



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BORU İÇİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI TASARIMLARA SAHİP
KONİK TİP TÜRBÜLATÖRLERİN ISI TRANSFERİNE
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Faruk IŞIK

**Ekim-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BORU İÇİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI TASARIMLARA SAHİP
KONİK TİP TÜRBÜLATÖRLERİN ISI TRANSFERİNE
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Faruk IŞIK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN**

Diğer Jüri Yeleri

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN Doç. Dr. Adem YILMAZ Doç. Dr. Ramazan ŞENER

**Ekim-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Faruk IŞIK tarafından hazırlanan “BORU İÇİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI TASARIMLARA SAHİP KONİK TİP TÜRBÜLATÖRLERİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 04/10/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN

.....

Üye

Doç.Dr. Adem YILMAZ

.....

Üye

Doç.Dr. Ramazan ŞENER

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Faruk IŞIK
Tarih:04.10.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORU İÇİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI TASARIMLARA SAHİP KONİK TİP TÜRBÜLATÖRLERİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Faruk IŞIK

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN

2024, 64 Sayfa

Bu çalışmada, 3 farklı koniklik (30° , 35° ve 40°) açısına sahip konik tip türbülatorlerin boru içerisindeki ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Türbülatorler 3, 6, ve 9 set dizilim olacak şekilde ısı transferi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hava hızları 1-10 m/sn arasında 1 m/sn artırımlar ile deneyler yapılmıştır. Ancak hava hızları salyangoz tipi fanın ürettiği havanın uyguladığı güç ile hava hızının üst sınırı belirlenmiştir. Hava hızının ve türbülator engel sayısının artması ile ΔP artmıştır. Aynı zamanda türbülator üzerindeki delik sayısı arttıkça ΔP de azalma meydana gelmiştir. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir. Sürtünme faktörü üzerine en önemli birincil etki olarak engel sayısıdır. Ardından ikinci en etkili faktör türbülator üzerindeki delik sayısı olarak saptanmıştır. Paralel ve zıt akışta en düşük Nusselt sayısı en az engeli bulunan ve en fazla delik sayısına sahip 3'lü türbülator setlerinde meydana gelmiştir. Türbülator engel sayısının artması ve türbülator üzerindeki delik sayısının azalmasıyla türbülatorler daha yüksek taşınım yaparak Nusselt sayısı yükselmiştir. Koniklik açısı azaldıkça nusselt sayısında her iki akış türünde de (Ters akış-Zıt akış) artış meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düz akış, Isı değiştirici, Türbülator, Zıt akış.

ABSTRACT
MASTER THESIS
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONICAL TYPE
TURBULATIONS WITH DIFFERENT DESIGNS PLACED IN THE PIPE ON
HEAT TRANSFER

Faruk IŞIK

Batman University Graduate Education Institute

Department of Renewable Energy Systems

Advisor: Assist. Dr. Fatih ÖZEN

2024, 64 Pages

In this study, the effect of conical type turbulators with 3 different conical angles (30°, 35°, and 40°) on heat transfer inside the pipe was investigated. Heat transfer experiments were carried out with turbulators arranged in 3, 6 and 9 sets. In addition, experiments were carried out with air velocities between 1-10 m/sec with 1 m/sec increments. However, since a centrifugal air compressor with a fixed application power was used for air velocities, the upper limit of the air velocity was determined by the power applied by the compressor. ΔP increased with the increase in the air velocity and the number of turbulator obstacles. At the same time, ΔP decreased as the number of holes on the turbulator increased. The decrease occurred in the friction factor as the Reynolds number increased. The most important effect on the friction factor was primarily the number of obstacles. Then, the second most effective factor was determined as the number of holes on the turbulator. The lowest Nusselt number in parallel and counterflow occurred in the 3-turbulator sets with the least obstacles and the highest number of holes. As the number of turbulator obstacles increased and the number of holes on the turbulator decreased, turbulators produced higher convection and the Nusselt number increased. As the taper angle decreased, the Nusselt number increased in both countercurrent and direct flows.

Keywords: Counter flow, Heat exchanger, Straight flow, Turbulator.

ÖN SÖZ

Günlük hayatta ısı transferi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Isı transferi konusunun daha iyi anlaşılması ve bu alanda çeşitli bilimsel araştırmaların yapılması ile teknoloji ve verimlilik konularında yüksek öneme sahip ilerleme gerçekleşmektedir. Yaşadığımız dünyadaki fosil kaynakların sınırlı olduğunu göz önüne aldığımızda, verimliliğin arttırılması konusu insanlık için de yüksek öneme sahiptir. Bu çalışmada, boru içerisinde konik tip olarak geliştirdiğimiz türbülatorlerin ısı transferine olan etkilerini incelenmiştir. Çalışma esnasında, deneylerde ve veri programlarının yazılmasında emeği geçen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Faruk IŞIK
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. ISI DEĞİŞTİRİCİLER	12
3.1. Isı ve Isının Ölçülmesi	12
3.2. Isı Aktarma Şekilleri	13
3.2.1. İletim ile ısı transferi	14
3.2.2. Taşınım yolu ile ısı transferi	15
3.2.3. Işınım ile ısı transferi	16
3.3. Isı Değiştirici Çeşitleri	17
3.3.1. Isı transfer şekline göre sınıflandırma	18
3.3.1.1. Akışkanların doğrudan temaslı olduğu ısı değiştiricileri	18
3.3.1.1. Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri	18
3.3.2. Isı geçişi yüzey alanı/ısı geçişi hacmi oranına göre sınıflandırma	19
3.3.2.1. Kompakt olmayan ısı değiştiricileri	19
3.3.2.2. Kompakt ısı değiştiricileri	20
3.3.3. Akışkan adetine göre sınıflandırma	21
3.3.3.1. İki akışkanlı	21
3.3.3.2. Üç akışkanlı	22
3.3.3.3. Çok akışkanlı	22
3.3.4. Isı transfer mekanizmasına göre sınıflama	22
3.3.4.1. İki tarafta da tek fazlı akış	22
3.3.4.2. Bir tarafta tek fazlı diğer tarafta çift fazlı akış	23
3.3.4.3. İki yönlü çift fazlı akış	25
3.3.5. Kontrüksiyon özelliklerine göre sınıflandırma	26
3.3.5.1. Borulu ısı değiştiricileri	26
3.3.5.2. Levhalı ısı değiştiricileri	27
3.3.5.3. Kanatlı yüzeyli ısı değiştiricileri	28
3.3.5.4. Rejeneratif ısı değiştiricileri	29
3.3.6. Akım yönüne göre sınıflama	30
3.3.6.1. Tek geçişli ısı değiştiricileri	30
3.3.6.2. Çok geçişli ısı değiştiricileri	31
4. YÖNTEM	32
4.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	34

4.1.1. Termokupl.....	34
4.1.2. Veri dönüştürücüsü	35
4.1.3. Veri kayıt programı.....	36
4.1.4. Veri kayıt programı.....	38
4.1.5. Fan motoru.....	40
4.1.6. Anemometre.....	41
4.1.7. Buhar kazanı	41
4.1.8. Isı eşanjörü.....	42
4.1.9. Tasarlanan konik tip türbülatorler.....	42
4.1.10. Vidalı mil M8 tij ve türbülatorlerin montajı	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
5.1. Hava Hızının Basınç Kaybı Üzerine Olan Etkisi.....	46
5.2. Reynolds Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkisi.....	47
5.3. Düz (Paralel) Akışta Nu/Re İlişkisi	48
5.4. Ters (Zıt) Akışta Nu/Re İlişkisi	52
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	56
6.1 Sonuçlar	56
6.2 Öneriler.....	57
KAYNAKLAR	59

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. BMP280 tipi basınç sensörü teknik özellikleri	39
Tablo 4.2. OBRA-140-4K-M model fan ve elektrik motorunun teknik özellikleri	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Isı aktarma yöntemleri (Goel, Wang, & Sunden, 2024).....	14
Şekil 3.2. İletim ile ısı transferi (E-OkulTV, 2024).....	15
Şekil 3.3. Doğal ve Zorlanmış Konveksiyon yolu ile ısı transferi (Çengel & Boles, 2017).	16
Şekil 3.4. Elektromanyetik dalga spektrumu (Uddin, 2024).	17
Şekil 3.5. Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı gövde-boru tipi ısı değiştirici (Maxwor, 2024).	19
Şekil 3.6. Hibrit (kuru+sulu) ısı değiştirici (Babcock&Wilcox, 2024).	21
Şekil 3.7. Basit bir kondenser tipi ısı değiştirici (Şimşek ve diğerleri., 2012).	23
Şekil 3.8. Su soğutma kulesi sistemi (DRC Makine).	24
Şekil 3.9. Kapalı çevrim soğutma kulesi sistemi (Bulgurcu & Koçyiğit, 2019).	25
Şekil 3.10. Plakalı ısı değiştirici (Kılıç, 2017).	26
Şekil 3.11. Spiral borulu ısı değiştiriciler (Sandas Makine, 2024).	27
Şekil 3.12. Levha tipi ısı değiştirici (Jeotes, 2024).	28
Şekil 3.13. Kanatlı boru tipi ısı değiştirici (RSR Enerji, 2024).	29
Şekil 3.14. Gaz türbininde atık ısı geri kazanımı çalışma şeması (Art Enerji, 2024)....	30
Şekil 3.15. Paralel ve zıt akışlı ısı değiştiriciler (Çengel & Boles, 2017).	31
Şekil 4.1. Deney sisteminin şematik görünüşü (Düz akış).	32
Şekil 4.2. a-Deney seti, b-Türbülatorlerin yerleşimi.	33
Şekil 4.3. Termokupllar ve deney üzerindeki bağlantıları.....	34
Şekil 4.4. ATmega2560 mikrodnetleyici veri dönüştürücüsü.	35
Şekil 4.5. Deney seti kayıt programı.	35
Şekil 4.6. Deney kayıt programı kayıt örnekleri.	37
Şekil 4.7. BMP280 tipi basınç sensörü ve deney üzerindeki bağlantıları.	38
Şekil 4.8. Basınç sensörlerinin ATmega2560 mikrodnetleyici kartına bağlantısı.....	39
Şekil 4.9. Basınç sensörleri, ATmega2560 mikrodnetleyici ve bilgisayar bağlantısı. .	39
Şekil 4.10. OBRA-140-4K-M model fan ve bağlantısı.	40
Şekil 4.11. Kestrel 2.000 Dijital Anemometre cihazı.....	41
Şekil 4.12. Buhar kazanı.....	42
Şekil 4.14. a-Türbülator tasarımı, kesim için açınım şekli, b-lazer makinesinde kesim görseli.....	43
Şekil 4.15. Türbülatorlerin imalat aşamaları.	44
Şekil 4.13. Deneyde kullanılan ısı eşanjörü iç yapısı görseli.	45
Şekil 4.15. Türbülatorlerin vidalı mil üzerine yerleşim düzeni.....	45
Şekil 5.1. Tüm türbülator tiplerinde hava hızının basınç farkı üzerine olan etkisi.....	46
Şekil 5.3. Düz akışta ve 30° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.	49
Şekil 5.4. Düz akışta ve 35° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.	50
Şekil 5.5. Düz akışta ve 40° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.	51
Şekil 5.6. Zıt akışta ve 30° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.....	52
Şekil 5.7. Zıt akışta ve 35° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.....	53
Şekil 5.8. Zıt akışta ve 40° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔP	: Basınç farkı
$^{\circ}$	: Derece
$^{\circ}C$	: Santigrat derece
$\emptyset$	: Çap
l	: Litre
F	:Fahrenayt
K	:Kelvin
SI	:Uluslararası standart

Kısaltmalar

dB	: Desibel
gr	: Gram
hPa	: Hectopascal
Hz	: Hertz
h	: Saat
Kg	: Kilogram
MPa	: Megapascal
m	: Metre
mA	: Miliamper
Nu	: Nusselt
Re	: Reynolds
Si	: Silisyum
Pa	: Pascal
sn	: Saniye
O	: Oksijen
V	: Volt
W	: Watt
FEM	:Sonlu elemanlar yöntemi
MW	:Mega watt
ANSYS	: Analiz ve simülasyonların yapılabildiği bilgisayar destekli program
CuO	:Bakır dioksit
SiO ₂	:Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	:Alüminyum oksit seramik
TEF	:Isı transfer değeri
PTST	: Gözyaşı damlası biçimli delikleri olan türbülator
STST	:Dairesel biçimli delikleri olan türbülator
Pa	:Paskal, basınç ölçü birimi

1. GİRİŞ

Kömürün keşfi ve yeni çelik üretim metotlarının gelişimi endüstri devriminin oluşmasına sebep olan en önemli etmenlerdendir. Çeliğin kolay ve ucuz bir şekilde üretilmesi, kömür gibi fosil kaynaklı yakıtlar kullanarak ısıtılan su buharının hareket enerjisine dönüşmesi ile mobilite kolaylaşmıştır.

Petrolün sondajı ve petrolden türetilen yakıtlar ile çalışan motorların icadı ile kömüre alternatif bir yakıt ile mobilite geliştirilmiştir. Seri üretim teknolojisinin keşfi ile insanlar motorlu araçlara daha ucuz bir şekilde elde edebilmiştir. Bu sayede, tarım gibi yoğun işgücü gerektiren alanlarda seri üretimin önü açılarak maliyetler düşürülmüştür. Yüksek rezervlere sahip petrol yataklarının keşfi ile akaryakıt fiyatları ucuzlamış ve hemen hemen her alanda içten yanmalı motorların kullanılmaya başlanmasına sebep olmuştur.

Hemen hemen her alanda fosil yakıtlarının kullanılması her ne kadar işgücü, maliyet, mobilite gibi konularda kolaylık olsa da her bir içten yanmalı motorun egzozundan salınan gazlar atmosferi giderek kirletmektedir. Atmosfere salınan zararlı emisyon gazlarından özellikle karbondioksit gazının atmosfer tabakasının üzerinde yer alarak dünyadan geri yansıyan ışınları engellemekte ve dünya tarafında daha fazla soğurulmasına sebep olmaktadır. Geri yansıması gereken ışınların dünyada kalarak sıcaklığın yükselmesine sebep olması sebebiyle küresel ısınma problemi ortaya çıkmıştır.

Küresel ısınma, dünya üzerindeki iklimleri etkileyerek insanoğlunun varlığını tehdit etmektedir. Tarım ürünlerinin iklim değişikliğinden dolayı yetişmemesi, tarım ürünlerine zarar vermesi, kuraklık gibi birçok etmenler kıtlık gibi birçok olaya sebep olmaktadır. Artık, ülkeler karbon emisyonlarının seviyesini azaltılması için çeşitli kanunlar, tüzükler, standartlar ve normlar getirmeye başlamıştır.

Aynı zamanda, fosil yakıt bazlı elektrik üretim tesislerinde enerji üretim veriminin de yüksek tutulması bir diğer araştırma/geliştirme konusudur. Isıl sistemlerde ısı verimin mümkün olduğunca yüksek olması hedeflenen çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Isıl verimin yüksek olması, kullanılan yakıttan tasarruf miktarının artmasıyla karbon emisyonlarının salınımının öncesine göre daha düşük

düzeyde olması sağlamaktadır. Isıl verimin arttırılması için yanma, ısı transferi gibi birçok konuda ar-ge faaliyetleri yapılmaktadır.

Isı transferinin verimliliğinin yüksek olması, sistemin çalışması esnasında oluşacak kayıpların en aza indirilmesi hem maliyet açısından hem üretim verimi açısından hem de emisyonların düşürülmesi açısından büyük öneme sahiptir.

Elde edilen ısı enerjinin transferi verimini arttırmaya yönelik ilgi bir şekilde endüstriyel gelişme ile artış göstermiştir. Enerji kayıplarını azaltmak, atık ısıların değerlendirilmesi ve enerji maliyetini azaltmak ısı transferinin verimini arttırmada endüstrideki ana motivasyon kaynaklarından bazılarıdır.

Diğer bir açıdan bakarsak, enerjinin dünyada giderek artan ihtiyaç haline gelmesi, enerjiye olan talebin artması nedeniyle enerji maliyetlerini arttırmıştır. Ayrıca, hidrokarbon bazlı enerjinin sınırlı olması kaynakların verimli kullanımına sebep olmuştur.

Nükleer santraller, termik santraller hatta bazı jeotermal santraller gibi yüksek kapasiteli enerji üretim tesisleri ısı dönüştürücüleri kullanmaktadır. Isıl dönüştürücülerin verimi elektrik üretimine etki eden en önemli faktörlerden biridir.

Endüstride ısıl dönüşüm sistemi olarak en başta eşanjörler ve türbülatorler kullanılmaktadır. Türbülator ve eşanjörlerin ısı iletim verimini geliştirmek için birçok ar-ge çalışmaları özel şirketler ve üniversiteler tarafından gerçekleştirilmektedir.

Isı transfer verimi yüksek olan eşanjör ve türbülator sistemleri, kendi ar-ge gelişim masrafını ve işletme masraflarını ciddi bir şekilde azaltarak verimliliği arttırmaktadır. Bu nedenle, günümüzde eşanjör ve türbülatorler konuları önemli bir yere sahiptir.

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimi ile elde edilen enerjinin daha az kayıplar ile elde etmek ve iletimini gerçekleştirmek için de enerji verimliliği konusuna literatürde birçok çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları Türbülator ile ısı transfer miktarını arttırmaktır. Türbülator bulunduğu bölgedeki bir yüzey hedefine sürekli bir akışkan yönlendirerek ısı transferi verimini artırmak için kullanılan elemanlardır. Türbülatorler ilk olarak genellikle buhar kazanların verimlerini arttırmak ve yakıt tüketimini azaltmak için kullanımına başlanmıştır. İlk türbülatorler burulmuş borulardan oluşmaktaydı. Günümüzde halen daha yeni tip türbülatorler geliştirmeye devam edilmektedir. Yeni teknolojilerin gelişmesi, farklı mühendislik tasarımları gibi konular türbülator araştırmalarının ilerlemesine sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, bir boru içine yerleştirilen konik ve farklı hava boşluklarına sahip delikli türbülatorlerin ısı transferine olan etkisi deneysel olarak incelenecektir. Verilen havanın farklı açılarda deliklere sahip türbülatorlerden boru iç çeperine çarpması ile ısı transferinin artırılması ve basınç kaybının da fazla etkilenmemesi hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçlar termik santrallerde, nükleer santraller gibi birçok uygulamada verimliliği artırması hedeflenmektedir. Isı transfer verimliliğinin çok az bile artırılması yüksek derecede olumlu çıktılar elde etmemizi sağlayacaktır. Bu sayede, enerji üretim tesislerinin, kalorifer kazanlarının, su ve hava ısıtma sistemlerinin ve atık enerji geri dönüşümü gibi konularda fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Boru içi türbülatorler ile ısı transferinde çeşitli çalışmalar yapılarak ısı transferi artışı gerçekleştirilmiştir. Farklı şekillerde türbülatorlerin ısı transferine olan etkisini incelemişler ve çeşitli basınç düşüşleri gözlemlenmiştir. Aşağıdaki çalışmalar, literatürde karşılaşılan çeşitli problemleri çözmekte ve/veya bu alanda çeşitli gelişmeler gerçekleştirmişlerdir.

Çulcu (Çulcu, 1998), yüksek lisans çalışması kapsamında, araştırmacı boru içerisine parçalı konik halka yüzeyli türbülatorleri yerleştirerek bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, akım ortamına entegre edilen ve boru boyunca konumlandırılan türbülatorlerin ısı transferini artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak, bu olumlu etkinin yanı sıra, basınç kayıplarında da belirgin bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, türbülatorlerin ısı transferine katkıda bulunurken aynı zamanda enerji kaybına neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Durmuş (Durmuş, 1993) doktora çalışması kapsamında, araştırmacı boru girişine yerleştirilen salyangoz şeklinde vortex akış üreticisi kullanarak çeşitli deneyler gerçekleştirmiştir. Deneylerini türbülanslı akış şartlarında yürüten araştırmacı, vortex etkisini sadece boru girişine uygulamıştır. Akışkan boru içerisinde ilerledikçe dönme etkisinin gelişmesine izin verilmiş, bu sayede basınç kayıplarında aşırı artışlar engellenmiştir. Akışkana dönme etkisi uygulandığında, araştırmacı tarafından deneysel olarak tespit edilen bir diğer önemli bulgu ise ısı transferinde belirgin artışlardır. Bu bulgular, salyangoz tipindeki dönmeli akış üreticisinin, akışın termal performansını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Özhan (Özhan, 2012) tarafından yapılan yüksek lisans tezi kapsamında duman borulu kazanlar için farklı tipteki türbülator ek parçaları üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüştür ve bunların kazan verimliliğini önemli ölçüde artırdığını rapor edilmiştir. Bu çalışmalar toplu olarak türbülatorlerin ısı transferini artırma ve çeşitli sistemlerin verimliliğini artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Yakut ve Şahin (Yakut & Sahin, 2004) konvansiyonel pasif yöntem kullanılarak, bir kanaldaki ısı transferini artırmak amacıyla farklı türbülatorlerin yerleştirildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Türbülatorler, akış içinde belirli aralıklarla girdap

oluşturarak ısı transfer oranını artırmaktadır. Deneylerin sonuçlarına göre elde edilen Nusselt, Prandtl ve Reynolds sayıları ile adımların bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. 30 mm adıma sahip türbülatorle ısı transferinin %70-140 aralığında iyileştiği gözlemlenmiştir. Türbülatorlerin girdap oluşturmadaki etkisi, en yüksek değerin 10 mm adımındaki türbülatorle elde edildiği şeklinde belirlenmiştir. 10, 20 ve 30 mm adımlarında aynı Reynolds sayısında meydana gelen en yüksek entropi verimi sırasıyla gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Türbülatorlerin düşük Reynolds sayılarında, yüksek Reynolds sayılarına nazaran daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

Güneş ve diğerleri (Gunes, Manay, Senyigit, & Ozceyhan, 2011) tarafından yapılan sayısal çalışmada, yay biçimindeki tel türbülatorler kullanılarak termal ve ısı transferi göz önüne alınarak üç farklı adımda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, içine türbülator yerleştirilmeyen boş bir boru ile de kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en iyi sonuçlar 19800 Reynolds sayısında, 0.0357 tüp çapı oranı (s/D), 1 adım oranı (P/D), 0.0714 a/D oranında (eşkenar üçgenin kenar uzunluğunun tüp çapına oranı) elde edilmiştir.

Kılıçaslan ve Saraç (Kılıçaslan & Ibrahim Saraç, 1998) tarafından yapılan çalışmada kanal içerisindeki ısı transfer verimini artırmayı ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemek amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, silindirik ve üçgen geometriye sahip iki farklı kanatçık üzerine odaklanılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, en elverişli kanatçığın belirlenmesidir ve bu değerlendirme hem laminar hem de türbülanslı akış şartlarında yapılmıştır. Hem laminar hem de türbülanslı akış şartlarındaki akışın değişimi 250-7000 Reynolds sayısının aralığında incelenmiştir. Sabit yüzey sıcaklığı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, elde edilen sonuçlar silindirik geometriye sahip kanatçığın ısı transfer veriminin daha yüksek gerçekleştiği sonucuna varmıştır.

Behçet ve diğerleri (Behçet, Cumali, & Aydın, 2009) ısı değiştiricisinin giriş kısmına pervane tipinde bir türbülator yerleştirilerek dönme akısını gerçekleştirmek amacıyla yapılan bir çalışmada, ısı ve basınç değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Termodinamik açıdan kazanımı değerlendirmek amacıyla ekserji çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, türbülatorlü borun, türbülatorsüz boruya göre 3 kat daha verimli olduğunu göstermiştir. Ekserji analizi ile iyileştirme yöntemini kullanmanın daha avantajlı olduğunu sonucuna varılmıştır. Böylece dönme akısında daha etkili bir enerji kazancı sağlandığı ortaya çıkmıştır.

Behçet ve diğerleri (Behçet ve diğerleri., 2009) yapmış oldukları bir çalışmada kanatçık ile gerçekleşen değişimlerin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri düz kanatçıklı borulu ısı değiştiricisi kullanarak Fluent programında FEM analizi ile incelenmiştir. Basitlik sağlamak adına Simetrik kanatçıklardan sadece birisi Fluent programında FEM analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ışığında, tüm kanatçıklar için statik basınç değişimi, toplam basınç düşüşü ve ısı transferine olan etkisi karşılaştırılmıştır. Araştırmada, akış yönünde olan kanatçığın ısı transferini arttırdığı gözlenmiştir. Aynı zamanda, kanatçıklar arasındaki mesafe azaldıkça basınç düşüşünün yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Şahin ve diğerleri (Şahin, Dal, & Baysal, 2007) düz plaka şeklinde ve farklı kanat açılı borulu ısı değiştiricilerinde basınç düşüşü ve ısı transferini incelemişlerdir. Model, Gambit yazılımında modellenerek çözüm oluşturulmuştur. Fluent 3 boyutlu tasarımın analizini programında sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Isı transferi ve basınç düşüşü 0° 'den 30° 'ye 5° artırım ile farklı kanat açıları için karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, $\theta = 30^\circ$ de en yüksek verim elde edilmiştir. Her bir kanatçık için en yüksek ısı transfer artışı 1.42 W ve en yüksek güç kaybına bağlı basınç kaybı her dilim için 0.54 mw olduğu sonucuna varılmıştır.

Gao ve Sunden (Gao & Sundén, 2001) farklı üç durumda, içine unsurlar yerleştirilmiş dikdörtgen kesite sahip bir kanalın ısı ve hidrolik performansı incelenmiştir. Hem paralel akış yönünde hem de akışa zıt yönde V-şeklinde iç elemanlar yerleştirilmiştir. Deneyler 1000-6000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık gradyanı dağılımı sıvı kristal tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde sürtünme kaybının boş boru tipine göre daha etkili olduğunu gözlemlenmiştir. En verimli durumun, akış yönünde V-şeklinde olan kanal olduğu görülmüştür. En yüksek ve en düşük sürtünme katsayısı paralel akışta gerçekleşmiştir. Akış yönünde V-şekilli unsurun kullanıldığı durumda ısı transferi veriminin en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Argunhan ve Yıldız (Argunhan & Yildiz, 2006) yapmış oldukları çalışmada dikdörtgen forma ve deliklere sahip türbülatorlerin, basınç değişimi ve ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Deneylerde, iç borunun giriş bölgesine 55° eğim açılı türbülator yerleştirilmiştir. Geliştirilen tasarımların ısı transferi verimini %80 oranında iyileştirdiği bildirilmiştir.

Çeri ve Koca (Çeri & Koca, 2022) çalışmalarında farklı açılara sahip türbülatorlerin gaz yakıtlı kazanlarda ısı transferini artırmak için nasıl kullanılabileceğine odaklanmaktadır. 3 farklı açılı kanatçıklara sahip türbülatorler kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların analizi de bulunmaktadır. Deneyde 15°, 20°, 25° kanatçık açısına sahip türbülatorler kullanılmıştır. En iyi verim kanatçık açısı 25° olan türbülatorde %97.6 olarak elde edilmiştir. Deneysel analizler, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Tavousi ve diğerleri (Tavousi, Perera, Flynn, Hasan, & Rahman, 2024) çalışmalarında çift borulu ısı değiştiricisinde türbülator ve nanoakışkan ekleyerek ısı transfer hızını arttırmayı hedeflemiştir. Çalışmada tek fazlı bir modelde CuO, SiO₂, Al₂O₃ su bazlı nanoakışkanlarla birlikte üçgen, dikdörtgen, trapez ve oval dahil olmak üzere dört tip türbülator tipinin ısı transferi üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Trapez türbülatorlerin diğer türbülator şekillerine göre daha yüksek Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü sergilediğini ortaya çıkarmıştır. Oval türbülatorler ise diğer türbülator şekillerine göre daha iyi bir performans değerlendirme kriteri sergilemiştir. Ayrıca, türbülator genişliği, yüksekliği ve aralığı gibi farklı geometrik parametreleri araştırdı ve türbülator yüksekliğinin ısı transferini arttırmada en önemli etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Türbülatorlü ve türbülatorsüz SiO₂ nanoakışkanı için sırasıyla ısı transfer performansı 1,2 ve 1,9 olmuştur.

Khedher ve diğerleri (Ben Khedher ve diğerleri., 2024) çalışmasında titreşimli, dokunmuş tellerden oluşan bir türbülator kullanmıştır. Bu türbülator, sıvı için önemli bir temas yüzeyi alanı ile hafif bir tasarım sağlayan, iç içe geçmiş metalik tellerden oluşur. Hem laminar hem de türbülanslı akış rejimlerini kapsayan, 1000 ile 8500 arasında değişen Reynolds sayıları için deneyler yapılmıştır. Bulgularda, bu türbülatorün ısı transferini %236'ya kadar önemli ölçüde arttırdığını, ancak basınç düşüşünde yalnızca marjinal bir artışa yol açtığını göstermektedir. Isı transferindeki bu dikkate değer gelişme, basınç düşüşünü kabul edilebilir sınırlar içinde tutarken, 2.45 gibi yüksek bir termal iyileştirme faktörün (TEF) elde edilmişti. Daha da yüksek bir TEF elde etmek için bu çalışma, titreşimli dokuma tel türbülatorün sarmal sarmal tel türbülatorle sinerjik kombinasyonunu araştırıyor. Çapları 0.5 ile 1.5 mm arasında değişen bobinler üzerinde deneyler yapılmaktadır. Her iki türbülatorün aynı anda kullanılması, ısı transfer katsayısında ve basınç düşüşünde sırasıyla %545 ve %320 artışla önemli bir iyileşmeye gerçekleştirmiştir.

Pourahmad ve diğerlerinin (Pourahmad, Pesteei, Ravaei, & Khorasani, 2021) yaptıkları çalışmada çift borulu bir ısı değiştiricinin ısı verimini ve performansını arttırmak için pasif ve aktif yöntemlerin eş zamanlı kullanımı araştırılmıştır. Çift bükümlü bant türbülatorü kullanılarak çalışma sıvısına hava kabarcıkları enjekte edilmiştir. Bu iki proses ile basınç düşüşü ve Nusselt sayısı üzerindeki etkileri eş zamanlı uygulandığında değerlendirmişlerdir. Her iki yöntemin eş zamanlı kullanımının, türbülatorle donatılmış bir ısı değiştirici olan basit borulu ısı değiştiricili durumlarla karşılaştırıldığında Nusselt sayısını %98-114, %3-14 ve %20-39 artırabildiğini göstermiştir. Ayrıca, Nusselt sayısının türbülator oranının azalmasıyla arttığını ve Reynolds sayısının artmasıyla, soğuk su debisi ve kabarcık enjeksiyon debisinin arttığını göstermiştir.

Sun ve diğerleri (Sun ve diğerleri., 2023) çoklu türbülator kullanımının hidrotermal parametreler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda, basınç düşüşü ve ısı transferi üzerindeki etkisini araştırmak için borunun içine çift, üçlü ve dördü türbülatorlerden oluşan üç farklı düzenlemeye sahip şerit veya ip geometrilili bir türbülator yerleştirmişlerdir. Geometrinin ve manyetik türbülator düzeninin hidrotermal parametreler üzerindeki önemli etkisini incelemişlerdir. Deneyler 500 ile 1500 arasındaki Reynolds sayısı aralıklarında laminar akışta gerçekleştirilmiştir. En yüksek ısı transferi ve termal iyileştirme faktörü (TEF), dördü şerit türbülatorde elde ettiğini bildirilmiştir. Bu türbülatorlerden ısı transferi düz boruya göre 3.02 kata kadar daha iyi verim vermiştir. Ayrıca, TEF değeri 2.01'e kadar çıkmıştır.

Wang ve diğerleri (Wang, Hai, Paw, Pasupuleti, & Abdalla, 2023) daha az basınç kaybı sağlayacak şekilde eşmerkezli olarak delinmiş, aerodinamik olarak tasarlanmış yeni bir türbülator formu için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yeni bir delikli gözyaşı damlası biçimli türbülatorün (PTST) hidrotermal parametreler üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Kare, altıgen, sekizgen ve daire delikleri içeren yatay delik geometrisine sahip PTST, sabit duvar sıcaklığına sahip bir bakır borunun içine yerleştirilmiş. Deneylerde hava kütleli debisi 0.044–0.099 kg/s aralığında türbülanslı akış hızları altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en yüksek TEF 1.39 olup 5 mm çapında dairesel delikli PTST'de elde edilmiştir. STST ve PTST'nin mevcut ısı transferleri düz boruya göre %310.1 ve %298 oranında arttığını rapor etmişlerdir.

Ata ve diğerleri (Ata & Acır, 2020) tarafından yapılan bir araştırmada, hava akışkanlı güneş kolektörünün ısı transferine etki eden farklı parametreleri incelenmiş ve

Taguchi yöntemi kullanılarak, bu parametrelerin optimizasyonlarını yapmışlardır. Çalışma kapsamında ayrıca ANOVA analizi yaparak her bir parametrenin etkilerini bulmuşlardır. Yaptıkları araştırma sonucunda, en uygun parametrelerin (maksimum ısı transferi için) Tip-II, $\alpha=25^\circ$ ve $Re=5000$ olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları ANOVA analizi sonucunda, ısı transferini etkileyen en önemli faktörlerin ise sırasıyla %73.77 ile Re , %7.78 ile kollektör eğim açısı ve %18.08 ile kollektör tipi olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, deneysel ve optimizasyon sonuçları karşılaştırdıklarında birbiri ile uyumlu olduklarını görmüşlerdir.

Karagöz ve diğerleri (Karagöz, Çiltaş, Yıldırım, & Erdogan, 2019) tarafından yürütülen bir çalışmada, boru içerisine yerleştirdikleri 3 farklı kanatçık ile ilgili olarak kanatçık açısı ($0^\circ, 45^\circ$ ve 90°), kanatçıklar arası mesafe (101,216,340), ve Reynold (Re) sayısı ile ilgili olarak dokuz farklı türbülator kullanarak sabit ısı akışındaki sürtünme katsayısı (f) ve nusselt sayısı (Nu) değerleri üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda, Re sayısının 6000 ile 18000 değerleri arasında olduğu ve Nu sayısının literatürdeki Nu sonuçları ile uyumlu olduklarını görmüşlerdir. Nu sayılarının büyükten küçüğe doğru sırasıyla 10, 5 ve 3 kanatçıklı türbülatorlerde olduğunu bulmuşlardır. Efektif çapın azalmasına bağlı olarak Nu sayısının arttığını fark etmişlerdir. Yerleştirdikleri türbülatorlerin sürtünme kat sayısını belirgin oranda artırdığını bulmuşlardır. Bu durumu ise Sy 'nin azalmasına ve kanatçık sayısının artışına bağlamışlardır. Ayrıca, boru içerisine koydukları 3 farklı açığa sahip türbülatorün etkisiyle, Re ve Nu değerlerinin önemli oranda arttığını görmüşlerdir.

Turgut (Turgut, 2020) tarafından türbülatorler hakkında yapılan bir araştırmada, eş eksenli olan bir ısı değiştiricisi içine yerleştirilen ve geometrik olarak dairesel kesitli olan türbülatorlerin ısı performans, basınç kaybı ve ısı transferine etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında Re değerini 10000 ile 42000 değerleri arasında sınırlandırmıştır. Farklı sembollerle (A, B ve C) gösterdiği düzenleme durumlarına göre; A düzenleme düzenleme durumunun en optimum, C düzenleme durumun ise en kötü olduğunu belirtmiştir. Nu sayısındaki artışın en optimum duruma göre %460 oranında arttığını ifade etmiştir. Ayrıca, ısı performans faktörünün bütün varyasyonlarda 1'den daha büyük elde edildiğini ifade etmiştir.

Baysal ve diğerleri (Baysal, Solmaz, Özgürkten, & Başeski, 2021) tarafından yapılan bir çalışmada, boru tipinin iç içe olduğu ve zıt akışlı bir türbülatorde, Re sayısının 4000 ile 26000 arasında basınç değişimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, boş, 25, 50, 75 ve 100 mm adım mesafelerinde sabit oranlı bir artışla

türbülantörlü ısı eşanjörü modeli tasarlayarak nümerik akışkanlar dinamiği yazılımında simülasyonlar yapmışlardır. Çalışmada elde edilen sürtünme faktörü korelasyonun literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğunu bulmuşlardır. Re sayısı ile basınç değerleri arasında doğru bir orantı olduğunu ancak sürtünme faktörünün ise ters yönde yani azaldığını bulmuşlardır. Türbülantörlü modellerde, adım mesafesi azalması ve halka tipi türbülantör sayısının artışından Re'nin olumsuz etkilendiğini görmüşlerdir. Ayrıca, türbülantörlü modellerdeki sürtünme kaybının boş boru ile kıyaslandığında daha yüksek değerde olduğunu fark etmişlerdir.

Çıtlak ve diğerleri (Çıtlak, Demirpolat, & Das, 2019) tarafından türbülantörler ile ilgili yapılan bir araştırmada, katı yakıtlı bir kazana ekledikleri 4 (dört) farklı tipteki şerit türbülantörün ısı transferini iyileştirmesi incelenmiştir. Çalışmaları sonucunda, türbülantörsüz kazanlara göre türbülantörlü kazanların ısı transferini %44 ile %84 oranında artırdığını bulmuşlardır. Ayrıca, bu oranlar aralığında basınç kayıplarının meydana geldiğini ifade etmişlerdir. En iyi ısı transferinin, tam boy ve sık kıvrımlı türbülantörlerde olduğunu bulmuşlardır. Oluşturdukları yapay sinir ağıları modellerinin yüksek doğrulukta tahmin edebildiğini ve bu nedenle başarılı bir modelleme yapıldığını belirtmişlerdir.

Turgut (Turgut, 2020) tarafından yapılan bir çalışmada, eş merkezli ve yatay konumlu bir ısı değıştiricisinin iç kısmına monte edilen dairesel kesite sahip türbülantörlerin etkilerini ve enerji kayıpları araştırılmıştır. Çalışması sonucunda, ısı sistemlerin performanslarının değeriendirilmesi ve iyileştirilmelerin yapıla bilinmesi için ekserjiik değeriendirmelerin yapılmasının daha faydalı olacağı belirtilmiştir. Re sayısının artışına bağılı olarak entropi üretim oranının da arttığı ve bu artış oranlarının 2.73 ve 1.84 aralığında olduğunu bulmuşlardır. NTU artışına bağılı olarak etkinlik değerilerinde de artışlar olduğunu görmüşlerdir. En yüksek ve en düşük NTU değeriilerinin ise sırasıyla 0.4516 ve 4200 olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca, ekserji kayıplarının yaklaşık olarak %20 ile %42 aralığında olduğunu bulmuşlardır.

Çelik ve diğerlerinin (Çelik, Uçar, & Erbay, 2019) yaptığı araştırmada, hermetik bir şofbene monte edilen ve bakır malzemesinden imal edilen kanatlı gövdenin, akışkanın sistemin terk etme hızına, ısı transferine, sıcaklık ve basınç dağılımına olan etkileri CFD yazılımı ile analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda, türbülantörsüz durumlarda, su çıkış hızlarının %1.3 oranında, basınç farkının ise %7 civarında değışim gösterdiğini bulmuşlardır. Türbülantörlü durumlarda ise, basınç kaybı değeriinin %34

civarında olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, 1 m/s hızla şebekede dolaşan suyun olumlu etkisiyle, şofbeninin ilave pompaya gereksinim duymadığını anlamışlardır.

Kurtbaş ve diğerleri (Kurtbaş, Gülçimen, Durmuş, & Durmuş, 2002) tarafından yapılan bir çalışmada, dış yüzeyi buhar ile ısıtılan tüpün, sabit cidar sıcaklığında, ısı transferini artırmak amacıyla kullanılan kesik koni şeklindeki türbülatorlerin etkilerini araştırmışlardır. Akışkan olarak havanın kullanıldığı çalışmada, kesik konik tipli türbülatorlerin ısı transferi yönünden daha iyi olduğunu ancak, yüksek basınç düşüşlerine neden olduğunu görmüşlerdir. Yüksek koniklik açısının daha olumsuz etkileri olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, 20°'lik açının en optimum olduğunu ve ısı transferi ve basınç kaybı üzerinde daha az olumsuz etkileri olduğunu bulmuşlardır.

Sungur ve diğerleri (Sungur & Topaloğlu, 2018) tarafından yürütülen nümerik bir çalışmada, ısınma amacıyla kullanılan bir duman borulu kazanın içine 1, 2, 3, 4, 7 ve 13 türbülatorler eklenerek, 3 ayrı hızdaki etkiler incelenmiştir. Araştırma sonucunda, türbülator sayısının artışına bağlı olarak boru içerisindeki girdapların sayısının arttığını ancak, belirli bir sayıdan sonra ise düşme eğilimine girdiğini bulmuşlardır. Nu sayısındaki değişimin (iyileşmenin) %5-15 aralığında ve 7 ile 13 türbülatorlü durumlarda olduğunu belirtmişlerdir. Isı transferi yönünden en iyi durumun ise 13 türbülator kullanımında olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, üç türbülator ve sonsuz türbülatorün basınç kayıplarını aynı miktarda değiştirdiğini bulmuşlardır.

Boran ve diğerleri (Boran, Daştan, Şahin, & Aktaş, 2014) tarafından, türbülatorler ile ilgili olarak yapılan deneysel bir diğer araştırmada, içe içe geçmiş boru tipi ısı değiştiriciler tasarlanarak, ısı değişimleri incelenmiştir. Zıt yönlü akışlar ile yaptıkları çalışmada, ısı transferinin arttığını bulmuşlardır. Nu sayılarının, teorik araştırmalara göre orta değerde olduğu ve böylece elde edilen sonuçların olumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, dar ölçekteki türbülerin, geniş ölçülü türbülatorlere göre daha yüksek değerde ısı transferi sağladığını fark etmişlerdir. Dar kesitli türbülatorler sayesinde türbülansların arttığını ve bu nedenle ısı geçişinin olumlu etkilendiğini bulmuşlardır. Üstelik, elde edilen deneysel sonuçların literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Diğer yandan, elde edilen Nu sayısı ile sürtünme faktöründe karşılaştırmalar yapıldığında uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

3. ISI DEĞİŞTİRİCİLER

Isının sistemler arasındaki değişimi, diğer bir deyişle ısı transferi, farklı mühendislik tasarımlarının gerektirdiği özelliklerden dolayı ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, farklı tür ve yapıdaki ısı transfer uygulamaları geliştirilmiştir (Liu ve diğerleri., 2024).

Isı değiştiriciler, bir ortamdan diğer bir ortama ısı transferini gerçekleştiren ve ısı transfer sistemlerinde en fazla kullanılan elemanlardır. İki veya daha fazla akışkanın karışmamaları için tasarlanan, sahip olduğu farklı sıcaklıklarının ısı değişimini mümkün kılan cihazlara ısı değiştiriciler veya eşanjörler denir (Negeed, Alhazmy, Abulkhair, Attar, & Hedia, 2023). Mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bu durum uygulamada nükleer santrallerde, termik santrallerinde, evlerdeki ısıtma ve havalandırma sistemlerinde, fabrikalarda güç üretiminde, kimyasal işlemlerde, araçlarda ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gibi hayatın birçok alanında bulunurlar (Liaw, Kurnia, & Sasmito, 2024).

3.1. Isı ve Isının Ölçülmesi

Isı, belirli sıcaklıktaki bir maddeden, daha düşük bir sıcaklıktaki bir maddeye, sıcaklık farkı sebebiyle aktarılan enerjiye denir. Isının ölçülebilen değerine sıcaklık denir. Yani ölçülen maddenin sıcaklığıdır. Bu nedenle sıcaklık maddenin molekül yapısına bağlıdır. Sıcaklık, bir nesnenin veya bir ortamın ısı enerjisi düzeyini ifade eden bir ölçüdür. Genellikle termometreler aracılığıyla ölçülür Celsius (°C) veya Fahrenheit (°F) gibi birimlerle ifade edilir. Sıcaklık atomların titreşiminin bir ölçüsüdür. Bir nesnenin sıcaklığı, iç enerji düzeyiyle ilişkilidir ve bu nedenle bir nesnenin sıcaklığı arttıkça moleküllerin ortalama kinetik enerjisi de artar. Sıcaklık, fiziksel ve kimyasal olayların gerçekleşme hızını, maddenin halini ve birçok diğer fiziksel özelliği etkileyen önemli bir faktördür. Isıyı enerji birimleri ile yani joule ve kalori ile ifade ederken,

sıcaklığı °C (Celsius-santigrat derece), K (Kelvin) ve °F (Fahrenheit) ile ifade ederiz (Granger, 1994).

Maddenin öz ısısı yani ısınma ısısı o maddenin bir gram kütlesinin sıcaklığını 1 santigrat derece değiştirmek amacıyla o maddeye aktarılması gereken ya da ondan alınması gereken ısı miktarına denir. Uluslararası birim sisteminde (SI) ise maddenin öz ısısı o maddenin 1 kilogram kütlesinin sıcaklığını 1 Kelvin (°K) değiştirmek için ihtiyaç duyulan ısıya denir ve “°C” ile ifade edilir (Haile & O’Connell, 2005).

m gram kütleli bir maddenin sıcaklığını Δt °C (t_2-t_1) kadar değiştirmek için ihtiyaç duyulan ısı miktarı (Q) aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanır.

$$Q = m.c.\Delta t \quad (1)$$

Burada;

Q : Sistem için ihtiyaç duyulan ısı miktarı

m : Kütle

Δt : İlk ve son sıcaklık farkı (t_2-t_1)

c :Maddenin öz ısısı,

Isı transferinde her zaman alınan ısı miktarı ile verilen ısı miktarı eşit kabul edilir yani Q (alınan) = Q (verilen) prensibi kullanılır (Çengel & Boles, 2017)

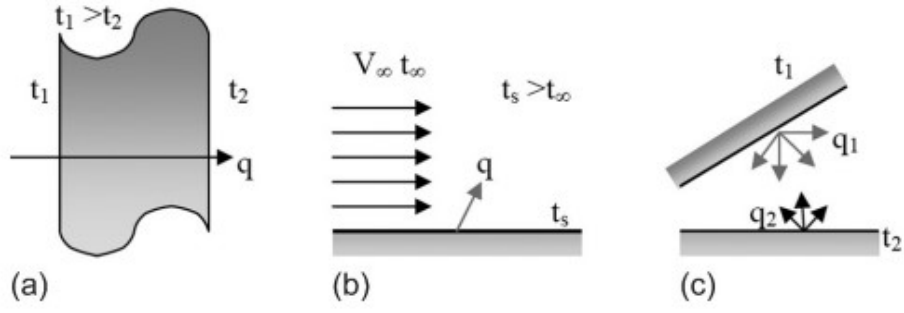
3.2. Isı Aktarma Şekilleri

Isı, maddenin tüm hâllerinde var olan bir enerji çeşididir. Evrenin her yerinde var olan tüm maddelerde bulunan bu ısı diğer enerji tiplerinde olduğu gibi bir yerden başka yerlere iletilmesi mümkündür. Şekil 3.1’de gösterildiği üzere ısı transferi üç yolla gerçekleşir (Khachan, 2018).

a-İletim ile ısı transferi

b-Taşınım ile ısı transferi

c-Işınım ile ısı transferi



Şekil 3.1. Isı aktarma yöntemleri (Goel, Wang, & Sunden, 2024)

3.2.1. İletim ile ısı transferi

Isı iletimi mekanizması, enerjinin durgun haldeki katı cisimler ve akışkanların (sıvılar ve gazlar) içindeki moleküler hareket ve metallerdeki elektron hareketi ile taşındığı bir süreçtir. Bu transfer, daha yüksek sıcaklıktaki bir madde ile daha düşük sıcaklıktaki bir madde arasında gerçekleşir (Şekil 3.2). Temas yoluyla enerji, daha yüksek sıcaklıktaki maddenin molekülleri daha düşük sıcaklıktaki maddenin moleküllerine çarpışarak aktarılır. İyi ısı iletkeni olan maddeler, özellikle metaller, genellikle hızlı bir şekilde ısıyı iletirlerken, kötü ısı iletkenleri, örneğin hava veya plastik gibi izolatörler, ısıyı daha yavaş iletirler. Bu nedenle, bir metal çubuğun bir ucuna ısı uygulandığında, diğer uç hızla ısınır çünkü ısı kolayca metalin içinden geçer. Ancak aynı ısıyı plastik bir çubukta iletirmek daha uzun sürebilir çünkü plastik, metal kadar iyi bir ısı iletkeni değildir. Bu nedenle, kondüksiyon yoluyla ısı transferi, maddenin özelliklerine, kalınlığına ve sıcaklık farkına bağlı olarak değişir. İletim de aynı zamanda sıcaklıktaki farktan kaynaklanan ısı transferi türlerinden biridir. Ancak iletim, bir maddenin içinde veya aralarında doğrudan temas olmadan gerçekleşir. Örneğin, bir metal çubuğun bir ucuna ateş tuttuğunuzda, çubuğun diğer ucunda da ısının yayılmasını gözlemleyebilirsiniz. Bu ısı transferi, metalin içindeki moleküller arasında gerçekleşir. Bu iki yöntem arasındaki temel fark, kondüksiyonun doğrudan temas gerektirmesi ve iletimin temas olmaksızın gerçekleşmesidir (Goel et al., 2024).

İletim yoluyla ısı iletim hızını etkileyen çeşitli faktörler vardır:

1-Malzeme Özellikleri: Malzemenin ısı iletkenliği, kondüksiyon hızını büyük ölçüde etkiler. İyi ısı iletkeni olan malzemeler, ısıyı daha hızlı iletir. Örneğin, metaller iyi iletkenlerdir, bu nedenle metalik yapıdaki nesneler ısıyı hızla iletir.

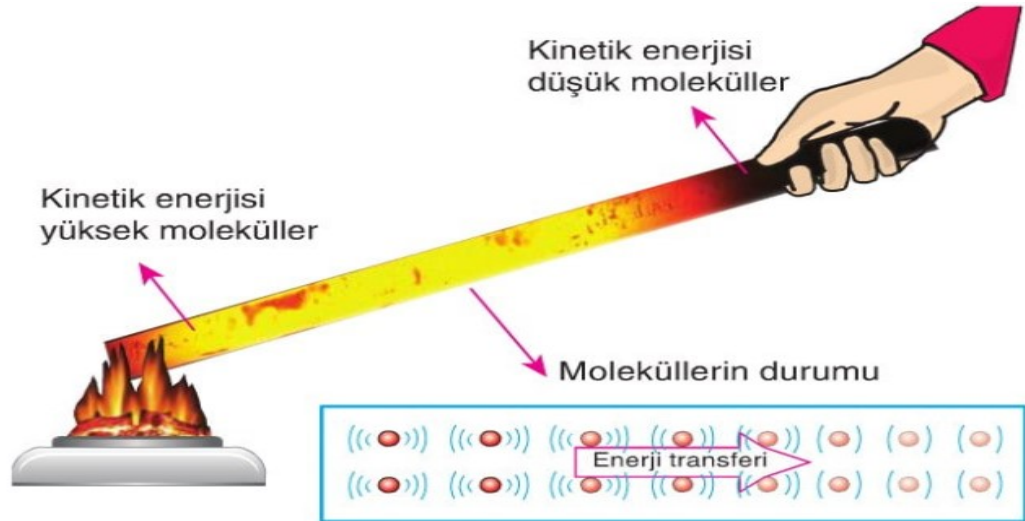
Ancak kötü ısı iletkenleri, örneğin hava veya yalıtkan malzemeler, ısıyı daha yavaş iletecektir (Altun & Gürkan, 2009).

2-Yüzey Alanı ve Kalınlık: İletim alanı ne kadar büyükse, ısı transferi o kadar hızlı olur. Benzer şekilde, ısı transferi kalınlıkla ters orantılıdır; yani, kalınlık arttıkça ısı transferi azalır. Bu nedenle, ince malzemeler daha hızlı ısı transfer ederken, kalın malzemeler daha yavaş ısı transfer eder (İşiker & Yeşilata, 2017).

3-Sıcaklık Farkı: Isı transferi genellikle sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Sıcaklık farkı ne kadar fazla ise, ısı transferi de o kadar çabuk gerçekleşir. Bu nedenle, yüksek sıcaklık farkları daha hızlı ısı transferine neden olur (Altun & Böke, 2009).

4-Malzeme Yoğunluğu: Malzemenin yoğunluğu, moleküler yapıyı etkiler ve dolayısıyla ısı iletimini etkiler. Genel olarak, yoğun malzemeler daha fazla molekül içerir ve bu da daha hızlı bir ısı transferine neden olabilir.

5-Termal Kütlenin Varlığı: Malzeme içindeki termal kütlenin varlığı, ısıyı depolama ve taşıma kapasitesini etkiler. Yüksek termal kütleyle sahip malzemeler, daha fazla ısıyı depolayabilir ve taşıyabilir, bu da ısı transferini etkileyebilir (Çengel & Boles, 2017).



Şekil 3.2. İletim ile ısı transferi (E-OkulTV, 2024).

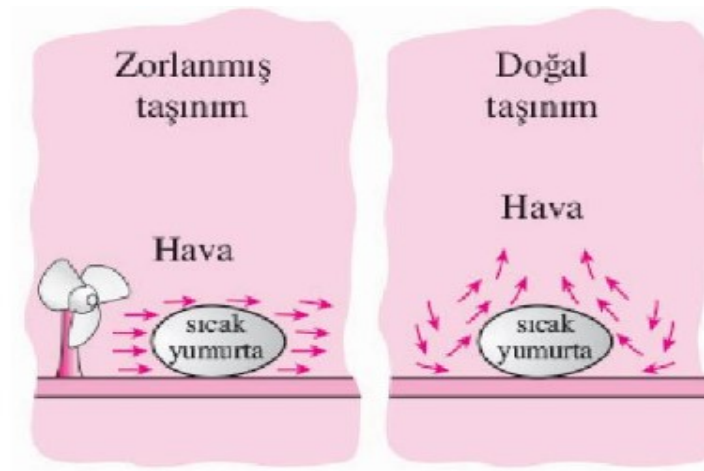
3.2.2. Taşınım yolu ile ısı transferi

Taşınım, ısı transferinin bir diğer önemli mekanizmasıdır ve bu mekanizmada ısı, bir akışkanın (genellikle sıvı veya gazın) kütsel hareketiyle taşınır (Şekil 3.3). Bu süreç genellikle sıvıların veya gazların ısınmasıyla başlar. Isılan bu akışkan,

yoğunluğunu azaltır ve dolayısıyla yükselir. Soğuyan bir akışkan ise yoğunluğu artar ve aşağı doğru iner. Bu hareket, sıcak ve soğuk bölgeler arasında bir dolaşım oluşturur ve böylece ısı transferi gerçekleşir. Konveksiyon, doğal (serbest) veya zorlanmış olabilir (Lawton & Klingenberg, 1996).

Doğal taşınım: Sıcak bir akışkanın kendi yoğunluğunun azalmasıyla yükselmesi ve soğuk bir akışkanın aşağı doğru inmesiyle oluşur. Örneğin, bir tenceredeki suyun ısıtılması sonucunda oluşan sirkülasyon doğal konveksiyona bir örnektir.

Zorlanmış taşınım: Bir dış etki tarafından uyarılan akışkan hareketidir. Örneğin, bir vantilatörün hava üflemesiyle odanın havasının dolaşması, zorlanmış konveksiyona bir örnektir.



Şekil 3.3. Doğal ve Zorlanmış Konveksiyon yolu ile ısı transferi (Çengel & Boles, 2017).

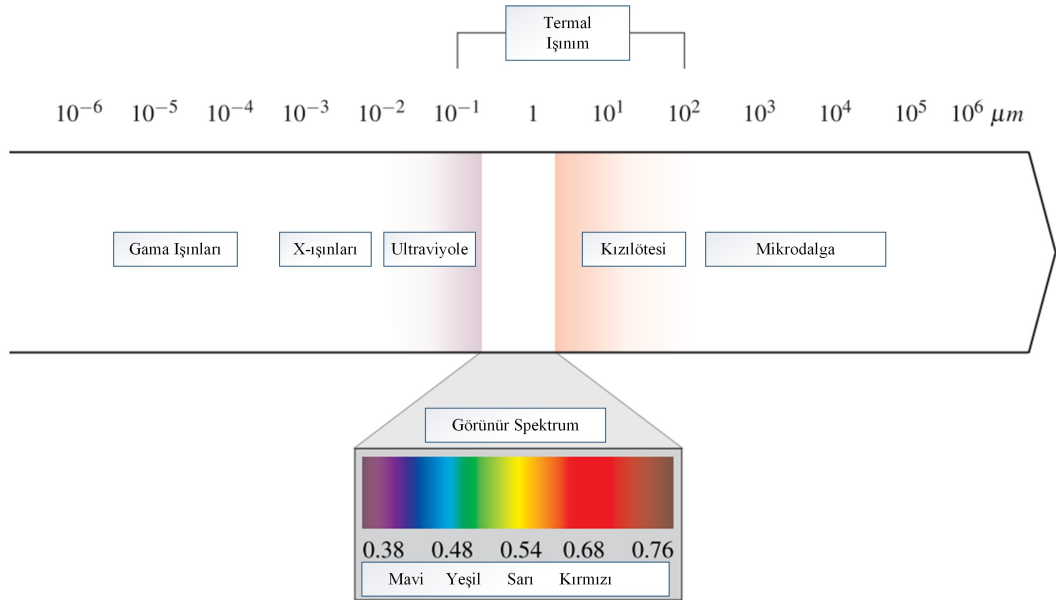
Taşınım, ısı transferinde önemli bir rol oynar, özellikle doğal olaylar ve birçok endüstriyel süreç için önemlidir. Atmosferdeki hava hareketleri, okyanus akıntıları ve birçok meteorolojik olay, doğal konveksiyonun bir sonucudur. Ayrıca, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri gibi birçok uygulamada konveksiyon prensipleri kullanılır (Demir, 2023).

3.2.3. Işınım ile ısı transferi

Radyasyon, ısı transferinin üç temel yolundan biridir. Radyasyon, bir cismin yaydığı elektromanyetik dalgaların ve/veya fotonların taşıdığı enerjidir. Uzayda sıcak bir cisim her yöne radyasyon yoluyla enerji yayar. Yayılan bu elektromanyetik enerji şeffaf bir cisme çarpması ile bir cisimden diğerine radyasyon ile ısı taşınımı gerçekleşir. Işınımın yansıdığı maddenin soğurma kapasitesine bağlı olarak radyasyonla iletilen

enerjinin verimi değişir. Radyasyona verilebilecek en açık örnek güneşten dünyaya ışı nım (radyasyon) yoluyla yapılan enerji aktarımıdır (Onur, 2023).

Bu dalgalar genellikle görünür ışı k, kızılötesi ışı nlar ve diğer elektromanyetik alanının belli bölgelerinde bulunur. şekil 3.4'te Elektromanyetik dalga spektrumu gösterilmektedir. Radyasyon ısı transferi, bir maddenin moleküllerinin hareketi veya teması olmadan gerçekleşir. Bu nedenle, boşlukta bile radyasyon ile ısı transferi mümkündür. Güneş ışı ğının Dünya'ya ulaşması ve bir odanın ısıtılması gibi birçok doğal olayda radyasyon etkilidir. Bir nesne, radyasyon yoluyla ısı enerjisi yayarak veya emerek diğer nesnelerden ısı alabilir veya verebilir. Örneğin, güneş ışı ğı bir duvarı ısıtabilir veya bir ocakta ısıtılmış bir tencerenin ışı ması da bir tür radyasyon ısı transferidir. Başka bir örnek ise, bir sobanın yaydığı kızılötesi ışı nlar, bir odayı ısıtmak için mobilya veya duvarlar tarafından emilir (Uddin, 2024).



şekil 3.4. Elektromanyetik dalga spektrumu (Uddin, 2024).

3.3. Isı Değiştirici Çeşitleri

Isı değiştirici, bir ortamdan (genellikle sıvı veya gaz) ısıyı alıp, başka bir ortama aktaran veya bir ortamın sıcaklığını değiştiren bir cihaz veya sistemdir. Isı değiştiriciler, çeşitli endüstriyel, ticari ve ev kullanımlarında yaygın olarak kullanılır. Örneğin, ev ısıtma ve soğutma sistemlerinde, buhar üretiminde, kimyasal işlemlerde ve endüstriyel proseslerde ısı değiştiricileri sıklıkla kullanılır. Isı değiştiricileri, ısıyı verimli bir şekilde transfer etmek için genellikle borular, plakalar veya diğer ısı geçirgen yüzeylerden oluşur.

Isı değiştiricileri, mühendislik uygulamalarında karşımıza çok çıkan, farklı sıcaklıktaki iki veya daha fazla akışkanının ısı geçişini sağlayan cihazlardır. Kullanım amaçlarına göre ısı değiştiricileri değişik kapasitelerde, boyutlarda ve tiplerde olabilmektedirler.

3.3.1. Isı transfer şekline göre sınıflandırma

Isı değiştiricilerde akışkan doğrudan temaslı ve doğrudan temaslı olmayan ısı değiştiricileri olarak iki şekilde ısı transferi gerçekleşir (Göçücü, 2020).

3.3.1.1. Akışkanların doğrudan temaslı olduğu ısı değiştiricileri

Doğrudan temaslı ısı değiştiricileri, bir akışkanın (genellikle bir sıvı veya gaz) ısı transferini, bir başka akışkanla (genellikle bir sıvı veya gaz) doğrudan temas halinde olacak şekilde gerçekleştirir. Bu, ısıyı iletken veya konveksiyonel olarak aktaran ara yüzeylerin bulunmadığı anlamına gelir. Bu tür ısı değiştiricileri, daha hızlı ve daha verimli ısı transferi sağlayabilir (Demir, 2023).

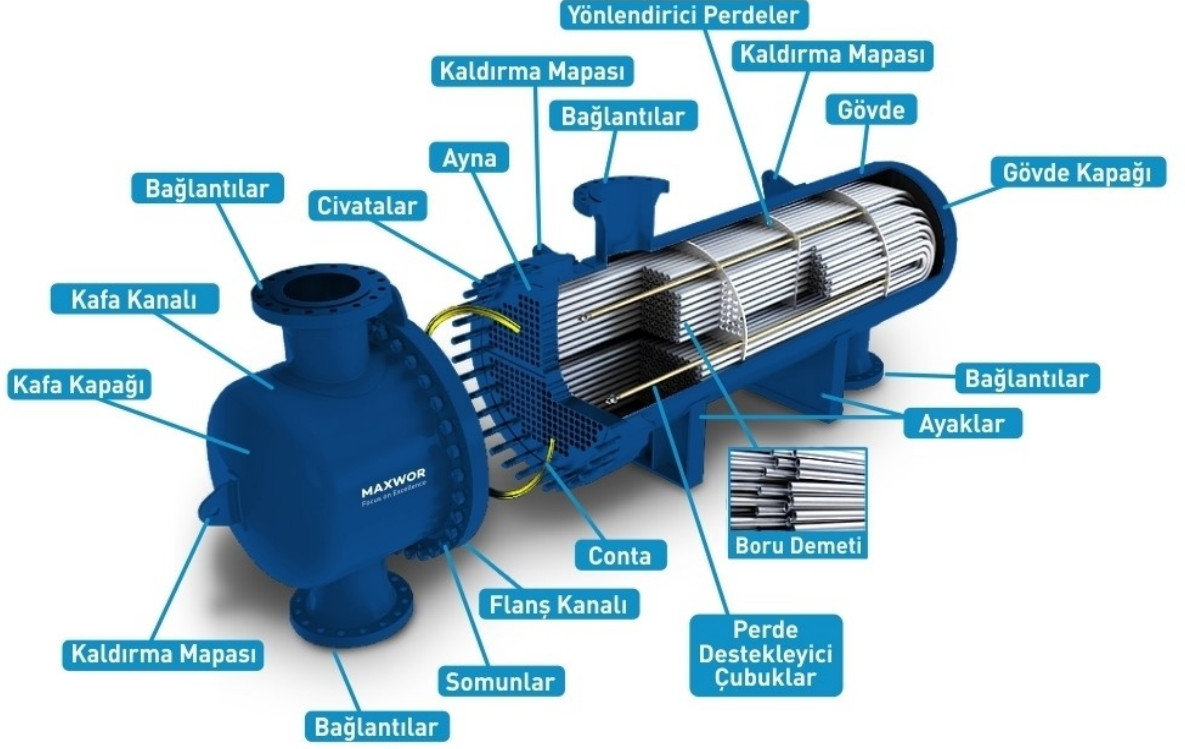
Örneğin, bir sıvının ısıtılması için buharın kullanıldığı bir buharlaştırıcı düşünelim. Bu buhar, bir boru içinden geçerek bir sıvıyı ısıtır. Bu sıvı, buharla doğrudan temas halinde olduğu için ısı transferi çok hızlı gerçekleşir. Benzer şekilde, soğutma için de benzer bir düzenek düşünülebilir, ancak bu sefer soğutucu sıvı bir gaz veya sıvı olabilir. Bu tür sistemler, iklimlendirme sistemlerinde çok kullanılır.

3.3.1.1. Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri

Doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri, iki akışkan arasındaki ısı transferini gerçekleştirmek için ara yüzeyler veya duvarlar kullanır. Bu ara yüzeyler, genellikle metal veya plastik gibi ısıyı iyi iletken malzemelerden yapılır. İki akışkan arasında fiziksel bir temas olmaksızın, ısı transferi bu duvarlar aracılığıyla gerçekleşir. şekil 3.5'te akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı bir gövde-boru tipi ısı değiştirici gösterilmektedir

Birincil akışkan, ısıyı taşıyan bir sıvı veya gaz olabilir ve ikincil akışkan genellikle ısı transferini alan veya veren bir süreçte kullanılan bir diğer akışkan olabilir.

Örneğin, bir buhar kazanında, kazanın içindeki su buharı, kazanın duvarlarına temas eder ve bu duvarlar aracılığıyla suya ısı aktarır (Maxwor, 2024).



Şekil 3.5. Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı gövde-boru tipi ısı değiştirici (Maxwor, 2024).

3.3.2. Isı geçişi yüzey alanı/ısı geçişi hacmi oranına göre sınıflandırma

Isı geçişi yüzeyinin ısı geçişi hacmine oranına göre yapılan sınıflandırma, ısı transferi sistemlerinin tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir kavramdır. Bu sınıflandırma, ısı transferi yüzeyinin büyüklüğü ile içinde bulunduğu akışkan hacminin oranını belirler. Bu oran, ısı transferinin etkinliğini ve verimini etkiler. Isı transferi yüzeyinin ve hacminin doğru oranı, verimli bir ısı transferi sağlamak için önemlidir. Örneğin, düzgün yüzeylerde yüksek ısı transferi yüzey alanına bağlı olarak sağlanırken, borulu yüzeylerde hem yüzey alanı hem de akışkan hacmi göz önünde bulundurulmalıdır.

3.3.2.1. Kompakt olmayan ısı değiştiricileri

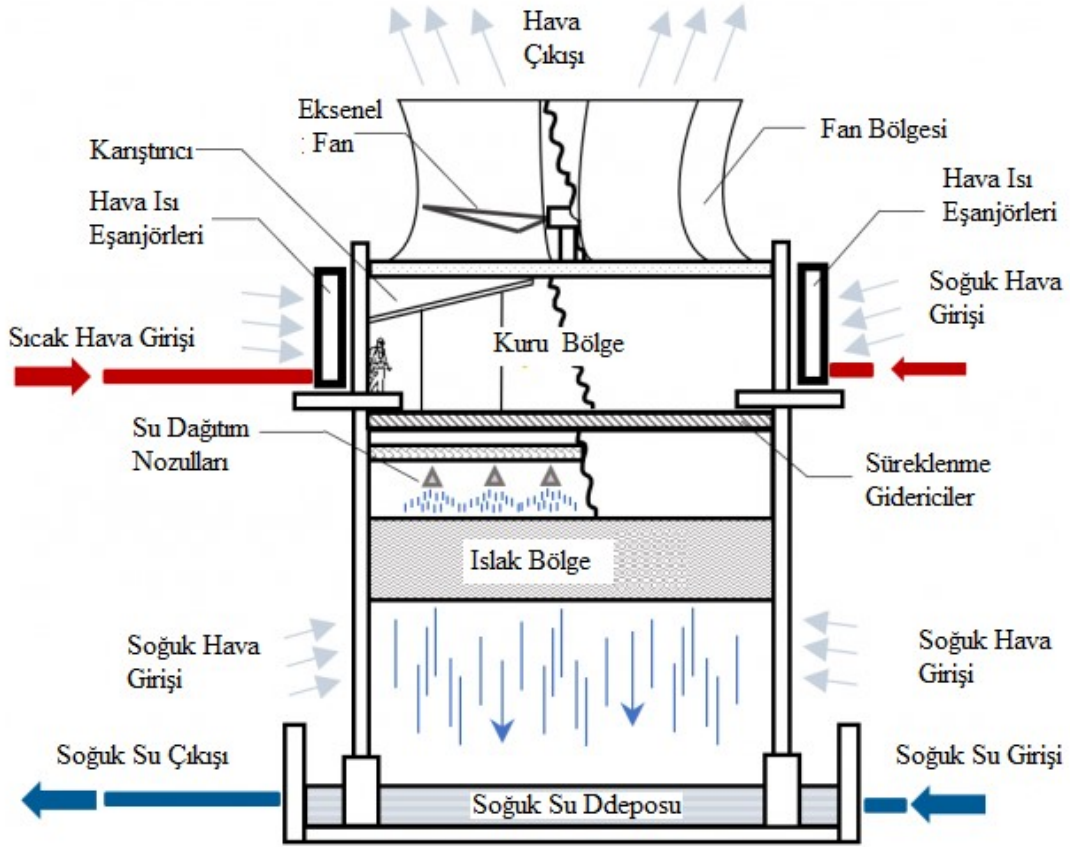
Kompakt olmayan ısı değiştiricileri, genellikle büyük hacimli sistemlerde kullanılan ve büyük ısı transfer yüzeyine sahip olan ısı değiştiricileridir. Bunlar,

kompakt tasarımı olmayan, dolayısıyla daha büyük boyutlara ve daha fazla miktarda soğutucu akışkanın kullanılmasına izin veren cihazlardır. Kompakt olmayan ısı değiştiricileri genellikle endüstriyel tesislerde, enerji santrallerinde, kimyasal işlemlerde ve büyük ölçekli iklimlendirme sistemlerinde kullanılır. Bunlar, büyük miktarlarda ısı transferi gerektiren uygulamalarda tercih edilir ve genellikle yüksek verimlilik sağlarlar. Bununla birlikte, daha büyük boyutları nedeniyle yerleşim ve kurulum açısından daha fazla alan gerektirebilirler.

3.3.2.2. Kompakt ısı değiştiricileri

Kompakt ısı değiştiricileri, yüksek verimlilik ve düşük yer ihtiyacı sağlayan modern ısı transferi sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Bunlar, genellikle sıvı-sıvı veya gaz-sıvı ısı transferi için kullanılan, kompakt bir yapıya sahip olan cihazlardır (Kilinç & Uygun, 2022). Kompakt tasarımı, daha fazla ısı transfer yüzeyinin küçük bir alana sıkıştırılmasını sağlar. Kompakt ısı değiştiricileri, plaka tipi, boru tipi veya hibrit yapıda olabilir. Şekil 3.6'da Hibrit (kuru+sulu) ısı değiştirici gösterilmektedir. Bu tür ısı değiştiricilerinin avantajları arasında daha küçük yer ihtiyacı, yüksek verimlilik, daha düşük enerji tüketimi ve kolay bakım sayılabilir (Babcock&Wilcox, 2024).

Plaka tipi ısı değiştiricileri ile çeşitli hibrit sistemler yapılabilmektedir. Plaka tipi ısı değiştiricileri, paralel akışkan kanalları arasında yerleştirilmiş plakalar kullanarak yüksek ısı transfer katsayısı sağlar. Boru tipi ısı değiştiricileri ise borular arasında ısı transferi gerçekleştirir ve genellikle yoğunlaştırma veya buharlaştırma işlemlerinde kullanılır.



Şekil 3.6. Hibrit (kuru+sulu) ısı değıştirici (Babcock&Wilcox, 2024).

3.3.3. Akışkan adetine göre sınıflandırma

Akışkan sayısına göre sınıflandırma, ısı transferi sistemlerini ve bileşenlerini tanımlamak için yaygın bir yöntemdir. Genellikle iki akışkan, üç akışkan veya çok akışkan sayısı olarak sınıflandırılır. Bunlar;

3.3.3.1. İki akışkanlı

Bu sistemlerde, genellikle sadece bir ısı transfer akışkanı vardır. Bunlar genellikle sıvı-sıvı veya gaz-sıvı ısı değıştiricileri olarak adlandırılır. Örnekler arasında radyatörler, buhar kazanları ve yoğuşturucular yer alır. Bu tür sistemlerde, ısı transferi bir akışkanın diğerine doğrudan temas ettiği bir arayüz üzerinden gerçekleşir.

3.3.3.2. Üç akışkanlı

Bu sistemlerde, genellikle ısı transferini kolaylaştıran bir üçüncü bir akışkan bulunur. Bu, bir ikincil akışkan veya yardımcı bir akışkan olabilir. Örneğin, birincil akışkan, proses sıvısı olabilirken, ikincil akışkan genellikle su veya bir termal yağ gibi başka bir sıvıdır. Üçüncü akışkan ise genellikle bir soğutucu su veya hava olabilir. Bu tür sistemlerde, ısı transferi genellikle birincil ve ikincil akışkanlar arasında gerçekleşir, ardından üçüncül akışkan, ısıyı taşıyan bir ortam olarak işlev görür (Demir, 2023).

3.3.3.3. Çok akışkanlı

Genellikle üç veya daha fazla akışkanın (sıvı veya gaz) bir araya getirilmesiyle ısı transferi sağlayan özel cihazlardır. Bu tür değiştiriciler, karmaşık sistemlerde sıcaklık değişimini optimize etmek için kullanılır. Örneğin, bir tesisin içinde birincil ve ikincil akışkanlar arasında ısı transferini sağlayan bir ısı değiştirici olabilir. Bunun yanı sıra, başka bir sistem akışkanının bir ısı taşıyıcıya (genellikle yağ veya su) ısı transferini sağlayan bir başka ısı değiştirici daha olabilir. Bu durumda, birincil akışkan ikincil akışkanı, ikincil akışkan ise ısı taşıyıcı olabilir. Ardından, ısı taşıyıcı, üçüncü bir akışkan ile (genellikle su veya hava) temas ederek ısıyı atabilir. Çok akışkanlı ısı değiştiricileri, karmaşık sistemlerin kontrolü için önemlidir ve sıcaklık kontrolü, enerji verimliliği ve sistem güvenliği gibi faktörlerde önemli bir rol oynar. Bu tür ısı değiştiricileri, endüstriyel tesislerde, enerji santrallerinde, kimyasal işlemlerde vb karmaşık uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Demir, 2023).

3.3.4. Isı transfer mekanizmasına göre sınıflama

Isı transfer mekanizmaları, ısı enerjisinin bir yerden diğerine geçiş yollarını ifade eder.

3.3.4.1. İki tarafta da tek fazlı akış

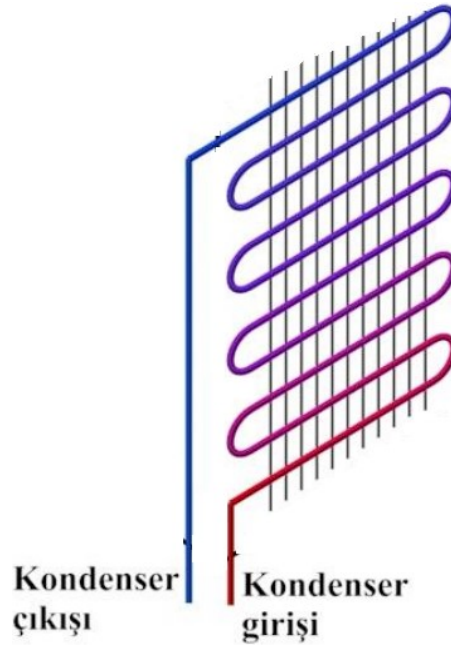
İki tarafta da tek fazlı akışın olduğu ısı değiştiriciler, genellikle sıcaklık farkının kullanıldığı veya ısıyı bir akışkanın diğerine aktardığı cihazlardır. Bu tür ısı

değiştiricileri, çeşitli endüstriyel ve evsel uygulamalarda kullanılır. Plakalı ısı değiştiricileri, radyatörler ve ısı pompaları bazı örnekleridir.

3.3.4.2. Bir tarafta tek fazlı diğer tarafta çift fazlı akış

Bir tarafta tek fazlı (genellikle sıvı) akışın olduğu, diğer tarafta ise çift fazlı (genellikle buhar ve sıvı karışımı) akışın olduğu ısı değiştiricileri, karmaşık ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tür ısı değiştiricileri, sıvı ve gazların birbirleriyle ısı transferi sağlamasına olanak tanır. Örneğin;

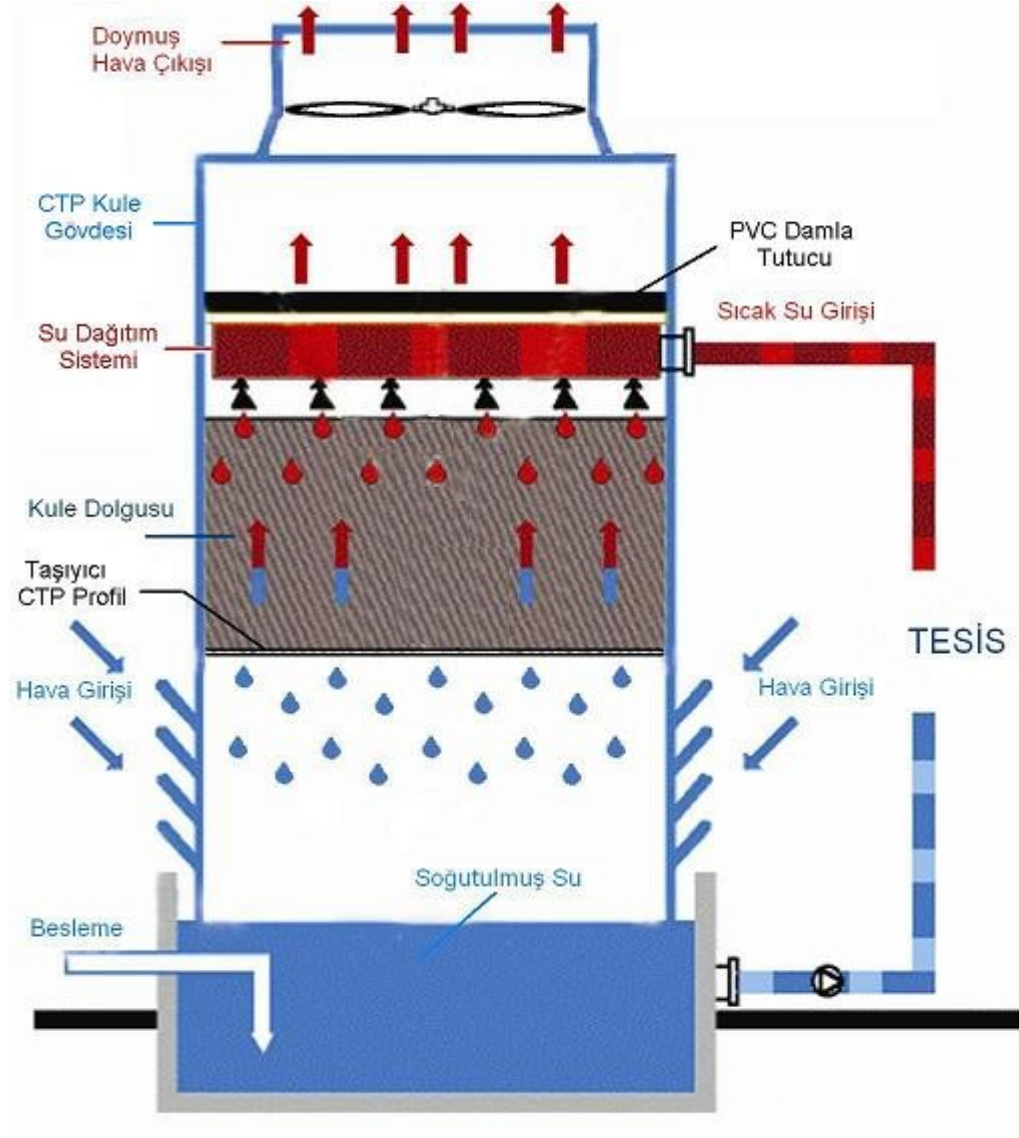
Kondenserler, buhar fazından yoğunlaşarak sıvı faza geçmesini sağlayan ısı değiştiricilerdir. Bir tarafta buharın geçtiği, diğer tarafta ise soğutma suyunun dolaştığı bir yapıya sahiptirler. Kondenserler genellikle buharla çalışan güç santrallerinde, buharlaştırma sistemlerinde ve buharla çalışan soğutucu cihazlarda kullanılır (şimşek, Bilgili, Yaşar, & şahin, 2012).



şekil 3.7. Basit bir kondenser tipi ısı değiştirici (şimşek ve diğerleri., 2012).

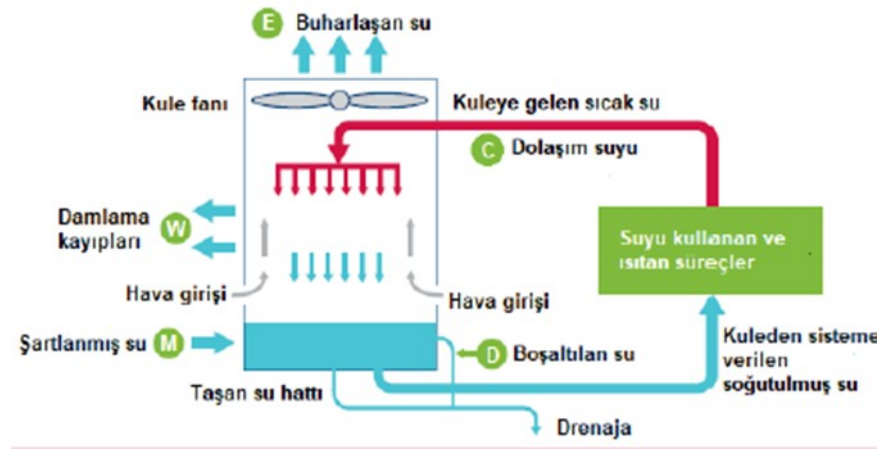
Buharlaşma Soğutucuları: Bu tür soğutucular, bir tarafta suyun buharlaşarak soğutma sağladığı, diğer tarafta ise hava akışının olduğu ısı değiştiricilerdir. Sıcak hava, suyun buharlaşması sırasında soğur ve böylece serinletilir. şekil 3.7’de basit bir kondenser tipi ısı değiştirici gösterilmektedir.

Buhar Jeneratörleri: Buhar jeneratörleri, genellikle suyun ısıtılarak buhar haline getirildiği ve buharın bir sistemi tahrik etmek için kullanıldığı cihazlardır. Bir tarafta sıvı suyun ısıtıldığı, diğer tarafta ise buharın oluştuğu ısı değişticilerdir (Kılıç, 2016).



Şekil 3.8. Su soğutma kulesi sistemi (DRC Makine).

Soğutma Kuleleri: Soğutma kuleleri, sıcak suyun buharlaşarak soğutulduğu cihazlardır. Genellikle endüstriyel tesislerde ve güç santrallerinde kullanılırlar. Şekil 3.8’de bir su soğutma kulesi sistemi tasarımı gösterilmektedir. Bu tasarımlarda, bir tarafta sıcak suyun dolaştığı, diğer tarafta ise hava akışının olduğu bir yapıya sahiptirler (İmal, 2022). Şekil 3.9’da da kapalı çevrime sahip bir soğutma kulesi sistemi tasarımı gösterilmektedir.



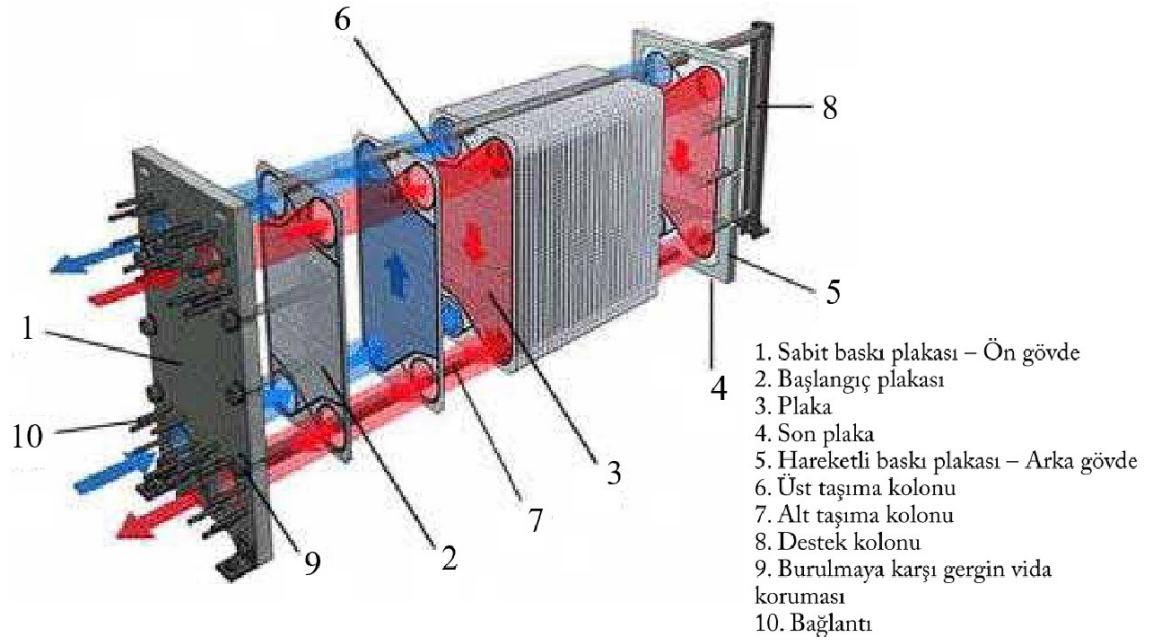
Şekil 3.9. Kapalı çevrim soğutma kulesi sistemi (Bulgurcu & Koçyiğit, 2019).

3.3.4.3. İki yönlü çift fazlı akış

İki tarafta da çift fazlı akışın olduğu ısı değiştiricileri, genellikle karmaşık sistemlerde kullanılır ve birbirinden farklı fazlardaki akışkanların ısı transferini sağlar (El-dean, Hassan, & Shafey, 2022). Bu tür ısı değiştiricileri, çeşitli endüstriyel uygulamalarda ve sistemlerde kullanılır. İki tarafta da çift fazlı akışın olduğu bazı örnekler şunlardır;

Çift Borulu Isı Değiştiricileri: Her iki tarafta da çift fazlı akışın olduğu bir boru sistemi kullanılarak ısı transferi sağlanır. Genellikle bir tarafında bir akışkanın buharı veya gazı, diğer tarafında ise bir sıvı bulunur. Bu tip ısı değiştiricileri, kimyasal sistemlerde, enerji santrallerinde ve endüstriyel ısıtma sistemlerinde kullanılır (Halıcı & Gündüz, 2013).

Çift Plakalı Isı Değiştiricileri: İki tarafta da çift fazlı akışın olduğu plakalar aracılığıyla ısı transferi sağlanır. Bu tip ısı değiştiricileri, yüksek verimlilikleri ve kompakt yapıları nedeniyle tercih edilir. Genellikle kimyasal endüstride, gıda işleme tesislerinde ve ısı geri kazanım sistemlerinde kullanılırlar (Kılıç, 2017). Şekil 3.10'da örnek bir plakalı ısı değiştirici tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Plakalı ısı değiştirici (Kılıç, 2017).

Çift Cidarlı-Boru Isı Değiştiricileri: Her iki tarafta da çift fazlı akışın olduğu bir kabuklu-boru sistemi kullanılarak ısı transferi sağlanır. Bir tarafta genellikle buhar veya gaz, diğer tarafta ise sıvı akışkan bulunur. Bu tip ısı değiştiricileri, yüksek basınç ve sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Çift Etkili Isı Pompaları: Her iki tarafta da çift fazlı akışın olduğu ısı pompaları, bir tarafta sıcak bir akışkanın dolaştığı, diğer tarafta ise soğuk bir akışkanın dolaştığı bir sistemdir. Bu tip ısı pompaları, ısı geri kazanımı, iklimlendirme ve endüstriyel ısıtma/soğutma sistemlerinde kullanılır (Samancı, Altınışık, & Sertkaya, 2011).

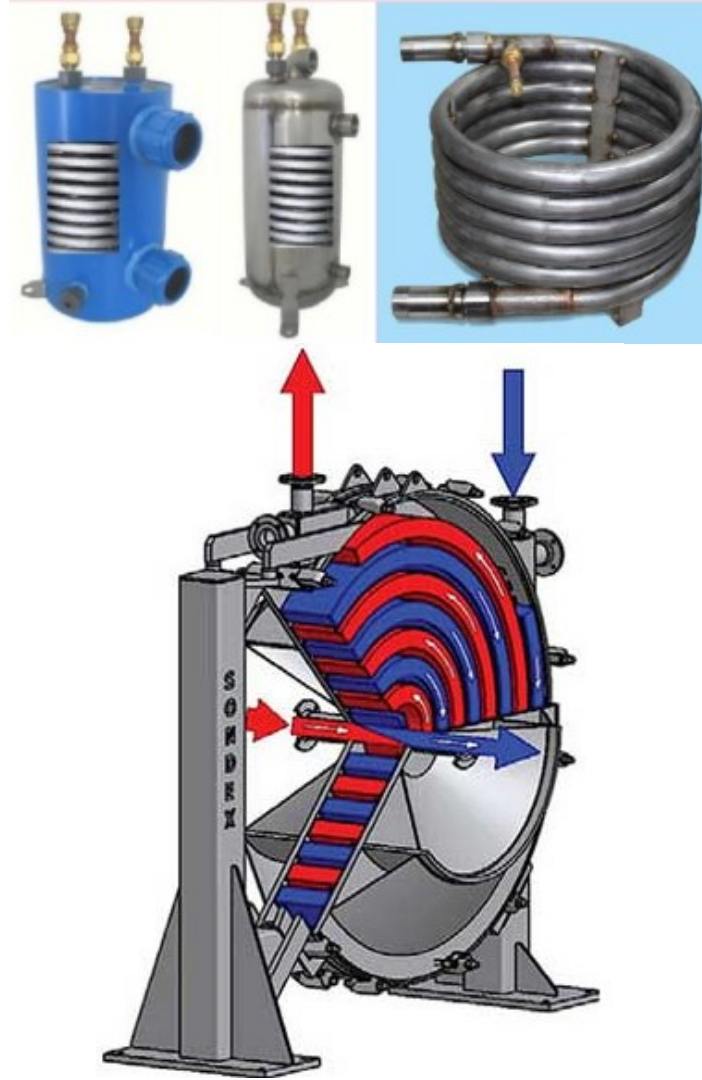
3.3.5. Konstrüksiyon özelliklerine göre sınıflandırma

Konstrüksiyon özelliklerine göre ısı değiştiriciler, ısı transferini gerçekleştirmek için farklı yapısal özelliklere sahip olabilirler. İşte bazı konstrüksiyon özelliklerine göre ısı değiştiriciler;

3.3.5.1. Borulu ısı değiştiricileri

Borulu ısı değiştiricileri, genellikle ısı transferi için kullanılan cihazlardır. Bu türdeki değiştiriciler, boru şeklindeki yapılarıyla bilinirler. Bunlar, bir akışkanın (genellikle sıvı veya gaz) içinden geçirilerek veya dışından dolaştırılarak ısı transferini

gerçekleştirirler. Bu ısı değiştiricileri döz borulu, Spiral borulu ve gövde borulu olarak imal edilirler. şekil 3.11’de çeşitli spiral borulu ısı değiştiriciler ve tasarımlar gösterilmektedir. Borulu ısı değiştiricileri, ısıtma ve soğutma sistemleri, enerji üretimi, kimyasal reaktörler ve gıda endüstrisi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar.

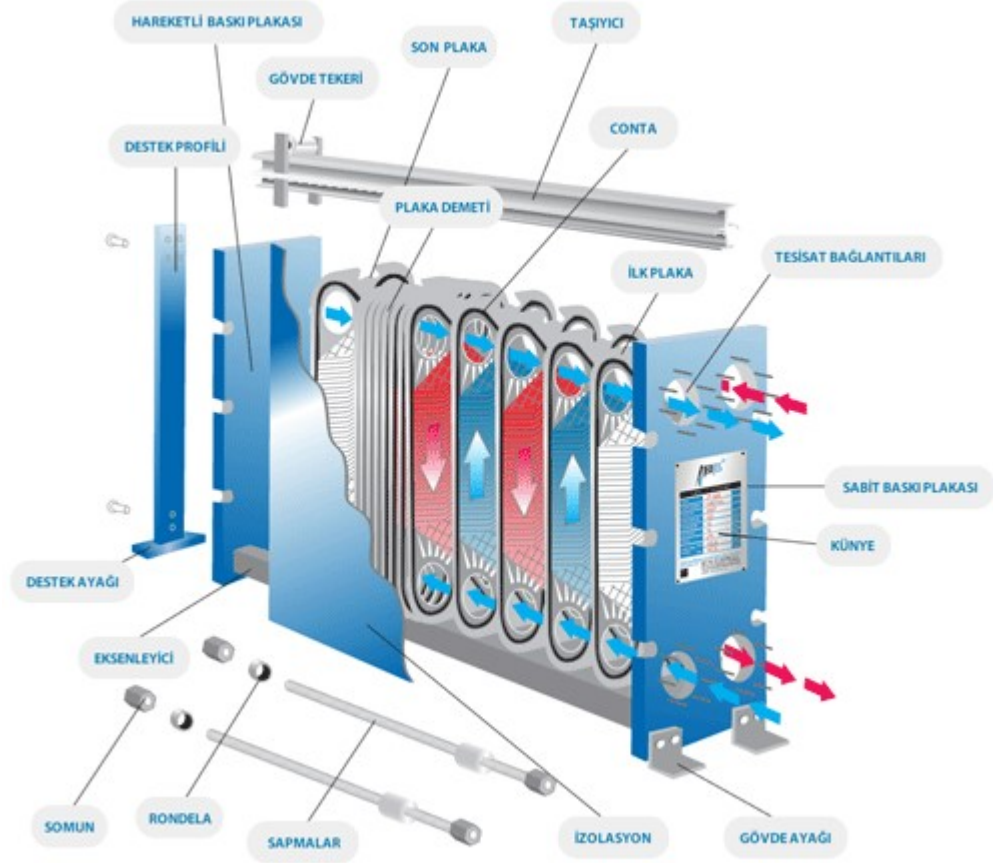


şekil 3.11. Spiral borulu ısı değiştiriciler (Sandas Makine, 2024).

3.3.5.2. Levhalı ısı değiştiricileri

Levhalı ısı değiştiricileri, bir sıvı veya gazın ısınıını başka bir akışkan veya ortama aktaran cihazlardır. şekil 3.12’de levha tipi ısı değiştirici gösterilmektedir. Levhalı ısı değiştiricileri, ısıyı bir levha veya plakadan diğerine aktaran termal iletim prensibine dayanır. Bu cihazlar, yüksek verimlilikleri, kompakt tasarımları ve geniş kullanım alanlarıyla bilinirler. Levhalı ısı değiştiricileri, çeşitli malzemelerden

yapılabilir, ancak en yaygın olanları alüminyum, çelik veya bakırdır. Bu malzemelerin seçimi, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak yapılır. Levhalar arasındaki sıvı veya gaz akışı, ısı transferinin etkinliğini artırmak için özel olarak tasarlanmış kanallar veya kanatçıklarla desteklenebilir. Bu cihazlar, endüstriyel ısıtma ve soğutma sistemlerinde, klima sistemlerinde, buharlaştırıcı ve kondansatörlerde, ısı geri kazanım sistemlerinde ve daha pek çok alanda yaygın olarak kullanılır (Ünverdi & Küçük, 2019).



Şekil 3.12. Levha tipi ısı değiştirici (Jeotes, 2024).

3.3.5.3. Kanatlı yüzeyli ısı değiştiricileri

Kanatlı yüzeyli ısı değiştiricileri, bir akışkanın sıcaklığını diğer bir akışkana aktaran ve genellikle ısı transferi sağlayan cihazlardır. Şekil 3.13'te kanatlı boru tipi ısı değiştirici çeşitleri gösterilmektedir. Kanatlı yüzeyler, ısı transferini artırmak için kullanılan yapısal özelliklerdir. İki akışkanın birbirinden ayrıldığı ve sıcaklığın birinden diğerine geçiş yaptığı bir tasarıma sahiptir. Bu akışkanlar, genellikle borular, kanallar veya plakalar aracılığıyla birbirinden ayrılır. Kanatlar, bir yüzeydeki ısı transfer yüzeyini artırarak, daha etkili bir ısı transferi sağlarlar. Bu kanatlar, genellikle çeşitli

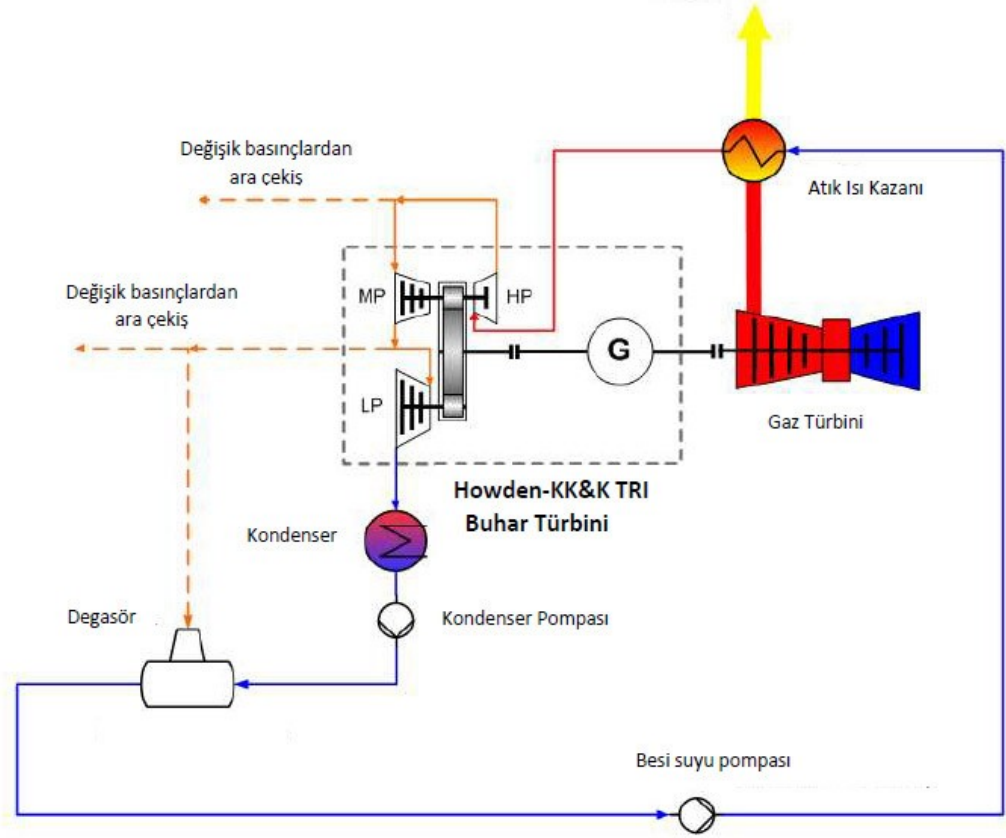
şekil ve boyutlarda olabilirler ve akışkanın akışını iyileştirmek ve ısı transferini artırmak için tasarlanmış olabilirler. Bu tür ısı değıştircileri genellikle endüstriyel uygulamalarda, ısıtma, soğutma ve klima gibi alanlarda kullanılır (RSR Enerji, 2024).



Şekil 3.13. Kanatlı boru tipi ısı değıştircisi (RSR Enerji, 2024).

3.3.5.4. Rejeneratif ısı değıştircileri

Rejeneratif ısı değıştircileri, bir ısıtma veya soğutma sistemi sırasında ısıyı geri kazanmak için kullanılan sistemlerdir. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek için kullanılır. Bu sistemler genellikle döner silindirler, plakalar veya ızgaralar gibi yapıları kullanır. Isı transferi sırasında, bir akışkan diğerinden ısı alır ve bu sıcaklık farkını kullanarak işlenen bir ortamdaki ısıyı geri kazanmak için kullanılır (Ökmen & Gübü, 2021). Rejeneratif ısı değıştircilerinin birçok avantajı vardır. Bunlar arasında enerji tasarrufu, işletme maliyetlerinin azaltılması, çevresel etkinlik ve süreç verimliliğinin artırılması sayılabilir. Bu nedenle, endüstriyel tesislerde, ısıtma, havalandırma ve klima sistemlerinde ve enerji üretiminde yaygın olarak kullanılırlar (Taşpınar & Öztürk, 2022). Şekil 3.14'te bir gaz türbininde atık ısı geri kazanımı çalışma şeması gösterilmektedir.

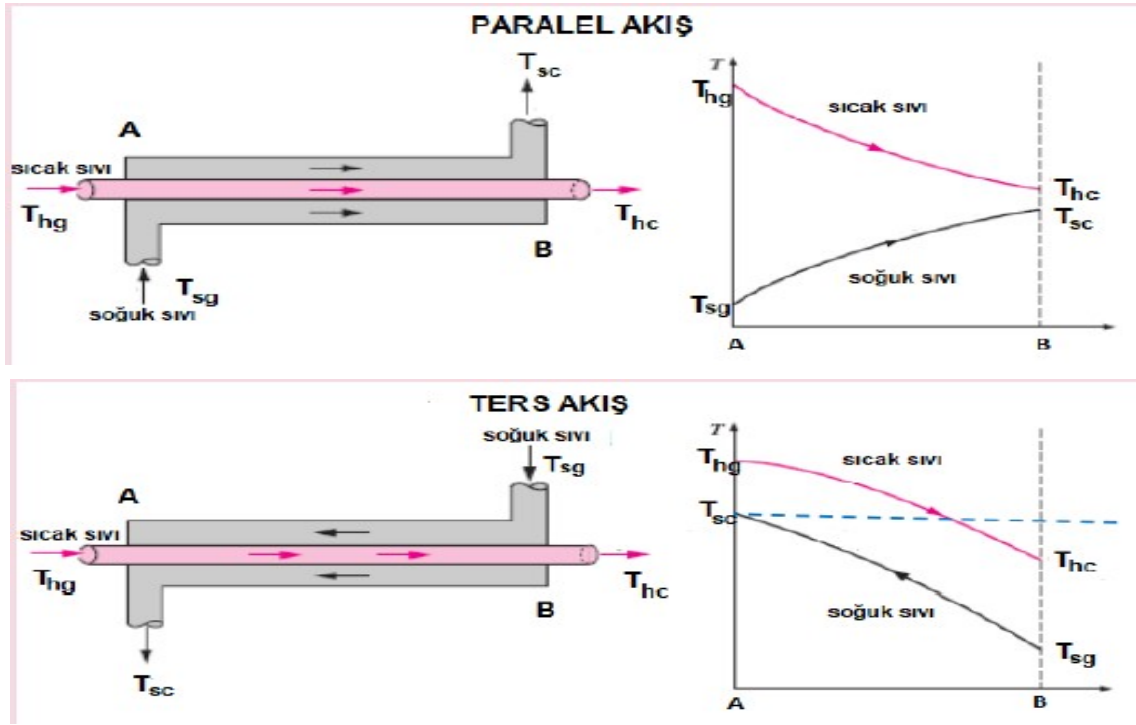


Şekil 3.14. Gaz türbininde atık ısı geri kazanımı çalışma şeması (Art Enerji, 2024).

3.3.6. Akım yönüne göre sınıflama

3.3.6.1. Tek geçişli ısı değiştiricileri

Tek geçişli ısı değiştiricileri, sıcak ve soğuk akışkanların bir kez karşılaştığı ve ısı transferinin tek bir yönde gerçekleştiği ısı değiştirme sistemleridir. Bu tür ısı değiştiricileri, bir akışkanın diğerine ısı transferini gerçekleştirirken, akışkanlar bir kez karşılaşır ve genellikle bir kez ısı değişimi gerçekleşir. Bu sistemde kullanılan akışkanlar paralel, ters ve çapraz akımlı kullanılırlar. Tek geçişli ısı değiştiricileri, basit tasarımları ve düşük maliyetleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilir. Bunlar tipik olarak boru eşanjörleri, plakalı eşanjörler veya ızgaralı eşanjörler gibi farklı yapı ve tiplerde olabilir (Çengel & Boles, 2017). Bu tip ısı değiştiriciler paralel ve zıt akışa sahip olabilir. Şekil 3.15’de paralel ve zıt akışlı ısı değiştiriciler ve etkisi gösterilmektedir.



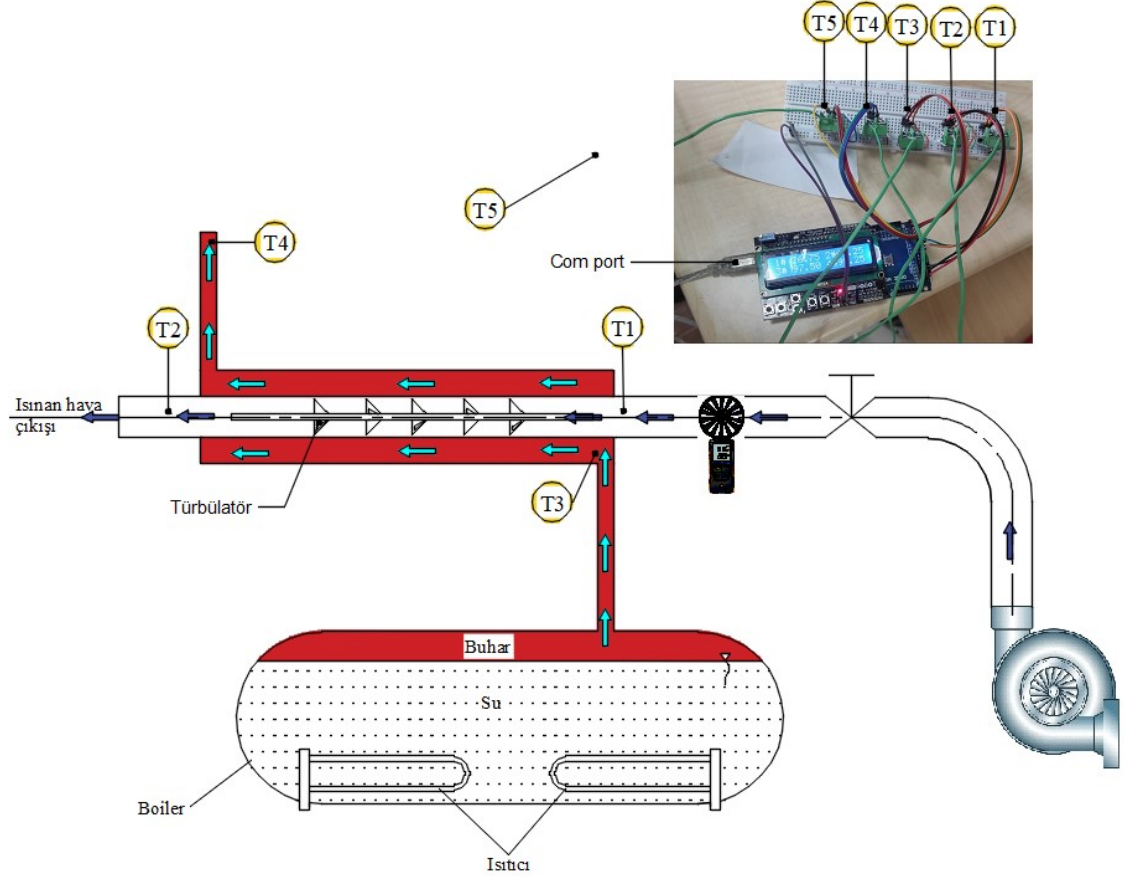
Şekil 3.15. Paralel ve zıt akışlı ısı değıştirciler (Çengel & Boles, 2017).

3.3.6.2. Çok geçişli ısı değıştircileri

Çok geçişli ısı değıştircileri, bir akışkanın içindeki ısıyı başka bir akışkana aktarmak için kullanılan cihazlardır. Çok geçişli ısı değıştircileri, birden fazla akışkan akışının birbirine temas ettiği bir yapıya sahiptir. Bu yapı, ısı transfer verimliliğini artırır ve enerji tasarrufu sağlar. Isı transferi, bu akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı sayesinde gerçekleşir. Bu ısı değıştircileri farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bunlar arasında çapraz akımlı, ters akımlı, çapraz-paralel akımlı ve çok geçişli gövde-borulu olanlar bulunmaktadır. Ayrıca, paralel levhalar arasında n adet geçişli olanlar da bu sınıflandırmaya dahildir. Bu tür ısı değıştircileri genellikle endüstriyel alanlarda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Endüstriyel süreçlerde verimliliği artırırken enerji maliyetlerini azaltmaya yardımcı olur.

4. YÖNTEM

Yapılan bu deneyler Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan türbülantörlü ısı değıştirici deney seti ile yapılmıştır. Sistem Autocad programında tasarlanmıştır. Şekil 4.1’de deney sistemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Deney sisteminin şematik görünüşü (Düz akış).

Deney sistemi eş merkezli iç içe geçirilmiş iki paralel borudan oluşan ısı eşanjöründen oluşmuştur. Su buharı oluşturmak için 22 lt kapasiteli kazan kullanılmıştır. Farklı iki noktadan kazanın içine yerleştirilmiş iki elektrikli ısıtıcı kullanılarak su buharı üretilmiştir. Bu su buharı eş merkezli boruların iç kısmından geçirilerek borular ısıtılmıştır. Kızgın su buharının borunun giriş ve çıkış yerlerine yerleştirilen termokupl kullanılarak sıcaklık verileri ölçülmüştür. Ayrıca iç boruya atmosferde oda sıcaklığında bulunan havayı yönlendirmek için salyangoz tipi fan motoru kullanılmış ve hava akış hızını istediğimiz hızlara ayarlamak için dijital hız

kontrol cihazı kullanılmıştır. İç boruya giren havanın giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için yerleştirilen iki adet termokupl kullanılmıştır. Ayrıca iç borunun giriş ve çıkış noktalarında basınçları ölçmek için boruya yerleştirilen dijital basınç sensörleri kullanılmıştır. Tüm bu verileri bilgisayara aktarmak için ATmega2560 mikrodenetleyici ile yaptığımız özel bir datalogger kullanılmıştır. Yaptığımız bu sistemde içteki boru için içi Ø60 mm, dışı Ø65 mm boyu 800 mm olan düz bakır boru kullanılmıştır. Dışta kullandığımız boru için ise çelikten yapılmış dışı galvanizle kaplanmış dışı Ø101 mm'lik çapa, boyu 1500 mm ve 1.2 mm cidar kalınlığından yapılmıştır. Sistemde oluşacak ısı kayıplarını önlemek için de dış boru ısı yalıtımında kullanılan fiberglass malzemesiyle kaplanmıştır. Salyangoz tipi fan tarafından belli hızlarda üretilen hava iç borudan, buhar kazanından üretilen kızgın buhar ise iki borunun arasındaki boşluktan geçerek ısı transferi gerçekleşmiştir. Borular arasında yoğunlaşma sonucu oluşan su, nem ve buharı uzaklaştırmak için sistemde uygun yere tahliye vanası konulmuştur. Şekil 4.2 a'da deney seti gösterilmiştir. Bu deney setinde içteki bakır borunun içine Şekil 4.2 b'de M8x800 mm tij üzerine 30°, 35° ve 40° açılarda üretilen konik tipteki türbülötörler 3, 6 ve 9 adet eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Tüm açılar için ayrıca konik forma sahip şeklindeki türbülötörlere 2, 3 ve 4 adet boşluk açılarak farklı türbülanslar oluşturularak oluşan sıcaklık değerleri ölçülmüştür.



a) Şekil 4.2. a-Deney seti, b-Türbülötörlerin yerleşimi.

Deneyde kullandığımız borularda uniform bir sıcaklık elde etmek için yaklaşık 2 saat kızgın buhar verilmiştir. Daha sonra salyangoz tipi fan motoru çalıştırılarak istenilen 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ve 10 m/sn akış hızına ayarlanarak bakır borunun iç kısmına hava akışı sağlanmıştır. Bu hava akışı sonucu borunun giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklık değerleri ve basınç farkları ölçülmüştür. Buhar kazanındaki su

miktarları her saat kontrol edilerek ihtiyaç durumunda su eklenmiş tekrar buhar üretilene kadar beklenilmiştir.

4.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Termokupl

Termokupl sıcaklığın ölçülmesi için kullanılan özel metallere 0.5 mm çapında T Tipi nikel-krom malzemedir. Bu termokupllardan ikisini kızgın buharın geçtiği iki boru arasındaki alana ulaşmak için dış borunun giriş ve çıkış noktalarına takarak kaynak buharındaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Diğer iki termokupl ise salyangoz tipi fanın ürettiği soğuk havanın geçtiği içteki borunun giriş ve çıkış noktalarında açılan deliklerin içinden geçirilerek bakır borunun içine yerleştirilmiş ve sıcaklıklar ölçülmüştür.

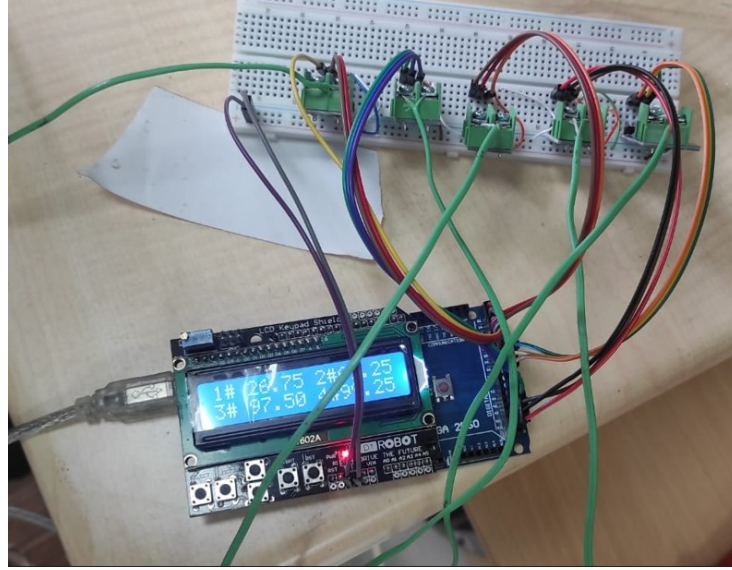


Şekil 4.3. Termokupl ve deney üzerindeki bağlantıları.

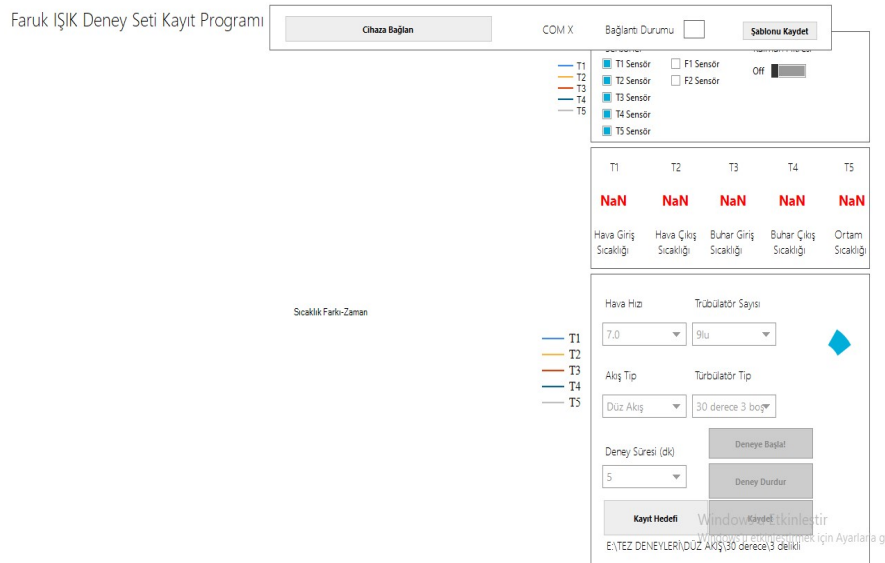
Termokupllardan elde edilen veriler bilgisayar ortamında kayıt altına alınarak çizelgeler oluşturulmuştur. Şekil 4.3'te deney seti üzerindeki bağlantıları gösterilmiştir. Termokupl -220°C ile 2.400°C arasında $\pm 0,1$ hata oranıyla ölçüm imkânı sağlamaktadırlar.

4.1.2. Veri dönüştürücüsü

Deney setinin uygun yerlerine yerleştirilen bu termokuplların sağladığı sıcaklık verilerini sayısal verilere dönüştürmek için Şekil 4.4'te ATmega2560 mikrodnetleyici kartından yaptığımız bir dönüştürücüye aktarmıştır. Cihazımızın ekranından da okunan bu sıcaklık verileri anlık olarak usb veri aktarma kablosuyla bilgisayarımıza aktarılmıştır.



Şekil 4.4. ATmega2560 mikrodnetleyici veri dönüştürücüsü.



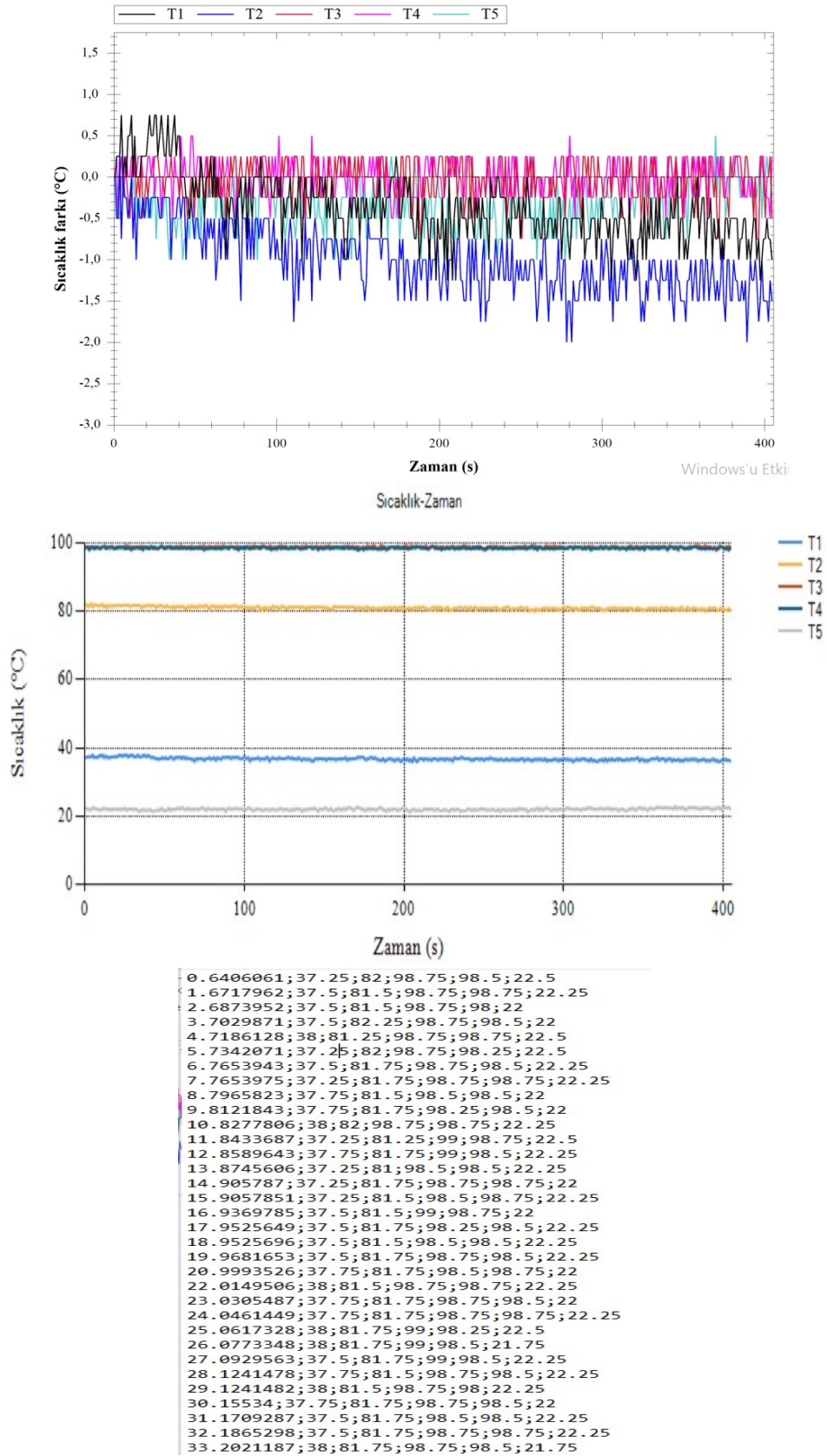
Şekil 4.5. Deney seti kayıt programı.

4.1.3. Veri kayıt programı

Veriler, C# ile tasarladığımız bir veri kayıt programı ile gerçekleştirilmiştir. Belirtilen program deney şartlarının organize edilmesini, kaydedilmesini ve grafik oluşturma görevlerini yerine getirmektedir. Şekil 4.5'te deney seti kayıt programı gösterilmektedir. Elde edilen veriler daha sonra talep edilmesi halinde tekrar grafiğe dökülebilmek için txt dosyası olarak da kaydedecek şekilde yapılmıştır.

ATmega2560 mikrodenetleyici kartından okunan sıcaklık değerleri COM porta seri yayın yapacak şekilde programlanmıştır. ATmega2560 mikrodenetleyici kartını programlamak için VSCode tabanında Platformio kütüphanesi kullanılmıştır. Diğer taraftan C# ile tasarladığımız program, COM portundan gelen yayını okuyarak, grafik ve kayıtlı verilere dönüştürmektedir.

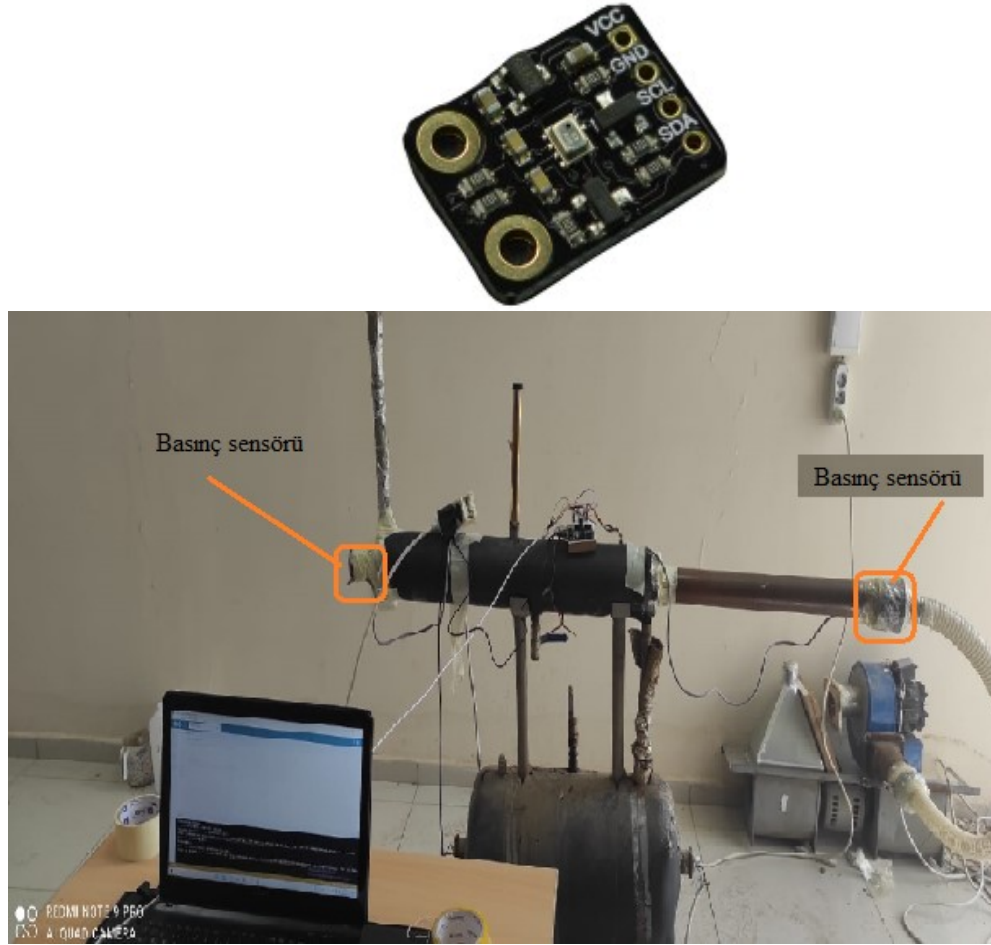
Şekil 4.6'da 400 saniye boyunca 30° açılı 2 boşluklu ve 3 adet konik türbülator tipinin yerleştirildiği deneyi setinden sağlanan veriler gösterilmiştir. Tasarlanan program her zaman veri kaydı yapmamakta, yapılan deney şartının seçimi, göstergede okunan verilerin doğruluğunu operatöre kontrol ettirdikten sonra kayıt yapmasını sağlamaktadır. Kayıt ise, deney durdur tuşu ile durdurduktan sonra mümkün olmaktadır. Oluşturulan deney, alt kısımda gösterilen dosya klasörüne deney parametrelerini hiyerarşik bir sırayla yazarak bir klasör oluşturarak kaydetmektedir. Bu yeni oluşturulan klasör içerisinde, 600 dpi çözünürlüğe sahip, zaman-sıcaklık ve zaman sıcaklık farkı grafikleri kaydedilmektedir. Ayrıca, txt dosyası olarak anlık alınan veriler de kaydedilmiştir.



Şekil 4.6. Deney kayıt programı kayıt örnekleri.

4.1.4. Veri kayıt programı

Deneyde kullanılan farklı türbülatorlerden kaynaklı oluşan hava türbülanslarından kaynaklı salyangoz tipi fanımızın ürettiği havanın deneyin giriş ve çıkışlarında farklı basınçlar oluşmasına neden olmuştur. Konik tipte türbülatorlerin boru içine yerleştirilmiş halde borunun giriş ve çıkış noktalarına Şekil 4.7’de gösterilen BMP280 tipi basınç sensörleri yerleştirilmiştir.

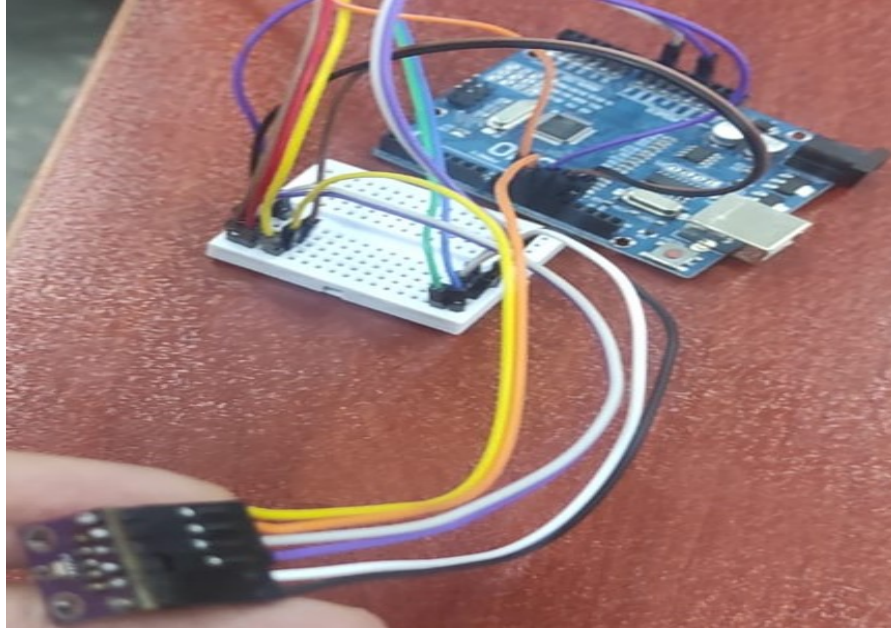


Şekil 4.7. BMP280 tipi basınç sensörü ve deney üzerindeki bağlantıları.

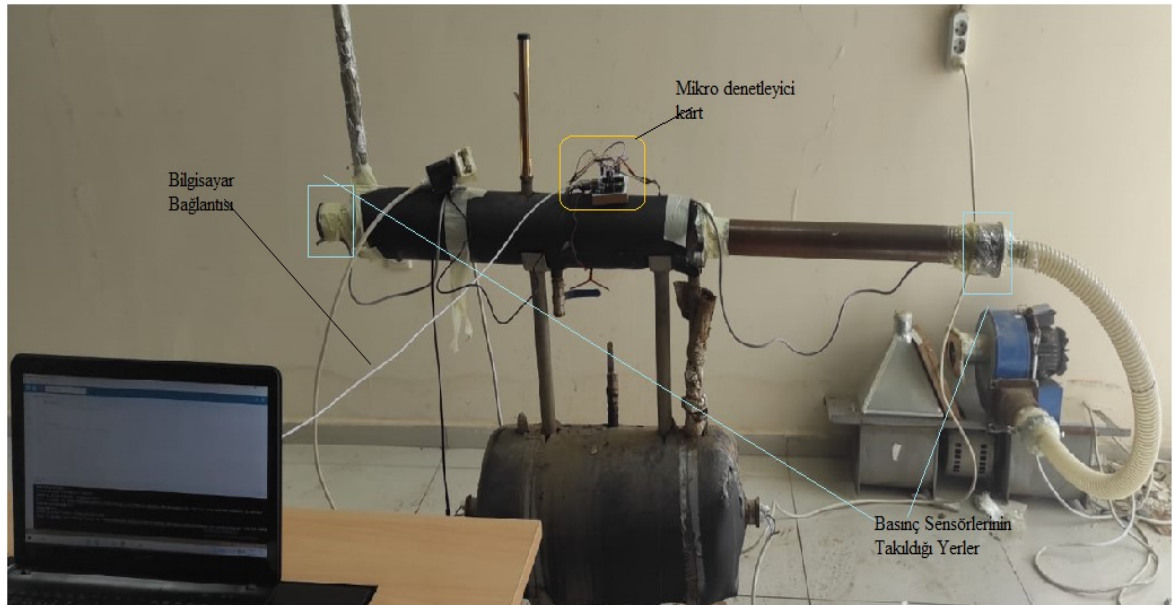
Tablo 4.1.’de teknik özellikleri verilen bu basınç sensörleri ölçtükleri basınç değerlerini oluşturulan ATmega2560 mikrodenetleyici kartına aktarmaktadır. Şekil 4.8’de BMP280 sensörünün paralel bağlantı şekli gösterilmektedir. Buradan mikrodenetleyicinin okuduğu veriler seri haberleşme kanalıyla bilgisayara aktarılmaktadır (Şekil 4.9). Bilgisayar tarafında ise, c# ile yazdığımız kaydedici ara yüz programına aktarılmış ve veriler kayıt altına alınmıştır.

Tablo 4.1. BMP280 tipi basınç sensörü teknik özellikleri

Giriş Gerilimi: 1.71V - 3.6V
Basınç Aralığı: 300-1100hPa (deniz seviyesinden +9000 ...- 500m / üstü)
Akım: 1.12mA
Çalışma Sıcaklığı: -40°C - +85 °C
Çalışma Basıncı: 300hPa - 1100hPa



Şekil 4.8. Basınç sensörlerinin ATmega2560 mikrodnetleyici kartına bağlantısı.



Şekil 4.9. Basınç sensörleri, ATmega2560 mikrodnetleyici ve bilgisayar bağlantısı.

4.1.5. Fan motoru

Yapılan deneylerde ihtiyaç duyulan hava akışı için Şekil 4.10'da gösterilen OBRA-140-4K-M model fan kullanılmıştır. Türbülatorlerin yerleştirildiği borunun çıkış noktasındaki hava akış hızı 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 m/sn değerlerinde ayarlamak için fanın emiş hattına yerleştirilen özel bir düzenek ile yapılmıştır. Deneyde kullanılan fan ve motorunun teknik özellikler Tablo 4.2 de verilmiştir. Üretilen hava fanın çıkış noktasından deney setinin türbülatorlerin yerleştirildiği iç borunun giriş kısmına spiralli plastik borular yardımıyla bağlantısı sağlanmıştır.



Şekil 4.10. OBRA-140-4K-M model fan ve bağlantısı.

Tablo 4.2. OBRA-140-4K-M model fan ve elektrik motorunun teknik özellikleri

Model	OBRA-140-4K-M
Voltaj	220 V
Frekans	50 Hz
Güç	300 Watt
Akım	2,00 A
Kondansatör	4/400 (uF/VOLT)
Devir	1400 d/dk.
Hava Debisi	600 m ³ /h
Ses Seviyesi	43 dB(A)
Ağırlık	7,90 Kg

4.1.6. Anemometre

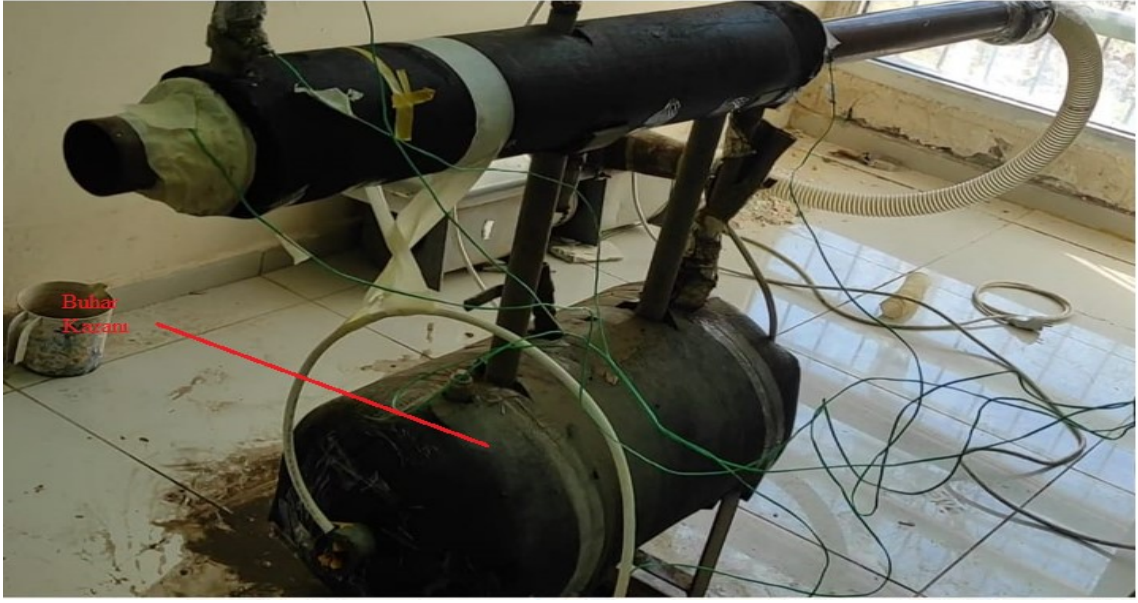
Deneyde türbülatorlerin yerleştirildiği iç bakır borunu çıkış tarafındaki havanın çıkış hızını ölçmek için Kestrel 2.000 Dijital Anemometre cihazı kullanılarak m/sn cinsinden ölçülerek ayarlanmıştır. Şekil 4.11’de görseli verilen anemometre cihazının hava akış hızı ölçüm aralığı 0 ile 40 m/sn aralığındadır. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi çıkış tarafındaki havanın hız ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kestrel 2.000 Dijital Anemometre cihazı.

4.1.7. Buhar kazanı

Deneylerde ihtiyaç duyduğumuz kızgın buharı elde etmek için 22 lt hacimli dairesel kesitli bir su deposu kullanılmıştır. Bu su deposunun içine iki yan tarafından her biri 1500 watt gücünde iki tane ısıtıcı yerleştirilerek su kaynatılmıştır. Bu ısıtıcılar su deposuna yerleştirilirken elektrik kaçağını önlemek için yalıtkan malzemeler kullanılarak depoya montajı sağlanmıştır. Buhar ve ısının meydana getirdiği basınç kazalarını önlemek içinde emniyet vanaları boşalma vanaları ve tahliye vanaları depoya eklenmiştir. Su deposundan üretilen kızgın buharı eşanjöre göndermek için depo ve eşanjör arasına borular eklenerek sağlanmıştır. Şekil 4.12’te buhar kazanı ve ısı eşanjörü görseli verilmiştir.



Şekil 4.12. Buhar kazanı.

4.1.8. Isı eşanjörü

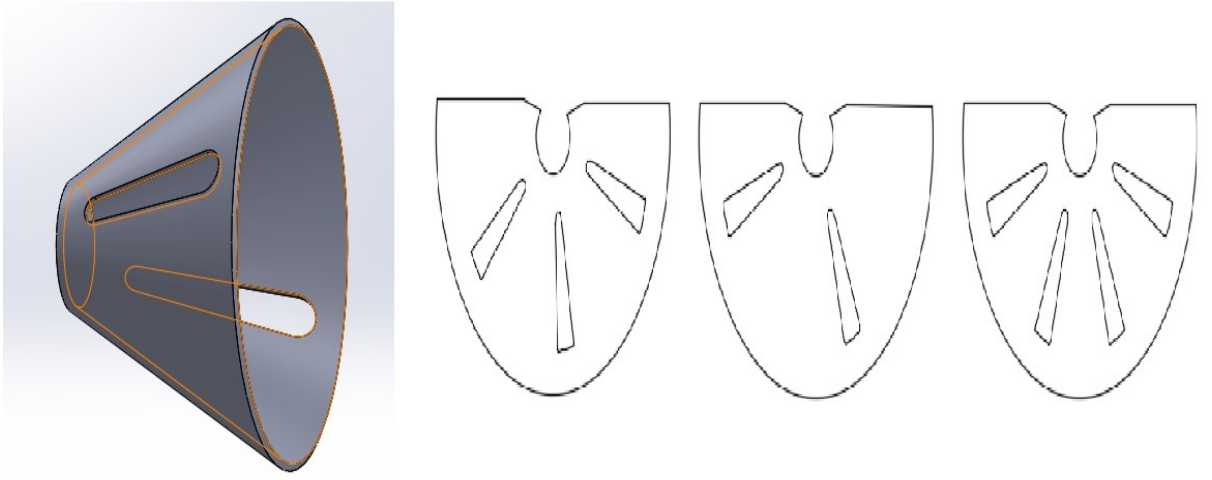
Bu deneyde kullanılan ısı eşanjörü iç içe geçmiş iki düz borudan yapılmıştır. Dışta kullandığımız boru çelikten yapılmış dışı galvanizle kaplanmış dışı Ø101 mm lik çapa, boyu 1500 mm ve 1.2 mm cidar kalınlığından yapılmıştır. İçteki boru için içi Ø60 mm, dışı Ø65 mm boyu 800 mm olan düz bakır boru kullanılmıştır. Deney setinde ısı kayıplarını önlemek için dış borunun dış kısmı fiberglass yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Salyangoz tipi fan motorundan üretilen oda sıcaklığındaki hava türbülantörlerin yerleştirildiği iç bakır borunun içinden geçmektedir. Şekil 4.13'te görülen ısı eşanjöründe, buhar kazanında üretilen kızgın su buharı ise ısı eşanjörümüzü oluşturan iki borunun arasında akarak ısı transferini gerçekleştirmiştir. Deney esnasında borular arasındaki yoğunlaşma sonucu oluşan nem ve suyu tahliye etmek için dış borunun alt kısmına tahliye vanası eklenerek eşanjörümüz oluşturulmuştur.

4.1.9. Tasarlanan konik tip türbülantörler

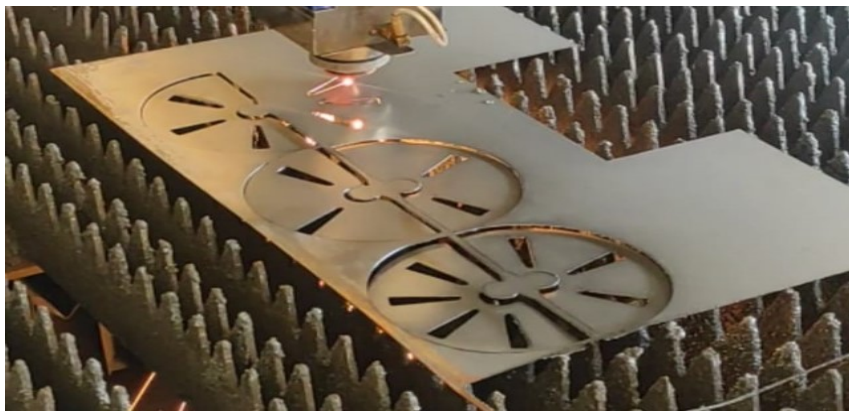
Isı taşınım verimliliğini artırmanın en iyi yollarından biri de eşanjör içine türbülantör yerleştirme yöntemidir. Bu verimliliğinin maksimum oranını bulmak için bizde Şekil 4.14-a'da görseli verilen konik tip türbülantörü üç farklı açıda (30°, 35°, 40° derece) ve her açıda ayrı olmak üzere eşit aralıklı iki, üç ve dört boşluklu olacak şekilde

tasarlanmıştır. Bu oluşturulan açılarda amaç iç borudan geçen kızgın buharın eşanjörlere çarparak burunun iç kısmına çapmasını sağlamakla oluşan türbülasyon sayesinde ısı iletim verimliliğini artırmaktır. Türbülator üzerindeki kanallardaki amaçta akış sırasında oluşabilecek basınç artışlarının önüne geçmektir.

Bilgisayar destekli tasarım programı yardımıyla tasarladığımız türbülatorlarımızın açınımları alarak görselde görüldüğü gibi kaydedip bilgisayar destekli lazer kesim makinasında 0.5 mm'lik saçlardan kesilmiştir. Şekil 4.14-b Türbülatorleri sistemde oluşan sıcak ve basınçlı ortama dayanıklı olması için sac malzemesin üretildi.



a)



b)

Şekil 4.14. a-Türbülator tasarımı, kesim için açınım şekli, b-lazer makinesinde kesim görseli.

Kesilen türbülator saçları Şekil 4.15-a'da görüldüğü gibi karga burnu pensesi yardımıyla elle konik forma katlanmıştır. Konik form sacın kenarları 5 mm üst üste

getirilerek punta kaynak makinesinde kaynak yapılarak birleştirilmiştir Şekil 4.15-b. Oluşan konik tip türbülatoörlere son düzgün formu vermek için torna tezgahında yapılan kalıp arasına alınıp preslenerek nihai forma ulaşması sağlanmıştır Şekil 4.15-c.



a)

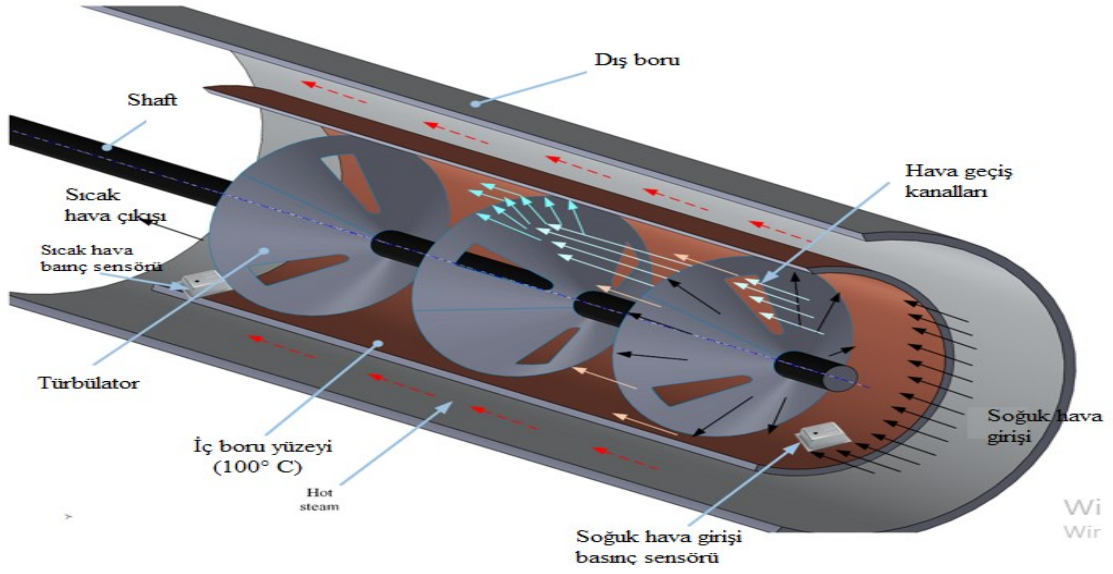


b)



c)

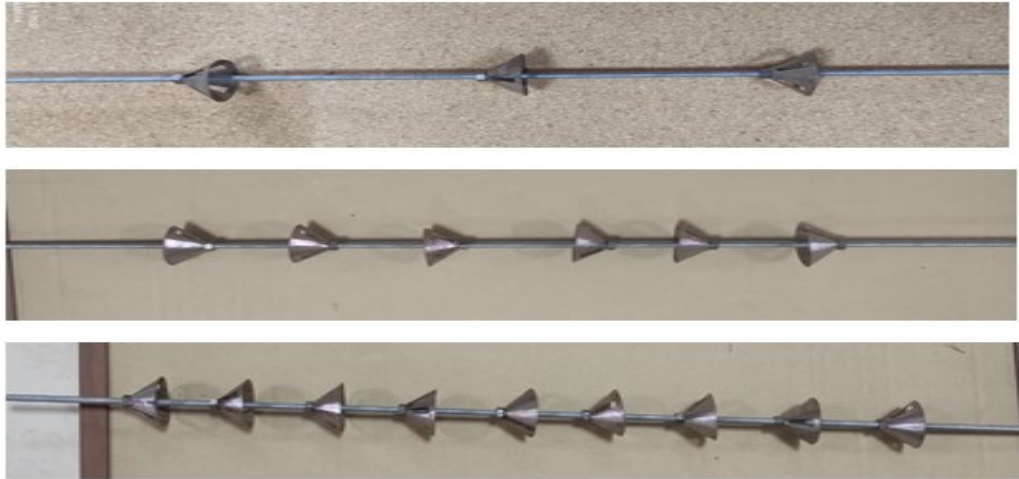
Şekil 4.15. Türbülatoörlerin imalat aşamaları.



Şekil 4.13. Deneyde kullanılan ısı eşanjörü iç yapısı görseli.

4.1.10. Vidalı mil M8 tij ve türbülatorlerin montajı

Ürettiğimiz türbülatorlerin deney düzeneğindeki iç bakır borunun içine yerleştirmek için 800 mm uzunluğunda M8x1.25 mm hazır satılan vidalı mil kullanılmıştır. Türbülatorlerimizi tij üzerine Şekil 4.15. te gösterildiği gibi 3 adet 200 mm eşit aralıklı, 6 adet 115 mm eşit aralıklı ve 9 adet 80 mm eşit aralıklı olmak üzere yerleştirirken sabitlemek için her iki tarafı kontra somunla sıkılmıştır.



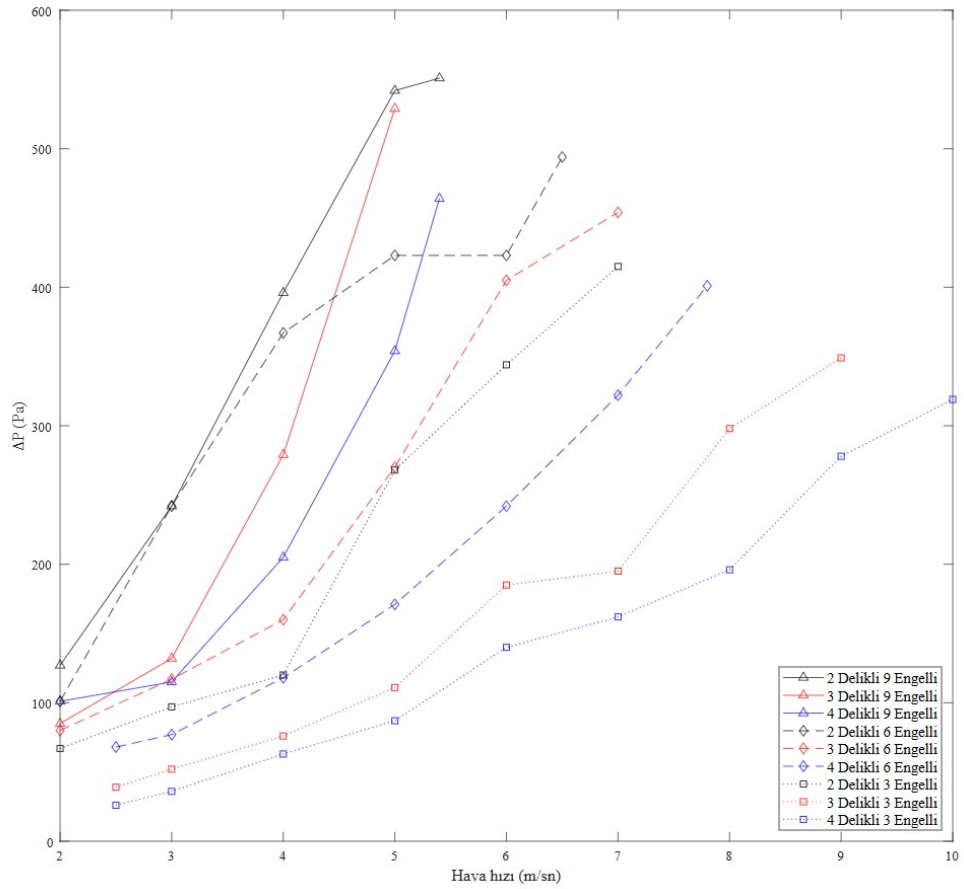
Şekil 4.15. Türbülatorlerin vidalı mil üzerine yerleşim düzeni.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, elde edilen bulgular ışığında veriler detaylı olarak irdelenmiştir. Paralel ve zıt akış konuları ayrı bir biçimde ele alınmıştır. Hava hızının basınç kaybı, sürtünme faktörü ve nusselt sayısına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, türbülator engel sayısının, türbülator açısının ve türbülator üzerindeki delik sayılarının da etkileri incelenmiştir.

5.1. Hava Hızının Basınç Kaybı Üzerine Olan Etkisi

Türbülatorlü ısı değıştircilerinde, havanın türbülator engellerine çarpması ile hava hızı bir miktar düşer. Bu nedenle, ısı değıştircisine giren hava ile çıkan hava arasında basınç farklılığı meydana gelir.



Şekil 5.1. Tüm türbülator tiplerinde hava hızının basınç farkı üzerine olan etkisi.

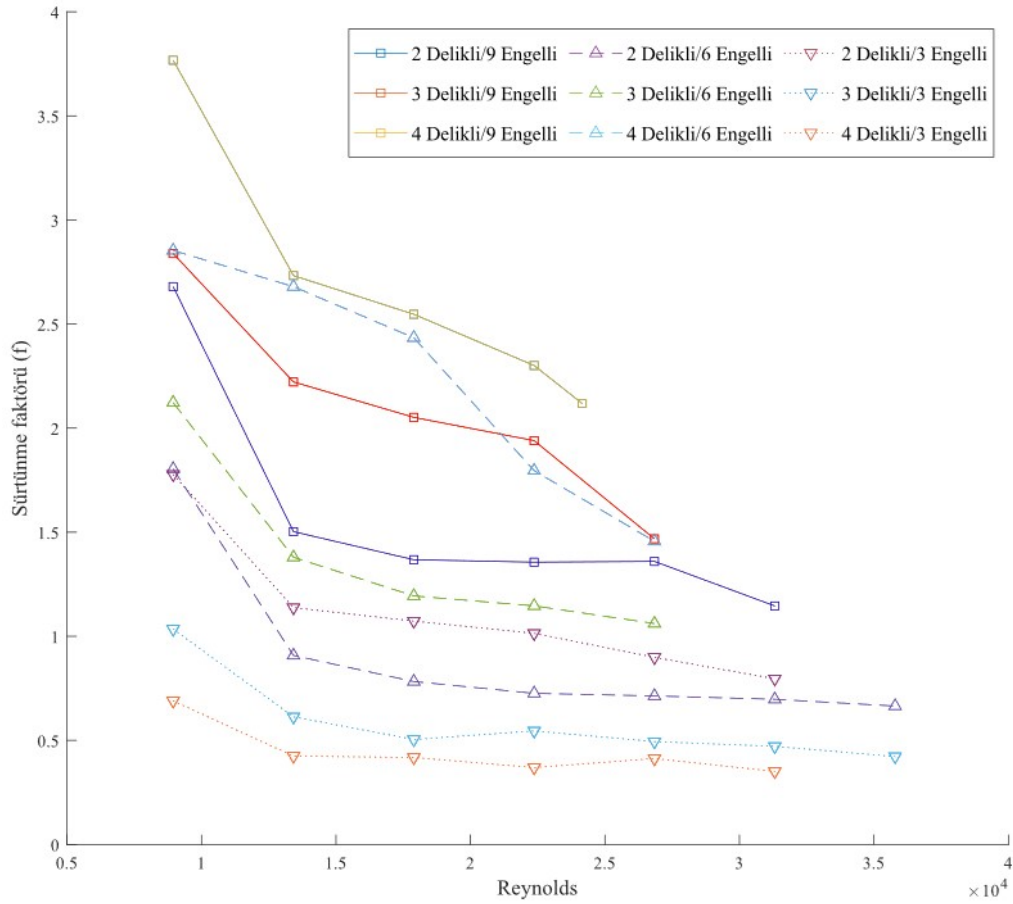
Isı değiştirici girişi ve çıkışı arasında basınç farkının yüksek olması istenmeyen bir durumdur. Çünkü, yüksek basınç farkı daha fazla kompresör gücüne ihtiyaç duyulacağı anlamına gelir. Ayrıca, kontrolsüz yüksek basınç sistem tasarımıni daha yüksek maliyetlerin oluşmasına sevk eder. şekil 5.1 tüm türbülatör tiplerinde hava hızının basınç farkı üzerine olan etkisini göstermektedir. Buna göre, en az türbülatör engel sayısına ve en fazla delik sahip türbülatör sistemi en düşük basınç farkını vermektedir. Ölçülen basınç farkı en düşük 30 Pa olarak 2.5 m/sn hızında 4 delikli ve 3 engelli türbülatör sisteminde elde edilmiştir. Hava hızı arttı basınç farkı artmıştır.

Daha fazla engel sayısı ve türbülatör üzerindeki deliklerin azalması uygulanan hava hızının azalmasına ve basınç farkının en yüksek seviyeye ulaşmasına sebep olur. Bu nedenle, 2 delikli ve 9 engelli türbülatör sisteminde en yüksek hava basınç farkı elde edilmiştir. En yüksek hava basınç farkı 5.5 m/sn hızda 565 Pa olarak llmştir.

Hava basınç farkı yükseldikçe, kayıplar artmış ve dolayısıyla hava pompasının uyguladığı g istenilen hava hızını karşılamada yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, yüksek basınç farkı oluşan deneylerde yüksek hava hızlarına ulaşılamamıştır. En yüksek basınç farkı 2 delikli ve 9 türbülatör engelli sistemde elde edilmiştir. Aynı zamanda, bu sistemde aynı pompa gücü ile uygulanan en yüksek hava hızı 5.5 m/sn olmuştur. Türbülatör engeli sayısı ve türbülatör üzerindeki delik sayısı azaldıkça oluşan basınç kaybı farkı azalmış ve uygulanabilen hava hızları artmıştır.

5.2. Reynolds Sayısının Sürtünme Katsayısına Etkisi

Sürtünme katsayısı hava hızının karşılaştığı engellerin oluşturduğu direncin bir ölçüsüdür. Bu sayede, deneyler esnasında oluşan akışkan direnci sayısal olarak ifade edilebilmektedir. Hava hızı arttı Reynolds sayısı da artmaktadır. şekil 5.2'de 30° türbülatör açısında gerçekleştirilen deneylerde Reynolds sayısının sürtünme faktörü üzerine olan etkisi gösterilmektedir. Buna göre, delik sayısı arttı havanın gösterdiği direnç miktarı azalmıştır. Benzer şekilde, engel sayısı azaldıkça sürtünme katsayısında azalma meydana gelmiştir.

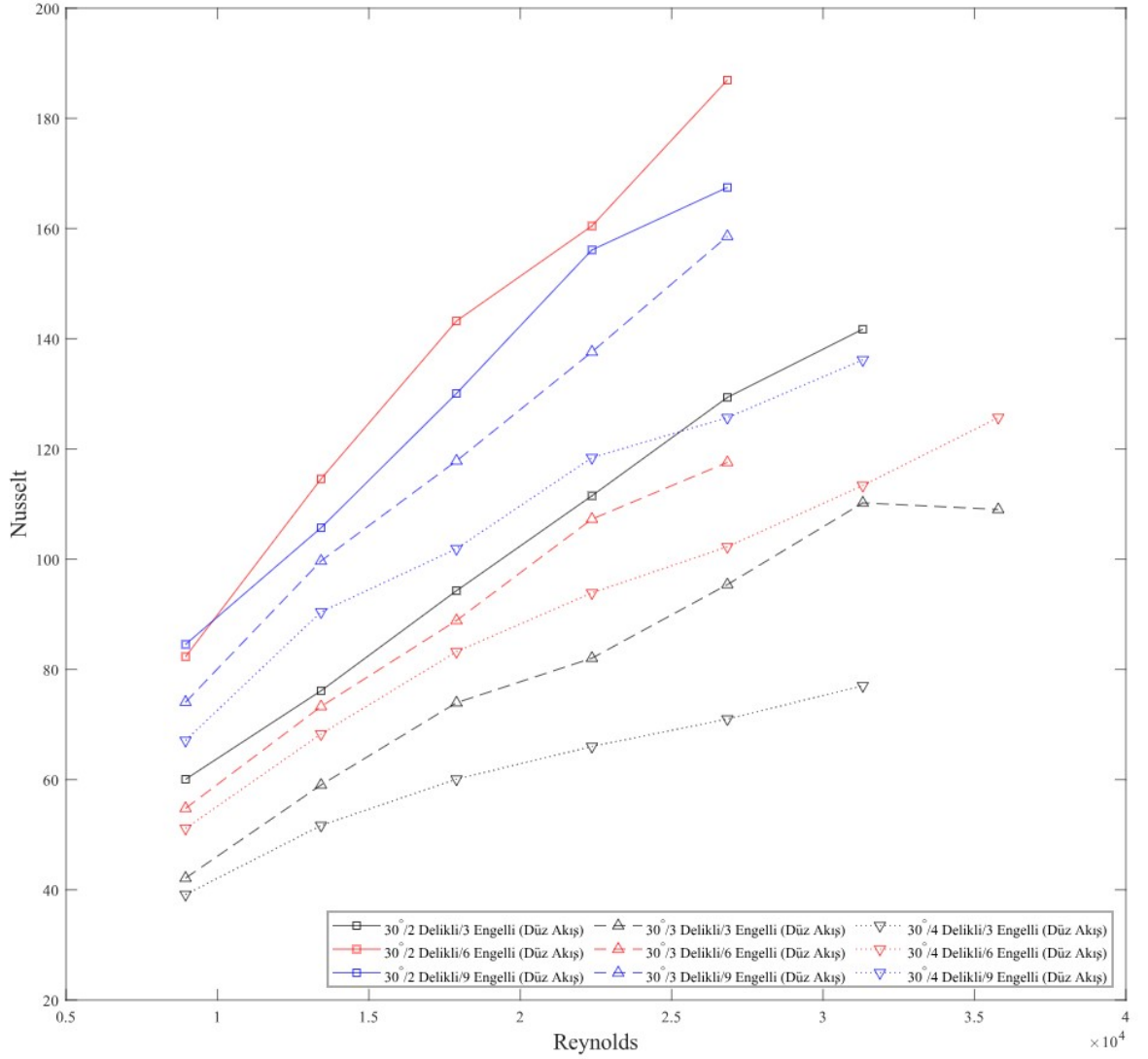


Şekil 5.2. 30° türbülötör açısında Reynolds sayısının sürtünme katsayısı üzerine olan etkisi

En yüksek sürtünme değeri 30° türbülötör açısında 9 türbülötör engeli ve 2 delikli türbülötör sisteminde meydana gelmiştir. Hesaplanan en yüksek sürtünme faktörü (f) değeri 3.72 olarak en düşük hava hızı olan 2 m/sn hava hızında ve 9862 Reynolds sayısında elde edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça meydana gelen sürtünme miktarı azalmıştır. Diğer taraftan, hava hızı arttıkça hava basınç kaybı en yüksek olarak ölçülmüştü. Bu nedenle, sürtünme katsayısı ve basınç farkı arasında ters bir orantı oluşmuştur.

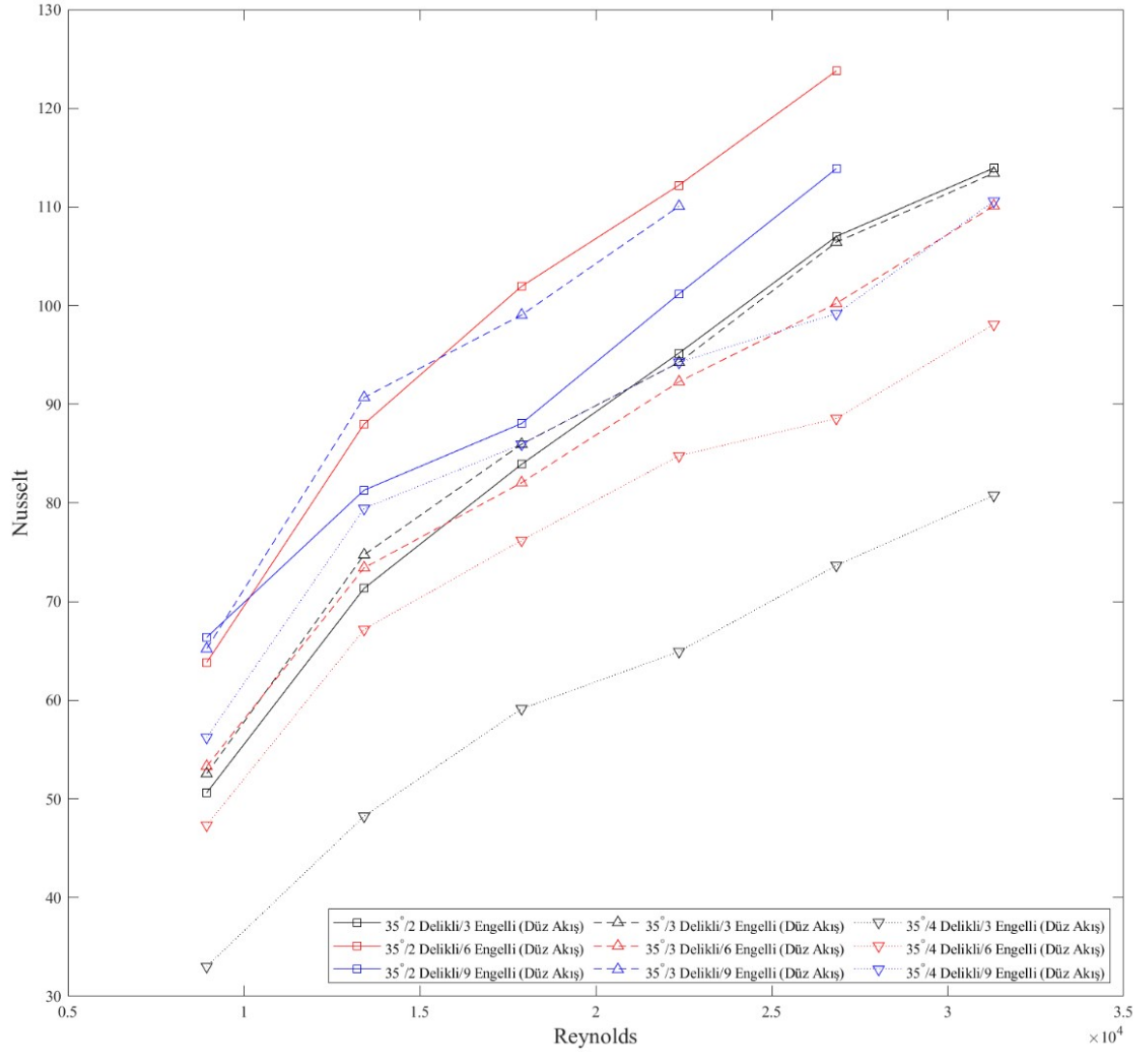
5.3. Düz (Paralel) Akışta Nu/Re İlişkisi

Paralel akış boru çapı dışında ve boru çapı içindeki akışın aynı yönde olduğu akış tipidir. Nusselt sayısı, türbülötör ile elde edilen ısı verimini ifade etmenin bir yoludur. Nusselt sayısı, ısı taşınım transfer katsayısının ısı iletim katsayısına olan bir orantıdır.



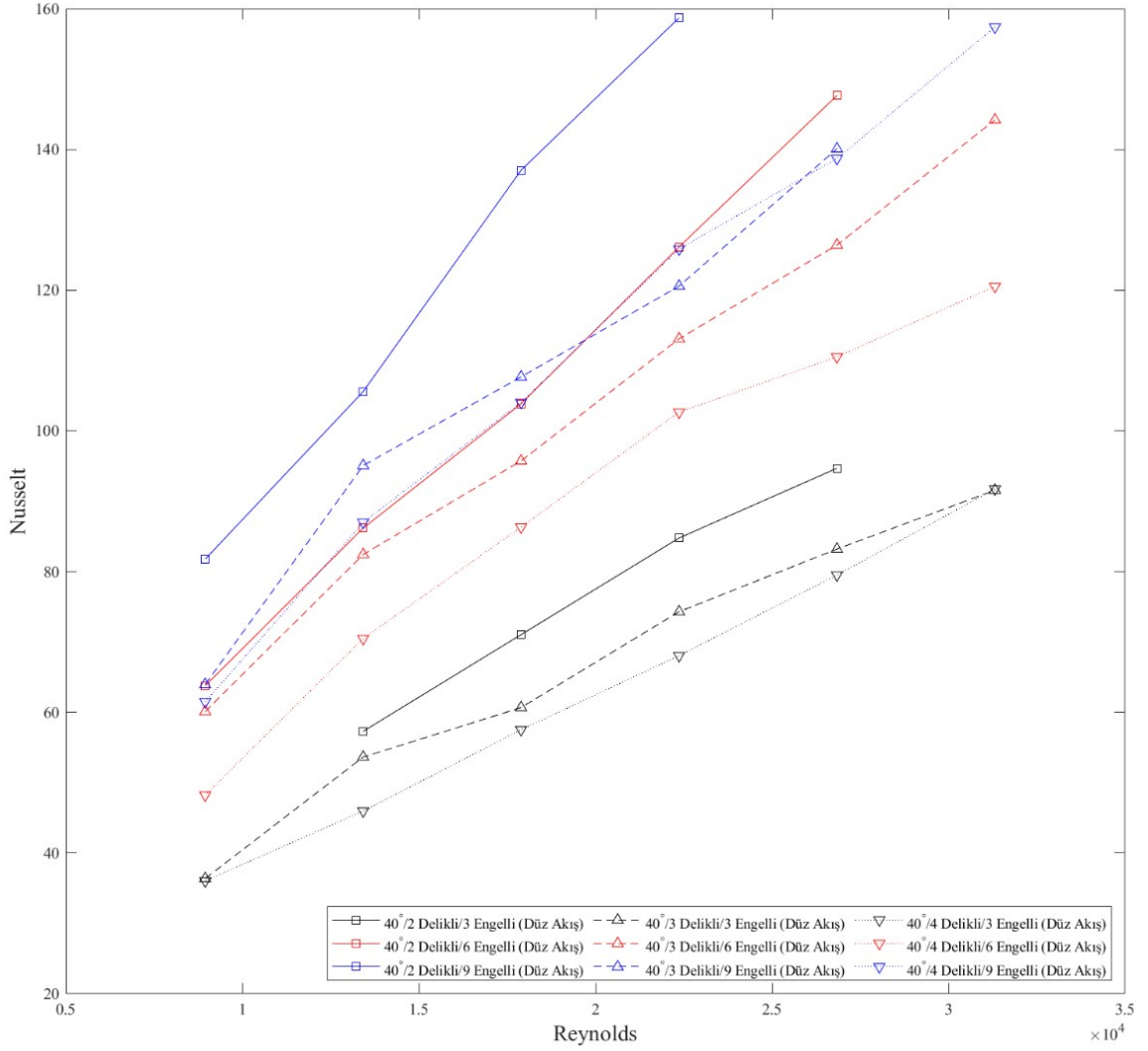
Şekil 5.3. Düz akışta ve 30° türbülötör açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

Şekil 5.3'te 30° koniklik açısına sahip türbülötörlerde Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi gösterilmektedir. Buna göre, en düşük nusselt sayıları hava miktarını en fazla geçiren ve en az engeli olan türbülötör setlerinde gerçekleşmiştir. Türbülötör engel sayısının artması ve türbülötör üzerindeki delik sayısının azalmasıyla türbülötörler daha yüksek taşınım yaparak Nusselt sayısı yükselmiştir. Ancak, engel sayısı arttıkça ve delik sayısı azaldıkça pompalanan havanın basıncında artış meydana gelmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur. Pompa için gerekli olan enerji miktarı elde edilen verimi azaltacaktır. 30° koniklik açısına sahip türbülötör setlerinde elde edilen en yüksek Nusselt sayısı 39.14 olarak 3 engelli ve 4 delikli türbülötörlerden gerçekleşmiştir. En yüksek Nusselt değeri ise 186.95 olarak 2 delikli ve 6 engel sayısına sahip türbülötör setinde elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Düz akışta ve 35° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

Şekil 5.4'te 35° koniklik açısına sahip türbülatorlerde Reynolds sayısının Nusselt sayısına etkisi gösterilmektedir. En yüksek ve en düşük Nusselt sayıları sırasıyla 33.01 ve 123.79 olarak elde edilmiştir. En düşük nusselt sayısı 8946 Reynolds değerinde 4 delikli ve 3 türbülator engelli setlerde elde edilmiştir. Buna karşın, En yüksek Nusselt sayısı 26839 Reynolds değerinde 2 delikli 6 türbülator engelli setlerde elde edilmiştir.

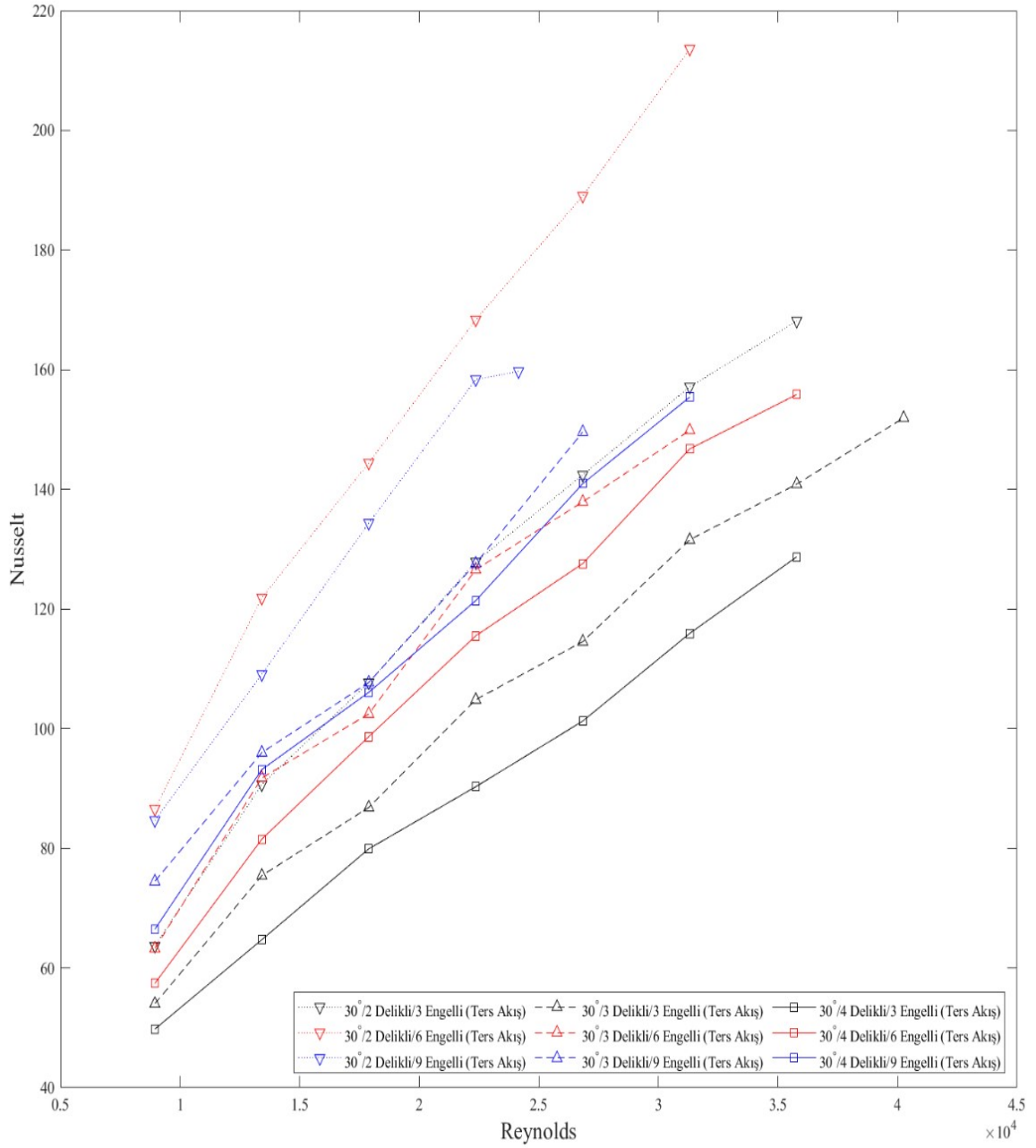


Şekil 5.5. Düz akışta ve 40° türbülötör açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

Şekil 5.5'te 40° koniklik açısına sahip türbülötörlerde Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi gösterilmektedir. 40 ° koniklik açısına sahip türbülötörler de benzer şekilde düşük engel sayısında en düşük Nusselt sayısını, en yüksek engel sayılarında ise en yüksek Nusselt sayısını vermiştir. En düşük Nusselt sayısı 36.02 olarak 4 delikli ve 3 engelli türbülötör setlerinde elde edilmiştir. Buna karşın, en yüksek Nusselt sayısı ise 158.70 olarak en fazla hava engeline sahip olan 2 delikli ve 9 engelli türbülötör setlerinde elde edilmiştir.

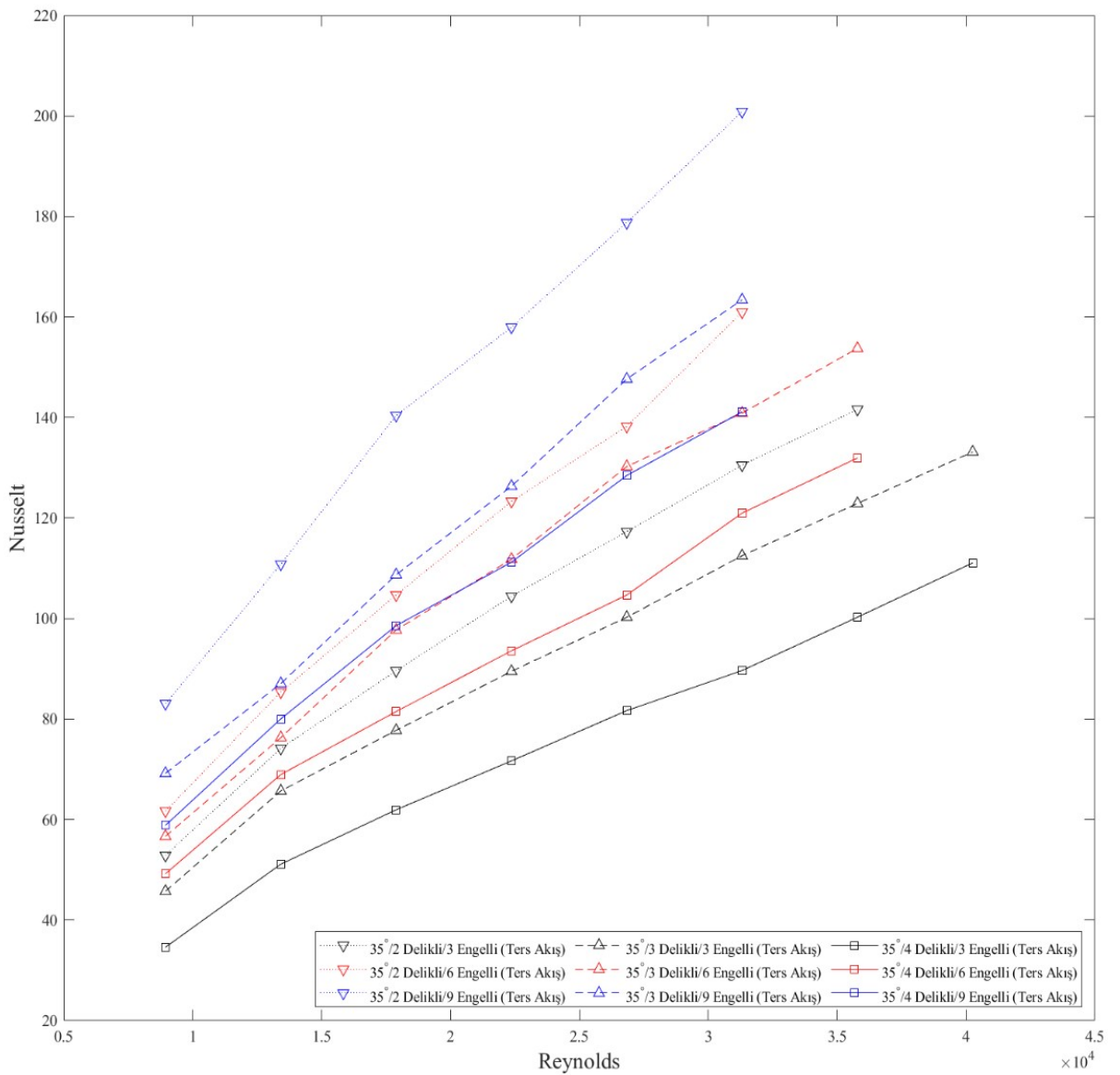
5.4. Ters (Zıt) Akışta Nu/Re İlişkisi

Zıt (Ters) akış ısıtıcı akışkan ile ısınan akışkanın ters hareket ettiği ısı değiştirici tipidir. Isıtıcı buhar, hava pompası tarafından uygulana havaya karşı ters yöndedir. Zıt akış ile düz akışa kıyasla daha yüksek ısı transfer verimliliği elde edilebilir. Ayrıca, zıt akışta buhar tarafından ısıtılan boru dış yüzeyinin ısı profili daha homojen bir dağılım sağlayabilmektedir. Bu nedenle ısı transferi uygulamalarında sıklıkla uygulanmaktadır.



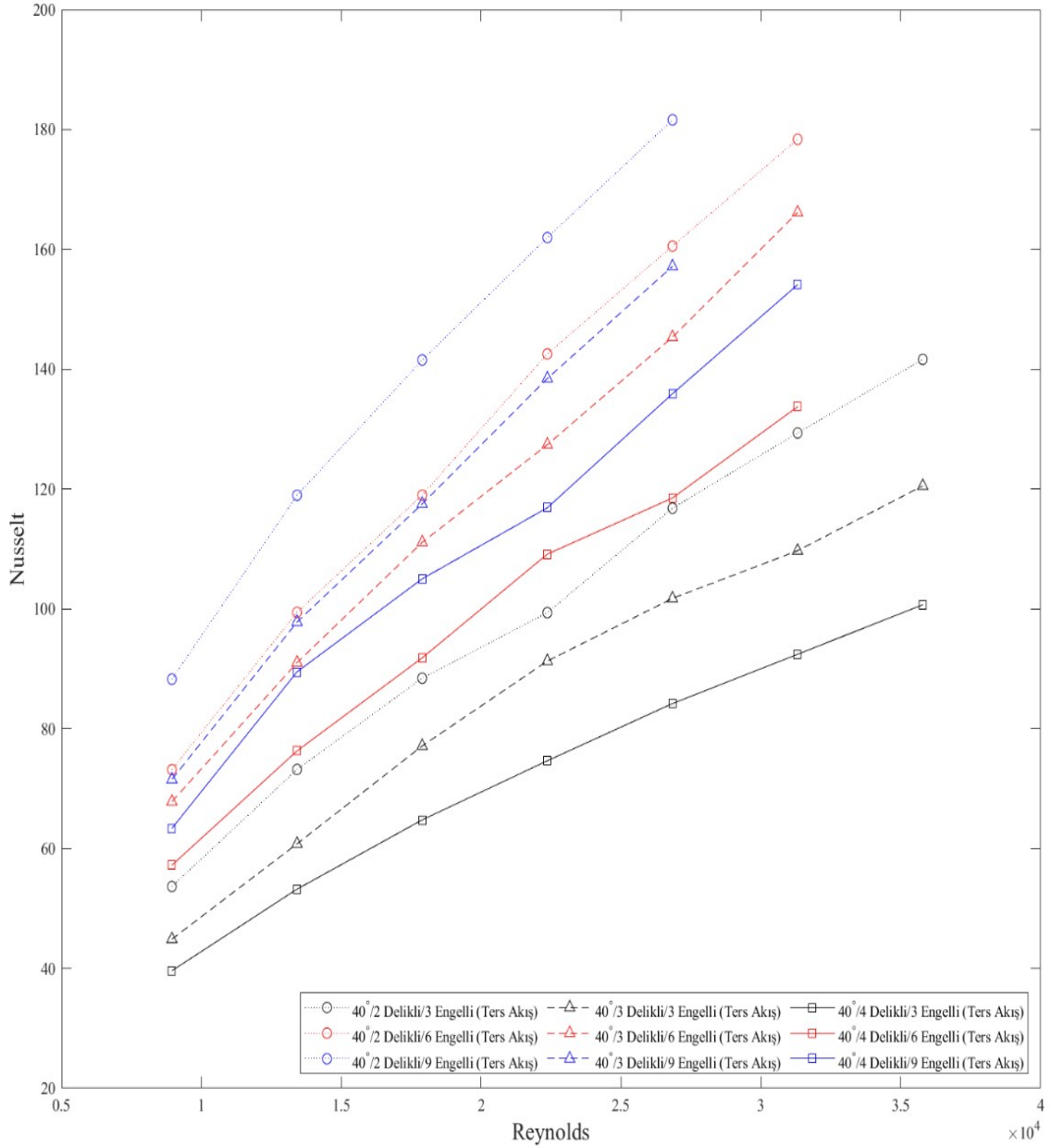
Şekil 5.6. Zıt akışta ve 30° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

Şekil 5.6’de zıt akışta ve 30° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi gösterilmektedir. En yüksek Nusselt sayısı 213.62 olarak 31313 Reynolds sayısında 2 delikli ve 6 engelli türbülator setlerinde elde edilmiştir. 2 delikli ve 9 engelli türbülator setlerine çok yakın Nusselt değeri sergilemiştir. Ancak basınç farkının çok yüksek olması ve motor gücünün buna yetmemesi neticesinde, 24155 reynolds değerine kadar çıkılabilmektedir. Deneyler motor gücünün yettiği noktaya kadar ile sınırlandırılmıştır. Daha yüksek Reynolds sayılarına çıkmak için daha büyük motor bulunsa da basınç farkının yüksek olması sebebiyle deneyler bu noktada sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.7. Zıt akışta ve 35° türbülator açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

Zıt akışta ve 35° türbülör açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Buna göre en düşük ve en yüksek Nusselt değeri sırasıyla 32.84 ve 203.62 olarak elde edilmiştir. En yüksek Nusselt değeri 31313 Reynolds sayısında 2 delikli ve 9 engelli türbülör setlerinde elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük Nusselt değeri en az hava direncine sahip olan 4 delikli 3 engelli türbülör setlerinde 8946 reynolds değerinde elde edilmiştir.



Şekil 5.8. Zıt akışta ve 40° türbülör açısında Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi.

40° türbülator koniklik açısında ve zıt akış deneylerinde Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerine olan etkisi Şekil 5.8’da gösterilmektedir. 40° türbülator koniklik açısında elde edilen en yüksek Nusselt değeri 2 delikli 9 engelli sette 181.62 olarak 26839 Reynolds değerinde elde edilmiştir. 40° türbülator koniklik açısında elde edilen en düşük Nusselt değeri 4 delik 3 engelli sette 39.61 olarak 8946 reynolds değerinde elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı açılarda ve farklı adette hava kanallarına sahip koni tip türbülatorlerin ısı transferi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Koniklik açıları 30° , 35° ve 40° olacak şekilde 3 set halinde tasarlanmıştır. Hava kanalı adetleri ise 2, 3, ve 4 adet olmak üzere üç farklı tasarıma sahiptir. Türbülatorün boru içerisine yerleşimi ise 3, 6, ve 9 set olacak şekilde ve hava kanalları birbirlerini görmeyecek şekilde sıralanmıştır. Hava akış hızları 2m/sn ile 10m/sn arasında kullanılmıştır. Türbülator koniklik açısı, hava kanal sayısı ve sıralama yerleşiminin kombinasyonlarının tümü göz önüne alınarak boru içerisinde ısı transfer deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Hava hızının (5.5 m/sn) ve türbülator engel sayısının artması (2 delik 9 engel) ile ΔP basınç farkı artmıştır. Aynı zamanda türbülator üzerindeki delik sayısı arttıkça ve engel sayısı azaldıkça (4 delikli 3 engel) ΔP de azalma meydana gelmiştir. Şekil 5.1. Bu azalmanın en büyük nedeni havanın sürtünme miktarının azalmasıdır. Şekil 5.2
- Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktöründe azalma (4 delikli 3 engel) meydana gelmiştir. Şekil 5.2
- Sürtünme faktörü üzerine en önemli etki birincil olarak engel sayısıdır. Ardından ikinci en etkili faktör türbülator üzerindeki delik sayısı olarak saptanmıştır.
- Basınç farkı ve sürtünme değerleri deneylerinde paralel ve zıt akış koşullarında birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Örneğin zıt akışta 30° açılı 3 boşluklu ve 3 engelli 3m/sn hava hızında basınç farkı ΔP 0.52 Pa değeri bulundu. Aynı koşullarda paralel akışta basınç farkı ΔP 0.515 Pa bulundu. Bu nedenle, bu deneylerde sadece düz akış göz önüne alınmıştır.

- Paralel akışta en yüksek nusselt sayısı değeri 30° koniklik açısında 186.95 değeri ile 2 delikli 6 adet türbülatorlü dizilimde elde edildi. Zıt (ters) akışta yüksek değer ise 30° koniklik açısında 213.62 nusselt sayısı 2 delikli 6 adet türbülatorlü dizilimde elde edildi. Bu sonuçlara göre en iyi verim zıt akışta olduğu görüldü.
- Paralel akışta en düşük Nusselt sayısı 35° açıda 33.01 değeri ile 4 delikli 3 engelli türbülatorde, zıt akışta ise 35° açıda 34.06 değeri ile 4 delikli 3 engelli türbülator setinde meydana gelmiştir.
- Türbülator engel sayısının artması (6 engel) ve türbülator üzerindeki delik sayısının azalmasıyla (2 delik) türbülatorler daha yüksek taşınım yaparak Nusselt sayısı yükselmiştir.
- Deneyde türbülator koniklik açıları 30° , 35° ve 40° olarak kullanıldı. Koniklik açısı azaldıkça (30°) nusselt sayısında her iki akış türünde de artış meydana gelmiştir.

6.2 Öneriler

Konik tip türbülatorlerin kullanımı ile boru içerisinde yüksek ısı transferi verimi elde edilmiştir. Deneyde en yüksek verim zıt akışta 30° koniklik açısında 2 delikli 6 engelli dizilimde 213.62 nusselt sayısında elde edilmiştir. Paralel akışta en yüksek verim aynı dizilim ve açı setinde 186.95 nusselt sayısında elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre zıt akış maksimum ısı transfer verimi vermekte ve paralel akışa göre %15 daha verimli olduğu görüldü. Ancak, türbülator içerisinde havanın tahliyesini gerçekleştirmek için delikler bulunsa da bir miktar basınç düşüşüne neden olmuştur. Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki maddeler gelecekteki çalışmalar adına önerilmektedir;

- Türbülator üzerinde daha fazla hava akışını sağlamak için daha çok delik sayısı koyulabilir.

- Türbülatör koniklik açısı düşürülerek ($<30^\circ$) yeni deneyler yapılabilir.
- Türbülatörler ters takılarak havanın girdap oluşturarak ısı transferini gerçekleştirmesi araştırmaya değer bir konudur.

KAYNAKLAR

- Altun, Ö., & Böke, E. (2009). Isıl Engelleyici Kaplamaların Etkin Isı İletim Katsayısının Teorik Olarak Belirlenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 139–152.
- Altun, Ö., & Gürkan, İ. (2009). Gözenekli Malzemelerde Isı İletim Katsayısının ve Kritik Yarıçapın Değişimi. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 01, 79–86.
- Argunhan, Z., & Yıldız, C. (2006). Dikdörtgen delikli türbülatorlerde delik sayısının ısı geçişine ve basınç düşüşüne etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 243–247.
- Art Enerji. (2024, 10 Eylül). <http://www.artenerji.com/v3/buhar-turbini-sektorel-uygulamalar>
- Ata, İ., & Acır, A. (2020). Hava Akışkanlı Güneş Kollektöründe Isı Transferi İyileştirmesine Etki Eden Parametrelerin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 527–535. <https://doi.org/10.2339/politeknik.525884>
- Babcock&Wilcox. (2024, 10 Eylül). Babcock&Wilcox. <https://www.babcock.com/home/environmental/spig-cooling-systems/hybrid-cooling-systems/>
- Baysal, E., Solmaz, Özgürkten, M., & Başeski, Y. (2021). İç İç Borulu Isı Değiştiricide Zıt Akışta Türbülator Kullanımının Basınç Değişimine Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2021(2), 817–826. <https://doi.org/10.31202/ecjse.871896>
- Behçet, R., Cumali, K., & Aydın, H. (2009). Isı değiştiricisine yerleştirilen pervane tipi türbülatorün ısı transferi üzerindeki etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009.
- Ben Khedher, N., Mehryan, S. A. M., Medani, M., Selim, M. M., Elbashir, N. B. M., & Boujelbene, M. (2024). Enhancing the efficiency of a double tube heat exchanger via a novel vibrating woven wire turbulator combined with a helical coiled wire; an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 248(PA), 123121. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123121>
- Boran, K., Daştan, F., Şahin, H. M., & Aktaş, M. (2014). Isı Eşanjörlerinde Isı Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 17(4), 183–191. <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33072/368024>
- Bulgurcu, H., & Koçyiğit, N. (2019). Kapalı Çevrim Soğutma Kulelerinde Enerji Verimliliği. *Termodinamik*, 6, 68–72.

- Çelik, H. S., Uçar, M., & Erbay, B. (2019). Bir şofben eşanjörünün boru iç yüzeylerine elips boşaltmalı kanatlı türbülator eklenmesinin şofben verimine olan etkisi. *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 1149–1167.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2017). *Thermodynamics An Engineering Approach* (Fifth Edit, Vol. 6, Issue 1). Mc Graw Hill.
- Çeri, B., & Koca, T. (2022). Farklı Açılı Kanatçıklara Sahip Türbülatorlerin Gaz Yakıtlı Kazanda Kullanımının Isı Transferine Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 35, 161–167. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1077986>
- Çıtlak, A., Demirpolat, A. B., & Das, M. (2019). Katı Yakıtlı Bir Kazanda Isı Transferi İyileştirmeleri ve Basınç Farkının Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 371–380. <https://doi.org/10.35234/fumbd.509198>
- Çulcu, B. (1998). Yeni tip türbülatorlerin ısı transferine ve basınç kayıplarına olan etkilerinin araştırılması. [Yüksek lisans tezi] Fırat Üniversitesi.
- Demir, M. E. (2022). Silindir tipi türbülatorlerin ısı transferi performansının analizi. [Yüksek lisans tezi] Batman Üniversitesi.
- Demiray, M. (2023). Farklı Malzemelerden Üretilen Türbülatorlerin Isı Kazancına Etkisinin Deneysel Analizi. [Yüksek lisans tezi] Batman Üniversitesi.
- DRC Makine. (2024, 10 Eylül). DRC makine. http://www.drc-makine.com/Urun_Detay.aspx?id=1038
- Durmuş, A. (1993). Dönmeli akış içeren dönen borulu ısı değiştiricisinde ısı transferi ve akışın incelenmesi. [Doktora tezi] Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- E-OkulTV. (2024, 10 Eylül). E-Okul TV. <https://www.eokultv.com/enerji-iletim-yollari-ve-enerji-iletim-hizi/14150>
- El-dean, A. S., Hassan, O., & Shafey, H. M. (2022). Heat transfer characteristics of two-phase flow in a double-layer microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 132, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105899>
- Gao, X., & Sundén, B. (2001). Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular ducts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24(1–2), 25–34. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(00\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00054-6)
- Göçücü, A. (2020). İki Fazlı Akışta Halka Türbülatorlerin Isı Transferine Etkisinin Deneysel İncelenmesi. [Yüksek lisans tezi] Atatürk Üniversitesi.
- Goel, V., Wang, W., & Sunden, B. (2024). Advances in Heat Transfer Augmentation Techniques in Single-Phase Flows. In *Advances in Heat Transfer Augmentation Techniques in Single-Phase Flows*. <https://doi.org/10.1201/9781003229865>

- Granger, R. A. (1994). Experiments in heat transfer and thermodynamics. Cambridge University Press.
- Gunes, S., Manay, E., Senyigit, E., & Ozceyhan, V. (2011). A Taguchi approach for optimization of design parameters in a tube with coiled wire inserts. *Applied Thermal Engineering*, 31(14–15), 2568–2577. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.022>
- Göloğlu, A. (2023). Levha Tipi Türbülatorlerin Isı Transferi Ve Akış Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi, [Yüksek lisans tezi] Batman Üniversitesi
- Haile, J. M., & O’Connell, J. P. (2005). Thermodynamics Fundamentals for Applications. In Cambridge University Press.
- Halıcı, F., & Gündüz, M. (2013). Örneklerle Isı Geçişi (Genişletil). Birsen Yayınevi.
- İmal, M. (2022). Hiperbolik Soğutma Kulelerinin Soğutma Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Değerlendirilmesi. *European Journal of Science and Technology*, 46, 1–8. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1134400>
- İşıker, Y., & Yeşilata, B. (2017). Yapı Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Tespitine Yönelik Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 01, 14–21.
- Jeotes. (2024, 10 Eylül). <https://jeotes.com/jeotes-plakali-isi-degistirici-parcalari>
- Karagöz, Ş., Çiltaş, S., Yıldırım, O., & Erdogan, S. (2019). Yatay Borularda Türbülatorlerin Isı Transferine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 306–316. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.459957>
- Khachan, J. (2018). Heat transfer through conduction, convection, and radiation. In Thermal Properties of Matter (pp. 3–12). Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.1088/978-1-6817-4585-5ch3>
- Kilicaslan, I., & Ibrahim Sarac, H. (1998). Enhancement of heat transfer in compact heat exchanger by different type of rib with holographic interferometry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 17(4), 339–346. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(98\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(98)00006-5)
- Kilinç, F., & Uygun, C. Z. (2022). Exergy Analysis of Graphene-Based Nanofluids in a Compact Heat Exchanger. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 42(1), 101–112. <https://doi.org/10.47480/isibted.1107466>
- Kılıç, B. (2016). Organik Rankine Çevriminin Ekserji Verimi Analizi. *Mesleki Bilimler Dergisi*, 5(2), 1–5.

- Kılıç, B. (2017). Farklı Plaka Yüzey Açısına Sahip Plakalı Isı Değiştiricilerin Ekserji Analizi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 283–290. <https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen/issue/57120/805830>
- Kurtbaş, İ., Gülçimen, F., Durmuş, A., & Durmuş, A. (2002). The effect of conical turbulators to heat transfer and exergy loss located in flow field in a pipe which has constant surface temperature. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 175–184.
- Lawton, B., & Klingenberg, G. (1996). Heat Transfer By Conduction And Convection. In A. Ahsan (Ed.), *Transient Temperature in Engineering and Science* (Vol. 1, pp. 45–99). Oxford University Press Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198562603.003.0002>
- Liaw, K. L., Kurnia, J. C., & Sasmito, A. P. (2024). Enhancing supercritical carbon dioxide heat transfer in helical tube heat exchangers with twisted tape inserts: A computational investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227(October 2023), 125598. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125598>
- Liu, M., Liu, S., Huang, Y., Zheng, R., Yuan, H., Wang, J., Gong, H., Wang, Y., & Huang, S. (2024). Pool heat transfer studies of near-critical and supercritical carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 229(January), 125669. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125669>
- Maxwor. (2024, 10 Eylül). <https://www.maxwor.com/product/govde-borulu-esanjorler>
- Negeed, E. S. R., Alhazmy, M., Abulkhair, H., Attar, H. M., & Hedia, H. S. (2023). Numerical simulation of dual-tube heat exchanger equipped with an innovative turbulator containing two-phase hybrid nanofluid: Hydrodynamic and exergy analysis. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 155(June), 1059–1068. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.07.025>
- Ökmen, A. B., & Gübü, H. (2021). Cfd analysis of optimum exhaust heat exchanger arrangement in thermoelectric generator designed for exhaust waste heat recovery of spark ignition engine. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(2), 1060–1080. <https://doi.org/10.31202/ecjse.910782>
- Onur, N. (2023). Introduction to Convective Heat Transfer A Software-Based Approach Using MAPLE and MATLAB. In *Jurnal Sains ITS*. Wiley. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006>
- Özhan, A. (2012). Duman Borulu Kazanlarda Duman Borularında Isı Transferini İyileştirme Yöntemlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. [Yüksek lisans tezi] Gazi Üniversitesi.
- Pourahmad, S., Pesteei, S. M., Ravaei, H., & Khorasani, S. (2021). Experimental study of heat transfer and pressure drop analysis of the air/water two-phase flow in a double tube heat exchanger equipped with dual twisted tape turbulator:

- Simultaneous usage of active and passive methods. *Journal of Energy Storage*, 44(PB), 103408. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103408>
- RSR Enerji. (2024, 10 Eylül). <https://rsrenerji.com/blog/kanatli-boru-malzemeleri>
- Şahin, H. M., Dal, A. R., & Baysal, E. (2007). 3-D Numerical study on the correlation between variable inclined fin angles and thermal behavior in plate fin-tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 27(11–12), 1806–1816. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.011>
- Samancı, A., Altınışik, K., & Sertkaya, A. ali. (2011). Çift Fazlı Güneş Enerjisi Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Teorik ve Deneysel İncelenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 10(1), 74–85. <http://sutod.selcuk.edu.tr/sutod/article/view/103%0Ahttp://sutod.selcuk.edu.tr/sutod/article/download/103/425>
- Sandas Makine. (2024, 10 Eylül). <https://sandasmakine.com/urunler/spiral-isi-degistirici/>
- Şimşek, E., Bilgili, M., Yaşar, A., & Şahin, B. (2012). Influences of the Plugging in Condenser Coils and Evaporator Filters on the Performance of Wall Type Split Air Conditioning System. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 27(2), 375–383.
- Sun, K., Liu, D., Mansir, I. B., Chen, X., Guo, C., Zhao, W., & Ghouschi, S. P. (2023). Experimental study of the hydrothermal characteristics of copper tube in the presence of the multi-string and multi-strip magnetic turbulator. *Applied Thermal Engineering*, 228(March), 120471. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120471>
- Sungur, B., & Topaloğlu, B. (2018). Boru İçine Yerleştirilen Konik Türbülator Sayısının Nümerik Optimizasyonu. *NWSA Academic Journals*, 13(3), 208–218. <https://doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.3.2A0151>
- Taşpınar, E., & Öztürk, A. (2022). Motorlu Taşıtlarda Kullanılan Ek Isıtıcıların Egzoz Gazlarındaki Atık Isı Enerjisinin Geri Kazanılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 482–494.
- Tavousi, E., Perera, N., Flynn, D., Hasan, R., & Rahman, M. (2024). International Journal of Heat and Fluid Flow Effect of novel turbulators on the hydrothermal performance of counterflow double tube heat exchanger using nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 107(May), 109427. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109427>
- Turgut, E. (2020). Dairesel kesitli türbülans üreticilerinin ısı performansının araştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(2), 481–490. <https://doi.org/10.24012/dumf.511382>
- Uddin, N. (2024). Heat Transfer: A Systematic Learning Approach. In Heat Transfer: A Systematic Learning Approach. <https://doi.org/10.1201/9781003428404>

- Ünverdi, M., & Küçük, H. (2019). Performance comparison of plate heat exchangers designed using Taguchi method and Computational Fluid Dynamics. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(4), 373–386. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.35493>
- Wang, G., Hai, T., Paw, J. K. S., Pasupuleti, J., & Abdalla, A. N. (2023). Numerical and ensemble machine learning-based investigation of the energy and exergy yields of a concentrating photovoltaic thermal device equipped with a perforated twisted tube turbulator. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 155(June), 754–765. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.06.033>
- Yakut, K., & Sahin, B. (2004). The effects of vortex characteristics on performance of coiled wire turbulators used for heat transfer augmentation. *Applied Thermal Engineering*, 24(16), 2427–2438. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.008>
- Yıldız, H. (2023). Isı Borusu Kullanılan Türbülötörlerin Isı Transferlerine Olan Etkisinin Deneysel Analizi. [Yüksek lisans tezi] Batman Üniversitesi