

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİKRO KANALLARDA ISI TRANSFERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Aylin CANAY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fethi HALICI

Eylül 2007

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİKRO KANALLARDA ISI TRANSFERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Aylin CANAY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez .. / .. /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fethi HALICI Yrd.Doç.Dr. Kemal ÇAKIR Yrd.Doç.Dr. Hasan KÜÇÜK
Jüri Başkanı Üye Üye

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması 2003-K-120-970 numaralı “Mikro Kanallardaki Akışın ve Isı Geçişinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi” başlıklı DPT projesi kapsamında hazırlanmıştır.

Beni bu çalışmaya yönlendiren, bu tezi hazırlamamda beni değerli fikirleriyle aydınlatan, karşılıklı fikir alışverişinde bulunduğumuz değerli öğretim üyesi Prof. Dr. Fethi HALICI’ ya, moral takviyesinde bulunan, bana güvenip her zaman destekleyen aileme ve en önemlisi başından sonuna kadar çalışmam sırasında beni yalnız bırakmayan, her zaman desteğini hissettiğim sevgili eşim Kadir CANDAK’ a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ISI GEÇİŞİ VE MİKRO KANALLAR.....	3
2.1. Isı Geçişi Nedir?.....	3
2.2. Isı Geçişi Çeşitleri.....	3
2.3. İletim İle Isı Geçişi ve Fourier Isı İletim Kanunu.....	5
2.4. Taşınım İle Isı Geçişi ve Newton' un Soğuma Kanunu.....	6
2.5. Işınım İle Isı Geçişi ve Stefan-Boltzmann Kanunu.....	8
2.6. Karma Isı Geçişi (İletim + Taşınım).....	10
2.7. Mikro Kanal Nedir?.....	11
2.8. Mikro Kanalların Gelişimi.....	11
2.9. Mikro Kanalların Sınıflandırılması.....	12
2.10. Mikro Kanalların Kullanım Sebepleri.....	13
2.11. Kanalların Minyatürleştirilmesi.....	14

BÖLÜM 3.

MİKRO KANALLAR HAKKINDA KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	16
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	27
3.1.1. Deney 1 : Mikro kanallarda iki fazlı akış.....	27
3.1.2. Deney 2 : Mikro kanal yapılarında tek fazlı su akışı için taşınım ile ısı geçişi.....	31
3.1.3. Deney 3 : Mikro kanallarda yoğuşma ile ısı geçişinde basınç kaybı ve ısı geçişi.....	34
3.1.4. Deney 4 : İki boyutlu mini kanallar ve mikro kanallarda maksimum ısı akışı.....	43

BÖLÜM 4.

MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİ VE AKIŞ ÇEŞİTLERİ.....	46
4.1. Mikro Kanallarda Tek Fazlı Akış.....	48
4.2. Mikro Kanallarda İki Fazlı Akış.....	51
4.3. Akış Rejimi Tanımlaması.....	53
4.3.1. 25 µm silis tüpte hava-su iki fazlı akışı.....	56
4.3.1.1. Dağınık kabarcıklı akış.....	56
4.3.1.2. Darbeli akış.....	58
4.3.1.3. Sıvı halka akış.....	58
4.3.1.4 Sıvı küme akışı.....	59
4.3.2. 50 µm silis tüpte buhar-su iki fazlı akışı.....	59
4.3.3. 100 µm kuvars tüpte hava-su iki fazlı akışı.....	60
4.4. Normal Boyuttaki Tüpler ve Mikro Kanallardaki Akış Arasındaki Farklar.....	63
4.4.1. Dairesel borularda akış.....	63
4.4.2. Laminer akış.....	69
4.4.3. Türbülanslı akış.....	70
4.5. Isı Geçişi Performansı.....	72
4.6. Basınç Kaybı.....	73
4.7. Isı Geçişi Tahmini.....	76

BÖLÜM 5.

MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	78
5.1. Basınç Azalması Etkisi.....	79
5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Etkisi.....	79
5.3. Sıkıştırılabilirlik Etkisi.....	87
5.4. Kanal Şeklinin Etkisi.....	90
5.5. Hidrolik Çap Etkisi.....	92
5.6. Yüzey Islaklığı Etkisi.....	94
5.7. Seyrelme Etkisi.....	94
5.8. Kanal Duvarındaki Eksenel Isı Yayılmının Etkisi.....	96
5.9. Duvar-Akışkan Birleşik Isı Geçişi Etkisi.....	97

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	99
KAYNAKLAR.....	102
ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

D	: Kanal çapı, m
R	: Kanal yarıçapı, m
l	: Kanal uzunluğu, m
W	: Kanal genişliği, m
H	: Kanal yüksekliği, m
f	: Sürtünme faktörü
Q	: Hacimsel debi, m ³ /s
U	: Akış hızı, m/s
U _m	: Ortalama hız, m/s
ν	: Kinematik viskozite, m ² /s
μ	: Dinamik viskozite, Pa.s
Δp	: Basınç kaybı, Pa
j	: Yüzeysel hız, m/s
λ	: Laplace sabiti
ρ	: Yoğunluk, kg/m ³
G	: Gaz fazı
L	: Sıvı fazı
D _h	: Hidrolik çap, m
h	: Isı taşınım katsayısı, W.m ⁻² .K ⁻¹
k	: Isı iletim katsayısı, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Nu	: Nusselt sayısı
Nu _{ort}	: Ortalama Nusselt sayısı
P ₀	: Poiseuille sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
Ks	: Knudsen Sayısı

E_c	: Eckert sayısı
Ma	: Mach sayısı
Br	: Brinkman sayısı
q''	: Isı akısı, W/m^2
\bar{q}''	: Ölçülemeyen ısı değişimi
T	: Sıcaklık, K
T_i	: Sıvı giriş sıcaklığı, K
T_w	: Çeper sıcaklığı, K
ΔT_m	: Logaritmik sıcaklık farkı
W_c	: Merkezden merkeze mikro kanal mesafesi, m
W_t	: Mikro kanal plakalar arası genişlik, m
l	: Laminer akış
t	: Türbülanslı akış
Q	: Toplam ısı geçişi, W
E_z	: Elektrik alan kuvveti
c_p	: Akışkanın özgül ısı, $kJ/kg.K$
e	: Elektron yükü, $1.6021 \times 10^{-19} C$
k_b	: Boltzmann sabiti, $1.3805 \times 10^{-23} Jmol^{-1}K^{-1}$
k_f	: Akışkanın ısıl iletkenliği, $W/m.K$
ε	: Işınım yayma katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	İletim, taşınım ve ışınım ile ısı geçiş şekilleri.....	4
Şekil 2.2.	Bir boyutlu ısı iletimi.....	5
Şekil 2.3.	Levha üzerindeki akışta hız ve sıcaklık dağılımları.....	7
Şekil 2.4.	İç içe iki yüzey arasında ısı ışınımı.....	9
Şekil 2.5.	İletim ve taşınım ile ısı geçişi.....	10
Şekil 2.6.	Bouasse tarafından düzenlenen Poiseuille test donanımı.....	12
Şekil 2.7.	Erimiş silis bir mikro tüpün (a) ve silikon plaka üzerine kimyasal aşındırma ile yapılmış dikdörtgen mikro kanalların (b) SEM resimleri.....	15
Şekil 3.1.	Hava-su akışı için deney mekanizmasının şematik bir resmi.....	28
Şekil 3.2.	50 µm dairesel tüpte buhar-su deneyinin şeması.....	29
Şekil 3.3.	Karıştırma odası.....	29
Şekil 3.4.	Mikro kanallı yapılarda su akışı için tek fazlı taşınım ile ısı geçişi deney düzeneği	33
Şekil 3.5.	Test düzeneği şeması.....	35
Şekil 3.6.	Termal genleşme tekniği çizimi.....	36
Şekil 3.7.	Paralel çoklu dairesel borular.....	39
Şekil 3.8.	Dairesel olmayan borular.....	39
Şekil 3.9.	İncelenen geometriler.....	39
Şekil 3.10.	Aralıklı basınç kaybı modeli için varsayılan akış örneğinin kesiti	41
Şekil 3.11.	Dairesel kanal sonuçlarının ölçülen basınç kaybı ile karşılaştırılması.....	41
Şekil 3.12.	Dairesel olmayan kanal için model sonuçlarının ölçülen basınç kaybı ile karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.13.	L/D_h sabitinde kütle akısı, nitelik ve hidrolik çap etkilerinin dairesel kanal basınç kaybı üzerinde etkisi.....	42

Şekil 3.14.	Test bölümü çizimi.....	44
Şekil 4.1.	Türbülanslı ısı geçişinin deneysel sonuçları.....	49
Şekil 4.2.	Plaka 7' nin sürtünme faktörü.....	49
Şekil 4.3.	Plaka 10' un sürtünme faktörü.....	50
Şekil 4.4.	Z ile f^* ' in değişimi.....	50
Şekil 4.5.	100 μm iç çaplı, yüksek saflıkta damıtılmış su, etanol ve damıtılmış hidroklorik asit solüsyonunda ultrasonik vibrasyonla temizlenmiş kuvars tüpteki hava-su iki fazlı akış örnekleri.....	56
Şekil 4.6.	İki fazlı akış çeşitleri.....	57
Şekil 4.7.	Buhar-su akışında iki fazlı akış örneği.....	60
Şekil 4.8.	100 μm kuvars tüpte iki fazlı akış örnekleri.....	61
Şekil 4.9.	Gaz külçesi içinde tüp duvarına yapışık sıvı damlacıklar.....	61
Şekil 4.10.	Tüp duvarında ıslak-kuru sınır.....	62
Şekil 4.11.	İki fazlı akış örnekleri geçişi.....	62
Şekil 4.12.	Laminer ısı geçişinin deneysel sonuçları.....	69
Şekil 4.13.	Laminer ısı geçişi üzerinde D_h/W_c etkisi.....	70
Şekil 4.14.	Laminer ısı geçişi üzerinde H/W etkisi.....	70
Şekil 4.15.	Türbülanslı ısı geçişi üzerinde D_h/W_c etkisi.....	71
Şekil 4.16.	Türbülanslı ısı geçişi üzerinde Z etkisi.....	72
Şekil 4.17.	Boyutsuz basınç kaybı üzerinde kanal büyüklüğü etkisi.....	73
Şekil 4.18.	Maksimum ısı geçişi için optimal mesafelendirme.....	74
Şekil 4.19.	a. $Re=2.83$ için farklı kesitlerde sıcaklık profili, b. $Re=56.5$ için farklı kesitlerde sıcaklık profili.....	77
Şekil 5.1.	Isı geçişinde duvar pürüzlülüğünün etkisi:(a) farklı giriş Kn sayılarında seyreltilmiş akışlar için, (b) farklı e, ile seyreltilmiş akışlar için, (c) farklı giriş Mach sayıları ile sıkıştırılabilir akışlar için, (d) farklı e, ile sıkıştırılabilir akışlar için.....	80
Şekil 5.2.	Ortalama Nusselt sayısı üzerinde duvar pürüzlülüğü etkisi.....	81
Şekil 5.3.	Gaz kromotografi sütunları için kullanılan paslanmaz çelik bir mikro tüpün SEM resimleri.....	82
Şekil 5.4.	Çap belirsizliğinin sürtünme faktörü üzerine etkisi.....	83
Şekil 5.5.	Bir mikro tüp içerisinde göreceli pürüzlülüğün laminar-türbülanslı geçiş üzerine etkisi.....	84

Şekil 5.6.	Pürüzsüz mikro tüplerdeki gaz akışında sürtünme faktörü.....	85
Şekil 5.7.	Mikro tüpler için sürtünme faktörü.....	86
Şekil 5.8.	Kalın mikro tüpler için sürtünme faktörü.....	86
Şekil 5.9.	Sayısal ve deneysel sürtünme faktörü sonuçlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.10.	Eckert sayısının tüp boyunca değişimi.....	88
Şekil 5.11.	Nusselt sayısının tüp boyunca değişimi.....	88
Şekil 5.12.	Kare ve eşkenar üçgen kanallardaki sıvı akışının sürtünme faktörleri.....	91
Şekil 5.13.	Kanal şeklinin akış rejimi üzerindeki etkisi.....	92
Şekil 5.14.	Aralıklı akış rejimi üzerinde hidrolik çap etkisi.....	93
Şekil 5.15.	Dairesel akış rejimi üzerinde hidrolik çap etkisi.....	93
Şekil 5.16.	Sadece etanolla temizlenmiş 100 µm iç çaplı durgun suda farklı şekillerde kabarcıklar.....	94
Şekil 5.17.	Mikro kanallar için Nusselt sayısı değişimi.....	96
Şekil 5.18.	Bir mikro kanal boyunca eksensel akış sıcaklığı değişimi; duvar-akışkan birleşik ısı geçişli (a) ve duvar-akışkan birleşik ısı geçişli olmayan (b).....	98

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Test bölümünün geometrik parametreleri.....	32
Tablo 3.2.	Deneyel belirsizlikler.....	33
Tablo 3.3.	Tipik akış durumları.....	45
Tablo 4.1.	İki fazlı akış rejimleri ve örneklerinin tanımı.....	55
Tablo 4.2.	İncelenen deneyel parametre alanları.....	76
Tablo 5.1.	Tek fazlı mikro akışlar için ölçek etkileri.....	89

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikro Kanallar, Mini Kanallar, Faz Dönüşümünde Isı Geçişi, Basınç Kaybı, Tek Faz, İki Faz, Isı Taşınımı, Ölçek etkisi, Mikro Etkiler.

Son yıllarda, mikro kanallarda akış ve ısı geçişi karakteristikleri üzerine çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, bazen klasik bağıntılarla uyuşması bazen de onlarla ters düşmesi nedeniyle sonuçların tek anlamlılıktan ne kadar uzak olduğunu açıkça göstermektedir. Bu tezde, esas olarak bu sapmaların nedeni analiz edilecek ve tartışılacaktır. Bu deneysel çalışmaların kronolojik analizi yapıldığında, mikro kanallardan elde edilen deneysel veri ile geleneksel teori arasındaki farklılığın azaldığını görmek mümkündür. Bu gerçek, mikro kanalın pürüzlülüğü ve geometrisinin daha iyi kontrolünün sonucu olan mikro üretim tekniklerindeki büyük gelişme ve yapılan deneysel testlerin doğruluğundaki artışla kısmen açıklanabilir. Bu nedenle, daha önceden yapılmış çalışmaların sonuçları bazen hatalarla dolu ve yanıltıcı olabilmektedir.

Bu tezde, mikro kanallardaki akışta ısı taşınımı ve basınç kaybı üzerindeki ölçek ve mikro etkileri rolünün, klasik teoriyle kanıtlanabilen, literatürde yayınlanan pek çok deneysel sonuçla açıklanması hedeflenmektedir. Mikro ölçülerde ısı geçişi alanındaki analitik yöntemler ve karmaşık ölçüm tekniklerine dair son 5 yılda büyük ilerleme kaydedilerek, mikro kanal akışının anlaşılmasına büyük katkıda bulunulmuş ve geleneksel teorik modellerin hangi durumlarda mikro kanal akışındaki ısı geçişi davranışını doğru tahmin etmek için kullanılabileceğini belirlemede yardımcı olmuştur. Bu tezde sunulan, sürmekte olan birçok araştırma projesine dair tartışmalarla birlikte, ısı geçişi ve mikro kanal akışını içeren eserlerin bir özeti. Teorik ve deneysel çalışmalar, hesap analizleri, daha yenilikçi modelleme tekniklerinin bazılarının tanıtımı ve bunlara ait tüm önemli bulgular sunulmuş, karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

HEAT TRANSFER IN MICROCHANNELS

SUMMARY

Key Words: Microchannels, Minichannels, Phase Change Heat Transfer, Pressure Drop, Single-Phase, Two-Phase, Convection, Scaling Effects, Micro Effects.

In the last years a large amount of experimental analyses have been addressed to the study of the fluid-dynamical and heat transfer characteristics of single-phase flows in micro channels. These reviews show clearly how the results are far from univocal, sometimes agreeing with the classical correlations, at other times contradicting them. In this paper the main aspects which can be responsible for these deviations will be analysed and discussed. From a chronological analysis of these experimental works it is possible to note that the discrepancy between the experimental obtained for micro channels and the predictions of the conventional theory is decreasing. This fact can be partially explained by considering the dramatic improvements in micro fabrication techniques with the consequent more appropriate control of the roughness and geometry of the micro channel and with the increase in the accuracy of the experimental tests made. For this reason the results of the older studies are sometimes fraught with errors and can be misleading.

In this work the role played by the main scaling effects and micro-effects on the pressure drop and on the convective heat transfer for single-phase flows in micro channels will be analysed with the aim to explain that many experimental results published in the open literature can be justified by using the conventional theory. The tremendous progress over the past five years in sophisticated measurement techniques and analytical methodologies in the area of micro scale heat transfer have greatly added to the understanding of the phenomena unique to micro channel flow and has helped to clarify those situations where conventional theoretical models can be used to accurately describe and predict the flow and heat transfer behavior in micro channel flows. Presented here is a review of the published literature along with discussions of several ongoing research projects involving micro channel flow and heat transfer. Theoretical and experimental studies, computational analyses, a description of some of the more innovative instrumentation techniques, and important findings from all of these are presented, compared and discussed.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektronik bileşenler ve cihazların soğutulması için, mikro kanallardaki akış uygulamasında bu fikrin 25 yıl önce ilk ortaya atılmasından bu yana kararlı bir ilerleme kaydedilmiştir. Çok küçük kanallar ve tüplerdeki akış ve ısı geçişi kanunlarını anlama çalışmaları ve bunun mikro ölçülerdeki ısı değiştiricilerinin tasarımının geliştirilmesinde kullanılması fikri birçok araştırmamanın yapılmasına sebep olmuş ve bu araştırma sonuçları yeni teknolojilerin gelişimi için oldukça faydalı olmuştur. Karmaşık deney setleri kullanılarak ve güçlü hesaplama tekniklerinden yararlanılarak yapılan teorik ve deneysel çalışmalar son birkaç yıl içinde rapor haline getirilmiş ve araştırmacıların bir dizi ilgi çekici gözlem yapmalarına da yardımcı olmuştur. Mikro kanal akışı ve ısı geçişinin tam ve kesin olarak tanımlanmasından önce, faydalı ve bilgilendirici olan çok daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Son zamanlarda yapılan teorik çalışmaların çoğunun geleneksel modelleme yöntemlerinden yararlanmasına rağmen, bazıları yeni modelleme stratejilerinin tanıtılmasına odaklanmıştır. Bu teorik çalışmaların başlıca amacı; mikro kanal akış analizinde geleneksel teorik yaklaşımların uygulanabilirliğinin belirlenmesi için deneysel ve sürekli ortam analizlerinin karşılaştırılmasıdır. Mikro kanallarda, ısı ve basınç ölçümlerinden yararlanan deneysel çalışmalar modern mikro parçaların yapılması teknikleri ile birleştirildiğinde şimdiye kadar gözlemlenmemiş bir dizi ilgi çekici olguyu açığa çıkartmıştır. Ayrıca; akışı görsel olarak canlandırma tekniklerinin kullanıldığı incelemeler de rapor edilmiştir. Bazı deneysel çalışmalar geleneksel davranışla uyum göstermemesine rağmen, son incelemelerin çoğu; özellikle karmaşık ölçüm tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar, geleneksel teorilerin mikro ölçülerde akış ve ısı geçişini doğru bir şekilde tahmin etme ve açıklamada, en azından belirlenen kanal karakteristik kesit ölçülerinde kullanılabileceği sonucunu desteklemektedir.

Bu çalışmada, geçen yüzyılın sonlarından önce yayınlanan mikro kanal makaleleri, farklı geometriler ve malzeme-akışkan kombinasyonlarıyla çeşitli mikro kanal akışı ve ısı geçişi uygulamalarını içeren araştırmalar özetlenmiştir. Son 5 yıl içinde bu alanda kayda değer bir ilerleme sağlandığından, bu alandaki en yeni bulguları ve yayınlanan önemli eserleri yorumlamak ve karşılaştırmak çok önemlidir.

BÖLÜM 2. ISI GEÇİŞİ VE MİKRO KANALLAR

2.1. Isı Geçişi Nedir?

Isı geçişi, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla nesne arasında iletim, taşınım ya da ışınım yoluyla (veya bu yolların birbiri ile olan kombinasyonları yoluyla) gerçekleşen enerji geçişidir. Madde alış verişi olmaksızın sadece sıcaklık farkından meydana gelen bu enerji geçişi “Isı Geçişi” olarak tanımlanır. Termodinamiğin ikinci kanununa göre; ısı sıcak bir sistemden daha soğuk bir sisteme doğru kendiliğinden akar. Termodinamik, bu ısı geçişinin nasıl ve ne hızda olduğunu açıklamaz. Çünkü termodinamikte zaman bir değişken olarak ele alınmaz. Termodinamik denge durumundaki sistemler ile ilgilenir. Geçen ısı doğrudan doğruya ölçülemez, ama meydana getirdiği tesirler gözlenebilir ve ölçülebilir.

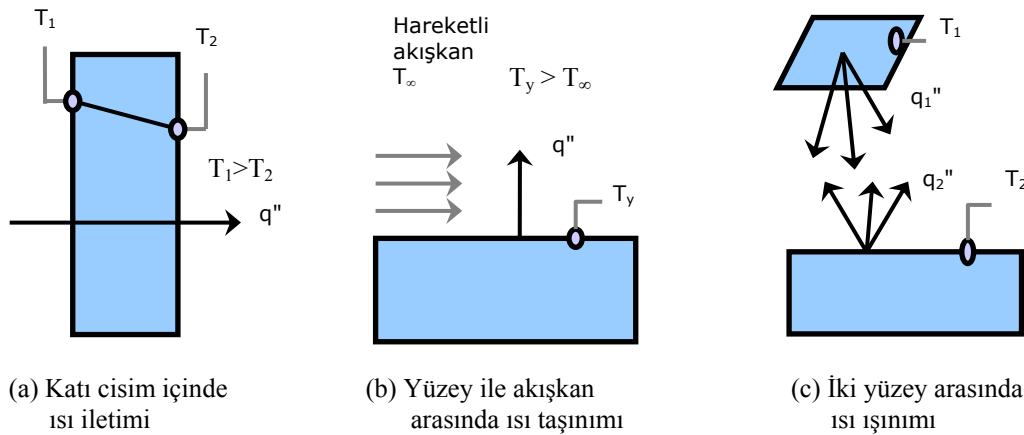
Isı geçişi bilim dalı, termodinamiğin birinci ve ikinci, kütlelenin korunumu ve Newton’ un ikinci hareket kanunlarına ilave üç özel kanun yardımı ile ısı geçişi olayının yapısını inceleyerek, ısı geçişini etkileyen büyüklükleri belirler ve bu büyüklükler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eder. Çözüm yöntemi olarak da analitik, sayısal, deneysel ve benzeşim yöntemlerini kullanır.

2.2. Isı Geçişi Çeşitleri

- 1) İletim (Kondüksiyon): Genel olarak katı cisimlerde, ısı enerjisinin serbest elektron hareketiyle bir molekülünden ya da atomdan diğerine geçmesi ile meydana gelen ısı geçişine “Isı İletimi” denir. Yani madde veya cismin bir tarafından diğer tarafına ısının iletilmesi ile oluşan ısı geçişidir. Hareketsiz bir ortamda sıcaklık gradyeni mevcutsa ısı geçişi için “iletim” (kondüksiyon) terimi kullanılır. Ortam akışkan veya katı olabilir. Isı geçişi, daima yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa

doğrudur. Yoğun maddeler genelde iyi iletkenlerdir; örneğin metaller çok iyi iletkenlerdir.

- 2) Taşınım (Konveksiyon): Sıvı ve gazlarda ısı enerjisinin, moleküllerin hareketleri sonucu nakledilmesi ile oluşan ısı geçişine “Isı Taşınımı” denir. Yani katı yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen ısı geçişidir. Akışkan içindeki akımlar vasıtası ile ısı geçişi meydana gelir. Akışkan içindeki veya akışkanla sınır yüzey arasındaki sıcaklık farklarından ve bu farkın yoğunluk üzerinde oluşturduğu etkiden doğabilmektedir.
- 3) Radyasyon (Işınım): Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektro manyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıklardaki iki yüzey arasında ısı geçişi, yüzeyler arasında engelleyici bir ortam olmadığında gerçekleşir. Katıların, sıvıların ve gazların ısı enerjisini elektro manyetik dalgalar şeklinde yayınladıkları veya yuttukları bu ısı geçiş şekline “Isı Işınımı” denir. Yani ışınım yolu ile ısı geçişi, fotonlar (elektromanyetik radyasyon) yolu ile olan ısı geçişidir.



Şekil 2.1. İletim, taşınım ve ışınım ile ısı geçiş şekilleri

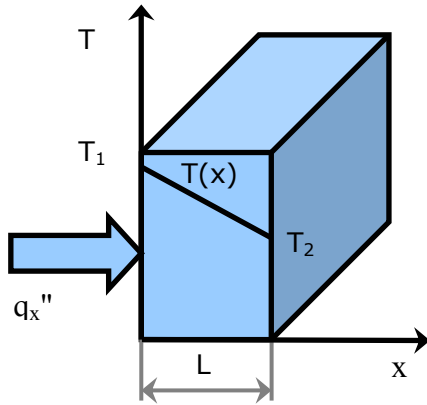
Şekil 2.1 (a)' da gösterildiği gibi, yüzey sıcaklıkları farklı katı cisim içinde iletimle ısı geçişi, (b)' de sıcaklıkları farklı yüzey ve akışkan arasında taşınım ile ısı geçişi ve (c)' de iki yüzey arasında ışınım ile ısı geçişi meydana gelmektedir. Herhangi bir ısı geçişi olayı; bu üç şeklin birisi ile herhangi ikisi ile ya da üçü ile birlikte meydana gelebilir.

2.3. İletim İle Isı Geçişi ve Fourier Isı İletim Kanunu

Isının iletildiği ortam içinde, atom veya molekül gibi mikroskobik parçacıkların hareket etmeksizin birbirlerine teması sonucu sıcaklık farkından dolayı oluşan ısı geçiştir. Zamana bağlı eşitliklerle ısı geçişi proseslerini miktar olarak ifade etmek mümkündür. Böylece, birim zamanda geçen enerji miktarı hesaplanabilir. İletim ile geçen ısı enerjisini ilk ifade eden 1822 yılında Fransız bilim adamı “J. B. Fourier” olduğundan, bu ifadeye “Fourier Isı İletim Kanunu” denir. Bu kanuna göre Şekil 2.2’deki gibi, içinde sıcaklık değişimi olan bir boyutlu bir levha göz önüne alındığında, birim alandan iletim ile geçen ısı miktarı, ısının geçiş yönündeki sıcaklık gradyeni ile orantılıdır. Buna göre; $T(x)$ fonksiyonu ile gösterilen sıcaklık dağılımı olan bir duvardan bir boyutlu ısı geçişi için:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

bağıntısı elde edilir. Bu formülde:



Şekil 2.2. Bir boyutlu ısı iletimi

q_x'' : Geçiş yönüne dik birim alan için x doğrultusundaki ısı geçiştir (ısı akışı veya iletim miktarı), (W/m^2)

k : Orantı katsayısı (ısı iletkenlik katsayısı olarak da bilinir), (W/mK)

dT/dx : Isı geçişi yönündeki sıcaklık gradyeni, (K/m)

Denklem 2.1’deki negatif işaret, azalan sıcaklık yönünde ısı geçişi olduğu gerçeğinin bir sonucudur. q_x'' ’i pozitif yapmak için konulmuştur.

Isı iletim katsayısı (k) birim kalınlıktaki bir cismin, birim yüzeyinden birim zamanda cismin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 1 °C olması halinde geçen ısı miktarıdır. Isı iletim katsayısı her madde için farklı değerlerde olup, malzemenin bileşimine, gözenekli olup olmamasına, malzeme içindeki neme, ısının geçtiği yöne ve benzeri fiziksel ve metalürjik etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Isı iletim katsayısı arttıkça ısı geçişi artmaktadır. Isı geçişinin iyi olmasının istenildiği durumlarda ısı iletim katsayısı yüksek olan malzemeler, ısı geçişinin azaltılması istenildiği durumlarda ise, ısı iletim katsayısı küçük olan ısı yalıtım malzemeleri kullanılmalıdır.

Zamanla değişmeyen sıcaklık dağılımı lineer olduğunda sıcaklık gradyeni:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

ve ısı akısı:

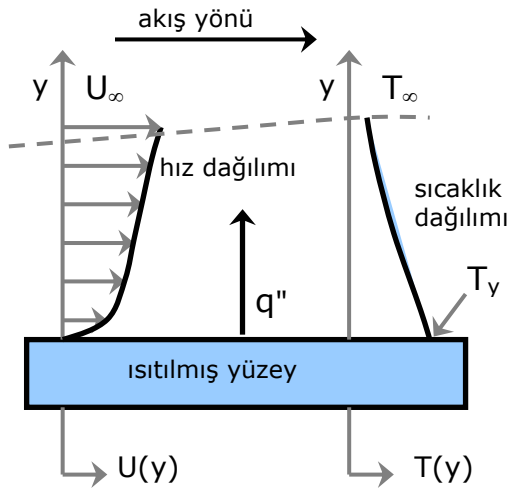
$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{veya} \quad q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad \text{şeklinde ifade edilir.}$$

Birim zamanda iletilen ısı miktarı için ısı akısı, geçişin gerçekleştiği alan ile çarpılmalıdır:

$$q_x = q_x'' A \quad (W) \quad (2.3)$$

2.4. Taşınım İle Isı Geçişi ve Newton' un Soğuma Kanunu

Sıcak bir levhanın üzerine soğuk hava üflendiğinde, levhanın daha çabuk soğuyacağı herkesçe bilinir. İşte bu olaydaki ısı geçişi ısı taşınımı ile olmaktadır. Levhaya çarpan hava molekülleri ısıyı alarak uzaklaştırmaktadır. Havanın hızı arttıkça levhanın soğuması daha hızlı olmaktadır. Isı taşınımı akışın yapısına göre sınıflandırılır. Akış, bir fan, pompa veya rüzgâr gibi araçlarla sağlandığı zaman yani akışkan hareketli ise “Zorlanmış Isı Taşınımı”, yoğunluk farkları nedeniyle sağlandığı zaman diğer bir deyişle akışkan hareketsiz ise “Doğal Isı Taşınımı” denir.



Şekil 2.3. Levha üzerindeki akışta hız ve sıcaklık dağılımları

Şekil 2.3’ deki gibi T_y sıcaklığındaki yüzey ile temasta bulunan T_∞ sıcaklığındaki akışkan arasındaki ısı geçişi ifadesi 1701 senesinde “Newton” tarafından verilmiştir. Bu ifade aşağıdaki gibi olup “Newton’ un Soğuma Kanunu” olarak adlandırılır.

$$q'' = h(T_y - T_\infty) \quad ; \quad T_y > T_\infty \quad (2.4.)$$

q'' : Taşınım ısı akısı, (W/m^2)

T_y : Yüzey sıcaklığı, (K)

T_∞ : Serbest akışkan sıcaklığı, (K)

h : Isı taşınım katsayısıdır, (W/m^2K). h , ısı taşınım katsayısı akışkanın özelliklerine ve akışkan hızına bağlıdır.

Bu ifadeye “Isı Taşınımının Özel Kanunu” da denilir. Fourier’ in ısı iletim kanunu, nasıl bir ısı iletim katsayısı “ k ” yı ortaya çıkarmış ise, Newton’ un soğuma kanunu da ısı taşınım katsayısı “ h ” adı verilen bir büyüklüğü ortaya çıkarmıştır. Bu ısı taşınım katsayısı bazı sistemler için analitik olarak hesaplanabilir, karmaşık sistemler için ise deneysel olarak tespit edilmektedir. Deneyler, ısı taşınım katsayısının; akışkanın cinsine ve fiziksel özelliklerine, akışkanın hareketli olup olmadığına, yüzey ve akışkanın geometrik ilişkisi v.b. gibi birçok etkene bağlı olduğunu göstermiştir. Isı taşınım katsayısı gaz akışkanlarda küçük, sıvılarda orta büyüklükte, buharlaşma ve yoğunlaşma olaylarında en büyük değerleri almaktadır.

2.5. Işınım İle Isı Geçişi ve Stefan-Boltzmann Kanunu

Sonlu sıcaklıktaki her bir cisim, atomların ya da moleküllerin elektron yapılarındaki değişim hareketinden dolayı, elektro manyetik dalga yayar. Sıcaklığın artması elektron, atom ve moleküllerin hareketini arttırdığından elektro manyetik dalga şiddetini yani ısı ışınımını arttırmaktadır. Bu ısı ışınımı, sonlu olan her sıcaklıkta meydana gelmektedir. Bazı cisimler ısı ışınımını yutar, bazıları yansıtır, bazıları da içlerinden daha serbestçe geçirir. İdeal bir boşlukta ısı iletiminin ve ısı taşınımının olmamasına karşılık ısı ışınımı olmaktadır.

Siyah cisimden yayılan ısı ışınımı bağıntısını 1879’ da “Stefan” ampirik olarak bulmuştur. “Boltzmann” da 1884’ de termodinamiğin birinci kanunundan hareket ederek aynı ifadeyi teorik olarak çıkarmıştır. Bu yüzden bu ifadeye “Stefan-Boltzmann Isı Işınımı Kanunu” denir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q = \sigma AT_y^4 \quad (2.5)$$

Görüldüğü gibi ısı ışınımı ile yayılan ısı enerjisi, alanla doğru orantılı, mutlak sıcaklığın (Kelvin) ise dördüncü kuvveti ile orantılıdır. Isı ışınımının mutlak sıcaklığın dördüncü kuvveti ile orantılı olması, sıcaklık büyüdükçe ışımla geçen ısının çok daha fazla arttığını gösterir. Yukarıdaki bağıntıda:

σ : Orantı katsayısı olup Stefan-Boltzmann katsayısı adını alır. Değeri, SI birim sisteminde $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ olup uygulamada $\sigma=4,96 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2\text{hK}^4$ değeri de kullanılmaktadır.

T_y : Yüzeyin mutlak sıcaklığı, (K), ($T_y(\text{K})=273,15+ T_y(^{\circ}\text{C})$)

A : Isı ışınımı yayan yüzeyin alanı, (m^2)

Yukarıdaki ifade sadece ideal siyah cisim için geçerlidir. Eğer siyah cisim başka bir siyah cisim ile çevrili ise, içteki cisimden dıştaki cisme net ısı ışınımı:

$$Q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanır. Bu ifadede:

A_1 : İçteki cismin yüzey alanı, (m^2)

T_1 : İçteki cismin sıcaklığı, (K)

T_2 : Dıştaki cismin sıcaklığı, (K)

dır. Siyah olmayan cisimlerde, yani gerçek cisimlerde, ısı ışınımı ideal siyah cisimden daha azdır. Gerçek cismin yaydığı ısı ışınımı:

$$Q = \sigma \varepsilon A T_y^4 \quad (2.7.)$$

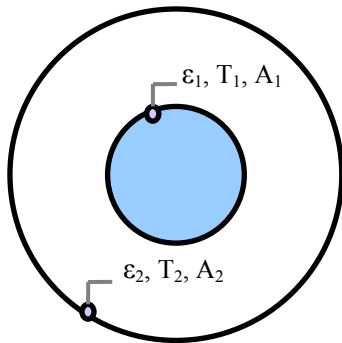
bağıntısı ile hesaplanır. Bu ifadede:

ε : Gerçek cismin ışınım yayma katsayısıdır ve değeri $0 < \varepsilon < 1$ dir. Siyah cismin ışınım yayma katsayısı 1' dir.

Gerçek cisim, yine gerçek cisim ile çevrili ise, içteki cisimden dıştaki cisme net ısı ışınımı:

$$Q_{12} = \sigma \varepsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

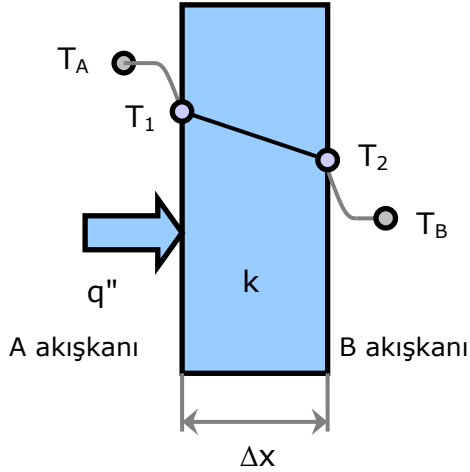
bağıntısı ile bulunur.



Şekil 2.4. İç içe iki yüzey arasında ısı ışınımı

2.6. Karma Isı Geçişi (İletim + Taşınım)

Pratikte, iletim ve taşınım vasıtasıyla ısı geçişi birçok halde birlikte olur. İki farklı sıcaklıktaki akışkanı ayıran bir duvar halini düşünelim.



Şekil 2.5. İletim ve taşınım ile ısı geçişi

A akışkanından duvara olan ısı akısı duvardan iletilen ve duvardan B akışkanına olan ısı akısına eşittir. Böylece:

$$q'' = h_A(T_A - T_1) = \frac{k}{\Delta x}(T_1 - T_2) = h_B(T_2 - T_B) \quad (2.9.)$$

yazılabilir. Bu denklemler sıcaklıklar cinsinden yazılıp yeniden düzenlendiğinde:

$$(T_A - T_B) = q'' \left(\frac{1}{h_A} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_B} \right) \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir.

Toplam ısı geçiş katsayısı, U tarif edilerek:

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_A} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_B} \right); \quad q'' = U(T_A - T_B) \quad (2.11)$$

yazılabilir.

2.7. Mikro Kanal Nedir?

Yüksek yoğunluklu, yüksek güçte ve yüksek hızda mikro elektronik cihazlardan, yüksek oranda ısı alınması gerekmektedir. Isı akısının 100 W/cm^2 dolayında olması beklenir. Elektronik cihazın en uygun şekilde çalıştırılması için, etkili ısı alma metodlarının geliştirilmesi gerekir. Bu metotlardan biri, mikro kanal ısı alıcısının kullanılmasıdır. Bir mikro kanal ısı alıcısı, mikro yapıdaki birçok kanalın bir mikro çipin arkasına yerleştirilmesiyle oluşur. Bu kanallar arasından, enerjiyi taşımak için bir sıvı geçer.

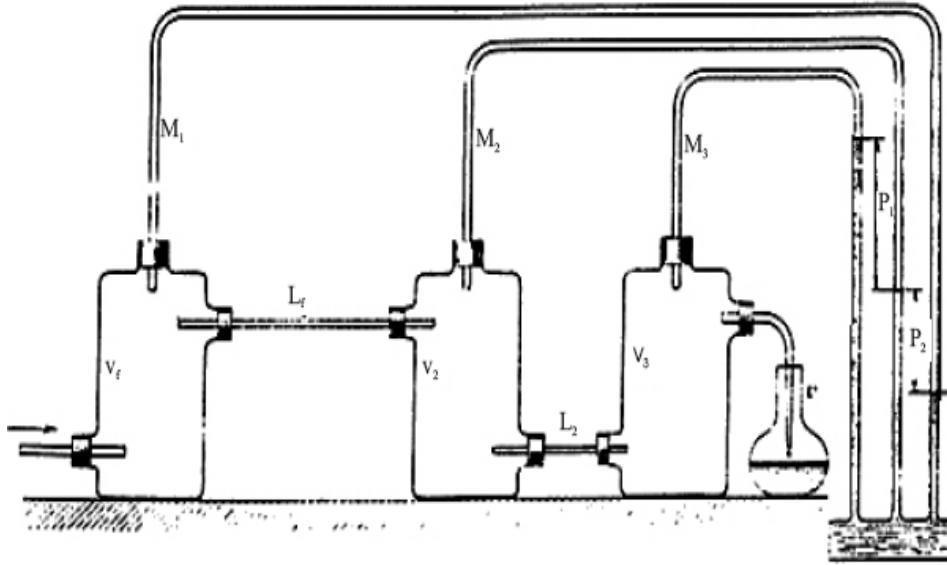
2.8. Mikro Kanalların Gelişimi

Pek çok makale, hidrolik çapı $100 \mu\text{m}$ ' den daha küçük olan mikro kanallardaki akış ve ısı geçişini analiz eden ilk çalışma olarak Wu ve Little tarafından 1983 yılında yazılan makaleyi göstermektedir. Bu bilgi yanlıştır. Gerçekte, ilk deneysel çalışma 1840 yılında Poiseuille tarafından cam mikro tüplerin test edilmesiyle yapılmıştır. Poiseuille, su kullanarak kılcal borulardaki kütleli akış hızı kanunlarını analiz etmek için iç çapı $15 \mu\text{m}$ ' ye kadar olan mikro tüpleri test etmiştir. Onun tarihsel deney sonuçları Şekil 2.6' da gösterilen çok basit deney düzeneği ile elde edilmiştir.

Poiseuille' nin deneyinde farklı uzunluktaki iki kılcal tüp (Şekil 2.6' da L1 ve L2) üç rezervuara bağlanmıştır (Şekil 2.6' da V1, V2, V3). Girişteki kütleli akış hızı için, Poiseuille rezervuarları arasındaki basınç farkını ölçebiliyordu. 1840 yılında Poiseuille tarafından sağlanan deneysel veri dairesel tüplerdeki laminer akışlar için ünlü "Poiseuille Kanununu" açıklamak için kullanılmıştır ki, buna göre sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile çarpımı sabit bir sayıyı (dairesel tüpler için 16' ya eşit) vermektedir.

Konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalardan 160 yıl sonra, Poiseuille kanununu bulan bilim insanlarının kullandığından daha hassas araçlarda, onların elde ettiğinden daha fazlasının bulunamaması yazarlara göre şaşırtıcıdır. Poiseuille' ün orijinal deneyimi son dönemlerde literatürde konu hakkında yayınlanan pek çok makalenin yazarını derinden etkilemiştir. Yazarlar 90' larda ortaya çıkan mikro kanallardaki sürtünme

faktörünün ölçümüyle ilgili makalelerin büyük bir çoğunluğunun doğru ve/veya hassas olmayan sonuçlar içerdiğini düşünmektedir. Bu, mikro kanallarda bile basınç kaybını öngören geleneksel bağıntıların başarısını onaylamakta, sürtünme faktörüyle ilgili son yıllarda yapılan deneysel sonuçların sayısındaki artışla doğrulanır görünmektedir.



Şekil 2.6. Bouasse tarafından düzenlenen Poiseuille test donanımı [39]

2.9. Mikro Kanalların Sınıflandırılması

Mikro kanallar için son yıllarda kabul gören sınıflandırma şekli aşağıdaki gibidir [92]:

- Mikro-ölçekli kanallar $(1\mu\text{m} < D < 100\ \mu\text{m})$
- Meso-ölçekli kanallar $(100\ \mu\text{m} < D < 1\text{mm})$
- Makro-ölçekli kanallar $(1\text{mm} < D < 6\ \text{mm})$, ki kompakt ısı değiştiricileri için kabul edilen boyutlardır.
- Geniş kanallar $(D > 6\ \text{mm})$

Kandlikar ve Grande ise, tek-fazlı gaz ve sıvı akışları, akış tipi kaynama, yoğuşma ve

adyabatik iki-fazlı akışı içeren çeşitli uygulamalarda ısı geçişi kavramı üzerine çalışmalar yapmışlar ve aşağıdaki kanal sınıflandırma şemasını önermişlerdir [39]:

-Konvansiyonel kanallar	$D > 3\text{mm}$
-Mini kanallar	$3\text{mm} \geq D > 200\ \mu\text{m}$
-Mikro kanallar	$200\ \mu\text{m} \geq D > 10\ \mu\text{m}$
-Geçiş Bölgesi Kanalları	$10\ \mu\text{m} \geq D > 0,1\ \mu\text{m}$
-Geçiş Bölgesi Mikro kanalları	$10\ \mu\text{m} \geq D > 1\ \mu\text{m}$
-Geçiş Bölgesi Nano kanallar	$1\ \mu\text{m} \geq D > 0,1\ \mu\text{m}$
-Moleküler Nano kanallar	$0,1\ \mu\text{m} \geq D$

Not: Burada D, kanalın hidrolik çapını ifade etmektedir.

Bu sınıflandırma cetveline göre $10\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$ arasındaki, boyutları en küçük olan kanallar “mikro kanal” sınıfına girmektedirler.

2.10. Mikro Kanalların Kullanım Sebepleri

Küçük ölçekli kanallardan oluşmuş sistemler aşağıda sıralanan özelliklere sahiptirler:

- Yüksek ısı akıları
- Küçük boyutlar ve ağırlıklar
- Çalışma akışkanı miktarının az olması
- Taşınabilir olmaları
- İleride seri üretimleri yapılarak ekonomikliklerinin sağlanabilmesi olasılığı

Bu özellikler küçük ölçekli sistemleri çekici kılsa da, bazı sorunlar aradan geçen yıllar içerisinde çözülememiştir. Örneğin; bu kanallarda yüksek ısı akılarını sağlayan çok küçük hidrolik çaplar, aynı zamanda basınç kayıplarının artmasına da yol açmaktadır. Bunun da ötesinde, kanal boyutları küçüldükçe, cidar ve ara yüzey etkilerinin artmasından dolayı, akışın davranışı klasik teoriden uzaklaşmaktadır. Ancak; bu uzaklaşmanın olduğu boyut henüz saptanamamıştır. Ayrıca; bu konuda,

araştırmacılar arasında bir uzlaşma da yoktur. 10 mm genişliğindeki dikdörtgen kanallar üzerinde yapılan çalışmalarla birlikte 1,5 mm çapındaki dairesel kesitli borularda yapılan çalışmalar da literatürde "mikro kanallar " olarak geçebilmektedir.

Küçük çaplı kanallar, ısı geçiş özellikleri gelişmiş olduğundan, oldukça ilgi görmektedir. Karakteristik boyutları 1 µm den 1 mm' e kadar değişen mikro-cihazlar günümüzde teknolojik bir gerçekliktir ve kalp pilinden mürekkep püskürtmeli yazıcılara kadar pek çok alanda başarı ile kullanılmaktadır. Bu kanallar üzerinde ayrıca, bilgisayar çiplerini soğutma ve yüksek akılarda ısı çekilmesi gibi uygulamalar için de çalışılmaktadır. Bunlar arasında mikro pompalar veya mikro ısı değiştiricileri gibi mikro-akışkanlı cihazlar (MFD' ler) çok önemli bir grup oluşturmaktadır. MFD' lerin ana kullanıcıları otomotiv ve uçak firmaları da dâhil mikro elektronik, kimya, ecza, gıda ve tıbbi teknolojiler gibi sanayilerdir. Bu türlü cihazların hemen hepsinin özü, karakteristik ölçüleri mikron mertebesinde olan ve çeşitli kesit alanlarına (en yaygınları dairesel, yamuk, dikdörtgen) sahip bir veya daha fazla mikro kanala dayanmaktadır. MFD' lerin başarısı göreceli olarak küçük yüzey ve hacimlerde yüksek ısı akısı kapasiteleriyle ilgilidir. Isı taşıma kapasitesi artışı, ısı iletim katsayısı ve kanalın hidrolik çapındaki azalma ve ısı geçiş yüzeyindeki (sabit bir hacim için) artış sonucu elde edilir. MFD' lerde kullanılan mikro kanalların hidrolik çapları tipik olarak 1 µm ile 2 mm arasında değişir. Bu çok önemli bir konuyu gündeme getirir. Şöyle ki mikroskobik boyutlarda olan kanallardaki nakil olayını yöneten yasalar hala mikro ölçekte tutulur mu, ve tutulmazsa ne tür yeni etkiler ortaya çıkar? Bu temel soruya yanıt vermek için pek çok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır.

2.11. Kanalların Minyatürleştirilmesi

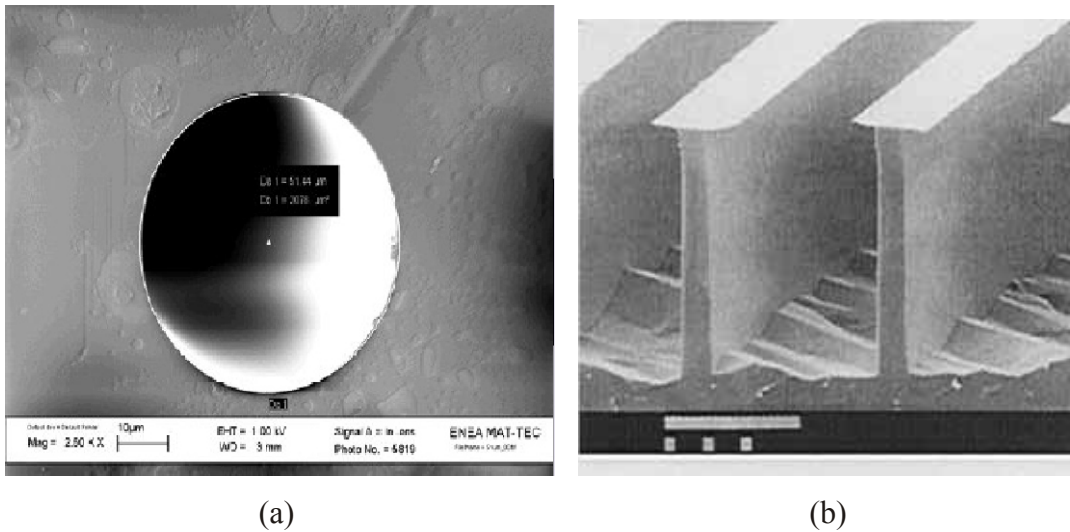
Kanalların minyatürleştirilmesi için pek çok teknik vardır. Ancak dört işlem teknolojisi sistem minyatürleştirme konusunda standart hale gelmiştir:

- Mikro mekanik işleme (Elmas işleme, lazer işlemleri, odaklanmış iyon dikişi, mikro delme)
- X-ışınıyla mikro işleme (LIGA)

- Fotolitografik-tabanlı işlemler (Isı ile kimyasal aşındırma)
- Yüzey ve yüzeye yakın mikro işlem işleme teknikleri

Fotolitografik işlem özellikle silikon plakalar içindir. Elektronik alanında doğan bu teknik oldukça gelişmiştir. Bu teknikle mikro kanallar için elde edilebilecek kesit şekilleri sınırlıdır. Gerçekte silikon plakalarda doğrudan kimyasal aşındırma yolu ile üretilen mikro kanallar, kullanılan silikonun kristalografik doğası gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Fotolitografik bazlı bir proses kullanıldığında, silikon kristal düzlemlerin yer değiştirmesiyle sabitlenen bir kesite sahip mikro kanallar elde edilebilir. Bu teknik çok yaygın olduğu için yamuk, dikdörtgen ve çift - yamuk (altıgen) bir kesite sahip mikro kanallar için elde edilen deneysel sonuçlar literatürde oldukça fazladır. Diğer tekniklerle ise teorik olarak her türlü kesite sahip kanalların minyatürizasyonunu gerçekleştirmek mümkündür.

Bu tekniklerle cam, erimiş silis, silikon, vb. gibi pürüzlülük değeri çok düşük (onlarca, yüzlerce nm) ve mükemmel düzgünlükte kesite sahip mikro kanallar elde etmek mümkündür (bakınız Şekil 2.7.a). Şekil 2.7.' de gösterildiği gibi, kimyasal aşındırma yoluyla elde edilen mikro kanallar, kanalın çevresinde uniform olmayan bir pürüzlüğe sahip olabilir. Bu pürüzlülük bize, dairesel olmayan kanallardaki basınç kaybı için geleneksel bağıntıların bu tür mikro kanalların deneysel verileriyle neden uyuşmadığını açıklar.



Şekil 2.7. Erimiş silis bir mikro tüpün (a) ve silikon plaka üzerine kimyasal aşındırma ile yapılmış dikdörtgen mikro kanalların (b) SEM resimleri [40]

BÖLÜM 3. MİKRO KANALLAR HAKKINDA KAYNAK ARAŞTIRMASI

Küçük ölçekli kanallar üzerinde 1981 yılında elektronik sistemlerin soğutulması amacıyla başlatılan çalışmalar, özellikle minyatür HVAC sistemlerinde kullanılabilecekleri düşünülerek son yıllarda giderek artmıştır.

Mala ve Li; çapları 50 mm ile 254 mm arasında değişen silika ve paslanmaz çelikten yapılmış iki ayrı dairesel kesitli kanalda basınç kayıplarını ölçmüşler; sabit kütleli debilerde Reynolds sayısı arttıkça Pousielle eşitliğinden; uzaklaşıldığını ve bu uzaklaşmanın 130 μm ' den daha küçük borularda daha fazla olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak su kullanılan bu deneyler için, akış davranışının mikro kanal malzemesine de bağlı olduğu yorumu yapılmış; dolayısıyla türbülansa erken geçiş ek olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde durulması da önerilmiştir [16].

Mala ve Li' den sekiz yıl önce, ASME' nin "Micro-Mechanical Sensors, Actuators and Systems" başlıklı toplantısında Pfahler ve diğerleri ile Choi ve diğerleri akışkanlarla yaptıkları çalışmaları sunmuşlardır. Pfahler isopropil alkol, silikon yağı, azot ve helyum ile dikdörtgen ve yamuk kesitli, silikon malzemeden yapılmış kanallarda gelişen akışı gözlemleyerek kanal hidrolik çapı küçüldükçe Navier-Stokes denklemlerinin geçerliliğini yitirdiği sonucunu çıkarmıştır. 0.5 mm ile 50 mm arasında yapılan deneylerde, araştırmacılar 470 MPa/m' ye kadar basınç düşümü gözledikleri deneylerinden teorik bir sonuç çıkaramayacaklarını belirtmişlerdir. Dairesel kesitli kanallarda 3-81 mm aralığında yapılan ölçümlerde 10 mm' den küçük çaplı kanallarda $f = 64/Re$ bağıntısının geçerli olmadığı gözlenmiştir. Isı geçişinin de izlendiği deneylerde, laminer akış için mikro kanallarda Nusselt sayısının Reynolds sayısına bağlı olduğu, türbülanslı akışta ise normal kanallardan çok daha büyük ısı geçiş katsayılarının elde edildiği vurgulanmıştır [75, 76].

Mikro kanal ısı alıcılarının tasarımı, Tuckerman ve Pease tarafından başlatılmıştır. Etkili bir soğutucu tasarlamak için, mikro kanallardaki akış özelliğini anlamak gerekir. Isı geçişi özelliklerini belirlemek için sadece hız dağılımının elde edilmesinden sonra, enerji denklemi çözülebilir. Ancak, geleneksel ısı taşıma teorileri mikro seviyeli akışla ilgili olguyu açıklamaya yetmez [79]. Pfahler ve ekibi, mikro kanallardaki sürtünme katsayısını ölçmüş ve isopropanol ve silikon yağında olduğundan daha yüksek akış oranını ortaya çıkarmıştır. Sonuçları, sıvının kutup yapısının gözlenen viskozitedeki değişimde rol oynayabileceğini göstermektedir [75].

Wu ve Little, mikro kanallarda akış sürtünmesini, gazların akış özelliklerini araştırmışlar ve taşınım ile ısı geçişi özelliklerinin geleneksel boyuttaki kanalların deney sonuçlarından ayrı olduğunu gözlemlemişlerdir. Bundan başka, laminer akış için sürtünme basıncı kaybının klasik teori sonuçlarından daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Bu ölçümler, laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin $Re=400-900$ aralığında olduğunu göstermektedir[41]. Pfahler ve ekibi daha sonra, $C=f \times Re$ sürtünme akış sabitinin teorik tahminlerden alınandan genel olarak daha düşük olduğunu ve bu değer artan Reynolds sayısı ile birlikte arttığını bulmuşlardır [75]. Choi ve ekibi ile Bowers ve Mudawar tarafından yapılan diğer araştırmaların hepsi, mikro kanallarda ya da mikro tüplerdeki faz değişimsiz sıvı akışı ve ısı geçişi davranışının, daha büyük kanal ya da tüplerdekinden oldukça farklı olduğu bilgi ve gözlemlerini desteklemektedir. Harley ve Bau, çok kenarlı ve kare kesitli mikro kanallarda sürtünme faktörünü (C_f) ölçmüşlerdir. Deneysel olarak, kare kanallar için C_f ' in 49 ve çok kenarlı kanallar için C_f ' in 512 olduğunu bulmuşlardır [77, 76, 42].

Peng ve ekibi, deneysel olarak türbülanslı akışa geçişin $Re=200-700$ aralığında başladığını ve tam türbülanslı taşınım ile ısı geçişine $Re=400-1500$ ' e ulaştığını ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca, Re ' nin mikro kanal küçüldükçe azaldığını da gözlemlemişlerdir [30]. Wang ve Peng, bu özelliğin mikro kanallardaki yüksek ısı akısına bağlı olarak sıvının termofiziksel özelliklerinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır [43].

Fedorov ve Viskanta, birleşik akış çözümleri çerçevesinde sıkıştırılmaz laminer Navier-Stokes denklemlerini sayısal olarak çözerek, elektronik soğutma uygulamaları için mikro kanal ısı alıcılarının üçboyutlu birleşik ısı geçişi analizini sunmuşlardır. Model, geniş bir Reynolds sayısı aralığında, ısıl direnç ve sürtünme faktörleri için elde edilen deneysel verilere göre doğrulanmıştır. Bu ısı değiştiricilerdeki ısıl basınç etkisi ve soğutma verimliliği ile ilgili pratik öneriler de sağlanmıştır [44].

Qu ve diğerleri, hidrolik çapları 51–169 μm aralığında değişen ikizkenar yamuk şeklindeki silikon mikro kanallarda akan suyun debi ve basınç kaybının deneysel ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu incelemede, deneysel sonuçlarla teorik tahminler arasında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. Geleneksel laminer akış teorisine göre tahmin edilen basınç kaybı ve sürtünme değerlerinden daha yüksek değerler görülmüştür. Bu etkileri açıklamak için, hidrolik çapları 62-169 μm aralığında değişen ikizkenar yamuk şeklindeki silikon mikro kanallardaki su akışı üzerine deneysel çalışmalar sunmuşlardır. Katı ve sıvı alanlarda sıcaklık dağılımının eşzamanlı belirlenmesini içeren birleşik problem için de sayısal bir çözüm elde edilmiştir [32].

Kim ve diğerleri, ısı geçişi için hem bir hem de iki denklemlerini kullanarak mikro kanal ısı alıcılarında sıcaklık dağılımı için analitik çözümler sunmuşlardır. Darcy sayısı ve etkin ısıl iletkenlikteki değişimlerin ısı geçişine etkisi üzerinde çalışılmıştır [5].

Richardson ve diğerleri, karmaşık serbest akış alanı kesitleri ile tekli bağlanan mikro kanallardaki geliştirilmiş laminer akış rejiminin varlığını incelemek için analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Termodinamik bir iyileştirme gerçekleştirmek için akışkanın birim ısı kapasitesi, entropi oluşum oranı ile temsil edilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki; amaç fonksiyonun minimum oluşu sadece düzensiz kesitleri olan çok küçük kanallarda görülebilmektedir. Bu minimum değerler nispeten zayıftır, buda iyi bir akış olması olasılığının nadir olduğunu göstermektedir [45].

Ryu ve diğeri, bir mikro kanal ısı alıcısının üç- boyutlu analizi için sayısal hesaplamalar sunmuşlardır. Sunulan analiz, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır. Verilen bir pompa gücünde mikro kanal ısı değiştiricisi için en uygun tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla ısı direnci minimuma indiren bir iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir [46].

Choi ve ekibi, 10 μm den daha küçük düz mikro kanallarda azot gazı akışı için fRe Poiseuille sayısının (sürtünme faktörü f ve Reynolds sayısı Re ' nin ürünü) yaklaşık 53 olduğunu, bunun da 64 olan geleneksel değerden daha az olduğunu bulmuşlardır [47]. Ancak, Wu ve Little çok pürüzlü mikro kanal akışı için Poiseuille sayısının 64' ten çok daha fazla olduğunu bildirmişlerdir [41].

Qu ve Mudawar, genişliği 57 μm ve derinliği 180 μm olan dikdörtgen kanalları içeren mikro kanal ısı alıcılarının üç-boyutlu sayısal analizini yapmışlardır. Üç-boyutlu Navier-Stokes ve enerji denklemlerini çözmek için SIMPLE algoritmasına dayanan sayısal bir yazılım kullanılmış ve sonuçlar diğer analitik çözümler ve mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, katı ve sıvılardaki sıcaklık artışının neredeyse doğrusal olduğunu göstermektedir. Isı akışı ve Nusselt sayısında çevresel bir değişim olduğu ve kanal girişinde maksimum değerler sergilediği görülmüştür. Bunlara ek olarak, nispeten yüksek Reynolds sayılarında, örneğin 1400' ün üzerinde, kanaldaki akışın tümünün akış şartlarının altında olduğu görülmüştür [48].

Mikro kanal ısı değiştiricilerinde zorlanmış taşınımın analitik ve sayısal çalışmaları Zhao ve Lu tarafından yapılmıştır. Analizde iki yaklaşımdan yani kanatçık ve gözenekli ortam yaklaşımı modellerinden yararlanılmıştır. Gözenekli ortam yaklaşımında, basınç için Darcy modeli ve katı ile sıvı fazlar arasındaki ısı geçişi için iki denklemler kullanılmıştır. Her iki yaklaşımın tahminleri toplam Nusselt sayısının en boy oranının artmasıyla ve etkin ısı iletim katsayısı oranındaki (sıvı ve gözenekli ortam arasındaki) azalma ile arttığını göstermiştir. Bu iki yaklaşım kullanılarak, bulunan sıcaklık dağılımı ve Nusselt sayısı tahminleri arasında büyük bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebepleri modellerde yapılan kabullere dayanılarak açıklanmıştır [49].

Toh ve diğeri, dört farklı boyuttaki silikon mikro kanallar boyunca sudaki ısı geçişi ve akışının üç boyutlu analizini yapmak için Sonlu Hacim Metodunu kullanmıştır. Sayısal yazılım, yerel ısı direnç için deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonuçlar özellikle düşük Reynolds sayılarında, yüksek ısı akılarında sürtünme direncinin azaldığını göstermektedir. Verilen bir ısı akısı için, düşük Reynolds sayılarında, sürtünme kayıplarındaki azalmanın, sıcaklığa bağlı akışkan viskozitesindeki azalmadan kaynaklandığı düşünülmüştür [50].

Kim, ısı direnci değerlendirmek için mikro kanal ısı değıştiricilerinde uygulanabilen; kanatçık modeli, gözenekli ortam modeli ve mikro kanal ısı değıştiricisinin üç boyutlu sayısal benzetimi modelini tartışmış ve özetlemiştir. Gözenekli ortam modelinin, sayısal benzetim sonuçları kıyaslandığında, tek-boyutlu ısı iletim kabulüyle mikro kanal ısı alıcısı ısı performansını kanatçık modelinden çok daha doğru tahmin ettiği bulunmuştur [5].

Van Male ve diğeri, asimetrik ısıtmanın olduğu silikon kare mikro kanallarda akışın ısı ve kütle geçiş özelliklerini belirlemek için CFD benzetimlerini kullanmışlardır. Benzetim sonuçları deneylere göre onaylanmış ve farklı Nusselt ve Sherwood sayıları için karşılıklı ilişkilerin sunulmasında kullanılmıştır [51].

Kao ve Kleinstreuer, farklı geometrideki mikro kanallarda viskoz yayılımın sıcaklık ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada çeşitli akışkanlar (su, metanol ve isopropanol) kullanılmıştır. Sonuçlar; mikro kanallar için viskoz yayılımın, geometrik parametrelerin (en boy oranı ve hidrolik çap) ve işletme parametrelerinin (Re , Pr ve Ec) güçlü bir fonksiyonu olduğunu ve bu tür akış analizlerinin hiçbirinde göz ardı edilemez olduğunu göstermektedir [52].

Morini, mikro kanallarda ısı geçişi ve basınç düşümü üzerine var olan deneysel sonuçların bir analizini sunmuş ve bunları geleneksel dairesel olmayan kanallar için Obot-Jones modeliyle karşılaştırmıştır. Sonuçlar; hidrolik çapları 1mm' den küçük olan kanallardaki davranışı doğru olarak tahmin edebilmek için geleneksel teorisin gözden geçirilmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, mikro kanallardaki akışın,

geleneksel kanallarda olması beklenenden daha küçük Reynolds sayılarında meydana geldiği görülmüştür [78].

Chen ve Cheng, elektronik çiplerin mikro kanallarla soğutulmalarında uygulanan yeni bir dallanma ağacı tasarımını tartışmışlar ve tanıtmışlardır. Bu dallanmış mikro kanal ağlarındaki ısı geçişi akış davranışını incelemek için analizler yapılmıştır. Bu ağların; geleneksel paralel mikro kanal ağları ile karşılaştırıldığında daha düşük pompalama gücü ve daha iyi bir ısı geçiş kapasitesi olduğu sonucuna varılmıştır [53].

Cheng ve Wu, ikizkenar yamuk şeklindeki mikro kanallarda su akışı için taşınım ısı geçişi ve basınç kaybı ile ilgili Nusselt sayısı değerinin ve sürtünme faktörünün bir dizi geometrik parametreye bağlı olduğunu ve yüzey pürüzlülüğü ile arttığını belirtmişlerdir. Bu artışın daha büyük Reynolds sayılarında daha belirgin olduğu görülmüştür. Geometrik boyutlar ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerinin hepsi bilindiğinde, ikizkenar yamuk şeklindeki mikro kanallarda su akışında Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sürekli olan boyutsuz parametreler elde edilmiştir [73].

Garimella ve Singhal, elektronik soğutma uygulamaları için pompalama kabiliyeti ve pompalama gücünün geliştirilmesi üzerine odaklanarak mikro kanallardaki akış üzerine deneysel sonuçlar sunmuşlar ve tartışmışlardır. Mikro kanal ısı alıcılarının pompalama gereksinimlerinin analizine dayanarak, pompalama gücünü minimuma indirmek için mikro kanal büyüklüğü geliştirilmiştir. Mikro kanallardaki laminer ve türbülanslı akış için akım sonuçları da sunulmuştur [54].

Liu ve Garimella, pleksiglastan yapılan dikdörtgen kesitli mikro kanallarda deiyonize su akışında akım görselleştirme çalışmaları için deneyler ve sayısal incelemeler yapmışlardır. Değerlendirilen mikro kanalların hidrolik çapları 250-1000 μm arasında değişmektedir. Karasızlığa sebep olabilecek dış düzensizliklerden kaçınmak için, azot gazı bulunan bir rezervuar yardımıyla gaz basıncıyla zorlanan bir akış kullanılmıştır. Daha uzun kanallarda; giriş-çıkış etkilerinden kaçınmak ve ölçülen değerlerin zıt yönde etkilenmemesi için giriş ve çıkış bölgelerine uzak konumlarda basınç azalması ölçülmüştür. Kısa kanallar için, giriş çıkış bölümlerinde basınç ölçümleri yapılmış kanallardaki basınç kaybını belirlemek için giriş ve çıkış kayıpları

önceden tahmin edilmiş ve hesaplamalara dâhil edilmiştir. Laminer ve türbülanslı rejimlerdeki sürtünme faktörleri belirlenmiş ve deneysel sonuçlar sonlu hacim metodunu temel alan bir CFD yazılım paketi kullanılarak yapılan benzetimlerle karşılaştırılmıştır. Yaklaşık 2000 değerindeki bir Reynolds sayısına kadar mikro kanallardaki akım özelliklerinin geleneksel teorilerle doğru şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. Türbülansa geçişin başlangıcı canlandırılmış ve tam gelişmiş türbülanslı akışın gelişiminin mikro kanallarda geciktiği gözlemlenmiştir. Çalışmalar, mikro kanal büyüklüğünün türbülans oluşumunda kayda değer bir etkisi olabileceğini göstermiştir [55].

Lee ve diğerleri, eni 194 μm ' den 534 μm ' ye değişen, genişliğin derinliğe oranı 5 olacak şekilde neredeyse sabit tutulan bakır mikro kanallarda deiyonize suyun tek faz akışı üzerine deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Bu deneyler laminer akışı kapsamaktadır ve türbülanslı akış için genişletilebilir [56].

Favre-Marinet ve diğerleri, paralel levhalı mikro kanallarda ısı geçişi ve sıvı akışı üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmiş ve bu konudaki eserlerin sonuçlarının kanallar arasındaki en uygun aralıkları deneysel olarak belirlediğini doğrulamışlardır. Bu karşılaştırmanın sonuçları, 0.4mm' den daha büyük aralıkları olan kanallar için klasik tahmin tekniklerinin geçerli olduğunu ancak kanal Aralığı 0.4mm' den daha az olduğunda Nusselt sayılarının olması gerekenden büyük tahmin edildiğini göstermiştir. Ayrıca akış tipi geçişinin kanal büyüklüğünden etkilenmediği de belirtilmiştir [57].

Judy ve diğerleri, birleşmiş silis ve paslanmaz çelikten yapılan kare mikro kanallar ve mikro tüplerdeki basınçla zorlanmış sıvı akışını incelemişlerdir. Çapları 15-150 μm arasında değişen kanallarda viskozite farklılıklarının etkisini belirlemek için su, metanol ve isoproponal ile deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarının, Stokes akım teorisi ile belirlenen sürtünme faktörü tahminleri ile örtüştüğü görülmüştür [58].

Lelea ve diğerleri, laminer akış rejiminde çeşitli çaplarda mikro tüplerde akış ve ısı geçişi üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Paslanmaz çelikten su damıtma sistemi incelenmiş ve deneysel ısı geçişi ve akış özellikleri ile

geleneksel borular için sayısal ve teorik sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Klasik ve geleneksel teorilerin mikro kanallarda su akışı için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır [59].

Ren ve diğerleri, mikro kanallarda saf su ve KCl (potasyum klorür) çözeltilerinin debi ve basınç kaybı arasındaki ilişkiyi belirlemek için deneysel ve teorik çalışmalarını sunmuşlardır. Basınç kaybının kanal büyüklüğüne ve sıvıların iyonik konsantrasyonuna büyük ölçüde bağlı olduğu gözlenmiştir [60].

Jiang ve diğerleri, mikro kanalları ve gözenekli ortamı olan ısı değiştiricileri üzerine deneysel incelemelerini sunmuşlardır. Performansların karşılaştırılmasına ek olarak mikro kanal büyüklüğünün ısı değiştiricilerinin ısı geçiş performansı üzerindeki etkisini analiz etmek için sayısal bir inceleme yapılmıştır. Analiz edilen ısı değiştiricilerde derin ve sığ mikro kanallar ve gözenekli ortamlar bulunmaktadır. Hem ısı geçişi hem de basınç düşümü açısından ele alındığında derin mikro kanallı ısı değiştiricisinin diğer iki ısı değiştiriciden daha iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir [61].

Yin ve diğerleri, paralel devreleri ve karmaşık başlıkları olan bir mikro kanallı ısı değiştiricisinin tek fazda basınç kaybı ölçümlerini sunmuşlardır. Ölçümler dâhili imalat kusurlarını belirlemek üzere yapılmıştır. Sonuçlar milimetreden daha küçük boyutlardaki kanallarda sürtünme için Moody Diyagramı'nın uygulanabilir olduğunu doğrulamaktadır [62].

Xu ve diğerleri, akım alanını birçok bağımsız bölümlere ayıran, boyuna ve enine mikro kanalları olan bir mikro kanallı ısı değiştiricisi geliştirmişlerdir. Bu düzenleme sınır tabakanın bozulmasına ve yeniden gelişmesine sebep olarak ısı geçişini arttırmıştır. Bu incelemede geleneksel boyuna mikro kanallarla karşılaştırıldığında basınç kaybı daha azdır. Deneylerde yüksek çözünürlüğü olan kızılötesi sıcaklık ölçme sistemi kullanılarak yerel sıcaklıklar ve ısı akısı ölçülmüştür. Uygun bir ısı direnç ve boyutsuz bir basınç kaybı belirlenmiştir. Bu parametreye göre genel Nusselt sayısının değişimi sunulmakta ve birinde enine kanal olan diğerinde ise olmayan iki silikon mikro kanal ısı değiştiricisinden gelen ısı geçişinde artış ve

basınç kaybında azalmayı gösteren deneysel sonuçlar karşılaştırılmaktadır [63].

Steinke ve Kandlikar, hidrolik çapı 207 μm olan ikizkenar yamuk şeklindeki mikro kanallarda kaynar suyun akışı sırasında laminer tek-fazlı ve iki-fazlı akış üzerine deneysel çalışmalarını sunmuşlardır. Adyabatik koşullar altında tek-fazlı laminer akış sürtünme faktörünün, geleneksel ilişkiler kullanılarak doğru şekilde belirlenebileceği görülmüştür [12].

Celata, kılcal mikro borularda tek- fazlı ısı geçişi ve akış araştırmalarının bir özetini ve laminer akım rejimindeki ısı geçişi ve sürtünme faktörünün deneysel sonuçlarını sunmuştur. Deneysel çalışmalar sonunda, yaklaşık 800' ün altındaki Reynolds sayıları için sürtünme faktörünün Hagen-Poiseuille kanunu ile uyumlu olduğu görülmüştür. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin Reynolds sayısının 1800-2500 olduğu aralıkta gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca mikro tüplerdeki ısı geçişinde geleneksel ısı geçişi bağıntılarının yetersiz kaldığını belirtmiştir [64].

Eason ve diğerleri, farklı teknikler kullanılarak farklı kesit şekilleri ve boyutları alınarak (ikizkenar yamuk, dikdörtgen ve dikdörtgenimsi) hem silikon hem de plastikten yapılan mikro kanalların basınç kaybı özelliklerinin doğrudan karşılaştırmasını sunmuşlardır. Yapım süreci ve kanal boyutlarının ölçümleri de sunulmuştur. Ayrıca hata analizi ve ölçümlerdeki yanlışlıkları hesaba katmak için yöntemler de sunulmuştur. Deneysel ve tahmini basınç kaybının karşılaştırması ve sürtünme faktörü karakteristikleri sunulmuş ve ele alınan çeşitli durumlar için irdelenmiştir [65].

Newport ve arkadaşları, mikro kanallardaki sıcaklık dağılımı ölçümlerinde geline son durumu özetlemiş ve akışın sıcaklık alanının elde edilmesi için interferometrik ölçümler önermiştir. İncelemelerde faz farkı yoğunluğu haritalarından sıcaklık verilerinin alınmasının doğruluğu da tartışılmıştır. Ayrıca faz oluşumu üzerinde ses seviyesinin etkisini tahmin etmek için optik deneyler de tanımlanmıştır. İnterferogram benzetimi ve ölçümlerdeki ses seviyesinin iki boyutlu yoğunluk çizimleri sunulmuştur [66].

Kockman ve diğerkleri, mikro kanallardaki 90 derece dirseklerde kütle geçişinin sayısal analizi hakkındaki tartışmaları sunmuşlardır. “T” bağlantılarındaki ısı geçişi de analiz edilmiştir. Çalışma, farklı dirsek ve bağlantı şekillerinde ısı ve kütle geçişi, akışkan kuvvetleri, laminer akış basınç dağılımı üzerine tartışmalar da sunmaktadır [67].

Nishio, mikro kanallarda ısı geçişini tek-fazlı laminer akış, iki-fazlı akış ve dalgalı akışın ısı geçiş durumlarını irdelemiştir. Mikro kanallardaki ısıl dalgalanmaların detaylı analizleri, buharlaşma üzerindeki etki ve termo akustik etkiler dikkate alınarak sunulmuştur. Ayrıca 0.1mm’ den daha geniş çaplı tüplerin deneysel sonuçlarının geleneksel analizlerle uyduştüğünü gösteren deneysel sonuçlar da tartışılmıştır [21].

Kandlikar ve Grande, elektronik çiplerin soğutma gereksinimi için tek-fazlı bir soğutma teknolojisinin yol haritasını sunmuşlardır. Mikroelektroniklerin doğrudan su soğutması tasarım seçeneklerinin yani sıra çip soğutma üzerine mevcut teknolojiler de incelenmiştir. Araştırmada ayrıca mikro kanallar ve kanallar içindeki mikro yapılar için derin reaktif aşındırma teknolojisi gibi yapım metotları da yer almıştır. Ayrıca basınç kaybı, maliyet, kirlenme gibi anahtar tasarım koşulları üzerine tartışmalar da sunulmuştur [68].

Nilson ve diğerkleri, tek -boyutlu enerji denklemini ve Laplace-Young denklemini kullanarak, üniform derinlikteki konik bir mikro kanalda buharlaşan akış için analitik çözümler elde etmiştir. Akış alanı iki bölgeye bölünmüştür: eğri yüzeyin kanalın üst köşelerine tutturulduğu giriş alanı, eğri yüzeyin duvarlar boyunca kanalın dibine çekildiği iç bölge. Bu alanlar analizlerde aradaki ortak yüzeyde birleştirilmiştir. Sonuçlar soğutma kapasitesi açısından konik kanalların düz kanallardan daha iyi bir performans sağladığını göstermiştir [69].

Garimella, çeşitli kesit şekilleri ve hidrolik çaplar için, mikro ve mini kanallarda yoğunlaşma için akış tipleri, basınç kaybı ve ısı geçişi üzerine deneysel incelemeler sunmuştur. Akışın görselleştirilmesi sonuçları, akış mekanizmalarının anlaşılmasını sağlamak için sunulmuş ve tartışılmıştır. Bu çalışmalar, mikro kanallardaki çeşitli

akış rejimleri arasındaki geçişin geleneksel geometrilerde olması beklenenden farklı koşullarda meydana geldiğini göstermiştir [70].

Garimella ve diğerleri, mevcut basınç kaybı modelleri ile yatay mikro kanallardaki soğutucu R134a'nın yoğuşması sırasındaki basınç kaybı ölçümlerinin deneysel sonuçlarını birleştirmiş ve buhar fazından sıvı fazına yoğuşma işleminin tüm gidişatını gösteren kapsamlı bir model sunmayı amaçlamışlardır [71].

Li ve diğerleri, mikro kanallarda gaz akışına dair teorik bir çalışma rapor etmiştir. Laminer akışta, ısı iletkenlik değişimleri için kinetik teoriden yararlanan bir model kullanarak cidarların ısı geçiş özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mikro kanallarda ve mikro tüplerde tam gelişmiş laminer akış için sıcaklık dağılımları ve ısı geçişi katsayıları için analitik ifadeler türetilmiştir. İncelemeler, küçük boyutlu kanallarda gazın ısı iletim katsayısı değişiminin gaz akışındaki ısı geçişini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir [31].

Yu ve Ameen, ısı geçişlerinin artışı veya azalması ile geçiş noktası, farklı en boy oranları ve karma ortalama sıcaklıklarını bulmuş ve Nusselt sayıları elde etmişlerdir. Isı geçişinin iki boyutsuz değişkene dayandığı bulunmuştur. Farklı en boy oranları için, bu boyutsuz değişkenlere dayanarak, ısı geçişinin artışı ve azalması arasındaki kritik eşik noktası belirlenmiştir [74].

Murakami ve Mikic, viskoz yayılımın hava soğutmalı mikro kanal ısı değiştiricilerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Boyutsuz gruplara dayandırılan metod sunulmuş ve verilen geometrik boyutlar ve ısı akısı için minimum pompalama gücü olan bir tasarım oluşturmak için çalışılmıştır. Performans değerlendirilmiş ve ısı akısı üzerindeki parametrik etkiler hesaplanmıştır. Hesaplamalar, mikro kanal ısı değiştiricisi için en iyi tasarımları elde etmede viskoz yayılımın etkilerinin göz önünde bulundurulmasının önemini ortaya çıkarmıştır [72].

Hrnjak ve ekibi, mikro kanal ısı değiştiricilerinde akışın düzgün dağılmaması sorununu sunmuştur. Kanallardaki tek ve iki-fazlı akışkanın eşit şekilde dağıtılması için değişik seçenekler sunulmuş ve tartışılmıştır. Akışkan olarak R134a

kullanılmıştır [62].

Garimella, 1990' larda mikro kanallardaki akış ve ısı geçişi üzerine yapılan deneysel ve teorik araştırmaların sonuçlarını derlemiş ve analizini sunmuştur. Mikro kanal akışı ve ısı geçişinde rapor edilen anormallikler ve sapmalar ayırt edilmiş ve geleneksel bağıntıların sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Raporda gözlemlenen sonuçlarda ortaya çıkan farklılıkları tespit edip ortadan kaldırmak için kanalların yerleştirilmesi, imalatı ve tasarımına dair kapsamlı incelemeler yapma ihtiyacı vurgulanmıştır [26].

Mikro kanallarda tek-fazlı ve iki-fazlı akış ile ilgili bugüne kadarki eserlerin bir incelemesi de Palm tarafından sunulmuştur. Verilen bilgilerle, mikro kanallardaki akış karakteristiğinin geleneksel teorilerden sapmasının sebeplerine dair cevaplanmamış bazı sorular belirlenmiştir [28].

Guo ve Li, mikro ölçülerde tek-fazlı akış ve ısı geçişi üzerindeki boyut etkilerini, karakteristik uzunluk azalırken, gaz seyrekleşme etkisi ve baskın faktörlerin değışiminin etkilerine göre sınıflandırarak bir inceleme ve tartışma sunmuşlardır. Çalışma, mikro ölçekte akış ve ısı geçişi verileri üzerinde; yüzey pürüzlülüğü, sıvı akışı üzerindeki baskın güçlerin değışiminin etkileri, aksel iletim etkileri, yüzey geometrisi ve ölçümlerin doğruluğu gibi diğer önemli faktörleri detaylı bir şekilde tartışmıştır [23].

3.1.Deneysel Çalışmalar

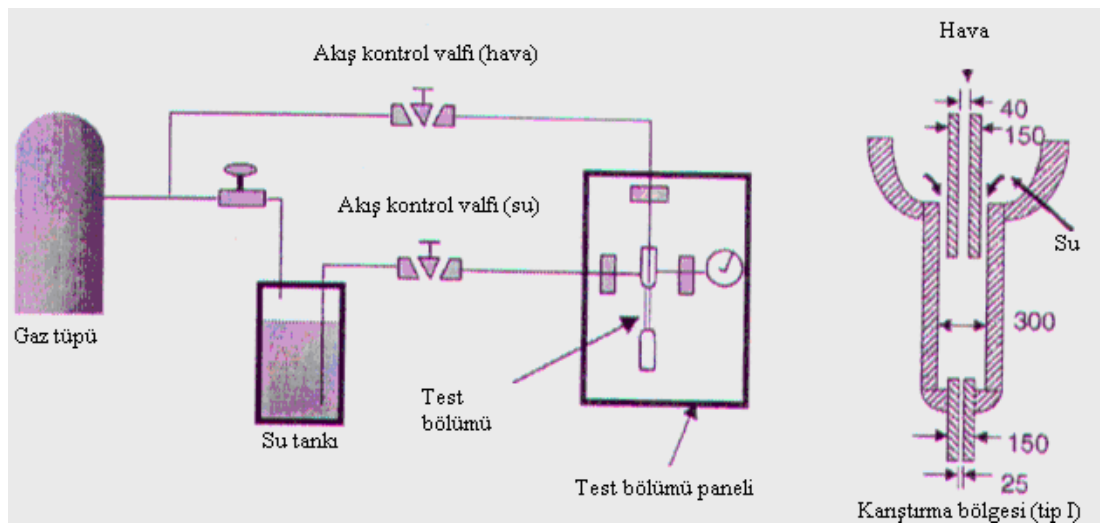
3.1.1. Deney 1 : Mikro kanallarda iki fazlı akış

Akimi Serizawa, Ziping Feng, Zensaku Kawara tarafından mikro kanallarda iki fazlı akış örnekleri üzerine yapılan deneylerde (Kasım 2001), hava-su ve sıvı-gaz akışı için 20, 25 ve 100 μ m iç çaplı tüplerde ve buhar-su akışı için 50 μ m iç çaplı tüplerde iki fazlı akış örnekleri mikroskopla gözlenmiştir. Hava-su akışı için, yüzeysel hızlar $J_L=0.003-17.52$ m/s ve $J_G=0.0012-295.3$ m/s oranında geniş bir aralığı kapsamaktadır. Hava-su ve buhar-su sistemlerinde akış örnekleri ve bunların özellikleri tanımlanmıştır. Test tüpünün iç duvarında iki fazlı akış örneklerinin yüzey

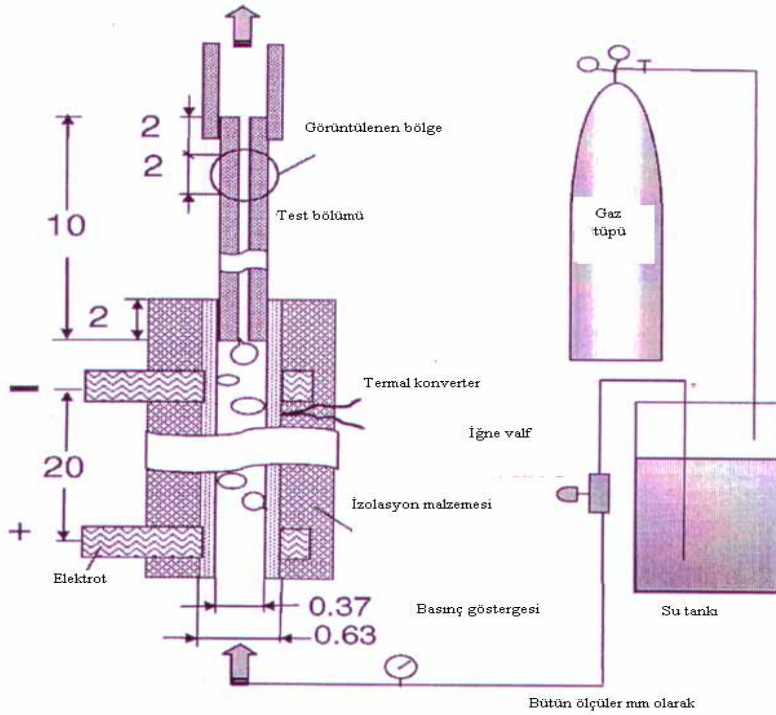
koşullarına duyarlı olduğu bildirilmiştir. Tüp duvarı ve gaz külçesi arasında, dikkatlice işlenmiş temiz yüzeyde kısmen sabit ince sıvı film tabakasıyla sabit bir dairesel akış ve gaz külçesi oluşumuna rastlanmıştır. Düşük hızlarda, gaz külçesi ve tüp duvarı arasında kuru ve ıslak bölgeler oluşmuştur. Armand ilişkisi ile iyi bir uyum gösteren kesitsel ortalama boş kırılma da fotoğraflarla tespit edilmiştir [37].

Hava-su ve buhar-su deneylerinin test aygıtlarının şematik diyagramları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Hava-su deneyleri için test bölümleri saydam silis ya da dairesel kesitli ve yatay kılcal kuvars tüplerden oluşmaktadır. Test edilen tüp iç çapları 10, 20, 30, 50 ve 100 μm ’ dur. Tüplerin toplam uzunluğu, test bölümüne giden karışım bölgesinin tasarımına bağlı olarak (8–10 mm’ nin görünür olduğu) 10–14 mm arasındadır. Bu deney sadece 20, 25 ve 100 μm iç çaplı test bölümünden elde edilen sonuçlarla ilgilidir.

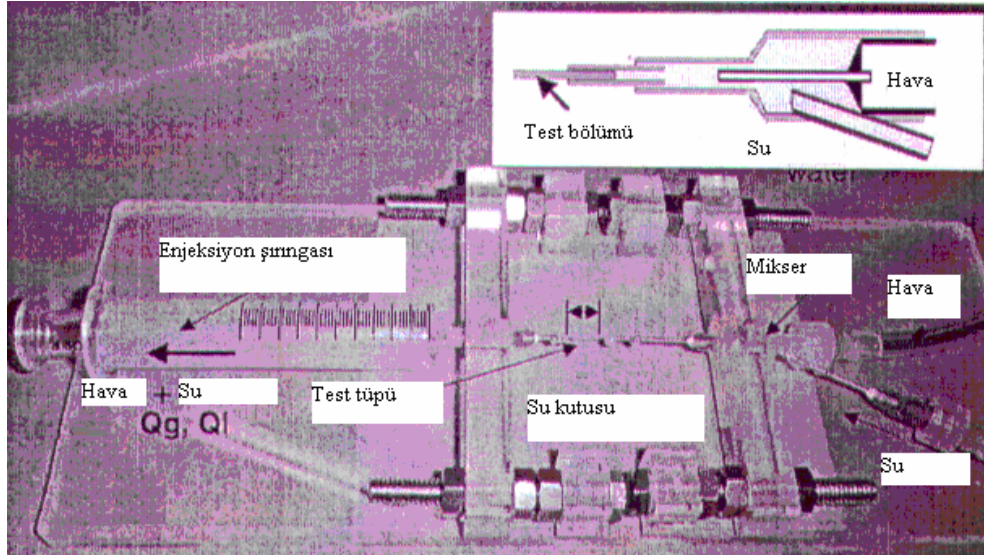
Su tankı için basınç da sağlayan yüksek basınç gaz tüpü hava tedarik etmektedir. Su yüksek basınçlı hava ile verildiğinden dolayı, pompa nedeniyle oluşabilecek titreşimi ve kirliliği önlemek için bu deneyde pompa kullanılmamıştır. Deney başlamadan önce, test bölümü ya test bölümünden etanol çekilerek ya da yumuşak bir fırça ve yüksek saflıktaki damıtılmış su, etanol ve seyreltilmiş hidroklorik asit karışımı kombinasyonu ile havuzda temizlenmektedir.



Şekil 3.1. Hava-su akışı için deney mekanizmasının şematik bir resmi (Bütün ölçüler μm) [37]



Şekil 3.2. 50 µm dairesel tüpte buhar-su deneyinin şeması [37]



Şekil 3.3. Karıştırma odası [37]

Şekil 3.1 ve 3.3' te gösterildiği gibi, farklı tasarımlardaki karıştırıcı yardımıyla iki fazlı akış gerçekleştirilmiştir. Su karıştırıcıya çevresel olarak enjekte edilirken, hava aksel olarak enjekte edilmiştir. Test bölümünün giriş basıncı, istenen akış durumunu elde etmek için değişken tutulmuş ve çıkış basıncı atmosfer basıncına eşit durumdayken, karıştırıcıya bağlı hassas basınç ölçme cihazıyla basınç ölçülmüştür. İki fazlı akış oranını ölçmek için, test bölümünün çıkışına bir enjektör başı ile hassas

enjeksiyon şırıngası yerleştirilmiştir. Bu şırınga test bölümünden gelen iki fazlı akışı toplayabilmekte ve hava ve su fazlarının hacimsel akış oranını tam olarak okuyabilmektedir. Dağınık kabarcıklı akış gibi durumlarda hacimsel akış oranı çok düşük olduğundan, yeterli sıvı hacmine ulaşmak için 24 saatten daha fazla beklenilmiştir.

Akış örneklerinin görüntülenmesi, orijinal görüntüyü 150 kata kadar büyütebilen hassas bir mikroskopla (NIKON, SMZ-U tipi) yapılmıştır. Saniyede 30–600 kare kayıt hızında ve 1730 dan 1/10 000/s çekme hızına sahip yüksek hızda bir kamera sistemi (FAST-CAM-Rabbit, CANON) mikroskopla birlikte yerleştirilmiştir. Görüntüleme için kullanılan ışık demeti, test bölümü altındaki ayarlanabilir bir ışık kaynağıyla elde edilmiştir. İki fazlı akış örnekleri, asıl olarak test bölümünün aşağıya doğru akış alanında 7000–9000 μm ' da gözlenmiştir. Şekil 3.2' de gösterilen buhar-su test devresi bir ön ısıtıcı ve test bölümünü içermektedir. Saf su çalışma sıvısı olarak kullanılmakta ve yüksek hava basıncıyla pompalanmaktadır. Ön ısıtıcı, 370 μm iç çapında, 630 μm dış çapı olan paslanmaz çelikten bir tüptür. Isıtma gücü, ayarlanabilir bir DC güç kaynağıyla sağlanmaktadır. Test bölümü 360 μm dış çapında ve 10000 μm uzunluğunda, 50 μm fused silica kılcal tüptür. Test bölümünün çıkışına ortalama hacim akış oranı zamanını ölçmek amacıyla sıvı toplamak için hassas bir enjeksiyon şırıngası takılmıştır. Görüntüleme, yüksek hızlı bir video kamerayla birlikte SMZ-U tipi (NIKON) mikroskobuyla gerçekleştirilmiştir. Bütün test esnasında 1/10 000s objektif hızında, saniyede 600 kare kaydı kullanılmıştır. Ortalama sıvı hızı yaklaşık 24.7 mm/s de ve giriş basıncı 2.4 barda tutulmuştur. Görüntüleme, test bölümünün girişinden 6000–8000 μm mesafesinde yürütülmüştür.

Sonuç olarak, 20, 25 ve 100 μm ve 50 μm iç çaplı tüplerde sırasıyla hava-su ve buhar-su iki fazlı akış örnekleri gözlenmiş ve dağınık kabarcıklı akış, gaz darbeli akışı, sıvı dairesel akış, sıvı darbeli akışı, eğri barbekü akışı (Yakutori) şekilli akış, halkasal akış, köpüklü akış, ince çizgili akış ve sıvı damlacıklı akış ayrıntılı özellikleri tanımlanmıştır. Ayrıca deneysel olarak, tüp duvarı ve sıvılar arasındaki kirlilik ve ıslaklık da araştırılmıştır. Dikkatlice temizlenmiş tüp duvarı ve gaz külçeleri arasında yüksek hızlarda halkasal akış ve gaz külçelerinin oluşumuna da rastlanmıştır. Ancak, düşük hızlarda, gaz külçeleri ve tüp duvarı arasında kuru ve

ıslak bölgeler oluşmaktadır. İki fazlı akış örneği geçiş haritası çıkarılmış ve Mandhane ilişkisiyle karşılaştırılmıştır. Birkaç 10 μm ' den birkaç 100 μm iç çapa kadar olan mikro kanallarda iki fazlı akışların, alışılmış ölçüde olan tüplerdeki iki fazlı akıştan birçok noktada önemli farklılık gösterdiği kabul edilse de, mevcut durumda, genel eğilim Mandhane ve diğerlerinin öngörülerini izlemektedir [85].

3.1.2. Deney 2 : Mikro kanal yapılarında tek fazlı su akışı için taşınım ve ısı geçişi

Peng ve Peterson tarafından yapılan deneylerde, 0.133-0.367 mm aralığındaki hidrolik çaplarda ve farklı geometrik şekillerde dikdörtgen kesitli mikro kanal yapılarında tek fazlı akışta taşınım ve ısı geçişi ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Sonuçlar, geometrik konfigürasyonun tek fazlı akışta taşınım ve ısı geçişi ve akış karakteristikleri üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Tabakasal ısı geçişinin mikro kanalların merkezden merkeze olan hidrolik çaplarının oranına bağlı olduğu görülmüştür. Akımsal ısı geçişinin, oluk oranı dikkate alınmaksızın $Z=0.5$ ' in en iyi konfigürasyon olacağı şekilde yeni bir boyutsuz değişken olan Z' nin bir başka fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Sürtünme faktörü ya da akış direnci, Z 0.5' e yaklaştığında, minimum değere ulaşmıştır. Hava akış direnci klasik bağıntıda tahmin edilenden daha düşüktür ve tam olarak gelişmiş hava akışı için Reynolds sayısı, düzenli kanal akışından çok daha düşüktür. Isı geçişi ve basınç kaybı için, deneysel ilişkiler gösterilmiştir [30].

Mevcut araştırma için, her biri birkaç dikdörtgen mikro kanaldan oluşan farklı mikro yapılar tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bunların geometrik ve karakteristik parametreleri Tablo 3.1' de verilmiştir. Şekil 3.4' te gösterilen test modülü, mikro kanalların bulunduğu paslanmaz çelik bir plakadan oluşmakta ve aynı zamanda bir izolatör ve kapatıcı işlevi görmektedir. Mikro kanal plaka ya da test bölümü üstünde, iki karter işlenmiş ve mikro kanallarla bir birine bağlanmıştır. Giriş ve çıkış karterlerinde, giriş ve çıkış basıncını ve mikro kanallardaki basınç kaybını ölçmek için, basınç vanaları yerleştirilmiştir. Karterlerin giriş ve çıkışında, giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için sensörler yerleştirilmiştir. Bundan başka, aksel duvar sıcaklık dağılımını ölçmek için, her mikro kanal plakasının arkasına altı ısı çifti yerleştirilmiştir. Bu ısı çiftleri üç farklı yere uzunlamasına dağıtılmıştır. Deney

sırasında, test modülü, ısı kaybını en aza indirmek için bir yalıtım malzemesi ile sarılmıştır.

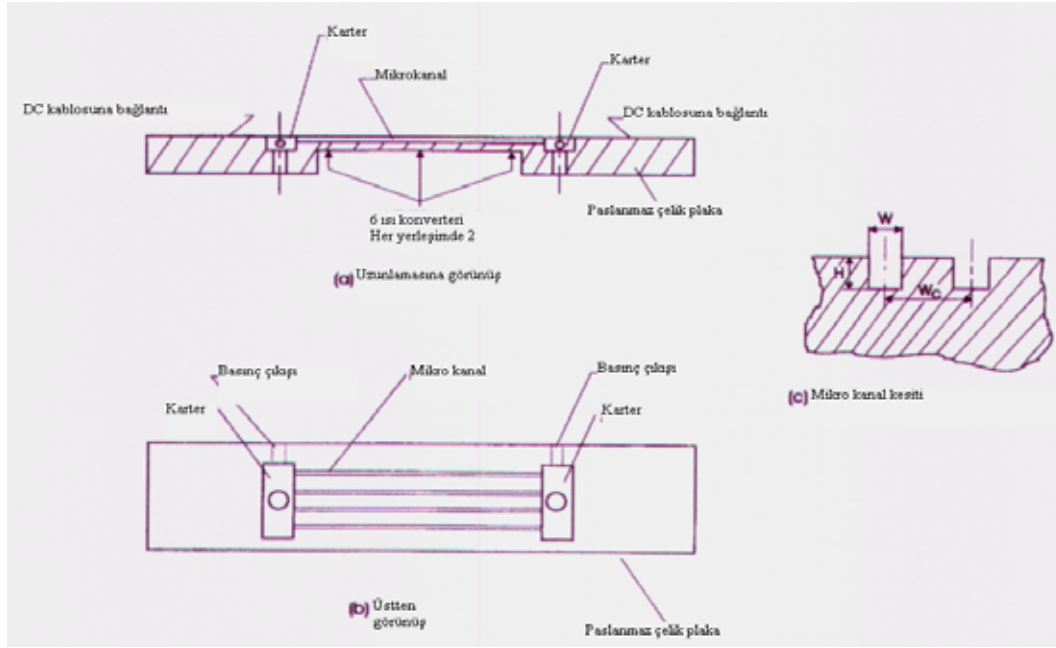
Çalışma sıvısı olarak su seçilmiştir. Sıvı özelliği değişimlerine karşı, deney 20–45 °C giriş sıcaklığında yapılmıştır. Sıvı hızı, 0.20 – 12 m/s olarak oldukça yüksektir. Buna göre Reynolds sayısı tamamen laminardan yüksek türbülanslıya geçişte 50–4000 arasındadır. Test tüpüne giren suyun debisi, ağırlık metoduyla kalibre edilen bir rotametre ile ölçülmüştür. Mikro kanallar arasından akan sıvının basınç kaybı, sürtünme katsayısını belirlemek için ölçülmüştür.

Mikro kanal paslanmaz çeliği, düşük voltaj ve yüksek elektrik akımı sağlayan bir DC transformatöre doğrudan bağlanarak ısıtılır. Bu yolla, plakanın ince bölümünde oluşan ısı, mikro kanalın her iki ucundan da, Şekil 3.4’ te gösterildiği gibi, doğrudan sıvıya aktarılır. Plakanın orta merkezi kalınlık ve genişlik bakımından aynı olduğu için, ısı akısının uzunlamasına ısıtılmış çevrede, izole edilen üst kısım dışında aynı olduğu gözlenmiştir. Isı akısını ölçmek ve kontrol etmek için giriş voltajı ve akımı ayarlanmıştır. Bu parametreler, 0.15 – 0.92 V ve 50–400 A arasında değişmektedir.

Tablo 3.1. Test bölümünün geometrik parametreleri [30]

Plaka	W [mm]	W_c [mm]	W_i [mm]	L [mm]	H [mm]	D_h [mm]	D_h/W_c	H/W	Z	C_{t1}	C_{t2}
1	0.4	4.5	18	45	0.2	0.267	0.0593	0.5	0.5	28 600	40 400
2	0.4	2.8	18	45	0.3	0.343	0.1225	0.75	0.75	44 800	34 200
3	0.4	2.0	18	45	0.3	0.343	0.1715	0.75	0.75	44 800	34 200
4	0.3	4.6	18	45	0.2	0.24	0.0533	0.667	0.667	42 600	18 200
5	0.3	2.8	18	45	0.3	0.30	0.107	1.00	1.00	109 000	38 600
6	0.3	2.0	18	45	0.3	0.30	0.15	1.00	1.00	109 000	38 600
7	0.2	4.5	18	45	0.2	0.20	0.0444	1.00	1.00	32 400	20 100
8	0.2	2.8	18	45	0.3	0.24	0.0857	1.50	0.667	42 600	18 200
9	0.2	2.0	18	45	0.3	0.24	0.12	1.50	0.667	42 600	18 200
10	0.1	4.5	18	45	0.2	0.133	0.0296	2.0	0.50	5200	1820
11	0.1	2.8	18	45	0.3	0.15	0.0536	3.0	0.333	24 200	6920
12	0.1	2.0	18	45	0.3	0.15	0.075	3.0	0.333	24 200	6920

Deneyler sabit durumda gerçekleştirilmiştir. Her farklı durum için deneysel veriler; debi, sıvı sıcaklıkları, giriş ve çıkış basınçları (ya da giriş ile çıkış arasındaki basınç kaybı), test bölümü duvarının sıcaklığı ve giriş voltajı ve akımı içeren deneysel veriler ölçülüp kaydedilmiştir. Ölçme belirsizlikleri, analiz edilmiş ve Tablo 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.4. Mikro kanallı yapılarda su akışı için tek fazlı taşınım ile ısı geçişi deney düzeneği [30]

Tablo 3.2. Deneysel belirsizlikler [30]

<u>Değişkenler</u>	<u>Belirsizlik %</u>
Debi	1.5
Hız	3.5
Voltaj	0.5
Akım	0.5
Isı akısı	8
Uzunluk ölçüsü	12
Basınç düşmesi	1.5
Sıvı sıcaklığı	1.5
Duvar sıcaklığı	1
Isı iletim katsayısı	10
Akış sürtünme faktörü	10
Nusselt sayısı	16
Reynolds sayısı	8

Sürtünme faktörünün ve Reynolds sayısının hesaplanmasında, suyun termo fiziksel özelliklerinin sıvı basıncından bağımsız olduğu var sayılmaktadır. Sıvı sıcaklığındaki değişim nedeniyle, sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı, plakanın uzunluğuna göre

değişim göstermiştir. Mikro kanalların giriş ve çıkışında ani bir kesit azalması ve artması olduğu için, ölçülen gerçek basınç kaybı, bu azalma ve artmaları da içermektedir.

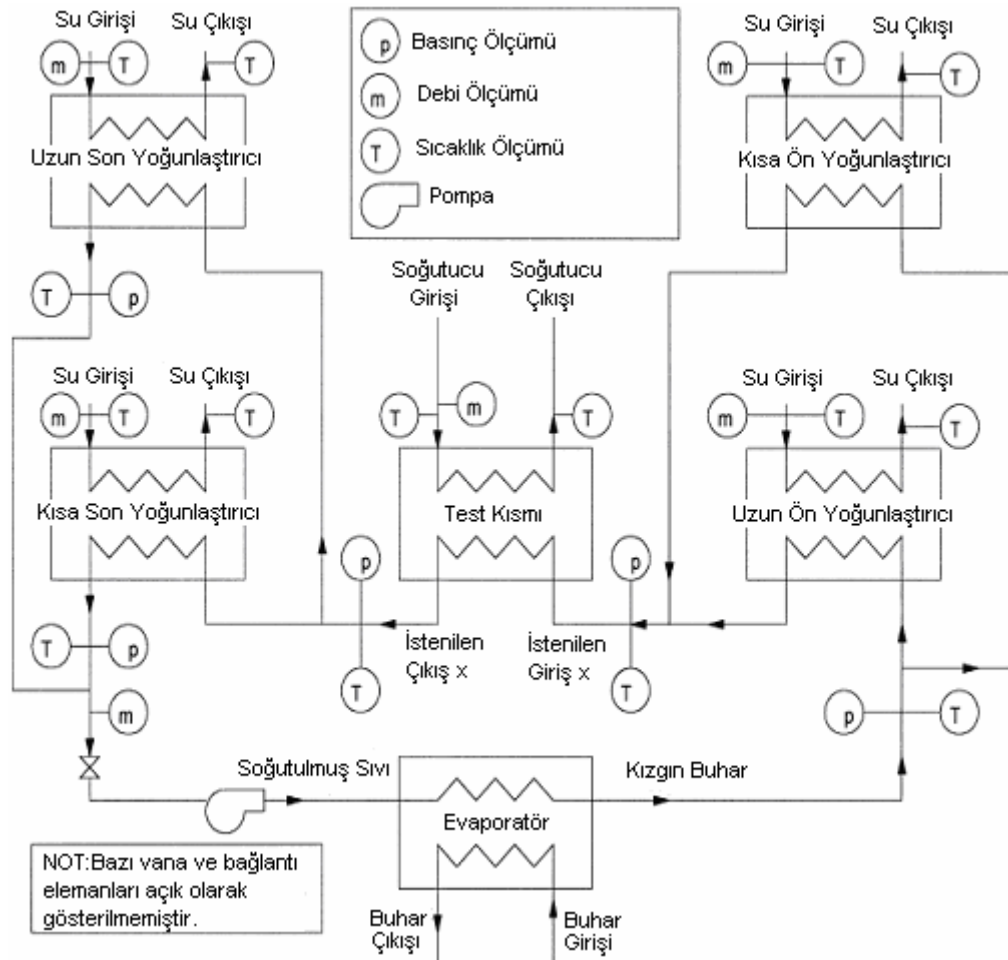
3.1.3. Deney 3 : Mikro kanallarda yoğuşma ile ısı geçişinde basınç kaybı ve ısı geçişi

Srinivas Garimella tarafından yapılan deneyde mikro kanallarda yoğuşma sırasında, basınç kayıpları ve ısı geçişi düzeneği incelenmiştir. Akış görüntüleme deneylerinin yürütüldüğü test düzeneği (Şekil 3.5), soğutucunun yoğuşması esnasında akış örneklerini kaydetmek için geliştirilmiştir. Kızdırılmış buhar su soğutmalı ön yoğunlaştırıcı kullanılarak istenilen düzeyde kısmen yoğunlaştırılır. Ön yoğunlaştırıcılardan çıkan soğutucu, içinde soğutucu ve iç boruyla diğer bir şeffaf dış pleksiglas boru arasından hava akışı olan bir cam boru ile boru içinde boru tipi karşı akışlı bir ısı değiştiricisi olan test bölümüne girer. Böylece akış rejiminin görüntülenmesi sağlanmış olur. Soğuk hava ve soğutucu arasındaki ısı geçişi yoğunlaşmaya yol açar. Halka içinde akan sıkıştırılmış hava mikro kanal için düşük diferansiyel basınç sağlayarak testin 1379–1724 kPa düzeyindeki doymuş basınç oranında yapılmasına izin verir. Farklı test koşullarında, farklı yoğunlaşmalara yer verebilmek için hava akış oranları değiştirilmiştir. Test bölümünün aşağı bölümünde bulunan yoğunlaştırıcılar soğutucunun tamamen yoğuşması ve sonradan soğutulması için kullanılmıştır [26].

Soğutucu ve hava akışının ölçümü için Coriolis tipi debimetre (soğutucu için $\pm\%15$ belirsizlik ve hava için $\pm\%0.2$ belirsizlik) kullanılmıştır. Soğutma suyu debileri maksimum $\pm\%2$ belirsizlikteki hassas rotametreler kullanılarak ölçülmüştür. $\pm\%0.25$ belirsizlikteki basınç dönüştürücüleri kullanılarak soğutucu basıncı ölçülmüştür. Bütün sıcaklıklar platin RTD' ler kullanılarak ölçülmüştür. 1/20 saniyeden 1/10 000 saniyeye kadar hız ayarı olan dijital kamera kullanılarak akış rejimleri kaydedilmiştir.

Ön yoğunlaştırıcıdaki enerji dengesi test bölümü girişinde soğutucu yeterliliğini sağlarken, son soğutucudaki benzer bir enerji dengesi test çıkışında soğutucu yeterliliğini sağlamıştır. Ek olarak, ölçülen giriş ve çıkış sıcaklıklarında ve test

bölümündeki havanın akış oranında (Δx) test bölümü boyunca aşırı ve bağımsız soğutucu değişimi gözlenmiştir. Ölçülen Δx ($x_{\text{test, i}} - x_{\text{test, o}}$) aralığında bütün deneylerde mükemmel bir uyum bulunmuştur. Ortalama test bölümü yeterliliği akış rejiminin kaydedilmesi için kullanılmıştır. Bu yaklaşım bütün farklı rejimler için on farklı soğutucu kullanılarak ($0 < x < 1$), her boruda beş farklı kütle akışı için ($150-750 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$) 50 veri noktasında uygulanmıştır.

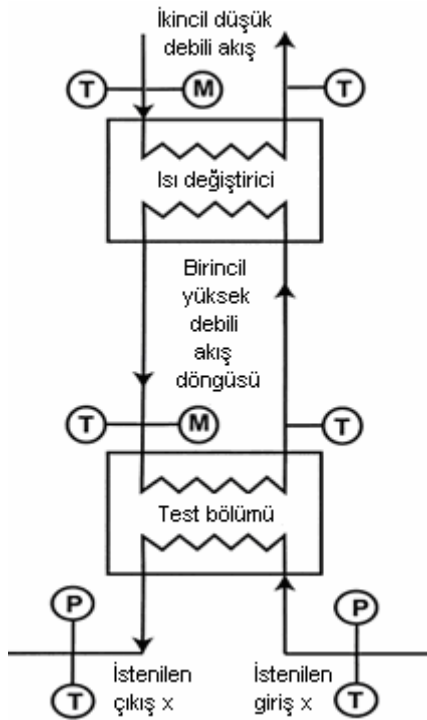


Şekil 3.5. Test düzeneği şeması [26]

Srinivas Garimella tarafından yapılan başka bir deneyde ısı geçişi testleri, basınç kaybı deneylerinde kullanılan aynı test bölümleri ile yapılmıştır. Ancak, mikro kanallardaki yüksek ısı taşınım katsayıları ve düşük kütle akışları test mekanizmasında ek değişiklikler yapmayı gerektirmektedir [26].

Soğutucu ısı taşınım katsayılarının hassas ölçümleri bu konuyla ilgili bir termal genişleme tekniğinin geliştirilmesiyle çözülmüştür. Böylece, Şekil 3.6’ da gösterildiği gibi test bölümü kapalı bir spiralde (birincil), yoğunlaşma tarafının hâkim termal direnci göstermesi için yüksek hızda su akışı kullanılarak soğutulmuştur. Bu birincil spiral ve ikincil soğutma suyu arasında, sıcaklık farkı elde etmek için ısı değişimi uygulanmıştır. İkincil soğutucu debisi, uygun bir ΔT sağlayabilmek ve test bölümünde düşük yoğunlaşma için ayarlanmıştır.

Düşük iletkenlikte çoklu fenolik köpük izolasyonu ve birincil soğutucu ve çevre arasındaki düşük sıcaklık farkları, birincil spiralden çevreye ısı kaybını en aza indirir. Aynı şekilde, bu spirale ısı katkısı, oldukça düşük debili sirkülasyon pompasıyla en aza indirilir.



Şekil 3.6. Termal genişleme tekniği çizimi [26]

Bu teknik ile sağlanan termal genişleme 200 W’ dan daha düşük ısı geçişinde bile \pm %2’ den daha az bir ölçüm belirsizliği ile sonuçlanmıştır. İkincil spiral görevindeki hatalarda maksimum belirsizlik \pm %10 dolayında olmuştur (bu koşullarda \pm %50 belirsizlik beklenmektedir). Büyük soğutucu debisi ve yüzey alanındaki artış, soğutucu çıkış duvarlarında yüksek soğutucu direnç oranlarıyla sonuçlanmıştır (5 ve

30 arası). Bu yüksek direnç oranı, ısı geçişindeki \pm %25 lik bir belirsizlikte bile soğutucu tarafı ısı taşınım katsayısını önemli ölçüde etkilememiştir. Bu deneyde dairesel ve dairesel olmayan mikro kanalların çoğu için, yoğuşma ile ısı geçişi katsayısındaki belirsizlik %20 dolayında olmuştur.

Isı geçişi katsayıları için rejim bazlı modellerin gelişimi devam etmektedir. Asıl olarak, veriler çoklu akış mekanizmaları arasındaki kesişme bölgeleri boyunca uygulanabilir akış rejimlerine bölünmüştür. Isı geçişi katsayıları, daha sonra ara yüzeysel kesme kuvveti gibi akışla ilgili parametrelere temel oluşturan basınç kaybı modelleriyle, uygulanabilir akış mekanizmaları şeklinde modellenmiştir. Bu kanallardan basınç kaybı verisinin, daha büyük borular için geleneksel modellerden çok, ısı geçişi modelleriyle birleştirilmesi, ısı geçişi modellerinin daha iyi sunulmasına ve modellerde daha fazla doğruluğa imkân vermektedir. Bundan başka, bitişik akış rejimleri için modeller arasındaki enterpolasyon, ısı geçişi katsayılarında kesişen bölgelerde yumuşak geçişlerle sonuçlanmaktadır.

Mikro ve mini kanallarda yoğuşma akışı örneklerinin, basınç kaybının ve ısı geçişinin devam eden araştırması 0.4–4.91 mm çapında kanallarda, 150 kg/m²s kütle akışında ve 750 kg/ m²s de yapılmıştır. Yoğuşma süreci esnasında görüntülemeyi sağlayan teknikler, bu geniş aralıkta değişen kütle akışı ve farklı şekil ve çaplardaki akış mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Video kayıtlarından geliştirilen akış rejimi haritaları, farklı akış rejimleri arasındaki geçişin, mikro kanallarda, geleneksel geometrilere olduğundan farklı koşullarda oluştuğunu göstermiştir. Özellikle, aralıklı akış rejimi uzantısının hidrolik çap azaldıkça, arttığı görülmüştür. Aynı şekilde, dalgalı akış rejimi de çap azaldıkça azalmakta ve kaybolmakta ve küçük çaplarda yer çekimi kuvvetinin azalan etkisini gösterir şekilde yerini dairesel akışa bırakmaktadır. Ancak, kanal şekli uygulanacak yoğuşma akışı örneğinin belirlenmesinde, hidrolik çaptan daha az önem taşımaktadır.

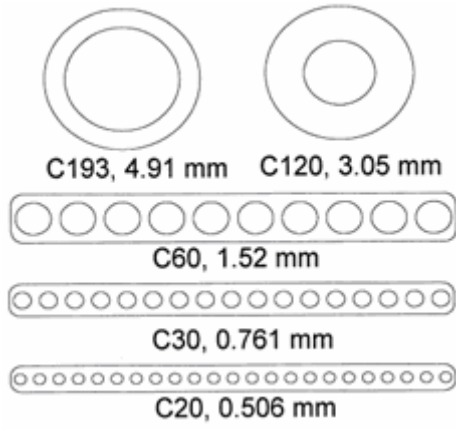
Buhar-sıvı hazne boyunca dairesel ve dairesel olmayan kanalların basınç kaybı ölçümleri, yoğuşmada basınç kaybı için deneysel geçerliliği olan modelleri geliştirmek için akış görüntüleme araştırmaları verileriyle bağlantılı olarak kullanılmıştır. Aralıklı rejimde örneğin, model sıvı dolgu, film tarafından

çevrelenmiş buhar- kabarcık bölgelerinin oluşumuna katkıda bulunmuştur. Bir sıvı dolgu sıklık modeli geliştirilmiş ve modellerin tahminleriyle ölçülen veriler arasında mükemmel uyum göstermiştir. Dairesel ve dairesel olmayan geometrilerin benzer modelleri üzerinde ısı geçişi katsayıları ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerin hassas şekilde yapılabilmesi için bir termal genleşme tekniği geliştirilmiştir.

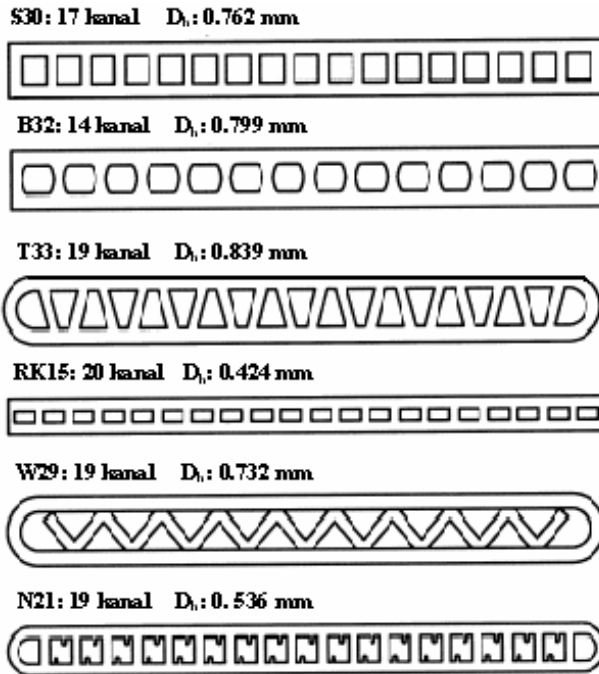
Isı geçişi katsayısı, basınç kaybı ve boyutsuz parametreler bazında geçiş kriterleri için yeni modellerin geliştirilmesine devam edilmektedir. Akış görüntülemesi, basınç kaybı ve ısı geçişi ölçümlerini ve analitik modelleme kullanan bu entegre yaklaşımın mikro ve mini kanallarda yoğuşma sürecinin daha iyi anlaşılmasına imkân tanıyacağına inanılmaktadır.

Srinivas Garimella' nın başka bir deneyinde büyük çapta (4.91 ve 3.05 mm) iki boru için, test bölümü karşı akışlı ve boru içinde boru tipi ısı değiştiricilerinden oluşmuştur. Daha küçük dairesel ve dairesel olmayan kanallar için, test bölümü çoklu çekilmiş paralel kanallarla düz borular olarak üretilmiştir. Bu tipteki üç boru, Şekil 3.9' da gösterildiği gibi, boru merkezinden akan soğutucuyla ve karşı yönden akan soğutma maddesiyle birlikte bir birine lehimlenmiştir [26].

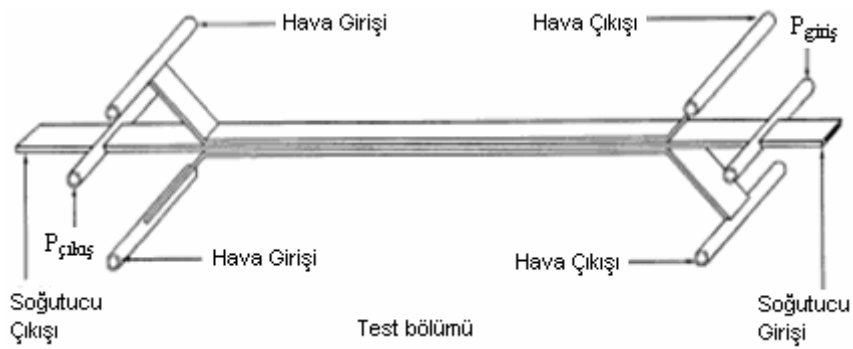
Bu çoklu paralel kanalların kullanım metodu, kullanılan soğutucu oranlarının test spirali boyunca hassas ısı dengesinin korunması için yeterli olmasını sağlamıştır. İncelenen kesitler, çekme usulüyle üretilen üçgen boruları ve dikdörtgen bir boruya W şekilli saplamayı da içeren farklı şekilleri içermektedir (Şekil 3.8' de gösterildiği gibi). Test bölümü boyunca basınç kaybı $\pm\%0.25$ hassasiyetinde bir basınç dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, her akış rejimi için yoğunlaşma basınç kaybı modelleri geliştirmek için kullanılmıştır. Aynı şekilde diğer akış rejimleri için basınç kaybı modelleri Coleman tarafından verilmiştir. Aralıklı rejim basınç kaybı modeli için, yukarıda tartışılan akış rejimi geçiş kriterleri, aralıklı akış rejimine uygun her boru için veri seçme amacıyla kullanılmıştır. Ölçülen basınç kayıpları (yoğunlaşmaya bağlı olarak), hız kesme ve kanal giriş ve çıkış etkilerinden dolayı düzeltilmiştir [97].



Şekil 3.7. Paralel çoklu dairesel borular [26]



Şekil 3.8. Dairesel olmayan borular [26]



Şekil 3.9. İncelenen geometriler [26]

Hız kesme etkisinin tahminleri aynı nominal koşullarla ve yoğunlaşma olmayan test bölümünde yapılan testlerle teyit edilmiştir. Aynı şekilde, son etkilerinin katkılarıyla ilgili tahminler 22.5 – 508 mm uzunluğunda değişen borular kullanılarak teyit edilmiştir. İlişkiler ve ölçümler arasındaki uyum çok iyi olmuştur ve ölçülen genel basınç kaybıyla karşılaştırıldığında bu etkiler oldukça küçük kalmıştır. Son olarak, kızgın buhar ve soğutulmuş sıvı durumları için her borunun tek faz basınç kayıpları, geniş bir kütle akış mesafesinde ölçülmüştür. Tek faz basınç kayıpları, Churchill tarafından öngörülen tahminlerle mükemmel bir uyum içinde olmuştur [80].

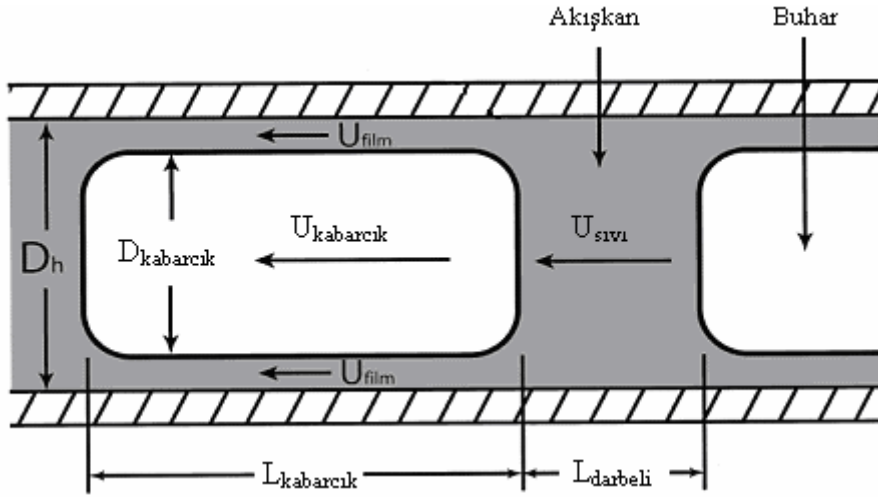
Yukarıda belirtilen yaklaşım, birçok boruda iki fazlı basınç kaybı sürtünme unsurları için deneysel değerlerin sağlam bir veri bankasını oluşturma imkânı vermiştir. Boru büyüklüğü azaldıkça, kabarcık ara yüzündeki yüzey gerilim kuvvetleri yer çekimi kuvvetlerine hâkim olmaya başlar ve kabarcıklar silindirik bir şekil oluşturmaya eğilim gösterirler. Model gelişiminde kullanılan ilgili “birim hücresi” Şekil 3.10’ da gösterilmiştir. Genel olarak, kabarcıklar sıvı dolgulardan daha hızlı hareket etmektedirler. Bu da film tarafından sıvı dolgu önüne sürekli bir yükseltme olduğunu göstermektedir. Bu olgu, aşağıdaki düşüncelerle geliştirilen modeli oluşturmaktadır:

- Kabarcık silindir şeklindedir.
- Sıvı dolguda buhar ya da kabarcıkta sıvı kalmaz (akış görüntüleme sonuçları tarafından doğrulanmaktadır).
- Kabarcıkların/sıvı dolgunun uzunluğu/sıklığı/hızı belirlenen koşullarda sabittir.
- Kabarcık bütünleşmesi yoktur.
- Kabarcık/film bölgesindeki basınç kaybı önemsiz miktarda değildir.

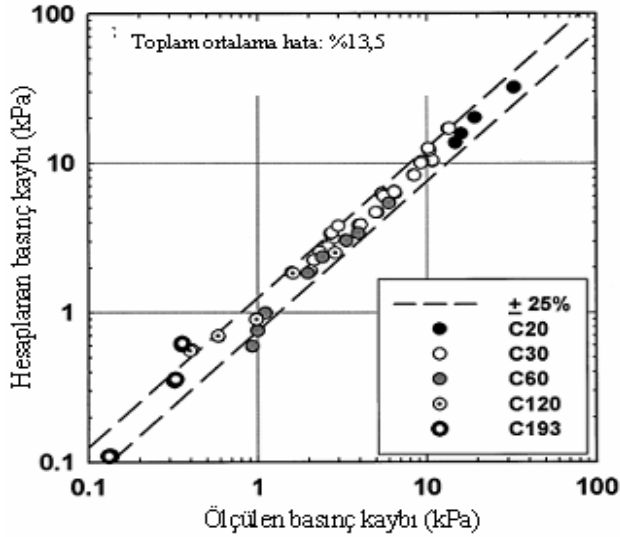
Suo ve Griffith tarafından yapılan benzer bir hacim analizi, sıvı dolgunun hızının genel kütle akış ve niteliğinden doğrudan hesaplanabileceğini göstermektedir. Bu araştırma sonuçları, bu durumda kabarcık hızının sıvı dolgu hızından 1,2 kere daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu varsayım, kabarcık çapı, film içindeki hız ve kabarcık ve sıvı dolgunun göreceli uzunluğu, kabarcık-film ara yüzündeki kesme kuvveti dengesini de içeren eş zamanlı bir denklemle hesaplanabilir. Böylece, sıvı dolgu ve buhar kabarcığındaki Reynolds sayısı (kabarcık ve çevreleyen film arasındaki ara yüzeydeki göreceli hıza dayanılarak) doğrudan belirlenebilir. Sıvı

dolgu ve kabarcık/film bölgelerinde sürtünme faktörünü ve basınç derecesini hesaplamak için Churchill ilişkisi kullanılmıştır [81].

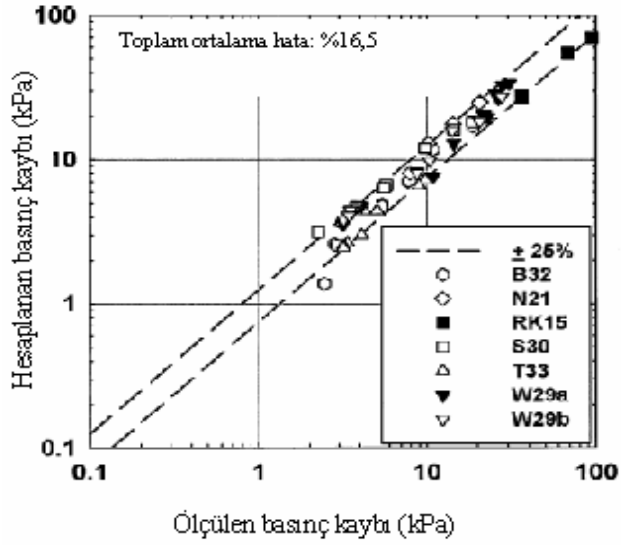
Sabit bir L/D_h oranıyla hidrolik çap etkisi Şekil 3.13’ de gösterilmiştir. Beklendiği gibi, nitelik ve kütle akışının artışı ve çapın küçülmesi basınç kaybında bir artışa yol açar.



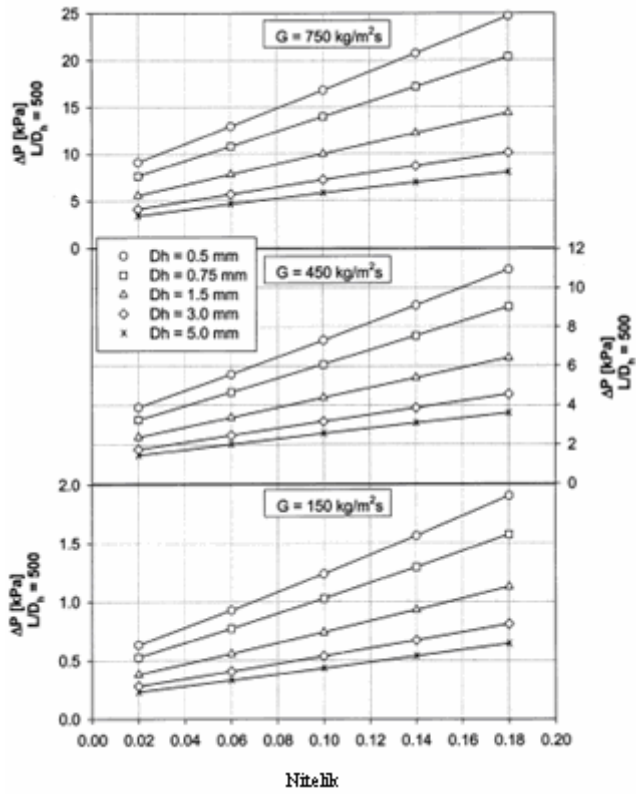
Şekil 3.10. Aralıklı basınç kaybı modeli için varsayılan akış örneğinin kesiti [26]



Şekil 3.11. Dairesel kanal sonuçlarının ölçülen basınç kaybı ile karşılaştırılması [26]



Şekil 3.12. Dairesel olmayan kanal için model sonuçlarının ölçülen basınç kaybı ile karşılaştırılması [26]



Şekil 3.13. L/D_h sabitinde kütle akışı, nitelik ve hidrolik çap etkilerinin dairesel kanal basınç kaybı üzerindeki etkisi [26]

3.1.4. Deney 4 : İki boyutlu mini kanallar ve mikro kanallarda maksimum ısı akısı

Marinet, Person ve Bejan tarafından yapılan deneyde, iki boyutlu mini kanallar ve mikro kanallarda maksimum ısı akısı incelenmiştir. Bu deneyde geniş mesafeli dikdörtgen kesitlerde su akışı araştırılmıştır. Deney tertibatında (Şekil 3.14), aktif kanallar $b:25\text{mm}$ genişliğinde boş merkezi parçalarla bir folyo tarafından ayrılmış iki düz bronz bloktan oluşmaktadır. Bu folyonun kalınlığı (kalınlık e) $0.1-1\text{ mm}$ ' den 0.1 mm adımlarla değişen kanal yüksekliğini sabitlemektedir. Kanalin diğer boyutları b ve uzunluğu $L (=82\text{mm})$ ' dir. Bu düzenlemenin asıl avantajı kanal duvarlarının aynı yüzey tarafından temsil edilmesi ve sadece kanal yüksekliği e ' nin bütün deney boyunca değişim göstermesidir. İki blok yukarı akış bölümünde bir birine yakın kanal girişi sağlamak için yuvarlatılmıştır. Bunlar elle işlenmiştir (ölçülen pürüzlülük $< 0.1\mu\text{m}$). Kanal giriş ve çıkışında iki çukur oluşturulmuştur. Isıtma iki blok içine yerleştirilen ve izolasyon malzemesiyle kaplanan dört elektrikli kartuş tarafından (maksimum toplam güç $4 \times 250\text{ W}$; deneylerde kullanılan tipik değer: $200-500\text{ W}$) yapılmıştır. Rezistansın aktif uzunluğu $l_h (=62\text{mm})$ kanal uzunluğundan daha küçük tutulmuştur. Temsili akış durumları Tablo 3.3' te gösterilmiştir. Kanal boyunca x absisi düz bölümden başlamaktadır [19].

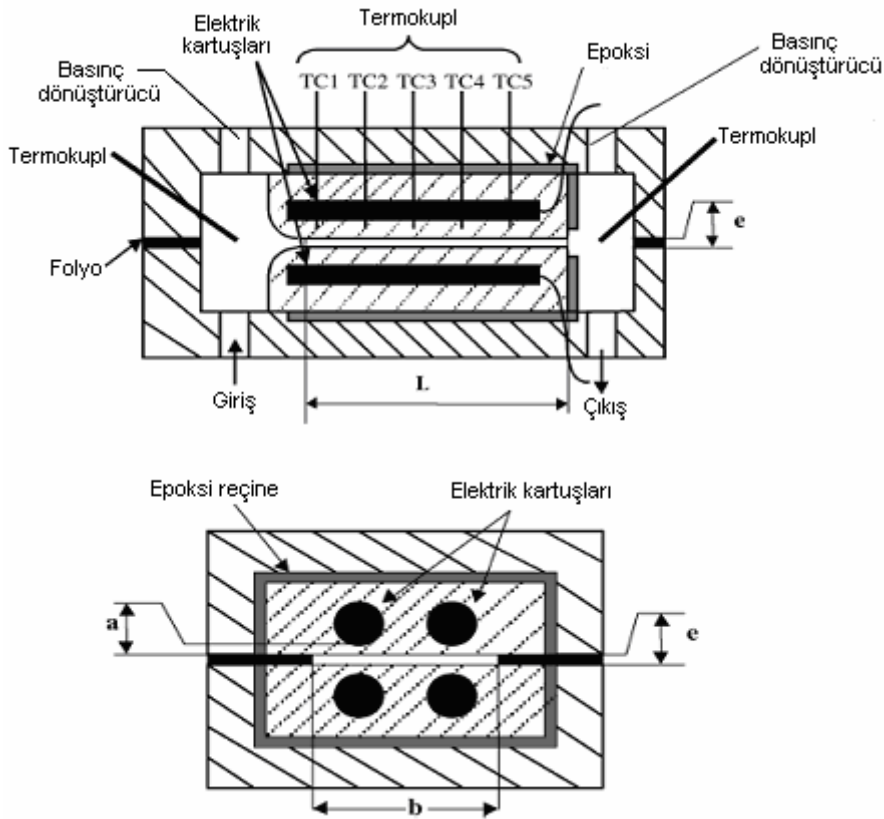
Debi iki adet yüksek hassasiyetli türbin tipi akış ölçerle ölçülmüştür. Basınç kaybı Δp piezo uzama transmetör (tam ölçü: 10^6 N/m) ile kanal giriş/çıkışında belirlenmiştir. Sırasıyla $T_{\text{giriş}}$ ve $T_{\text{çıkış}}$ şeklinde belirtilen K tipi termokupllar, sıvı giriş ve çıkışını ölçmek için iki çukura yerleştirilmiştir. Duvar sıcaklıkları kanal boyunca 1.5 cm artışla yerleştirilen T tipi (çap 0.5 mm) beş termokupl (TC_1 ' den TC_5 ' e kadar) ölçülmüştür (ilk termokuplun yerleşimi $x:0.6\text{cm}$). İlgili alanlar "1" den "5" e kadar adlandırılmıştır. Termokupllar bronz blok içinde metal-sıvı arabiriminden 1 mm uzaklıkta yerleştirilmiştir.

Veriler, hidrolik çap (D_h) bazında belirlenen Reynolds sayısı (Re) ve Nusselt sayısı (Nu) kullanılarak yorumlanmıştır. Re kanaldaki hacim hızına dayanmaktadır. Yoğunluk, dinamik viskozite ve Prandtl sayısı gibi su özellikleri, giriş/çıkış sıcaklıkları ortalamasında belirlenmiştir. ($T_{\text{ort}}=[1/2][T_{\text{giriş}}+T_{\text{çıkış}}]$). Nusselt sayısı da

kullanılarak ısı iletim katsayısı ve yerel film sıcaklığında T_{film} belirlenmiştir. Sürtünme faktörü f giriş/çıkış basınç ölçümlerinden belirlenmiştir.

Giriş basıncı kanal girişine doğru akış hızlanmasından dolayı düzeltilmiştir. Kanal çıkışındaki basıncı değerlendirmek için çıkış çukurunda sabit basıncın klasik varsayımı yapılmıştır. Başka bir deyişle, birbirine yakın kanal girişlerindeki kayıplar dikkate alınmamış ve kanal çıkışlarına yoğunlaşmıştır. Bundan dolayı mikro kanallar boyunca basınç kaybı aşağıdaki gibidir:

$$\Delta p = p_{giriş} - p_{çıkış} - (1/2)\rho V^2 \quad (3.1)$$



Şekil 3.14. Test bölümü çizimi [19]

Tablo 3.3. Tipik akış durumları [19]

e	b (mm)	L (mm)	U (m/s)	Q_v (l/mn)	Re
100 μm	25	82	0.1–10	0.015–1.5	20–2400
200 μm	25	82	0.16–15	0.05–4.5	57–6000
1 mm	25	82	0.02–4	0.03–6	40–7400

$P_{\text{giriş}}$ ve $P_{\text{çıkış}}$ sırasıyla giriş/çıkış çukurlarında ölçülmüştür (Şekil 3.14). Sürtünme faktörü aşağıdaki gibidir:

$$f = \frac{\tau}{(1/2)\rho V^2} = \frac{\Delta p}{2\rho V^2} D_h L \quad (3.2)$$

Yerel ısı akısı q'' rezistans boyunca düzenli olarak dağılmış olan elektrik gücü P' den bulunmuştur. Yerel sıvı sıcaklığı duvarlardan verilen ısı akısı ve akış tarafından alınan toplam ısıdan bulunmuştur. Kanal boyunca akışkana aktarılan toplam ısı miktarı ile bloklarda verilen elektrik gücü arasında, çok küçük debilerin dışında yakın bir uyuma rastlanmıştır. Bu son durumda, $T_{\text{çıkış}}$ ' in yanlış ölçümlerinden kuşkulandığı ve rezistans ve metalik levha arasında iletim için rezistans ve kanal arasına yerleştirilen bir boyutlu bir model geliştirilmiştir.

Bu hesaplamalardan, 2. ve 3. bölümlerdeki ölçümlerin iletici etkiden etkilenmediği ve kanaldaki ısı geçiş katsayısını belirlemede kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. Yerel sıvı sıcaklığı T_f ' nin l_h uzunluğu boyunca doğrusal olarak değişebileceği var sayılabilir. Isı geçiş yüzeyinin rezistansın aktif uzunluğuyla uyumlu olduğu var sayılmıştır. Yerel Nusselt sayısı aşağıdaki ilişkiler ölçülerek hesaplanmıştır:

$$q'' = \frac{P}{2bl_h} \quad (3.3) \quad T_{\text{film}} = T_{\text{giriş}} + [T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}}] \frac{x}{l_h} \quad (3.4)$$

$$h = \frac{q''}{T_{\text{çidar}} - T_{\text{film}}} \quad (3.5)$$

BÖLÜM 4. MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİ VE AKIŞ ÇEŞİTLERİ

Mikro boyutlu sistemler, birçok uygulamayı mümkün kılacak şekilde son yıllarda hızla gelişmiştir. Isı geçişi alanında mikro kanalların kullanımı, elektronik ekipmanların soğutulması bakımından gelecek vaat etmektedir. Kanalların uzunluk derecelerinin azalmasıyla birlikte ısı geçiş katsayısının artması beklenmektedir ve bu Tuckerman ve Pease' in deneylerinde de olduğu gibi birçok kez gözlenmiştir. Ancak, aynı zamanda debi hızla azalırsa, basınç kaybı hızla artmaktadır. Isı geçiş sorunlarında uygun uygulama için mikro kanalların en iyi şekilde tasarlanmasının dikkate alınması bu açıdan önem taşımaktadır. Tuckerman ve Pease' nin çalışmalarından beri, klasik analiz metoduyla mikro ısı dağıtma gövdelerinde mikro ısı geçişini optimize etmek için birçok analiz yapılmıştır [79].

Mikroelektromekanik Sistemler (MEMS); 1981 yılından bu yana elektronik cihazların soğutulması; ısı pompalarının, ısı makinalarının, yanma sistemlerinin ve yakıt işleme sistemlerinin mikro ölçeklerde geliştirilmesi amacıyla üzerinde çalışılan bir konudur. Ancak; bu çalışmalardan, klasik akış ve ısı geçişi mekanizmalarının küçük ölçekteki kanallarda geçerli olmadıkları sonucu çıkmıştır. Öte yandan, mikro ölçekteki geometrilerin soğutma sistemlerine uygulanması, soğutucu üretimi açısından önemlidir [1].

Mikro elektromekanik sistemler (MEMS); tıp, biyo mühendislik, bilgi teknolojileri ve diğer endüstriler üzerinde çok etkilidir bu nedenle MEMS araştırması özellikle mikro ölçeklerde sıvı akış ve ısı geçişinde temel ve uygulamalı araştırma konusunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Küçük mikro kanallarda akış ve ısı geçişinin bazı analitik ve deneysel sonuçları; sürtünme faktörünün varyasyonu, ısı geçişi katsayısı ve laminerden türbülansa erken geçiş gibi klasik boyuttaki kanallarınkinden farklıdır. Kanallardan doğru tek aşamalı akış için bildirilen sürtünme faktörü ve ısı geçişi

katsayısında ve mikro ölçek geçişlerinde laminerden türbülanslı akışa geçiş için bilinen Reynolds sayılarından büyük farklılıklar vardır.

Mikro kanallarda ya da mikro kanal yapılarında faz değişimli ya da faz değişimi olmaksızın taşınım ısı geçişinin önemi, elektronik termal kontrol cihazlarının kullanılmaya başlamasıyla önemli şekilde artmıştır. Mikro seviyedeki akış ve ısı geçişlerinin ilk araştırmalarında, Tuckermann ve Pease mikro kanallarda akış ve ısı geçişi özelliklerini araştırmış ve ya doğrudan silikon tabaka ya da devre panosu üretilmiş mikro kanallar aracılığıyla tek fazlı taşınım su akışı yoluyla elektronik çiplerin etkili bir şekilde soğutulabileceğini göstermiştir. Isı akışı, $1.3 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ iken, yüzey sıcaklığı $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ' den daha az bir seviyede tutulmuştur. Bu başlangıç araştırmasından beri, diğer araştırmalar ilk bulguları desteklemiş ve mikro kanallar kullanılarak yüksek ısı akılarına ulaşılabileceğini göstermiştir. Bu araştırmaların birçoğu, mikro kanallardaki laminer akışta ısı geçişi katsayısının daha büyük kanallardaki türbülanslı akıştan daha yüksek olabileceğini göstermektedir [79].

Bir kanalın duvarları ile akışkan arasındaki taşınım ile ısı geçişinin temel denklemi:

$$q = hA (T_{\text{duvar}} - T_{\text{akışkan}}) \quad (4.1)$$

Kanal içindeki akışta ısı taşınım katsayısı ve yüzey alanı kanal çapı ile bağlantılıdır. Kanal çapını küçültmek birçok avantaja sahiptir. Hepsinden önce, daha küçük çaplardaki kanallar daha yüksek bir yüzey alanının dâhili akış hacmi oranına sahiptirler. Hacimsel temelde, akışkana ısı geçişi, hidrolik çapla ters orantılı olarak artar. Buna ek olarak, daha küçük çaplı kanallarda akış genellikle laminer olduğundan, ısı taşınım katsayısı çap azaldıkça artar.

Hidrodinamik kanunları ve ısı geçişi üzerinde olası etkileri test etmek ve ölçümlerden optimal kullanım koşullarını ortaya çıkarmak için iki boyutlu mikro kanallarda akış ve ilgili ısı geçişi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kanal yüksekliği e kolayca değiştirilebileceği gibi 1 mm ve 0,1 mm arasında tasarlanmıştır. Genel sürtünme faktörü ölçümleri ve Nusselt sayıları ile hidrodinamiğin klasik kanunları, ısı geçişinin $e > 0.4 \text{ mm}$ civarında olduğunu doğrulamaktadır. e ' nin daha düşük

değerleri için, Nusselt sayısında önemli azalmalar gözlenmiştir. Bu arada Poiseuille sayısı ise laminar gelişen akışın alışılmış değerlerini sürdürmeye devam etmiştir. Türbülansa geçiş kanal büyüklüğü tarafından etkilenmemiştir.

4.1. Mikro Kanallarda Tek Fazlı Akış

Son yıllarda, mikro kanallarda tek fazlı akış ve ısı geçişi konusunda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar üzerine önemli sayıda eserler ortaya çıkmıştır. Peng ve ekibinin akış direnci ile ilgili deneysel ölçümlerinin sonucu olarak, mikro kanallarda tek fazlı akışın hesaplanması için ampirik bağıntılar önerilmiştir. Bu ilişkiler laminar akış için aşağıdaki gibidir [30]:

$$f = \frac{C_{f,l}}{Re^{1.98}} \quad (4.2)$$

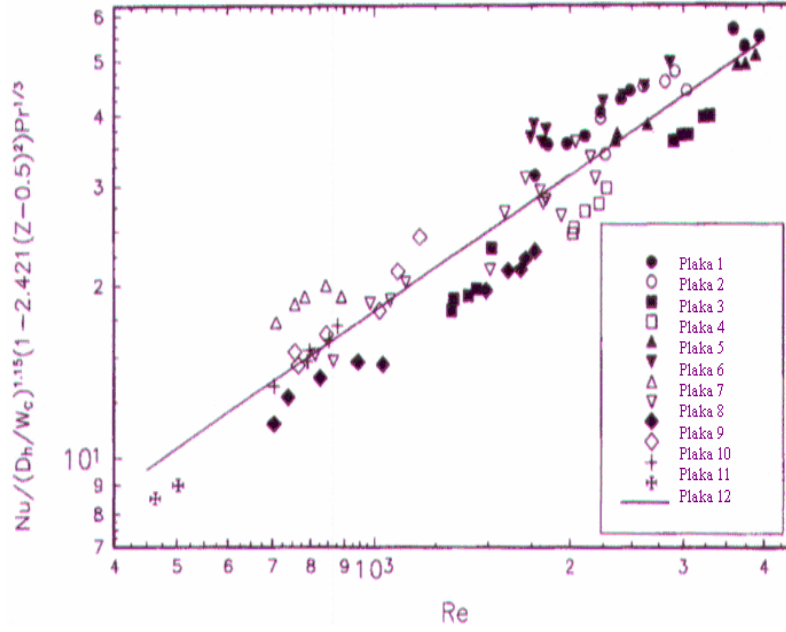
ve tamamen gelişmiş türbülanslı akış için;

$$f = \frac{C_{f,t}}{Re^{1.72}} \quad (4.3)$$

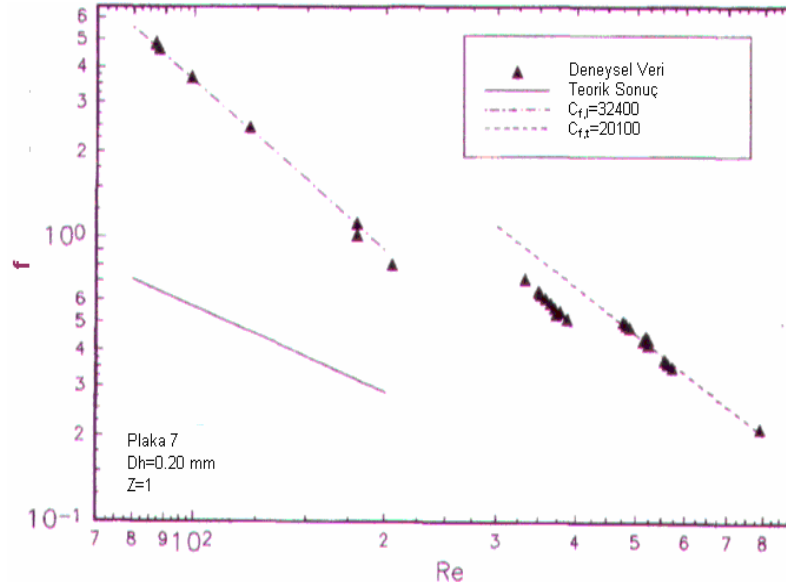
gibidir.

$C_{f,l}$ ve $C_{f,t}$: Sırasıyla laminar ve türbülanslı akış için ampirik katsayılarıdır. Bu değerler, mikro kanal konfigürasyonu ve geometrik parametrelere de bağlıdır.

Mikro kanal plakaların ya da yapıların deneysel incelemesi, Peng ve ekibinin analizlerinin mevcut duruma uygulanabilir olduğunu ve akış direncinin laminar ve türbülanslı akış için (4.2) ve (4.3) denklemlerinde verilen formda olduğunu göstermektedir. Deneysel verilerin karşılaştırılması D_h hidrolik çapı ve boyutsuz değişken Z' nin, (4.2) ve (4.3) denklemlerindeki ampirik katsayıların belirlenmesinde önemli parametreler olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Türbülanslı ısı geçişinin deneysel sonuçları [30]

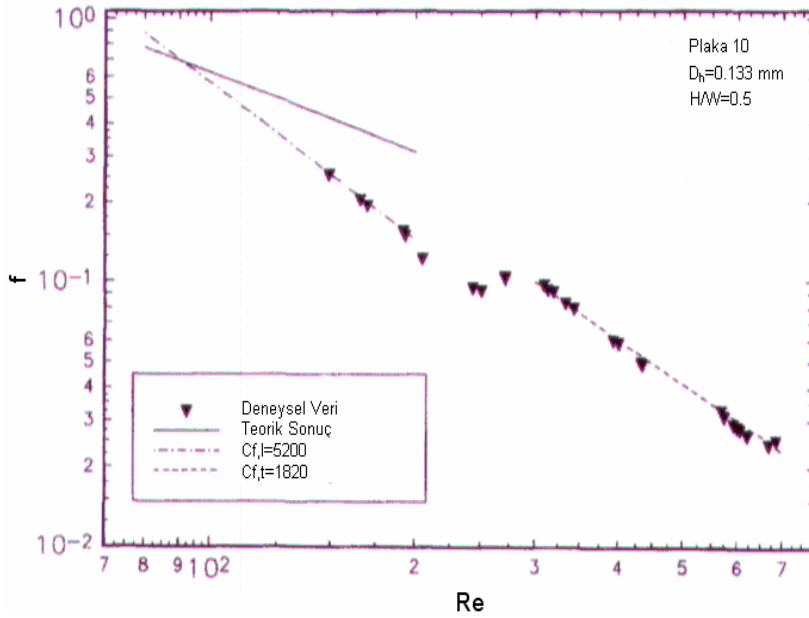


Şekil 4.2. Plaka 7' nin sürtünme faktörü [30]

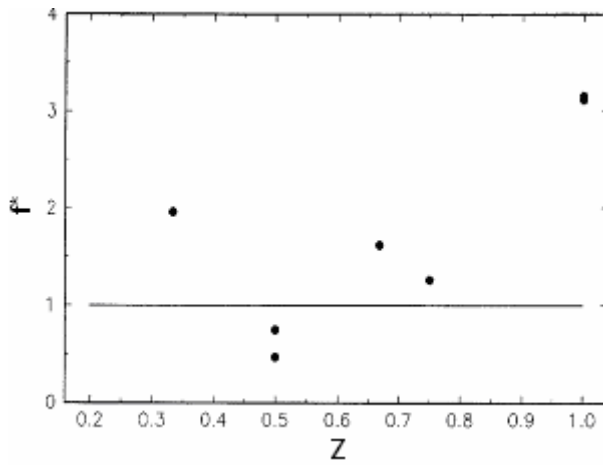
Şekil 4.2 ve 4.3' ün karşılaştırılmasından, uygun geometrik konfigürasyonun seçilmesiyle, laminer durumlar için sürtünme faktörünün azaltılabilir ve klasik bağıntılarla tahmin edilen değerden daha aza indirilebilir olduğu görülmektedir. Laminer ısı yayılım Reynolds sayısı Re_{cri} için yeni bir parametre olan f^* deneysel ve teorik sürtünme faktörünü anlatmak için kullanılabilir:

$$f^* = \left(\frac{f_{l,deney}}{f_{l,teorik}} \right)_{Re_{cr}} \quad (4.4)$$

Bu f^* değeri, Şekil 4.4' deki Z değerinin bir fonksiyonu olarak görünmektedir. Mikro kanal plaka ya da yapıların ya da benzeri aletlerin tasarımında f^* minimum değere sahiptir. Türbülanslı akış için, mikro kanallarda ölçülen akış direnci geleneksel ilişkiyle tahmin edilenden daha düşüktür ve Reynolds sayısı, tamamen gelişmiş türbülanslı akışta olduğundan daha azdır.



Şekil 4.3. Plaka 10' un sürtünme faktörü [30]



Şekil 4.4. Z ile f^* ' in değişimi [30]

0.133–0.367 mm hidrolik çapında ve farklı geometrik konfigürasyonlarda, son derece küçük dikdörtgen kanalları olan mikro kanal plakalardaki su akışının taşınımıyla ısı geçişi ve akış özellikleri deneysel olarak incelendiğinde; mikro kanal plakaların ve ayrı mikro kanalların geometrik konfigürasyonunun tek fazlı taşınımıyla ısı geçişi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve laminer ve türbülanslı ısı geçişi üzerindeki etkinin oldukça farklı olduğu görülmüştür. Plakaların üretildiği malzemenin ısıl iletkenliği bir faktör olabilirken, mikro kanallar, hidrolik yarıçapın alt tabaka kalınlığıyla karşılaştırılacağı kadar küçüktür ve bu nedenle, alt tabaka geleneksel kanallarda olduğundan çok daha önemlidir. Sonuç olarak, burada değerlendirilen küçük kanallar için, kanal şekli laminer ve türbülanslı akışlar için çok önem taşımamaktadır. Laminer ısı geçişi, D_h/W_c ve H/W parametrelerine bağılyken, türbülanslı ısı yayımı, D_h/W_c ve H/W ’ ten çok, Z parametrelerine bağıldır. Boyutsuz oran $Z=0.5$ ’ in türbülanslı ısı geçişi için en uygun konfigürasyon olduğu bulunmuştur. Bundan başka, laminer ve türbülanslı durumda ısı geçişinin tahmini için ampirik ilişkiler önerilmiştir. Aynı kanal sayısı ve ebattaki bir plaka için, merkezden merkeze mesafe azaldıkça kanalın iki tarafından, merkezde ısı geçişi azalmaktadır.

Mikro kanallardaki akışkanın akış direnci de deneysel ve analitik olarak araştırılmış ve akış direncinin hesaplanması için bağıntılar önerilmiştir. Deneyler, sürtünme faktöründe geometrik parametrelerin önemini göstermiştir. Hidrolik ap ta dâhil, H/W veya Z ve D_h/W_c laminer sürtünme faktörü ya da akış direnci Z , 0.5’ e yaklaştığında minimum değerine ulaşır. Türbülanslı akış için, mikro kanallarda ölçülen akış direnci bağıntısı tahmin edilenden daha düşüktür ve Reynolds sayısı, tamamen gelişmiş türbülanslı akışta olduğundan daha azdır. Direnç ne kadar düşük olursa, Reynolds sayısı o kadar artar.

4.2. Mikro Kanallarda İki Fazlı Akış

Mikro kanallarda iki fazlı akış, mikro-elektro-mekanik sistemler, elektronik soğutma, kimyasal proses mühendisliği, medikal ve genetik mühendisliği, biyomühendislik vs. gibi alanlarda geniş çaplı kullanımıyla son zamanlarda dikkatleri çekmektedir. Örneğin yakın zaman önce JSME tarafından organize edilen mikro kanallarda ısı

geçiş ve sıvı akışı araştırma komitesi, alanında bir dizi makale yayınlamıştır. 100 mikrondan küçük mikro dereceli akış yollarında akış ve ısı geçiş bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle küçük ve ultra küçük (1 µm sıralamasında) akış yollarında akış örnekleri, kırılma, basınç kaybı, sıvı film kalınlığı vs. gibi iki fazlı akış ve bunun mekanizması hakkında temel bilgi mühendislik, tasarım amaçları ve pratik performansın geliştirilmesi için önem taşımaktadır.

Ghiaasiaan ve Adebek-Khalik ve Serizawa ve Feng tarafından yakın zaman önce yayınlanan makaleler, mikro kanallarda iki fazlı akış ve ısı geçiş üzerine geniş bir incelemeyi yansıtmaktadır [82, 37]. Mikro-ölçek aralığında kalması açısından, iki fazda yapılan çalışmalarda Xu' nun, hava-su karışımı ile 0.3, 0.6, 1 mm genişliğindeki dikdörtgen kesitli düşey kanallarda yaptığı çalışmalardan söz etmekte fayda vardır. Xu, iki fazlı rejimlerde "görünür (superficial) hız" olarak adlandırılan parametrenin mikro-kanallardaki etkisi üzerinde durmaktadır. İki fazlı akışta, sıvı faza ait ve gaz faza ait görünür hız aşağıdaki şekilde ifade edilir [13]:

$$J_1 = Q_1 / A \quad (4.5)$$

$$J_g = Q_g / A \quad (4.6)$$

J_1 : Sıvı faza ait görünür hız

J_g : Gaz faza ait görünür hız

Q_1 : Sıvı fazın hacimsel debisi

Q_g : Gaz fazın hacimsel debisi

A : Toplam kesit alanı

biçiminde tanımlanır. Yani; herhangi bir faza ait görünür hız, o fazın hacimsel debisinin toplam kesit alanına oranıdır.

Mikro-ölçekli kanallardaki iki fazlı akış konusunda son yıllarda yapılan çalışmalara verilebilecek iyi bir örnek de Triplett ve diğerlerinin 1999 yılında, 1.1mm–1.450 mm boyutlarındaki dairesel ve yarı üçgensel kesitli kanallarda, yine hava su karışımı ile yaptıkları çalışmadır. Bu araştırmacılar, "mikro kanal" olarak niteledikleri

geometrilerinde, hidrolik çapın kompakt ısı değıştiricilerinde kullanılan Laplace sabiti değerinden küçük olduğunu vurgulamaktadırlar. Ancak; yaptıkları deneylerden, geniş kanallara uyarlanabilen akış haritalarından fazla bir sapma olmadığı; fakat geçiş rejimleri açısından fark olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu sonuca; deney yapılan aralığın, mikro değil, makro ölçekli olmasının neden olduğu açıktır [83].

Öte yandan; mikro ölçekte, iç içe geçmiş cam borulardaki iki fazlı akışın incelendiği bir başka çalışmada elde edilen akış haritalarının, hem geniş kanallardaki hem de mikro-kanallardaki akış rejimleri ile uyumsuz olduğu görülmektedir. Ayrıca, mikro ölçekte, tek fazlı rejimde yapılan çalışmalarda ise azalan kanal genişliğinin ısı geçişini iyileştirdiği; fakat basınç kaybını arttırdığı gözlemlenirken, türbülansa geçişin de bilinenden ($Re=2400$) daha düşük Reynolds sayılarında gerçekleştiği belirtilmiştir

Sıvı-gaz iki fazlı akış örnekleri için; hava-su akışı, 20, 25 ve 100 μ m iç çaplı tüplerde ve buhar-su akışı 50 μ m iç çaplı tüplerde, mikroskopla gözlemlendiğinde hava-su akışı için yüzeysel hızların $J_L=0.003-17.52$ m/s ve $J_G=0.0012-295.3$ m/s oranında geniş bir aralığı kapsadığı görülmüştür. Hava-su ve buhar-su sistemlerinde dağınık kabarcıklı akış, gaz darbeli akışı, sıvı halka akış, sıvı küme akış, köpüklü ya da demetli halka akış, sıvı damlacıklı akış ve özel tip akış örnekleri ve bunların özellikleri tanımlanmıştır. Test tüpünün iç duvarında iki fazlı akış örneklerinin yüzey koşullarına duyarlı olduğu bildirilmiştir. Tüp duvarı ve gaz külçesi arasında, dikkatlice işlenmiş temiz yüzey durumunda kısmen sabit ince sıvı film tabakasıyla sabit bir dairesel akış ve gaz külçesi oluşumuna rastlanmıştır. Düşük hızlarda, gaz külçesi ve tüp duvarı arasında kuru ve ıslak bölgeler oluşmuştur.

4.3. Akış Rejimi Tanımlaması

İki fazlı akış, geniş kanallarda bile henüz evrensel isimler konmamış rejimlerden oluşmaktadır. Bu nedenle; iki fazlı akış rejimlerini özetlemekte fayda vardır:

a) Dağınık kabarcıklı akış : Sıvı faz, sürekli bir ortamda akarken, gaz faz, sıvı faz içerisinde kabarcıklar halinde dağılmıştır.




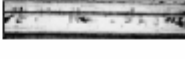










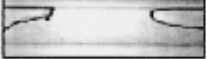
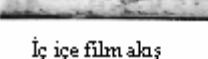
- b) Darbeli akış : Gaz fazı, cidardan sıvı faz ile ayrılmış ve yarım daire şapkali dikdörtgenler biçiminde dağılmıştır. Sıvı fazı ayrıca bu gaz parçalarını da ayırır ve ayrı ayrı gaz kabarcıkları da içerebilir.
- c) Sıvı halka akışı : Büyük gaz kabarcıklarının darbeli akışa geçmeleri sırasında oluşur. Kaotik bir karakteri vardır.
- d) Sıvı küme akışı : Cidar sıvı ile çevrili iken gaz fazı sürekli biçimde kanalın ortasında akar. Bu akış dalgalı bir karakter gösterebilir.

Dört ana akış rejimi olan dağınık kabarcıklı akış, darbeli akış, sıvı halka akışı, sıvı küme akışı rejimlerini tanımlamak için, her veri noktasında akış görüntüleme videosunun sayısallaştırılmış çerçeveleri kullanılmıştır (Tablo 4.1' e bakın). Dairesel akış rejiminde buhar, kanalın orta kısmında az sayıda asılı sıvı damlalarıyla akmakta ve sıvı akışı boru duvarı çevresinde olmaktadır. Bu rejim içindeki akış örneği (dairesel halkalar, dalgalı halkalar, dalga paketleri ve dairesel film oluşumları) kütle akışı ve kalitesi değişirken yer çekiminin ve kesme kuvvetinin farklı etkilerini göstermektedir.

Burada kullanılan dalgalı akış rejimi, genellikle dairesel rejim içinde bir akış örneği olarak değerlendirilmiştir. Adyabatik akışlardan farklı olarak (daha önceki araştırmaların merkezi olan hava-su karışımları gibi), yoğunlaşan akışların kütle akışı ve kalitesi kombinasyonlarının çoğunun çevresinde sıvı kaplaması oluşturacağı beklenmektedir.

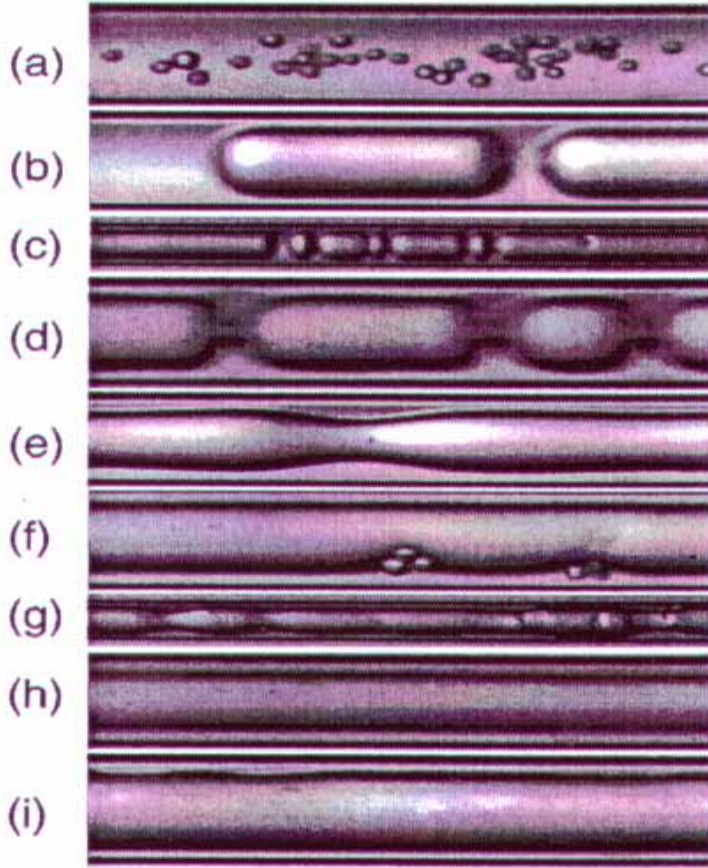
Sıvı-buhar arabirimindeki dalgalar, farklı hızlarda hareket eden iki faz arasındaki ara yüzeysel kesmeden kaynaklanmaktadır. Böylece, rejim faz arabirimi boyunca hareket eden daha büyük dalgalara bölünmüş ve uzun mesafeli geniş dağınık dalgalar ve dalga boyları Tablo 4.1' de gösterildiği gibi diğerinin üzerinde olmaktadır. Her veri noktası için gözlenen akış mekanizması, bir akış rejimi haritası geliştirmek için Tablo 4.1' de gösterilen akış örneklerine atanmıştır. Bazı durumlarda, akış mekanizması birden fazla akış rejimine uymuştur.

Tablo 4.1. İki fazlı akış rejimleri ve örneklerinin tanımı [26]

		AKIŞ REJİMLERİ			
		İç içe akış	Dalgah akış	Kesikli akış	Dağmuk akış
Akış Biçimleri					
	Dumanlı akış	Kesikli dalgah akış (0)	Darb eli akış	Kabarcıklı akış	
					
	İç içe halka akış	Kesikli dalgah akış (1)	Darb eli akış	Kabarcıklı akış	
					
Dalgah halka akış	Kesikli dalgah akış (2)	Tampon akış	Kabarcıklı akış		
					
Dalgah paket akışı	Dağmuk dalgah akış (3)	Tampon akış			
					
İç içe film akış					

Not: Yukarıda parantez içindeki sayılar ikincil dalgaların yoğunluğunu belirtmektedir.

Kanallardaki iki fazlı akış çalışmaları bu akışların sıvı ve gaz fazlarının görünür hızlarına göre gelişimlerini içerir. Xu, çalışmasında; 0,3 mm genişlikteki kanallardaki akış rejimlerinin, geniş kanallardakilerden tümüyle farklı olduğunu belirtmekte; geniş kanallardakinin aksine, çok düşük gaz hızlarında bile kabarcıklı akışın hiç bir zaman oluşmadığını vurgulamaktadır. 0.6 mm ve 1mm' lik kanallarda ise geniş kanallardaki akış haritaları ile uyumlu bir akışın gözlemlenmiş; dolayısıyla mikro-ölçekli kanallar için yeni akış rejimi haritalarının çıkarılması gerektiği belirtilmiş; bu kanallardaki farklılığın nedeni olarak da dar kanallarda kayma gerilmesinin artan etkisi gösterilmiştir (burada, Xu' nun mikro-ölçekli kanal biçiminde söz ettiği kanalların, meso-ölçek grubuna girdiğini vurgulamakta fayda vardır) [13].



- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| (a) Dağınık kabarcıklı akış | (b) Darbeli akış |
| (c) Geçiş akışı | (d) Eğri akış (Yakitori Akışı) |
| (e) Sıvı küme akışı | (f) Köpüklü halkalı akış |
| (g) Geçiş akışı | (h) Sıvı halka akışı |
| (i) İnce akış | |

Şekil 4.5. 100 μm iç çaplı, yüksek saflıkta damıtılmış su, etanol ve damıtılmış hidroklorik asit solüsyonunda ultrasonik vibrasyonla temizlenmiş kuvars tüpteki hava-su iki fazlı akış örnekleri [37]

4.3.1. 25 μm silis tüpte hava-su iki fazlı akışı

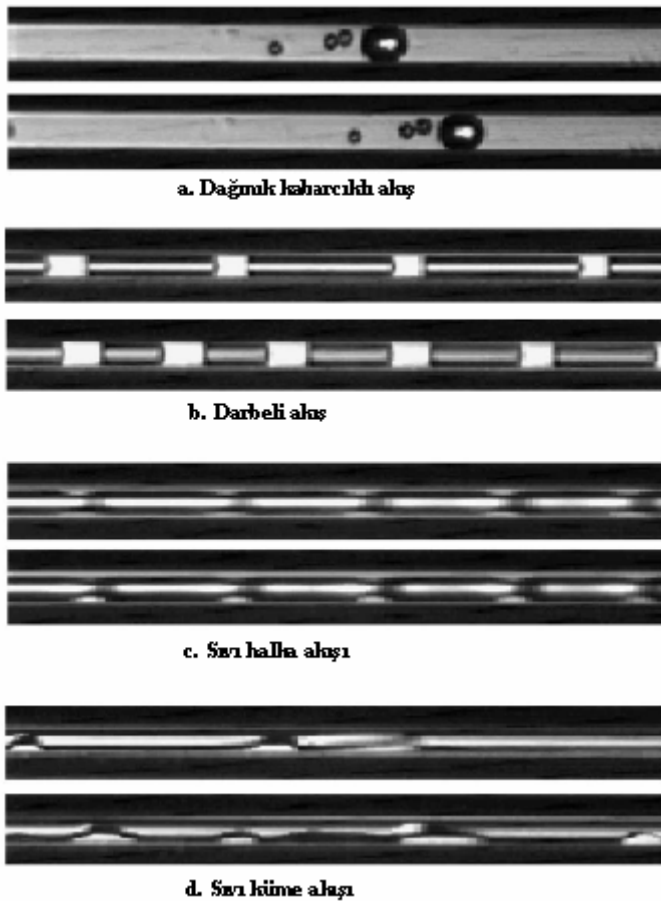
Şekil 4.6, atmosferik basınçta 25 μm silis tüpte hava-su akışında gözlenen iki fazlı akış örneklerini göstermektedir. İki fazlı akışı belirlemek için, görüntü yapısında ışık kırılması düzeltilmemiştir. Şekil 4.6' daki tüpün merkez hattı boyunca bulunan parlak bantlar silis tüpündeki ışık kırılmasından kaynaklanmaktadır.

4.3.1.1. Dağınık kabarcıklı akış

Hava-su ve buhar-su akışında $J_g = 0,0083$ m/s gibi çok küçük gaz akışı oranında iki tip dağınık kabarcık durumu gözlenmiştir. Biri, tüp çapından daha küçük ince

dağılmış kabarcıklardır. Diğeri, küresel baş ve kuyruklu tüp çapına yakın ya da daha büyük, ancak ard arda bulunan kabarcıklarda mesafenin bazen tüp çapından on kat daha uzun olduğu kabarcıklardır. Hava-su akışında bu iki tip kabarcığın, küçük ebatlı kabarcıkların büyükleri takip ettiği çift kabarcıklar olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Küçük kabarcıkların hareketi, büyük kabarcıklardan güçlü şekilde etkilenmektedir. Mevcut deneylerde gözlemlenen dağınık kabarcıklar, tüp çapına eşit ya da biraz daha büyük olan kabarcıkların dışında her zaman küresel bir şekilde kalmaktadırlar. Bu asıl olarak yüksek arabilirimsel basınca ve iyi bilinen Laplace-Young denklemiyle belirlenebilecek olan mikro ebatlı kabarcıklara bağlıdır [37]:

$$P_G - P_L = \frac{2\sigma}{R} \quad (4.7)$$



Şekil 4.6. İki fazlı akış çeşitleri [37]

Denklem 4.7' yi, 5 μm çapındaki bir kabarcığa uygulamakla, kabarcık ara yüzeyindeki basınç farkının neredeyse 0,3 bar' a ulaştığını bulabiliriz. Bu basınç farkı, bir kabarcığın küresel şekilde kalması ve şeklinin bozulmasını önlemek için yeterlidir. Böylece, hareket eden iki kabarcık arasındaki bütünleşme, bu tür küçük tüplerde oldukça zor gözlenmektedir.

4.3.1.2. Darbeli akış

Ultra küçük tüplerde, kabarcıklar yüksek katılıktadır ve her zaman küresel şekildedir. Bu yüzden normal büyüklükteki kanaldan, darbeli akışa dağınık kabarcıklı akış geçişi tamamen farklı olmaktadır. Deneysel gözlemlerden, darbeli akışın bir giriş olgusu olduğu görülmektedir. Darbeli akış, sadece gaz debisinin tüp girişinde yüksek olması ve uzun gaz kabarcığı hızının bunlar arasındaki sıvı köprünün güçlü yüzey gerilim gücünü aşamayacağı kadar yüksek olmadığı durumlarda ortaya çıkar.

Darbeli akıştan kaynaklanan basınç kaybı çok yüksektir. Yüzey gerilimi kuvveti sıvı fazı bir külçe yapısında tutmakta ve film olarak dağılmasını önlemektedir. Diğer taraftan, gaz külçesinin ultra küçük yapısı, gaz-sıvı arabiriminde yüksek basınca yol açmaktadır. Bu basınç farkı, gaz külçesinin tüp kesitinin tamamını kaplamasına yol açmaktadır ve bundan dolayı sıvı filmin gaz külçesi altında bulunması zordur.

4.3.1.3. Sıvı halka akış

Şekil 4.6c sıvı filmin duvar üzerinde simetrik olarak dağıldığı tipik sıvı halka akışı yapısıdır. Deneysel gözlemlerden, sıvı halka akışının gaz hızı yüksek olduğu durumda, darbeli akıştan geçtiği görülmüştür. Düşük gaz hızı durumunda, sıvı halkanın ilk olarak iki müteakip gaz külçesini ayıran sıvıdan kaynaklandığı görülmektedir. Gaz hızı yüksekse, birçok simetrik sıvı halkası tüp duvarında neredeyse eşit mesafelerde oluşur. Gaz akış oranı yeterince yüksekse, sıvı külçe uzunluğu azalırken, gaz külçe uzunluğu artar. Belirli bir gaz debisinde takip eden gaz külçesi, sıvı külçesine nüfuz eder ve bununla birlikte bir sıvı halka oluşur. Normal yerçekimi koşullarında geleneksel tüplerde sıvı halka akışı gözlenmemiştir, ancak bu mevcut tüp ebatlarında oldukça açıktır. Triplett ve ekibi 1.09 mm hidrolik yarı üçgen

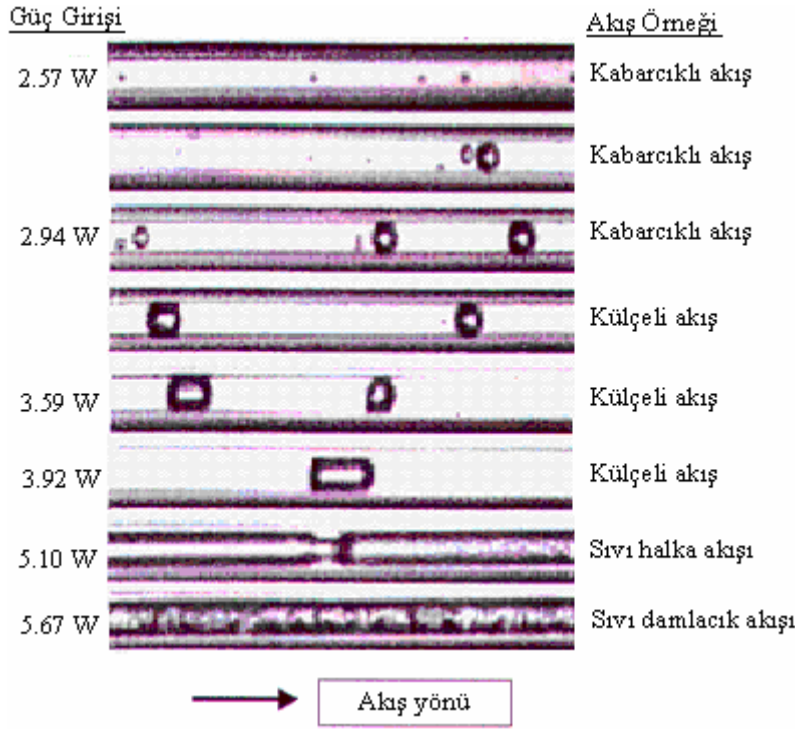
test kanalında, duvardan viskozite gücü ile gazın çekme gücünün, sıvı halkanın hareketini belirlediğini gözlemlemişlerdir. Viskozite gücü daha hâkim durumdaysa, sıvı akışı duvara yapışacak ve büyüyecektir. Bu büyümenin aşağı akım ve yukarı akım bölgelerinde sıvı filmde kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıvı halkaların yüksekliği belirli bir seviyeye yaklaşıncaya, gazın çekme gücü hâkim olur ve sıvı halkalar aşağı akım yönünde hareket etmeye başlarlar [83].

4.3.1.4 Sıvı küme akışı

Sıvı halka akışında gaz akışını artırdığımız zaman, Şekil 4.6' da gösterildiği gibi yüksek hızlı gazın sıvı faza geçtiği ve sıvı kümelerin duvar üzerinde kaydığı bir sıvı küme akışı oluşur. Sıvı kümenin şekli, yatay büyük tüplerde olduğu gibi dalgalı akışa çok benzemektedir. Sıvı küme bir taraftan diğerine kaymaktadır. Bir sıvı küme tüp duvarıyla temas ettiğinde, güçlü yüzey gerilim kuvveti bunun sıvı film tabakasına yayılmasını önlemektedir.

4.3.2. 50 µm silis tüpte buhar-su iki fazlı akışı

Buhar-su deneyinde, 10 mm uzunluğunda ve 50 µm iç çapında bir silis kılcal tüpü de akımla ısıtılan paslanmaz çelik boruya bağlanmıştır. Su rezervuarına basınç verilmesiyle, saf su test bölümüne yayılır. Ölçme işlemi, ön ısıtıcıya ısı girişini 2.47 cm/s değiştirerek düşük J_L sıvı hızında yapılmıştır. Şekil 4.7, 50 µm silis tüpte uygulanan iki fazlı buhar-su akışını göstermektedir. Gözlenen genel eğilimler, 25 µm tüpteki hava-su akışına oldukça benzemektedir. Buna bir istisna, sıvı damlacık akışlarının da gözlenmiş olduğudur. Ancak, bu iki durum arasında önemli bir fark yoktur, çünkü hava-su akışında sıvı damlacık akışını gözleyemeyişimizin nedeni, daha çok test ettiğimiz deneysel durumdan kaynaklanmaktadır.

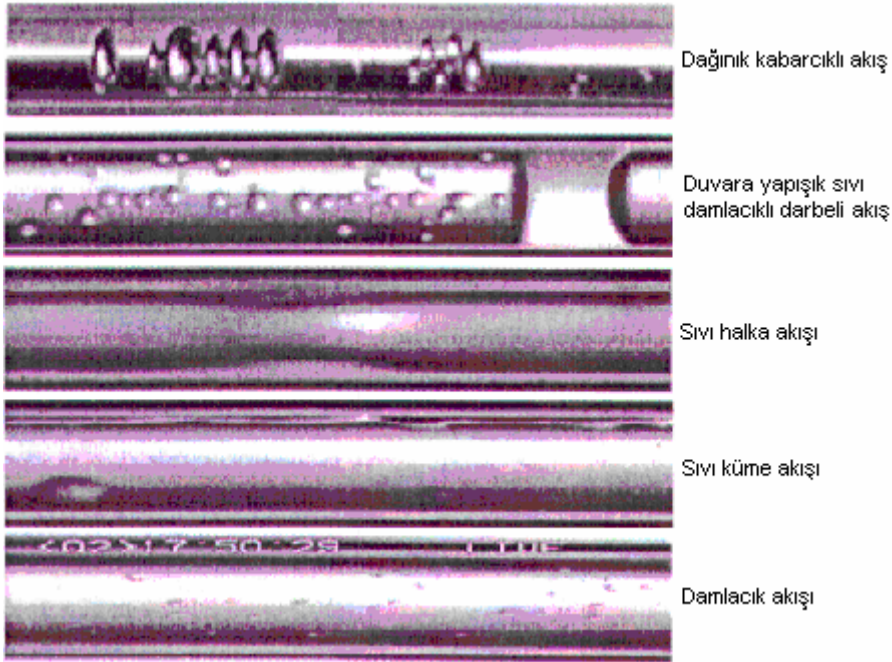


Şekil 4.7. Buhar-su akışında iki fazlı akış örneği [37]

4.3.3. 100 μm kuvars tüpte hava-su iki fazlı akışı

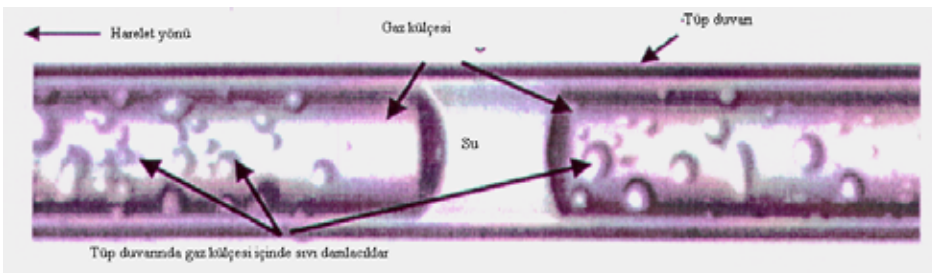
Şekil 4.8' de gösterildiği gibi, 100 μm kuvars tüpte gözlenen iki fazlı akış örnekleri, 25 μm silis kılcal tüptekiyle bazı istisnalarla birlikte, neredeyse aynıdır. Bu istisnalardan biri, düşük hızlarda karşılaşılan akışta bir gaz külçesinde bulunan küçük sıvı damlacıklarının tüp duvarına yapışmalarıdır (Şekil 4.9). Gaz külçesi ve tüp duvarı arasında sıvı filminin bulunmaması bunun kanıtıdır. Bundan başka, tüp duvarında tek şekilli olarak dağılmış ince sıvı filmler sıvı halka akışı gözlemlenmiştir. Bundan başka, sıvı darbeleri akışta, sıvı külçeler parçacıklı sürekli bir formda akmaktadır. Düşük sıvı akış debilerinde, kısmen sürekli sıvı film akışı ince çizgili akışa ve hatta büyük sıvı damlacıklara ya da kesikli sıvı kümeciklere dönüşür. Yüksek gaz hızında, sıvı damlacık akışı açık şekilde görülmektedir. Sorularımızdan biri, gaz darbeleri akışta test tüpünün iç duvarının ıslak mı yoksa kuru mu olduğudur. Bu sorun, yüksek hız videosu ve 0.4 μm kalınlıktaki hassasiyette aynı odaklı bir lazer ölçer kullanarak çözülmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.10, gaz külçelerinin akışında tüp duvarında ıslak ve kuru bölgeler arasında hareket eden sınırı göstermektedir.

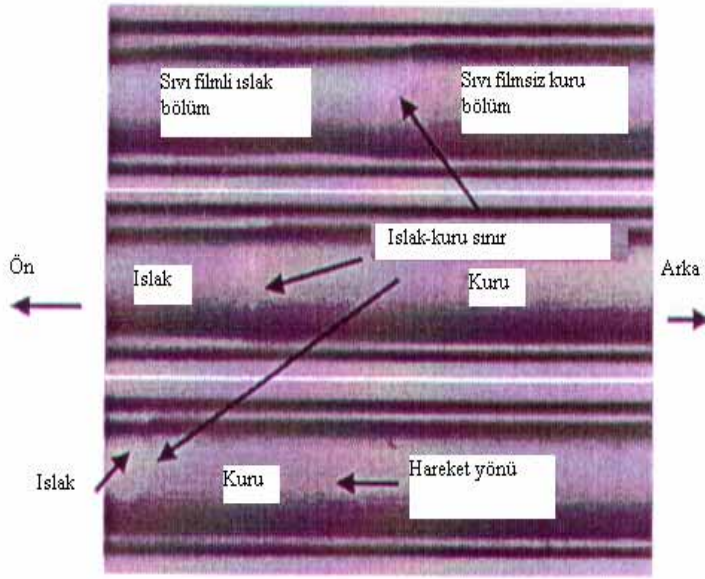


Şekil 4.8. 100 µm kuvars tüpte iki fazlı akış örnekleri [37]

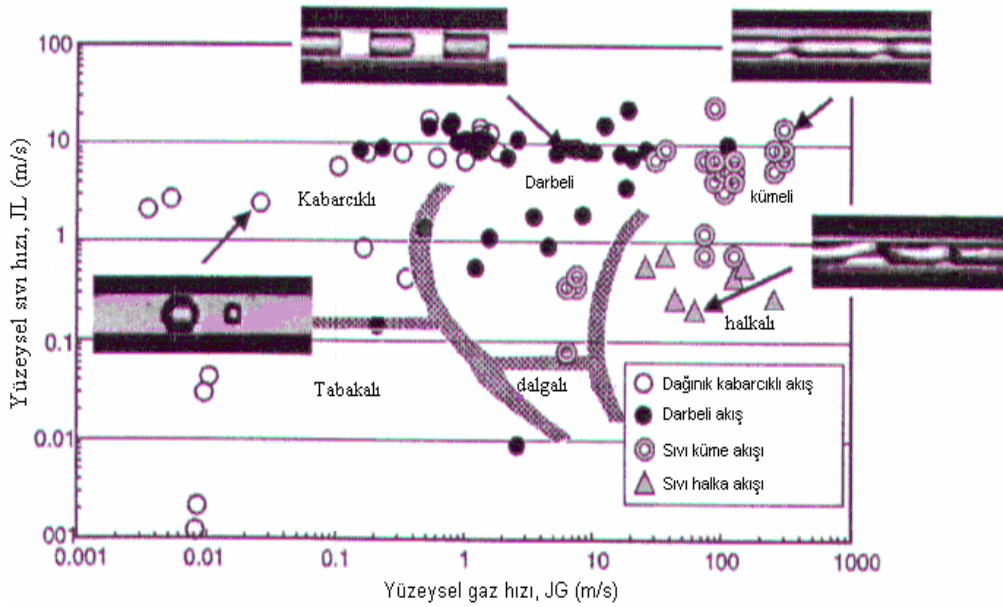
Aynı odaklı lazer ölçerden gelen sinyallerin ayrıntılı incelenmesi sonucunda, gaz külçesinin de altında bir kuru alanın varlığı ortaya çıkmıştır. Kariyasaki ve ekibi, 1–4,9 mm çap mesafelerindeki bir tüpte, hava-su akışında büyük gaz külçelerini çevreleyen film kalınlığını ölçmüşlerdir. Gaz külçesi ve tüp duvarı arasında bir sıvı filmin varlığını gözlemlemişler ve film kalınlığının gaz külçesi boyunca azaldığını göstermişlerdir [84].



Şekil 4.9. Gaz külçesi içinde tüp duvarına yapışık sıvı damlacıklar [37]



Şekil 4.10. Tüp duvarında ıslak-kuru sınır [37]



Şekil 4.11. İki fazlı akış örnekleri geçişi [37]

Şekil 4.11, neredeyse atmosferik basınçta 20 μm silis tüpte, iki fazlı hava-su akışından elde edilen akış örneğini göstermektedir. Bu şekilde, her ikisi de ayrı akış olan sıvı halka akışı ve sıvı küme akışı arasındaki farkı göz ardı edersek, akış örneği genel olarak, Mandhane ve ekibi tarafından öngörüldüğü gibidir [85]. Bu sonuç, Kariyasaki ve Fukano tarafından hava-su için 1, 2.4 ve 4.9 mm çaplı tüplerde yapılan deney sonuçlarına uymamaktadır [84].

4.4. Normal Boyuttaki Tüpler ve Mikro Kanallardaki Akış Arasındaki Farklar

Sorularımızdan biri, mikro kanallarda iki fazlı akış örneklerinin, normal büyüklükteki tüplerle karşılaştırıldığında farklı olup olmadığıdır. Normal büyüklükteki tüplerde ve birkaç mm çapındaki mikro tüplerde, akış örnekleri genel olarak düşük yüzey gerilim etkili özgül ağırlık özelliği göstermektedir. Diğer taraftan, birkaç μm çaptan, onlu sayılardaki μm çapa kadar olan mikro kanallarda iki fazlı akışın asıl olarak, yüzey geriliminden, viskoziteden ve atalet kuvvetlerinden etkilendiğine inanılmaktadır. Ancak, şimdiye kadar bu küçük kanallarda akış örneklerini neyin gerçekleştirdiği konusunda detaylı bilgiye ulaşılamamıştır.

4.4.1. Dairesel borularda akış

1)Dairesel borularda laminar akış: R yarıçaplı boruda laminar akan suyun boru merkezindeki hızı (basınç azalmakta) $U_m = \Delta P \cdot R^2 / 4L \cdot \mu$ şeklindedir. Akışkanın genel hızı ise:

$$U(r) = U_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (4.8)$$

şeklindedir. Akışkanın ortalama hızı $U_0 = U_m/2$ dir. Borudaki sürtünme katsayısı:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (4.9)$$

şeklinde, hız ve kayma gerilmesine bağlıdır.

2)Dairesel borularda türbülanslı akış: Türbülanslı akışta genel hız bağıntısı:

$$U(r) = U_m \left(1 - \frac{r}{R} \right)^m \quad (4.10)$$

şeklinde. Bu durumda ortalama hız:

$$U_0 = \frac{2U_m}{(m+2)(m+1)} \quad (4.11)$$

olur.

Boru içindeki akış koşullarını tanımlamak üzere aşağıdaki boyutsuz sayılar tanımlanır:

Reynolds Sayısı

“Re” ile gösterilen “Reynolds Sayısı”, akışkanlar mekaniğinde atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır. Reynolds sayısı, adını 1842 ile 1912 yılları arasında yaşamış olan ve bu sayıyı tanımlayan “Osborne Reynolds” tan almıştır. Reynolds’ un, boya akımı deneylerinden elde ettiği sonuçları, bir sayı tanımlayarak genelleştirilmesi ile elde edilmiş boyutsuz katsayıdır. Bir akışın karakterini (laminer veya türbülanslı) belirlemekte kullanılır. $Re < 2300$ değerinde laminer akış ve $Re > 10000$ değerinde türbülanslı akış kabul edilir. Bu limitler arasında geçiş bölgesi tanımlanmıştır. Açık kanal akışlarında kritik Reynolds sayısı 500’ dur. Düz bir levhada türbülans başlangıcı için bu sayı 500000 iken, boru içerisinde 2300 olmaktadır. En önemli husus ise uzunluk olarak karakteristik uzunluğun tespitidir ki bu da akışın olduğu geometrinin alanının 4 ile çarpımının çevreye bölümüyle bulunabilir (D_h).

Reynolds sayısı tipik olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{u_m D}{\nu} = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskozite kuvvetleri}} \quad (4.12)$$

ρ : Akışkanın yoğunluğu

u_m : Boru kesit alanında ortalama akışkan hızı

D : Boru çapı

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi ($\nu = \mu / \rho$)

Reynolds sayısının düşük değerlerinde akış laminerdir, ancak giriş etkileri bulunmaktadır ve bu kanal boyunca toplam basınç kaybını etkiler.

Prandtl Sayısı

Prandtl sayısı momentum yayılımının ısı yayılımına oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4.13)$$

c_p : Akışkanın sabit basınçta özgül ısı

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi

k : Akışkanın ısı iletim katsayısı

Nusselt Sayısı

Nusselt sayısı (Nu), yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanını gösterir. Laminer akışta Nu sabittir, ancak türbülanslı akışta Reynolds sayısı ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu şeklinde ifade edilir.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (4.14)$$

h : Akışkanın ısı taşınım katsayısı

D : Boru çapı

k : Akışkanın ısı iletim katsayısı

Dairesel olmayan borulardaki akış probleminde karakteristik uzunluk olarak hidrolik çap tanımlanmalıdır. Hidrolik çap değeri:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.15)$$

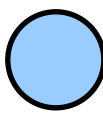

olarak tarif edilir. Burada:

A_c : Akış kesit alanı

P : Islak çevre uzunluğu

dur. Türbülanslı akış için dairesel kesitli borulara ait bağıntı kullanılabilir. Laminer akış için Nu_D değerleri tablo halinde verilir:

Bağıntı	Koşullar
$Nu_D = 4.36$	laminer, sabit ısı akısı, $Pr > 0.6$
$Nu_D = 3.66$	laminer, sabit yüzey sıcaklığı, $Pr > 0.6$
$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$	Türbülanslı, $0.6 < Pr < 160$, $Re_D > 10000$, $L/D > 10$, Isıtma için $n=0.4$, soğutma için $n=0.3$

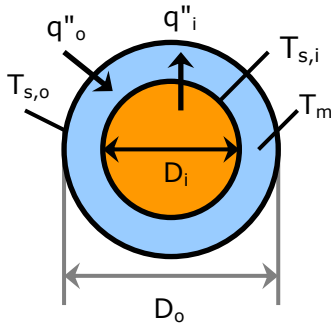
Kesit	b/a	Sabit ısı akısı	Sabit yüzey sıcaklığı
	—	4.36	3.66
	1.0	3.61	2.98
	1.43	3.73	3.08
	2.0	4.12	3.39
	3.0	4.79	3.96
	4.0	5.33	4.44

Kanal büyüklüğüyle birlikte Nusselt sayısında önemli bir düşüş gözlenir. Bir kanalın hidrolik çapındaki azalma, hacminde söz konusu alanındakinden daha büyük bir azalma meydana getirmektedir. Yani mikro akışkanlı sistemlerde alan-hacim oranı çok yüksek olma eğilimindedir. Bu, yüzey kuvvetlerinin kütle kuvvetleri üstüne hâkimiyetini gündeme getirir. Bu sayede, mikro akışların davranışı normal boyutlu

borulardaki akışlardan tamamen farklı olabilir. Diğer örnek mikro tüplerdeki kaynayan veya yoğuşan akışkan için akış rejimlerinin evrimidir. Ara yüz (kılcal) kuvvetlerinin kütle kuvvetleri üstündeki hâkimiyeti akış rejiminin sırasını büyük ölçüde değiştirir ve yatay kanallardaki akış katmanlaşmasını ortadan kaldırır.

Yapılan deneylerde, kanal yüksekliği azaldığında Nu' nun arttığı görülmüştür. Böylece klasik ısı geçişi kuramından sapma görülmüştür. Nu azalması dar mikro kanallarda çok daha fazladır. $e=0.1$ mm için Nu , büyük kanallarda olduğundan %60 daha düşüktür.

Eşmerkezli borulara ısı geçişi uygulamalarında borunun iç ve dış yüzeylerine ait Nu sayıları tanımlanır.



$$q''_i = h_i (T_{s,i} - T_m), \quad q''_o = h_o (T_{s,o} - T_m)$$

Karşılık gelen Nu sayıları:

$$Nu_i = \frac{h_i D_h}{k}, \quad Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} \quad (4.16)$$

Hidrolik çap değeri:

$$D_h = \frac{4(\pi/4)(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o + \pi D_i} = D_o - D_i \quad (4.17)$$

Türbülanslı akışta Nu sayısı, hidrolik çap kullanılarak dairesel kesitli boru için bağıntılardan tespit edilebilir. Laminer akış için tablo değerleri:

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	-	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

f , akıştaki sürtünme faktörünü temsil eder [30]:

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho U^2} = \frac{2D_h \Delta p}{\rho U^2 L} \quad (4.18)$$

Toplam ısı oluşumu ya da ısı akısının belirlenmesinde iletim, taşınım ve ışınmadan kaynaklanan ısı kayıpları bir enerji dengesi kullanılarak değiştirilmiştir. Mikro kanal yapısının ısı akısı aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$q'' = \frac{Q}{A} \quad (4.19)$$

Burada Q toplam ısı girişi ve A mikro kanal plaka alanını belirtmektedir. ($A = W.L$)

Isı geçişi katsayısı aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir:

$$h(x) = \frac{q''}{\Delta T_m} \quad (4.20)$$

h ısı geçişi katsayısı akış koşullarının laminar veya türbülanslı olmasına göre farklılık gösterir. Burada T_m , ortalama ısı farkıdır ve aşağıdaki denklemlerle belirlenmiştir:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{iç} - \Delta T_{dış}}{\ln(\Delta T_{iç} / \Delta T_{dış})} \quad (4.21)$$

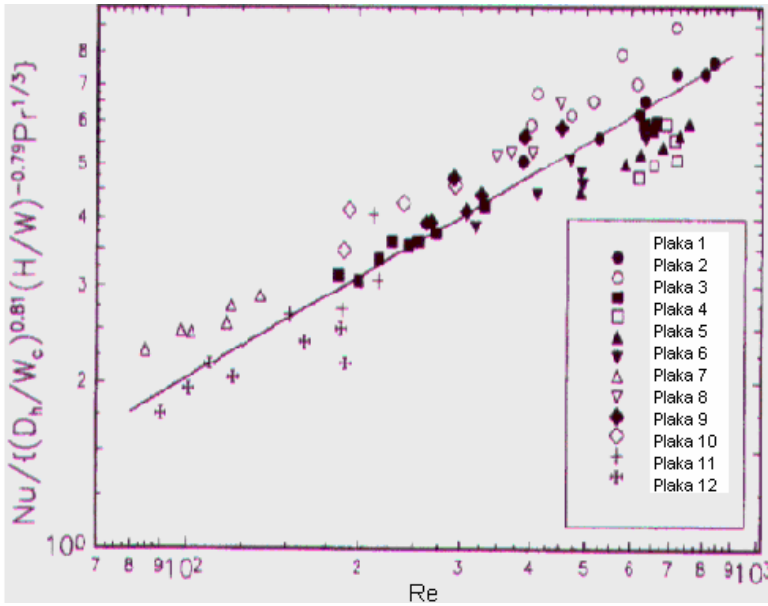
Her durumda, ısı kaybının büyüklüğü çok değildir.

4.4.2. Laminer akış

On iki farklı mikro kanalda, akışkan olarak su kullanılması halinde Nusselt bağıntısı aşağıdaki denklemle ilişkilendirilmiştir [30]:

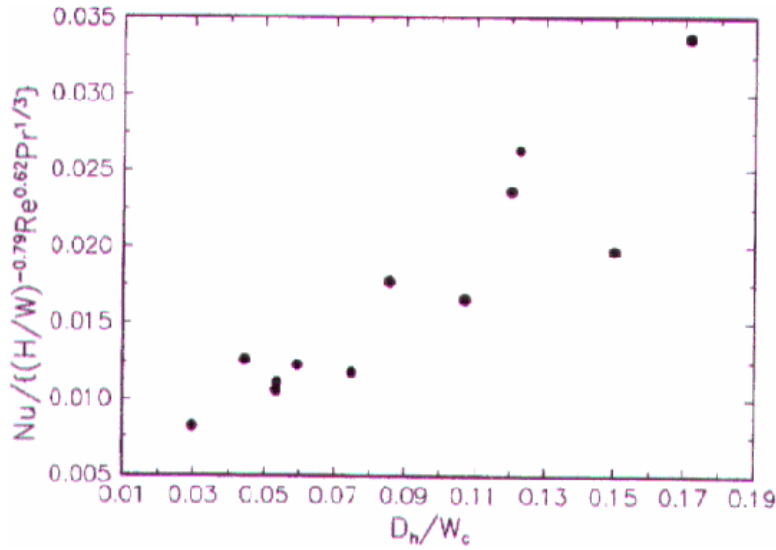
$$Nu = 0.1165 \left(\frac{D_h}{W_c} \right)^{0.81} \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.79} Re^{0.62} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.22)$$

Şekil 4.12’ de bu bağıntı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Laminer taşınım ile ısı geçişi için Reynolds sayısı aralığı, farklı mikro kanal yapıları ya da plakalar için benzer değildir. On iki mikro kanaldan elde edilen deneysel veriler ve Denklem 4.22’ de verilen bağıntı arasında iyi bir uyum vardır. Bu bağıntı için sapma aralığı yaklaşık olarak $\pm \%30$ ’ dur.

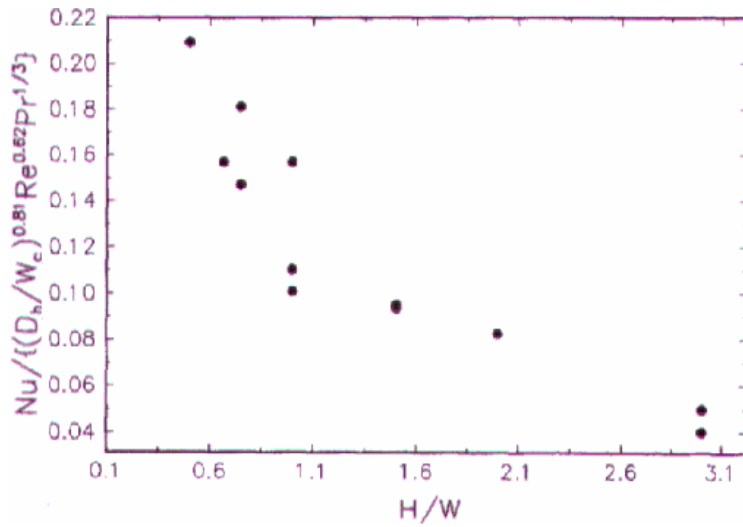


Şekil 4.12. Laminer ısı geçişinin deneysel sonuçları [30]

Şekil 4.13 ve 4.14 merkezden merkeze mesafe ve D_h/W_c ile H/W fonksiyonları için test plakalarının ortalama deneysel sonuçlarını ve laminer taşınım ile ısı geçişi üzerinde geometrik parametrelerin etkilerini göstermektedir.



Şekil 4.13. Laminer ısı geçişi üzerinde D_h/W_c etkisi [30]



Şekil 4.14. Laminer ısı geçişi üzerinde H/W etkisi [30]

Mikro ölçek tüplerdeki laminardan dalgalı akışa erken geçişte, sıvının termo fiziksel özellikleri kanal boyunca belirgin şekilde değişmekte ve böylece kanal çıkışındaki Re giriştekinin iki katına çıkabilmektedir. Bu nedenler, türbülansa erken geçişte kısmen Re 'deki artışa bağlanabilir.

4.4.3. Türbülanslı akış

Türbülanslı ısı geçişi için D_h/W_c oranının (merkezden merkeze mesafenin), özellikle laminar taşınım ile ısı geçişi durumunda çok önemli bir parametre olduğu bulunmuştur. Şekil 4.15, her plaka için D_h/W_c değerine bağlı olarak türbülanslı ısı

geçişini göstermektedir. Bu ilişki Şekil 4.13' te gösterilene benzemektedir, ancak daha detaylı bir analiz türbülanslı ısı geçişinin bu ilişkiye laminer durumda olduğundan daha bağımlı olduğunu göstermektedir. Yükseklik (H) ve genişliğin (W) önemi neredeyse aynıdır, ancak bu iki parametrenin türbülanslı ısı geçişi üzerindeki etkisi, yükseklik/genişlik boyutsal parametresi tarafından kolayca belirlenemez. Bu nedenle, aşağıdaki gibi Z değişkeni belirlenmiştir:

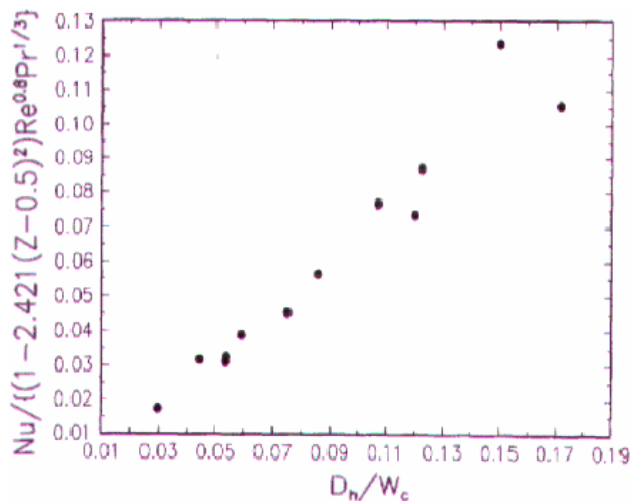
$$Z = \frac{\min(H, W)}{\max(H, W)} \quad (4.23)$$

Bu ilişkinin önemi deneysel olarak belirlenmiştir.

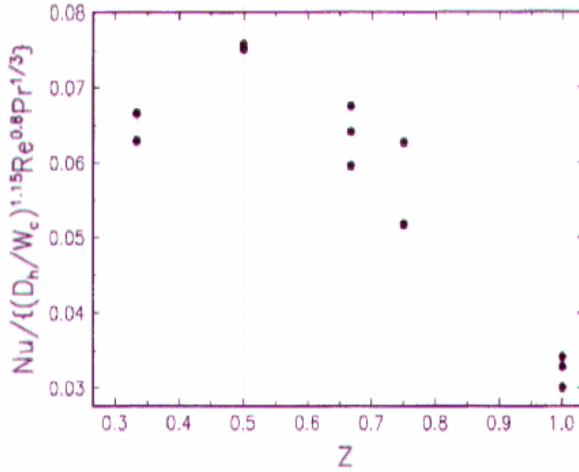
Mikro kanallı yapılarda tam olarak gelişmiş türbülanslı akışta taşınımınla ısı geçişi aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir [30]:

$$Nu = 0.072 \left(\frac{D_h}{W_c} \right)^{1.15} \left[1 - 2.421(Z - 0.5)^2 \right] Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (4.24)$$

Mikro kanallı yapılarda ısı geçişi özelliklerini veren bağıntılar oluşturulurken, mikro kanallı plakalarda akışkana ısı geçişinin oldukça karmaşık olduğu görülmektedir. Yukarıda bildirildiği gibi, tek fazlı taşınımınla ısı geçişi için geometrik konfigürasyon önemlidir. Laminer ve türbülanslı ısı geçişinde farklı etkileri vardır.



Şekil 4.15. Türbülanslı ısı geçişi üzerinde D_h/W_c etkisi [30]



Şekil 4.16. Türbülanslı ısı geçişi üzerinde Z etkisi [30]

4.5. Isı Geçişi Performansı

Peng ve ekibi, mikro kanallı yapılarda laminer ısı geçişi için kritik Reynolds sayısının yaklaşık 200-700' de ve tamamen gelişmiş türbülanslı akışta 400-1500' de gerçekleştiğini göstermiştir. Bundan başka, geçiş Reynolds sayılarının, hidrolik çapın azalmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Mevcut araştırmada yapılan deneyler, bu sonuçların, sadece benzer mikro kanal boyutlarıyla, mikro kanal yapılarındaki sıvı akışı için geçerli olduğunu göstermiştir. Hidrolik çap, mikro kanal yüksekliği ve genişliğinin oranı (H/W) ve hidrolik çap oranıyla mikro kanal merkezlerinin mesafesi (D_h/W_c) gibi geometrik parametrelerin hepsinin, akış karakteri ve ısı geçişinde etkili olduğu görülmektedir [30].

Mikro aletlerin yüzey/hacim oranı geniş olduğundan, yüzey etkisiyle ilişkili faktörlerin, küçük çaplı akış ve ısı geçişinde daha fazla etkisi vardır. Bunların arasında: (a) sıvı hız profillerini hareket ettiren ve daha yüksek sürtünme faktörlerine yol açan, yüzey sürtünmesinin neden olduğu akış sıkışması; (b) laminerden türbülanslı akışa erken geçişe, artan sürtünme faktörüne ve Nusselt sayısına büyük ihtimalle neden olan yüzey pürüzlülüğü; (c) mikro kanallarda doğal ısı yayılımı için Nu ve Re arasındaki korelasyonu değiştiren, doğal ısı yayılımındaki akışmazlık kuvvetinin önemi ve (d) kanal yüzey geometrisi, yüzey elektrostatik yük, kanal duvarındaki aksiyal ısı iletimi ve ölçüm hatalarını da içeren diğer etkenler vardır.

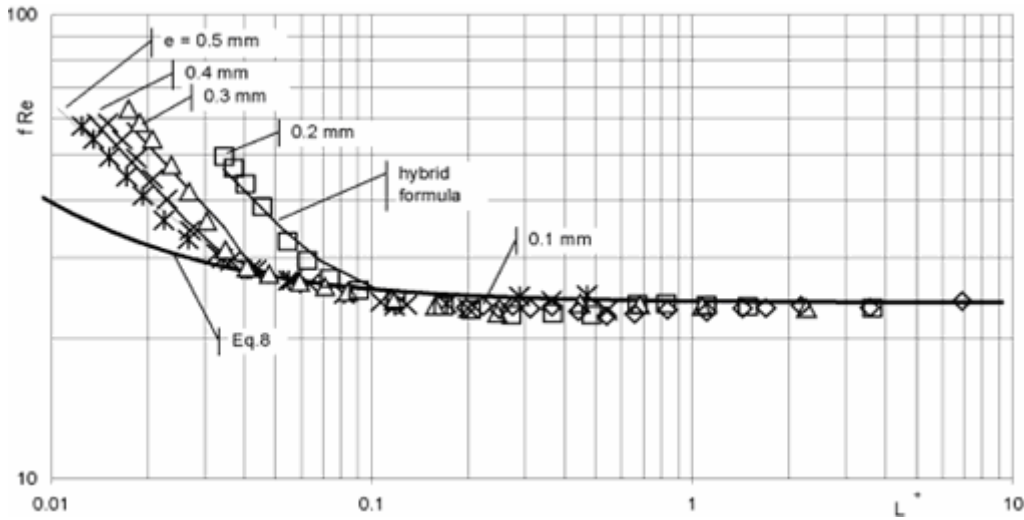
Bütün bu faktörler; mikro kanallardaki akış ve ısı geçişi davranışının, konvensiyonel ölçeklerdekilere farklı olmasına neden olabilir.

4.6. Basınç Kaybı

Mikro kanallarda basınç kaybı ile ilgili yapılan araştırmalar, test edilen kanalların uzunluğu sabit olduğu için giriş uzunluğuna, kanal yüksekliğine ve akış hızına bağlıdır. Bundan dolayı basınç kaybını boyutsuz kanal uzunluğu L^+ nın bir fonksiyonu olarak görmek faydalı olacaktır. Ölçümlerden çıkarılan Poiseulle sayısı:

$$Po = fRe \quad (4.25)$$

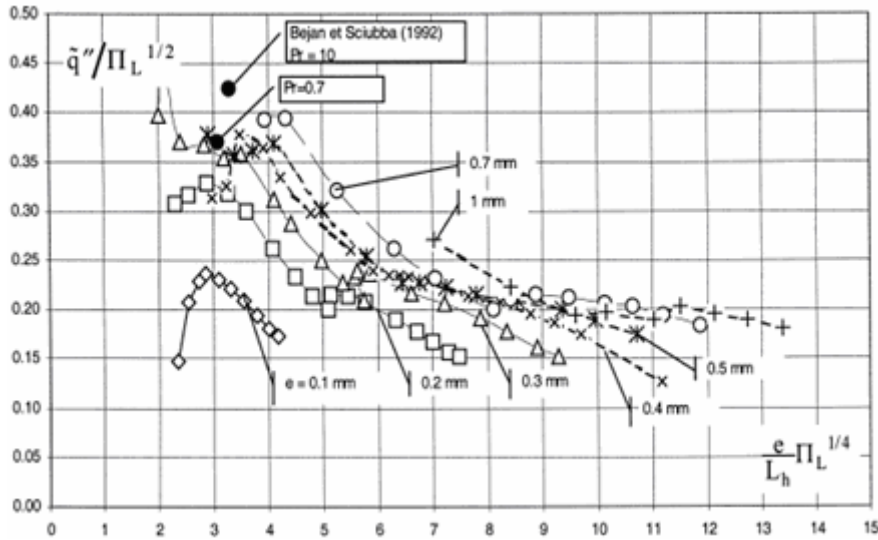
e' nin en düşük değeri için Şekil 4.17' de çizilmiştir. Şekil 4.17, geliştirilen laminer akış rejimi için sürtünme kuramı ($fRe=64$) kanal yüksekliğine bakılmaksızın mevcut deneyde çok iyi teyit edilmiştir.



Şekil 4.17. Boyutsuz basınç kaybı üzerinde kanal büyüklüğü etkisi [19]

Kanal boyunca ölçülen toplam basınç kaybı Δp ' den alınmıştır:

$$\Delta p_{giriş-3"} = \Delta p - \Delta p_{3"-çıkış} \quad (4.26)$$



Şekil 4.18. Maksimum ısı geçişi için optimal mesafelendirme [19]

Isı geçişi ile ilgili makro ölçek akış teorisinin geçerliliğini inceleyen en basit yöntemlerden biri, çok ince boru veya kanalların bilinen uzunluğu üzerinde basınç kaybı deneyleri yapmaktır. Daimi kesit bölümü kanalları veya yatay borulardaki sıkıştırılmayan akışların basınç denklemi aşağıdaki gibidir [4]:

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} \left[f \frac{L}{D} + \sum K_L \right] \quad (4.27)$$

f : Sürtünme faktörü

ρ : Sıvı yoğunluğu

V : Ortalama hız

L : Kanal veya tüp uzunluğu

D : Hidrolik çap

$\sum K_L$: Akış giriş, çıkış ve hidrodinamik büyüme uzunluğundan kaynaklanan kayıpları temsil eder.

Yukarıdaki ifade f için çözülebilir. f Re neticesi için şu şekilde ifade edilir [4]:

$$f \text{ Re} = \frac{\pi \Delta P D^4}{2 \pi L \mu} - \frac{4 p Q}{\pi L \mu} \sum K_L \quad (4.28)$$

Q : Sıvının hacimsel debisi

μ : Dinamik viskozite

Mikro tüplerde sıvı akışı önemli bir iç basınca ihtiyaç duyar. Bu akış sırasında artan basınç sıvıların özelliklerini etkileyebilir. Sıvıların kıvamlılığının basınçla beraber arttığı da bilinir. Ancak su, isopropanol ve metanol için etki tanımlaması sadece Bridgman'ın kıvamlılık ölçümünün yüksek basınçta basınca bağlı olduğunu bildiren 1926 yılındaki çalışması olarak ortaya çıkar. Bu çalışmada test edilen en düşük basınç 500 atm idi. Su için kıvamlılıkta basıncın etkisi çok küçük olarak gösterilir (bu çalışmanın basınç alanı için %0.5' ten az olduğu hesaplanmıştır). Basınçla artan sıvı kıvamlılığı, artan basınç düşümüyle (artan Re) fRe 'deki azalma eğilimini artıracaktır.

Mikro kanallarda akışı sağlamak için yüksek basınç gerekir. Çoğu sıvının termo fiziksel özelliği ultra yüksek basınçlara ulaşana kadar ihmal edilebilir bir şekilde basınca bağlıdır. Önemli ölçüde yükseltilmiş basınçlar hızda yükselmeye sonuçlanır ki bu fRe 'deki açıkça görülen azalmayı düzeltir.

Birleşmiş silika mikro tüplerle yapılan çalışmaların aksine, bu paslanmaz çelik tüpler için Reynolds sayısı ölçüsü $Re \approx 2000$ 'i aşmıştır. Bu yüksek Reynolds sayısında, özellikle saf su verisinde görüldüğü gibi, laminer-türbülans akış geçişinin belirtisini sunar. Paslanmaz çelik tüp kullanarak toplanan veri $fRe = 64$ 'lük kavramsal sürtünme devamlılığının sürekli olarak biraz altındadır. Ancak belirsizlik teoriyi tüm veri için yayar.

Tablo 4.2. İncelenen deneysel parametre alanları [4]

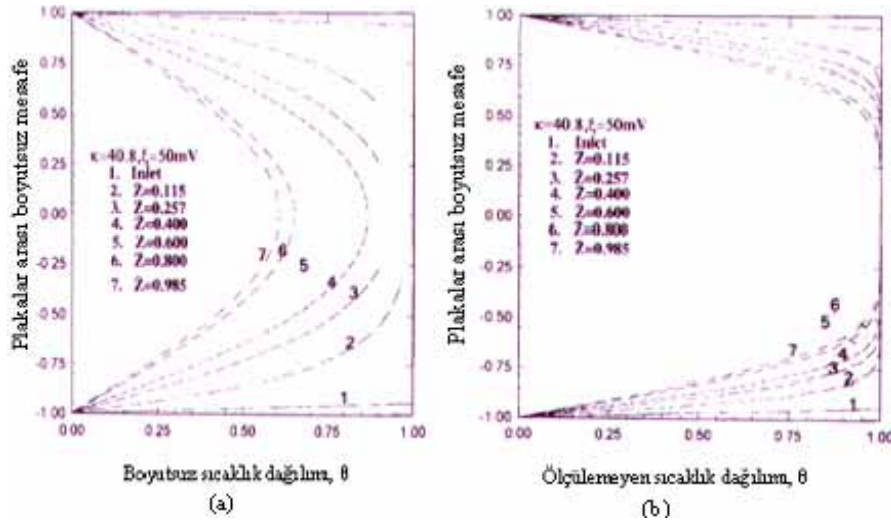
D (nominal, İm)	L (m)	Re
Birleşmiş dairesel silika mikro tüp		
15	0.036	34–41
20	0.030–0.050	18–989
30	0.040–0.070	8–1716
40	0.050–0.37	17–769
50	0.070–0.29	44–1451
75	0.30–0.39	146–1883
100	0.30	109–1858
150	0.20–0.30	137–1540
Birleşmiş kare silika mikro tüp		
50	0.080–0.13	61–1527
75	0.11–0.30	161–1150
100	0.18–0.30	95–1723
Paslanmaz çelik dairesel mikro tüp		
75	0.15	83–2384
100	0.18	66–2431
125	0.30	58–1800

* Tüm testlerde; saf su, metanol ve isopropanol kullanılmıştır.

4.7. Isı Geçişi Tahmini

Mikro kanallarda ısı geçişi davranışını analiz etmek için, kanal uzunluğu boyunca farklı kesitlerde sıcaklık dağılımı üzerinde Re etkisini dikkate almak önemlidir. Şekil 4.19(a,b), sırasıyla $Re=2,83$ ve $Re=56,5$ için sıcaklık profillerini göstermektedir. İki şekil arasındaki farkı açıkça görebiliriz. Şekilde giriş olarak işaretlenen kanal girişinde, sıcaklık profilleri çıkış profilleriyle karşılaştırılmıştır. $Re=2.83$ için, sıcaklık profilinin, tamamen gelişmiş hız profili gibi parabolik bir şekli vardır, ancak $Re=56.5$ için sıcaklık profili bir türbülanslı hız profiline benzemektedir. Girişteki dik

sıcaklık profili $\bar{x} = \pm 1$ ' de $\partial \theta / \partial \bar{x}$ türevidir. Ek olarak, θ_m ' de kanal girişinde maksimum seviyededir. Akış kanalı boyunca, θ_m azalır.



Şekil 4.19a. $Re=2.83$ için farklı kesitlerde sıcaklık profili, (θ) [31]
 b. $Re=56,5$ için farklı kesitlerde sıcaklık profili [31]

Wu ve Little, ısı değiştiricileri içindeki nitrojen gaz akışı için akış ve ısı geçişi karakteristiklerini ölçtüklerinde, laminer akış ($Re < 600$) için bildirilen Nusselt sayıları geleneksel korelasyonlar yoluyla oluşturulan tahminlerinkinden daha aşağıdaydı. $600 < Re < 1000$ için, Nu standart değerlerden daha yüksekti. Laminerden, türbülanslı ısı geçişine geçiş bölgesi Re ' de 1000' den 3000' e kadar değişen şekilde görülmüştür [9].

BÖLÜM 5. MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Mikro ölçekte akış ve ısı geçişinde yeni sorular; bildirilen sürtünme faktörü, ısı geçişi katsayıları ve onların fiziksel mekanizmalarındaki büyük farklılıklardır ve bu sorunlar hala açıklanamamaktadır. Bu sorunlar; Gad-el-Hak, Mehendale ve diğerleri, Darin ve diğerleri ile Palm tarafından, makalelerine birçok kez konu olmuş ve tartışılmıştır [88, 87, 86, 28]. Gaz basıncını azaltmanın, mikro ölçekli gaz akışları açısından daha düşük sürtünme faktörlerine ve daha düşük Nusselt sayılarına yol açtığı yaygın olarak fark edilmiştir. Basınç kaybı etkisinin yanı sıra, Mehendale ve diğerleri, kanal yüzeyi pürüzlülük farklılıkların; sürtünme faktöründeki ve ısı geçişi datasındaki eşitsizlikleri açıklayabileceğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca ısı taşınım katsayıları; neredeyse tüm çalışmalarda, akışkan sıcaklığına değil de giriş ve/veya çıkış sıvı sıcaklıklarına dayandığı için, konvansiyonel korelasyonların kıyaslanması problem doğurur [87].

Mikro kanallarda ısı geçişini etkileyen faktörleri kısaca şu başlıklar altında sıralayabiliriz:

1. Basınç Azalması Etkisi
2. Yüzey Pürüzlülüğü Etkisi
3. Sıkıştırılabilirlik Etkisi
4. Kanal Şeklinin Etkisi
5. Hidrolik Çap Etkisi
6. Yüzey Islaklığı Etkisi
7. Seyrelme Etkisi
8. Kanal Duvarındaki Aksiyal Isı Yayılımının Etkisi
9. Duvar-Akışkan Birleşik Isı Geçişi Etkisi

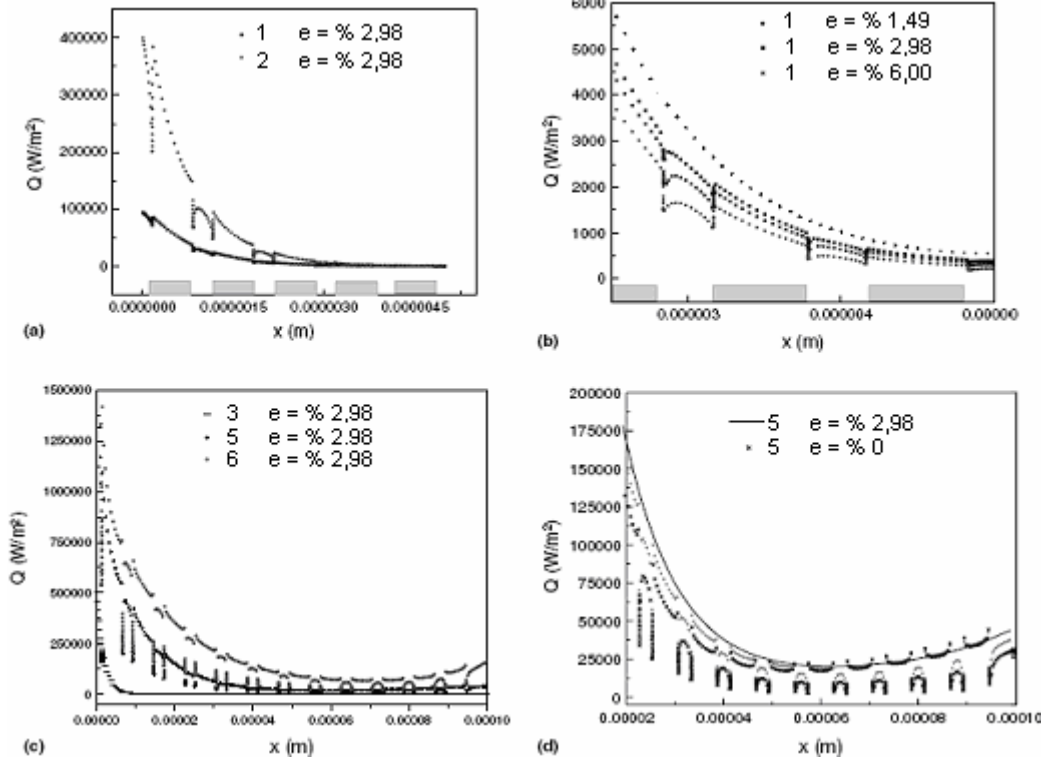
5.1. Basınç Azalması Etkisi

Guo, mikro kanallardaki akış için ısı geçişi korelasyonları ve akış başlangıcının çeşitli mekanizmalarını, iki grup halinde sınıflandırmıştır. İlk olarak, eğer akışın karakteristik uzunluğu moleküler ortalama serbest yolla aynı büyüklük dizisindeyse, Navier–Stokes denklemleri ve Fourier ısı iletimi denklemi bozulur ve sonuç olarak, akış ve ısı geçişi davranışları büyük ölçüde değişir. Bu, Knudsen sayısı ile temsil edilebilen basınç azalması etkisidir. “Knudsen Sayısı”, K_n , moleküler ortalama serbest yolunun ve akışın karakteristik uzunluğunun oranı olarak tanımlanır. İkinci olarak, akış ve ısı geçişi korelasyonları üzerindeki boyut etkisi; ölçek azaldıkça, akış ve ısı geçişindeki dominant faktörlerin varyasyonuna bağlanır. Örneğin, farklı ölçeklerdeki ısı geçişi için, değişen akış ve ısı geçişini etkileyen sıvı için kullanılan kuvvet ve normal boyutlarda genel olarak ihmal edilen tüp duvarındaki aksiyal ısı iletimi, mikro ölçeklerde önemli olabilir. Sonuç olarak, mikro ölçek akış ve ısı geçişi korelasyonları, normal boyutlu borularda gerçekleşen akış ve ısı geçişinden farklıdır [23].

Şayet Knudsen sayısı (gaz serbest yolu ve uzunluk derecesi arasında $K_n = \lambda/H$ oranı) 0.001 ile 0.1 arasında ise, akış sürekli bir akış olarak sayılamaz. Duvar yüzeyinde hız kayması ve ısı atlaması oluşur. Bu tür basınç azalma etkileri sürtünme faktöründe ve ısı taşınım katsayısında artan K_n sayısı ile birlikte azalmaya yol açar. Standart atmosferik koşullar altındaki hava için, bir mikro kanalın çapı $67 \mu\text{m}$ ’den daha az ise, basınç azalma etkisi önem kazanır.

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Etkisi

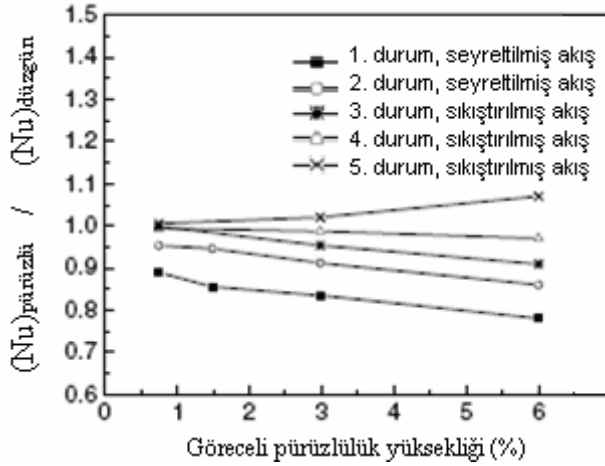
Mikro kanallardaki akışta duvar pürüzlülüğünün ısı geçişi üzerindeki etkisi Şekil 5.1. (a) ve (b)’de verilmiştir. Şekil 5.1.(a)’da gösterildiği gibi, girişe yakın bölgede daha büyük bir giriş K_n sayısı ile gaz akışında daha düşük olan bir K_n sayısına göre seyrelme etkisi daha fazla ve yerel ısı akışı daha azdır. Duvar üzerindeki gaz sıcaklığı daha düşüktür. Bunun nedeni gaz molekülleri ve duvar arasındaki çarpışmada ısı geçişinin düşük olmasından ve bundan dolayı gaz akışına daha az enerji taşınmasındandır.



Şekil 5.1. Isı geçişinde duvar pürüzlülüğünün etkisi:(a) farklı giriş Kn sayılarında seyreltilmiş akışlar için, (b) farklı e ile seyreltilmiş akışlar için, (c) farklı giriş Mach sayıları ile sıkıştırılabilir akışlar için, (d) farklı e ile sıkıştırılabilir akışlar için [10]

Şekil 5.1.(b)' den görülebileceği gibi, farkedilir yükseklikte bir artış, çıplak duvar yüzeyinde yerel ısı akısını azaltır. Hacimdeki azalma ve devir daim bölgesinin yüksekliğinin artışı, akış alanının iyice karışmasını sağlar ve böylece duvar yakınındaki ısı geçişinin azalmasına yol açar. Şekil 5.1.(c)' de gösterildiği gibi giriş Mach sayısının artışıyla birlikte, sıkıştırılabilirlik etkisi daha fazla önem kazanır ve seyrelme etkisi daha yaygındır.

Şekil 5.2 ortalama Nu sayısı üzerinde duvar pürüzlülüğü etkisini göstermektedir. Ortalama Nu sayısı pürüzlü kanallarda seyreltilmiş akışlarda azalmaktadır. Özellikle yüksek Nu sayılarında seyreltilmiş akışta, ısı geçişi etkisinin azalması anlamına gelen pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla, Nu sayısında azalma önemlidir. Ancak, yüksek sıkıştırılabilir bir akış için, ortalama Nu sayısı çok fazla azalmaz ya da pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla hafifçe artar.

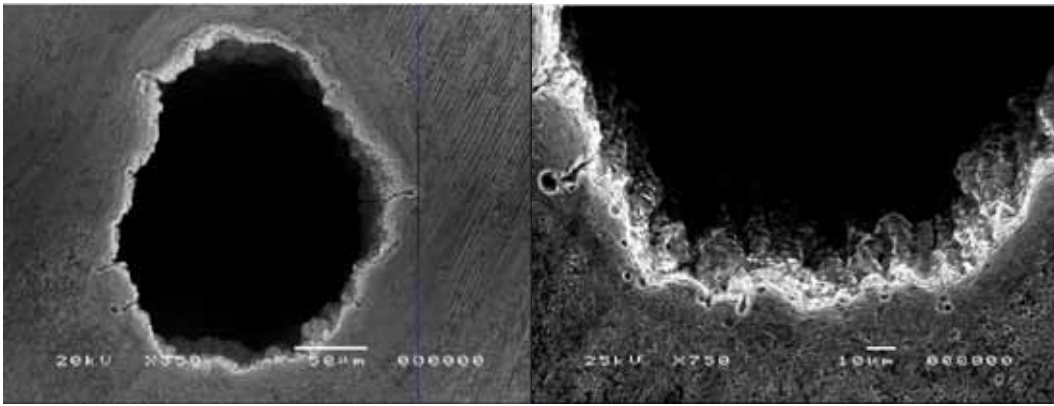


Şekil 5.2. Ortalama Nusselt sayısı üzerinde duvar pürüzlülüğü etkisi [10]

Seyreltilmiş ve sıkıştırılabilen gaz akışları üzerinde duvar pürüzlülüğü etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

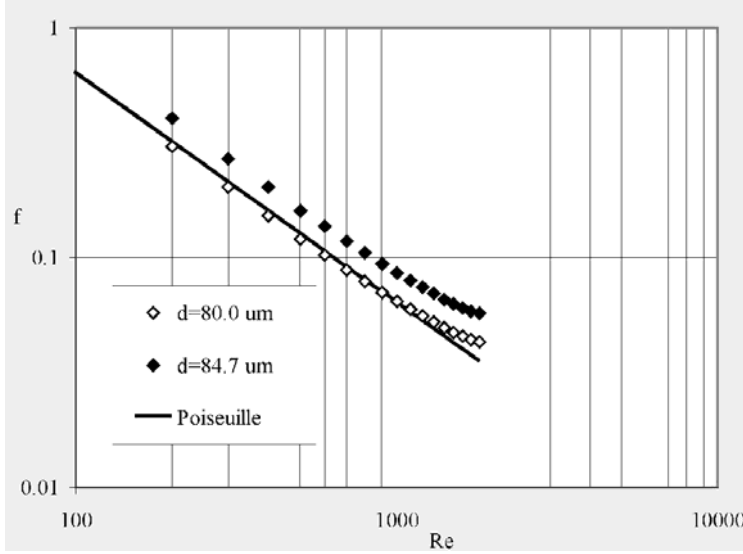
- 1) Pürüzlü unsurlar yukarı doğru gaz akışını kısıtlamakta, daha fazla basınç düşmesine neden olmakta ve engelleme etkisine ve devir daim bölgelerinin oluşumuna bağlı olarak, Poiseuille sayısında artışa neden olmaktadır. Seyreltilmiş gaz için yüzey pürüzlülüğü etkisi daha azdır.
- 2) Seyreltilmiş gaz, pürüzlülük unsuruna karşı hassastır. Ortalama Poiseuille sayısı sadece pürüzlülük yüksekliği arttığında değil, pürüzlülük unsurları arasındaki mesafe azaldığında da artmaktadır. Ancak, bu etki daha düşük Kn' de daha güçlüdür. Sıkıştırılabilir gaz akışı pürüzlülük unsuruna duyarlıdır.
- 3) Göreceli pürüzlülük yüksekliğindeki artış, seyreltilmiş ve sıkıştırılabilir akışların her ikisi için yerel ısı akısında azalmaya yol açar. Seyreltilmiş gazlar için, pürüzlülük unsuru ortalama Nu sayısını artırmaz (Örn. ısı geçişi etkinliği). Giriş Kn sayısı büyükse, yerel ısı akışı ve ortalama Nu sayısı daha düşük Kn sayısından daha azdır. Ancak, yüksek sıkıştırılma özelliği olan bir akış için, ortalama Nu sayısı çok fazla değişmez ya da hafifçe artar. Duvar pürüzlülüğünün varlığı ısı geçişini güçlendirir. Duvar pürüzlülüğünün ortalama ısı geçişi üzerindeki etkisi, Poiseuille sayısında olandan daha azdır. Duvar pürüzlülüğünün, mikro kanallarda geleneksel kanallarda olduğundan daha fazla etkiye yol açtığını göstermektedir.

Sürtünme faktörü ve ısı geçiş katsayısının bir kanalın duvarlarının göreceli pürüzlülüğünden etkilendiği iyi bilinen bir gerçektir. Mikro kanallar için, yüzey pürüzlülüklerinin ortalama yüksekliği ile kanalın hidrolik çapı arasındaki oran olarak tanımlanan “göreceli pürüzlülük” değeri yüksek değerlere ulaşabilir. Özellikle ticari paslanmaz çelikten yapılmış mikro tüpler için göreceli pürüzlülük %2–8 değerlerine erişebilir. Şekil 5.3’ de paslanmaz çelikten bir mikro tüpün kesitinin 2 SEM resmi gösterilmektedir. Bu tür mikro tüpte pürüzlülüğün ortaya çıkabileceği açıktır, ortalama 1–5 μm ’ lik pürüzlülük normal kabul edilebilir.



Şekil 5.3. Gaz kromotografi sütunları için kullanılan paslanmaz çelik bir mikro tüpün SEM resimleri [10]

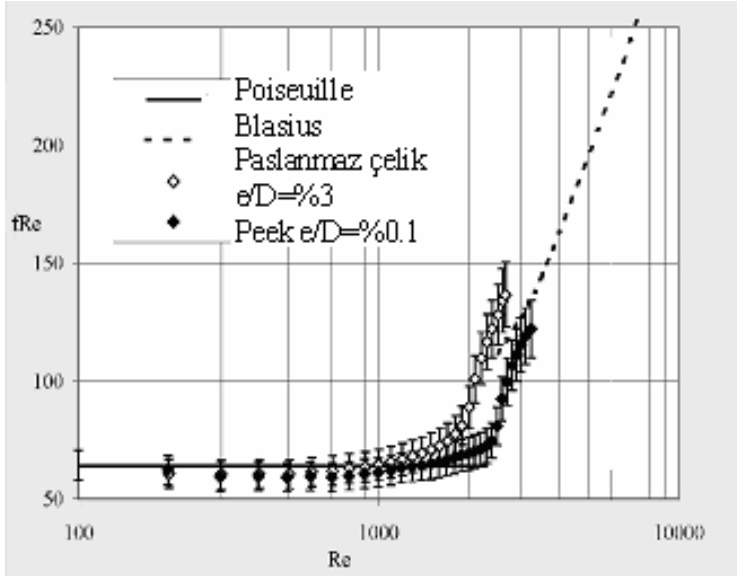
Bir mikro kanalın hidrolik çapının doğru belirlenmesinin sürtünme faktörünün doğru değerlendirilmesinde ne kadar önemli olduğunu deneylerle kanıtlamak mümkündür. Genelde, bir mikro kanalda sürtünme faktörünün deneysel olarak saptanması iki manifold arasındaki basınç farkının ölçülmesiyle yapılır.



Şekil 5.4. Çap belirsizliğinin sürtünme faktörü üzerine etkisi [39]

Deneyel çalışmalar, yüzey pürüzlüğünün yüksek değerlerinin, sürtünme faktörünü ve laminar ve türbülanslı rejimler arasındaki geçişi gösteren kritik Reynolds sayısını büyük ölçüde etkileme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bazı araştırmacılar, sıvı mikro akışları için yüzey pürüzlüğünün sürtünme faktörünün rolü üzerine etkisini, mikro kanallardaki pürüzler arasında yakalanmış olan çok ince gaz tabakası tarafından duvarlardan kısmen ayrılmış olan sıvı akışlarını dikkate alarak açıklamıştır. Bu gaz tabakası sürtünme faktörü tarafından varsayılan değerini ve özellikle laminar-türbülans geçişiyle ilgili kritik Reynolds sayısını etkileyebilir ve Poiseuille kanunu tarafından laminar rejimde varsayılan sürtünme faktörleri değerlerindeki sapmaları açıklayabilir.

Sayısal çalışmalar, genelde pürüzlülüğün Nusselt sayısı üzerine olan etkisinin sürtünme faktörlerine etkisinden daha az telaffuz edildiğini göstermiştir. Isı geçişindeki etkisi çoğunlukla deneysel belirsizliklerde kabul edilenle aynı büyüklüktedir. Büyük bir göreceli pürüzlülük, düzgün bir mikro kanal içinde ve pürüzlülük etkisinin büyük ölçüde kanal şekline bağlı olduğu durumdaki Nusselt sayısının değeri karşılaştırıldığında, Nusselt sayısı değerini artırabilir veya azaltabilir.

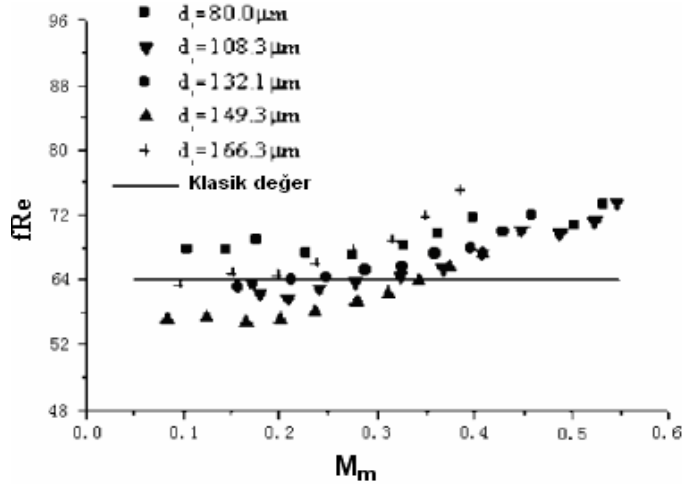


Şekil 5.5. Bir mikro tüp içerisinde göreceli pürüzlülüğün laminer-türbülanslı geçiş üzerine etkisi [39]

Pürüzlülüğün laminer-türbülanslı geçişler üzerine etkisi, göreceli pürüzlülüğün (e/D) iki farklı değeri için paslanmaz çelik ve peek (polietereterketon) iki mikro tüp için Poiseuille sayısının (fRe) deneysel verilerinin, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak gösterildiği Şekil 5.5 incelenerek görülebilir. Buradan pürüzlülüğün, kritik Reynolds sayısının değerini düşüreceği yorumlanabilir.

İç duvar rölatif pürüzlülüğünün %5' ten az olduğu durumlarda, laminer akış karakteristiğindeki pürüzlülük etkisinin göz ardı edilebileceği sonucuna varan Nikuradse (1933) ve Moody (1944)' den beri, yalnızca birkaç çalışma laminer akışta pürüzlülük etkisini göz önünde bulundurmıştır. Laminer akışlar için bazı deneysel ve hesaba dayalı sonuçlar, Moody' nin bilinen sonucuyla çelişmiştir. Nikuradse' nin sonucu günümüzde hala hâkimdir. Çünkü klasik boyutlardaki kalın tüplerin genellikle türbülanslı ve laminer akışlar için pratik önemi daha azdır. Ancak, mikro kanallardaki akışlar genellikle laminerdir ve bu nedenle kalın mikro kanallardaki laminer akış önemli hale gelmiştir [90, 89].

Pürüzsüz mikro kanallardaki gaz akışının sürtünme faktörü deneysel verileri Şekil 5.6' da gösterilmektedir. Yine, Mach sayısı $<0,3$ olduğu sürece, sürtünme faktörü standart değere çok yaklaşmaktadır. Bunun ötesinde sürtünme faktöründeki artışın nedeni akışın sıkıştırılabilir olmasıdır.

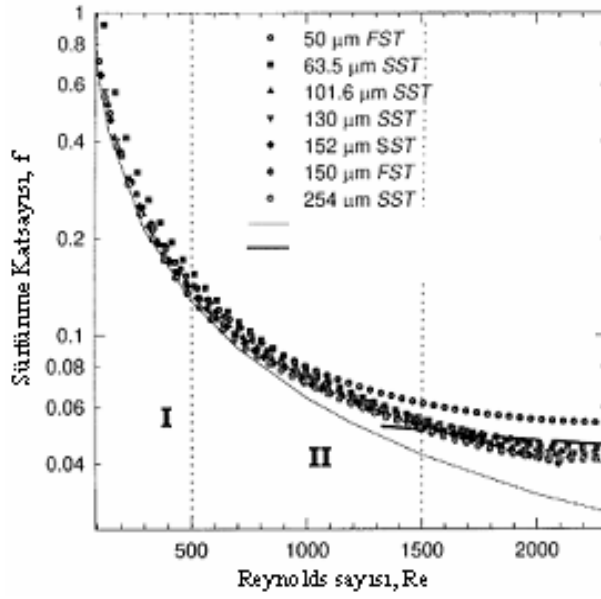


5.6. Pürüzsüz mikro tüplerdeki gaz akışında sürtünme faktörü [23]

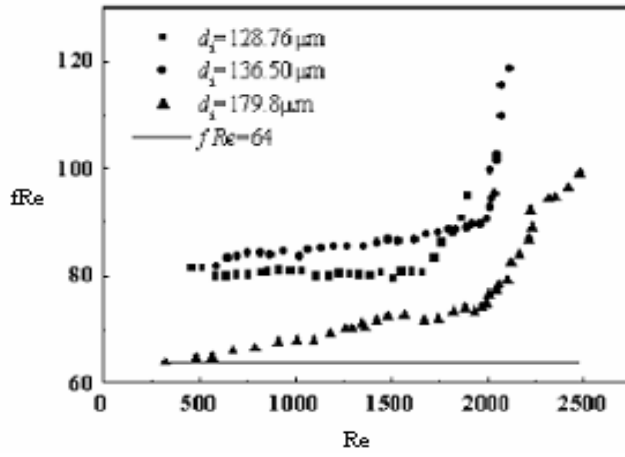
Celeta ve diğerleri, 130 μm kanal çapındaki R114 akışı için sürtünme faktörünü ölçmüştür. Reynolds sayısı 100 ile 8000 arasında değişmiş ve bağıl kanal yüzey pürüzlülüğünün % 2.65 olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar laminar akış için sürtünme faktörü, Hagen–Poiseuille’ in teorisi $Re < 583$ ile uyum içerisinde olduğunu göstermiştir. Öte yandan, Re ’ nin daha yüksek değerleri için, deneysel data Hagen–Poiseuille teorisinden daha yüksektir ve laminardan dalgaliya geçişin $1881 < Re < 2479$ arasında değiştiği görülmüştür [91].

Şekil 5.8’ deki sürtünme faktörleri 500 ile 2000 arasındaki Re ’ nin teorik değerlerinden % 10-%25 daha yüksektir.

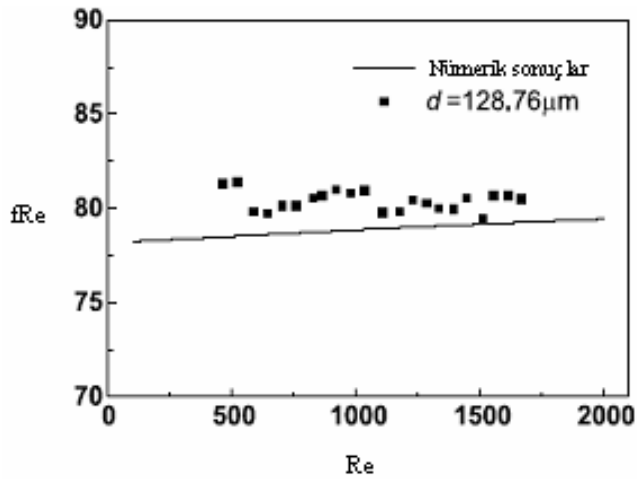
Du, pürüzlülük değeri için paslanmaz çelik mikro tüplerin iç yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafına dayanarak Şekil 5.9’ da gösterilen sayısal sonuçları elde etmiştir [93].



Şekil 5.7. Mikro tüpler için sürtünme faktörü [23]



Şekil 5.8. Kalın mikro tüpler için sürtünme faktörü [23]



Şekil 5.9. Sayısal ve deneysel sürtünme faktörü sonuçlarının karşılaştırılması [23]

Mikro kanallardaki akışı etkileyen parametrelerden biri de pürüzlülüğün yarattığı akış düzensizliğidir. Re yeterince büyük olduğunda, düzensizlikler laminlerden dalgali akışa erken geçişe neden olur. Ek olarak, türbülans; akış değişkenliğinden değil de pürüzlülüğün yol açtığı düzensizliklerden dolayı olduğu için, laminlerden dalgaliya geçiş düzenli ve yumuşak olabilir.

Mikro seviyede, tamamen düz duvar yüzeyi elde etmek mümkün değildir. Mikro sistemler hakkındaki geleneksel bilgilere göre, pürüzlülük %5' ten daha azsa, sürtünme faktörü üzerindeki etkisi önemsizdir. Ancak mikro kanallar için, daha önce sunulan deneysel ve sayısal sonuçlar yüzey pürüzlülüğünün akış ve ısı geçişi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Ancak, bir mikro kanal içinde genişmiş bir gaz akışı için, pürüzlülüğün etkisi daha karmaşıktır ve ölçülmesi daha zordur.

Yüzey pürüzlülüğünün laminer akış karakteristiği üzerinde ve Re sayısı sonuçlarında bir etkisi olduğu genel olarak kabul edilir. Merkle' nin viskozite modeline göre, pürüzlülüğün etkilenen viskozite (μ_R) tüp merkezinden duvara doğru artış gösterir. Merkezde, pürüzlülük viskozitesinin sıfır olduğu ve duvarda maksimum değere ulaştığı var sayılır.

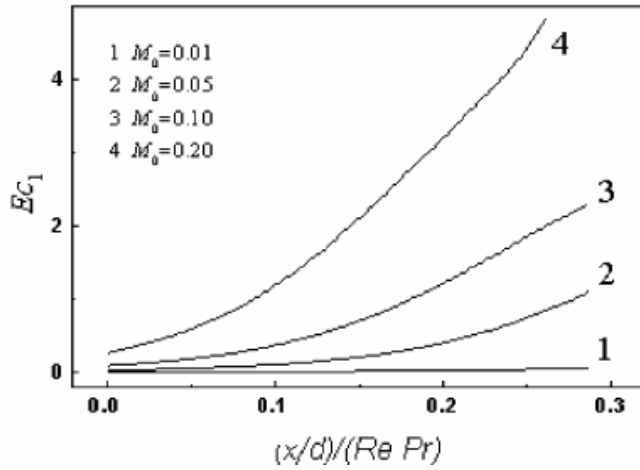
Laminer akış durumunda ise duvar pürüzlülüğü etkisinin sürtünme faktörü üzerinde önemli bir rol oynadığı deneysel olarak ölçülmüş ve tahmin edilmiştir. Mevcut araştırmalarda tahminlerle deneysel sürtünme faktörü verileri arasında iyi bir uyum olduğu sonucuna varılabilir.

5.3. Sıkıştırılabilirlik Etkisi

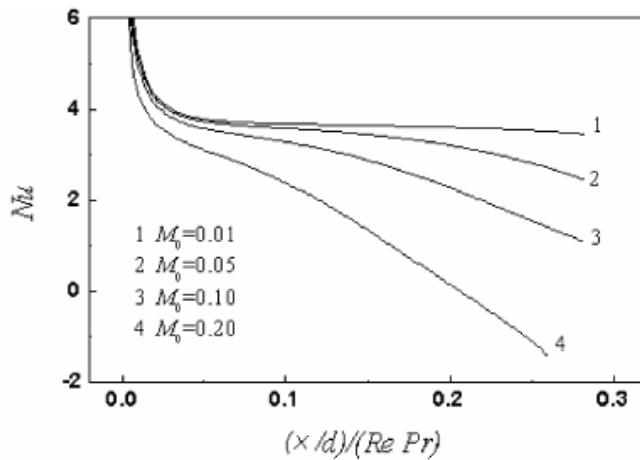
Normal boyutlardaki kanallarda gaz akışı Mach sayısı küçük ise akışın sıkışmaz olduğu varsayılır. Bu nedenle, gaz yoğunluğu akış sürecinde sabit olarak alınabilir. Tüplerdeki akış, tamamen gelişmiş hale gelir ve sürtünme faktörünün ve tüp uzunluğunun çapa oranı yeterince büyük olursa, Reynolds sayısı sabite eşittir. Yerel Nusselt sayısı sıkıştırılabilirlik etkisine bağlı olarak kanal boyunca artmaktadır.

Mikro tüplerdeki akış için, sıkıştırılabilirliğin gaz akışı ve ısı geçişi üzerindeki etkisi üzerine yapılmış birçok teorik çalışma vardır. Van der Berg ve diğerleri, dairesel tüp içindeki laminer akışın izotermal, sıkıştırılabilir Navier–Stokes denklemlerini çözmüştür [51].

Ayrıca, sıkıştırılabilirliğin neden olduğu Mach sayısındaki artışa baktığımızda, Şekil 5.10’ da gösterildiği gibi giriş Eckert sayısı küçük olsa bile, aşağıya doğru akışın Eckert sayısı oldukça artabilir. Genişlemenin ortaya çıkardığı işlem, kanal içerisinde sıcaklık kaybına neden olur. Eğer Mach sayısı ve sonucunda ortaya çıkan kanal içindeki sıcaklık kaybı yeterince büyükse, klasik anlamda tanımlanan Nusselt Sayısı bile Şekil 5.11’ de gösterildiği gibi negatif olabilir.



Şekil 5.10. Eckert sayısının tüp boyunca değişimi [23] ,



Şekil 5.11. Nusselt sayısının tüp boyunca değişimi [23]

Geleneksel teoriye göre, bir kanal boyunca ortalama Mach sayısı 0,3' ten daha küçükse, akışın yerel olarak sıkıştırılmaz olacağı kabul edilir. Ek olarak, tüp boyunca basınç kaybı giriş basıncının %5' inden daha düşükse, aksel yönde gaz akışın ivmelenme etkisi ihmal edilebilir (başka bir deyişle, kanal boyunca gaz yoğunluğunun değişimi ihmal edilebilir).

Celata ve diğerleri, 500' e kadar olan Reynolds sayıları için sıkıştırılabilirliğin sürtünme faktörü üzerine etkilerini tespit etmek için deneyler yapmışlar ve maksimum $\pm 20\%$ lik deneysel belirsizlik içerisinde giriş ve çıkıştaki sürtünme kayıplarının toplam basınç kaybına sadece çok az katkısı olduğunu bulmuşlardır [94].

Tablo 5.1' de sürtünme faktörü ve ısı taşınımı üzerine her bir etkinin oynadığı rol özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Tek fazlı mikro akışlar için ölçek etkileri [40]

<i>Etki</i>	<i>Sıvı</i>	<i>Gaz</i>	<i>f</i>	<i>Nu</i>
Seyreltme	Hayır	Evet	↓↓ $f=f(Kn)$	↓↓ $Nu=Nu(Kn, \beta_1)$ laminer rejimde
EDL	Evet	Hayır	↑↑ $f=f(\lambda_D/D_h)$	↑↑ $Nu=Nu(\lambda_D/D_h)$ laminer rejimde
Viskoz yayılma	Evet	Evet	↓↓ $f=f(Re)$ laminer rejimde	↓↓ $Nu=Nu(Br/Ec)$ laminer rejimde
Duvar-akışkan birleşik ısı geçişi	Evet	Evet	≈↓ $f=f(Re)$ laminer rejimde	↓↓ $Nu=Nu(Re)$ laminer rejimde (düşük Re)
Pürüzlülük	Evet	Evet	↑↑ önceki L-T geçişi	≈↑
Geometrik belirsizlikler	Evet	Evet	↑↓	↑↓
Sıkıştırılabilirlik	Hayır	Evet	↑↑ $f=f(Ma)$	↓↓ $Nu=Nu(Ec)$
AÇIKLAMA				
↑↑ - geleneksel teoriden daha yüksek				
↓↓ - geleneksel teoriden daha düşük				
≈ - geleneksel teori ile uyuyor				
Kn=Knudsen sayısı Re=Reynolds sayısı				
Br=Brinkman sayısı Ec=Eckert sayısı				
Ma=Mach sayısı				
λ_D =Debye uzunluğu D_h =hidrolik çap				

Pürüzlü kanallar için ortalama fRe sayısındaki artış giriş Ma sayısına bağlıdır. Sıkıştırılmayan akış için, Poiseuille sayısı, belirli bir pürüzlülük yüksekliği için daha

büyük bir Reynolds sayısı ile sabit kalır. Ancak sıkıştırılabilir bir akış için ortalama fRe sayısı önemli artışlar gösterir.

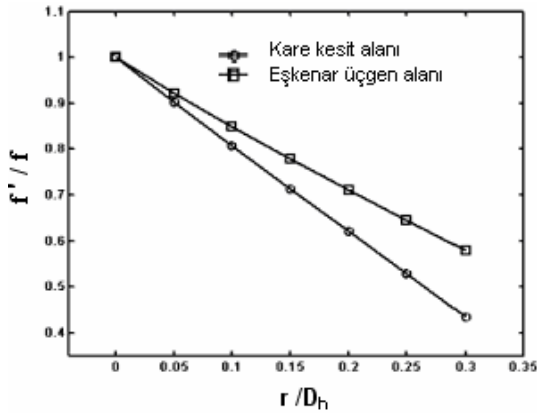
Ortalama fRe 'deki artış daha büyük Ma sayısı ve yüksek pürüzlülük unsurları olan pürüzlü kanallarda önemlidir. Bunun nedeni Mach sayısının gaz akışı sıkıştırılabilirliğinin büyüklüğünü temsil etmesidir. Mach sayısı ne kadar yüksekse, parabolik şekilden o kadar hız profili sarp ve daha büyük Poiseuille sayısı oluşur. Bundan dolayı sıkıştırılabilir gaz, pürüzlü yüzeye duyarlıdır. Ancak, Turner ve ekibinin deneysel sonuçları göreceli yüzey pürüzlülüğü $0.1 < e < 6$ olduğunda, seyreltilmiş ve sıkıştırılabilir gazlar için sürtünme faktörü üzerinde açık bir etki olmadığını göstermiştir. fRe 'deki artış, oldukça az görülmüş ve $2-6$ 'da kalmıştır.

5.4. Kanal Şeklinin Etkisi

Hidrolik çapın, mikro kanallardaki akışta sıvı içindeki çözünmüş gazların veya yüzey üzerine emilmiş gazların akış ve ısı geçişi karakteristikleri üzerinde büyük etkisi olabilir. Bu tür gazlar dairesel olmayan kanalların köşelerinde toplanırken, ıslak çevre azaltılacaktır ve gerçek akış kesiti azalırken, akışkan hızı artacaktır. Geniş hız sürtünmeyi arttırırken, daha küçük çevre sürtünmeyi azaltır. Kanal köşelerindeki gaz baloncuklarının geometrisi ve boyutu; sıvı yüzey gerilimine ve kontak açısına dayanır. Sayısal sonuçlar, ıslak çevrenin, ortalama hızdan daha çok baloncuk boyutuna dayandığını göstermiştir. Bu nedenle, azalmış ıslak çevrenin neden olduğu sürtünme azalması; artan ortalama hızın neden olduğu sürtünme artışından daha geniş olacaktır.

Normalize sürtünme faktörünün R ve D_h oranına bağımlılığı, R ve D_h 'in yay yarıçapı ve kanal hidrolik çapı olduğu, Şekil 5.12' de kare ve eş kenar üçgen en-kesitli mikro kanallar için gösterilmiştir. Bu bağımlılık farklı geometrilere sahip kanallarda farklılık gösterecektir. Çözeltinin içinden çıkan çözünmüş gazlar, ölçülen sürtünme faktörünü azaltacaktır. Yani daha küçük kanal ara kesitlerinin, sürtünme faktörü açısından deneysel sonuçları arasındaki farklılıklar daha fazla olacaktır. Bu nedenle, farklı geometrilere sahip mikro kanallardaki sıvı akışı korelasyonlarının karşılaştırılmasında hidrolik çapın kullanımı şüphelidir.

Boru şekli etkisi, altı değişik boru için akış rejimi kullanılarak araştırılmıştır. Dairesel ($D_h = 4.91$ mm); kare 4×4 mm ($D_h = 4$ mm, $\alpha = 1$); dikdörtgen 2×4 mm ve 4×2 mm ($D_h = 2.67$ mm, $\alpha = 0.5$ ve 2); ve dikdörtgen, 4×6 mm ve 6×4 mm ($D_h = 4.8$ mm, $\alpha = 0.67$ ve 1.5). Burada görüntü oranı (α) boru genişliğine bölünen boru yüksekliğidir. 4×4 mm, 4×6 mm ve 6×4 mm borular ve dairesel borular için akış türleri arasındaki geçişler Şekil 5.13’ te gösterilmiştir.

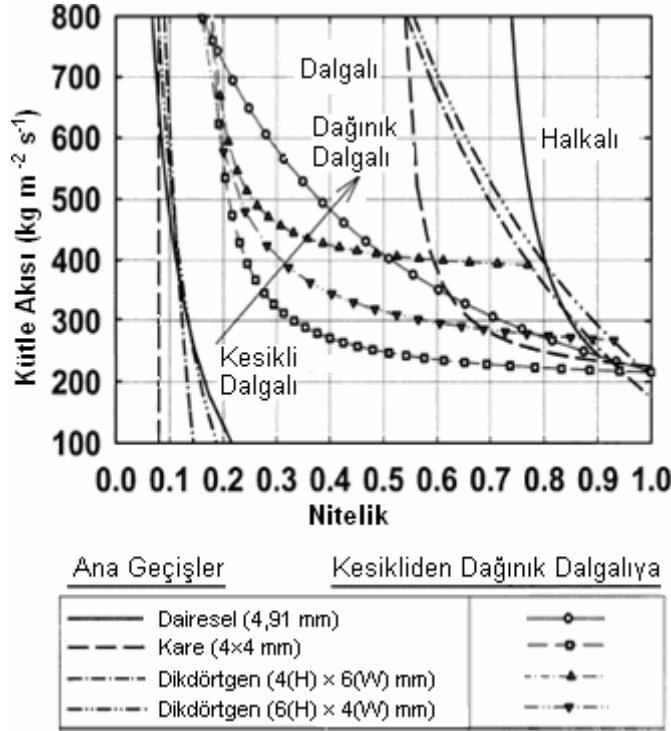


Şekil 5.12. Kare ve eşkenar üçgen kanallardaki sıvı akışının sürtünme faktörleri [23]

Şekil 5.13’ teki borular, benzer hidrolik çaplara sahiptir ($4,0 - 4.91$ mm). Bu şekil aralıklı rejimin dairesel borularda, kare şeklinde olan borulara göre daha büyük olduğunu göstermektedir. Dikdörtgen borular için aralıklı rejiminin uzantısı dairesel ve kare borulardır. Dalgalı akış rejimi de dairesel borularda daha büyüktür. Kare ve dikdörtgen kanalların köşelerde ve boru boyunca sıvının tutunmasına yardımcı olduğu görülmektedir. 4×6 mm ve 6×4 mm borularda büyük görüntü oranı, düşük kütle akışı oranlarında kesintisiz rejimde hafif bir artışa yol açarken, yüksek kütle akışlarında hafif azalmalara yol açmaktadır. Ancak, bu etkiler düşüktür ve geçiş hattının görüntü oranından az bir şekilde etkilendiği sonucuna varılabilir.

Dairesel kanallar, oldukça yüksek ısı taşınım katsayılarına sahip olmaları nedeniyle birçok uygulamada dairesel olmayan mikro kanallar kullanılmaktadır. Hava-su karışımının iki fazlı bir akış araştırmasında, Coleman ve Garimella, bu tür geometrilerde akış rejimi geçişlerinin daha büyük çaplı dairesel borularda olduğundan farklı olduğunu göstermişlerdir. Bunun nedeni, büyük dairesel borularla

küçük dairesel olmayan borular arasında yer çekimi, kesme ve yüzey gerilim etkilerinin önemli farklılık göstermesidir. Böylece, büyük yuvarlak boru ilişkilerinin küçük çaplı ve dairesel olmayan borulara olan extrapolasyonu basınç kaybına ve ısı geçişi tahminlerinde yanılmalara yol açabilir.



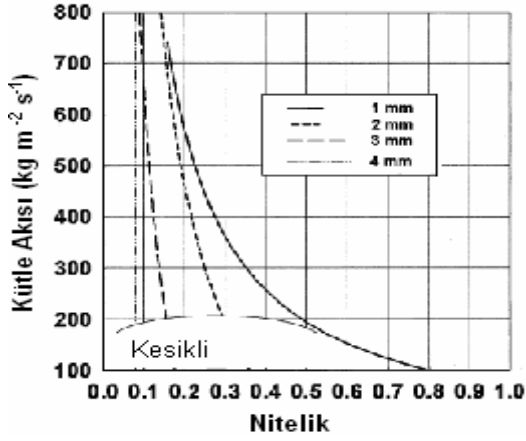
Şekil 5.13. Kanal şeklinin akış rejimi üzerindeki etkisi [26]

Boru çapı düştükçe, yüzeysel sıvı hızının dağınık akış rejimine geçişi daha yüksek bir değerde gerçekleşmektedir. Aynı şekilde boru çapı azaldıkça, sınır değerine yaklaşan dairesel akışa geçiş neredeyse yüzeysel gaz hızının sabit değerinde gerçekleşmektedir. Böylece, akış türlerinin ve geçişlerin boru çapı ve şekliyle birlikte önemli oranda değiştiği görülmektedir.

5.5. Hidrolik Çap Etkisi

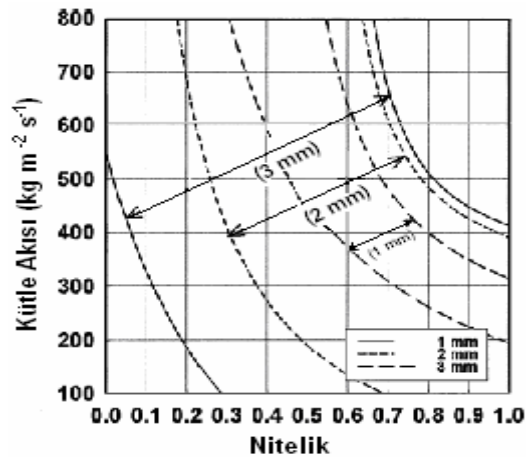
Hidrolik çap, genel olarak dairesel olmayan konvensiyonel boyutlu tüplerdeki akış ve ısı geçişini karakterize etmek için kullanılır. Akış rejimi haritaları üzerinde hidrolik çap etkisi, Şekil 5.14 ve 5.15' te gösterildiği gibidir. İncelenen dört kare boruda D_h azaldıkça aralıklı akış rejiminin arttığı görülmektedir. Düşük çaplarda aralıklı akış rejiminin artması bu boyutlarda yer çekimi kuvvetinden dolayı yüzey geriliminin

artmasından kaynaklanmaktadır. Bu oluşumun başka bir nedeni de karesel kanallarda sıvının dik kenarlardan daha kolay kalmasıdır.



Şekil 5.14. Aralıklı akış rejimi üzerinde hidrolik çap etkisi [26]

Şekil 5.15, 4 mm kanal haritasının, dairesel film örneklerinin bulunmadığı dalgalı akış rejimi tarafından hâkim olduğunu göstermektedir. D_h azaldıkça, dairesel akış rejimi ortaya çıkar ve haritanın önemli bir bölümünü kaplar. Böylece, 4 mm kanal için yer çekimi etkileri artar ve akış rejimi haritasının dalgalı akış rejimiyle kaplanmasına yol açar.



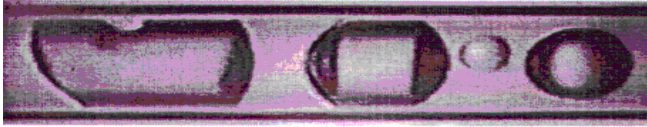
Şekil 5.15. Dairesel akış rejimi üzerinde hidrolik çap etkisi [26]

Hidrolik çap azaldıkça yüzey gerilimi etkisi artacak şekilde yerçekimi etkisiyle etkilenir ve dalgalı akış rejimi yerine dairesel film akış örneğini artırır. Böylece, D_h azaldıkça dalgalı akış rejiminin yerini dairesel akış rejimi alır ve $D_h = 1$ mm boruda varlığını kaybeder. Dalgalı akış rejiminin büyüklük üzerindeki etkisine ek olarak D_h

aynı zamanda dalgalı akış rejimi içinde akış örneklerini etkiler. Böylece, D_h azaldıkça dalgalı akış rejiminin sıvının kenarlarda ve bütün çevre boyunca tutulmasından dolayı dairesel film örnekleri tarafından değiştirildiği görülmektedir. Bundan başka yüzey gerilimi, dalgaları stabilize ederek küçük çaplarda daha kalıcı dalgalara yol açmaktadır.

5.6. Yüzey Islaklığı Etkisi

Mikro kanallarda iki fazlı akış az ya da çok yüzey gerilimi gücünden etkilenir ve bu nedenle tüp duvarı ve sıvı arasındaki yüzey pürüzlülüğü ve ıslaklığın iki fazlı akış örneklerini ya da iki fazlı akış yapılarını etkilediği düşünülmektedir. Barajas ve Pantón, iki fazlı akış örnekleri ve bunların geçişi üzerinde deneysel araştırmalar yapmıştır. Bu sonuçlardan, akış örneği geçişlerinin yüzey kirliliğinden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Mikro kanallarda akışın tüp ve sıvılar arasındaki ıslaklıktan etkilendiği ve yüzey kirliliğinin akış örneklerinin geçişinde etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Sadece etanolla temizlenmiş 100 µm iç çaplı durgun suda farklı şekillerde kabarcıklar [37]

5.7. Seyrelme Etkisi

Termodinamik denge için $K_n \lambda / L$ oranının birden küçük olması gereklidir. Bu oran “Knudsen Sayısı” olarak adlandırılır ve mikro akışlarda çok önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, akış rejimlerini Kn ' in bir fonksiyonu olarak ayırmak mümkündür ve genelde aşağıdaki sınıflandırma kabul edilir:

- $Kn < 10$ için, akış sürekli akış olarak adlandırılır ve klasik kayma sınır koşulları olmayan Navier-Stokes eşitlikleriyle modellenenir.
- $10 < Kn < 10$ için, akış kayma akışı olarak adlandırılır ve Navier-Stokes eşitlikleri, duvarlarda kayma hızı ve sıcaklık atlaması dikkate alınarak uygulanabilir.

Bu yeni sınır koşulları, seyreltme etkisinin ilk olarak duvarlarda hissedileceğini gösterir.

- $10^{-1} < Kn < 10$ için, akış geçiş akışı olarak adlandırılır ve Navier-Stokes eşitliklerinin sürekli yaklaşımı artık geçerli değildir. Bununla birlikte, moleküller arası çarpışma henüz ihmal edilebilir değildir ve dikkate alınması gerekir.
- $Kn > 10$ için, akış serbest moleküler akış olarak adlandırılır ve moleküller arası çarpışma, gaz molekülleri ve duvarlar arasındaki çarpışmayla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.

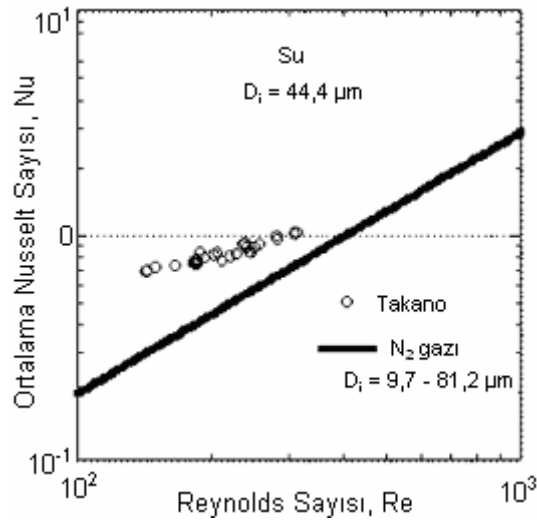
Hidrolik çapı $1\mu\text{m}$ ' den büyük olan mikro kanallardaki akışkanlar için Knudsen sayısı genellikle 0.001 ' den küçüktür. Bunun anlamı genelde seyrelme etkisinin ihmal edilebilir olmasıdır. Öte yandan, mikro kanallarda özellikle düşük basınçlardaki gaz akışları için seyrelme etkileri önemli hale gelmektedir. Seyrelme etkisinin mikro kanallardaki sürtünme faktörleri ve ısı taşınımı katsayıları üzerine etkilerini analiz etmek için pek çok makale yazılmıştır. Bu konuyla ilgili son derece doğru bir çalışma Colin tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, son yıllarda üzerinde çok çalışılan kayma-akış rejimi teorik ve deneysel bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Bu alanda elde edilen ana sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1) Seyreltme, büyük Knudsen sayılarında akışkan ve duvarlar arasındaki etkileşimleri azalttığı için, sürtünme faktörünün değerini azaltma eğilimindedir. Sabit bir kesit için, sürtünme faktöründeki azalma; $Kn=0$ için (örneğin sürekli akış) Poiseuille sayısının aldığı değerle atanan bir Knudsen sayısı için, tam gelişmiş akış (f) sürtünme faktörü ve Reynolds (Re) sayısının ürünü olarak tanımlanan Poiseuille sayısının karşılaştırılmasıyla hesaplanmıştır. Sürtünme faktöründeki azalma kesitin geometrisine ve Knudsen sayısına bağlıdır.
- 2) Seyreltilmiş gazların kütleli akış hızının ölçülmesiyle elde edilen deney sonuçları birinci dereceden kayma akış modellerinin sürtünme faktörleri ve kütle akış hızının sadece $Kn < 0,1$ için ihmal edebileceğini kanıtlamıştır.
- 3) Gaz seyrelmesi ısı taşınım değerini düşürmektedir.

5.8. Kanal Duvarındaki Eksenel Isı Yayılmının Etkisi

Genel olarak, konvensiyonel büyüklükteki kanalların, kanal duvarındaki aksiyal ısı yayılımı göz ardı edilebilir çünkü genellikle duvar kalınlığı, kanal çapıyla kıyaslandığında çok küçük kalır. Mori ve diğerleri ile Shah ve London, gelişmiş laminer akışın Nusselt sayılarının 4.36 ile 3.66 arasına denk geldiğini keşfetmişler ve bu sayıların sabit ısı akışı ve sabit sıcaklık sınır şartlarına ait Nusselt sayılarına karşılık geldiğini göstermişlerdir. Öte yandan, mikro kanallardaki akış açısından, duvar kalınlığının kanal çapıyla aynı olması mikro kanallardaki akış ve ısı geçişini etkilemektedir.

Mikro kanallardaki ısı geçişinin mevcut deneysel sonuçları, konvensiyonel boyuttaki kanallardakinden farklılık gösterir. Örneğin, Choi ve diğerlerinin raporuna göre; hidrolik çapları 9,7 ile 81,2 arasında değişen mikro kanallardaki ortalama Nusselt sayıları, standart kanallarinkinden daha düşüktür ve Reynolds sayılarının artışıyla onlar da artmaktadır. Takano, Şekil 5.17' de de gösterildiği gibi iç çapı 52,9 dış çapı 144,7 olan dairesel mikro tüplerin içindeki ısı geçişinin benzer sonuçlarını elde etmiştir [76].



Şekil 5.17. Mikro kanallar için Nusselt sayısı değişimi [23]

5.9. Duvar-Akışkan Birleşik Isı Geçişi Etkisi

Reynolds sayısının düşük olduğu bölgelerde, birleşik ısı geçişinin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkileri hissedilir. Mikro kanalın duvarları boyunca iletimle ısı geçişi çok boyutlu bir eşsıcaklık dağılımı gösterir. Bir mikro kanalın duvarlarıyla akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısının deneysel değerlendirmesi duvarlar için bir iletim modelinin kullanılmasını gerektirir. Çünkü ara yüzde sıcaklığın ve duvardaki ısı akısının yerinde doğrudan ölçülmesi çok zordur. Tipik olarak, Nusselt sayısının deneysel değerleri, duvar ısı akısının üniform olduğunun düşünüldüğü modeller kullanılarak hesaplanır.

Herwig ve Hausner ile Maranzana ve diğerleri, tarafından belirtildiği gibi birleşik ısı geçişi etkileri hâkim olduğunda mikro kanaldaki sıcaklık dağılımı her yerde doğrusal değildir ve mikro kanal boyunca ısı akısı üniform olmaz. Bu nedenle Şekil 5.18, mikro kanal boyunca akışkan sıcaklığının eksensel dağılımının birleşik etkili ve birleşik etkisiz durumlarını göstermektedir. Akışkan sıcaklığının mikro kanalın giriş ve çıkışındaki ortalama değerinin alınmasıyla hesaplanan Nusselt sayısı, gerçek değerinin altında olabilir. Bu, ortalama Nusselt sayısının deneysel değerlerinin teorik olanla özellikle düşük Reynolds sayılarında tam akış için neden uyuşmadığının bir açıklamasıdır. Bu uyuşmazlık, Reynolds sayısı arttığında azalma eğilimindedir, çünkü birleşik ısı geçiş etkileri sınırlıdır. Nusselt sayısının Reynolds sayısına bağıllığı, Reynolds sayısının düşük değerleri için böyle açıklanır. Başka bir deyişle, Maranzana ve diğerleri tarafından da belirtildiği gibi ortalama Nusselt sayısı, mikro kanalın katı duvarlarındaki eksensel iletim nedeniyle laminer rejimde bile Reynolds sayısına bir bağıllık sergileyebilir [95, 96].

Birleşik duvar-akışkan etkileri düşük Reynolds sayıları için önemli olduğundan, bunlar viskoz ısıtma ile ilgili etkilerle doğrudan rekabette değildir. Silikonda eksensel ısı iletiminin önem sınırı, ısı taşınımıyla karşılaştırıldığında aşağıdaki eşitsizlik kullanılabilir [40]:

$$\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right) \left(\frac{D_h}{L} \right) \frac{A_s}{A_f} \frac{1}{\text{Re Pr}} > 0.01 \quad (5.1)$$

Bu eşitsizlikte:

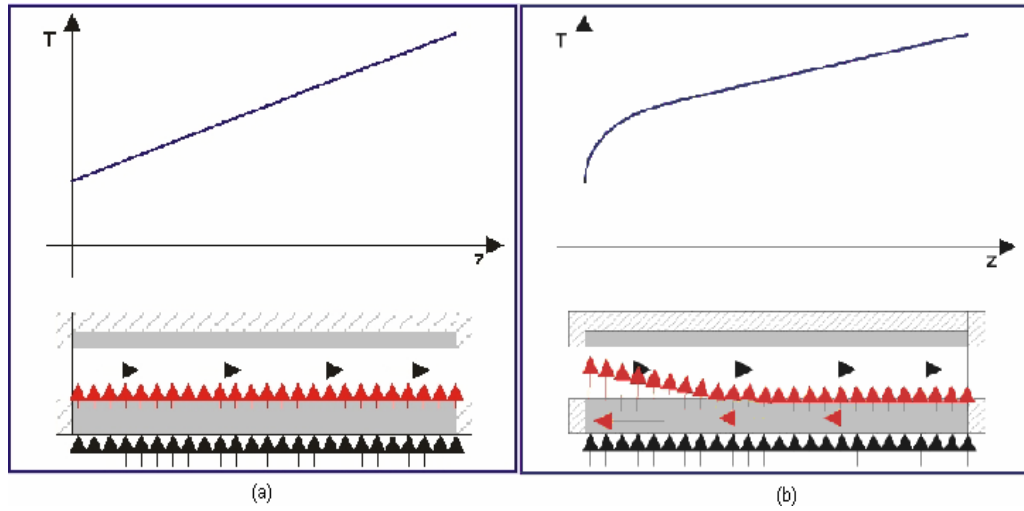
L : Mikro kanalın boyu

D_h : Hidrolik çap

λ_s ve λ_f : Sırasıyla duvarların ve akışkanın ısı iletkenliği

A_s ve A_f : Duvarların ve akışkanın (eksensel iletimle ısı akısına dik) alanları

dır. Ek olarak, mikro kanal duvarlarındaki ısı akısı sabitse, Reynolds sayısının çok küçük değerlerinde mikro kanal boyunca sıcaklık yükselmesi çok büyük olabildiği için termo fiziksel sabit kabul edilemezler. Diğer bir deyişle, özelliklerin sıcaklıkla değişimiyle ilgili etkileri mikro kanallarda genelde birleşik etkilere bağlanır.



Şekil 5.18. Bir mikro kanal boyunca eksensel akış sıcaklığı değişimi; duvar-akışkan birleşik ısı geçişli (a) ve duvar-akışkan birleşik ısı geçişli olmayan (b) [40]

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek yoğunluklu, yüksek güçte ve yüksek hızda çalışan mikro elektronik cihazlar, yüksek oranda ısı giderimine ihtiyaç duyarlar. Elektronik cihazın en uygun şekilde çalıştırılması için, etkili ısı alma metotlarının geliştirilmesi gerekir. Bu metotlardan biri, mikro kanal ısı değiştiricilerinin kullanılmasıdır. Bir mikro kanal ısı değiştiricisi, mikro yapıdaki birçok kanalın bir mikro çipin arkasına yerleştirilmesiyle oluşur. Bu kanallar arasından, enerjiyi taşımak için bir sıvı geçirilir. Küçük ölçekli kanallar üzerinde 1981 yılında elektronik sistemlerin soğutulması amacıyla başlatılan çalışmalar, özellikle minyatür HVAC sistemlerinde kullanılabilecekleri düşünülerek giderek artmıştır.

Karakteristik boyutları 1 μm ' den 1 mm' ye kadar değişen mikro-cihazlar günümüzde teknolojik bir gerçekliktir ve kalp pilinden mürekkep püskürtmeli yazıcılara, mikro pompalar, mikro ısı değiştiricileri gibi mikro-akışkanlı cihazlardan (MFD' ler) otomotiv ve uçak firmalarını içeren mikro elektronik, kimya, ecza, gıda ve tıbbi teknolojiler gibi sanayiler, biyomedikal mühendislik, MEMS ve nano teknoloji gibi alanlar da yaygınlaşmaktadır. Bu tezde, mikro kanallardaki akış için ölçek etkileri ve mikro etkilerin basınç kaybı ve ısı taşınımı üzerine etkileri geniş bir literatür çalışması ile sunulmaktadır.

Mikro kanallar; yüksek ısı akıları, küçük boyutta ve hafif olmaları, çalışma akışkanı miktarının az olması, taşınabilir olmaları, ileride seri üretimleri yapılarak ekonomikliklerinin sağlanabilmesi olasılığı gibi sebeplerden dolayı tercih edilmektedirler. Bu özellikler küçük ölçekli sistemleri çekici kılsa da, bazı sorunlar aradan geçen yıllar içerisinde çözülememiştir. Örneğin; bu kanallarda yüksek ısı akılarını sağlayan çok küçük hidrolik çaplar, aynı zamanda basınç kayıplarının artmasına da yol açmaktadır. Bunun da ötesinde, kanal boyutları küçüldükçe, cidar ve ara yüzey etkilerinin artmasından dolayı, akışın davranışı klasik teoriden

uzaklaşmaktadır. Ancak; bu uzaklaşmanın olduğu boyut henüz kesin olarak saptanamamıştır. Ayrıca; bu konuda, araştırmacılar arasında bir uzlaşma da yoktur.

Akışın görüntülenmesini sağlayan teknikler sayesinde günümüzde akış mekanizmasının daha iyi anlaşılması sağlanmış ve video kayıtlarından geliştirilen akış rejimi haritaları, farklı akış rejimleri arasındaki geçişin mikro kanallarda geleneksel geometrilere olduğundan farklı koşullarda oluştuğunu göstermiştir. Geleneksel ısı taşınım teorileri mikro seviyeli akışla ilgili olguyu açıklamaya yetmemektedir.

Mikro kanallarda ısı geçişi özellikleri geleneksel ebattaki kanalların deney sonuçlarından farklıdır. Mikro kanallardaki akış ve ısı geçişi üzerine yapılan deneylerde kanal boyutları, ortalama pürüzlülük, yerel ısı taşınımı, bir mikro kanal boyunca statik basıncın yerel değeri vb. gibi bazı parametreleri doğru olarak ölçmek zordur. Bu nedenle, yayınlanan kaynaklardaki tutarsızlıklar büyük olasılıkla deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır. Mikro kanallardaki akış türü değişiminin geleneksel kanallarda olması beklenenden daha küçük Reynolds sayılarında meydana geldiği görülmüştür. Mikro kanallarda laminer akış için sürtünme basıncı kaybının klasik teoriden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Mikro kanallarda kanal şekli irdelendiğinde ise soğutma kapasitesi açısından konik kanalların düz kanallardan daha iyi bir performans sağladığı gösterilmiştir.

Bu çalışmada mikro kanallardaki akış ve ısı geçişi üzerine yapılan teorik ve deneysel araştırmalardaki ilerlemeler incelenerek tek-fazlı akış ve iki-fazlı akış üzerine yapılan araştırmalar sunulmuştur. Analitik ve sayısal çözümler, ölçüm metotları ve iyileştirme çalışmaları gözden geçirilmiştir. Mikro kanallarda ısı geçişi üzerine sürmekte olan bazı araştırmalar sunulmuş ve tartışılmış, bunlar; mikro kanalların üçboyutlu sayısal analizlerini, kaynamanın başlaması üzerine akış görselleştirme çalışmalarını, polimer tabanlarda buharlaşma analizlerini ve mikro ısı borusu kanallarının sayısal modellenmesini içermiştir. Bu incelemeye dayanarak, açıktır ki mikro kanallar üzerine deneysel araştırmalar; daha iyi üretim yöntemlerinin, sıcaklık ve basınç sensörlerinin ve veri elde etme yöntemlerinin uygulanması sebebiyle oldukça ilerletilmiştir. Rapor edilen çalışmaların çoğunluğu, kanallarda ve tüplerde

akış ve ısı geçişi için geleneksel çözümlerin ve bağıntıların mikro kanal akış davranışını tahmin etmede oldukça yeterli olduğunu göstermiştir.

Son incelemelerin çoğunluğu; özellikle karmaşık ölçüm tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar, geleneksel teorilerin mikro ölçülerde akış ve ısı geçişini doğru bir şekilde tahmin etme ve açıklamada, en azından belirlenen kanal karakteristik kesit ölçülerinde kullanılabileceği sonucunu desteklemektedir.

KAYNAKLAR

- [1] YANG, C., LI, D., Electrokinetic effects on pressure-driven liquid flows in rectangular microchannels. TSOURIS, C., PORCELLI, J.V., Process intensification – has its time finally come? Chem. Eng. Progr. 2003; 10:50–55.
- [2] KWANG, Z., CHU, H., Flow in a microtube with corrugated wall.
- [3] MALA, G.M., LI, D., Flow characteristics of water in microtubes. CHARPENTIER, J-C., Process intensification by miniaturization. Chem. Eng. Technol. 2005; 28(3):255–258.
- [4] JUDY, J., MAYNES, D., WEBB, B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. SCHUBERT, K., BRANDNER, J., FICHTNER, M, LINDER, G., SCHYGULLA U, WENKA, A., Microstructure devices for applications in thermal and chemical process engineering. Microscale Therm. Eng. 2001; 5:17–39.
- [5] KIM, D.K., KIM, S.J., Averaging approach for microchannel heat sinks subject to the uniform wall temperature condition.
- [6] BAYRAKTAR, T., PIDUGU, S.B., Characterization of liquid flows in microfluidic systems.
- [7] MALE, P.V., Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating.
- [8] ZHU, X., LIAO, Q., Heat transfer for laminar slip flow in a microchannel of arbitrary cross section with complex thermal boundary conditions.
- [9] AL-BAKHIT, H., FAKHERI, A., Numerical simulation of heat transfer in simultaneously developing flows in parallel rectangular ducts.
- [10] JI, Y., YUAN, K., CHUNG, J.N., Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannel.
- [11] LE, M., HASSAN, I., Simulation of heat transfer in high speed microflows.
- [12] STEINKE, M.E., KANDLIKAR, S.G., Single phase liquid friction factors in microchannels.

- [13] SHEN, S., XU, J.L., CHEN, Y., Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface.
- [14] MACINNES, J.M., CHEN, Z., ALLEN, R.W.K., Investigation of alternating flow mixing in microchannels.
- [15] JEN, C.P., Improved design and experimental demonstration of a bi-directional microfluidic driving system.
- [16] MALA, M., LI, D., Flow characteristics of water in microtubes.
- [17] SAITOH, T., SEKINO, A., HIRAIDE, M., Manipulate fluid in microchannels with thermo-responsive film.
- [19] GRAY, B.L., COLLINS, S.D., SMITH, R.L., Interlocking mechanical and fluidic interconnections for microfluidic circuit boards.
- [19] MARINET, F., PERSON, S.L., BEJAN, A., Maximum heat transfer rate density in two-dimensional minichannels and microchannels.
- [20] XU, Q.Y., NAKAJIMA, M., BINKS, B.P., Preparation of particle-stabilized oil-in water emulsions with the microchannel emulsification method.
- [21] NISHIO, S., Single-Phase Laminar-flow heat transfer and two-phase oscillating-flow heat transport in microchannels.
- [22] DESMET, G., BARON, V., Chromatographic explanation for the side-wall induced band broadening in pressure-driven and shear-driven flows through channels with a high aspect-ratio rectangular cross-section.
- [23] GUO, Z.Y., LI, Z.X., Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer.
- [24] YANG, L.J., Buckled-type valves integrated by parylene micro-tubes.
- [25] ASAKO, Y., TORIYAMA, H., Heat transfer characteristics of gaseous flows in microchannels.
- [26] GARIMELLA, S., Condensation flow mechanisms in microchannels: basis for pressure drop and heat transfer models.
- [27] GLOCKNER, P.S., NATERER, G.F., Numerical simulation of electrokinetic flow and heat transfer in microchannels with a finite-volume method.
- [28] PALM, B., Heat transfer in microchannels.

- [29] KOO, J., KLEINSTREUER, C., Analysis of surface roughness effects on heat transfer in micro-conduits.
- [30] PENG, X.F., PETERSON, G.P., Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures.
- [31] MALA, G, LI, D., DALE, J.D., Heat transfer and fluid flow in microchannels.
- [32] QU, W., MALA, G.M., LI, D., Heat transfer for water flow in trapezoidal silicon microchannels.
- [33] WONG, C.C., Investigation of gas flow in long and narrow channels.
- [34] LEE, P.S., Investigation of heat transfer in rectangular microchannels.
- [35] ENGIN, T., GORDANINEJAD, F., EVRENSEL, C., Numerical simulation of laminar flow of water-based magneto-rheological fluids in microtubes with wall roughness effect.
- [36] LELEA D., Some considerations on frictional losses evaluation of a water flow in microtubes.
- [37] SERIZEWA, A., KAWARA, F.Z., Two-phase flow in microchannels.
- [38] Doç.Dr. Fethi HALICI, Uzm. Mehmet GÜNDÜZ, Örneklerle Isı Geçişi, 2001.
- [39] KANDLIKAR, S.G., GRANDE, W.J., Evaluation of single phase flow in microchannels for high heat flux chip cooling-thermohydraulic performance enhancement and fabrication technology, 2004.
- [40] LORENZINI, M., MORINI, G.L., Single-phase fluid flow and heat transfer in microchannels.
- [41] WU, P., LITTLE, W.A., Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thompson refrigerators, 1983.
- [42] BOWERS, M.B., MUDAWAR, I., High flux boiling in low flow rate, low pressure drop mini-channel and micro-channel heat sinks, 1994.
- [43] WANG, B.X., PENG, X.F., Forced convection and boiling characteristics in microchannels, 1998.
- [44] FEDOROV, A.G., VISKANTA, R., Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heat sink for electronic packaging, 2000.

- [45] RICHARDSON, D.H., SEKULIC, D.P., CAMPO, A., Reynolds number flow inside straight micro channels with irregular cross-sections, 2000.
- [46] RYU, J.H., CHOI, D.H., KIM, S.J., Numerical optimization of the thermal performance of a microchannel heat sink, 2002.
- [47] CHOI, H., LEE, D., MAENG, J.S., Computation of slip flow in microchannels using langmuir slip condition, 2003.
- [48] QU, W., MUDAWAR, I., Analysis of three- dimensional heat transfer in micro-channel heat sinks, 2002.
- [49] ZHAO, C.Y., LU, T.J., Analysis of microchannel heat sinks for electronics cooling, 2002.
- [50] TOH, K.C., CHEN, X.Y., CHAI, J.C., Numerical computation of fluid flow and heat transfer in microchannels, 2002.
- [51] VAN MALE, P., DE CROON, M., TIGGELAAR, R.M., VAN DEN BERG, A., SCHOUTEN, J.C., Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating, 2004.
- [52] KOO, J., KLEINSTREUER, C., Analysis of surface roughness effects on heat transfer in micro-conduits, 2005.
- [53] CHEN, Y., CHENG, P., Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets, 2002.
- [54] GARIMELLA, S.V., SINGHAL, V., Single phase flow and heat transport and pumping considerations in microchannel heat sinks, 2004.
- [55] LIU, D., GARIMELLA, S.V., Investigation of liquid flow in microchannels, 2004.
- [56] LEE, P.S., GARIMELLA, S.V., LIU, D., Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, 2005.
- [57] FAVRE MARINET, M., LE PERSON, S., BEJAN, A., Maximum heat transfer rate density in two-dimensional minichannels and microchannels, 2004.
- [58] JUDY, J., MAYNES, D., WEBB, B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels, 2002.
- [59] LELEA, D., NISHIO, S., TAKANO, K., The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water, 2004.
- [60] REN, L., QU, W., LI, D., Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels, 2001.

- [61] JIANG, P.X., FAN, M.H., SI, G.S., REN, Z.P., Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat-exchangers, 2001.
- [62] HRNJAK, P.S., YIN, J.M., BULLARD, C.W., Single phase pressure drop measurements in a microchannel heat exchanger, 2002.
- [63] XU, J.L., GAN, Y.H., ZHANG, D.C., LI, X.H., Microscale heat transfer enhancement using thermal boundary layer redeveloping concept, 2005.
- [64] CELATA, G.P., Single-phase heat transfer and fluid flow in micropipes, 2004.
- [65] EASON, C., DALTON, T., DAVIES, M., O'MATHUNA, C., SLATTERY, O., Direct comparison between five different microchannels, 2005.
- [66] NEWPORT, D., GARVEY, J., DALTON, T., EGAN, V., WHELAN, M., Development of interferometric temperature measurement procedures for microfluid flow, 2004.
- [67] KOCKMANN, N., ENGLER, M., HALLER, D., WOLAS, P., Fluid dynamics and transfer processes in bended microchannels, 2005.
- [68] KANDLIKAR, S.G., GRANDE, W.J., Evaluation of single-phase flow in microchannels for high heat flux chip cooling-thermohydraulic performance enhancement and fabrication technology, 2004.
- [69] NILSON, R.H., GRIFFITHS, S.K., TCHIKANDA, S.W., MARTINEZ, M.J., Axially tapered microchannels of high aspect ratio for evaporative cooling devices, 2004.
- [70] GARIMELLA, S., Condensation flow mechanisms in microchannels: Basis for pressure drop and heat transfer models, 2004.
- [71] GARIMELLA, S., AGARWAL, A., KILLION, J.D., Condensation pressure drop in circular microchannels, 2005.
- [72] MURAKAMI, Y., MIKIC B.B., Parametric investigation of viscous dissipation effects on optimized air cooling microchanneled heat sinks, 2003.
- [73] CHENG, P., WU, H.Y., An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions, 2003.
- [74] YU, S., AMEEL, T.A., Slip-flow heat transfer in rectangular microchannels, 2001.
- [75] PFAHLER, J., HARLEY, H., BAU, H., ZEMEL, J.N., Gas and liquid flow in small channels, ASME, 1991.

- [76] CHOI, S.B., BARRON, R.F., WARRINGTON, R.O., Fluid flow and heat transfer in micro tubes, ASME, 1991.
- [77] HARLEY, J., BAU, H.H., PFAHLER, J., ZEMEL, J.N., Liquid transport in micron and submicron channels, 1990.
- [78] MORINI, G.L., Laminar-to-turbulent flow transition in microchannels, "Microscale Thermophysical Engineering", 2004.
- [79] TUCKERMAN, D.B., PEASE, R.F., High performance heat sinking for VLSI, 1981.
- [80] CHURCHILL, S.W., Friction factor equations spans all fluid flow regimes, 1977.
- [81] SUO, M., GRIFFITH, P., Two phase flow in capillary tubes, 1964.
- [82] GHIAASIAAN, S.M., ABDEL-KHALIK, S.I., Two phase flow in microchannels, 2000.
- [83] TRIPLETT, K.A., GHIAASIAAN, S.M., ABDEL-KHALIK, S.I., SADOWSKI, D.L., Gas liquid two phase flow in microchannels, 1999.
- [84] KARIYASAKI, A., FUKANO, T., KAGAWA, M., Flow patterns and pressure drop in isothermal gas liquid concurrent flow in a horizontal capillary tube, 1989.
- [85] MANDHANE, J.M., GREGORY, G.A., AZIZ, K., A flow pattern map for gas liquid flow in horizontal pipes, 1974.
- [86] DARIN, K., et al., Single phase forced convection heat transfer in microgeometries, 1995.
- [87] MEHENDALE, S.S., JACOBI, A.M., SHAH, R.K., Heat exchangers at micro and meso scales, 1999.
- [88] GAD-EL-HAK, M., The fluid mechanics of microdevices.
- [89] MOODY, L.F., Friction factors for pipe flow, 1944.
- [90] NIKURADSE, J., Strmungsgesetze in rauhen rohren, 1933.
- [91] CELETA, G.P., CUMO, M., GULIELMI, M., ZUMMO, G., Experimental investigation of hydraulic and single phase heat transfer in 0.130 mm capillary tube, 2000.
- [92] www.mmoistanbul.org/yayin/scripts/prodView.asp?idproduct=19 (JACOBI, A.M., Özel Görüşme, 20 Haziran 2000).

- [93] DU, D.X., Effect of compressibility and roughness on flow and heat transfer in microtubes, 2000.
- [94] CELATA, G.P., CUMO, M., GULIELMI, M., ZUMMO, G., Experimental investigation of hydraulic and single phase heat transfer in 0.130 mm capillary tube, 2000.
- [95] HERWIG, H., HAUSNER, O., Critical view on “New Results In Micro-Fluid Mechanics”, 2003.
- [96] MARANZANA, G., PERRY, I., MAILLET, D., Mini and micro channels influence of axial conduction in the walls, 2004.
- [97] COLEMAN, J.W., An experimentally validated model for two phase sudden contraction pressure drop in microchannel tube headers, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Aylin CANAY, 01 Ocak 1981 tarihinde İzmit' te doğdu. Nakliyeci bir baba ve ev hanımı bir annenin ilk çocuğudur. 1982 ve 1990 yıllarında iki erkek kardeşi daha oldu. İlkokulu Tüpraş İlkokulu' nda ve ortaokulu Tüpraş 50. Yıl Lisesi' nde bitirdikten sonra Yarımca Süper Lisesi' ne girmeye hak kazandı ve dört senelik eğitimini başarı ile tamamladı. Okulda, ders başarısı dışında sosyal faaliyetlerde de başarılı oldu. Halkoyunları ve basketbol alanlarındaki faaliyetlerini, okul dışındaki çeşitli yerlerde de sürdürdü. Basketbol lisansı ve halkoyunları eğitmenlik diploması almaya hak kazandı.

Üniversite sınavında, çok istediği bölüm olan Makina Mühendisliği bölümünü kazandı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi' nde üniversite hayatına başladı. Üniversite hayatına, yine aynı okulun Jeofizik Mühendisliği bölümünü kazanan kardeşi ile birlikte devam etti. Dört senelik üniversite eğitimini başarılı ile tamamlayıp 2003 yılında mezun oldu ve o sene yüksek lisans eğitimine başladı. Eğitimine devam ederken 2006 yılı Ocak ayında Adapazarı Şeker Fabrikası' nda işe başladı. 2006 yılı Eylül ayında ise evlendi ve hala Adapazarı Şeker Fabrikası' nda çalışmaktadır.