

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇARPAN JETLERDE ISI-KÜTLE
TRANSFERİ ANALİZİ**

Abdullah BİNGÖL

Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN

ELAZIĞ-2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇARPAN JETLERDE ISI-KÜTLE TRANSFERİ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah BİNGÖL

151120106

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:

Tezin Savunulduğu Tarih:

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ömer Faruk CAN

Doç. Dr. Nevin ÇELİK

ELAZIĞ-2019

ÖNSÖZ

Danışman hocam Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN'e bu tez çalışması süresince olabilecek en uygun ortamı sağladığı ve gerektiğinde hiçbir yardımı esirgemediği için teşekkürü bir borç bilirim.

Kıymetli hocam Doç. Dr. Nevin ÇELİK'e tezimin deneysel çalışmaları ve yazım sürecinde, değerli fikirlerini paylaştıkları için ve her ihtiyaç duyduğumda yardımlarını fazlasıyla sundukları için teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2019

Abdullah BİNGÖL
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
ABSTRACT.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİ TANITIMI VE UYGULANIŞI... 2	
2.1. Literatür Araştırması	2
2.2. Naftalin Nasıl bir Maddedir?	11
2.3. Süblimleşme Nedir?	12
2.4. Naftalinin Özellikleri	16
2.5. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Avantajları	20
2.6. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Uygulanışı.....	21
2.7. Ölçümler.....	22
2.7.1. Tartma	23
2.7.2. Yerel Ölçüm Yöntemi	23
2.7.3. Doğal Taşınımın Tespiti.....	27
2.7.4. Başka Yöntemler Kullanılarak Yerel Ölçüm Yapma	28
2.8. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Sınırları	28
2.9. Kütle Transferi ve Isı-Kütle Transferi Benzerliği (Analojisi)	30

3.	DENEYSEL ÇALIŞMA	32
3.1.	Deney Düzenegi	32
3.2.	Analoji Denklemlerinin Bulunması	36
4.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	42
4.1.	Sherwood ve Nusselt Sayıları Hesaplanması.....	42
4.2.	Belirsizlik Analizi	46
4.3.	Grafiksel Sunumlarla Sh ve Nu Değişimi	47
5.	SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR		55
ÖZGEÇMİŞ		59

ÖZET

Çarpan Jetlerde Isı-Kütle Transferi Analizi

Isı transfer katsayısının tespitinin zor olduğu durumlarda, bilhassa cıdar-iletim hatalarının önüne geçmek amacıyla, ölçüm için yüksek teknolojilerin kullanılması gerekebilmektedir. Bu durum ölçüm maliyetlerini çok yükseğe çıkarmaktadır. Fakat özellikle son yıllarda ısı transfer katsayısı tespiti için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında da, endüstriyel pek çok alanda kullanılan ve yüksek ısı ve kütle transferi kabiliyetine sahip olan çarpan jetlerde, son yıllarda geliştirilen yöntemlerden biri olan ve kütle transfer tekniğini esas alan naftalin süblimleşme tekniği kullanılmıştır.

Naftalin kendisine ait özel kokusu olan, parlak kristal yapılı beyaz renkli bir bileşiktir. Organik yapıdadır ve organik kimyanın aromatik bileşikler sınıfına girer. Süblimleşme özelliği olan naftalinin sıvı formu bulunmamaktadır ve naftalin süblimleşme tekniği doğru ölçümler elde etmemizi sağlar. Fakat yöntemin doğru sonuçlar vermesi için katı naftalinin yoğunluğu, doymuş buhar yoğunluğu/basıncı ve havadaki kütle difüzyon katsayısı/Schmidt sayısının doğru tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması için oluşturulan deney düzeneği, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında kurulmuş olup, bir sehpa üzerine yerleştirilmiş hassas bir terazinin üzerinde yer alan naftalin tabletleri ve ona çarptırılan ısıtılmış hava jetinden oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalar neticesinde, kütle kaybı ölçümü için deneyden önce ve sonra tartımı yapılan numunelere ait kütle farkları ve bu esnada geçen süre göz önüne alınarak hesaplanılan süblimleşme miktarlarının ardından görülmüştür ki, jet çıkış sıcaklığının değişimi arttıkça kütle transferi de ısı transferi de aynı oranda artmıştır. Reynolds sayısının artımı ise hem kütle transferini hem de ısı transferini arttırıcı yönde etki etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı-kütle transferi, naftalin, Schmidt sayısı

ABSTRACT

Heat-Mass Transfer Analysis in Multiplier Jets

In cases where the heat transfer coefficient is difficult to detect, it may be necessary to use high technologies for measurement, especially to avoid wall-conduction errors. This increases the measurement costs very high. However, in recent years, different methods have been applied for heat transfer coefficient determination. In this thesis, the use of naphthalene sublimation technique which is one of the methods developed in recent years and which is based on mass transfer technique has been used in multiplier jets which are used in many industrial fields and have high heat and mass transfer capability.

Naphthalene is a white compound with a bright crystal structure with a special smell. It is organic and belongs to the class of aromatic compounds of organic chemistry. There is no liquid form of naphthalene with sublimation, and the technique of naphthalene sublimation allows us to obtain accurate measurements. However, in order for the method to give accurate results, the density of the solid naphthalene, the saturated vapor density / pressure and the mass diffusion coefficient in the air/ Schmidt number must be determined accurately.

The experimental set-up for this thesis consists of naphthalene tablets placed on a tripod and a heated air jet which is impinging to naphthalene at the Firat University Engineering Faculty Mechanical Engineering Department Fluid Mechanics Laboratory.

As a result of the studies carried out, the mass differences of the samples weighed before and after the test for the mass loss measurement and the sublimation quantities calculated by taking into consideration the time passed, the increase in the jet outlet temperature increased the mass transfer and heat transfer increased at the same rate. The increase of Reynolds number has a positive effect on both mass transfer and heat transfer.

Key Words: Heat-mass transfer, naphthalene, Schmidt number

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Toz ve tablet naftalin numuneleri	13
Şekil 2.2. Süblimleşme halindeki naftalin	13
Şekil 2.3. Naftalinin süblimleşme anındaki hal değişimi	14
Şekil 2.4. Basınç-sıcaklık diyagramında süblimleşmenin yeri	15
Şekil 2.5. Dört eksenli derinlik ölçme sistemi	24
Şekil 2.6. İki eksenli derinlik ölçme sistemi	25
Şekil 2.7. 4-eksenli bir LVDT sisteminde otomatik veri okuma sistemi bağlantı şeması	25
Şekil 2.8. Düz yüzeyde dış akışta A bileşeni için derişim sınır tabakası gelişimi .	31
Şekil 3.1. Deney Düzenegi	32
Şekil 3.2. a) Naftalin kalıp b) Hassas terazi.....	33
Şekil 3.3. a) Sıcak hava jeti ekipmanları b) pürüzsüz krom boru c) konum ayarlı sehpa	34
Şekil 3.4. Jet akımı elde edilen lüle	35
Şekil 3.5. Sıcak tel anemometre ve probu	35
Şekil 4.1. $H/D = 2$ için farklı jet sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları	49
Şekil 4.2. $H/D = 4$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları	50
Şekil 4.3. $H/D = 6$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları	51
Şekil 4.4. $H/D = 8$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları	52
Şekil 4.5. $Re = 15000$ ve $T_{jet} = 30$ °C için Nu ve Sh sayılarının H/D ile değişimi .	53
Şekil 4.6. $Re = 45000$ ve $T_{jet} = 80$ °C için Nu ve Sh sayılarının H/D ile değişimi .	53

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Naftalin dışında kalan diğer süblimleşen madde özellikleri.....	16
Tablo 2.2. Naftalinin özellikleri.....	17
Tablo 2.3. Naftalinin havadaki doymuş buhar basıncı (Goldstein ve Cho, 1995)..	18
Tablo 2.4. Havadaki naftalin buharının özellikleri (Ambrose vd., 1975).....	19
Tablo 2.5. Naftalinin hava içerisindeki difüzyon katsayısı ve Schmidt sayısı	19
Tablo 4.1. Reynolds sayısı hesaplanması	43
Tablo 4.2. Kütle transfer katsayısı, difüzyon katsayısı ve Sherwood sayılarının hesaplanması.....	45
Tablo 4.3. Schmidt sayısı, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı	46

SEMBOLLER LİSTESİ

A	naftalinli çarpma yüzeyi alanı (m^2)
c	ampirik bağıntı katsayısı
D	jet giriş çapı (m)
d	jet çıkış çapı (m)
De	Dean Sayısı
D_{naf}	difüzyon katsayısı (m^2/s)
h_m	ortalama ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
K_x	yerel kütle transfer katsayısı (m^2/s)
K_m	ortalama kütle transfer katsayısı (m^2/s)
k_{hava}	havanın ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)
L	karakteristik uzunluk (m)
Le	Lewis sayısı
m	ampirik bağıntı için üs katsayısı
$\dot{m}$	kütleli debi (kg/s)
n	ampirik bağıntı üs sayısı
Nu	Nusselt Sayısı
P	basınç (Pa)
P_{atm}	atmosfer basıncı (Pa)
Pr	Prandtl sayısı
Pr_t	türbülanslı Prandtl sayısı (Pa)
$P_{v,w}$	yüzeydeki naftalin buharı basıncı (Pa)
$\dot{Q}$	hacimsel debi (m^3/s)
q_w	cidarda sabit ısı akısı (W/m^2)
R	naftalin buharının gaz sabiti ($J/kg K$)
Re	Reynolds sayısı
Sc	Schmidt sayısı
Sc_t	türbülanslı Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	sıcaklık (K)
T_w	sabit duvar sıcaklığı (K)

T_{∞}	ortam sıcaklığı (K)
U_j	ortalama jet akış hızı (m/s)
x	boyutsuz karakteristik uzunluk

Latince semboller

α_t	türbülanslı ısı difüzyon katsayısı (m ² /s)
α	ısı difüzyon katsayısı (m ² /s)
δm	kütle değişimi (kg)
$\delta \tau$	zaman değişimi (s)
ν_{hava}	havanın kinematik viskozitesi (m ² /s)
θ	boyutsuz sıcaklık farkı
$\rho_{v,\infty}$	havadaki naftalin gazı yoğunluğu (kg/m ³)
$\rho_{v,w}$	yüzeydeki naftalin gazı yoğunluğu (kg/m ³)
τ	boyutsuz zaman

1. GİRİŞ

Isı transfer katsayısı bazen karmaşık cihazlar ve zor ölçümler içeren deneylerle tespit edilir. Isı transferi deneylerinde küçük bir bölge üzerinde sıcaklık hızla değişiyorsa ısı taşınım katsayısını tespit etmek genellikle çok zordur. Bu tür ölçümler yüksek oranda cidar-iletim hataları içerebilirler. Böyle karışık geometri veya akışlarda hassas sıcaklık ölçümü yapmak üstün teknoloji gerektirir. Hem paradan hem zamandan tasarruf amacıyla son yıllarda yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri kütle transfer tekniğine dayanan naftalin süblimleşme tekniğidir.

Kütle transfer ölçümlerinin sıkça ve başarıyla uygulandığı çarpan jet tekniği, yüksek ve kontrollü yerel ısı/kütle transfer katsayısı sağlaması açısından oldukça kullanışlı olup ısıtma, soğutma ve kurutma gibi birçok işlem çarpan jetler vasıtasıyla etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu tekniğin uygulamaları yüksek sıcaklık gaz türbini soğutma sistemi, elektronik bileşenlerin soğutulması, ahşabın, tekstilin, kâğıdın kurutulması, film endüstrisi, cam işleme uygulamaları ve endüstriyel gıda işleme alanlarında görülmektedir.

En iyi bilinen kütle transfer yöntemi şüphesiz iyi geliştirilmiş naftalin süblimleşme tekniğidir. Bu teknikte kütle transferi ile ısı transferi arasındaki benzerlikten (analojiden) faydalanarak ısı transfer katsayısı tespit edilir. Bu yöntemle en girift geometrilerde bile ölçüm yapılabilir. Örneğin bir borunun iç yüzeyinde, bir deliğin kenarında, bir yüzeyin uç köşelerinde veya girinti ve çıkıntılarında rahatlıkla ölçüm yapılabilir.

Naftalinin süblimleşmesinden kaynaklı kütle transferinden yola çıkarak ısı transferini bulmayı amaçlayan bu tez 5 bölümden oluşmaktadır. Girizgâhın yapıldığı birinci bölümü takip eden ikinci bölümde literatür araştırması, naftalin süblimleşme tekniğinin genel tanıtımı ve uygulamaları ayrıca ısı-kütle transfer benzeşimi (analojisi) anlatılmıştır. Üçüncü bölümde deneysel çalışma ve hesaplama yöntemi tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar sunulmuştur. Son olarak beşinci bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. NAFTALİN SÜBLİMLEŞME TEKNİĞİ TANITIMI VE UYGULANIŞI

2.1. Literatür Araştırması

Çarpan hava jetleri yüksek ısı ve kütle transferi kabiliyetine sahiptirler. Bundan dolayı, kâğıt, kumaş ve mürekkep kurutulması, cam temperlenmesi, metallerin sertleştirilmesi, elektronik cihazların soğutulması, türbin kanatçıklarının soğutulması gibi ve birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Ancak sürekli gelişen teknoloji ve artan talepler, zaten yüksek olan ısı ve kütle transferini daha da yükseğe çıkartma arzusu doğurmaktadır. Bununla birlikte enerjinin gün geçtikçe değerlendirilmesi, bu artırıma mümkün olan minimum maliyetle yapmayı gerektirmektedir. Bundan dolayı, bu konuyla ilgili birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmış ve yapılmaktadır.

Çarpan jet sistemlerindeki yüzeysel ortalama ısı/kütle transferi özellikle soğutma, ısıtma ve kurutma işlemlerinde oldukça önemlidir. Bu nedenle, yüzeysel ortalama kütle transfer katsayısına ilişkin deneysel veri elde edilmesi ve jet kullanılan ve kullanılmayan yüzeyler üzerindeki kütle transfer ilişkisinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu tezde çarpan jetlerde ısı transfer katsayısının tespiti kütle transfer yöntemine dayalı naftalin süblimleşme tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla son derece geniş bir konu olan çarpan jetlerin literatür taraması kütle transfer tekniklerini özellikle de naftalin süblimleşme tekniğini kullanan çalışmalarla sınırlandırılmıştır.

Literatür araştırmasına ülkemizde yapılan akademik çalışmalar incelenerek başlanmıştır. Solak (2017) tarafından yakın zamanda gerçekleştirilmiş doktora tezinde bir jet hücresi içinde daldırılmış çarpan jetin farklı açılarda konumlandırılan bir yüzeye çarptırılması durumunda gerçekleşen kütle transferi incelemiştir. Deneyler, Reynolds sayısının (Re) 5,000 ile 40,000 değerleri arasında, lüle-çarpma yüzeyi mesafesinin (H/D) 2-6 değerlerinde, çarpma yüzeyi açısının (θ) 60° ile 90° aralığında ve Schmidt sayısının (Sc) 1692 değerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çarpma yüzeyi üzerindeki yerel kütle transferi katsayıları elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Hedef yüzeyin düzleminin lüle eksenine ile yaptığı açı 90° olan ilk durumda,

çarpma yüzeyi üzerindeki gerçekleştirilen kütle transfer ölçümlerinin jet durgunluk noktası civarında bir maksimum değere ulaştığı tespit edilmiştir. Yerel kütle transfer katsayıları, radyal mesafedeki artışla azalmıştır. Reynolds sayısındaki artışın yerel kütle transferi değerlerini artırdığı gözlenmiştir. Lüle-yüzey mesafesi 2'den 6'ya artırıldığında, tüm yüzey üzerinde kütle transfer katsayıları azalmıştır. Çarpma yüzeyi düzleminin lüle eksenini ile dik açıdan farklı olan 60°, 70° ve 80°'lik açılarda konumlandırıldığı durumlarda, çarpma yüzeyi üzerinde kütle transferi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlere göre; açıdaki azalmayla birlikte maksimum kütle transferinin yeri, dik durumda radyal mesafenin sıfıra eşit olduğu geometrik durma noktasından radyal yönde uzaklaşmıştır. Açılı durumlarda yapılan deneyler, çarpma açısının azalması ile birlikte kütle transfer katsayılarının azaldığını göstermiştir. Maksimum yerel kütle transfer katsayılarının yeri, jet durgunluk noktasından itibaren duvar jet akışının hızının azalmadığı yönde değişmiştir.

Şara vd., (2008) yaptıkları çalışmada döner bir yüzey üzerine bir sıvı jetin çarptırılması durumunda meydana gelen kütle transferini anlatmaktadır. Kütle transfer katsayıları elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Parametre olarak, 340,000-120,0000 değerleri arasındaki dönel Reynolds sayıları, 170,000-530,000 değerleri arasındaki jet Reynolds sayıları ve 2-8 değerleri arasındaki arası boyutsuz jet-çarpma yüzeyi mesafesi (H/D) kullanılmıştır. Jet kullanılmayan dönen diske kıyasla çarpan jetlerin kütle transferinde büyük bir iyileştirmeye neden olduğu ileri sürülmüştür.

İşman (2011) hazırladığı tez çalışmasında tekli ve çoklu çarpan hava jetlerde zorlanmış taşınım ile ısı ve kütle transferini incelemiştir. Bu çalışmanın ısı transferi ayağında, hava hızı, hava nemi ve jet-yüzey arası mesafe gibi parametrelerin yanında türbülansı arttırıcı unsurların ısı transferi üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca ikili jet durumu için elde edilen değerler, tek jet durumlarıyla kıyaslanmıştır. Tek ve çift jet için deneysel olarak çalışılan hemen hemen tüm durumların eş zamanlı olarak HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) analizleri yapılmıştır. Bunun yanında oluşturulan sayısal modelde, mevcut deney tesisatında araştırılması mümkün olmayan durumlar da incelenmiştir. Aynı deney tesisatında iki farklı tipteki ıslak kumaşın çarpan hava jeti ile kurutulması durumları incelenmiştir. ANSYS-CFX programında dışarıdan değişkenler tanımlanarak kütle transferi için de çözümler elde edilmiştir. İşman'ın çalışmalarında, ısı transferi için en etkin parametrenin jet çıkış hızı yani Reynolds değeri olduğu görülmüştür.

Tek jet durumu, çalışılan durumların tümünde çift jete göre daha etkin bir ısı transferi performansı sergilemiştir. Sayısal olarak yapılan çalışmalarda artan giriş türbülans şiddetinin sadece çarpma noktasında yerel Nusselt değerini arttırdığı, çarpma noktasından uzaklařtıķa etkisini yitirdiği sonucu elde edilmiştir. Kütle transferi için yapılan deneylerden, artan Reynolds sayısının kuruma süresini kısalttığı, ancak paralelinde fan gücünü de arttırdığından optimum Reynolds değerinin 20,000 ila 30,000 arasında olması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca, artan jet çıkış sıcaklığının kuruma süresini kısalttığı ve bu artışın kurutma işlemini daha ekonomik hale getirdiği elde edilen sayısal sonuçlardandır.

Erkmen (2004) tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasında bir jetin çarptığı dönen bir diskten kütle transferi ferrisiyanür iyonlarının katodik indirgenmesine dayanan sınırlayıcı akım tekniği yardımıyla incelenmiştir. Karşılaştırma amacı ile sabit bir diske çarpan jetli ve jetsiz dönen disk ayrıca incelemiştir. Disk dönme hızına bağlı Reynolds sayısı, jet çıkışındaki Reynolds sayısı, jet-disk arasındaki mesafe deneysel çalışmada değişken parametreler olarak seçilmiştir. Deneysel sonuçlardan, disk yüzeyinden kütle transferinin dönme hızı Reynolds sayısının ve jet Reynolds sayısının artması ile arttığı, $H/D = 6$ değerine kadar H/D ile arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür. Ayrıca incelenen dönme hızları aralığında yüzeyden kütle transferi üzerine jetin baskın olduğu görülmüştür.

Arzutuğ' un (2003) yüksek lisans tez çalışması bir hücre içinde çarpan dönen jet ve yüzey arasında kütle transferi hakkında bir çalışmayı kapsamaktadır. Deneylerde bir boru jet, bir dört kanallı jet ve dört kanallı dönen jetler kullanılmıştır. Boru eksenini ile $19-62^\circ$ açı yapan dört adet dönen oluşturucusu tasarlanmış ve yapılmıştır. Yerel kütle transfer katsayılarının radyal dağılımı araştırılmış ve jet-çarpma yüzeyi mesafesi, jet Reynolds sayısı ve dönme şiddetinin radyal dağılım üzerine etkileri belirlenmiştir. Deneyler Reynolds sayısının 6,570 - 50,800 değerleri arasında ve boyutsuz jet-yüzey mesafesinin (H/D) 2-10 değerleri arasında Schmidt sayısının sabit 1,692 değerinde gerçekleştirilmiştir. İlk kütle transfer ölçümleri dairesel bir boru jet ile gerçekleştirilmiş ve durma noktası civarında kütle transfer katsayılarının bir maksimum verdiği tespit edilmiştir.

Detaylı bir kütle transferi çalışması da Arzutuğ ve Yapıcı (2009) tarafından yapılmıştır. Çalışmada jet içerisine bir düz, üç adet de helisel yönlendirici yerleştirilmiştir.

Helisel yönlendiriciler helis açıları 19.8, 30.4 ve 45° olacak şekilde imal edilmişlerdir. Yönlendiricilerle akış, jet içerisinde dört kanal içinde akacak şekilde ayrılmıştır. Çalışmada Reynolds sayısı 10950- 43800 aralığında, boyutsuz jet-çarpma yüzeyi mesafesi (H/D) ise 2-10 aralığında değiştirilmiştir. Yerel kütle transferi katsayıları elektrokimyasal limit difüzyon akım tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma noktasındaki pik Sherwood değerlerinin tüm helis açıları için arttığı ve helisel saptırıcılı durumlarda H/D değeri arttıkça pik noktanın oluşum yerinin jet çarpma noktasından uzaklaştığı tespit edilmiştir. 45°'lik helis açısı durumunda Reynolds sayısı değerinin kütle transferini neredeyse etkilemediği gözlemlenmiştir. Helis açısının artması kütle transferini düşürmüş, ancak üniformluğunu arttırmıştır. Ortalama kütle transferi miktarı açısından düz yönlendirici diğerlerinden daha üstün bir performans sergilemiştir. H/D değeri 8 değerine kadar kütle transferini etkilemiş, bu değerden sonra etkisini kaybetmiştir.

Yapıcı vd. (1999), elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım tekniği kullanarak, düz bir yüzey üzerinde daldırılmış çarpan dairesel jet ile yüzey yerel kesme gerilimi değerlerini ölçmüşlerdir. Kesme geriliminin radyal yöndeki dağılımı göz önüne alındığında en yüksek pik $H/D = 4$ için elde edilmiştir.

Arşivlenmiş uluslararası dergilerdeki makaleler incelendiğinde bu konuda çok değerli çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Feroz ve Prasad (2006), makalelerinde çoklu jetlerden oluşan düzeneğin çarpma bölgesindeki kütle transferi katsayısına ilişkin deneysel sonuçlar sunmaktadır. Lüle demetinin boyutu, yüzey alanından olan mesafesi ve lüle çap genişliğinin kütle transfer katsayısı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Kütle transferi lüle genişliği ile birlikte artmakta; lülenin yüksekliği, yüzey alanı ve elektrot boyutunun artması ile azalmaktadır. Ayrıca, kütle transfer katsayısı ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki de incelenmiştir.

Chen et al. (2001) tarafından yapılan araştırmada laminar çarpan yarık-jet akışlarındaki yüksek Schmidt sayılı kütle transferi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu maksatla yarık tabanlı Reynolds sayısı 220-690 arası olacak şekilde kullanılmıştır. 100 mikrometre elektrotlar üzerinde elektrokimyasal yöntemlerle yapılan kütle transfer ölçümleri hesaplanan kayma gerilmesi değeri ile analitik bir ilişki kurularak karşılaştırılmıştır. Chen ve ark. (1998) tek bir çarpan hava jetiyle oluşacak olan kütle

transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada dairesel kesitli bir jetten çıkan hava yine dairesel düz bir yüzeye çarptırılmıştır. Dairesel yüzey 5 mm kalınlığında naftalin ile kaplanmış ve bir motorla tahrik edilerek çeşitli devir sayılarında kendi eksenini etrafında dönebilecek hale getirilmiştir. Naftalinin süblimleşebilme özelliği sayesinde, her bir noktada, o noktadaki yerel kütle taşınım katsayısına bağlı olarak değişik kalınlıklar elde edilmiştir. Naftalin kalınlığı yüzeyi bilgisayar kontrolü ile komple tarayabilen hassas bir kalınlık ölçer ile ölçülmüştür. Bu kalınlıklardan kütle transfer katsayısına literatürde tavsiye edilen bağıntılar kullanılarak geçilmiştir. Çalışmada öncelikle sadece diskin dönüş etkisini incelemek için jetten hava üflenmeksizin sadece disk kendi eksenini etrafında farklı hızlarla döndürülmüştür. Belirli bir devre kadar devir sayısı ile orantılı olarak artan Sherwood sayısı belirli bir devirden sonra lineerliğini bozarak tırmanışa geçmiştir. Yani klasik taşınım problemlerindeki laminar, geçiş ve türbülanslı bölgeler benzer şekilde elde edilmiştir. Daha sonra Reynolds sayısı değeri 2000 ile 100000 arasında değişecek şekilde farklı hızlarda hava üflenerek deneyler tekrarlanmıştır. Sadece dönüşten olan kütle transferi için tanımlanan Sherwood sayısı ile sadece jetin etkisiyle oluşan kütle transferi için tanımlanan Sherwood sayısının toplamı, toplam Sherwood sayısı olarak ele alınmıştır. Jetten hava üflendiği durumlarda, toplam Sherwood sayısının laminar bölgede dönüş hızından bağımsız olduğu ancak geçiş ve türbülanslı bölgede artan devir sayısı ile arttığı tespit edilmiştir.

Pekdemir ve Davies (1998) eksenini etrafında dönen bir silindirin yüzeyinin dikdörtgen kesitli bir jet ile kurutulmasını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada Pekdemir tarafından geliştirilen foto-evaporatif teknik kullanılmıştır. Bu tekniğe göre yüzey kromatografik kâğıtla kaplanmış ve ıslaklığa göre oluşan renk değişimini kızılötesi (infrared) ışık altında gözlenmiştir. Çalışmada silindirin dönüş hızı ve havanın jetten çıkış hızına göre iki farklı Reynolds sayısı tanımlanmıştır (Re_w ve Re_j). $Re_w = 0 - 80000$ aralığında, $Re_j = 46000 - 270000$ aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca silindir çapının, jet hidrolik çapına oranı (d/D_h), silindir-jet arası boyutsuz mesafe (L/D_h), çarpma noktasının silindir eksenine olan boyutsuz uzaklığı (E/D_h) ve jetin çarpma açısı (ϕ) gibi parametreler de çalışmada değiştirilmiş ve kütle transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda silindir dönüş hızının, $Re_w/Re_j \leq 0.15$ için kütle transferini azalttığı, 0.15 ila 0.55 aralığında etkilemediği, 0.55 den büyük değerler için ise arttırdığı görülmüştür. Optimum L/D_h mesafesinin Re_j değeri arttıkça 4 den 8'e doğru kaydığı sonucu elde edilmiştir. E/D_h

ın -0.555 olması durumunda maksimum kütle transferi sağlanmıştır. Buradaki eksilik silindir üzerindeki çizgisel hız vektörünün yönünün tersi yönü simgelemektedir. ϕ kütle transferini 60 ila 90 derece aralığında çok fazla etkilemezken 60° 'den küçük açılarda açının azalmasıyla azaltmıştır.

Rhee vd. (2003) çoklu jetlerde ısı ve kütle transferi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla oluşturulan deney tesisatında aralarında $6D$ kadar boşluk olan 25 adet jet, 5×5 kare şeklinde dizilmiştir. Çalışmada iki farklı yüzey oluşturulmuştur. Bunlardan birincisinde yüzeyin üç yanı tamamen kapatılıp, bir kenarı hava çıkışı için açık bırakılmıştır. Diğer yüzeyde ise dört bir yan da hava çıkışına kapatılmış, hava çıkışları için jetlerin aralarına hava tahliye delikleri açılmıştır. Her iki yüzey de tamamen naftalinle kaplanmıştır. Çalışma esnasında Reynolds değeri 10,000 'de sabit tutulup, boyutsuz jet-yüzey uzaklığı (z/D_h) değeri 0.5 ila 10 arasında değiştirilmiştir. Çalışma sonunda düşük z/D_h değerleri için ($z/D_h \leq 2$) hava tahliye deliklerinin olmadığı durumlarda ısı ve kütle transferi üzerine karşıt akım etkilerinin baskın olduğu, yine bu mesafelerde çarpma noktalarındaki yerel ısı ve kütle transfer katsayılarında artışın meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca büyük z/D_h değerleri için ($z/D_h \geq 4$) karşıt akım etkilerinin azaldığı ve en yüksek ortalama ısı ve kütle transferi katsayılarının $z/D_h = 2$ mesafesinde kaydedildiği elde edilen sonuçlar arasındadır. Hava tahliye delikleri ise hem dağılımların daha homojen olmalarına hem de düşük z/D_h değerlerinde ortalama ısı ve kütle transfer katsayılarında artışa sebep olmuşlardır.

Travnicek ve Tesar (2003) ise sentetik bir halka jetteki (annular jet) kütle transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için bir plaka üzerine iç çapı 38 mm dış çapı 40 mm olacak şekilde bir yarık açılmış ve plaka gerisine bir hoparlör yerleştirilerek sentetik jet oluşturulmuştur. Hoparlöre elektrik verildiğinde oluşan titreşimle yarıktan hava çıkışı sağlanmış, çıkan hava yüzeye çarptırılmıştır. Yüzey, kütle transferinin hesaplanabilmesi için diğer çalışmalarda olduğu gibi naftalinle kaplanmıştır. Çalışmada hoparlöre iki farklı elektrik gücü farklı frekanslarda verilmiştir. Ayrıca çalışmada akışa duman verilerek akışın görünürlüğü de sağlanmıştır. Çalışmada çarpma yüzeyinin olmadığı, serbest jet durumu da incelenmiştir. Çarpma yüzeyinin olduğu durumda ise 20 mm ve 40 mm olacak şekilde iki farklı jet-yüzey uzaklığı araştırılmıştır. Çalışmada her iki mesafe için de hoparlöre verilen yüksek elektrik gücü için kütle transferi miktarının düşük güce ait değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine her iki mesafede de artan

frekansla birlikte kütle transferi miktarının arttığı, ancak belirli bir eşik frekansından sonra kütle transferi miktarında bir azalma meydana geldiği kaydedilen sonuçlardandır.

Hong vd. (2009) kanal içinde çarpan hava jetiyle oluşturulacak ısı ve kütle transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için dikdörtgen kesitli bir kanal oluşturup, kanal için iki farklı durum oluşturmuşlardır. Bunlardan ilkinde kanal üst kenarına 3 adet üfleme deliği açılmış, kanalın bir ucu kapatılmış ve jetlerden kanala giren havanın sadece bir uçtan çıkması sağlanmıştır. İkincisinde ise, kanalın her iki ucu tamamen kapatılmış ve üfleme deliklerinin olduğu kenarın tam karşısındaki çarpma yüzeyi üzerine, üfleme deliklerinin izdüşümlerinin ortalarına gelecek şekilde, çıkış delikleri açılıp, hava bu deliklerden tahliye edilmiştir. Bu bahsedilen tasarım boyutsuz jet-çarpma yüzeyi mesafesi (H/D) 2 ve 6 olacak şekilde ayrı ayrı imal edilmiştir. Üretilen tüm kanallar kendi ekseni etrafında dönen 1m çapında dairesel bir masa üzerine yerleştirilip döndürülerek durgun durumdaki ısı ve kütle transferinin yanında dönme durumunda Coriolis kuvvetlerinin ısı ve kütle transferine olan etkileri de araştırılmıştır. Kanallar dönen masaya hem dik hem de yatay olarak yerleştirilmiştir. Kanalların çarpma kenarı kütle transferi miktarlarının tayin edilebilmesi için naftalinle kaplanmıştır. Çalışma boyunca Reynolds değeri 5,000 'de sabit tutulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar kısaca şu şekildedir; $H/D = 6$ 'da, her iki çıkış konfigürasyonu için de, kanalın dönen masaya yatay yerleştirilmesi durumunda elde edilen ortalama Sherwood sayısı, durgun ve dönen masaya dik yerleştirilme durumlarına göre kayda değer miktarda azalmıştır. $H/D = 2$ durumunda ise dönen masaya dik ve yatay yerleştirilme durumlarının her ikisi için her iki çıkış konfigürasyonunda da ortalama Sherwood sayısı birbirine çok yakın ve masanın durgun olması durumundan çok az da olsa bir miktar büyük olarak elde edilmiştir.

Naftalin süblimleşme tekniği 1950'lerden bu yana çeşitli deneylerde çokça kullanılmaktadır. Deneyler yüzeydeki ortalama ve yerel kütle transferini bulmayı amaçlar. Ortalama katsayılar tartma ile yerel katsayılar ise özel aygıtlarla derinliğin ölçülmesi şeklinde yapılır. İstenilen sınır şartlarında karmaşık geometriler için kütle transferi hakkında detaylı bilgiyi yerel ölçümler sayesinde elde edebiliriz. Test numunelerinin geometrisi düzlem levha, dairesel ya da dörtgen silindir gibi dökümü ve ölçüm yapılması kolay şekiller olabilir. Son yıllarda yapılan deneyler içerisinde türbin kanadı gibi eğri şekillerde (Chen ve Goldstein, 1992) ve delik içi yüzeyi gibi zor geometrilerde yerel ölçümler detaylı bir şekilde yapılır. Dairesel disklerin (Sporrow ve Geiger, 1985) ve kare

yada dikdörtgen plakaların çeşitli açılar altında durma noktasındaki kütle transferi incelenebilmektedir.

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

Russ ve Beer (1997) sinüzoidal eğri bir boru iç yüzeyinde ısı transferini ve akış alanını araştırmışlardır. Eksenden itibaren karşılıklı simetri olduğundan borunun yarı parçası alınmıştır. Bu parçanın üzerine döküm yöntemiyle naftalin kaplanmıştır. Bilgisayar kontrollü bir mikrometre seviyeli hareketli tabla sinüzoidal yüzeyi tarayarak derinlik ölçmüştür. Elde edilen verilerden yararlanarak yerel Sherwood sayıları tespit edilmiştir. Uygun analogiden yararlanarak Nusselt sayısı değişimi 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 yöntemiyle kütle transferini tespit etme yöntemini kullanmıştır.

Chyu ve Natarajan (1996), yaptıkları bir çalışmada üç boyutlu yüzeyin, çıkıntılı elemanların ısı transferini incelemişlerdir. Beş farklı elemanın (silindir, küp, elmas piramit ve yarıküre) eşit Re sayısında ısı transfer yüzey alanındaki pürüzlülük etkisi, naftalin süblimleşme tekniği kullanılarak araştırılmıştır.

Cho ve arkadaşları (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 bir yüzeye çarptırılarak, kütle transferi ölçülmüş ve uygun bir analogi ile ısı transfer oranına geçilmiştir. Jet eğim açısının değişmesi, durgunluk 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 yarık 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 ve arkadaşları (1998), dönen diske çarpan dairesel jetin ısı (kütle) transferini araştırmak üzere yaptıkları deneysel çalışmada naftalin süblimleşme tekniğinden yararlanmışlardır. Deneylerin sonucunda bulunmuştur ki; ısı (kütle) transferi üç bölgeye ayrılıyor; çarpmanın baskın olduğu bölge, karışım bölgesi ve dönmenin baskın olduğu bölge.

Park ve Yoo (2004) naftalin süblimleşme tekniğini kullanarak sınır tabakanın etkisini araştırmak için iki akış koşulunda yerel ısı/kütle transfer katsayısı elde etmişlerdir. Elde edilen yerel ısı/kütle transfer katsayısı Sherwood sayısı, Stanton sayısı ve *Colburn-j*

faktörü gibi boyutsuz parametrelere dönüştürülür. Bulunan sonuçlar düz bir plakadan laminar ve türbülanslı ısı/kütle transferi korelasyonları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre yerel Sherwood sayısı ve yerel Stanton sayısı ısı/kütle transferi ve momentum transferi arasındaki benzerliğin türbülanslı sınır tabaka için daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

Kataoka ve Mizushina (1974) elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniğini kullanarak bir çarpan dairesel jette, yerel ısı transfer hızı üzerine serbest akım türbülans etkisini araştırmışlardır. Vallis vd. (1978) akışa dik yerleştirilmiş düzgün bir yüzey ile bir asimetrik türbülanslı jet arasındaki ısı transfer katsayısının radyal dağılımı üzerinde (H/D) oranı, Reynolds sayısı, lüle çapının etkisini sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği kullanarak incelemişlerdir.

Literatür taramasından da görüleceği gibi, naftalin süblimleşme tekniğinin ısı transferi sonuçlarının elde edilmesi için mükemmel bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Goldstein ve Cho, 1995, Mendes, 1991). Tekniği kullanan birçok araştırmacı, kütle transferi işleminin daha temiz sınır koşullarıyla kurulabileceğini ve ilgili ısı aktarım işleminden daha kolay ve daha doğru bir şekilde çalışılabileceğini savunmuşlardır (Sparrow vd, 1985, Altemani ve Menegaido, 1995 ve Eckert ve Drake, 1972).

2.2. Naftalin Nasıl bir Maddedir?

Naftalin kendisine ait özel kokusu olan, parlak kristal yapılı beyaz renkli bir bileşiktir. Organik yapıdadır ve organik kimyanın aromatik bileşikler sınıfına girer. Naftalinin yapısı halkalıdır. Naftalin, kömür katranından süblimleşme denen özel usulle elde edilir. Havagazı elde edilirken ham gazdan ayrılan katranda bol miktarda naftalin bulunur. Naftalinden türeyen *naftol*, *naftilamin*, *naftakinon* gibi bileşikler, boyar maddeler elde etmeye yarar.

Naftalinin ilk defa 1819 yılında kömür katranından elde edildiği biliniyor. Bugün ise, petrolün katalizör yardımı ile parçalanmasından elde edilmektedir. Kömür katranının fraksiyonlu destilasyonundan elde edilen ve 170-230°C arasında geçen orta yağda naftalin vardır. Orta yağda naftalinden başka fenol ve piridin bazı da bulunur. Bu yağdan kristallendirilerek alınan naftalin, sodyum hidroksit ile muamele edilerek fenolden kurtarılır. Bundan sonra da, erimiş halde seyreltik sülfat asidiyle muamele edilir ve

böylece diğer safsızlıktan kurtarılır. Sonra da destilasyona ve süblimleşmeye asyona tabi tutularak iyice saflaştırılır. Saf naftalinin bileşimi 1826'da tayin edilmiştir. Moleküler formülü $C_{10}H_8$ olup, iki karbonuna hidrojen bağlı değildir. Bu karbonlar arasındaki çift bağların yerleri, sabit olmayıp, titreşim halinde yer değiştirirler. Saf naftalin $80.1^{\circ}C$ sıcaklıkta erir ve $218^{\circ}C$ sıcaklıkta kaynar.

Naftalin suda, soğuk alkolde çözünmez, fakat sıcak alkolde ve eterde çözünür. Süblimleşme özelliği vardır. Pikrik, asitle sağlam bir bileşik meydana getirir. Bu bileşiğin erime noktası $151^{\circ}C$ 'dir. Bu reaksiyondan faydalanarak naftalin karakterize edilir. Naftalin kokusu güveleri kaçırıcı özellikte olduğundan, yün eşyaların korunmasında kullanılır. Naftalinin göze etki eden zehir özelliği vardır.

Naftalinin reaksiyonları genelde benzenin reaksiyonlarına benzer. Naftalin, benzenden daha az doymuş olduğu için, kısmi katılma reaksiyonları verir. Naftalin, çoğu boyaların ve reçinelerin elde edilmesinde kullanılır. Mesela indigo boyasının elde edilmesinde bir ara maddedir. Ayrıca, trifenilmetan boyaları, antrakinon ve bunun türevleri, naftalinden elde edilir.

2.3. Süblimleşme Nedir?

Katı bir maddenin sıvı hale geçmeden buhar haline veya tersine gaz halindeki bir maddenin sıvılaşmadan katı hale geçmesine süblimleştirme denir. Bu işlem normal atmosfer basıncında veya vakumda yapılabilir. Bu işlemin temelinde katı maddenin ısıtılması sonucu, erime noktasına gelmeden buhar basıncının atmosfer basıncına eşitlenmesidir. Normal atmosfer basıncı altında bir erime noktasına sahip bir bileşik süblimleştirilmek istenirse düşük basınçlı ortamda bu işlem yapılabilir. Bunu yapabilmek için, önce bileşiğin erime noktası anındaki buhar basıncı bulunur. Daha sonra çalışma basıncı, bu erime anındaki buhar basıncından daha aşağıda uygulanırsa madde süblimleştirilebilir.

Süblimleşmede sıvı hal görülmez. Kuru buz (katı karbondioksit), naftalin, iyot, arsenik, kamfor süblimleşen maddelere örnek verilebilir. Süblimleşme ısı olarak gerçekleşen bir olaydır. Süblimleşen maddelerin tanecikleri arasındaki çekim kuvveti zayıftır. Bu nedenle katı halden doğrudan gaz hale geçerler. Süblimleşme olayında maddenin yapısı değişmediğinden olay fiziksel bir değişimdir. Süblimleşmede açık hava

basıncı önemlidir. Hava basıncı azaltılarak süblimleşme hızı artırılır. Süblimleşme olayı kapalı kapların içerisinde bazı maddelerin saflaştırılması için kullanılır.

Tuvaletlerde kullandığımız koku gidericiler, giysilerimizin güvellenmemesi için kullandığımız naftalin süblimleşen maddelerdir. Naftalinin veya koku gidericilerin zamanla azaldığını ve etrafa koku yaydığını hissederiz fakat bu maddelerin sıvı halini görmeyiz. Bunun sebebi süblimleşme olayıdır. Kar ve buz çok az da olsa süblimleşmektedir. Kışın dışarı kuruması için asılan çamaşırlar donmuş olmalarına rağmen kuruması sağlanmaktadır.

Gaz haldeki maddenin doğrudan katı hale dönmesine kırıgılaşma denir. Kırıgılaşma süblimleşmenin tersidir. Özellikle kış aylarında arabaların camlarında buzlanma meydana gelir. Havadaki su buharının doğrudan buza dönüşmesi gerçekleşmektedir. Şekil 2.1’de toz ve tablet halindeki naftalini, Şekil 2.2’de ise süblimleşme anında görüntülenmiş naftalin kütlesi görülmektedir.



Şekil 2.1. Toz ve tablet naftalin numuneleri

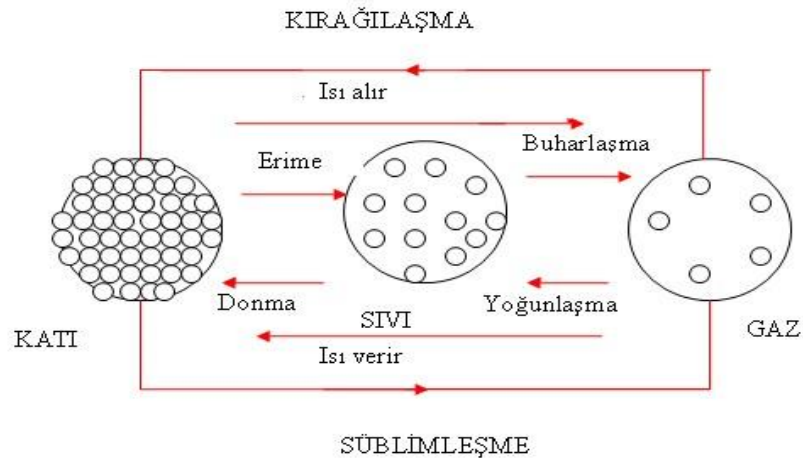


Şekil 2.2. Süblimleşme halindeki naftalin

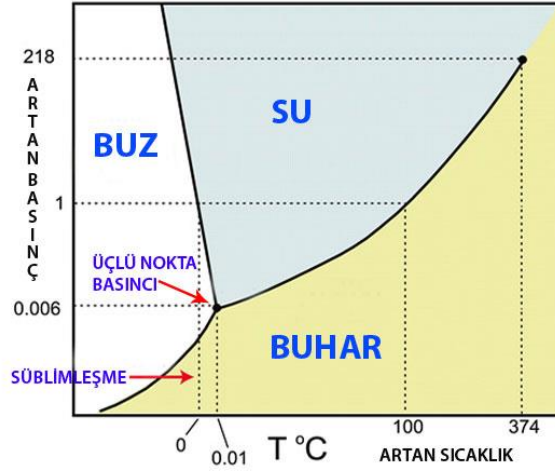
Süblimleşmenin en önemli uygulamalarından biri, vakumda dondurarak kurutmadır. Normal tekniklerle kurutulduklarında bozulan bazı maddeler, bir vakum odasına yerleştirilir ve kurutma yoluyla giderilmesi istenilen sıvının üçlü nokta sıcaklığının biraz altına kadar soğutulur. Donan sıvı (genellikle buz), süblimleşerek maddeden çıkar. Oluşan buhar da, ya vakum odası dışına pompalanır ya da yeniden dondurulur.

Sahne efektlerinde sık kullanılan bir işlem de, katı karbon dioksitle (kuru buz), yapay duman ya da sis üretilmesidir. Karbon dioksit, üçlü nokta basıncı atmosfer basıncının üstünde olduğundan, erime noktasına ulaşmadan buharlaşır ve atmosfer basıncında sıvılaşmaz. Kuru buzdan süblimleşerek çıkan buhar, çok soğuk olduğu için, havadaki su buharının sis vererek yoğunlaşmasına yol açar.

Süblimleşmenin en yaygın örneği, sıcaklığın $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmemesine karşılık, yağın karın yavaş yavaş yok olmasıdır. Süblimleşme mekanizmasını anlamamanın en iyi yolu, belirli bir madde için basıncın sıcaklıkla değişmesini gösteren faz çiziminin incelenmesidir. Şekil 2.3'de süblimleşmenin şematik döngüsü, son olarak Şekil 2.4'de basınç-sıcaklık diyagramı üzerinden süblimleşme noktası gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Naftalinin süblimleşme anındaki hal değişimi



Şekil 2.4. Basınç-sıcaklık diyagramında süblimleşmenin yeri

Belli bir sıcaklık ve basınç tarafından belirlenen bir nokta, bu alanlardan hangisine rastlıyorsa, söz konusu koşullar altında yalnızca o faz kararlı olabilir. Nokta eğrilerden biri üstüne düşerse, eğrinin iki yanındaki fazlar birbirleriyle dengededirler ya da başka bir deyişle, birlikte bulunurlar. Nokta, arakesit olan ve “üçlü nokta” diye adlandırılan T noktasına rastlarsa, üç faz birbiriyle dengededir. Üçlü nokta sıcaklığının altındaki herhangi bir sıcaklıkta faz grafiğinin “katı” ve “buhar” alanları arasında “sıvı” alanı bulunmadığından, katı, süblimleşebilir (katı ile buhar dengededir).

Süblimleşmeden arıtma yöntemi olarak yararlanılabilmesi için, katı fazın buhar basıncının nispeten yüksek olması gerekir. Sözgelimi iyot, yaklaşık 100 °C’ye kadar dikkatle ısıtılırsa, sıvılaşmadan, iyot buharı vererek buharlaşır. Bununla birlikte, üçlü nokta sıcaklığına ulaşıncı sıvı fazın ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Oda sıcaklığında en çok bilinen süblimleşebilen maddeler arasında katı karbon dioksit, benzoik asit, arsenik, iyot, naftalin, kâfur, mentol bulunur. Bu maddelerin buhar basınçları açık atmosfer koşullarında yüksek olduğu için süblimleşmeleri hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ayrıca donma sıcaklığının altında buz ve kardan da süblimleşme gerçekleşir. Bunun yanında, timol, borneol, piren gibi organik bileşikler ve mikro düzeyde metaller de süblimleşebilmektedirler.

Süblimleşebilen maddelere örnek olması açısından ve de bir sonraki bölümde özellikleri açıklanacak olan naftalinle kıyaslanabilmesi açısından naftalin dışında kalan iki süblimleşebilen madde olan mentolün ve kâfurun özellikleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

Tablo 2.1. Naftalin dışında kalan diğer süblimleşen madde özellikleri

Madde adı	Kafur	Mentol
Kimyasal formül	C ₁₀ H ₁₆ O	C ₁₀ H ₂₀ O
Moleküler ağırlık	152.23 g mol ⁻¹	156.27 g mol ⁻¹
Katı hal yoğunluğu	0.99 g cm ⁻³	0.89 g cm ⁻³
Erime sıcaklığı	175-177°C	31-42°C
Kaynama sıcaklığı	204°C	212 °C
Termodinamik denge sıcaklığı	180.3°C	-
Termodinamik denge basıncı	51.44 kPa	-
Süblimleşme entalpisi	58.5 cal g ⁻¹	-
Parlama noktası sıcaklığı	64.44°C	93°C
Kritik sıcaklık	422°C	384.85°C
Kritik basınç	30.4 bar	27.104 bar
Su içerisindeki çözünürlük	1200 mg/L	420-508 mg/L
Aseton içerisindeki çözünürlük	Yüksek oranda çözünür	Yüksek oranda çözünür
Katı hal görünüşü	Beyaz yarı saydam kristal	Beyaz veya renksiz kristal
Zararları	Cilt üzerinde hafif tahriş edici etkisi bulunur. Gözler üzerinde tahriş edici etkisi vardır. Solunum sistemine zarar verir, ölüme neden olabilir.	Cilt üzerinde hafif tahriş edici etkisi bulunur. Yutulması ölüme neden olabilir. Solunum sistemine zarar verir.

2.4. Naftalinin Özellikleri

Naftalin süblimleşme tekniği çok doğru ölçümler elde etmemizi sağlar ve ısı transfer yöntemiyle kıyaslandığında sınır şartlarını elde etmede oldukça avantajlıdır. Bununla beraber bu yöntemin 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 (ya da Schmidt sayısı). Katı naftalinin yoğunluğu ve özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından ölçülmüştür. Tablo 2.2 'de bu değerler listelenmiştir.

Tablo 2.2. Naftalinin özellikleri

Naftalin Özelliği	Açıklama	Birim
Kimyasal formül	C ₁₀ H ₈	
Molekül ağırlığı	128.17	kg/mol
Erime noktası	80.2	°C
Donma noktası (havada 1.01325 bar basınçta)	80.285	°C
Üçlü sıcaklık noktası	80.28	°C
Normal kaynama noktası (havada 1.01325 bar basınçta)	217.993	°C
Süblimleşme entalpisi	70.36	kJ/mol
Kritik sıcaklık	472.5	°C
Kritik basınç	40.51	Bar
Kritik hacim	413x10 ⁻⁶	M ³ /mol
Sıvı yoğunluğu (1.01325 bar basınçta, 80.23°C 'de)	0.978	kg /m ³
“ “ (“ “ “ , 120°C 'de)	0.946	“
“ “ (“ “ “ , 130°C 'de)	0.938	“
Katı halde ısı iletim katsayısı	0.333	W/m-K
Katı halde yoğunluğu (20°C)	1175.0	kg/m ³

Naftalinin doymuş buhar yoğunluğu, ideal gaz kanunundan doymuş buhar basıncını ve yüzey sıcaklığını kullanarak tespit edilir. Naftalinin doymuş buhar basıncı birçok çalışmada ele alınmıştır. Tablo 2.3'de bu değerler %7 farklılıklarla özetlenmiş ayrıca doymuş buhar basıncı ile sıcaklık bağıntıları arasındaki korelasyonlar verilmiştir.

Tablo 2.3. Naftalinin havadaki doymuş buhar basıncı (Goldstein ve Cho, 1995)

Sıcaklık (°C)	Korelasyon denklemi	T = 298.15 K için (Pa)	Yöntemler ve hata
0-60	$\log P = 11.7797 - 3812.34/T - 0.02593 \log T$ P (mmHg), T (K)	11.32	Buharlaşma, %4.2
6.7-20.7	$\log P = 10.597 - 3783/T$ P (cmHg), T (K)	10.81 ^{*1}	Taşkınlık
0-38	$\log P = 11.55 - 3765/T$ P (mmHg), T (K)	11.14	Buharlaşma,
16-50	$\log P = 11.424 - 3722.5/T$ P (mmHg), T (K)	11.58	Dinamik doyma: 0.0052 mmHg
40-80	$\log P = 9.58102 - 2619.91/(t + 220.651)$ P (mmHg), t (°C)	(10.98) ^{*a}	Buharlaşma 0.033 mmHg
16-80	$\log P = 10.0896 - 2926.61/(t + 237.332)$ P (mmHg), t (°C)	11.44	0.022 mmHg
275 K	0.9226 Pa, 275 K'de	(10.93) ^{*a}	Gaz-doyması; %2
-10 dan 70 e (-43 den 71 e)	$T \log P = 1/2a^0 + \sum a_s E_s(x)$ $a_0 = 301.6247; a_1 = 791.4937; a_2 = -8.2536;$ $a_3 = 0.4043; x = (2T - 574)/114$ $E_1(x) = x; E_2(x) = 2x^2 - 1; E_3(x) = 4x^3 - 3x$ P (Pa), T (K)	11.22	%3.77
-10 den 36.85e	$\log P = 14.47884 - 8037.107 / (410.77 - 273.15 + T)$ P (bar), T (K)	10.85	20 Pa ≤ P ≤ 0.04 bar için %1
7.15-31.85	$\ln P = 26.25 - 8575/T$ P (mmHg), T (K)		Gaz-doyması; %2.2
0-80	$R \ln P = 20.0885 + 72513[(1/298.15) - (1/T)]$ $- 57.53[(298.15/T) - 1 + \ln (T/298.15)]$ R gaz sabiti (= 8.3143); P (Pa), T (K)	11.20	Statik %1.6

^{*a} değerler denklemlerden çıkarılmıştır, ancak 298.15 K sıcaklık değeri ölçülen aralık arasında değildir.

Naftalinin buharlaşma basıncı sıcaklığa karşı çok hassastır. Tablo 2.4’de naftalinin havadaki özellikleri verilmiştir. Oda sıcaklığında 1°C ’lik değişim buhar basıncında yaklaşık %10 değişikliğe neden olur. Bu yüzden yüzey sıcaklığını elde ederken özel dikkat gerekir.

Tablo 2.4. Havadaki naftalin buharının özellikleri (Ambrose vd., 1975)

T (K)	P_v (Pa), (naftalin)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	$D_{naf} \times 10^6$ (m ² /s)	Sc (naf-hava)
290	4.918	14.811	6.455	2.290
295	8.206	15.268	6.671	2.284
300	13.434	15.731	6.891	2.278
305	21.604	16.200	7.115	2.272

Naftalinin havadaki difüzyon katsayısı ve buna bağlı olarak hesaplanan Schmidt sayısı farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Schmidt sayısını bulmak için literatürde bugüne kadar önerilmiş en önemli teorik ve ampirik korelasyonlar Tablo 2.5’de sunulmuştur.

Tablo 2.5. Naftalinin hava içerisindeki difüzyon katsayısı ve Schmidt sayısı

Sıcaklık aralığı (K)	D_{naf} (denklem)	D_{naf} 298.16 K	Sc (denklem)	Sc 298.16 K	Belirsizlik	Yöntem
298.16	0.0611	0.0611	2.54	2.54	%4.46	Stefan (kapalı)
303.2	0.086	0.0834	1.805	1.86	%4.1	Stefan (açık)
287.66-327.12	$8.1771 \times 10^{-7} T^{1.983}$	0.066	$8.0743 T^{-0.2165}$	2.35	%3.0	Stefan (kapalı)
295.16-302.16	$1.495 \times 10^{-6} T^{1.888}$	0.0702	$4.4163 T^{-0.1215}$	2.21	%4.1	Stefan (kapalı)
~1000	-	0.0664		2.337	%8.0	Teorik
-	$2.2381 \times 10^{-6} T^{1.81}$	0.0674	$2.9500 T^{-0.0435}$	2.30	%7.21	Ampirik
-	$3.0933 \times 10^{-6} T^{1.75}$	0.0662	$2.1344 T^{+0.0165}$	2.344	%6.71	Ampirik

Naftalinin havadaki difüzyon katsayısı 298.16 K’ de 0.066 ila 0.0702 değerlerinin ortalaması olarak tahmin edilmiştir (Goldstein ve Cho, 1995). Böylece difüzyon katsayısı 0.0681 şeklinde bulunmuştur. Netice olarak difüzyon katsayısı ve Schmidt sayısı için kabul edilen en genel korelasyonlar şu şekildedir:

$$D_{naf} = 0.0681 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.93} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{atm}} \right) \text{ cm}^2/\text{s} \quad (2.1)$$

$$\nu_{hava} = 0.1556 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.7774} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{atm}} \right) \text{ cm}^2/\text{s} \quad (2.2)$$

$$Sc = 2.28 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{-0.1526} \quad (2.3)$$

Burada verilen ampirik bağıntıların üçünde de basınçlar Pascal, sıcaklıklar Kelvin cinsinden hesaplanmıştır.

2.5. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Avantajları

Isı transferi deneylerinde genellikle iletim ve radyasyon kayıpları mevcuttur. Netice olarak izotermal ve yalıtımlı 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 (inaktif) yüzey yalıtımlı duvar şartına benzemektedir. Ayrıca kütle transfer yüzeyinde izotermal sınır şartında yalıtımlı sınır şartına süreksiz bir dönüşüm mümkündür, oysa ısı transferinde iletim ve radyasyon etkilerinden dolayı bu imkânsızdır. Süblimleşme metodu aynı zamanda birleşik ısı transferi durumlarında konveksiyonu iletimden ayırır. Böylece kütle transferi deneyleri ısı transferinin konveksiyon bileşenini etkisi altına alır, çünkü cidar iletimi hataları ve radyasyon hataları elimine edilmiştir.

Eğer test yüzeyi üniform sıcaklık ve basınçta tutulursa, naftalin buharlaşma basıncı ve derişimi yüzeyde üniform olacaktır. Bu da ısı transferi problemlerindeki izotermal yüzey şartına benzerlik göstermektedir. Difüzyon ve taşınımdan dolayı yüzeyde sürekli olarak kütle kaybı olacaktır. Derişim gradyanı, sıcaklık gradyanına ve kütle akısı, ısı akısına benzetilebilir. Zaman ortalamalı yerel kütle transfer oranları süblimleşme derinliği ölçülerek elde edilir. Isı/kütle transfer katsayısı izotermal şartlarda elde edilse bile, diğer sınır şartlarına da uygulanabilir, çünkü ısı/kütle transfer katsayısı cidar/sıcaklık dağılımının türbülanslı akışta çok zayıf bir fonksiyonudur.

Bir kütle transfer deney parçası kolaylıkla imal edilebilir ve taşınabilir. Ayrıca karmaşık bir ısıtma veya ölçme sistemine ihtiyaç yoktur. Örneğin malzemeyi yalıtma veya ısı çift aparatlarına gerek yoktur. Naftalin süblimleşme tekniğinde yalnızca dökümle elde edilebilecek bir naftalin kaplı numuneye ihtiyaç vardır. İstenilen sınır şartlarında tam temsil etme ile karmaşık hareketli parçalar içeren bir geometride bile ölçüm yapmak mümkündür.

2.6. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Uygulanışı

Naftalin süblimleşme tekniğinin uygulandığı çalışmalarda kullanılan naftalin yüzeyler genelde naftalinle kaplanmış yüzeyler olarak karşımıza çıkmaktadır. Test numunelerinin üzerine naftalinin kaplanması makinede imalat, daldırma, püskürtme, döküm gibi işlemleri veya bu işlemlerin kombinasyonunu içerir. Bu yöntemlere kısaca bakalım.

Makineyle İşleme: Bu yöntemde sıradan bir torna tezgâhı veya freze tezgâhı 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. Dökümden çıkmış numunelerle imalattan çıkmış numuneler arasında fark vardır.

Daldırma: Bu yöntem tüm yöntemler içerisinde belki de en kolay olanıdır. Test parçasını sıvı naftalin fırınına daldırarak kaplama yapılır. Alternatif olarak bir test numunesini sıvı naftalinle boyayabilirsiniz. Ancak bu yöntemle tekrarlanabilirdik ve kalınlığın uniformluğu gibi problemler ortaya çıkar. Daldırmayı özellikle ince kanatçık uygulamalarında görebilirsiniz.

Püskürtme: Püskürtme yöntemiyle eritilmiş naftalin püskürtülerek bir alt tabaka şekillendirilir. Kaplama yaklaşık olarak 0.015-0.115 mm kalınlığında ince bir tabakadır. Bu yöntem Neal (1975) tarafından geliştirilmiştir. Neal, tutucu bir çözelti içerisinde %20 derişimli naftalin çözeltisi kullanmışlardır. Lee (1989) erimiş naftalini püskürtmek üzere ısıtılmış basınçlı havayı kullanmıştır. Püskürtmeyle kaplama işlemi karmaşık geometriler için daha uygundur. Ancak yerel ölçümler yapmak için yeterince düzgün yüzeyler elde etmek bu teknikte zordur.

Dökme: Dökme yöntemi, en çok bilinen ve en uygun yöntemdir. Bu yöntem basittir ve başarıyla tekrarlanabilir. Bu yöntemdeki en önemli husus kalıp yüzeyi çok pürüzsüz olmalıdır ve oldukça iyi cilalanmalıdır. Kütle transfer deneylerinde kullanılan naftalinli yüzeylerin çoğu dökümle elde edilir. Bu yöntemde erimiş naftalin kalıbın içine dökülür. Daha sonra katılaşmaya bırakılır ve en sonunda numune modelden çıkartılır. İlkönce numunenin üzerinde kalan naftalin eritme şeklinde giderilir. Kalıp test

numunesinden ve iyice cilalanmış alüminyumdan oluşur. Alüminyum kalıp 3 °C’de alüminyum tozu ile cilalanmıştır.

Cilalanmış yüzeyler izopropil alkollü pamukla temizlenir. Girintili yüzeyler ve naftalin eritme fırını da alkolle temizlenir. Kalıbın iç boyutları istenilen test numunesinin boyutlarıdır. Test numunesinin akıtıldığı deliklere bir kanal yerleştirilir ve hava girişi için birkaç maça deliği açılır. Naftalin tozunun yeterli bir miktarı elektrik ısıtıcısıyla yaklaşık 1 kW kapasitede kaynayıncaya kadar ısıtılır. Kaynayan naftalin ısıtıcıdan alınır ve kaynaması (kabarması) durana kadar bekletilir. Kısa bir süre sonra (~30 s) oda sıcaklığında kalıba dökülür.

Bu yöntem 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 çıkarılırken; maça, hava boşluk tipleri ve cıvatalar çıkarıldıktan sonra bir çekiçe keskin bir şekilde vurulur. Yeterli kesme kuvveti olmazsa naftalin yüzeyinin bir kısmı kalıba yapışabilir. Naftalinli yüzeyin pürüzlülüğü eşdeğer bir cilalı metalinkiyle kıyaslanabilmelidir. Dökme yöntemi ile istenilen geometride ve boyutta naftalin yüzey elde edilebileceğinden tüm yöntemler içerisinde en kullanışlı olanıdır.

2.7. Ölçümler

Kütle transfer oranını ölçmek için iki genel yöntem vardır. Bunlar ortalama transfer katsayılarını ölçmede yararlanılan tartma yöntemi ve yerel katsayıları ölçmek için kullanılan ve özel ölçü aygıtı kullanımını gerektiren yerel ölçüm yöntemidir.

2.7.1. Tartma

Test numunesini ölçümden önce ve sonra tartarak ortalama bir katsayı elde edilir. Bu yöntem için yüksek hassasiyetli tartıya gerek duyulur. Tartma yönteminde ölçüm süresince doğal taşınım yerel ölçümlerden daha düşüktür. Çünkü ölçme süresi 5 saniye gibi kısa bir süredir. Uygun yüksek çözünümlü terazi ağırlık kapasitesini sınırlar. Test numunesinin ağırlığı bazen kullanılan terazinin kapasitesiyle sınırlanır. Uygulamalarda genellikle %0.1 hatayla 0.1 mg çözeltide ve 200 gr kapasitede terazi kullanılır.

Bazen naftalin test kesiti çeşitli küçük parçalardan oluşur, bunların her biri atılır ve tek başına ölçülen her bir parça terazinin kapasitesi içerisinde yeterince hafif olmalıdır. Böylece bu yolla elde edilen sonuçlar aslında ortalama transfer katsayısını verir.

Doğru sonuçlar elde etmek için test zamanı en az 10 mg naftalinin süblimleşmesi kadar olmalıdır. Bu da yaklaşık 50 µm derinlik gerektirir. Genelde ortalama Sherwood sayısı tartma ölçüm metoduyla ölçülürse, bağımsız yerel ölçümlerin değerlerinin nümerik entegralleriyle uyum sağlar.

2.7.2. Yerel Ölçüm Yöntemi

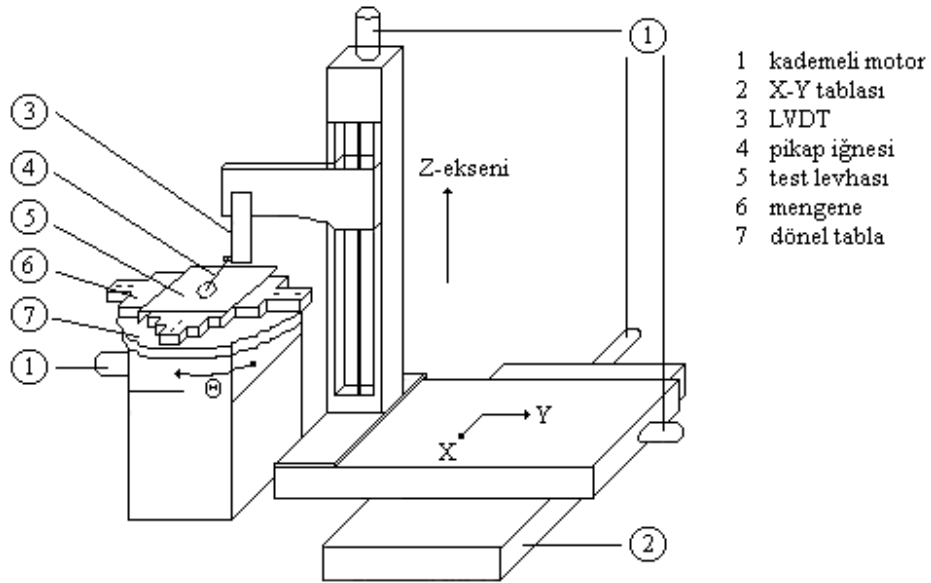
Yerel ölçme yöntemi Goldstein ve Cho, (1995) tarafından uygulanmış ve oldukça hassas sonuçlar elde edilmiştir. Yazarlar bu çalışmada yerel ölçüm yapmak için, üzerinde referans noktaların belirlendiği dökümden çıkmış naftalin numunenin etrafındaki süblimleşmeyen çerçevelerle (metal parçalar) yeni bir yüzey oluştururlar. Bu çerçeveler yüksek derecede cilalanmışlardır ve küçük dairesel çukurlara sahiptirler, bu çukurlar numunenin ölçüm tablası üzerindeki benzer yeri bulmak üzere kullanılan orijinal noktaya benzer. Çerçeve en az 1 mm kalınlıkta olmalıdır ki; gerilmelere dayanabilsin ve ölçümler yapılabilsin. Çerçeveler köşelerde tümseklerin oluşmasını engeller ki; bu tümsekler köşe bölgelerde yüksek kütle transfer oranlarına neden olurlar. Test numunesinin büyüklüğü nadiren ölçüm tablasının boyutuyla sınırlanır (yüksekliği ve genişliği). Alanın en ilginç kısmında detaylı yerel değerler elde edilebilir.

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

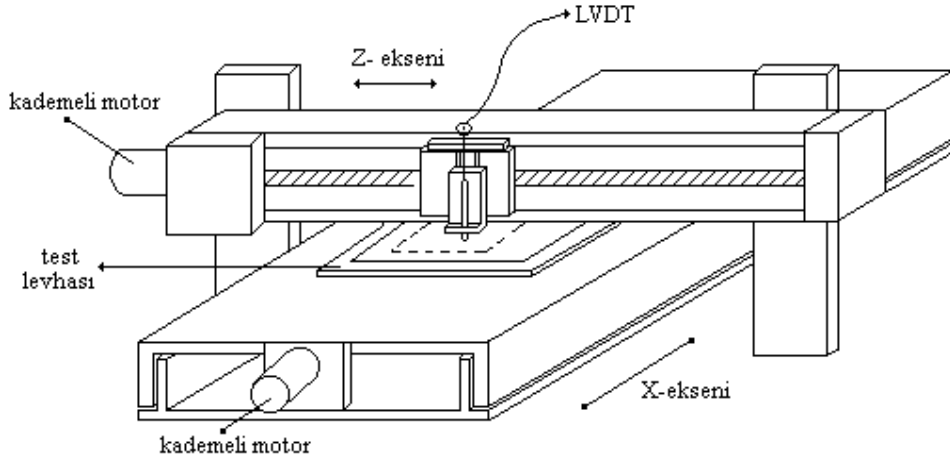
- ✓ Akışa maruz kalmadan önce ve sonra numuneyi tam yerleştirmek,
- ✓ Derinlik ölçümünü doğru tespit etmek,
- ✓ Doğal konveksiyon kayıplarını minimize edecek hızlı veri okumak

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 yüzeyleri veya iç delik yüzeylerde ölçme başarıyla yapılır. Ölçme sistemi bir derinlikölçer, bir lineer sinyal, bir kademeli motor ve kişisel bilgisayardan ibarettir. Şekil 2.5’de adı geçen literatürdeki çalışmada kullanılan iç deliklerde ölçüm yapabilen bir dört eksenli tabla düzeni verilmiştir. Şekil 2.6’da ise iki eksenli derinlik ölçme sistemi verilmiştir.

Süblimleşmeden kaynaklanan yerel boşluklar, başka bir deyişle yerel derinlikler hassas bir ölçü aygıtı (bundan sonra kısaca LVDT diye adlandırılacaktır) ile ölçülür. Bu aygıt literatürde lineer değişken diferansiyel dönüştürücü olarak geçen bir sinyal dönüştürücüdür. Dolayısıyla LVDT bir sinyal göstergesine bağlıdır ve bu sinyal göstergesi AC dış sinyalini DC gerilimine dönüştürür. Aynı zamanda ölçü aygıtının yer değiştirmesine bağlı olarak elektriksel sinyali yükseltir. LVDT ölçü aygıtı için farklı tipler kullanılır. Bu tipler öyle seçilir ki; böylece en küçük yüzey eğimi bile en az hatayla ölçülebilir.

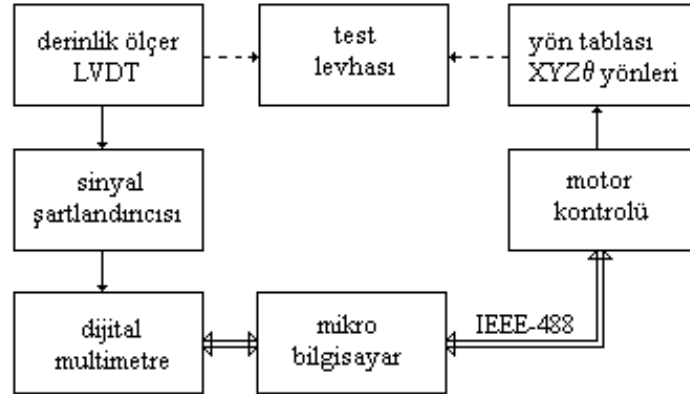


Şekil 2.5. Dört eksenli derinlik ölçme sistemi (Goldstein ve Cho, 1995)



Şekil 2.6. İki eksenli derinlik ölçme sistemi (Goldstein vd., 1985)

Hassas ölçüm yapabilmek için evvela biri test numunesini, diğerleri de LVDT 'yi istenilen yönde hareket ettirmek için kademeli motorlar kurulur. Bu sistem lineer doğrultuda $25.4 \mu\text{m}$, açısal doğrultuda 0.02° mesafe yer değiştirebilir. Bir dijital multimetre ile verilen noktalarda daha doğru sonuçlar elde etmek için sinyal şartlandırıcısındaki sinyaller artırılır (genelde dörtten yediye kadar). Kişisel bir bilgisayar, ölçüm tablalarının hareketini kontrol eder ve IEEE-488 (GPIB) sürücünden geçerek LVDT 'den derinlikleri okur. Şekil 2.7'de veri okuma sisteminin çalışma şeması verilmiştir.



Şekil 2.7. 4-eksenli bir LVDT sisteminde otomatik veri okuma sistemi bağlantı şeması (Goldstein vd., 1985)

Yerel kütle transfer katsayılarını tespit etmek için naftalin yüzeyi yükselme profili her testten önce ve sonra ölçülür. Yüzey yükseltmeleri arasındaki fark (süblimleşmeyen metal parçalar üzerinde referans alınan dereceye göre), süblimleşme derinliğinin bir

ölçüsüdür. Yerel yüzey profilini en güzel şekilde elde etmek için dört önemli faktöre dikkat etmek gerekir. Bunlar;

- ✓ Her bir kademede naftalin yüzeyinin eğimini verebilecek kadar bir artış yapmak,
- ✓ 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.

Ölçüm sistemi ve veri 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. Ancak bu şartlar ölçüm zamanını arttırmaya yöneliktir. Simetrik bir numune için test numunesinin yarı parçası ölçülerek zaman ve kademe artışı azaltılır.

DeneySEL 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 derinliğini yaklaşık 0.038-0.05 mm olacak şekilde seçilir. Süblimleşme derinliği ölçüm hatasından iki veya üç kat daha büyük ölçüde olmalıdır. Doğal konveksiyon kayıpları genelde %5'den daha azdır. Bazı noktalarda bu oran en fazla %10'a yaklaşabilir. Süblimleşme oranı Reynolds sayısına (hava akış hızına), naftalinin yüzey sıcaklığına (naftalinin buharlaşma basıncına) 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 imkânsız olacaktır. Ayrıca uzun deney sürelerinde doğal konveksiyon önem kazanacaktır ve sonuçlar elde edilirken hesaplara katılmak zorunda kalacaktır.

Kütle transfer katsayıları bir deneyin öncesinde ve sonrasında ölçülen süblimleşme derinliklerinin farkı olarak elde edilir. Test yüzeyi üzerinde ölçülen her bir iz çizgisi, süblimleşmeyen metal parçaları, örneğin her iki uçtaki alüminyum çerçeveyi içerir. Süblimleşmeyen metal parçalar en küçük karelere uyan bir referans çizgi oluşturmak için kullanılır. Naftalin yüzey yüksekliği bu çizgiye bağlı olarak bulunur. Toplam süblimleşme derinliği yüzey yüksekliğinin önce ve sonra ölçülen değerlerinin farkıdır. Doğal konveksiyondan kaynaklanan süblimleşme toplam süblimleşmeden çıkarılarak net süblimleşme derinliği bulunur.

2.7.3. Doğal Taşınımın Tespiti

Süblimleşme derinliği ölçümleri boyunca test numunesinin kurulması aşamasında ve depolanma anında doğal taşınımdan kaynaklanan süblimleşme ihmal edilemez. Örneğin bir delik boyunca doğal taşınım kaybı 24°C 'deki toplam ölçümün %10'u kadardır, oysa bunun normali %5'den az olmalıdır.

Doğal taşınım 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 dâhildir. Doğal taşınım kayıpları test numunesi ölçüm tablası üzerinden uzaklaştırılırken deneysel olarak tespit edilir. Başlangıçta görünen doğal taşınım oldukça yüksektir; daha sonra kararlı bir değere ulaşır. Ortalama kütle transfer oranı yaklaşık 1 saat sonra değişir.

Doğal taşınım 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. Elde edilen denklem sıcaklıktan kaynaklanan naftalin buhar değişimine (oda sıcaklığında her 1°C 'de %10) ve farklı sıcaklıklara göre çeşitli ölçümler için kontrol edilir.

Doğal taşınım 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. Ölçüm boyunca doğal taşınım kayıplarını azaltmak için ölçüm tablası hava geçirmez bir

kuşatmayla çevrilebilir. Bu kuşatmanın içinde hava, naftalin buharıyla birlikte doyar. Ancak, eğer kademeli elektrik motoru kullanılmışsa, motor kuşatmanın dışına konulmalıdır. Aksi halde kuşatmanın içinde hava sıcaklığı artacak ve naftalinin buharlaşma basıncı değişecektir.

2.7.4. Başka Yöntemler Kullanılarak Yerel Ölçüm Yapma

Yerel kütle transfer katsayıları ince-film naftalin kütle transfer tekniği kullanılarak elde edilebilir (Goldstein ve Cho, 1995). Kütle transferinin yerel değerleri test numunesi üstündeki uygun alanın üzerinde naftalin tabakasını tamamen temizlemek için ihtiyaç duyulan zaman aralığını dikkate alarak tespit edilir. Boru akışlarında akımı görünür hale getirmek için test numunesi şeffaf bir malzemeden yapılır. Bir tek noktadaki kütle transfer katsayısı o noktadan ayrılan naftalin tabakasının ayrılma zaman aralığıyla ters orantılıdır. Naftalin film tabakası (yaklaşık 0.015 mm) naftalin çözeltisini yüzeye püskürterek oluşturulur. Transfer katsayıları ölçüm boyunca dışardan kaybedilen doğal konveksiyonu içermezler.

Yüzeydeki naftalin tabakası farklı yüzey konumlarının biri diğeriyle kıyaslanabilsin diye, kütle transfer oranlarının uniform kalınlığında olmalıdır. Sprey metoduyla bu şartı sağlamak zordur. Ayrıca deney boyunca naftalin tabakasının süblimleşmesinden dolayı toz zerreciklerinin görünmesiyle birlikte, kütle transfer sınır şartı sabit derişiklik yüzeyinden süblimleşmeyen cidara doğru değışiklik gösterir. Böylece boş bir kısmın alt akımda transfer oranları, üst akımdaki naftalin buhar derişikliğinden dolayı artacaktır.

Yerel transfer katsayılarını tespit etmede diğeri bir yöntem holografik interferometre yöntemidir. Hava naftalin iç yüzeyindeki yerel katsayılar, çıkıntıların bir video yada kamerayla çekilmesiyle ölçülür. Test numunesi pürüzsüz şeffaf bir cismin üzerine ince bir plaka şeklinde naftalin sürülerek elde edilir.

2.8. Naftalin Süblimleşme Tekniğinin Sınırları

Naftalin süblimleşme tekniği geniş alanda uygulanır ve rahatlıkla kullanılabilir. Ancak bu yöntemin kullanılamayacağı yerler de vardır. Bu alanlar şöyle özetlenebilir.

Düşük Hız Sınırlaması: Düşük hızlı akımlarda ölçüm yapılacak zamanı uzun tutmak gerekir. Uzun sürede ise sıcaklık değişimlerini kontrol etmek zorlaşır. Uygulamada 2 saatin üzerinde ölçüm süresinden kaçınılır (yaklaşık 38 µm derinlik). Süre uzadıkça doğal taşınım kayıpları artacaktır. Bu problemi çözmek için bazen test levhası küçültülür ki (dolayısıyla Rayleigh sayısı küçülür) eşit Reynolds sayısında akış hızı da arttırılabilin.

Yüksek Hız Sınırlaması: Aerodinamik/viskoz ısıtmadan (geri dönme etkileri) 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 (ya da dinamik sıcaklık) kaynaklanan ısı enerjisi büyük olacaktır.

Yüksek Kayma Gerilmeli Akışlar: 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.

Süblimleşmeden Kaynaklanan Şekil Değişikliği: Ölçüm alma süreci boyunca naftalin test yüzeyinin şekli süblimleşmeden dolayı kademe kademe değişir. 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 değişiklik yapar. Genelde maksimum derinlik değişimi 0.2 mm 'den azdır.

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

Karışık Geometriler: Dökümü veya imali zor olan bazı karmaşık geometrilerde yöntemin kullanılması uygun değildir. Döküm yönteminde kalıplar numuneden çıkartılırken bir kesme hareketi gereklidir. Bu nedenle kalıptan numuneyi çıkarırken naftalin test numunesi üzerindeki kesme kuvvetine öyle bir güç sarf edilmelidir ki; kalıpları kırmak mümkün olabilsin. Karışık geometriler spreyle kaplanabilir, ancak pürüzlü yüzey oluşacağından bu sefer de yerel ölçüm yapmak zorlaşacaktır.

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

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

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

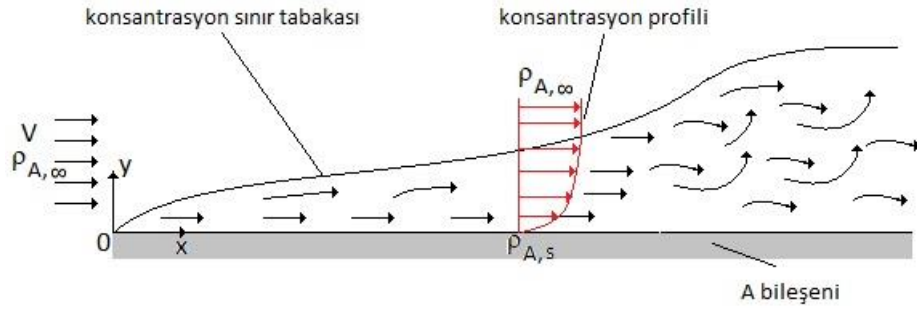
2.9. Kütle Transferi ve Isı-Kütle Transferi Benzerliği (Analojisi)

Taşınım ile kütle transferi bir yüzey ve bir hareketli akışkan arasındaki kütle transferi şeklinde tanımlanabilir. Isı transferinden biliyoruz ki; yüzeye yakın sıcak akışkan uzaklaştırılarak yerine daha soğuk akışkan getirilirse akışkan hareketi ısı transferini önemli ölçüde etkiler. Benzer şekilde yüzeye yakın yüksek-derişimli akışkan uzaklaştırılır yerine daha düşük derişimli akışkan getirilirse akışkan hareketi kütle transferini önemli ölçüde etkiler.

Isı ve kütle taşınımı arasındaki benzerlik zorlanmış ve doğal taşınımı, laminar ve türbülanslı ve iç-dış akışı barındırmaktadır. Isı taşınımına benzer olarak kütle taşınımı da yüzey geometrisi, akış rejimi, akış hızı ve akışkan özelliklerinin değişimi ve bileşim gibi akışkan akışı ile ilgili zorluklardan dolayı karmaşıktır. Bu nedenle, kütle transferini belirlemek için deneysel bağıntılara güvenme zorunluluğu vardır. Ayrıca kütle taşınımı molar esastan daha ziyade kütle esastı olarak analiz edilmelidir. Bunun dışında ısı taşınımında sıcaklık gradyanlarının var olduğu bölge ısı sınır tabaka olarak tarif edilmişti. Benzer şekilde kütle taşınımında içinde derişim gradyanlarının mevcut olduğu akış bölgesi derişim sınır tabakası olarak tarif edilir.

Kütle transferinin temeli ısı ve kütle transferi işlemleri arasındaki benzerlikle birlikte anlaşılır. Isı ve kütle transfer süreçlerini tanımlayan denklemler üzerinde yapılan boyutsal analiz, geometrik olarak benzer yapı ve benzer sınır koşulları için aynı formüle ait denklemlerin elde edilebildiğini gösterir. Kütle transfer sürecini açıklayan Sherwood sayısı ile ısı transferi işlemini açıklayan Nusselt sayısı arasında basit bir ilişki bulunduğu

sonucuna varılmıştır. Kütle transferi deneyleri için sınır şartı, benzer ısı aktarım problemi için bir izotermal yüzeye karşılık gelir. Hem boyutsuzlaştırılmış derişim fark profili hem de kütle transfer katsayısı tam gelişmiş bölgede sabit kalır. Bu, sürtünme ve ısı transfer katsayılarının tam gelişmiş bölgede sabit kalmalarına benzerdir (Şekil 2.8).



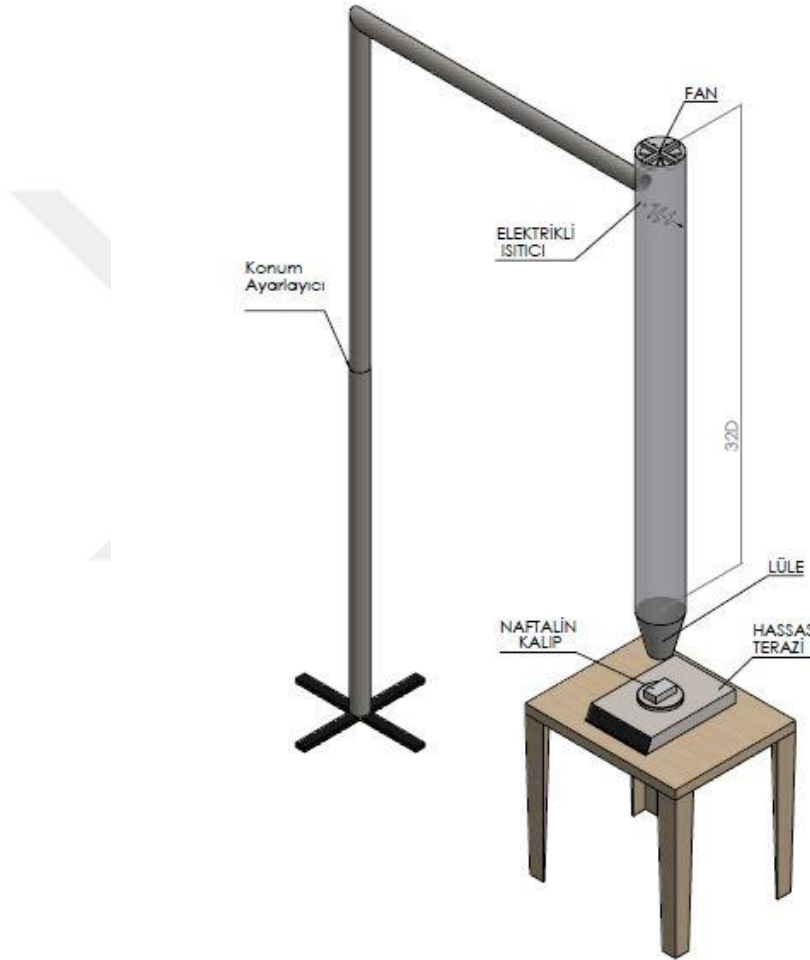
Şekil 2.8. Düz yüzeyde dış akışta A bileşeni için derişim sınır tabakası gelişimi

Kütle taşınımına en iyi örnek naftalinin üzerine üflenlen hava akımıyla süblimleşmesi örneğidir. Akışkan akışı ısı ve kütle transferinden etkilenmesine rağmen sabit özellikli akım kabulü süreklilik ve momentum denklemlerinin enerji ve difüzyon denklemlerinden türetilmesine izin verilir. Bu kabul akış alanında sıcaklık ve derişim farkları çok küçük olduğu zaman geçerlidir. Kütle taşınımı ile ısı taşınımı arasındaki analogi denklemleri Bölüm 3.2’ de Deneysel Hesaplamalar kısmında detaylarıyla sunulmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Düzenegi

Bu çalışmada Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında kurulan olan deney düzenegi kullanılmıştır. Deney düzeneginin şematik görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney Düzenegi

Deney düzenegi esasında basit bir sehpa düzenegi üzerine yerleştirilmiş hassas bir terazinin üzerinde yer alan dikdörtgen sabun kalıbına dökülerek üretilmiş katı naftalin ve ona çarptırılan ısıtılmış hava jetinden ibarettir (Şekil 3.2a). Katı naftalin Bölüm 2’de detayları açıklanan döküm yöntemi ile elde edilmiştir. Bu işlem esasında, eriyik naftalinin dikdörtgen kesitli bir kalıba doldurulması ve katılaştırılmışından başka bir şey değildir. Eritme işlemi esnasında yeterli miktarda naftalin tozu bir elektrikli ısıtıcı ile sıvılaşıp

kadar bekletilmiştir. Sıvılaştıran naftalin ısıtıcıdan alınmış ve kısa bir süre bekledikten sonra, yani sıvı naftalinin sıcaklığı 70 – 80 °C olduğu zaman, eriyik naftalin oda sıcaklığındaki kalıba dökülmüştür. Bu işlem basit gibi görünse de sıcaklık ölçümleri ve kalıpları doldurmadan önceki bekleme süreleri büyük önem arz eder. Yüksek sıcaklıkta (>80°C) yapılan döküm, naftalin yüzeyinin üzerinde baloncukların oluşmasına ve naftalin renginin koyu bir renge bürünmesine sebep olur. Düşük sıcaklık (< 60°C) ise döküm esnasında yüzey üzerinde dalga biçiminde izlerin oluşmasına sebep olur (Şenman, 2012).

Ortalama bir kütle geçişi katsayısı, test numunesinin deney öncesi ve sonrası tartımları alınarak elde edilebilir. Bu yöntem için yüksek çözünürlüklü tartı gereklidir. Tartım yöntemi ile ölçüm esnasında meydana gelen doğal süblimleşme de göz önüne alınmalıdır. Şu anda mevcut olan yüksek çözünürlüklü tartıların ölçebildikleri ağırlık kapasitesi sınırlıdır. Numunenin ağırlığı bazı durumlarda tartının sınırlı ağırlık kapasitesi yüzünden kısıtlanabilmektedir. Bu çalışmada 20 gr kütleyle sahip 10 cm x 5 cm x 2 cm ebatlarında dikdörtgenler prizması şekilli naftalin kalıplar kullanılmıştır ve kütle ölçümleri RADWAG marka 200 gr/0.01 gr ölçüm hassasiyetine sahip WTC 2000 kodlu terazi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2.b).



Şekil 3.2. a) Naftalin kalıp b) Hassas terazi

Sıcak hava akımı elde etmek için özel bir sıcak hava fanı hazırlanmıştır. Bir saç kurutma makinasının çalışma prensibinden yola çıkılarak hazırlattırılan ısıtıcı fanda 2000 W ısıtıcı ile çalışan kademeli olarak 3 ayrı güç ve 3 ayrı hız ayarına sahip saç kurutma makinası iç aparatları kullanılmıştır. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş akım sağlayabilecek uzunlukta uzun bir borunun bir ucuna ısıtıcı ünite monte edilirken diğer ucuna akış jeti oluşturmak üzere daraltılmış ağızlı lüle geçirilmiştir.

Isıtıcı ünitenin bağlandığı düşey konumlu boru bir kelepçe yardımıyla konum ayarlı sehpa bağlanmıştır. Bu sehpa aslında hastanelerde kullanılan serum taşıyıcı sehpanın üst çubuğuna 90'lık açıyla bağlanan ikinci çubuk borudan ibarettir. Kaynakla bağlanan ikinci borunun ucunda ısıtıcı ünite bir kelepçe ile bağlanmış ve su terazisiyle konumun dikliği kontrol edilmiştir. Lüle ağzı ile tartı üzerinde konumlandırılmış olan naftalin kalıbın üst yüzeyi arasındaki mesafe (H) dört kez değiştirilmiştir. Lüle çapı ile boyutsuzlaştırılan mesafe $H/D = 2, 4, 6$ ve 8 olarak alınmıştır. Isıtıcı ünitenin çalışma prensibi, kullanılan krom boru ve taşıyıcı sehpanın resmi Şekil 3.3' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3. a) Sıcak hava jeti ekipmanları b) pürüzsüz krom boru c) konum ayarlı sehpa

Sıcak hava geçirilen borunun iç çapı 6 cm uzunluğu hidrodinamik olarak tam gelişmiş akım elde etmek üzere $32D$ yani 192 cm seçilmiştir. Jet akımı elde etmek üzere Şekil 3.4’de gösterilen 3 cm çıkış çapına sahip bir lüle kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Jet akımı elde edilen lüle

Yukarıda detaylarıyla tanıtılan deney düzeneğinde evvela sıcak havanın jet çıkışında naftalin yüzeye çarptırılmaksızın serbest haldeki ortalama çıkış sıcaklığı ve hızları tespit edilmiştir. Hava hızı ve sıcaklığı sıcak tel anemometre prensibiyle çalışan bir hızölçerle ölçülmüştür. Sıcak tel anemometre yardımı ile sıvı ve gazların hızlarının ölçülmesi yaygındır. CEM-DT 8880 model sıcak tel anemometresi 210 x 75x 50 mm boyutlarında, 0-90°C sıcaklıkta çalışma aralığı, 0.1-25 m/s hız ölçüm aralığına sahiptir. Anemometrenin hız ölçümü için belirsizlik oranı cihaz kataloğundan hız ölçümü için $\pm\%5$, sıcaklık ölçümü için $\pm 1^\circ\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Prob bağlantısı ve ölçüleri Şekil 3.5 ’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Sıcak tel anemometre ve probu

Isıtıcı fan ünitesinin boruya gönderdiği akış hızı sıcak hava jetinin 3 ayrı kademesinde sırasıyla düşükten yükseğe doğru $V_1 = 8$ m/s, $V_2 = 15$ m/s ve $V_3 = 22$ m/s olarak ölçülmüştür. Böylece jet çıkışında Reynolds sayısı belirlenebilmiştir.

Aynı anemometre akımın ortalama çıkış sıcaklığını da vermektedir. Doğrulama amacıyla laboratuvarda hazır kurulu olan bir datalogger ve ısı çiftler yardımıyla jet çıkışında sıcaklık ölçümleri ayrıca alınmış ve sonuçlar uyumlu çıktığından anemometredeki değerler esas alınmıştır. Buna göre hava sıcaklıkları $T_1 = 30$ °C, $T_2 = 55$ °C ve $T_3 = 80$ °C olarak kaydedilmiştir. Ortam sıcaklığı ve basıncı datalogger üzerindeki basınç ve sıcaklık sensörleriyle sürekli olarak tespit edilmiştir. Deneyler süresince ortam sıcaklığının 25 °C ortam basıncının 0.98 atm civarında olduğu ve değerlerin değişmediği izlenmiştir.

3.2. Analoji Denklemlerinin Bulunması

Deneyssel çalışmada hassas terazi üzerindeki kaba düzgün şekilde yerleştirilen naftalin blokun hava çarptırılmadan önce kütlesi kaydedilmiştir. Bir kronometre ile süre tutularak belirli bir zaman aralığı boyunca sıcak hava naftalin yüzeye çarptırılmıştır. Çarpma esnasında kütle değişimi olmuş ancak tam değer hava ağırlığı etki etmemesi için fan kapatılır kapatılmaz alınmıştır. Aradaki fark kayıp kütle olarak hesap edilmiş, zaman bölünerek de kütle akısı bulunmuştur. Her bir hız, sıcaklık ve lüle çapı değişiminde benzer şekilde deney tekrarlanmıştır. Ölçülen kütle farkları yada diğer bir ifadeyle kütle transferi sistemde gelişen ısı transferinden ötürüdür. Dolayısıyla ısı-kütle transferleri arasındaki benzetimden (analoji) yola çıkarak aşağıdaki bölümde verilen hesaplama yöntemiyle ortalama ısı transferi Nusselt sayısı cinsinden elde edilmiştir. Elde edilen kütle transfer verileri ısı-kütle transferi benzetimi (analojisi) yardımıyla ısı transferi cinsinden elde edilmiştir. Bölüm 2.9'da kütle transferinin boyutsuz sayısı olarak bilinen ve Reynolds sayısına ve Schmidt sayısına bağlı olan Sherwood sayısı ile ısı transferi boyutsuz sayısı olarak bilinen ve Reynolds sayısı ile Prandtl sayısına bağlı olan Nusselt sayısı arasında bir ilişki olduğu anlatılmıştı. Buradan yola çıkarak Sherwood sayısı ile Nusselt sayısı arasında fonksiyonel bir ifade oluşturulabilir. Bu ilişkiyi oluşturmak üzere evvela sabit özellikli akımın transport denklemlerini hatırlayalım.

Enerji denklemi (ısı transferi):

$$\frac{D\theta}{D\tau} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial \hat{x}_i} \left[\left[1 + \frac{\alpha}{\nu} \frac{Pr}{Pr_t} \right] \frac{\partial \theta}{\partial \hat{x}_i} \right] \quad (3.1)$$

Burada θ boyutsuz sıcaklık farkını x 'in üzerindeki şapka sembolü boyutsuz parametreleri, α türbülans momentum yayılımını ve Pr_t türbülans Prandtl sayısını ($Pr_t = \alpha / \alpha_{th}$ 'dır ve α_{th} türbülans ısı difüzyonu) gösterir. Türbülans Prandtl sayısı şu parametrelerin fonksiyonudur:

$$Pr_t = f(Re, Pr, \hat{x}_i) \quad (3.2)$$

Isı taşınımında, hız ve ısı sınır tabakalardaki momentum ve ısı difüzyonunun bağıl nem büyüklükleri, bilindiği gibi boyutsuz Prandtl sayısı ile ifade edilir. Boyutsuz ısı transfer katsayısı olan yerel Nusselt sayısı ise fonksiyonel olarak şöyle yazılır:

$$Nu = f(Re, Pr, \hat{x}_i) \quad (3.3)$$

İki bileşenli ve tek-fazlı sistem için difüzyon denklemi (kütle transferi) ise şöyle yazılır:

$$\frac{Dm}{D\tau} = \frac{1}{ReSc} \frac{\partial}{\partial \hat{x}_i} \left[\left[1 + \frac{\alpha}{\nu} \frac{Sc}{Sc_t} \right] \frac{\partial m}{\partial \hat{x}_i} \right] \quad (3.4)$$

Burada m boyutsuz kütle miktarı ve Sc_t türbülanslı Schmidt sayısıdır ($Sc_t = \alpha / \alpha_{tm}$ ve α_{tm} türbülans kütle difüzyonudur). Anlaşılacağı üzere Schmidt sayısı ısı transferindeki Prandtl sayısına benzemektedir. Boyutsuz kütle transfer katsayısı olan yerel Sherwood sayısı fonksiyonel olarak şöyle yazılabilir:

$$Sh = f(Re, Sc, \hat{x}_i) \quad (3.5)$$

Burada Sherwood sayısı hakkında kısa bir açıklama yapmakta fayda olacaktır. Sherwood sayısı formülde de görüldüğü gibi yüzeydeki boyutsuz derişiklik gradyanına eşittir ve yüzeyde gerçekleşen taşınım kütle geçişinin bir ölçüsüdür. Nusselt sayısının ısı sınır tabakada gördüğü işlevi Sherwood sayısı derişiklik sınır tabakasında görür.

Görüldüğü gibi ısı ve kütle transfer denklemleri benzer ifadelerle sahiptirler. Bu yüzden eğer sınır şartları verilen geometri için benzerse, Pr ve Pr_t sayıları sırasıyla Sc ve Sc_t sayılarına eşit olduğu zaman (3.3) ve (3.5)' de görüldüğü gibi Nu ve Sh benzer çözümlere sahiptirler. Laminar akımda yukarıdaki denklemlerin sağ tarafındaki ikinci terimler düşer, boyutsuz formda türbülans difüzyonu da ortadan kalkar. Türbülanslı akımda elde edilen deneysel sonuçlar göstermiştir ki Pr_t sayısı Sc_t sayısına eşittir (yani Lewis sayısı, $Le = 1$ 'dir).

Deneylerle elde edilen ısı transferi sonuçları ampirik denklemlerle de bulunmuştur:

$$Nu = cRe^m Pr^n \quad (3.6)$$

Isı ve kütle transferi analogisine göre kütle transferi sonucu şöyle korele edilir:

$$Sh = cRe^m Sc^n \quad (3.7)$$

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

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (3.8)$$

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

Isı kütle transfer analogisini kullanmanın birçok yolu vardır. Naftalin süblimleşme yöntemi bunlardan yalnızca biridir. Eğer oda sıcaklığında hemen elde edilen yüzey sıcaklığı uniform ise naftalin kaplı test numunesi yüzeyde sabit buharlaşma basıncına ve derişimine sahip olacaktır. Bu sınır şartı ısı transferindeki sabit duvar sıcaklığı sınır şartına benzemektedir. Aktif olmayan duvar yani kütle transferine karşı geçirgen olmayan duvar yalıtımlı duvar sınır şartına benzerdir.

Yukarıda yazılan 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 derişimine sahiptir.

Naftalin buharının yüzeyde doymuş olan ama dış sınır tabakada sıfır olan çeşitli derişimlerinde, akışkan özelliklerinin değişimini belirleyebilmek mümkündür. Ancak naftalinin doymuş buhar basıncı yaklaşık olarak 298 K'de 11 Pa'dır, yani atmosfer basıncının 4 katı daha düşüktür. Böylece hava naftalin karışımının temel özellikleri saf havadan elde edilir ve akış alanı içerisinde sabit kabul edilir. Analojinin geçerli olabilmesi için ısı ve kütle transferindeki süreklilik ve momentum denklemlerinden elde edilen sınır şartlarının benzer olması gerekmektedir.

Yerel ve ortalama ısı transferini belirlemek üzere yapılacak bir naftalin süblimleşme deneyinde en basit haliyle hesaplama tekniği şu şekildedir: evvela yerel ölçüm yapılabilmişse ve naftalin yüzeyler üzerindeki süblimleşme derinlikleri hassas olarak ölçülebilmişse; bu süblimleşme derinlikleri kütle transfer katsayısını bulmada kullanılır. Bunun için ilk önce ısı transfer katsayısı şöyle bir hatırlanmalıdır:

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_\infty} \quad (3.9)$$

buna uygun olarak yerel kütle transfer katsayısı:

$$K_x = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(\delta_z/\delta_\tau)}{\rho_{v,w}} \text{ (yerel için)} \quad (3.10.a)$$

ve ortalama kütle transfer katsayısı:

$$K_m = \frac{\delta_m/\delta_\tau}{\rho_{v,w}} \text{ (ortalama için)} \quad (3.10.b)$$

bulunur. Burada $\rho_{v,\infty} = 0$ naftalinin serbest akımdaki buhar yoğunluğudur. Dolayısıyla doğal taşınımında:

$$K_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w}} \quad (3.10.c)$$

Denklem (3.9) ve (3.10.a) arasındaki mukayesede görölüyor ki; ısı transferindeki h , q_w ve $(T_w - T_\infty)$ terimleri kütle transferinde sırasıyla K , $\dot{m}$ 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. Naftalin buharlaşma yoğunluğu $\rho_{v,w}$ ideal gaz kanunundan buhar basıncı ve yüzey sıcaklığı kullanılarak tespit edilir.

$$\rho_{v,w} = P_{v,w}/RT_w \quad (3.11)$$

Son olarak Sherwood sayısı kütle transfer katsayısına, difüzyon katsayısına ve karakteristik uzunluğa bağlıdır. Karakteristik uzunluk çarpan jetin geometrisi dairesel olduğu için burada jet çıkış çapı olan “ d ” olarak alınacaktır.

$$Sh = \frac{K_m d}{D_{naf}} \quad (3.12)$$

Burada istenilirse Sherwood sayısı oranı kullanılabilir ve belirsiz bir difüzyon katsayısına bağlı olmayabilir. İşte kütle transfer katsayısı olan Stanton sayısı difüzyon katsayısının belirsizliğini ortadan kaldırıyor. Kütle transfer katsayısı olan Stanton sayısı ortalama ölçümler için:

$$St_m = \frac{Sh}{ReSc} = \frac{h_m}{U_\infty} \quad (3.13)$$

şeklinde bulunur. Ancak burada ısı ve kütle transfer analogisinde Schmidt sayısı devreye girer. Schmidt sayısı momentum ve kütle yayılım katsayılarının oranı olup şöyle gösterilir:

$$Sc = \frac{\nu_{hava}}{D_{naf}} \quad (3.14)$$

Formül açılımından hatırlanacağı üzere kütle transferinde yer alan Schmidt sayısı ısı transferindeki Prandtl sayısına benzetilmektedir.

$$\frac{Sh}{Nu} = \frac{g(Sc)}{g(Pr)} \quad (3.15)$$

Denklem (3.12) ve Denklem (3.13) yeniden düzenlenerek yazılacak olunursa Sherwood sayısı Schmidt sayısına bağlı şekilde yazılabilir.

$$Sh = \frac{K_m d}{D_{naf}} = \frac{K_m d}{\nu_{hava}} \frac{\nu_{hava}}{D_{naf}} = \frac{K_m d}{\nu_{hava}} Sc \quad (3.16)$$

Benzer şekilde Nusselt sayısının

$$Nu = \frac{h_m d}{k_{hava}} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edildiği biliniyor. Şimdi Denklem (3.16) ile Denklem (3.17) Denklem (3.15) deki gibi oranla gösterilirse:

$$\frac{\frac{K_m d}{\nu_{hava}} Sc}{\frac{h_m d}{k_{hava}}} = \frac{g(Sc)}{g(Pr)} \quad (3.18)$$

Nusselt sayısı için öngörülen ampirik bağıntılarda yer alan Prandtl sayısı üssünün Schmidt sayısı için de geçerli olduğundan yola çıkarak aşağıdaki benzerliği yazalım:

$$g(Sc) = Sc^{0.333}, \quad g(Pr) = Pr^{0.333} \quad (3.19)$$

$$\frac{K_m k_{hava}}{h_m \nu_{hava}} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0.333} \frac{1}{Sc} \quad (3.20)$$

olacaktır. Isı taşınım katsayısı h_m 'i yalnız bırakalım:

$$h_m = \frac{K_m k_{hava}}{\left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0.333} \frac{1}{Sc} \nu_{hava}} \quad (3.21)$$

$$Nu = \frac{K_m k_{hava}}{\left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0.333} \frac{1}{Sc} \nu_{hava}} \frac{d}{k_{hava}} \quad (3.22)$$

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Sherwood ve Nusselt Sayıları Hesaplanması

Deney sonuçlarının sunumu hesaplanan değerlerin açıklanışlarıyla birlikte yapılacaktır. Böylece hangi sonucun nasıl elde edildiği daha net anlaşılacaktır. Deneylere başlamadan önce jetlerin Reynolds sayısı hesaplanmalıdır.

$$Re = \frac{U_{jet} D}{\nu_{hava}} \quad (4.1)$$

Burada jet çıkış hızları $U_{jet} = 8, 15$ ve 22 m/s olarak üç ayrı değerde ölçülmüştür. Jet çıkış çapı $D = 0.03$ m'dir. Havanın viskozitesi daha önce Denklem (2.2) ile verilen ampirik bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır. Tüm deneyler aynı gün içerisinde, laboratuvar şartları çok değiştirilmeden tamamlanmıştır. Deneyler boyunca ortam havasının sıcaklığı $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Naftalin kalıba püskürtülen jet akımının sıcaklığı T_j daha önce de belirtildiği gibi 30°C , 55°C ve 80°C olarak ölçülmüştür. Bu durumda naftalin süblimleşme katsayısını etkileyen sıcaklık aslında aritmetik ortalama sıcaklıktır ($T_b = \frac{T_{\infty} + T_j}{2}$). Ölçülen ortam basıncı ve sıcaklık değerleri Denklem (2.2) de yerine koyularak cm^2/s cinsinden viskozite bulunmuş ardından m^2/s ye çevrilmiştir. Tablo 4.1'de Denklem (2.2.)'yi hesaba katarak bulunan Reynolds sayılarının hesaplanması gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Reynolds sayısı hesaplanması

Jet çıkış sıcaklığı T_{jet} (K)	Ort. jet çıkış hızı U_{jet} (m/s)	Ortam Basıncı P_{atm} (Pa)	Havanın viskozitesi ν_{hava} (m ² /s)	Re
303.16	8	99298.5	1.59519E-05	15045.20348
303.16	15	99299.5	1.59518E-05	28210.04062
303.16	22	99300.5	1.59516E-05	41375.14291
328.16	8	99296.5	1.715E-05	13994.13279
328.16	15	99298.5	1.71497E-05	26239.52747
328.16	22	99300.5	1.71494E-05	38485.41542
353.16	8	99298.5	1.83852E-05	13053.9593
353.16	15	99298.5	1.83852E-05	24476.17368
353.16	22	99300.5	1.83849E-05	35899.11111

Kütle kaybı ölçümü için deneyden önce ve sonra tartımı yapılan numunelere ait kütle farkları ve bu esnada geçen süre göz önüne alınarak süblimleşme hesaplanmıştır. Denklem (3.10.c) yeniden açık şekilde yazılırsa:

$$K_m = \left(\frac{\Delta m}{\Delta t (\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty})} \right) \quad (4.2)$$

Daha önce de açıklandığı üzere burada Δm deney öncesi ve sonrası ölçülen naftalin miktarlarının farkını yani süblimleşen naftalin miktarını göstermektedir. Δt süblimleşme boyunca geçen süreyi, $\rho_{v,w}$ yüzeydeki naftalin gazının yoğunluğunu, $\rho_{v,\infty}$ havadaki naftalinin yoğunluğunu göstermektedir. $\rho_{v,w}$ hesaplamak için denklem (3.11) ile verilen ideal gaz denkleminde faydalanılmıştır. İdeal gaz denkleminde bulunan $P_{v,w}$ yüzeydeki naftalinin buhar basıncını gösterir ve Tablo 2.3’de 0-80°C sıcaklık aralığı için kullanılan ampirik bağıntıyla hesaplanabilir.

$$R \ln P = 20.0885 + 72513[(1/298.15) - (1/T)] - 57.53[(298.15/T) - 1 + \ln(T/298.15)] \quad (4.3)$$

Havadaki naftalin gazının yoğunluğu $\rho_{v,\infty}$ bulmak için, öncelikle havaya taşınan naftalin gazı miktarının hesaplanması gerekmektedir. Naftalin yüzeyden süblimleşme miktarı bilindiğinden ötürü, süblimleşen kütle debisi $\dot{m}$ ile hacimsel debinin $\dot{Q}$ oranı

havanın naftalin gazı yoğunluğunu verecektir. Hacimsel debi jet hızı ve kesit alanının çarpımıyla bulunur. Böylece naftalin kalıptan kütle ortama kütle geçiş katsayısı K_m bulunmuş olur.

K_m değeri ve Denklem (2.1) 'de verilen ampirik bağıntı yardımıyla bulunan naftalin difüzyon katsayısı D_{naf} Denklem (3.12)'de yerine konularak Sherwood sayısı hesap edilir. Boyutsuz kütle transfer sayısı Sh hesaplamak üzere yapılan işlem sıralaması şu şekildedir:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m_s}{\Delta t_s} \rightarrow \dot{Q} = U_j A \rightarrow \rho_{v,w} = \frac{\dot{m}}{\dot{Q}} \rightarrow \rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R T_b} \rightarrow K_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} \rightarrow Sh = \frac{K_m D}{D_{naf}} \quad (4.4)$$

Tablo 4.2'de lüle-yüzey arası mesafe $H/D = 2$ durumunda Sh sayısını bulmak için yapılan adımlar ve elde edilen değerler verilmiştir. Her bir ölçüm suresi 120 s olarak alınmıştır. Toplam 9 deney yapılmıştır her bir deney önceden dökümü yapılan ve buzdolabı içinde süblimleşmeden muhafaza edilen yeni naftalin kalıpla yapılmıştır. Böylece doğal taşınımından kaynaklı süblimleşme sadece kalıbın jet çarptırılmadan tartıldığı 1 s, jetin çarptırıldığı 120 s ve son sıcaklığının tekrar tarttırıldığı 1 s'lik zamanda yani 122 s içerisinde gerçekleştirilmiştir. Literatürden alınan bilgilere göre 122 s doğal taşınım için yüksek bir zaman dilimi olmayıp sonucu en fazla %0.5 oranında değiştirecektir (Goldstein ve Cho, 1995). Bu nedenle doğal taşınım kaybı ihmal edilmiştir.

Artık Sherwood sayısından yola çıkarak Schmidt sayısı Sc (Denklem 3.16), ısı taşınım katsayısı h_m (W/m^2K) (Denklem 3.21) ve akabinde Nusselt sayısı Nu (Denklem 3.22) ile bulunur.

$$Sc = \frac{Sh \nu_{hava}}{K_m d} \rightarrow h_m = \frac{K_m k_{hava}}{\left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0.333} \frac{1}{Sc} \nu_{hava}} \rightarrow Nu = \frac{K_m k_{hava}}{\left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0.333} \frac{1}{Sc} \nu_{hava}} \frac{d}{k_{hava}} \quad (4.5)$$

Burada havanın ısı iletim katsayısı olan k_{hava} sıcaklığa (T_b) bağlı olarak tablolardan bulunmuştur. Prandtl sayısı hava için 0.701 olarak alınmıştır. Diğer değerler Tablo 4.3 yardımıyla tespit edilmiştir.

Tablo 4.2. Kütle transfer katsayısı, difüzyon katsayısı ve Sherwood sayılarının hesaplanması

Kütlesel debi $\dot{m}$ (kg/s)	Naftalinin yüzeydeki yoğunluğu $\rho_{v,w}$ (kg/m ³)	Naftalinin havadaki yoğunluğu $\rho_{v,\infty}$ (kg/m ³)	Naftalinin yüzeydeki basıncı $P_{v,w}$ (Pa)	Kütle transfer katsayısı K_m (m/s)	Naftalin difüzyon katsayısı D_{naf} (m ² /s)	Sherwood sayısı Sh
1.087E-05	0.00027104	6.8863E-05	1.34475853	0.00586246	7.1030E-06	24.760694
0.0000313	0.00042693	6.8863E-05	1.34475853	0.01084982	7.1029E-06	45.825115
4.548E-05	0.00043963	6.8863E-05	1.34475853	0.01591779	7.1029E-06	67.230778
4.287E-05	0.00116519	7.3784E-05	1.50075033	0.00570750	8.2769E-06	20.686913
6.306E-05	0.00093427	7.3784E-05	1.50075033	0.01073054	8.2768E-06	38.893752
7.553E-05	0.00078092	7.3784E-05	1.50075033	0.01578243	8.2765E-06	57.20587
8.327E-05	0.00247740	7.5954E-05	1.60655268	0.0056813	9.5368E-06	17.87170
9.889E-05	0.00160811	7.5954E-05	1.60655268	0.01068445	9.536E-06	33.61017
0.0001157	0.00131538	7.5954E-05	1.60655268	0.01570315	9.5366E-06	49.39850

Tablo 4.3. Schmidt sayısı, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı

Sc	h_m (W/m ² K)	Nu
2.245785937	11.24938183	16.87407275
2.245785937	20.81975956	31.22963935
2.245785937	30.54500483	45.81750725
2.072016259	9.654163207	14.48124481
2.072016259	18.15092235	27.22638353
2.072016259	26.69681855	40.04522783
1.92781752	8.54312423	12.81468635
1.92781752	16.06651018	24.09976527
1.92781752	23.61373289	35.42059934

4.2. Belirsizlik Analizi

Yapılan kütle transferi ölçümleri neticesinde ortaya çıkan hatalar Kline ve McClintock tarafından geliştirilen belirsizlik analizi yöntemi ile tespit edilmiştir. Yöntem literatürde deneysel bulguların hata analizi için en çok kullanılan belirsizlik analizi yöntemidir. Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise, Kline ve McClintock'a göre toplam hata şu şekilde bulunur:

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (4.6)$$

Bu çalışmada hesaplanan Reynolds sayısının hesaplanması aşamalarında ortaya çıkan belirsizlik Denklem (4.6) yardımıyla aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$w_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial U_j} w_{U_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \nu} w_{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} w_D\right)^2} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7 Re sayısına yani Denklem 4.1'e bölünürse:

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{w_{U_j}}{U_j}\right)^2 + \left(\frac{w_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{w_v}{v}\right)^2} \quad (4.8)$$

Benzer şekilde Denklem 4.4 ile bulunan Sherwood sayısı yeniden düzenlenirse şu hale gelir:

$$Sh = \frac{\frac{\Delta m_s}{\Delta t_s}}{\left[\frac{\frac{\Delta m_s}{\Delta t_s} - \frac{P_{v,\infty}}{R T_b}}{U_j A} \right]} \frac{D}{D_{naf}} = \frac{\frac{\Delta m_s}{\Delta t_s}}{\left[\frac{\frac{\Delta m_s}{\Delta t_s} - \frac{P_{v,\infty}}{R T_b}}{U_j A \Delta t_s} \right]} \frac{D}{D_{naf}} = \frac{\Delta m_s}{\Delta t_s} \frac{U_j A \Delta t_s R T_b}{[R T_b \Delta m_s - U_j A \Delta t_s P_{v,\infty}]} \frac{D}{D_{naf}}$$

Belirsizlik denkleminde yerine koyulur ve Sh sayısına bölünürse,

$$\frac{w_{Sh}}{Sh} = \sqrt{\left(\frac{w_{T_b}}{T_b}\right)^2 + \left(\frac{w_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{w_{P_{v,\infty}}}{P_{v,\infty}}\right)^2 + \left(\frac{w_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{w_{D_{naf}}}{D_{naf}}\right)^2 + \left(\frac{w_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta m_s}}{\Delta m_s}\right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta t_s}}{\Delta t_s}\right)^2 + \left(\frac{w_{U_j}}{U_j}\right)^2}$$

elde edilir.

Burada her bir parametrenin belirsizlik değeri, ölçüm cihazları için Bölüm 2’de verilen değerler, fiziksel özellikler gibi Tablolardan okunan değerler ve alan ve çap gibi büyüklükler için ise %0.01 alınarak denklemde yerine konulmuştur. Sonuçta Reynolds sayısı için ortalama belirsizlik %5 civarında çıkarken Sherwood sayısına ait belirsizlik yaklaşık olarak %8 oranında hesaplanmıştır.

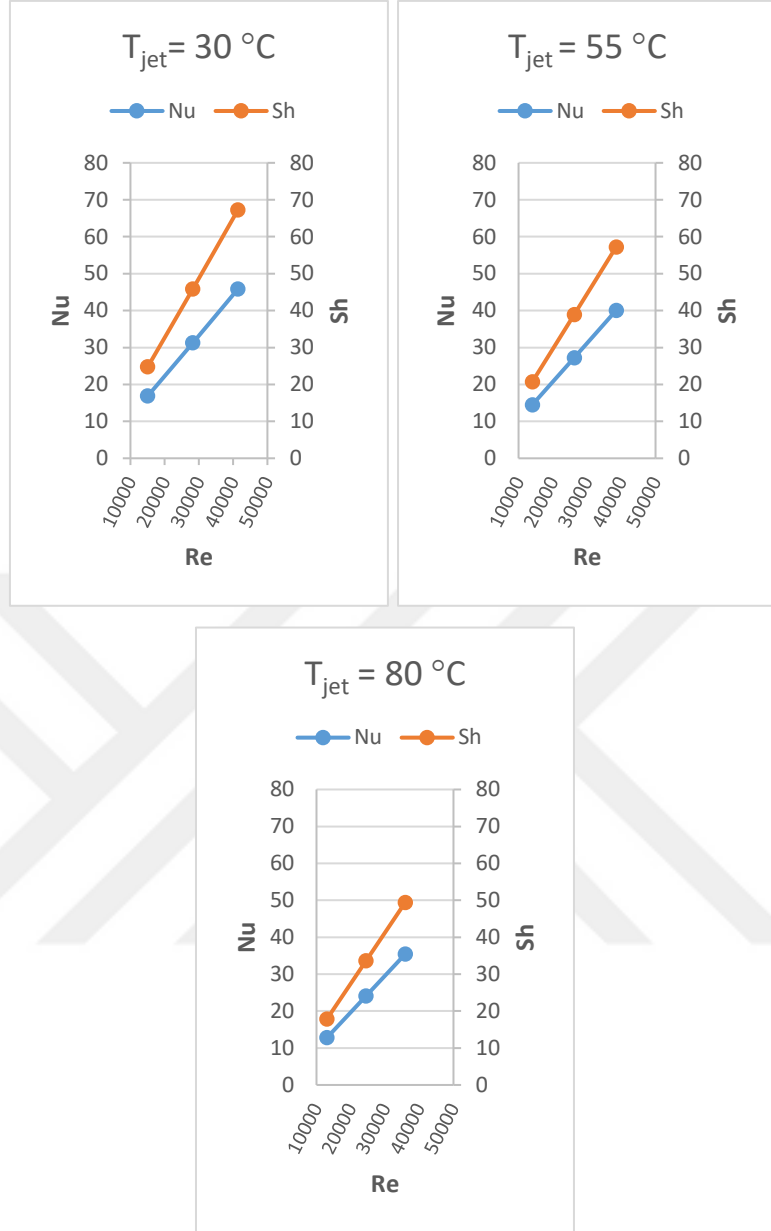
4.3. Grafiksel Sunumlarla Sh ve Nu Değişimi

Bu bölümde çıkan kütle transferi sonuçları ve analogi ile bulunan isi transfer sonuçları grafiksel olarak değerlendirilecektir. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te lüle-naftalin blok arası mesafe $H/D = 2$ için ’de Nusselt sayısı ve Sherwood sayısı iki ayrı dikey eksen üzerinde gösterilmiştir ve her ikisinin aynı Reynolds sayısına bağlı değişimi kıyaslanmıştır. Yanyana sıralanan üç grafik eksen başlıklarından da anlaşılacağı üzere üç ayrı jet çıkış sıcaklığına bağlı Nu ve Sh değerleridir.

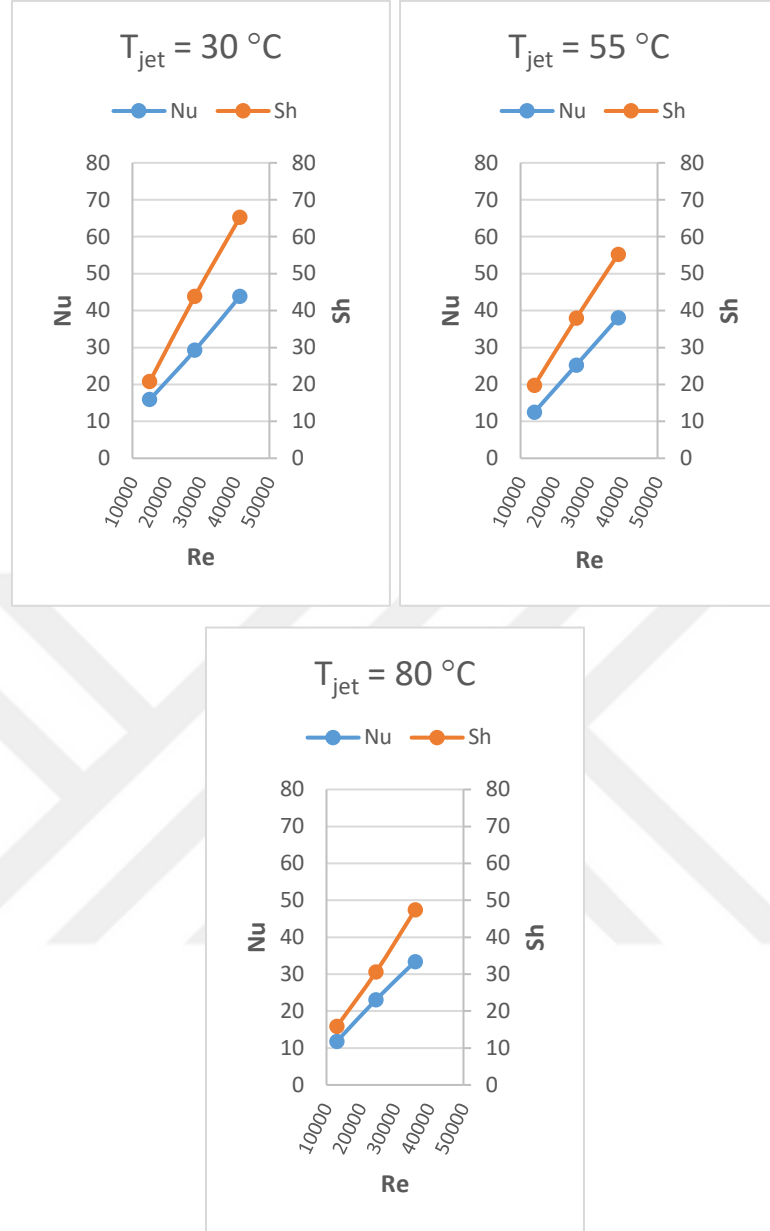
Lüle ile naftalin yüzeyin en yakın olduğu $H/D = 2$ mesafesinde jet çıkış hızına bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısı arttıkça kütle transferi de artmıştır. Momentum artışının kütle transferini arttıracak akışkanlar mekaniğinden bilinen bir durumdur ve

burada da gözlemlenmiştir. Artan jet çıkış sıcaklığı naftalin yüzeyden daha fazla miktarda süblimleşmeye sebebiyet verdiğiinden süblimleşen madde miktarı sıcaklıkla beraber Tablo 4.2’de de görüldüğü gibi artmıştır. Yani lüleden çıkan sıcak hava daha fazla miktarda naftalinin süblimleşerek kaybolmasına sebep olmuştur. Ancak Sh sayılarına bakıldığında durumun burada aynı olmadığı görülmektedir. En yüksek sıcaklık olan $T_{jet} = 80^{\circ}\text{C}$ ’de, en düşük Sh sayıları hesaplanmıştır. Yani artan jet çıkış sıcaklığı süblimleşmeyi arttırmış ancak boyutsuz kütle transfer sayısını artıramamıştır. Bunun en önemli sebebi hesaplamalarda da görüleceği gibi naftalinin difüzyon katsayısıdır. Tablo 4.2’de görüldüğü gibi kütle geçiş katsayısı olan K_m değerleri artan sıcaklıkla beraber artmış, ancak değeri ortam sıcaklığına son derece bağlı olan difüzyon katsayısı da artan sıcaklıkla beraber arttığı için Sh sayısında azalmaya sebebiyet vermiştir. Söz konusu durum bundan sonraki grafiklerde sunulan tüm H/D mesafeleri için benzer çıkmıştır.

Şekil 4.1’de görülen diğer bir önemli sonuç Nu ve Sh sayılarının birbirine eşit çıkmamasıdır ki bu da doğal konveksiyonun ihmal ve belirsizlik ve deneysel hatalar gibi önemli sebeplerle açıklanabilir. Ancak grafiklerin tamamında Nu ve Sh sayılarının eğilimleri birbirine benzer çıkmıştır.

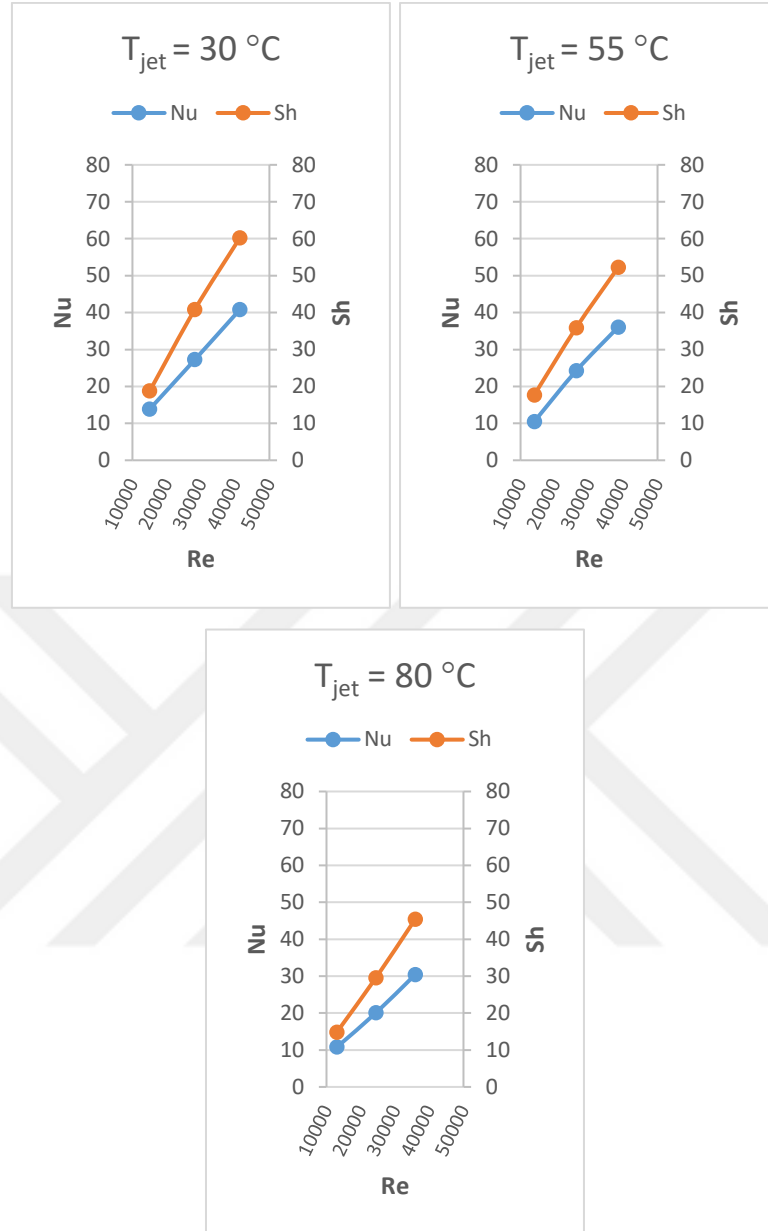


Şekil 4.1. $H/D = 2$ için farklı jet sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları

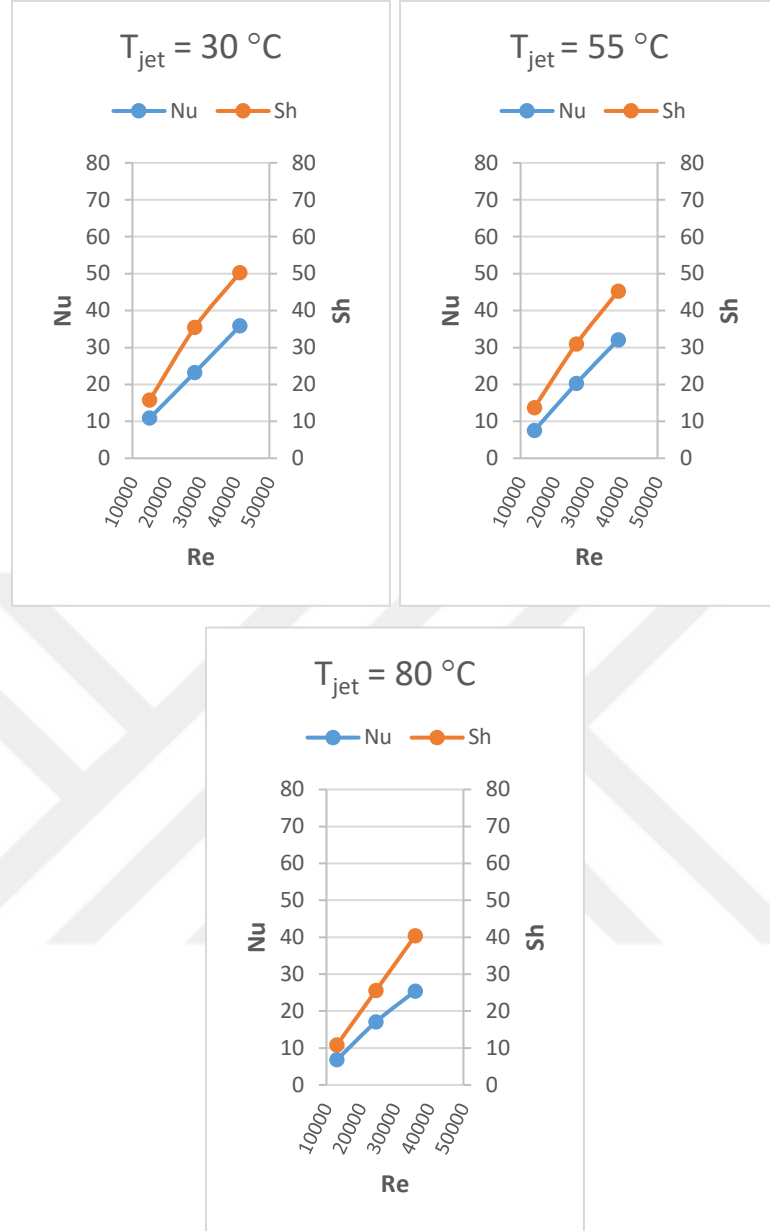


Şekil 4.2. $H/D = 4$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları

Şekil 4.2’de $H/D = 4$, Şekil 4.3’te $H/D = 6$ ve Şekil 4.4’te $H/D = 8$ için Sh ve Nu sayıları gösterilmiştir. Artan lüle-yüzey mesafesi ile beraber kütle transferinde hafif bir düşüş görülmüştür. Bunun dışındaki diğer değişimler $H/D = 2$ ’dekine benzerdir. Ancak H/D arttıkça yani lüle-yüzey arası mesafe arttıkça kütle transferi sayısı olan Sh azalmıştır.

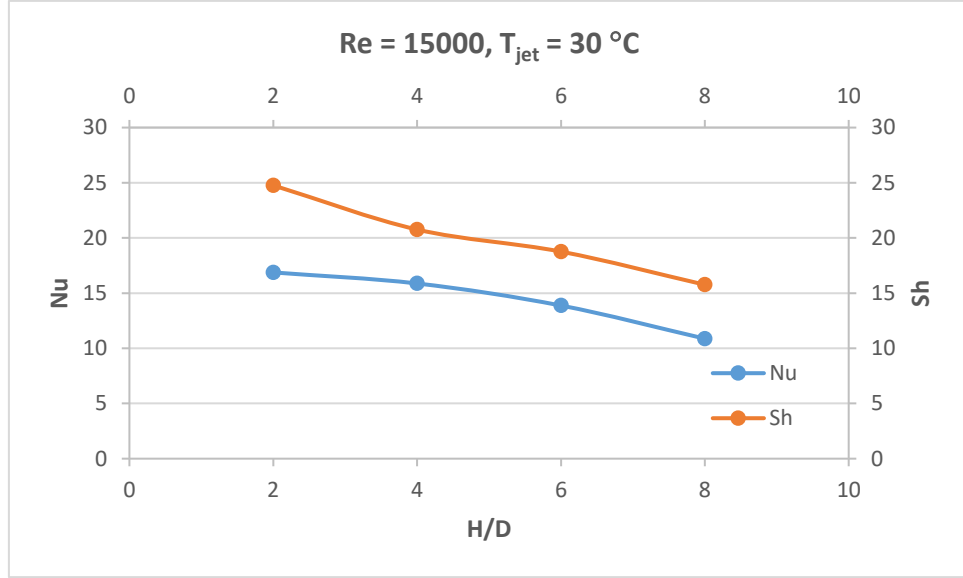


Şekil 4.3. $H/D = 6$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları

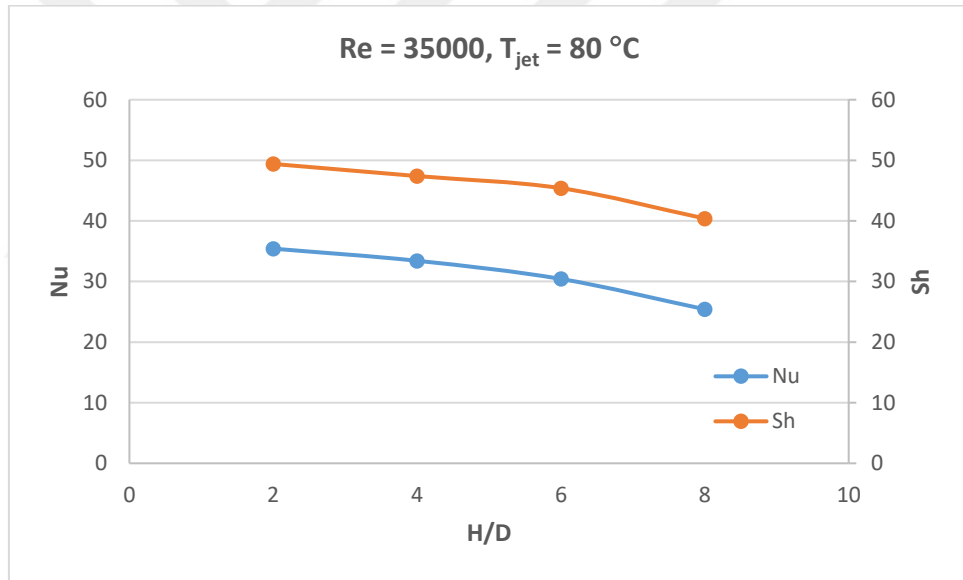


Şekil 4.4. $H/D = 8$ için jet çıkış sıcaklığında ve Re sayısında bulunan Nu ve Sh sayıları

Şekil 4.5 test edilen en düşük jet çıkış hızı değerinde ($U_j = 8\text{ m/s}$, $Re \sim 15000$) ve en düşük jet çıkış sıcaklığı değerinde ($T_{jet} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) lüle-yüzey mesafesi ile Sh - Nu sayıları arasındaki değişimi göstermektedir. Naftalin yüzeyle jet ağzı arasındaki mesafe arttıkça Sh sayısı düşmüştür. Benzer şekilde Şekil 4.6 test edilen en yüksek hız ($U_j = 22\text{ m/s}$, $Re \sim 45000$) ve sıcaklık ($T_{jet} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) değerlerindeki H/D eğilimini göstermektedir. Burada da artan H/D ile azalan Sh ve Nu söz konusudur.



Şekil 4.5. $Re = 15000$ ve $T_{jet} = 30\text{ °C}$ için Nu ve Sh sayılarının H/D ile değişimi



Şekil 4.6. $Re = 45000$ ve $T_{jet} = 80\text{ °C}$ için Nu ve Sh sayılarının H/D ile değişimi

Son olarak Sh sayısı ve Nu sayısı ile ilgili bazı korelasyonlar elde edilmiştir. STATISTICA paket programı kullanılarak elde edilen lineer olmayan yaklaşım yöntemi ile regresyon katsayısı %99 olan üstel ampirik bağıntılar bulunmuştur. Buna göre tüm sıcaklık değerleri için Sh ve Nu sayıları şöyle değişmektedir.

$$Sh = 0.0019 Re^{0.85} H/D^{-0.3}$$

$$Nu = 0.0013 Re^{0.78} H/D^{-0.25}$$

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada soğuk bir yüzeyin sıcak hava jetiyle ısıtılması problemi kütle transfer yöntemi olan naftalinin süblimleşmesi yöntemiyle ele alınmıştır. Döküm yöntemiyle elde edilen naftalin kalıba üç farklı jet çıkış sıcaklığı ($T_{jet} = 30, 55, 80$ °C) ve jet çıkış hızında ($U_{jet} = 8, 15, 22$ m/s) hava akımı çarptırılmıştır. Jet ile naftalin yüzey arasındaki mesafe dört kez ($H/D = 2, 4, 6, 8$) değiştirilmiştir. Ortaya çıkan kütle transferi Sherwood sayısı ile tespit edilmiştir. Isı transferi ile kütle transferi arasındaki benzerlikten yola çıkılarak oluşturulan $Sh-Nu$ benzeşimi ile Nusselt sayıları da bulunmuştur. Sonuçlar her iki boyutsuz sayı cinsinden tek grafik üzerinde gösterilmiştir. Çıkan genel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Jet çıkış sıcaklığı arttıkça soğuk naftalin yüzeyden süblimleşmeyle kütle transferi artmasına rağmen, artan sıcaklıkla beraber artan naftalin difüzyon katsayısı Sherwood sayısında düşüşe sebep olmuştur. Benzer durum hesaplanan Nusselt sayıları için de geçerlidir.
- ✓ Lüle ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe arttıkça Sherwood sayısı azalmıştır.
- ✓ Jet çıkış hızı arttıkça Sherwood sayısı artmıştır.
- ✓ Çalışmada belirsilik analizi yapılmış ve bulunan Sherwood sayılarının %8 hata içerdiği görülmüştür.
- ✓ Deneyler çok kısa zaman dilimleri içinde gerçekleştirildiğinden doğal taşınım kayıpları dikkate alınmamıştır.

KAYNAKLAR

- Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sparke, C.H.S.** 1975. The vapor pressure of naphthalene, *Journal of Chemical Thermodynamics*, **7**, 1173-1176.
- Altemani C.A.C. and Menegaido, L.L.** 1995. Enhanced Convective Cooling of a PCB in a Duct, EEP - *Advances in Electronic Packaging, ASME*, **10-2**, 817 – 822.
- Arzutuğ, M.E.** 2003. Mass Transfer in Impinging Swirl Jets, (PhD Thesis), Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Arzutuğ, M.E., Yapıcı, S.** 2009. Electrochemical Mass Transfer in Impinging Swirl Jets, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 1593-1602.
- Brundrett, E. and Baines, W.D.** 1964. The production and diffusion of vorticity in duct flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **19**, 375.
- Burns, D.V.** 1991. *Local Mass Transfer in Turbulent Flow Downstream of a 90° Bend in a Duct of Square Cross Section*, (Yüksek Lisans Tezi), University of Minnesota.
- Chen, D., Li, F., Ray, A.K.** 2001. External and Internal Mass Transfer Effect on Photocatalytic Degradation, *Catalysis Today*, **66**, 475-485.
- Chen, P.H., Goldstein, R. J.** 1992. Convective Transport Phenomena on the Suction Surface of a Turbine Blade Including the Influence of Secondary Flows Near the Endwall, *Journal of Turbomachinery*, **114(4)**, 776-787.
- Chen, D.W., Ray, A.K.** 1998. Photodegradation Kinetics of 4-Nitrophenol in TiO₂ Suspension, *Water Res.*, **32(11)**, 3223-3234
- Chen, Y.M., Lee, W.T., Wu, S.J.** 1998. Heat (Mass) Transfer Between an Impinging Jet and a Rotating Disk, *Heat and Mass Transfer*, **34**, 195-196.
- Cho, H.H. Jabbari, M.Y., Goldstein R.J.** 1997. Experimental Mass (Heat) Transfer In and Near a Circular Hole in a Flat Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40(10)**, 2431-2443.

- Cho, K.** 1989. Measurement of the Diffusion Coefficient of Naphthalene Into Air, (PhD Thesis) University of New York.
- Cho, H.H.** 1992. Heat/Mass Transfer Flow Through an Array of Holes and Slits, (PhD Thesis), University of Minnesota.
- Chyu, M.K., Natarajan, V.** 1996. Heat Transfer on the Base Surface of Threedimensional Protruding Elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **39(14)**, 2925-2935.
- Eckert, E.R.G.** 1976. Analogies to Heat Transfer Processes in E.R.G Eckert and R. J. Goldstein (eds), *Measurement in Heat Transfer*, **2**, 397-423.
- Eckert, E.R.G. Drake, R.M.** 1972. Analysis of Heat and Mass Transfer. *McGraw-Hill*, New York, 373-386, 728-734.
- Feroz S. Prasad V.S.R.K.** 2006. Mass Transfer Coefficients at the Stagnation Point with Submerged Impinging Multi-Jet Flow of Fluid Electrolyte, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, **30**, 221-229.
- Gessner, F.B.** 1973. The Origin of Secondary Flow in Turbulent Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **58**, 1.
- Gessner, F.B. Jones, J.B.** 1965. On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels, *Journal of Fluid Mechanics*, **23**, 689.
- Goldstein, R.J., Cho, H.H.** 1995. A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **10**, 416-434.
- Goldstein, R.J., Chyu, M.K., Hain, R.C.** 1985. 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. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **28(5)**, 977-985.
- Hong, S. K., Lee, D. H., and Cho, H. H.** 2009. Effect of Jet Direction on Heat/Mass Transfer of Rotating Impingement Jet. *Applied Thermal Engineering*, **29(14-15)**, 2914-2920.
- İşman, M.K.** 2011. Tekli ve Çoklu Çarpan Hava Jetlerinde Taşınım İle Isı ve Kütle Transferinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi.

- Kataoka, K. Mizushima, T.** 1974. Local Enhancement of the Rate of Heat-Transfer in an Impinging Round Jet by Free-Stream Turbulence, *Society of Heat Transfer of Japan*, **2**, 305-309.
- Kudchadker, A.P., Kudchadker, S.A. Wilhoit R.C.** 1978. API 707, Naphthalene, *American Petroleum Institute*, Washington D.C.
- Park J.H. and Yoo S.Y.** (2004). A Naphthalene Sublimation Study on Heat/Mass Transfer for Flow Over a Flat Plate, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **18(7)**, 1258-1266.
- Pekdemir, T. and Davies, T.W.** (1998). Mass Transfer From Stationary Circular Cylinders in A Submerged Slot Jet of Air, *Int. J Heat Mass Transfer*, **41(15)**, 2361-2370.
- Perkins, H. J.** (1970). The Formation of Streamwise Vorticity in Turbulent Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **44**, 721.
- Popiel, C.O., and Boguslawski, L.** (1988). Effect of Flow Structure on the Heat or Mass Transfer on a Flat Plate in Impinging Round Jet, *Proceedings of 2nd UK national Conference on Heat Transfer, University of Strathclyde*, **1**, 663.
- Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H.H.** (2003). Heat (Mass) Transfer on Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling Systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **17(1)**, 95-102.
- Rojas, J. and Yianneskis, M.** (1984). The Development of Liquid Crystal Techniques for the Measurement of Wall Heat Transfer Coefficients in Ducts, *Preliminary Report*, Imperial College of Science and Technology.
- Russ, G. and Beer, H.,** (1997). Heat Transfer and Flow Field in a Pipe with Sinusoidal Wavy Surface -II Experimental Investigation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **40(50)**, 1071–1081.
- Solak, I. and Laval J. P.** (2017). Large-Scale Motions From a Direct Numerical Simulation of a Turbulent boundary Layer, *Physical Review E*, **98(3)**
- Sparrow, E. M., and Geiger, G. T.** (1985). Local and Average Heat Transfer Characteristics for a Disk Situated Perpendicular to a Uniform Flow. *Journal of Heat Transfer*, **107(2)**, 321-326.

- Sparrow, E. M., and Lovell, B. J.** (1980). Heat transfer characteristics of an obliquely impinging circular jet, *Journal of Heat Transfer*, **102**(2), 202-209.
- Sparrow, E. M., and Wong, T. C.** (1975). Impingement Transfer Coefficients Due to Initially Laminar Slot jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **18**(5), 597-605.
- Schmidt, T.E.** (1949). Heat transfer calculation for extended surfaces, *Refrigerating Engineering*, **57**, 351- 357.
- Şara O.N., Erkmen J., Yapıcı, S. and Çopur M.** (2008). Electrochemical mass transfer between an impinging jet and a rotating disk in a confined system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **35**, 289–298.
- Taylor, R.E., Graziani, R.A., F.A., Blair, J.R. ve Mayle** (1980). An experimental study of endwall and airfoil surface heat transfer in a large scale turbine blade cascade. *Journal of Engineering for Power*, **102**, 257-267.
- Trávníček, Z., & Tesař, V.** (2003). Annular Synthetic Jets Used for Impinging Flow Mass Transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 3291.
- Ward, J., Mahmood, M.,** (1982). Heat Transfer From a Turbulent, Swirling Impinging Jet, *7th International Heat Transfer Conference*, **HTD-3**, 401-407.
- Yapıcı, S., Kuslu, S., Özmetin, C., Erşahan, H. and Pekdemir, T.** (1999). Surface shear stress for submerged jet impingement using electrochemical technique” *Int. J. of Applied Chemistry*, **29**, 185-190.
- Vallis, E.A, M.A. Patrick and A.A. Wragg** (1978). Radial Distribution of Convective Heat Transfer Coefficient Between an Axisymmetric Turbulent Jet and a Flat Plate Held Normal to the Flow. *6 th International Heat Transfer Conference, Toronto*.

Abdullah Bingöl

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Lojmanları M-18

Elazığ

E-Mail: abduallah233@gmail.com

Telefon: 0531 219 38 17

KİŞİSEL BİLGİLER

- İsim: Abdullah BİNGÖL
- Doğum Yeri: Elazığ
- Doğum Tarihi: 20.11.1992
- Uyruğu: Türkiye Cumhuriyeti
- Medeni Durumu: Evli
- Askerlik Durumu: Yapıldı
- Ehliyet: B Sınıfı



İŞ TECRÜBELERİ

- MEDICAL PARK ELAZIĞ 08.2019- | Elazığ - Türkiye | Teknik Hizmetler Yöneticisi
- TETİŞ YAPI İNŞAAT A.Ş. 08.2015 – 01.2019 | Elazığ - Türkiye | Makine Mühendisi
- Dpoint GRUP - 08.2014 - 10.2014 (2 ay) | Barcelona - İspanya | Stajyer
- SANICA ISI SANAYİ - 07. 2013 - 08. 2013 (1 ay) | Elazığ - Türkiye | Stajyer
- SARSILMAZ SİLAH SANAYİ - 07. 2012 - 08. 2012 (1 ay) | Düzce - Türkiye | Stajyer

ÖĞRENİM DURUMU

- Üniversite (Yüksek Lisans) - Fırat Üniversitesi - 09. 2015 - Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Enerji A.B.D | Elazığ - Türkiye |
- Üniversite (Lisans) - Fırat Üniversitesi - 09. 2010 - 07. 2014 Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği | Elazığ - Türkiye |
- Üniversite (Lisans) - Bialystok University of Technology - 20.02.2012-19.06.2012 Erasmus Değişim Programı | Bialystok - Polonya |
- Lise - Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi - 06. 2010 Fen Bilimleri

YABANCI DİL VE DÜZEYİ

- İngilizce : Çok iyi – [Anadolu Lisesi (4 Yıl) , Yurtdışı Tecrübesi (6 ay)] Reading (Çok iyi), Listening (Çok iyi), Writing (Çok iyi), Speaking (Çok iyi)

BİLGİSAYAR BECERİLERİ

- AutoCAD
- SolidWorks
- Microsoft Office

GÖREV ALINAN PROJELER

- TOKİ-BİNGÖL MERKEZ İNÖNÜ MAHALLESİ 2. ETAP 620 ADET KONUT YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL,KESİN KABUL
- TOKİ-BİNGÖL MERKEZ İNÖNÜ MAHALLESİ 32 DERSLİKLİ İLKÖĞRETİM OKULU YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL,KESİN KABUL,
- TOKİ-BİNGÖL İL TERMİNAL BİNASI İLE ALTYAPI VE ÇEVRE DÜZENLEMESİ İNŞAATI İŞİ-PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL,KESİN KABUL,
- TOKİ-NİĞDE ULUKIŞLA 425 KONUT+CAMI+TİCARETHANE YAPIM İŞİ, PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL, KESİN KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ELAZIĞ EĞİTİM VE ARAŞTIRMA HASTANESİ KVC EK BİNASI YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL,KESİN KABUL,
- ELAZIĞ İL HÜKÜMET KONAĞI BİNASI, KAPALI OTOYOL VE MEYDAN DÜZENLEMESİ YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI, GEÇİCİ KABUL,
- TOKİ-MALATYA İLİ AKÇADAĞ İLÇESİ 25 YATAKLI DEVLET HASTANESİ İNŞAATI İLE ALTYAPI VE ÇEVRE DÜZENLEMESİ İŞİ-KESİN KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-MALATYA YEŞİLYURT 45 YATAKLI DEVLET HASTANESİ TADİLAT, GÜÇLENDİRME, NİTELİKLİ HALE GETİRME VE EK BLOK YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI,GEÇİCİ KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ADİYAMAN GÖLBAŞI 75 YATAKLI DEVLET HASTANESİ YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI, GEÇİCİ KABUL, KESİN KABUL,
- ELAZIĞ MERKEZ KÜLTÜRPARK REKREASYON ALANI YAPIM İŞİ-GEÇİCİ KABUL, KESİN KABUL,
- İLLER BANKASI A.Ş. ELAZIĞ BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ HİZMET BİNASI VE MÜŞTEMİLATI YAPIM İŞİ-KESİN KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ORDU KUMRU 50 YATAKLI DEVLET HASTANESİ YAPIM İŞİ- PROJE UYGULAMASI, GEÇİCİ KABUL,KESİN KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ÇANAKKALE LAPSEKİ 30 YATAKLI DEVLET HASTANESİ YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI, GEÇİCİ KABUL,
- TOKİ-BALIKESİR İLİ DURSUNBEY İLÇESİ 75 YATAKLI DEVLET HASTANESİ İLE ALTYAPI VE ÇEVRE DÜZENLEMESİ YAPIM İŞİ-KESİN KABUL,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ANTALYA FİNİKE 75 YATAKLI DEVLET HASTANESİ YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI,
- KARAYOLLARI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ-ANTALYA FİNİKE KGM MİSAFİRHANE YAPIM İŞİ-PROJE UYGULAMASI ,
- SAĞLIK BAKANLIĞI-ERZİNCAN DEVLET HASTANESİ-165 YATAKLI EK BİNA YAPIM İŞİ- PROJE UYGULAMASI (PROJE DEVAM EDİYOR),

- ELAZIĞ İLİ CUMHURİYET MAHALLESİ 277 ADET KONUT VE ÇEVRE DÜZENLEMESİ YAPIM İŞİ- PROJE UYGULAMASI (PROJE DEVAM EDİYOR)

