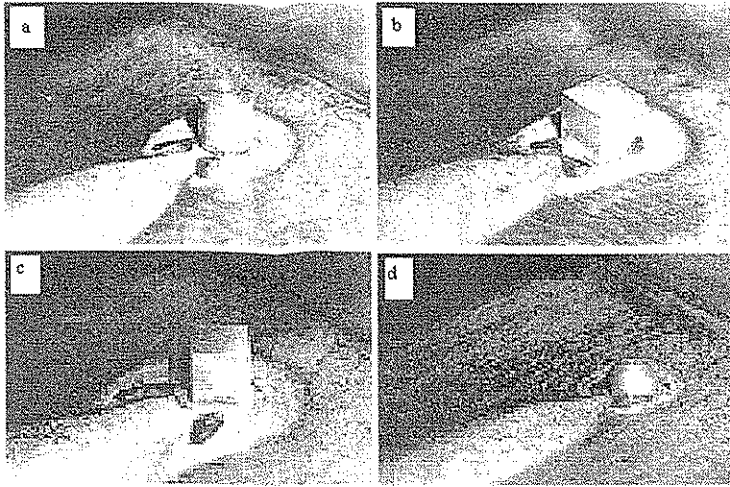


Şekil 3. Sinüsoidal eğri bir boru iç yüzeyinin naftalinle kaplanması.

SONUÇLAR

Bu çalışmada kütle transferine dayalı naftalin süblimleşme tekniğinin kullanılış özellikleri üzerine derleme bir rapor sunulmuştur. Esasında bu çalışma ısı transferi uygulamaları konusunda bir fizibilite raporu olma özelliğindedir. Çeşitli literatürlerin incelenmesi sonucu bu tekniğin avantajları yanı sıra birtakım sınırlamaları ve sakıncaları da olduğu tespit edilmiştir. Ortalama katsayıları bulmada sadece tartma metodu gibi basit bir uygulama yeterli olmasına karşılık, yerel ölçümler yaparken kullanılan harekete yön verme ve data okuma aparatları sistemi karmaşık ve pahalı hale getirmektedir. Bu sistemin avantajları ve dezavantajları kısaca şöyle özetlenebilir:

- Bir kütle transfer deney parçası kolaylıkla imal edilebilir ve taşınabilir.
- Karmaşık bir ısıtma veya ölçme sistemine ihtiyaç yoktur.
- İstenilen sınır şartlarında tam temsil etme ile kompleks hareketli parçalar içeren bir geometride bile ölçüm yapmak mümkündür.
- Isı transferi deneylerinde genellikle iletim ve radyasyon kayıpları mevcuttur. Netice olarak izotermal ve adyabatik sınır şartları yaklaşıktır. Ancak naftalin süblimleşme tekniğiyle hatasız ya da çok az hatayla bu sınır şartı problemi giderilebilir.
- Kullanımının sınırlı olduğu alanlar mevcuttur. Yani her sisteme kolaylıkla uygulanmaz.
- Yerel ölçümler zaman alıcı ve masraflıdır.



Şekil 4. Naftalin kaplı yüzeye farklı geometride çıkıntılar bırakılması esnasında ısı transferinin incelenmesi

KAYNAKLAR

Ambrose, D. Lawrenson, I.J., and Sparke, C.H.S., The Vapor Pressure of Naphthalene, *J. of Chem. Thermodynamics*, 7, 1173-1176, 1975.

Chen, Y.M., Lee, W.T., and Wu, S.J., Heat (Mass) Transfer between an Impinging Jet and a Rotating Disk, *Heat and Mass Transfer*, 34, 2-3, 195-201, 1998.

Cho, H.H., Jabbari, M.Y., and Goldstein R.J., Experimental Mass (heat) Transfer in and near a Circular Hole in a Flat Plate, *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, 40, 10, 2431-2443, 1997.

Cho, K., Irvine, T.F., and Karni, J., Measurement of the Diffusion Coefficient of Naphthalene into Air, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35, 4, 957-966, 1992.

Chyu, M.K., and Natarajan, V., Heat Transfer on the Base Surface of Three- Dimensional Protruding Elements, *Int.J. Heat Mass Transfer*, 39, 14, 2925-2935, 1996.

Ganzavles, F.L.A., van der Geld, C.W.M., Heat and Mass Transfer from Internal Flows to Hemispheres and Flat Parts in Between, *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, 41, 3705-3718, 1998.

Goldstein R.J., and Cho H.H., A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10, 416-434, 1995.

Goldstein R.J., Chyu, M.K., and Hain R.C., Measurement of Local Mass Transfer on A Surface in the Region of the Base of A Protruding Cylinder with A Computer-Controlled Data Acquisition System, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28, 5, 977-985, 1985.

Kudchaker, A.P., Kudchadker, S.A., and Wilhoit, R.C., Naphthalene, *API Monograph Ser. 707, American Petroleum Institute*, Washington, D.C., 1978.

Li, Q.L., Chen, Z., Flechtner, U., and Warnecke, H.J., Local and Overall Heat Transfer Around a Pin Finned Tube in Cross Flow, *Chemische Technik*, 49, 6, 288-290, 1997.

Popiel, C.O., and Baguslowski, L., Effect of Flow Structure on the Heat or Mass Transfer on a Flat Plate in Impinging Round Jet, *C.201/88*, 663-685, 1988.

Russ, G., and Beer, H., Heat Transfer and Flow Field in a Pipe with Sinusoidal Wavy Surface-II. Experimental Investigation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 5, 1071-1081, 1997.

Schmidt, R.R. Use of Naphthalene Sublimation Technique for Obtaining Accurate Heat Transfer Coefficients in Electronic Cooling Applications, *The Report of IBM Corporation, Itherm*, Washington, D.C., May, 41-49, 1994.

Sporrow, E.M., and Lovell, B.J., Heat Transfer Characteristics of an Obliquely Impinging Jet, *J. of Heat Transfer, Transactions of ASME*, 102, 202-209, 1980.

Sporrow, E.M., and Wong, T.C., Impingement Transfer due to Initially Laminar Slot Jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 597-605, 1975.

Ward, J., and Mahmood, M., Heat Transfer from a Turbulent Swirling Impinging Jet, *Proc. of the Seventh Int. Heat Transfer Conference*, vol.3, Hemisphere Washington DC, 1982.



Nevin ÇELİK

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 1997 yılında mezun oldu. 1998 yılında aynı bölümde yüksek lisans çalışmasına başladı. 1999 yılında Enerji Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak alındı. 2000 yılında yüksek lisans derecesi aldı ve doktora eğitimine başladı. Halen aynı bölümde doktora çalışmalarını yürütmektedir. Yazar İngilizce ve Almanca bilmektedir.