

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GIDA TEKNOLOJİSİ PROGRAMI

HİBRİT PASTÖRİZASYON SİSTEMİ İÇİN BİR ISITICININ
TASARLANMASI VE TERMOEKONOMİK
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yunus Emre KAZAZ

Danışman

Doç. Dr. Tuncay YILMAZ

İl. Danışman

Doç. Dr. Anıl BAŞARAN

MANİSA-2024

YUNUS
EMRE
KAZAZ

HİBRİT PASTÖRİZASYON SİSTEMİ İÇİN BİR ISITICININ
TASARLANMASI VE TERMOEKONOMİK PERFORMANSININ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Yunus Emre KAZAZ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Yunus Emre KAZAZ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tuncay YILMAZ

İkinci Danışman: Doç. Dr. Anıl BAŞARAN

Bu çalışmada, yenilikçi hibrit pastörizasyon sisteminde kullanılmak üzere tasarlanan bir ısıtıcının termoekonomik performansı incelenmiştir. Araştırma kapsamında, daldırmalı rezistans ısıtıcı kullanılarak ısıtılan bir sistem tasarlanmış ve bu sistem üzerinden deneysel veriler elde edilmiştir. Bu deneysel veriler, sistemin enerji verimliliği ve ekserji performansı üzerine analizler yapılmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen ekserji analizi sonucuyla, sistemin ekonomik performansını değerlendirmek amacıyla termoekonomik analiz yapılmıştır. Ayrıca, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizi ile sistemin farklı karıştırıcı ve debi koşullarındaki termal davranışları incelenmiş, böylece sistemin performansının akış koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiği de değerlendirilmiştir. CFD analizleri, konjuge ısı transferi prensipleri doğrultusunda yapılmış ve sistemdeki kazanın üç boyutlu modeli oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Hem deneysel analizlerde hem de CFD simülasyonlarında sıvı gıda maddesi olarak su kullanılmıştır. Yapılan CFD analizleri sonucunda, sistemin ısı transferi performansı ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

Çalışma sonunda ekserji verimliliği düşük bulunmuştur. Ancak termoekonomik analiz sonucunda bulunan birim fiyat başına enerji maliyetinin de düşük bir miktar olduğu görülmüştür. Bu durumda kayıpların maliyet üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Pastörizasyon, Enerji verimliliği, Ekserji verimliliği, CFD analizi, Termoekonomik Analiz

2024, 71 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Yunus Emre KAZAZ

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Education

Department of Food Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Tuncay YILMAZ

Co-Supervisor: Doç. Dr. Anıl BAŞARAN

In this study, the thermoeconomic performance of a heater designed for use in an innovative hybrid pasteurization system was examined. Within the scope of the research, a system heated by an immersion resistance heater was designed, and experimental data were obtained from this system. These experimental data enabled analyses of the system's energy efficiency and exergy performance. Based on the results of the exergy analysis, a thermoeconomic analysis was conducted to evaluate the economic performance of the system. Furthermore, Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was performed to investigate the thermal behavior of the system under different mixing and flow conditions, allowing for the evaluation of performance variations depending on flow dynamics. The CFD analyses were conducted in accordance with conjugate heat transfer principles, and a three-dimensional model of the system's tank was developed for the analyses. Water was used as the liquid food medium in both experimental analyses and CFD simulations. The CFD analyses provided insights into the system's heat transfer performance and temperature distributions.

At the end of the study, the exergy efficiency was found to be low. However, the thermoeconomic analysis revealed that the energy cost per unit price was also relatively low. This indicates that the impact of losses on costs is minimal.

Keywords: Pasteurization, Energy Efficiency, Exergy Efficiency, CFD Analysis, Thermoeconomic Analysis

2024, 71 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli katkıları ve yardımları için danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Tuncay YILMAZ'a ve Sayın Doç. Dr. Anıl BAŞARAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmama büyük katkılarından dolayı Serhan SARI beye teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Yunus Emre KAZAZ

Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

N_0	Başlangıçtaki mikroorganizma sayısı
$\dot{V}$	Hacimsel debi
$\dot{m}$	Kütle debisi
c	Birim fiyatı başına enerji maliyetin
Ca	Akışkanın özgül ısısı
CELLF	Eskalasyon düzeltme faktörü
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
CHT	Konjuge ısı transferi
CRF	Anapara geri kazanma faktörü
D	Ondalık azalma süresi
F	Mikroorganizmaları öldürmek için gereken süre
FDA	Gıda ve İlaç İdaresi
HTST	Yüksek Sıcaklıkta Kısa Süre (High Temperature Short Time)
k	Bir değere getirilmiş düzeltme faktörü
LTLT	Düşük Sıcaklıkta Uzun Süre (Low Temperature Long Time)
M	Bir değere getirme faktörü
MRF	Hareketli Referans Çerçevesi (Moving Reference Frame)
N	Kalan mikroorganizma sayısı
pH	Asitlik derecesi
SM	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Kayar Mesh (Sliding Mesh)
T	Sıcaklık
v	Hız
x_i	x koordinatı
z	Ölüm hızını 10 kat artıran sıcaklık değişimi ($^{\circ}\text{C}$)
ε	Verim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Plakalı ısı değıştiricide akışların gösterimi.....	5
Şekil 2.2 Gvde borulu ısı değıştirici	5
Şekil 2.3 Bazı meyve ve meyve sularının pH dereceleri	9
Şekil 2.4 Canlı kalma eğrisi	10
Şekil 2.5 Termal direnç eğrisinin gösterimi [28].	11
Şekil 2.6 Elektrikli ısıtıcılar: a) Hat içi ısıtıcı, b) Daldırmalı ısıtıcı.....	13
Şekil 2.7 MRF bölgesinin gösterimi	19
Şekil 3.1 Hibrit ön ısıtıcının akım şeması.....	21
Şekil 3.2 Prototip olarak geliştirilen ön ısıtıcı	22
Şekil 3.3 Isıtıcı ön tasarımı	24
Şekil 3.4 Isıtma sisteminin şematik gösterim	25
Şekil 3.5 Isıtma sistemi.....	26
Şekil 3.6 Daldırmalı ısıtıcı rezistans	26
Şekil 3.7 Şebeke analizörü.....	27
Şekil 3.8 Sıcak su sayacı.....	27
Şekil 3.9 İki bıçaklı karıştırıcıya sahip ısıtıcı tankın bileşenlerinin boyutlandırılması	29
Şekil 3.10 Isıtıcı modeli	30
Şekil 3.11 Kazan içerisinde oluşturulan hacim	31
Şekil 3.12 MRF bölgesinin gösterimi	32
Şekil 3.13 Mesh atılmış geometri	33
Şekil 3.14 Modeldeki meshin kesit alanı	34
Şekil 4.1 Isıtıcıya ait akımlar	45
Şekil 4.2 Ekserji analizi için ısıtıcıya ait akımlar	48

Şekil 4.3 Isıtıcıyı oluşturan akımlar	53
Şekil 4.4 Kazan içerisindeki sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 4.5 Kazan içerisindeki hız dağılımı	55
Şekil 4.6 CFD analizinde kullanılan karıştırıcı tipleri. A) 4 bıçaklı, 45 derece eğimli karıştırıcı. B) 4 bıçaklı 90 derece eğimli karıştırıcı. C) 6 bıçaklı, 45 derece eğimli karıştırıcı	56
Şekil 4.7 Dikey kesiti alınmış kazan içerisindeki hız davranışları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcı sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan.....	58
Şekil 4.8 Yatay kesiti alınmış kazandaki hız davranışları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcı sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan.....	59
Şekil 4.9 Dikey kesiti alınmış kazandaki sıcaklık dağılımları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcı sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan.....	60

TABLO DİZİNİ

Tablo 2.1 Darbeli elektrik alan teknolojisinin pastörizasyon proseslerinde uygulamaları.....	7
Tablo 2.2 Farklı gıdalarda pastörizasyonun amacı [26]	8
Tablo 2.3 Isı değıştircilerdeki akışların CFD simülasyon çalışmaları [36].	17
Tablo 4.1 Isıtıcıya ait akımların fiziksel özellikleri.....	45
Tablo 4.2 Isıtıcı akımlarının fiziksel özellikleri.....	48
Tablo 4.3 Isıtıcı akımları için ekserji değerleri.....	54
Tablo 4.4 Kazandaki en yüksek sıcaklık değeri	61
Tablo 4.5 Suyun kazanı terk etme sıcaklıkları.....	62

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Pastörizasyon	3
2.1.1 Isı Değiştiriciler.....	4
2.1.2 Pastörizasyon Yöntemleri	6
2.1.3 Pastörizasyon İşlemi Uygulanan Bazı Gıdalar.....	8
2.1.4 Mikroorganizmaların Isıl Dirençlerinin Saptanması.....	10
2.2 Elektrikli Isıtıcı Sistemler	13
2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD).....	14
2.3.1 Gıda Endüstrisindeki CFD Uygulamaları	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1 Materyal	23
3.1.1 Isıtma Sisteminin Tasarımı.....	24
3.2 Yöntem.....	28
3.2.1 CFD Analizi	28
3.2.2 Termodinamik Analiz.....	35
3.2.2.1 Enerji.....	35

3.2.2.2 Kütlenin Korunumu Yasası	36
3.2.2.3 Termodinamiğin Birinci Yasası	37
3.2.2.4 Termodinamiğin İkinci Yasası	38
3.2.2.5 Ekserji	40
2.3.5.1 Ekserji Kaybı	41
2.3.5.2 Sürekli Akıslı Açık Sistemlerde Ekserji	42
3.2.2.6 Termoeconomik Analiz	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
4.1 Enerji Analizi	45
4.2 Ekserji Analizi	47
4.3 Termoeconomik Analiz	51
4.4 CFD Analizi	55
4.4.1 CFD Optimizasyonu	56
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	70
Ek Tablo 1. Sıvı suyun yoğunluğu tablosu	70
Ek Tablo 2. Sıvı suyun fiziksel özellikleri tablosu	71

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde yükselmesi sonucu gıdaya olan talep artmıştır. Gıdaya olan talebin artması gıda sektöründe enerji ihtiyacının da artmasına sebep olmuştur. Gıda endüstrisinde artan enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtlarının kullanılması, ormanlara zarar verilmesi ve tarım alanlarının hatalı kullanımından dolayı doğal kaynaklar tahrip olmaktadır. Bunun sonucunda “sürdürülebilirlik” kavramının önemi; iklim değişiklikleri, sera gazında görülen artış ve küresel ısınma neticesinde artmıştır [1]. Gıda endüstrisinde enerji verimliliğini arttırmak ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla yeni çözümler aranmaktadır [2].

Plakalı, borulu ve gövde borulu gibi ısı değiştiriciler; günümüzde, gıdalara uygulanan ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemler, gıdayı istenilen sıcaklığa sıcak su veya buhar gibi aracı akışkanları kullanarak getirmektedir. Aracı akışkanları ısıtmak için kullanılan sıcak su veya buharın üretilmesi için yardımcı tesisler gerekir ve bu durum sistemin maliyetinin ve enerji tüketiminin artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda ısıtma sistemlerinde fazla ekipman kullanılması, sanitasyon maliyetini artırır ve hijyenin korunmasını zorlaştırmaktadır. Aracı akışkanların üretilmesi için kullanılan fosil yakıtlar çevre ve havanın kirlenmesine sebep olmaktadır. Çevre kirliliğini azaltmak için alınan önlemler de ek maliyetlere sebep olmaktadır. Bütün bu olumsuz durumların önüne geçebilmek amacıyla aracı akışkan gerektirmeyen, enerji verimliliği sağlayan ve az bileşen gerektiren çevreci sistemler, yenilikçi tasarımlar aranmaktadır [3], [4].

Bu tez çalışmasının amacı daldırılabilir rezistans ısıtıcı ile ısıtılan bir kazanın termal performansını değerlendirmek ve enerji verimliliğini inceleyerek ısıtma süreçlerinin optimizasyonuna katkıda bulunmaktır. Bu amaçla ön ısıtma işlemi görmüş 40 °C gıdanın pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılması süreci Ansys Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen CFD analizleri ile değerlendirilmiştir. 3 farklı karıştırıcı tipi ve 3 farklı RPM değerinde CFD analizi yapılarak optimizasyon yapılmıştır. Deneysel verilerle elde edilen sonuçlarla ısıtıcı sistemin enerji ve ekserji performansı bulunmuştur. Bu değerler ışığında termoeconomik bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın nihai hedefi, gıda ısıtma proseslerinde kullanılan bu tür sistemlerin daha verimli ve ekonomik bir şekilde çalışmasını sağlamak ve böylece sürdürülebilir üretim süreçlerine katkıda bulunmaktır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Pastörizasyon

Gıda koruma yöntemleri, gıda kaynaklı hastalıkları engellemek amacıyla kullanılan işlem basamaklarına verilen isimdir. Geleneksel bir koruma yöntemi olan pastörizasyon, ürün sıcaklığını yükseltip, termal enerji kullanarak spesifik patojen mikroorganizmalarını öldürme işlemidir [5]. Gıdanın muhafazası için kullanılan en önemli adımlardan biridir, aynı zamanda gıdanın güvenliği için de oldukça önemlidir. Gıdaların duyuşsal ve besinsel özelliklerinde minimum değişikliğe sebebiyet veren bir işlem sürecidir, gıdanın bozulmasına sebep olan ve nispeten ısıya duyarlı mikroorganizmaları etkisiz hale getirirken aynı zamanda enzimlerin de inaktivasyonunu sağlamaktadır [6]. Mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesi sürecinde pastörizasyon sistemlerinin ısıtma ve soğutma aşamaları büyük önem taşımaktadır. Pastörizasyon işleminden sonra düşük sıcaklıklara getirilen ve saklanan gıdaların raf ömrü genellikle birkaç gün veya birkaç ay uzamaktadır [7].

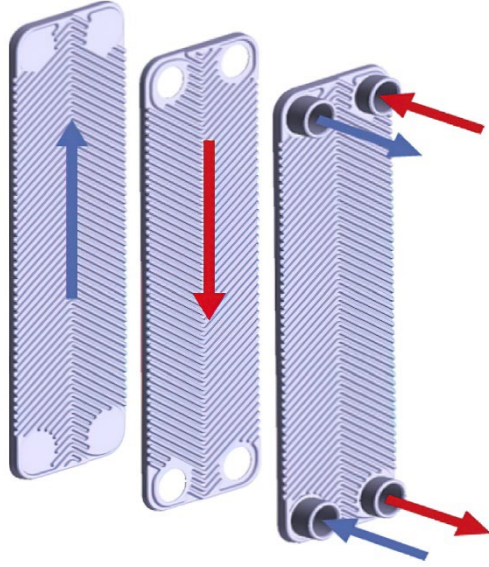
1864-1865 yıllarında ünlü Fransız bilim adamı Louis Pasteur tarafından geliştirilen pastörizasyon, adını da ondan almıştır. Pasteur, şarabı 50-60°C arasında ısıtarak istenmeyen mikroorganizmaları yok edebileceğini keşfedip, benzer bir çalışmayı bira üzerinde yapmış ve sütün ekşimesinin, şarap ve biranın bozulmasına benzer şekilde, zararlı mikroorganizmaların büyümesinden kaynaklandığını fark etmiştir. Çiğ sütte görülen ve insanlarda tüberküloza sebep olan Mycobacterium tuberculosis'i etkisiz hale getirmek, bu uygulamanın başlıca hedeflerinden birisi olarak görülmekteydi [8]. Günümüzdeyse pastörizasyonun sıcaklık-zaman ayarları, sütte bulunan en dayanıklı patojen ve Q hummasına neden olan Coxiella burnetii'yi hedef alan termal ölüm süresi çalışmaları temel alınarak yapılmaktadır. Sütün ticari amaçla ısıtma işlemi tabi tutulması 1880'lerin sonunda başlamıştır. 1908'de Chicago, Amerika Birleşik Devletleri'nde şehir içinde satılan süt için pastörizasyon uygulamasını zorunlu kılan ilk büyük şehir olmuştur. 1987'de ise Gıda ve İlaç İdaresi (FDA), çiğ sütün eyaletler arası satışını yasaklamış ve dolayısıyla eyaletler arası

ticarete insan tüketimi için olan süt ve süt ürünlerinin pastörize edilmesini zorunlu hale getirmiştir [9].

2.1.1 Isı Değiştiriciler

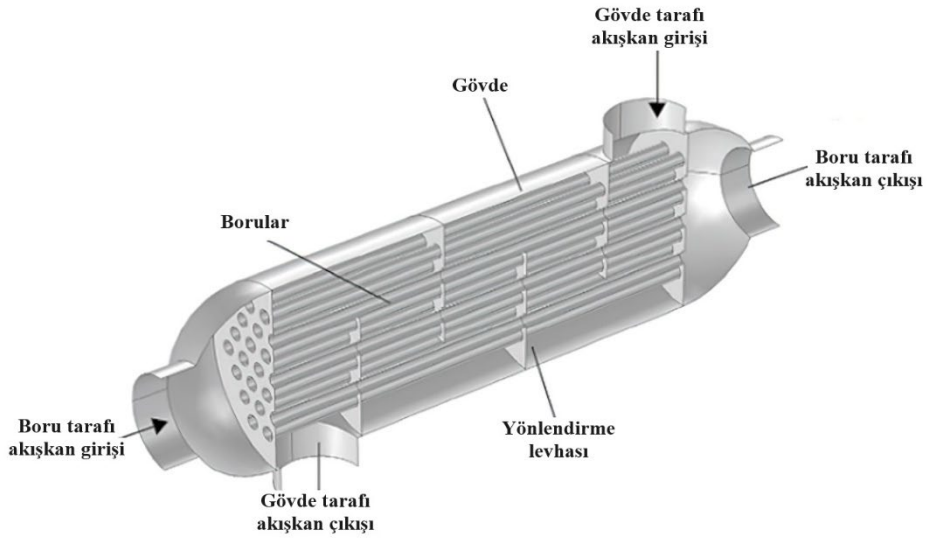
Farklı sıcaklıklara sahip iki veya daha fazla akışkan arasında görülen ısı transferi, birçok mühendislik uygulamasında en kritik ve yaygın işlemlerdendir. Bu ısı transferini sağlayan cihazlara, ısı değiştiricisi denir. Isı değiştiricilerinde, akışkanlar genellikle metal bir yüzeyle birbirlerinden ayrılırlar ve böylece akışkanların birbirlerine karışması engellenerek doğrudan ısı transferi sağlanır [10].

Plakalı ısı değiştiriciler; kompaktlık, tasarım esnekliği, düşük basınç kayıpları, düşük kirlenme eğilimi, kolay temizleme ve kolay bakım gibi önemli avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Plakalı ısı değiştiriciler, bir dizi plakadan oluşmakta ve üç çeşitte incelenmektedirler: contalı plakalı, spiral plakalı ve lamelli. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bir plakalı ısı değiştirici, genellikle birbirine temas eden bir dizi oluklu metal plakadan oluşur. Her plaka, akışkanları alternatif akış geçitlerine yönlendirmek için tasarlanmış contalar ile giriş ve çıkış noktaları olan dört açıklığa sahiptir. Bu contalar, plakalar arasından geçen sıvıların birbirine karışmasını engellemektedirler. Plakalı ısı değiştiricide; contalar sayesinde plakalar üzerinde bulunan akış kanallarından geçen akışkanlar, birbirine karışmadan akarken sıcaklık farkı nedeniyle istenilen ısı transferi gerçekleşmektedir [12], [13].



Şekil 2.1 Plakalı ısı değıştircide akışların gösterimi

Gövde borulu ısı değıştirciler tüm dünyada en çok kullanılan ısı değıştircilerdir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi gövde borulu ısı değıştircide, gövdenin içersine yerleştirilmiş çok sayıda boru bulunmaktadır. Bir akışkan boruların içersinden akarken, diğerk akışkan gövde içersinde boruların dışından akmaktadır. Bu sayede sıcaklık farkına bağılı olarak ısı transferi gerçekleşmektedir. Isı transferini iyileştirmek amacıyla gövde içersindeki akışı yönlendiren yönlendirme levhaları bulunmaktadır [14], [15].



Şekil 2.2 Gövde borulu ısı değıştirci

Bir diğ er borulu ısı değıştirici çift borulu ısı değışicidir. Çift borulu ısı değıştirici en basit ısı değıştirici türlerinden biridir. Sıcak ve soğuk akışkanlar için farklı i  ve dış çapa sahip, eş merkezli iki adet borudan oluşmaktadır. Bir akışkan küçük borudan akarken diğ er akışkan ise iki boru arasında kalan aralıktan akmaktadır [15].

2.1.2 Pastörizasyon Yöntemleri

Uygulanan sıcaklık ve zamana dayalı iki ana pastörizasyon yöntemi g r lmektedir. Birinci yöntem düşük sıcaklıkların uzun süre kullanıldığı yavaş bir işlem (LTLT), diğ eri ise yüksek sıcaklıkların kısa süre kullanıldığı hızlı bir işlemdir (HTST). Yavaş pastörizasyon aynı zamanda kesikli yöntem olarak da bilinmektedir. Geleneksel yavaş pastörizasyonda, tipik olarak 15-30 dakika boyunca 65-70  C sıcaklık uygulanmaktadır [16]. 30 dakika boyunca uygulanan bu yöntemde genellikle çift cidarlı tanklar kullanılmaktadır. Isıtma işlemi cidarlar arasında akan sıcak su veya buhar yardımı ile yapılmaktadır. Etkili bir ısı transferi ve homojen bir şekilde ısıtma için tank içerisine yerleştirilen bir karıştıracı yardımıyla karışırma işlemi uygulanmaktadır çift cidarlı tank ile yapılan pastörizasyon işlemi basit fakat yavaş ve verimsiz bir süreçtir. Verimliliğı artırmak için genellikle 15 saniye boyunca sürekli olarak 72  C sıcaklık uygulanmakta ve bu işlemlerde genellikle plakalı ısı değıştiriciler kullanılmaktadır [8]. Bu ısıt işlem, canlı mikroorganizma sayısında 5 log azalma sağlamakta ve ısıya dirençli sporlar hariç neredeyse tüm bozucu etkiye sahip bakterileri, mayaları, k fleri ve patojenleri etkisiz hale getirmektedir. Ayrıca 85–90  C, 8–15 saniye gibi koşullara sahip ultra yüksek sıcaklıkta pastörizasyon işlemi de bazı durumlarda uygulanmaktadır. Uzun raf ömürlü süt üretimi için ultra pastörizasyon ve sterilizasyon gibi işlemler de uygulanmaktadır [17].

Isıl olmayan teknikler, mikroorganizmaların ve enzimlerin inaktivasyonunu genellikle düşük sıcaklıkta gerçekleştirerek gıdaların biyolojik ve duyuasal özelliklerini optimal düzeyde korur. Isıl olmayan teknikler, bu özelliğı sayesinde ısıt uygulamalara göre avantaj sahibi olarak g r lmektedir [18]. İki elektrot arasındaki ürünün değışik şiddetlerde ve s relerde elektrik darbelerine maruz bırakılmasına dayanan darbeli

elektrik alan uygulaması; hücre zarında geçici ve kalıcı gözenekler (porlar) oluşturmaktadır. Gözenekleri, hücrede önemli bir ısı artışına sebebiyet vermeden oluşturması bu teknolojinin en önemli özelliğidir [19]. Elektroporasyon, hücrede oluşan bu gözeneklerin adıdır. Zimmerman (1986) tarafından öne sürülen, dielektrik parçalanma teorisi; elektroporasyon tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen hakkında en çok kabul gören teorilerden biridir [20]. Bu teoriye göre uygulanan kuvvet, hücre zarının kalınlığının azalmasına sebep olur. Hücre zarı sıkıştırılmaz yapıya sahip olduğundan dolayı zar kalınlığı azaldığında; yağların faz dengesi bozulur, yağ tabakaları ve hücre zarı alanı arasındaki oran artar ve hücre zarı 1-10 kV/cm kuvvet 10-15 ms uygulama sonrasında parçalanır [21]. Darbeli elektrik alan uygulamasının geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu ve besinsel özelliklerde olumsuz etkiye yol açmadığı, fiziko-kimyasal ve duyuşal özellikleri daha iyi koruduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [22]. Darbeli elektrik alanın bazı pastörizasyon uygulamaları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Darbeli elektrik alan teknolojisinin pastörizasyon proseslerinde uygulamaları.

Ürün	Sistem koşulları	Gözlenen etki
Portakal suyu	25,30,40 kV/cm	Geleneksel yöntemle kıyaslandığında kayıpların çok daha az olduğu görülmüştür. A vitamini içeriğinde sırasıyla %11.1, %13.9, %9.9, Karotenoid içeriğindeyse %9.6, %6.4, %7.8 azalma gözlemlenmiştir [23].
Soya sütü	40 kV/cm, 547 µs	S. Aureus ve E. coli mikroorganizmalarında sırasıyla 3.15 ve 5.20log azalma gözlemlenmiştir [24].
Süt	35 kV/cm, 2 µs, 200 kHz	E. coli patojeninde 6 log azalma gözlemlenmiştir [25].

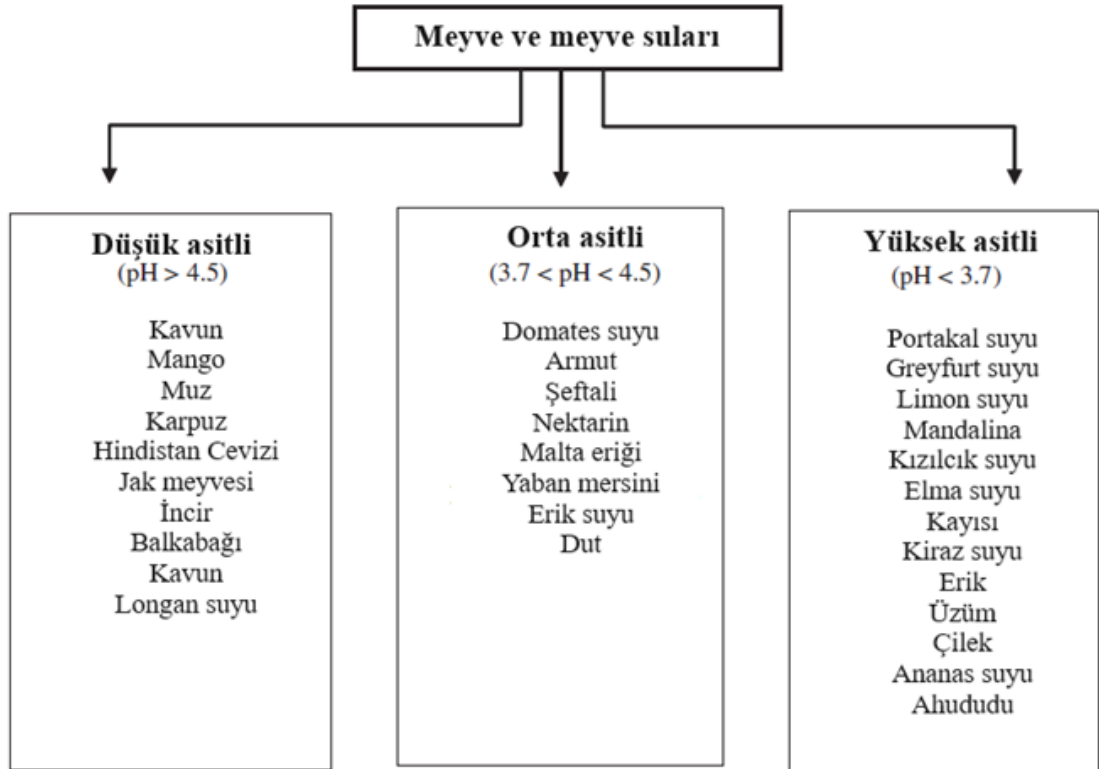
2.1.3 Pastörizasyon İşlemi Uygulanan Bazı Gıdalar

Pastörizasyon sürecinde gıdalara 100 °C'nin altında ısı işlem uygulanır. Bu işlem; pH değeri 4,5'ten yüksek olan düşük asitli gıdalarda, patojenlerden kaynaklanabilecek sağlık tehditlerinin en aza indirilmesini sağlamaktadır. Böylece düşük asitli gıdalarda raf ömrü birkaç güne kadar uzatılabilmektedir. pH değeri 4,5'in altında olan yüksek asitli gıdalarda ise enzim inaktivasyonu ve maya, küf gibi bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların yok edilmesi ve raf ömrünün birkaç ay uzatılması amacıyla uygulanır (Tablo 2.2) [26].

Tablo 2.2 Farklı gıdalarda pastörizasyonun amacı [26]

Gıda	Ana amaç	İkincil amaç	Minimum koşullar
Meyve suyu	Enzim inaktivasyonu	Bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesi	65 °C 30 dk, 77 °C 1 dk, 88°C 15 s
Bira	Bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesi	-	65-68 °C 20 dk (Şişede), 72-75 °C 1-4 dk
Süt	Patojenlerin öldürülmesi	Enzimlerin inaktivasyonu	63 °C 30 dk, 71,5 °C 15 s
Dondurma	Patojenlerin öldürülmesi	Bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesi	65 °C 30 dk, 71 °C 10 dk

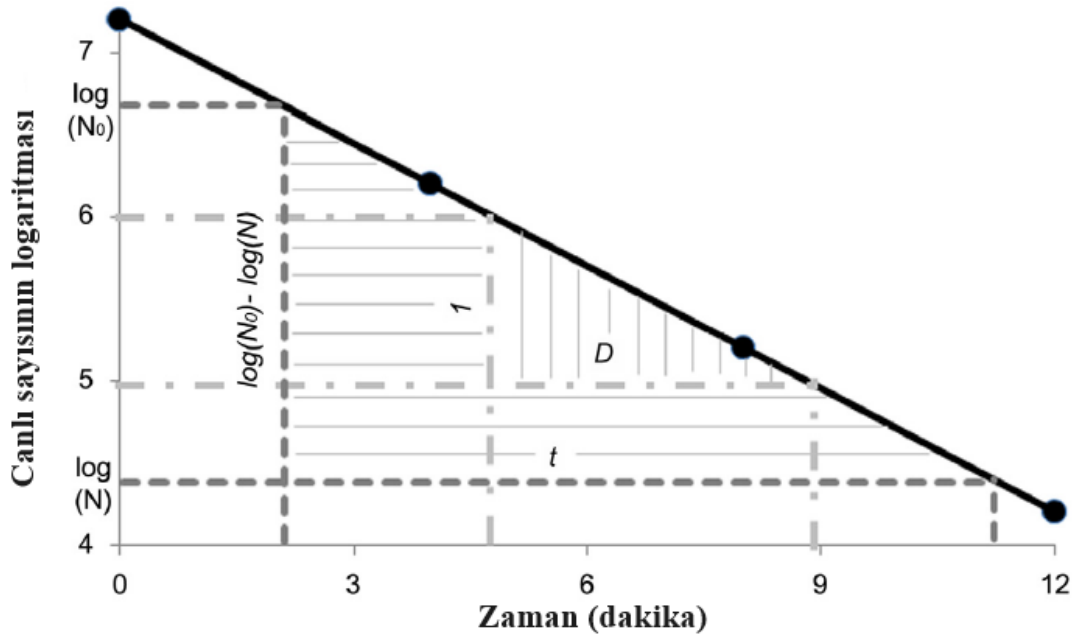
Pastörizasyon işlemlerinde; ısıtım işlem sıcaklığının belirlenmesi için ilk adım, hedef mikroorganizmanın seçilmesidir. Isıtım işlem uygulamalarında, pH 4,5'in altında patojen mikroorganizma bulunmamaktadır. Asidik ortamda, patojen mikroorganizmaların dirençleri çok azaldığından bu tür gıdalarda bozulmaya neden olan en dirençli mikroorganizmalar hedef olarak seçilmelidir. pH 4-4,5 aralığında olan gıdalarda uygulanacak ısıtım işlemlerde hedef alınabilecek mikroorganizmalar arasında *Bacillus coagulans*, *Bacillus polymyxa* gibi anaeroblar bulunur. pH 3,7 değerinin altında ise yüksek asitli ortamda mikroorganizmaların ısıtım dirençleri çok düşük olmaktadır ve bu nedenle yüksek asitli ortamlarda mikroorganizmaların ısıtım dirençlerini kaybetmeleri, basit bir ısıtım işlemin pastörizasyon için yeterli olmasını sağlar. Şekil 2.3'te bazı meyve ve meyve sularının pH dereceleri gösterilmiştir [26], [27].



Şekil 2.3 Bazı meyve ve meyve sularının pH dereceleri

2.1.4 Mikroorganizmaların Isıl Dirençlerinin Saptanması

Yapılan araştırmalarda mikroorganizmaların ölümünün birinci derecede kinetik modele göre gerçekleştiği belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle; belirli bir sıcaklıkta yapılan ısıtma işlemi sonucunda canlı kalan mikroorganizma sayısının logaritmaları, ısıtma süresine karşı grafiğe yerleştirilirse doğrusal bir eğri elde edilir. Bu şekilde oluşan eğriye o mikroorganizma için sabit sıcaklıkta “canlı kalma eğrisi” denir [27]. Şekil 2.4’te canlı kalma eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Canlı kalma eğrisi

D-değeri, sabit sıcaklıkta hedef mikroorganizma sayısında veya enzim aktivitesinde görülecek %90 azalma için gerekli olan ısıtma süresi olarak tanımlanır. Başka bir deyişle canlı sayısının 10⁵'ten 10⁴'de düşmesi yani 1 desimal azalma olması demektir [27], [28]. Bu tanımdan yola çıkılarak D değeri için aşağıdaki formül yazılabilir:

$$D = \frac{t}{\log N_0 - \log N} \quad (2.1)$$

Burada;

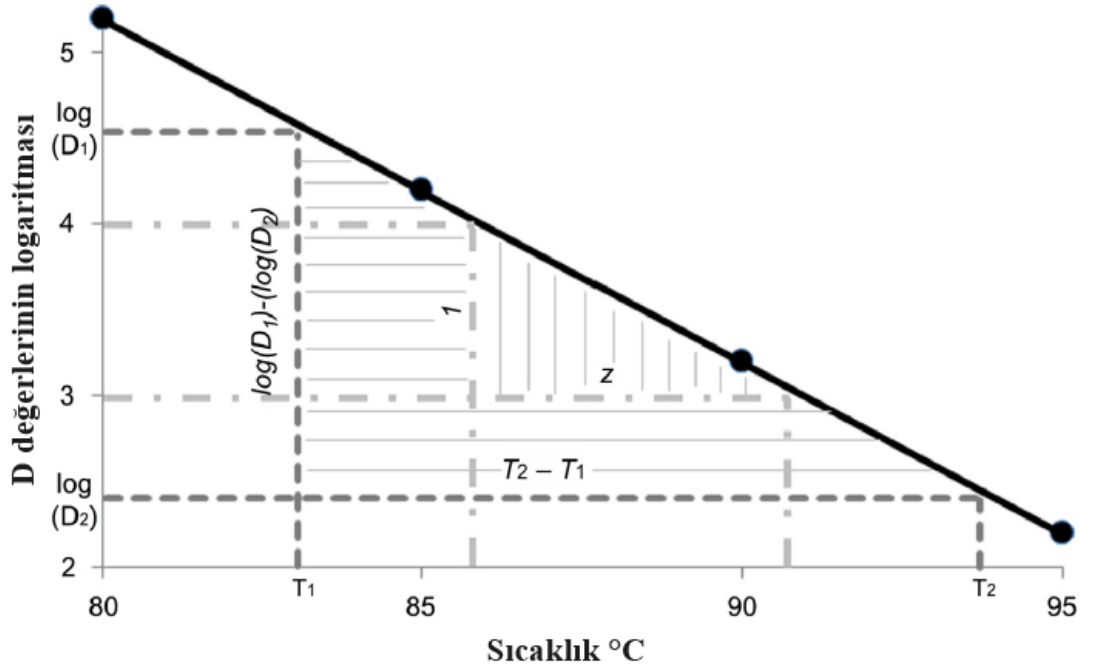
$\log N_0$: Başlangıçtaki mikroorganizma sayısını,

$\log N$: Belirli bir süre sonra kalan mikroorganizma sayısını,

t : Isıl işleme tabi tutma süresini,

D : Mikroorganizma popülasyonunda %90 azalma için gereken süreyi, ifade etmektedir.

Bir mikroorganizmanın D değerleri sıcaklığa karşı yarı logaritmik grafiğe işlenirse, doğrusal bir eğri elde edilir. Elde edilen doğru, hedef mikroorganizma veya enzim için termal direnç eğrisi olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.5'te termal direnç eğrisi gösterilmiştir. Termal direnç sabiti z değeridir [27], [28].



Şekil 2.5 Termal direnç eğrisinin gösterimi [28].

z Değeri, bir hedef mikroorganizma veya enzimin D değerini 10 misli kadar azaltmak için gereken sıcaklık miktarı olarak tanımlanmaktadır. z değeri ne kadar yüksekse o mikroorganizma, sıcaklık yükselmesinden o kadar az etkilenmektedir. Tanıma göre z değeri, aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [27], [28]:

$$Z = \frac{T_2 - T_1}{\log D_{T1} - \log D_{T2}} \quad (2.2)$$

Burada;

T_1 : İlk sıcaklığı (°C),

T_2 : İkinci sıcaklığı (°C),

$\log D_{T1}$: İlk sıcaklıkta (T1) mikroorganizmaların ölüm süresini

$\log D_{T2}$: İkinci sıcaklıkta (T2) mikroorganizmaların ölüm süresini,

göstermektedir.

Termal ölüm süresi, gıda maddesi içerisinde bulunan mikroorganizma ve spor popülasyonlarının istenilen seviyeye indirilmesi için gereken zamandır. Bu zaman, farklı D değerleriyle yani D değerlerinin katları olarak ifade edilir. Örneğin, F=4D denklemi %99,99 oranında bir mikroorganizma sayısının azalmasını sağlamak için gerekli olan termal ölüm süresi olarak ifade edilir. F=12D denklemiyse genel olarak uzun raf ömrünün olması istenen gıda maddelerinin ısıtım süreçlerinde baz alınan termal ölüm süresidir [1]. Örneğin, %99,99 oranında azalma sağlamak için F=4D kullanılır. Bu, mikroorganizma popülasyonunun 4 log birim (10,000 kat) azalması anlamına gelir. Uzun raf ömrü sağlanmak istenen gıda maddelerindeyse %99,9999999999 oranında azalma sağlamak için F=12D kullanılır. Bu, mikroorganizma popülasyonunun 12 log birim (1 trilyon kat) azalması anlamına gelir. Termal ölüm süresi için istenen son mikrobiyal yük N ile ifade edilirse;

$$\log N_0 - \log N = \frac{F}{D} \quad (2.3)$$

Bu denklemdeki ifadeler;

N : mikrobik popülasyon sayısını,

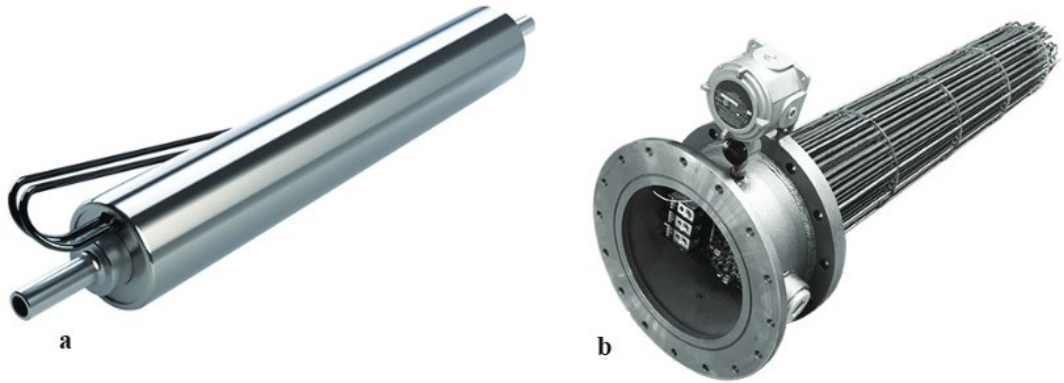
N_0 : başlangıçta mikrobik popülasyon sayısını,

D : ondalık azaltma süresini,

F : termal ölüm süresini,
ifade edilmektedir.

2.2 Elektrikli Isıtıcı Sistemler

Endüstride genel olarak iki çeşit elektrikli ısıtıcı çeşidi bulunmaktadır: Hat içi ısıtıcılar ve daldırılmalı ısıtıcılar. Şekil 2.6’da hat içi ısıtıcı ve daldırılmalı ısıtıcılara örnekler gösterilmiştir. Hat içi ısıtıcılar dolaşımli ısıtıcılar olarak da bilinmektedirler. Bu ısıtıcılar bir borunun gövdesinde bulunur ve flanşlı bir ısıtıcıya sahiptir. Ürün boru boyunca akarken ısıtılmaktadır. Daldırılmalı ısıtıcılar ise bir kap veya kazan içerisine daldırılan boru şeklindeki ısıtıcılardır [29].



Şekil 2.6 Elektrikli ısıtıcılar: a) Hat içi ısıtıcı, b) Daldırılmalı ısıtıcı

Spesifik durumlarda ısının hassas ayarlanması gerekmektedir. Proseste anlık akış hızının değişmesi veya prosese giren ürünün sıcaklığının değişmesi durumunda hızlı bir yanıt süresi gereklidir. Bunun yanında bazı proseslerde sıcaklığın çok dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu tür durumlarda elektrikli ısıtıcıların kullanılması son derece idealdir. Değişen akış hızının olduğu durumlarda aracı akışkan ile sıcaklık kontrolü oldukça zordur. Bu gibi durumlar nedeniyle elektrikli ısıtıcılar, gıda endüstrisinin bazı uygulamalarında buhar sistemleri gibi aracı akışkanlardan daha yaygındır. Örneğin çikolatanın üretim prosesinde, çikolata çok spesifik bir sıcaklıkta

pişirilmeli ve bu sıcaklıkta tutulmalıdır. Aşırı bir ısıtmada yanarak besin ve lezzet kayıpları yaşanmaktadır [29], [30], [31].

Elektrikli ısıtıcıların bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Elektrikli ısıtıcıların yüksek maliyetleri nedeniyle yüksek hassasiyet gerektiren bir ısıtma yoksa, buhar büyük olasılıkla ilk tercih olarak değerlendirilecektir. Bunu yanında bazı durumlarda elektrikli ısıtmanın kullanılabilmesi için yeterli gücün bilinmesi gerekmektedir. Belirli bir süreç için gereken toplam ısı miktarını belirlemek ve güç gereksinimlerini anlamak, elektrikli ısıtmanın mümkün olup olmadığını belirlemede yardımcı olacaktır [29], [30].

2.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), güçlü bilgisayarlar ve uygulamalı matematik kullanılarak akışkanların akış durumlarını modellemek için kullanılır. CFD'nin başarısı, sayısal simülasyon sonuçlarının dikkatli laboratuvar deneyleriyle ne kadar iyi uyum sağladığı ve laboratuvar da izole edilemeyen son derece karmaşık fenomenleri ne kadar iyi tahmin edebildiğiyle ölçülür. Dijital bilgisayarların ortaya çıkışından bu yana büyük bir ilgi toplayan CFD, 1960'ların sonlarından itibaren akışkan dinamiğinin tüm yönlerinde önemli bir gelişme göstermiş ve bu gelişmeler sayesinde birçok şirketin mühendislik tasarım ve analiz süreçlerinde vazgeçilemez bir araç olmuştur. Yeni tasarımların veya süreçlerin performansını üretim veya uygulamadan önce tahmin etme yeteneği, CFD'nin önemini artırmıştır [32]. Araştırmacılar, ekipman tasarımcıları ve proses mühendisleri; fırınlar, soğutmalı sergi dolapları, karıştırma tankları, sprey kurutucular, ısı değiştiriciler gibi çeşitli proses ekipmanlarının akışını ve performansını analiz etmek için gün geçtikçe daha fazla CFD kullanmaktadırlar. CFD programları; aynı zamanda ısı ve kütle transferi, faz değişimi, kimyasal reaksiyon, mekanik hareket, ilgili katı yapıların gerilmesi veya deformasyonu gibi süreçleri de tahmin edebilen standart nümerik araçlardır. [33].

Çoğu CFD sonucu; daha iyi performans, daha yüksek güvenilirlik, daha güvenli ölçeklenebilirlik, gelişmiş ürün tutarlılığı ve daha yüksek tesis verimliliği sağlamaktadır. Çoğu durumda hangi ve kaç doğrulama testinin yapılması gerektiğine karar vermeden önce yeni sistemleri analiz etmek için öncelikle CFD kullanılmaktadır. CFD kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilmektedir [32]:

- Akış dağılımı, ağırlık kayıpları, kütle ve ısı transferi, partikül ayrımı gibi konularda detaylı bir yaklaşım sağlamaktadır.
- Modelde yapılan geometrik değişiklikler laboratuvar testlerine göre çok daha az zaman ve maliyetle değerlendirilebilmektedir.
- Modeller temel fizik prensiplerine dayandığı ve ölçek bağımsız olduğu için ölçeklendirme yaşanan problemleri oldukça azaltmaktadır.
- Özellikle yüksek sıcaklık veya tehlikeli ortamlarda detaylı ölçüm almanın mümkün olmadığı durumları simüle etmek analizi oldukça kolaylaştırmaktadır.
- Etkin bir analiz ve tasarım aracı olarak tesis problemlerini değerlendirirken sadece etkileri değil, aynı zamanda kök nedenleri de vurgulayabilmektedir.

Isı transferi ve akışkan mekaniği ile ilgili olan eşitlikler, korunum yasalarının matematiksel ifadeleri olarak kabul görmekte ve Navier-Stokes denklemlerini temel almaktadır. Kütlenin korunumu (süreklilik) yasası, bir sisteme giren kütle akışlarının çıkan kütle akışkanlarıyla tam olarak dengelenmesi gerektiğini belirtmektedir [34]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.4)$$

Momentumun korunumu yasası (Newton'un ikinci hareket yasası), bir akışkan parçacığına etki eden dış kuvvetlerin toplamının doğrusal momentum değişim oranına eşit olduğunu belirtir [34]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-P \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2.5)$$

Enerjinin korunumu yasası (termodinamiğin birinci yasası), bir akışkan parçacığının enerjisindeki değişim hızının, parçacığa eklenen ısı ve yapılan iş ile eşit olduğunu belirtir [34]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = S_T \quad (2.6)$$

CFD yazılımları genellikle sonlu elemanlar, sonlu hacimler ve sonlu farklar yöntemlerini kullanarak problemleri çözmektedir ancak sonlu farklar yöntemi karmaşık geometrilere sahip mühendislik problemlerinin çözümünde genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri bu tür problemlerde daha sık tercih edilmektedir [33].

2.3.1 Gıda Endüstrisindeki CFD Uygulamaları

Günümüzde yaygın olarak kullanılan CFD yazılımları arasında ANSYS Fluent, Abaqus, Comsol, ADINA, FIDAP, CFX, Star, CFD2000 ve PHOENICS gibi programlar bulunmaktadır [35]. Gıda sektöründe en sık yapılan CFD analizlerinden biri, ısı değiştiriciler üzerine yapılan çalışmalardır. Tablo 2.3'te bu çalışmalardan bazıları ve kullanılan CFD yöntemleri detaylandırılmıştır.

Tablo 2.3 Isı değiştircilerdeki akışların CFD simülasyon çalışmaları [36].

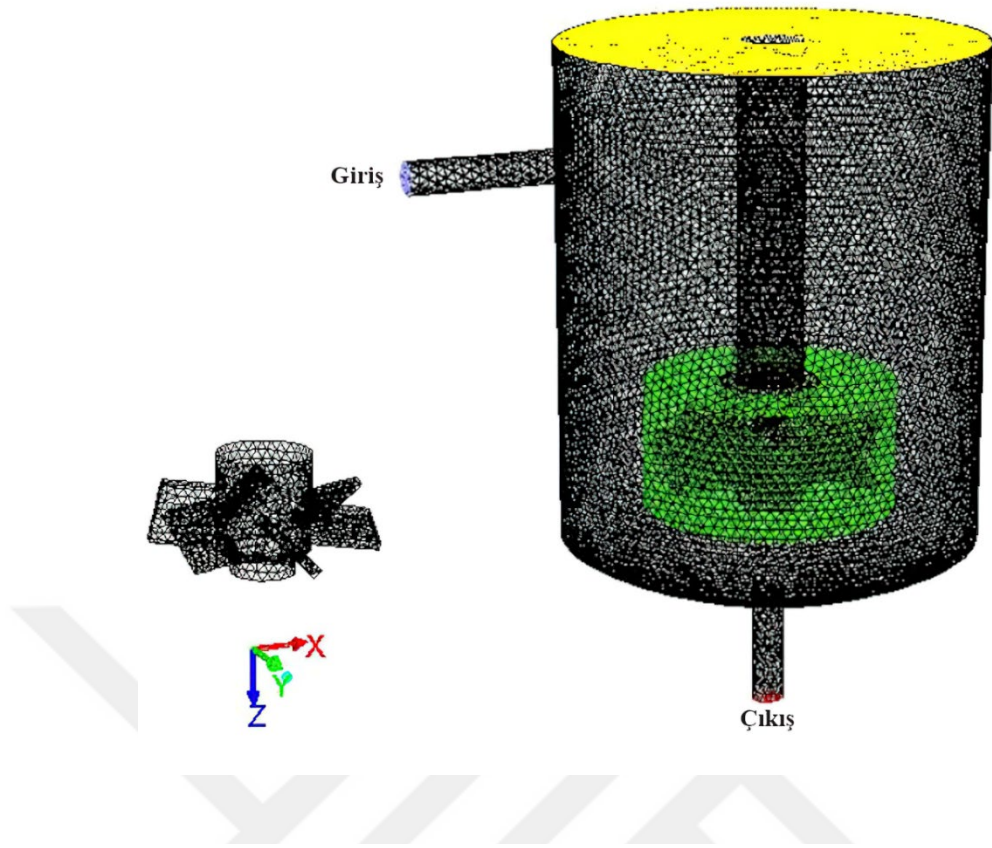
Yazar/Tip	CFD Metodu
Vikas Kumar ve ark. (2003) Borulu ısı değiştirici	CFD yazılımı: PHOENICS Türbölans modeli: k - ϵ
Qiuwang Wang ve ark. (2008) Gövde borulu ısı değiştirici	CFD yazılım: Fluent Çözüm tipi: SIMPLE Mesh yazılımı: Gambit
Koorosh Mohammadi ve ark. (2009) Gövde borulu ısı değiştirici	CFD yazılımı: Fluent 6.1 Çözüm tipi: SIMPLE Türbölans modeli: k - ϵ Mesh tipi: Dörtgen, 1.200.000 hücre
Koen Grijspeerdt ve ark. (2003) Plakalı ısı değiştirici	CFD yazılımı: FINE-Turbo, EURANUS Mesh yazılımı: FINE-Turbo Türbölans modeli: k - ϵ Çözüm tipi: SIMPLE, PISO Mesh: Dörtgen

Gıda ürünleriyle yapılan birçok CFD çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmalar çeşitli süreçleri ve uygulamaları kapsamaktadır. Örneğin; ısı değiştirici analizlerinde (Arsana ve ark., 2020; Wong ve ark., 2006), gıdaların kurutulması süreçlerinde (Zadravec M., 2020; Benavides-Moran ve ark., 2021), sterilizasyon ve pastörizasyon tekniklerinde (Lespinard ve ark., 2014), pişirme ve fırın tasarımı optimizasyonunda (Tank ve ark., 2014; Khatir ve ark., 2012; Feyissa ve ark., 2013), dumanlama yöntemlerinde (Promtong ve ark., 2020), soğutma ve soğutucuların performansında (Narsaiah ve ark., 2021; Chen ve ark., 2022; Stebel ve ark., 2022), karıştırma işlemlerinin verimliliğinde (Kenche ve ark., 2013; Ameer H., 2018), ekstrüzyon

işlemlerinin iyileştirilmesinde (Emin ve ark., 2021; Hicks ve ark., 2012; Tagliavini ve ark., 2018), 3D gıda baskısında (Cui ve ark., 2022), kristalizasyon süreçlerinde (Meng ve ark., 2021; Srinivasan S., 2022) ve dolum ile gıda paketleme teknolojilerinde (Venturelli ve ark., 2018; Jałowicka ve ark., 2020; Wu ve ark., 2019) gerçekleştirilen çalışmalar arasında sayılabilir [36].

Bu tez çalışmasında, Ansys Fluent yazılımının 2023 R2 versiyonu kullanılarak CFD analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz yapılacak geometri, daldırılmalı rezistans ısıtıcı ile ısıtılan bir çalkalamalı kazan olarak modellenmiştir. Kazan için literatürde yer alan çalkalamalı kazanlar üzerine yapılan CFD analizleri referans alınmıştır. Daldırılmalı ısıtıcı için ise konjuge ısı transferi ile ilgili yapılan araştırmalar temel alınmıştır.

Literatüre göre bir çarkın bir tank içerisinde dönmesi Multiple Reference Frame (MRF) ve Sliding Mesh (SM) gibi çeşitli yöntemlerle modellenebilmektedir. MRF yöntemi, pervanenin sabit bir pozisyonda olduğu varsayılarak, akış alanının tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemde, dönen pervane ve sabit bölmeler, her biri kendi referans çerçevesinde değerlendirilmektedir ve zamandan bağımsız (steady-state) bir analiz yapılmaktadır [37], [38]. Şekil 2.7’te Mesh atma aşamasında pervane etrafında oluşturulan MRF bölmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.7 MRF bölgesinin gösterimi

Sliding Mesh (SM) yöntemi ise daha dinamik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemde, çarkın zaman içinde tank içerisinde dönmesi gerçek zamanlı olarak modellenmektedir. İki ayrı ağ bölgesi kullanılmaktadır: biri sabit olan bölmelere ve tank duvarına, diğeri ise dönen pervaneye bağlıdır. Pervanenin döndüğü bu süreçte, pervane bölgesindeki mesh yapısı sürekli olarak güncellenmektedir, bu da daha hassas ve zamana bağlı bir çözüm sunmaktadır. SM yöntemi, daha doğru sonuçlar vermekte, ancak MRF yöntemine kıyasla daha fazla hesaplama süresi ve işlemci gücü gerektirmektedir. Yine de birçok araştırmacı, benzer karıştırma sistemlerinde MRF yöntemini kullanmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir [39], [40].

Konjuge ısı transferi (CHT), özellikle çalışma sıcaklığının çok yüksek olduğu kritik uygulamalarda önemli bir rol oynar. Bu tür uygulamalarda, metalürjik sınırı aşmamak için katı içindeki sıcaklık dağılımını hesaplamak gerekmektedir. Sıcaklık dağılımı, malzeme seçimi ve duvar kalınlığını büyük ölçüde etkilemektedir. Konjuge ısı transferi, bir sistemde hem katı hem de akışkan bölgelerinde gerçekleşen ısı

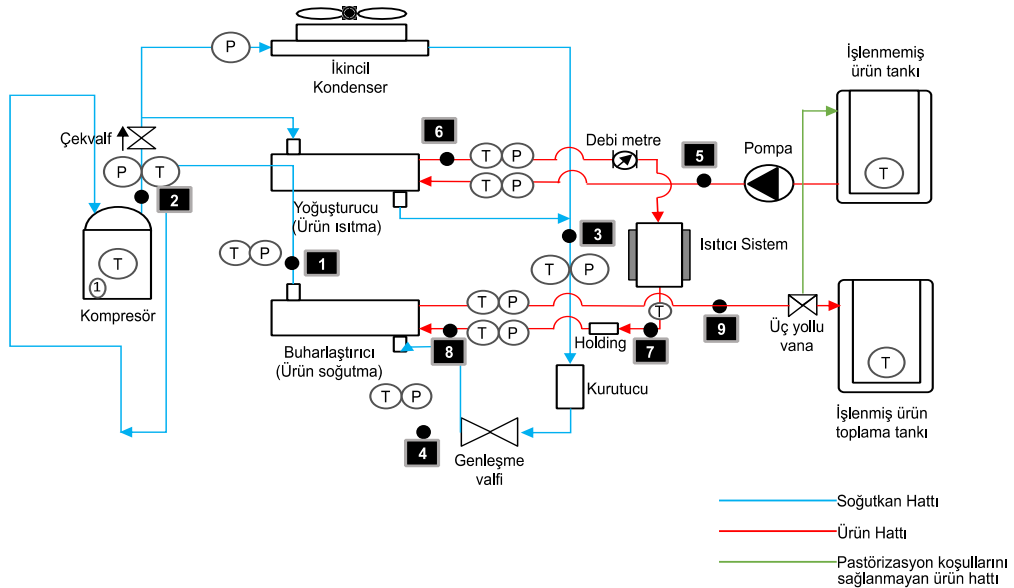
transferi süreçlerinin eş zamanlı olarak incelemektedir. Bu sayede, akışkan ve katı arasındaki ısı transferi süreçleri daha gerçekçi bir şekilde modellenmektedir. Çoğu çalışmada, ana akışın sınır katmanındaki sıcaklık dağılımı belirlenip, ardından ısı transfer katsayısı hesaplanarak katı içindeki süreçler analiz edilmiştir. Ancak, konjuge ısı transferi problemlerinde akışkan ve katı için hesaplamalar aynı anda yapılır, bu da daha fiziksel bir yaklaşım sunar. CHT üzerine yapılan çalışmalar genellikle analitik olup, sayısal çalışmalar sınırlıdır. Laminer ve türbülanslı akışlar için yapılan deneysel çalışmalar az sayıdadır ve çoğunlukla basit geometriler üzerinde gerçekleştirilmiştir [41].



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, pastörizasyon proseslerinde kullanılmak üzere bir ısıtıcı tasarlanmıştır. Tasarlanan ısıtıcının elektrik enerjisi ile çalışması, enerji verimliliği açısından avantaj sunması beklenmektedir. Elektrik enerjisinin kullanımı, fosil yakıtların kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunurken, aynı zamanda işletme maliyetlerini de düşürme potansiyeli de bulunmaktadır.

Isıtıcı, ön ısıtma işlemi görmüş gıdaların pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Isıtıcının bir diğer tasarlanma amacı da prototip olarak geliştirilen hibrit ön ısıtıcı cihaz ile kullanılmasıdır. Bu hibrit ön ısıtıcı cihaz buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimiyle çalışmaktadır ve sistemde tek bir soğutucu akışkan dolaşmaktadır. Bu sayede, yan tesislerde üretilen sıcak su veya buhar gibi aracı akışkanlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Ürün, soğutma çevrimi kullanılarak 30-40 °C'ye kadar ısıtılabilir. İstenilen pastörizasyon sıcaklığına ikincil bir ısıtma sistemiyle ulaşılmaktadır ve elektrik destekli ısıtma sistemi kullanılarak pastörizasyon işlemi tamamlanmaktadır. Sistemin şematik gösterimi şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Hibrit ön ısıtıcının akım şeması

Ön ısıtıcı sistemin çalışma prensibi şekil 3.1'deki numaralandırmalar kullanılarak şu şekilde tarif edilebilir; Soğutucu akışkan kompresörde (Şekilde 2 numara öncesi) yoğuşturucu basıncına sıkıştırılır ve bu süreçte ısınmaktadır. Isınan soğutucu akışkan yoğuşturucuda (6 numara öncesi) ısı vererek soğur fakat bu sırada hala ortam sıcaklığından daha sıcak bir durumdadır. Bu süreçte yoğuşturucuda bulunan ürün, soğutucu akışkanın verdiği ısı ile yaklaşık 30-45 °C arasında bir değere ısınmaktadır. Bir miktar ısınan ürün, ikincil ısıtma sistemine gönderilerek (7 numara öncesi) pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılır ve holding hattında (7 numara sonrası) bekletilerek ısıl işleme tabi tutulmaktadır. Ürün holding hattında bekletilirken, soğutucu akışkan kısılma vanasında (4 numara öncesi) buharlaştırıcı basıncına kısılarak çevre sıcaklığının altına düşmektedir. Holding hattını geçen ürün, buharlaştırıcıya (8 numara sonrası) gelir ve burada ürünün sıcaklığı soğutucu akışkana geçmektedir. Böylece, soğutucu akışkan ısınırken ürün soğutularak yaklaşık 4°C'ye düşürülmektedir. Soğutucu akışkan devir daim yaparken, ürün işlenmiş ürün tankına ve daha sonrasında da dolum ünitesine aktarılmaktadır. Bu tasarım ile soğutma çevrimindeki normalde atık olarak nitelendirilen ısı ürüne aktarılarak, bir ön ısıtma işlemi yapılması sağlanmıştır. Prototip olarak geliştirilen makine şekil 3.2'de gösterilmiştir.

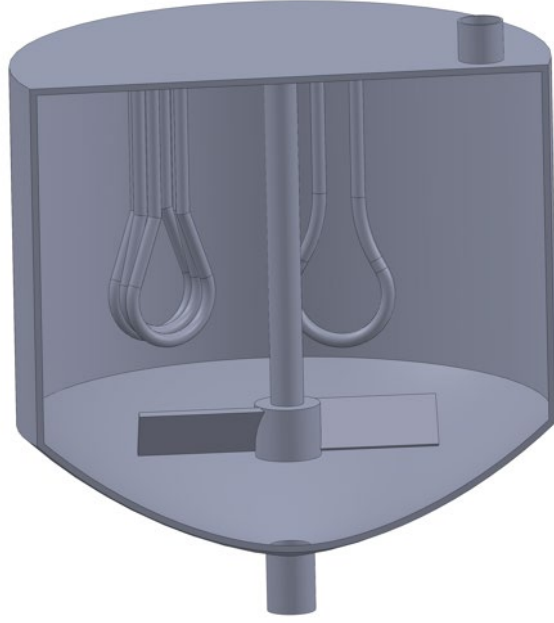


Şekil 3.2 Prototip olarak geliştirilen ön ısıtıcı

Bu tez çalışmasında ön ısıtma işlemi için basit bir düzenek kullanılmıştır. Bu düzenek, akışkanın sıcaklığını, pastörizasyon sıcaklığına ulaşmadan önce belirli bir seviyeye getirecek şekilde tasarlanmıştır. Isıtıcıda ön denemelerde kullanılacak akışkan su olarak belirlenmiştir. Çalışmada, tasarımın oluşturulması ve simülasyonların yapılması için; Solidworks ve Ansys Fluent yazılımlarından faydalanılmıştır. Isıtıcıdan elde edilen verilerle ekserji ve enerji analizleri yapılmıştır. Bu sayede termodinamiğin birince ve ikinci yasası kullanılarak ekserji maliyeti hesaplanmıştır. Gelecekteki projelerde ise ön ısıtıcı olarak prototip halinde geliştirilen hibrit pastörizasyon makinesinin kullanılması hedeflenmektedir.

3.1 Materyal

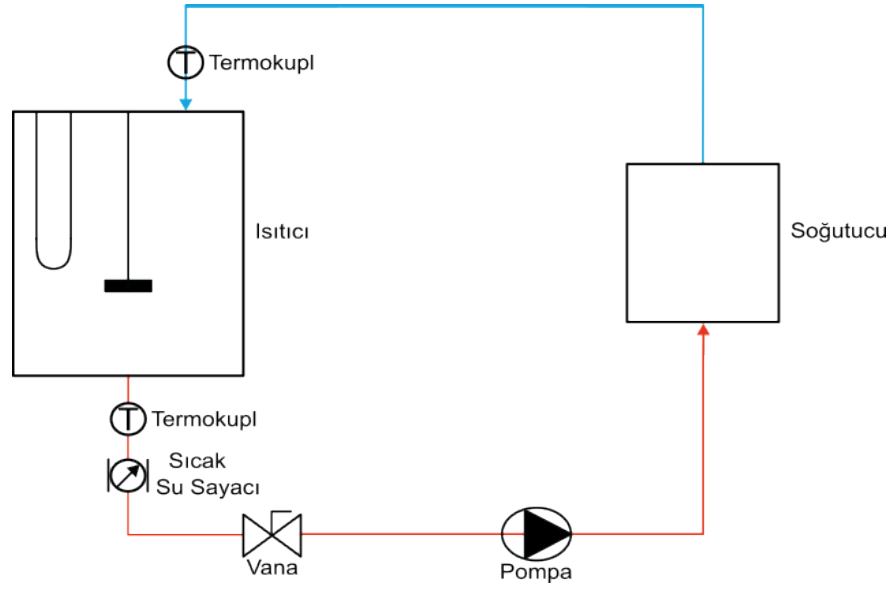
Elektrikli ısıtıcı daldırılmalı rezistans ısıtıcı ile çalışmaktadır. Tasarımda kullanılacak rezistanslar gıda ile uyumlu olup, doğrudan gıdaya temas etmektedir. Böylece ısıtmada sürecinde oluşacak enerji kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Rezistans yüzeyinin aşırı ısınması bu tarz sistemlerde yaygın bir sorundur. Bu durum gıdanın yanmasına ürün kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple tank içine bir karıştırıcı yerleştirilmiştir. Oluşan sirkülasyon tank içerisindeki gıdanın homojen bir şekilde ısınmasına katkıda bulunmuştur. Ön ısıtma işlemiyle bir miktar ısınan gıda elektrikli ısıtıcı ile pastörizasyon sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Şekil 3.3'te ısıtıcının ön tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Isıtıcı ön tasarımı

3.1.1 Isıtma Sisteminin Tasarımı

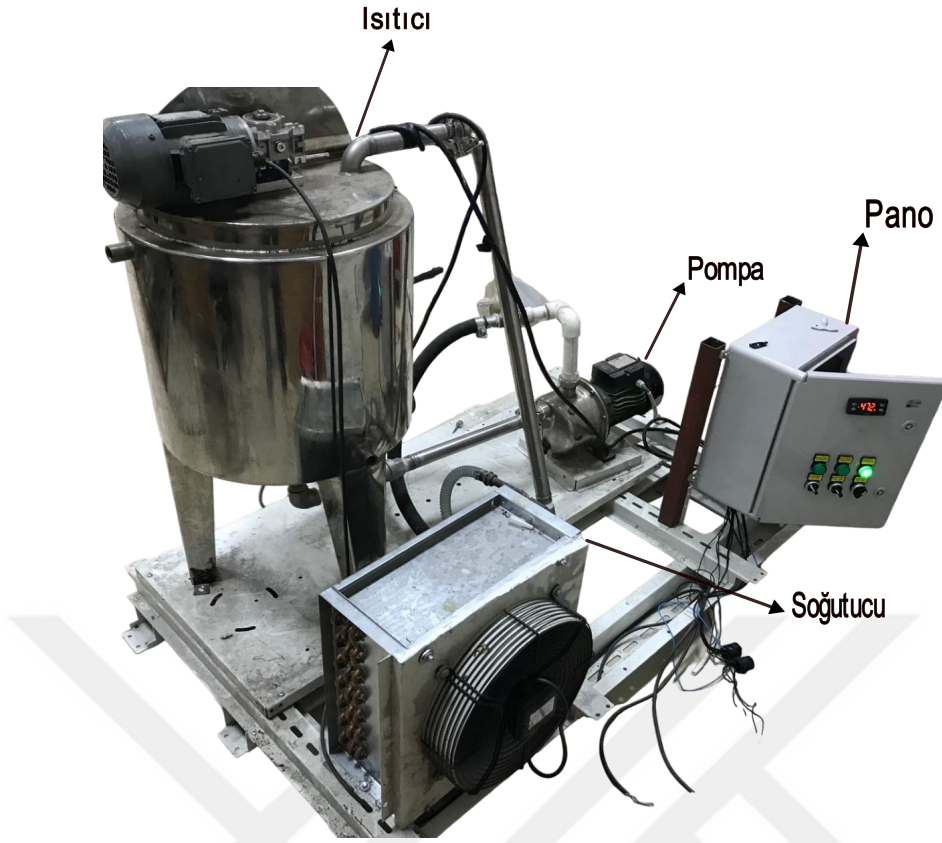
Ön denemelerin yapılabilmesi amacıyla basit bir düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenek sayesinde ısıtıcıda ısıtılan akışkan, soğutucu yardımıyla ön ısıtma sıcaklığına düşürülmektedir. Düzeneğin şematik gösterimi şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Isıtma sisteminin şematik gösterim

Pastörizasyon sıcaklığına ısıtılan gıdanın ısıtıcıdan çıkış sıcaklığı ölçülmektedir. Isıtıcıyı terk eden akışkan, bir pompa yardımıyla soğutucuya yönlendirilir. Soğutucu, akışkanın sıcaklığını belirli bir seviyeye kadar düşürmek amacıyla tasarlanmıştır, bu işlem pervane yardımıyla gerçekleştirilir. Pervane, akışkanın etkin bir şekilde soğutulmasını sağlayarak, yeniden ısıtıcı sisteme geri dönmesini sağlamaktadır. Isıtıcı girişindeki sıcaklık algılayıcı sayesinde, soğutulan gıdanın sıcaklığı sürekli olarak izlenmektedir. Bu süreçte akışkan yaklaşık 40 derece sıcaklığa kadar düşürülmektedir. Bu soğutma işlemi, akışkanın ön ısıtmaya tabi tutulmuş gibi değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Soğutulan gıda ısıtıcı sistemde pastörizasyon sıcaklığına kadar tekrardan ısıtılmaktadır. Bu sistemde debi ayarlaması vana yardımı ile yapılmaktadır. Kazan doluyken sistem ilk kez çalıştırılacağında vana istenilen debiye göre açılarak ilk çıkış debisi ayarlanmıştır.

Sistem sürekli akışlı açık bir sisteme örnek teşkil etmektedir. Bu tür sistemlerde gıda sürekli olarak hareket halindedir. Sistem rejime geldiği zaman zamanla sıcaklık veya diğer parametrelerde değişiklik gözlenmemektedir. Sistemin görseli şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Isıtma sistemi

Kazanda ısıtıcı olarak daldırılmalı rezistans kullanılmaktadır. Rezistans titanyum olup gıda ile uyumludur. Gıdaya direkt temas etmesi sayesinde ısı kaybını azaltması amaçlanmıştır. Isıtıcı rezistans şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Daldırılmalı ısıtıcı rezistans

Rezistansın gücünü belirlemek amacıyla şebeke analizörü kullanılmıştır. Bu değer ekserji analizinde iş girdisi olarak denkleme eklenmiştir. Şekil 3.7’de şebeke analizörü gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Şebeke analizörü

Isıtıcının ekserji ve enerji analizinin yapılabilmesi için kütle debisinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple sistemde sıcak su sayacı bulunmaktadır. Su sayacı 90 °C sıcaklığa kadar çalışabilmektedir. Sistemde kullanılan sıcak su sayacı şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Sıcak su sayacı

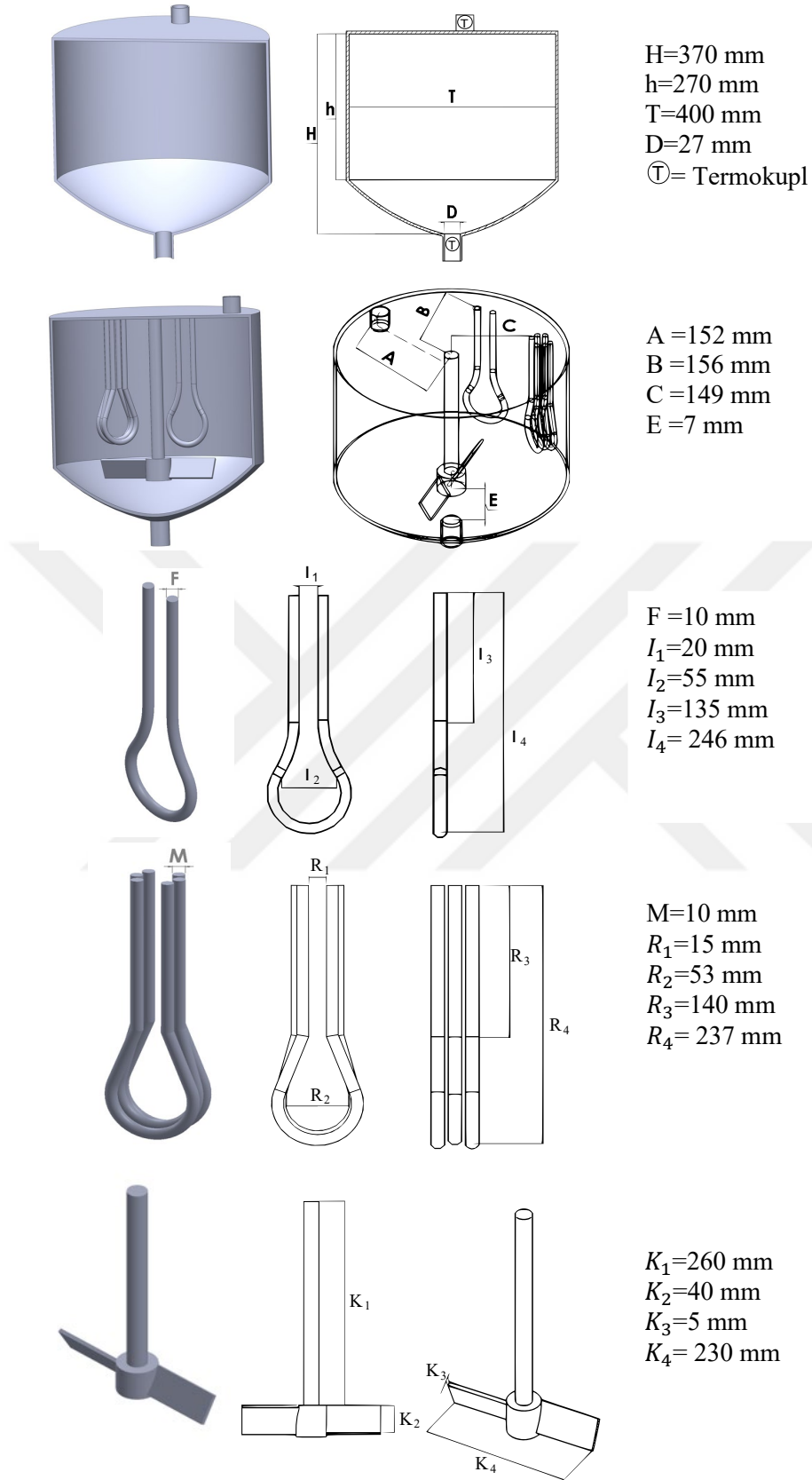
3.2 Yöntem

Deney sırasında, farklı güçlerde çalışan iki adet titanyum daldırma tipi elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. 2 kw ve 1 kw güçlerine sahip iki adet ısıtıcı kazana tepeden daldırılarak yerleştirilmiştir. Kazan 30 L hacmindedir ve içerisinde, sıvının hareketini sağlamak ve sıcaklık dağılımını homojenleştirmek amacıyla bir karıştırıcı bulunmaktadır. Bu karıştırıcı, 45 derece eğime sahip iki bıçakla donatılmıştır ve 40 RPM (dakikada 40 devir) hızında çalışmaktadır. Deneysel verilerin elde edilmesinin ardından CFD analizleri ve termoekonomik analiz gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 CFD Analizi

Isıtıcı sistemde; akışkan davranışını modelleme, ısı transferini anlama, performansı değerlendirme, tasarım optimizasyonu ve hataları önlemek için mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan CFD analizine yer verilmiştir. Bu analizle, akışkanın hareketi, ısı transferi gibi kritik parametreler üç boyutlu olarak simüle edilmiştir.

Isıtıcı Solidworks yazılımı kullanılarak 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan şekil ve parçalarının boyutları şekil 3.9'da gösterilmiştir.

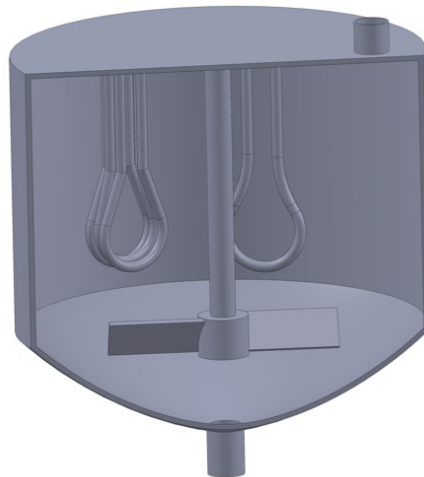


Şekil 3.9 İki bıçaklı karıştırıcıya sahip ısıtıcı tankın bileşenlerinin boyutlandırılması

Isıtıcı sistem analizinde Ansys Fluent yazılımı kullanılmıştır. Analizin ilk aşamasında karıştırıcı bıçaklarının çevresini kaplayacak şekilde küçük silindirik bir MRF (Multiple Reference Frames) bölgesi tanımlanmıştır. MRF yöntemi dönen parçaların kazan içerisindeki modellemek amacıyla kullanılmıştır. MRF bölgesine RPM (Dakikadaki devir sayısı) atanarak analizde kullanılmıştır. Bu, dönme hareketinin olduğu bölgelerde hassas sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

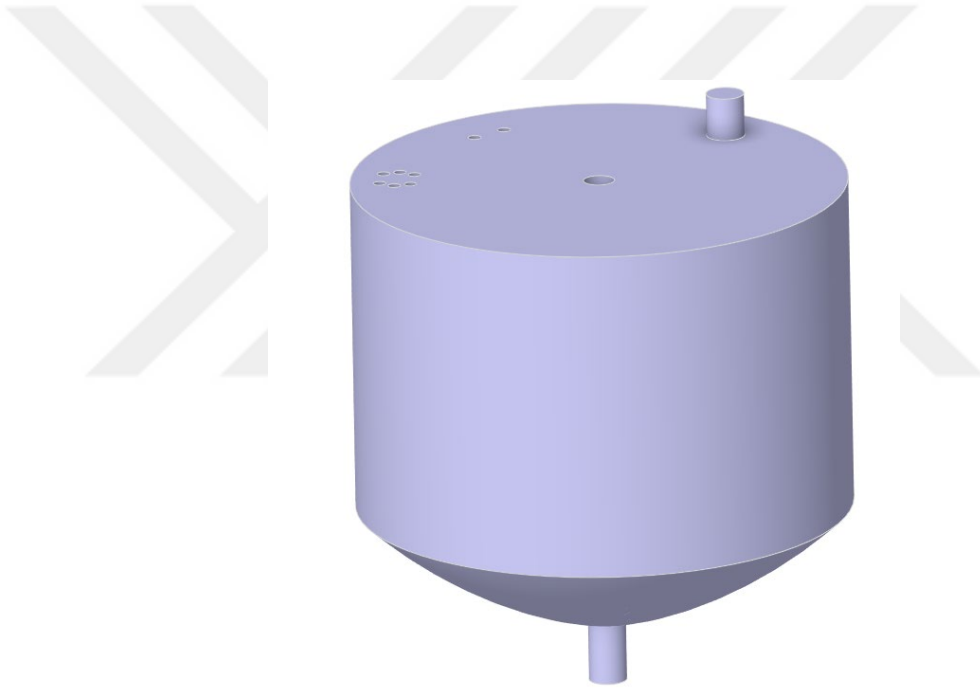
Titanyum ısıtıcılar enerji kaynağı olarak tanımlanıp CHT (Conjugate Heat Transfer) analizi yapılmıştır. CHT, katı ve sıvı bölgeler arasındaki ısı transferini modelleyen bir yöntemdir. Analizde ısıtıcının gücü, ısıtıcı hacmine bölünecek yani W/m^3 cinsinden tanımlanmıştır. Bu sayede ısı yük doğru bir şekilde modellenmiştir. CHT analizi karmaşık sistemlerde gerçekçi sonuçlar elde etmek için önemli bir yöntemdir. Özellikle ısı etkileşimlerin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Analizde kullanılacak zaman tabanlı yaklaşım Steady (Durağan durum) olarak belirlemiştir. Transient (Zamana bağlı) analizlerde daha gerçekçi ve doğru sonuçlar almak mümkündür, fakat bu analizler için çok fazla işlem gücü ve güçlü bir işlemci gerekmektedir. Solidworks yazılımında modellenen ısıtıcı sistemin görseli şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Isıtıcı modeli

Ansyes yazılımında bulunan Spaceclaim uygulaması ile geometri analiz için uygun hale getirilmiştir. Spaceclaim, Ansys tarafından sağlanan üç boyutlu bir modelleme uygulamasıdır. İlk olarak kazanın giriş ve çıkış noktaları belirlenerek kazan içerisinde bir hacim oluşturulmuştur. Oluşturulan hacim kazanın içerisindeki akış davranışını analiz etmek için temel alanı oluşturmaktadır. Analizde kazanın metal yüzeyleri içinde kalan bu hacim dikkate alınacaktır. Hacmin dışında kalan kazanın yüzey bölgeleri ve diğer gereksiz bölgeler pasif hale getirilmiştir. Bu sayede yazılımın gereksiz bölgelere mesh atarak, işlem yükünü arttırmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Meshleme CFD analizlerinde en kritik adımlardan birisidir. Bu adımın doğru yapılması işlem sonuçlarının doğruluğunu arttırırken, analiz süresini de kısaltmaktadır. Şekil 3.11’de kazan içerisinde oluşturulan hacim gösterilmiştir.

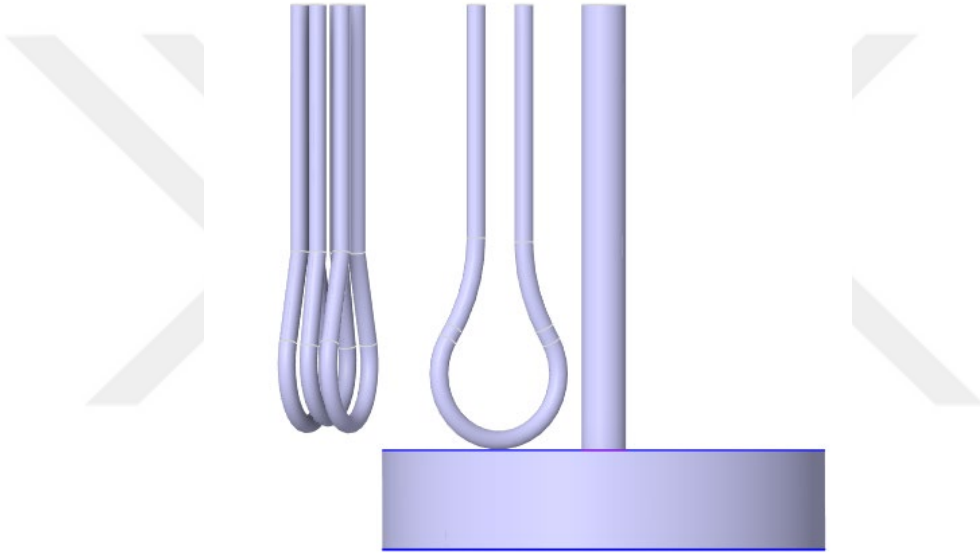


Şekil 3.11 Kazan içerisinde oluşturulan hacim

Kazanın içerisindeki sirkülasyonu sağlamak amacıyla, karıştırıcının etrafına MRF bölgesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bölge kazan içerisinde pervane dönüyormuş gibi bir etki yaratmaktadır. Bu sayede akışkanın kazan içerisinde belirli bir hızda hareket etmesi sağlanmaktadır. İşlevini yitiren karıştırıcı katısı ayırma komutu ile MRF bölgesinden kesilir ve ardından pasif hale getirilmiştir. Bu işlem ile sadece gerekli bölgelerin analizde yer almasını amaçlamaktadır. Bu sayede işlem yükü

azalmaktadır. Ayrıca karıştırıcının pasif olması MRF bölgesinin etkin bir şekilde çalışmasını ve doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır.

MRF bölgesi ve rezistans tank içerisinde oluşturulan hacimden ayırma komutu ile kesilmiştir. Bu işlemi bu bölgelerin duvar olarak tanımlanmasını sağlamaktadır. Duvar olarak tanımlanan bölgeler analiz sırasında sabit sınır koşullarında ele alınabilmektedir. Bu sayede diğer bileşenler ile etkileşimleri daha doğru bir şekilde modellenebilmektedir. Oluşturulan MRF bölgesi şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 MRF bölgesinin gösterimi

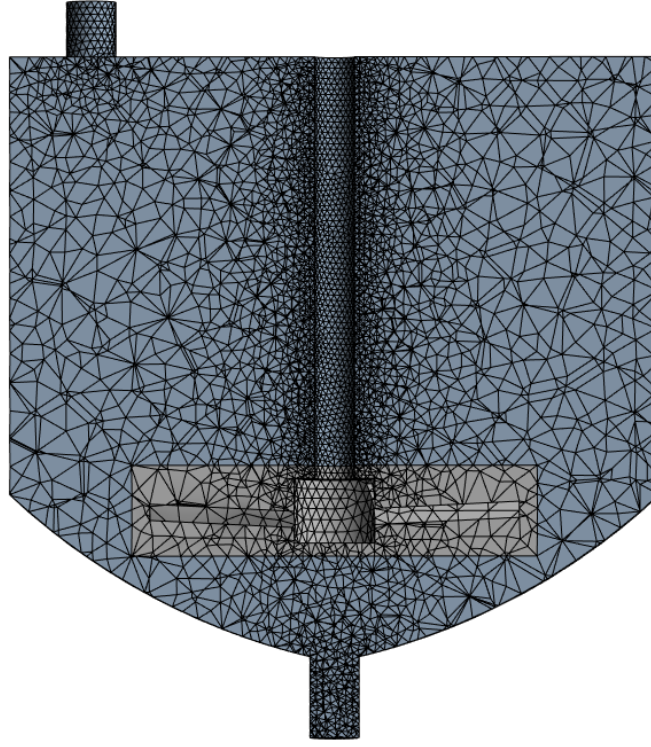
Spaceclaim’de geometri modellikten sonra, ikinci aşama mesh işlemidir. Bu aşamada, modelin üzerinde mesh oluşturulmuştur. Mesh işlemi, modelin sonlu elemanlar yöntemine uygun hale getirilmesi için modelin üzerinde ağ yapısının oluşturulmasıdır. Sonlu elemanlar yöntemi, sistemlerin davranışını analiz etmek için sistemin çok sayıda küçük parçalara bölünmesini sağlamaktadır. Bu elemanların her birinin davranışı hesaplanarak tüm sistemin genel davranışı tahmin edilir. Mesh işleminin kalitesi, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle ısıtılan yüzeye yakın bölgelerdeki mesh elemanlarının uygun boyutlarda

olması, ısı transferi gibi hassas süreçlerin doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Şekil 3.13'te mesh atılmış geometri gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Mesh atılmış geometri

Mesh atma işlemi sırasında çeşitli teknikler kullanılmıştır. Kıvrımlı bölgelerdeki (örneğin; MRF bölgesi, tank yüzeyleri gibi bölgeler) mesh kalitesini arttırmak için Curvature tabanlı mesh atma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, modeldeki eğimli ve kıvrımlı bölgelerde daha iyi mesh atmak için kullanılmaktadır. Modelin yüzeylerindeki akış davranışlarını daha iyi anlamak ve modellemek için Inflation tekniği kullanılmıştır. Bu teknik yüzeylere yakın bölgelerde sınır tabakası oluşturarak akış davranışlarının çözülmesine katkıda bulunmaktadır. Bu süreçte Smooth Transition yöntemi kullanılarak sınır tabakası ile mesh arasında iyi bir geçiş sağlanmıştır. Şekil 3.14'te modele atılan Mesh'in kesit alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Modeldeki meshin kesit alanı

Mesh işlemi bittikten sonra model ASYS Fluent yazılımında analize hazır hale getirilmiştir. Öncelikle yazılımdaki units (birimler) sekmesinden angular velocity (açısal hız) birimi rev/min (RPM) olarak değiştirilmiştir. Bunlara ek olarak sıcaklık birimi °C olarak, hız birimi m/s olarak değiştirilmiştir. Yer çekimi ivmesi -y yönünde tanımlanmıştır.

MRF bölgesi y eksenini boyunca döndürülmüştür. Bu bölgeye 40 RPM hız değeri girilmiştir. Isıtıcı bölgeye heat flux (ısı akısı) seçeneği kullanılarak W/m^3 cinsinden güç değeri girilmiştir. Inlet (giriş) bölgesine m/s cinsinden akış hızı değeri girilmiştir. Akış modeli türbülanslı k-epsilon (k-ε) modeline göre ayarlanmıştır. Çözüm yöntemi olarak SIMPLE kullanılarak analiz işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Termodinamik Analiz

3.2.2.1 Enerji

Enerjinin bilimi olarak termodinamik gösterilebilmektedir. Enerji bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanabilmektedir. Enerji; potansiyel, kinetik, mekanik, elektrik, ısı, nükleer ve kimyasal gibi farklı türlerde bulunabilmektedir. Sistemin toplam enerjisi belirtilen enerjilerden manyetik, elektrik, yüzey etkileri ve diğer türler ihmal edildiğinde, kinetik potansiyel ve iç enerjisinin toplamından oluşmaktadır. Bir sistemin toplam enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [42]:

$$E = U + E_k + E_p \quad (3.1)$$

Aynı ifade birim kütle için yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$e = u + e_k + e_p \quad (3.2)$$

Burada e enerjii, u iç enerjii, e_k kinetik enerjii ve e_p potansiyel enerjii ifade etmektedir.

Sistemin hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji denir ve,

$$E_k = m \frac{v^2}{2} \quad (3.3)$$

Şeklinde hesaplanır. Potansiyel enerji ise bir sistemin yer çekimi ivmesinin g olduğu bir yerde z yükseklikte sahip olduğu enerjidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_p = mgz \quad (3.4)$$

Kinetik ve potansiyel enerji birim kütle için yazıldığında aşağıdaki bağıntılar bulunur.

$$e_k = \frac{v^2}{2} \quad (3.5)$$

$$e_p = gz \quad (3.6)$$

3.2.2.2 Kütlenin Korunumu Yasası

Kütlenin korunumu doğanın en temel ilkelerinden bir tanesidir. Kütle de enerji gibi korunum yasalarına uyar ve var veya yok edilemez. Açık sistemlerde kütlenin korunumu ifadesi şu şekilde ifade edilir [42];

$$\left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kontrol hacmine} \\ \text{giren kütle} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kontrol hacminden} \\ \text{çıkan kütle} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kontrol hacmi} \\ \text{içerisindeki} \\ \text{toplam} \\ \text{kütle değişimi} \end{array} \right) \quad (3.7)$$

Veya

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç = \frac{\Delta \dot{m}_{\text{Kontrol hacmi}}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde zamanla akış özelliklerinin değişmediği bilinmektedir. Açık sistemlerde toplam kütle zamanla değişmez ($\Delta \dot{m}_{\text{Kontrol hacmi}} = \text{sabit}$). Bu durumda kütlenin korunumu yasası gereği kontrol hacmine giren kütlenin, çıkan kütleyle eşit olması gerekmektedir. Kütlenin korunumu yasası sürekli akışlı açık sistemlerde aşağıdaki gibidir;

$$\left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda kontrol} \\ \text{hacmine giren kütle} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda kontrol} \\ \text{hacminden çıkan kütle} \end{array} \right) \quad (3.9)$$

Veya

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\chi \quad (3.10)$$

3.2.2.3 Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu ifade etmektedir. Termodinamiğin birinci kanuna göre enerji, enerji türleri arasında dönüşebilmektedir ancak enerji miktarında değişim olmayacağı belirtilmektedir. Birim kütle için toplam enerjiyi veren eşitlik denklem 3.11’de verilmiştir. Kontrol hacmine giren ve çıkan akışkan akış enerjisine (Pv) sahip olacaktır. Bu durumda yeni denklem şu şekilde olacaktır [42];

$$e = Pv + u + e_k + e_p \quad (3.11)$$

Burada ($Pv + u$) ifadesinin entalpiye (h) eşit olduğu bilinmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji eşitlikleri de yerine yazıldığı takdirde;

$$e = h + \frac{v^2}{2} + gz \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. Sürekli akışlı sistemlerde, belirlenen kontrol hacmi içerisinde sürekli akış vardır. Kontrol hacmi içerisinde zamana bağlı olarak akışkanın özelliklerinde değişim olmaz. Bu sistemlerde belirlenen kontrol hacminde toplam kütle ve enerji sabittir. Sürekli akışlı açık sistemlerde sisteme ısı, iş, kütle giriş ve çıkışı

olabilmektedir. Bu durumda termodinamiğin birinci yasası aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir;

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta \quad (3.13)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \sum_\zeta \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (3.14)$$

3.2.2.4 Termodinamiğin İkinci Yasası

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin miktarı ile ilgilenmektedir, herhangi bir hal değişiminde çevre ve sistem arasındaki alınan ve verilen iş ve ısı ile iç enerjideki oluşan değişime arasındaki bağıntıyı vermektedir. Termodinamiğin ikinci kanunu ise enerjinin niteliğiyle birlikte niceliğini de öne çıkarmaktadır. Bir sistemdeki entropi üretimi enerji niteliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple bir sistemin analizinde termodinamiğin birinci ve ikinci kanunun beraber kullanılmasının daha doğru olacağı vurgulanmaktadır. Termodinamiğin ikinci kanununun geleneksek ifade biçimleri şu şekildedir [42]:

Clasius ifadesine göre doğada kendiliğinden hiçbir zaman düşük sıcaklıktaki cisimden yüksek sıcaklıktaki cisme ısı geçişi olamaz. Bu durum ancak ısı makineleri gibi sistemlerle mümkün olabilir.

Kelvin ifadesine göre sistemde tek bir ısı kaynağından ısı çekerek bu ısıyı tamamen işe dönüştürmek mümkün değildir.

Kelvin-Planck ifadesine göre tek bir ısı kaynağından ısı alarak sürekli olarak iş üreten makine yapma olasılığı yoktur. Isının bir miktarı ile iş üretilirken kalan kısmının da bir kuyuya aktarılması gereklidir.

İfadelerin hepsi ısıнын tamamının işe çevrilemeyeceğini vurgulamaktadır. Bu durum, çevre ve sistemde etki oluşturmada hiçbir süreç gerçekleşemez ifadesiyle açıklanabilir.

Enerji türleri arasında dönüşüm yaparken, bazı enerji biçimleri ısı enerjisine kayıpsız olarak dönüşebilir. Ancak, ısı enerjisinin tamamen mekanik enerjiye dönüşmesi mümkün değildir. Kayıpsız dönüşüm, yani tersinir süreçler, enerji dönüşümü sırasında hiçbir düzensizlik yaratmaz. Fakat gerçekte, enerji dönüşümleri sırasında bazı düzensizlikler ve kayıplar kaçınılmazdır. Bu durum, termodinamiğin ikinci yasasını ortaya koymaktadır. Termodinamiğin ikinci yasası, enerji dönüşümleri sırasında oluşan bu düzensizliklerin "tersinmezlik" olarak adlandırıldığını belirtmektedir. Yani, doğal enerji dönüşüm süreçleri her zaman tersinmezdir. Bu, ısı enerjisinin tamamen mekanik enerjiye dönüşemeyeceği anlamına gelmektedir. Burada, ısı enerjisinin tamamen kaybolduğu değil, bir kısmının iş yapma kapasitesinin olmadığını ifade edilmektedir [43].

Enerji dönüşümünde meydana gelen düzensizlikler entropi kavramının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Entropi enerjinin kalitesini belirleyen termodinamik bir özelliktir. Başka bir deyişle entropi düzensizliğin nicel ölçüsüdür. Sistemlerin entropisinin bilinmesinden ziyade entropi değişiminin bilinmesi daha kullanışlıdır. Entropinin tanımı Clausius eşitsizliğinden gelmektedir:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS_{\text{içten tersinir}} \quad (3.15)$$

$$\frac{\delta Q}{T} \leq dS \quad (3.16)$$

Sisteme birim miktarda aktarılan ısıнын sıcaklığa oranı, sistemde bir miktar tersinmezlik meydana getirir. Bu durum dS ifadesiyle gösterilir. Ayrıca denklem 3.16'daki eşitsizlik tersinmezliği ifade etmektedir.

Sistemlerde oluşan tersinmezlikler sistemlerin çalışma verimini azaltmaktadır. Oluşan tersinmezliklerin ölçüsü entropi üretimidir. Tersinmezlik arttıkça, entropi üretimi de artar. Bu bağlamda, entropi, kapalı ve açık sistemlerde gerçekleşen hal değişimlerinde tersinmezliklerin hesaplanmasında kullanılır. Sürekli akışlı açık sistemde birim zamandaki toplam entropi üretimi:

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum \dot{m}_{\text{g}} s_{\text{g}} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \geq 0 \quad (3.17)$$

3.2.2.5 Ekserji

Ekserji, bir sistemin çevresi ile (ölü hal) aynı şartlara getirilmesi ile elde edilebilecek en büyük iş şeklinde tanımlanabilmektedir. Bir sistemin çevre ile termodinamik dengede olması durumu ölü haldir (T_0).

Sürekli akışlı açık sistemlerde termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu şu şekildeydi:

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{\text{ç}} + \dot{W}_{\text{ç}} + \sum_{\text{ç}} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.18)$$

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\text{ç}} s_{\text{ç}} - \sum \dot{m}_{\text{g}} s_{\text{g}} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \geq 0 \quad (3.19)$$

Denklem 3.17'de entropi üretimi gösterilmiştir. Sadece çevreyle ısı alışverişinde bulunan bir girişli ve çıkışlı sürekli akışlı sistemler için:

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \dot{m}(s_{\text{ç}} - s_{\text{g}}) + \sum \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_0} \geq 0 \quad (3.20)$$

Burada $\dot{Q}_{\text{çevre}} = -Q$ 'dir. Birinci kanunda ısı geçişi terimi yok edilir ve sistemde bir giriş ve bir çıkış varsa denklem basitleştirilebilir:

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m} \left[(h_g - h_{\dot{c}}) - T_0(s_g - s_{\dot{c}}) + \frac{V_g^2 - V_{\dot{c}}^2}{2} + g(z_g - z_{\dot{c}}) \right] \quad (3.21)$$

Elde edilen denklem birim kütle için yazılırsa:

$$w_{tr} = (h_g - h_{\dot{c}}) - T_0(s_g - s_{\dot{c}}) + \frac{V_g^2 - V_{\dot{c}}^2}{2} + g(z_g - z_{\dot{c}}) \quad (3.22)$$

Bir sistemdeki ısıнын tamamı işe dönüştürülemez. Isının sadece bir kısmı ekserji olarak kullanılabilir ve bu kullanılabilir enerji kısmı iş yapma potansiyeline sahiptir. Bu durumda ısı için ekserji:

$$Ex_{isl} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (3.23)$$

İş, doğrudan ekserji olarak kabul edilir. İş enerjinin kullanılabilir bir formudur ve ekserji iş yapma kapasitesini temsil eder. Bu durumda:

$$Ex_{i\dot{s}} = W$$

2.3.5.1 Ekserji Kaybı

Sürekli akışlı açık sistemlerde sisteme giren akışın ekserjisinden çıkan akışın ekserjisi çıkarıldığı zaman birim zamanda yok olan ekserji bulunmaktadır:

$$\dot{Ex}_k = \dot{Ex}_g - \dot{Ex}_{\dot{c}} \quad (3.24)$$

Ekserji kaybı sistemde üretilen entropi ile çevre sıcaklığının çarpılmasıyla da bulunabilmektedir:

$$\dot{E}x_k = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (3.25)$$

2.3.5.2 Sürekli Akışlı Açık Sistemlerde Ekserji

Sürekli akışlı açık sistemlerde zamanla değişim olmadığı bilinmektedir. Bu durumda ekserji dengesi şu şekilde yazılabilmektedir:

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_{\text{ç}} - \dot{E}x_k = 0 \quad (3.26)$$

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_{\text{ç}} + \dot{E}x_k \quad (3.27)$$

Açık sistemlerde, sisteme ısı, iş, kütle giriş ve çıkışı olabilmektedir:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_g \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + W_g + \dot{m}[(h - h_0) + \frac{V^2}{2} + gz - T_0(S - S_0)] \\ = \dot{Q}_{\text{ç}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + W_{\text{ç}} + \dot{m}[(h - h_0) + \frac{V^2}{2} + gz - T_0(S - S_0)] + \dot{E}x_k \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.2.2.6 Termoekonomik Analiz

Termoekonomi, ekserji analizini ekonomik prensiplerle birleştirerek etkin sistem tasarımı, maliyet veya işletimi için gereken altyapıyı sağlayan bir mühendislik alanıdır. Termoekonominin amacı, ekserji analizi yaparak maliyetleri en aza indirmektir. Termoekonominin termodinamik uygulamaları, ekserjinin yapısına dayanır. Termoekonomi terimi ekserji analizi ve ekonominin birleşimini ifade ettiğinden, ekserji ekonomisi terimi de kullanılır. Termoekonominin araçları, analiz

sistemlerini daha verimli ve ucuz bir şekilde tasarlamayı, bu sistemlerin verimliliğine bağlı olarak ihtiyaç duyulan temel değişiklikleri belirlemeyi ve sistemden elde edilebilecek maliyetleri ve uygun fiyatları daha doğru bir şekilde belirlemeyi mümkün kılar [44].

Sistemlerdeki kütle, ısı ve iş akışlarının kullanılabilir termodinamik değerleri ekserji aracılığıyla belirlenebildiğinden, ekserjiyi termal sistemler için maliyet tahsisine dahil etmek çok mantıklıdır. Her ekserji akışı, ekserji maliyetlendirmesinde belirli bir maliyetle ilişkilidir. Bu yaklaşım, termal bir sisteme giren ve çıkan ekserji ile ilgili maliyet değerlerini ve ekserji ile ilişkili güç ve ısı akışlarını açıkça ifade etmemizi sağlar [45].

Ekserji, bir sistem ile çevresi arasındaki iş, ısı ve diğer etkileşimlerini ve sistem içindeki tersinmezliklerin etkisini ölçer. Bu nedenle, ekserji, maliyetlerin hesaplanmasında rasyonel bir temel sağlar. Ekserji maliyetlendirmesi, maliyet oranlarını, ilgili ekserji oranları ve birim maliyetler üzerinden değerlendirir [44]. Birim maliyeti veren denklem aşağıda verilmiştir:

$$\dot{C} = c\dot{E} = c\dot{m}e \quad (3.29)$$

Burada c değeri birim ekserji başına maliyeti ve $\dot{E}$ değeri ilgili akımın ekserji değerini temsil etmektedir. Herhangi bir ekipman için maliyet denge denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\sum \dot{C}_e + \dot{C}_w = \dot{C}_q + \sum \dot{C}_i + \dot{Z}_i \quad (3.30)$$

Burada $\dot{C}$ değeri ilgili akımın maliyet oranını vermektedir. Z değeri ise yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamını ifade etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney sonucunda, sistemin performansı belirlenen çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir. Bu koşullarda, suyu ısıtma süreci 1 atm basınç altında gerçekleştirilmiştir. 100 L/saat debide çalışan sistemde, suyun giriş sıcaklığı 42 °C olarak ölçülmüştür. Isıtma işlemi sırasında, kazan içerisindeki iki bıçaklı karıştırıcı 40 RPM hızında dönerek sıvı karışımını sağlamış ve sıcaklık dağılımını homojenleştirmiştir. Titanyum daldırma tipi ısıtıcılarla ısınan suyun, ısıtıcıdan çıkış sıcaklığı 66 °C olarak kaydedilmiştir.

Akış tipini belirlemek için Reynolds sayısı bulunmuştur. Reynolds sayısı aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu 60} \quad (4.1)$$

Burada;

D_a : Karıştırıcı çapını

N: Dakikadaki devir sayısını (RPM)

ρ : Sıvının yoğunluğunu

μ : Sıvının viskozitesini

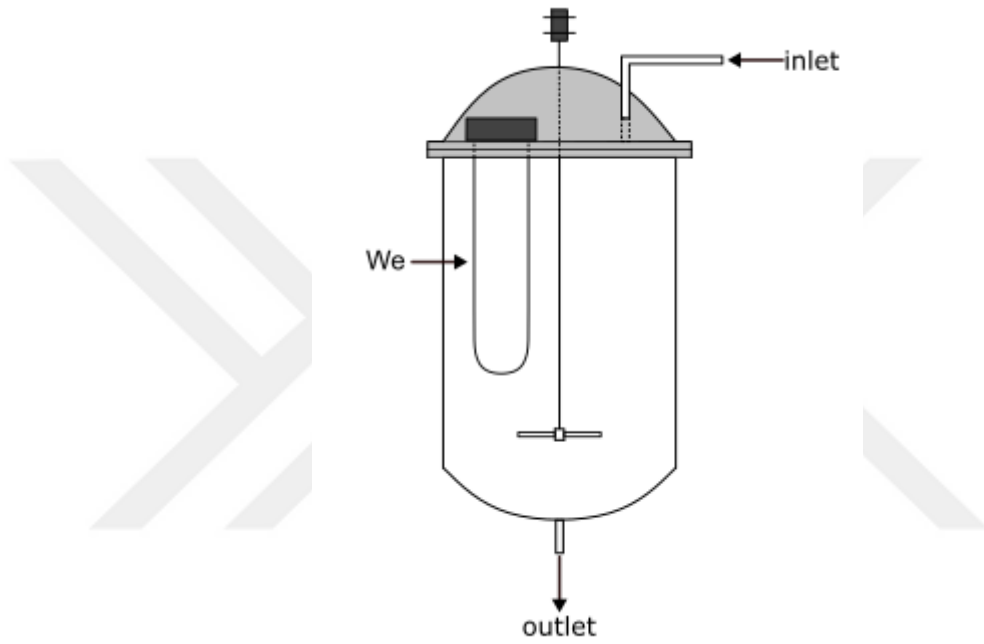
ifade etmektedir. Değerler yerine koyulduğunda Reynolds sayısı;

$$N_{Re} = \frac{(0.23)^2 \left(\frac{40}{60}\right) (980)}{0.4418} = 78.22 \quad (4.2)$$

olarak bulunmuştur. Tank içerisindeki akışın laminar tipi akış olduğu belirlenmiştir.

4.1 Enerji Analizi

Isıtıcı sisteme ait giriş ve çıkış akımları şekil 4.1’de gösterilmiştir. Isıtıcıya ait akımların fiziksel özellikleri tablo 4.1’de gösterilmiştir. Suyun belirli sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri termodinamik tablolar aracılığı ile. Su doymuş sıvı kabul edilmiştir ve bu kabule göre entalpisi bulunmuştur. Sisteme giren iş rezistansın ısınmasını sağlayarak gıdayı ısıtmaktadır.



Şekil 4.1 Isıtıcıya ait akımlar

Tablo 4.1 Isıtıcıya ait akımların fiziksel özellikleri

Akımlar	inlet	outlet
Sıcaklık (°C)	42	66
Basınç (Pa)	101,325	101,325
Entalpi (kJ/kg) [Ek tablo 2]	175.89	276.31

Açık sistemlerde, kütlenin korunumu yasasına göre sisteme giren kütle çıkan kütleye eşit olmaktadır. Hacimsel debinin korunumu gibi bir ifade söz konusu değildir. Bu sebeple enerji ve ekserji denkleğinin çözülebilmesi için kütle debisinin bulunması gerekmektedir. Sistemde bulunan su sayacı sistemden ne kadar m^3 su geçtiğini göstermektedir. Bilindiğı üzere kütle ile hacim arasındaki oran yoğunluğu vermektedir:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.3)$$

Burada yoğunluğun biriminin (kg/m^3) olduğı görölmektedir. Kütle ve hacim ifadeleri saniyeye bölündüğünde debi ifadelerine geçiş yapılabilir.

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (4.4)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (4.5)$$

Su sayacından 66 °C’de 10 dakikada 0,016 m^3 su geçmiştir. Bu durumda hacimsel debi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{V} = \frac{0,016 (m^3)}{10 (dk)} \frac{1 (dk)}{60 (s)} = 0.000028 \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (4.6)$$

Suyun 66 °C’deki suyun yoğunluğu 979.98 (kg/m^3) olarak tespit edilmiştir [Ek tablo 1. Sıvı suyun yoğunluğu tablosu]. Kütleli debiyi veren denklem, denklem 4.5’te verilmiştir. Bu durumda kütleli debi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{m} = 979.98 \times 0.000028 = 0.0274 \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (4.7)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde zamanla değişim olmamaktadır. Bu durumda giren enerji çıkan enerjiye eşittir:

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \dot{m} \left(h_1 + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \dot{m} \left(h_2 + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4.9)$$

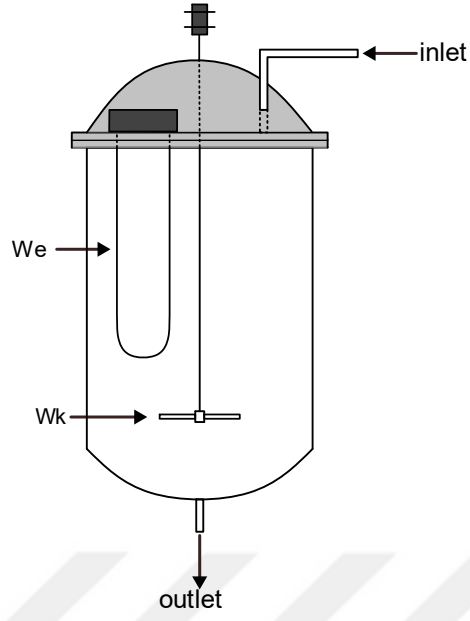
Sisteme giren enerji sadece iş enerjisidir. Rezistans ısıtıcı elektrik işi ile gıdayı ısıtmaktadır. Potansiyel ve kinetik enerjiler çok küçük değerler olduğu ihmal edilmiştir. Bu durumda iş aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{W}_g = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (4.10)$$

$$\dot{W}_g = 0.0274(276.31 - 175.89) = 2.75 \text{ kW} \quad (4.11)$$

4.2 Ekserji Analizi

Isıtıcı sisteme ait giriş ve çıkış akımları şekil 4.2’de gösterilmiştir. Isıtıcıya ait akımların fiziksel özellikleri tablo 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Ekserji analizi için ısıtıcıya ait akımlar

Tablo 4.2 Isıtıcı akımlarının fiziksel özellikleri

Akımlar	inlet	outlet	Ölü hal (T_0)
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	42	66	25
Basınç (Pa)	101,325	101,325	101,325
Entalpi (kJ/kg)	175.89	276.31	104.83
Entropi (kJ/kgK)	0.59888	0.9060	0.3672
Kütleli debi (kg/s)	0.0274	0.0274	-

Ekserji dengesi ifadesi aşağıda gösterilmiştir:

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta - \dot{E}x_k = 0 \quad (4.12)$$

Bu denklik ısıtıcı için incelendiğinde denkliğe elektrik işi de eklenmelidir:

$$W_r + W_k + \dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta - \dot{E}x_k = 0 \quad (4.13)$$

$$\dot{E}x = \dot{m} \left[(h_2 - h_0) + \frac{v^2}{2} + gz - T_0(S_2 - S_0) \right] \quad (4.14)$$

$$\dot{E}x_1 = 0.0274[(175.89 - 104.83) - 298(0.5988 - 0.3672)] = 0.055 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) \quad (4.15)$$

$$\dot{E}x_2 = 0.0274[(276.31 - 104.83) - 298(0.9060 - 0.3672)] = 0.244 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right) \quad (4.16)$$

Rezistansın gücü 2.950 kW, karıştırıcının gücü 0.1 kW olarak sistemden ölçülmüştür. Bu değer ekserji denkliğine direkt girmektedir. İşin tamamı ekserji olarak kabul edilmektedir. Bu durumda kaybolan ekserji aşağıdaki gibi bulunur:

$$\dot{E}x_k = W_r + W_k + \dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta \quad (4.17)$$

$$\dot{E}x_k = 2.950 + 0.1 + 0.055 - 0.244 = 2.861 \text{ kW}$$

Ekserji kaybını bulmanın diğer bir yolu da ölü hal ile entropi üretiminin çarpılmasıdır. Bu sayede ekserji denkliğinden bulunan ekserji kaybının sağlanması yapılabilmektedir.

$$\dot{E}x_k = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (4.18)$$

İşin entropisi yoktur. Bu sebeple entropi denkliğine rezistansın güç değeri dahil edilmemiştir. Entropi dengesi ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$S_{giren} + S_{üretim} = S_{çıkan} \quad (4.19)$$

$$s_1\dot{m} + S_{üretim} = s_2\dot{m} \quad (4.20)$$

$$S_{üretim} = s_2\dot{m} - s_1\dot{m} \quad (4.21)$$

$$S_{üretim} = 0.9060 \times 0.0274 - 0.59888 \times 0.0274 = 0.00961 \quad (4.22)$$

$$\dot{Ex}_k = T_0 \dot{S}_{üretim} \quad (4.23)$$

$$\dot{Ex}_k = 298 \times 0.00961 = 2.86 \quad (4.24)$$

Ekserji verimi kısaca; çıkanların girenlere bölümü olarak yazılabilmektedir. Bu durumda ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Ex}_2}{\dot{Ex}_1 + \dot{W}_r + \dot{W}_k} = 1 - \frac{\dot{Ex}_k}{\dot{Ex}_1 + \dot{W}_r + \dot{W}_k} \quad (4.25)$$

$$\varepsilon = \frac{0.244}{0.055 + 2.950 + 0.1} = 0.078 \times 100 = \%7.8 \quad (4.26)$$

Ekserji verimliliğinin %7.8 bulunması ısıtıcının verimsiz çalıştığı anlamına gelmemektedir. Enerji analizine göre 2.9 kW değerindeki ısıtıcı gerekli enerjiyi sağlayıp tanktaki suyu istenilen sıcaklığa çıkarmıştır. Yani sistem enerji analizi açısından dengededir. Ekserji analizi ise enerji miktarına değil enerjinin iş yapabilme

potansiyelini dikkate almaktadır. Bilindiği gibi elektrik enerjisi ekserjinin düzenli halidir ve direkt iş olarak sisteme girmektedir. Isı enerjisi ise ekserjinin düzensiz halidir ve sistemde tersinmezliklere sebep olur. Bu sistemde elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi sistemdeki tersinmezlikleri arttırmış ve iş potansiyelinin düşmesi sebep olmuştur. Özetle elektrik enerjisinin büyük bir kısmı iş potansiyelini kaybederek sadece ısı enerjisine dönüşmüştür. Bu durumda işe dönüşebilir potansiyelin büyük bir kısmı kaybolmuştur. Başaran ve ark., 2023 yılında yaptıkları çalışmada 3 kW bir elektrikli ısıtıcı ile sütü pastörizasyon sıcaklığına çıkarmışlardır. Bu çalışmadaki ekserji verimliliği %8.88 bulunmuştur. Bu durum enerji geri kazanımının yetersiz kalmasına bağlanmıştır [46].

Başaran ve ark. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, indüksiyon sisteminin ekserji verimliliği %32.67 olarak belirtmişlerdir. Bu fark, indüksiyon sistemlerinin enerjiyi doğrudan ürüne aktarması ve daha homojen ısı transferi sağlamasıyla ilişkilendirilebilmektedir. Elektrikli ısıtıcılar ise su bazlı sistemlerde %6.51, HTF bazlı sistemlerde %6.13 ekserji verimliliği sağlamıştır. Bu değerler bu çalışmadaki daldırmalı ısıtıcıda bulunan %7.8 değerine yakındır. Ancak, indüksiyon sistemleri ile karşılaştırıldığında daldırmalı elektrikli ısıtıcıların verimliliği optimize edilmelidir [47].

4.3 Termoekonomik Analiz

Cihaz ömrü $n=20$ yıl, faiz oranı (r_i) %0.15 (Euro için), eskalasyon oranı (r_n) %1, geri ödeme oranı (i_{eff}) %1.5, bir ayda 24 gün çalışıldığı kabul edilmiştir.

Anapara geri kazanma faktörü CRF;

$$CRF = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n - 1} \quad (4.27)$$

$$CRF = \frac{0.015(1+0.015)^{20}}{(1+0.015)^{20}-1} = 0.0582 \quad (4.28)$$

Bir değere getirilmiş düzeltme faktörü k;

$$k = \frac{1+r_n}{1+i_{eff}} \quad (4.29)$$

$$k = \frac{1+1}{1+1.5} = 0.8 \quad (4.30)$$

Eskalasyon düzeltme faktörü CELF;

$$CELF = \frac{k(1-k^n)}{1-k} CRF \quad (4.31)$$

$$CELF = \frac{0.8(1-0.8^{20})}{1-0.8} 0.0582 = 2,3 \quad (4.32)$$

Bir değere getirme faktörü;

$$M = \frac{CELF}{1+r_i} \quad (4.33)$$

$$M = \frac{2,3}{1+0.015} = 2.26 \quad (4.34)$$

Cihazın ilk yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alınarak bir değere getirilmiş parasal değeri (Z) bulunmaktadır.

$$Z_{yatırım} = Z_{Ekipman} + Z_{nakil} + Z_{işçilik} + Z_{tesis} \quad (4.35)$$

$$Z_{yatirim} = 3000 + 50 + 50 + 40 = 3140 \text{ €} \quad (4.36)$$

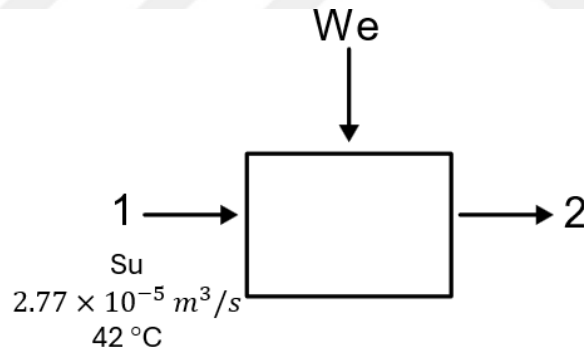
İşletme maliyeti yatırım maliyetinin %30'u olarak kabul edilmiştir. Sisteme ait akımlar şekil 4.3'te gösterilmiştir.

$$Z_{işletme} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{vergi} \quad (4.37)$$

$$Z_{işletme} = 942 \text{ €/yıl} \quad (4.38)$$

$$Z = (Z_{yatirim} + Z_{işletme})M \quad (4.39)$$

$$Z = \left[\frac{3140}{20 \times 24 \times 365} + \frac{942}{12 \times 365} \right] \times 2.26 = 0.52 \text{ €/h} \quad (4.40)$$



Şekil 4.3 Isıtıcıyı oluşturan akımlar

Isıtıcı için maliyet denklemi aşağıdaki gibidir:

$$c_1 E_1 + c_e E_e + Z = c_2 E_2 \quad (4.41)$$

İşlenen ürün sudur, c_2 değeri suyun birim fiyatı başına enerji maliyetini vermektedir. c_e değeri elektrik enerjisinin maliyetidir. Ortalama elektrik maliyeti 4.46 TL/kWh'dır. Euro bazında bu değer 0.11 €/kWh'dır.

$$c_e = 0.11 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0.11 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \cdot \text{h}} = 0.11 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{s}} = 3.05 \times 10^{-5} \text{ €/kJ} \quad (4.42)$$

Isıtıcı hesabı için gerekli akımlar tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Isıtıcı akımları için ekserji değerleri

Akımlar	Ekserji (kW)
1	0.055
2	0.244
W_e	2.950

Suyun maliyeti 0.27 Euro/m³'dür. Maliyet denge denklemi aşağıdaki gibidir. Tablo 3.5'teki değerler yerine koyulursa;

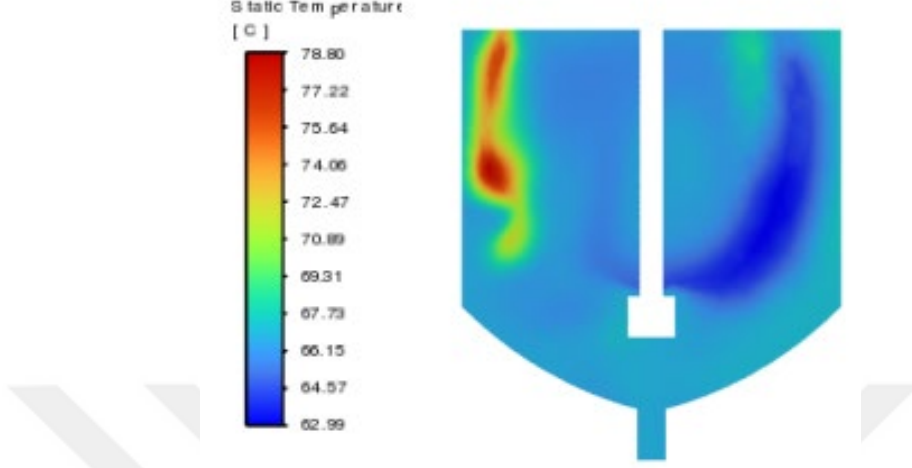
$$(c_1 \times E_1) + (3.05 \times 10^{-5} \times E_e) = c_2 \times E_2 \quad (4.43)$$

$$c_2 = 3.99 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{€}}{\text{kJ}} \right) \quad (4.44)$$

değeri elde edilir.

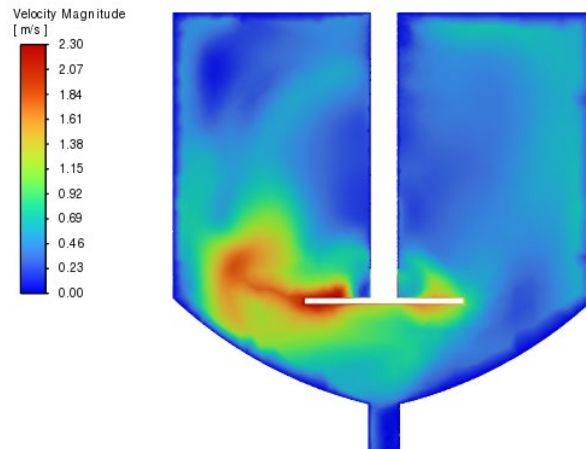
4.4 CFD Analizi

CFD analizi sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Kazan içerisindeki sıcaklık dağılımı

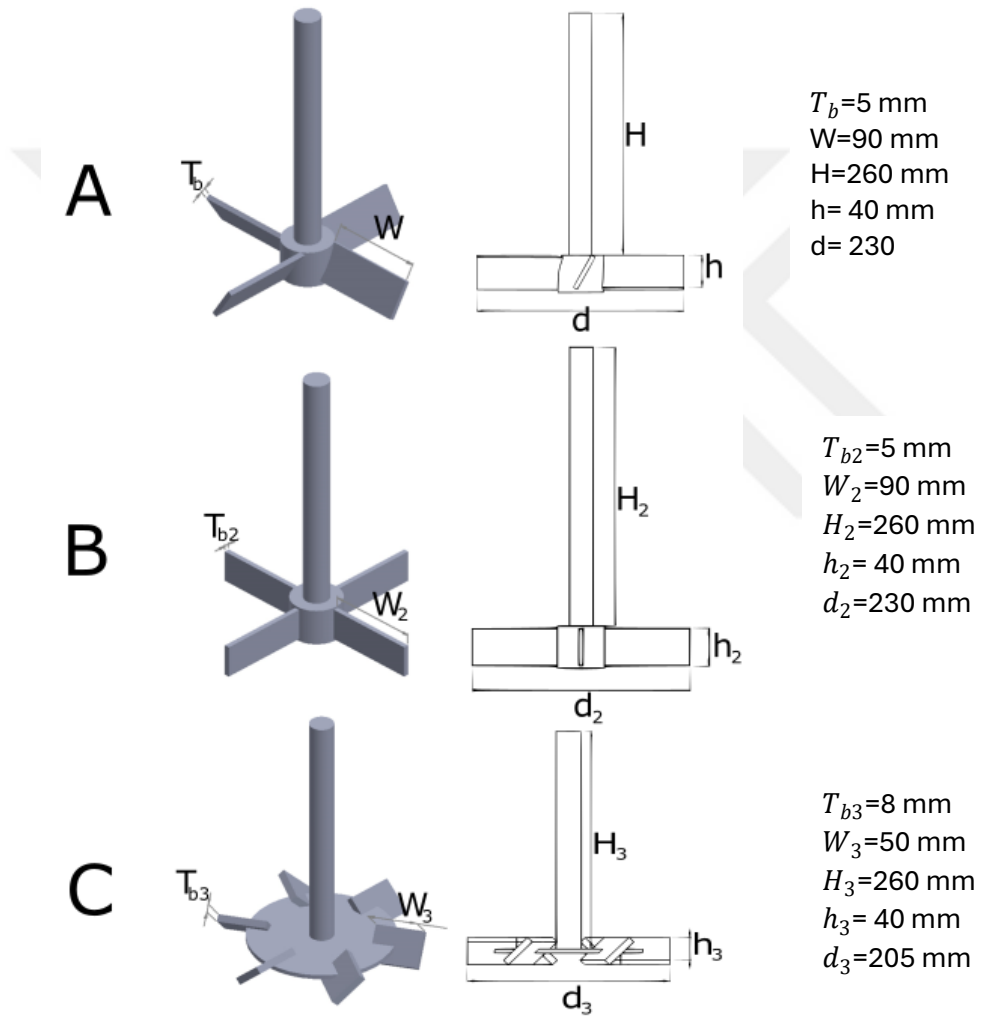
Tankın üst kısmından 42 °C su girişi mevcuttur. Isınan su, tankı 66 derecede terk etmektedir. Sıcaklık dağılımı incelendiğinde rezistansa yakın kısımların daha sıcak olduğu görülmektedir. Karıştırıcı suyun hızını artırarak sıcaklık dağılımının homojen olmasına yardımcı olmaktadır. Ancak üst kısımdan su girişi sebebiyle hızın buralarda düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.5). Bu durumda karıştırıcının etkisi kısıtlı kalmakta ve tankın içerisindeki su yeterince homojen olarak ısınmamaktadır.



Şekil 4.5 Kazan içerisindeki hız dağılımı

4.4.1 CFD Optimizasyonu

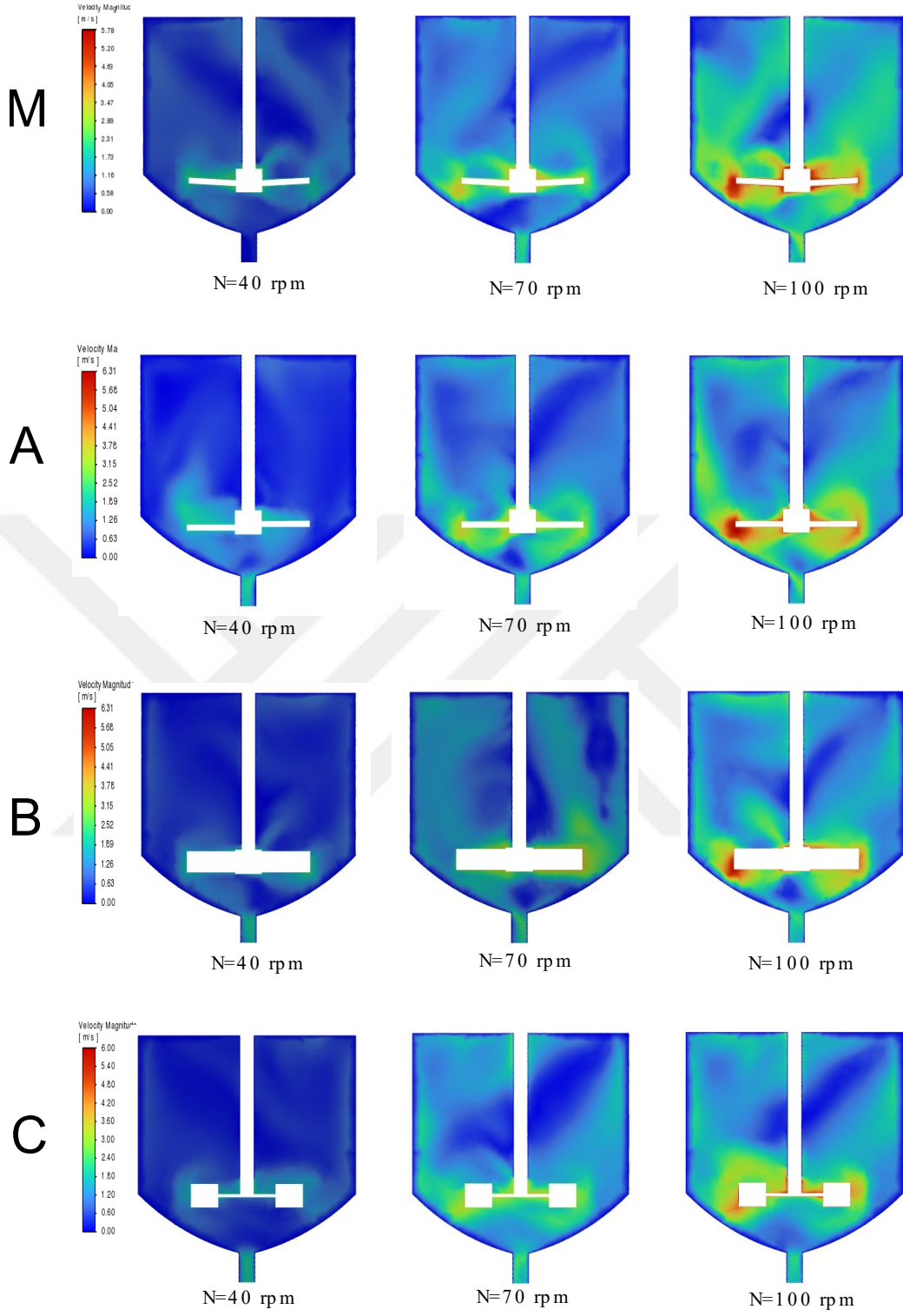
Tasarlanan sistemin performansını iyileştirmek amacıyla CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı CFD analizi 3 farklı karıştırıcı tipi için ve her bir karıştırıcıda 3 farklı dönme hızı için tekrar edilmiştir. Diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Analizlerde kullanılan karıştırıcı tipleri şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 CFD analizinde kullanılan karıştırıcı tipleri. A) 4 bıçaklı, 45 derece eğimli karıştırıcı. B) 4 bıçaklı 90 derece eğimli karıştırıcı. C) 6 bıçaklı, 45 derece eğimli karıştırıcı

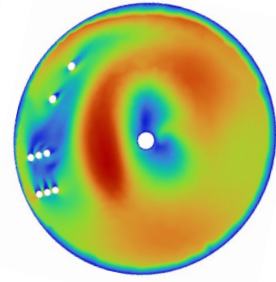
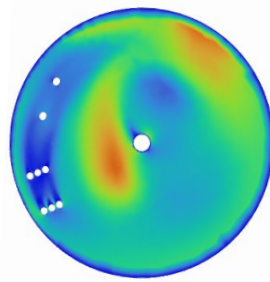
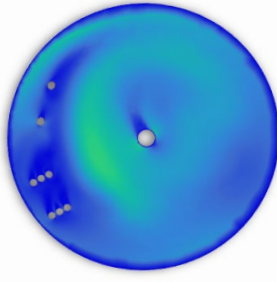
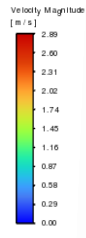
CFD analizlerinde sadece karıştırıcı tipleri değiştirilerek daha önce yapılan analiz tekrar edilmiştir. Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de kazan içindeki hız dağılımını gösteren grafik verilmiştir. Şekil 4.9’de kazan içerisindeki sıcaklık dağılımını veren grafik verilmiştir.



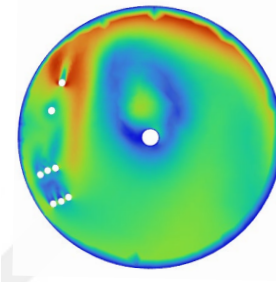
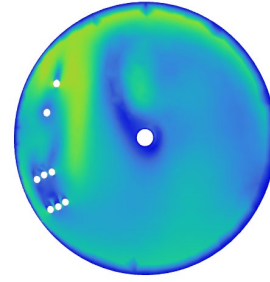
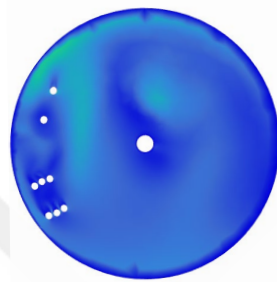
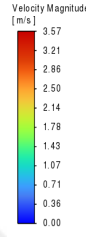


Şekil 4.7 Dikey kesiti alınmış kazan içerisindeki hız davranışları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcı sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan

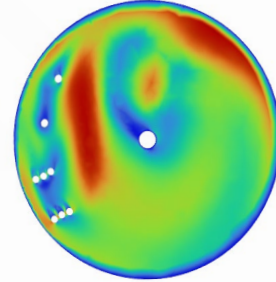
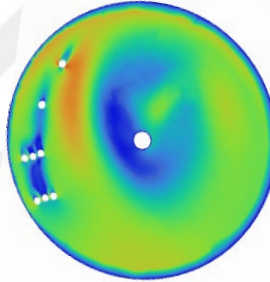
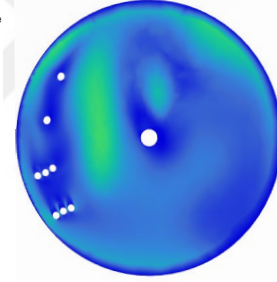
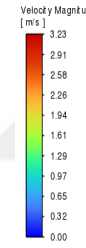
M



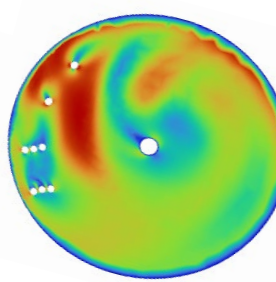
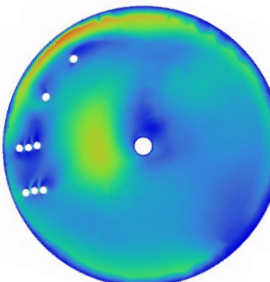
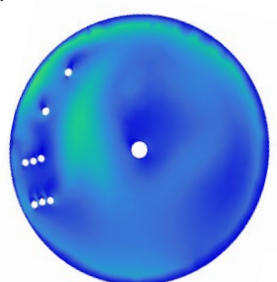
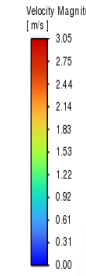
A



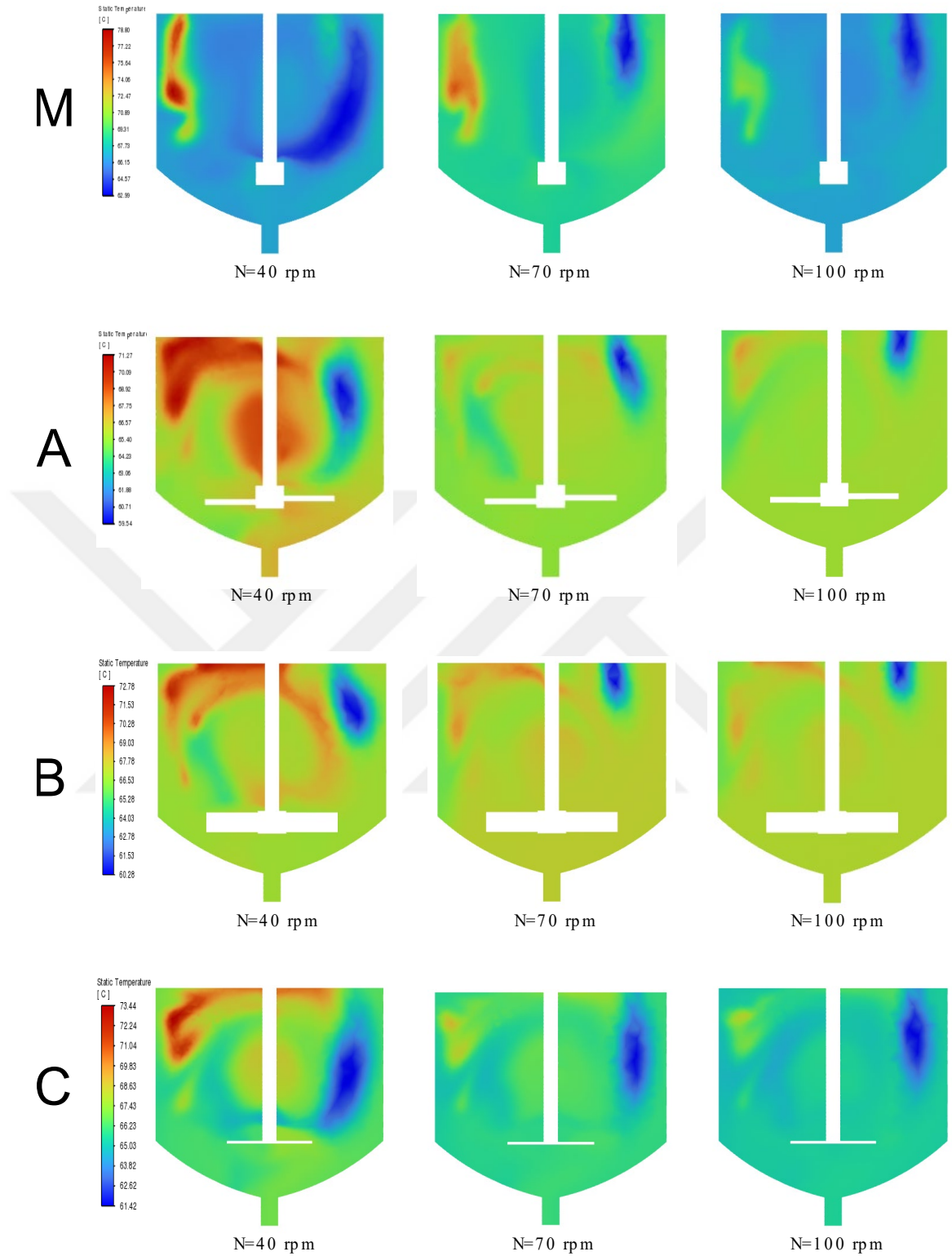
B



C



Şekil 4.8 Yatay kesiti alınmış kazandaki hız davranışları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan



Şekil 4.9 Dikey kesiti alınmış kazandaki sıcaklık dağılımları. M) 45 derece eğimli 2 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. A) 45 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcı sahip kazan. B) 90 derece eğimli 4 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan. C) 45 derece eğimli 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip kazan

CFD analizleri sonucunda karıştırıcı bıçaklarının ve RPM değerlerinin kazan içerisindeki sıvı hareketi üzerindeki etkisini gözlemlenmektedir. Düşük RPM değerlerinde kazanda etkin bir karıştırma olmadığı gözlenmiştir. Orta RPM değerlerinde (70 RPM ve üzeri) hem sıcaklık homojenliği hem de akış hızının dengelendiği tespit edilmiştir. 45° eğimli dört bıçaklı karıştırıcı hem dikey hem de yatay ekseninde daha homojen bir karışım sağlayarak, özellikle orta RPM’de optimum performans sunmuştur. Buna karşılık, iki bıçaklı karıştırıcı etkin bir karıştırma sağlayamamıştır. 90 derece eğimli dört bıçaklı karıştırıcı ise dikey karışımda etkili olsa da yatay ekseninde yetersiz kalmıştır. Genel olarak, 45° eğimli dört bıçaklı karıştırıcının ve orta RPM değerlerinin, sıcaklık ve hız homojenliğini en iyi şekilde optimize ettiği görülmüştür. CFD analizi sonucunda bulunan suyun kazanı terk ediş sıcaklıkları tablo 4.4’te gösterilmiştir. Ayrıca analizlerde karıştırma sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklık değerleri tablo 4.5’te gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Kazandaki en yüksek sıcaklık değeri

Karıştırıcı	40 RPM	70 RPM	100 RPM
M	78,5 °C	72 °C	68 °C
A	71,2 °C	68,5 °C	67,7 °C
B	71,2 °C	69,2 °C	68,8 °C
C	73,4 °C	69,36 °C	66,8 °C

Tablo 4.5 Suyun kazanı terk etme sıcaklıkları

Karıştırıcı	40 RPM	70 RPM	100 RPM
M	66,6 °C	66,4 °C	66 °C
A	67,1 °C	66,9 °C	66,7 °C
B	66,9 °C	67,0 °C	66,8 °C
C	66,9 °C	66,8 °C	66,8 °C

Tablolarda sunulan verilere göre, suyun kazanı terk etme sıcaklıkları ve kazandaki en yüksek sıcaklık değerleri, sistemin farklı çalışma koşullarına göre değerlendirilmiştir. 70 RPM ve üzerinde suyun çıkış sıcaklığının pastörizasyon için gereken değere yakın olduğu ve kazandaki sıcaklık farkının minimal düzeyde kaldığı görülmektedir. Ancak RPM değeri arttıkça harcanan enerji miktarının arttığı bilinmektedir. Bu durumda enerji verimliliği de düşünüldüğünde uygun RPM değerinin seçilmesi gerekmektedir. 40 RPM koşullarında ise suyun çıkış sıcaklığında dalgalanmalar olduğu ve kazanda sıcaklık homojenliğinin sağlanamadığı belirlenmiştir. Bu durum, düşük RPM karıştırıcının türbülans yaratma kapasitesinin yetersizliğine bağlanabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, daldırılmalı rezistans ısıtıcı ile ısıtılan karıştırılmalı tank sisteminin deneysel verileriyle enerji, ekserji ve termoekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ANSYS Fluent kullanılarak yapılan CFD analizleri, farklı karıştırma hızları ve fark karıştırıcı tipleri için sistemin termal davranışını ortaya koymuştur.

1. Termoekonomik analiz sonuçlarına göre, sistemin birim enerji maliyeti düşük bulunmuş, bu durum ekonomik verimliliği desteklemiştir. Ancak ekserji verimliliğinin düşük olması, sistemde geri dönüşü olmayan enerji kayıplarının azaltılması gerektiğini göstermektedir. Bu durum için daha az ekserji kaybı yaratacak ısıtıcı kullanılması veya yalıtım teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir.

2. Termoekonomik analizde 3.99×10^{-4} Euro/kJ değeri elde edilmiştir. Bu değer pastörizasyon sürecinde ısıtılmış su için hesaplanan birim ekserji başına düşen maliyeti ifade eder. Bu değer enerji verimliliğinin yüksek olduğunu ve enerji maliyetlerinin düşük olduğunu gösterir. Bu değer, ekserji analizinde elde edilen %8 verimlilikle doğrudan ilişkilidir. Sistemin düşük verimlilikle çalışmasına rağmen, termoekonomik maliyetlerin bu kadar düşük olması, elektrik enerjisinin ısıya dönüşümündeki tersinmezliklerin etkisinin sınırlı kaldığını ve enerji maliyetlerinin minimize edildiğini gösterir. Elektrik enerjisinin ısıya dönüşümü sırasında yaşanan tersinmezlikler, genellikle enerji kayıplarına neden olmaktadır. Ancak, bu kayıpların maliyet üzerindeki etkisinin düşük olduğu görülmektedir.

3. 70 RPM ve üzerindeki değerlerde yapılan analizlerde, etkin karıştırma sağlanarak kazandaki sıcaklık dağılımı optimize edilmiştir. Ancak RPM'deki artış enerji tüketimini arttırmaktadır. Bu durumda enerji verimliliği göz önüne alınarak uygun karıştırma koşulları seçilmelidir.

4. Titanyum daldırmalı ısıtıcıların optimal yerleşiminin bulunması ile kazandaki sıcaklık dağılımı optimize edilebilir.

6. Deneyin süt ile de yapılması, gıda işleme süreçlerine daha yakın ve uygulamaya dönük sonuçlar elde edilmesi açısından önemlidir. Süt, suya kıyasla farklı fiziksel ve termal özelliklere sahiptir; viskozite, yoğunluk ve ısı iletkenlik gibi parametrelerdeki bu farklılıklar, ısı transferi ve enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkili olabilir. Ayrıca süt, protein, yağ ve şeker gibi bileşenler içerdiğinden, ısıtma sırasında yüzeyde yanma, tortu oluşumu veya bu bileşenlerin rezistansla etkileşimi gibi spesifik durumlar gözlemlenebilir. Dolayısıyla, deneyin sütle tekrarlanması, daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Güneş, N. Ç. (2020). Yaşam döngüsü analizi ile konsantre şeftali püresinin karbon ayak izinin belirlenmesi. *Akademik Gıda*, 18(3), 247-255.
- [2] Aganovic, K., Smetana, S., Grauwet, T., Toepfl, S., Mathys, A., Van Loey, A., & Heinz, V. (2017). Pilot scale thermal and alternative pasteurization of tomato and watermelon juice: An energy comparison and life cycle assessment. *Journal of cleaner production*, 141, 514-525.
- [3] Yildirim, N., Genc, S. (2017). Energy and exergy analysis of a milk powder production system. *Energy Conversion and Management*, 149, 698-705.
- [4] Çivi, C., Yılmaz, T., & Başaran, A. (2019). Gıda İşleme Proseslerinde İndüksiyon ile Isıtma Kullanımının Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 158-168.
- [5] Singh, R. Heldman, D.R.. (2014). Introduction to food engineering: Fifth edition. Introduction to Food Engineering: Fifth Edition. 1-861.
- [6] Rahman, M. (2007). Handbook of Food Preservation. 10.1201/9781420017373.
- [7] Öney, G. R. (2012). Süt ürünleri üretim proseslerinde risk analizi. (Tez No. 328194) [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. Yök Tez Merkezi
- [8] Meunier-Goddik, L. Sandra, S. (2011). Liquid Milk Products: Pasteurized Milk. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 3. 274-280. 10.1016/B978-0-12-374407-4.00280-6.
- [9] Ryser, E. (2016). Pasteurization of Liquid Milk Products: Principles, Public Health Aspects. 10.1016/B978-0-08-100596-5.21367-X.
- [10] Kızıllan, Ö. (2007). Gövde Borulu Bir Isı Degistiricisinde Sasırtma Levhasının Isı Tasınım Katsayısına ve Basınç Düşümüne Etkisinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 246-251.
- [11] Jegla, Z., Stehlik, P., & Kohoutek, J. (2004). Alternative approach in optimization of plate type heat exchangers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 6-15.

- [12] Şencan, A., Selbaş, R., & Kılıç, B. (2010). Isıtma Ve Soğutma Uygulamalarında Kullanılan Plakalı Isı Eşanjörlerinin Deneysel Analizi. *Tübbav Bilim Dergisi*, 3(1), 35-44.
- [13] Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., & Haglind, F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 305-328.
- [14] Marzouk, S. A., Abou Al-Sood, M. M., El-Said, E. M., Younes, M. M., & El-Fakharany, M. K. (2023). A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(15), 7539-7578.
- [15] Molana, M. (2016). A comprehensive review on the nanofluids application in the tubular heat exchangers. *Am. J. Heat Mass Transf*, 3(5), 352-381.
- [16] Deák, T.. (2014). Food Technologies: Pasteurization. 10.1016/B978-0-12-378612-8.00257-2.
- [17] Grant, Ball, Rowe. (1998). Effect of high-temperature, short-time (HTST) pasteurization on milk containing low numbers of Mycobacterium paratuberculosis. *Letters in Applied Microbiology*, 26(2), 166-170.
- [18] Anlı, E. A. (2019). Yenilikçi teknolojilerden prensip ve yasal yönleriyle vurgulu elektrik alan teknolojisi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 23(3), 354-363.
- [19] Güleç, H. A., Üniv, Y. Y., & Van Bölümü, G. M. (2006). Modern gıda muhafazasında vurgulu elektrik alan ve ultrason uygulamaları. *Türkiye*, 9, 24-26.
- [20] Fincan, M., Çiftci, Y. (2021). Meyve ve sebzelerin kurutulmasında ön işlem olarak vurgulu elektrik alan kullanımıI. *Gıda*, 46(4), 830-847.
- [21] Bilek, S. E. (2010). Vurgulu Elektrik Alan PEF Teknolojisi. *Akademik Gıda*, 8(3), 33-37.
- [22] Erafşar, F. K., Çınar, İ. (2018). Gıda İşlemede Isısal Olmayan Uygulamalar: Vurgulu Elektrik Alan. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, (19), 26-33.

- [23] Cortés, C., Esteve, M. J., Rodrigo, D., Torregrosa, F., & Frigola, A. A. (2006). Changes of colour and carotenoids contents during high intensity pulsed electric field treatment in orange juices. *Food and Chemical Toxicology*, 44(11), 1932-1939.
- [24] Li, Y. Q., Tian, W. L., Mo, H. Z., Zhang, Y. L., Zhao, X. Z. (2013). Effects of pulsed electric field processing on quality characteristics and microbial inactivation of soymilk. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1907-1916.
- [25] Walter, L., Knight, G., Ng, S. Y., Buckow, R. (2016). Kinetic models for pulsed electric field and thermal inactivation of *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens* in whole milk. *International Dairy Journal*, 57, 7-14.
- [26] Fellows, P. J. (2022). *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead publishing.
- [27] Cemeroglu, B. Karadeniz, F. Ozkan, M.. (2003). Meyve sebze isleme teknolojisi. *Gıda Teknolojisi Yayinlari*. 28. 469-472.
- [28] Ağçam, E., Akyıldız, A., & Dündar, B. (2018). Thermal pasteurization and microbial inactivation of fruit juices. In *Fruit juices* (pp. 309-339). Academic Press.
- [29] Bell, J.L. (2017)., Boiler Project Fundamentals, *Chemical Engineering Progress*, 113 (9), 53-59
- [30] Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A., & Sait, S. M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970-983.
- [31] Sezai, I., Aldabbagh, L. B. Y., Atikol, U., Hacisevki, H. (2005). Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater. *Applied Energy*, 81(3), 291-305.
- [32] Xia, B., Sun, D. W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 34(1-3), 5-24.
- [33] Süfer, Ö., Kumcuoğlu, S., Tavman, Ş. (2016). Gıda mühendisliğinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları. *Akademik Gıda*, 14(4), 465-471.

- [34] Norton, T., Sun, D. W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD)—an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(11), 600-620.
- [35] Akkaya, S. (2019). Dolum aşamasında pastörizasyon sağlayan indüktif süt dolum makinesi tasarımı (Tez no. 573037). [Yüksek lisans tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi] Yök Tez.
- [36] Szpicer, A., Bińkowska, W., Wojtasik-Kalinowska, I., Salih, S. M., Póltorak, A. (2023). Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. *European Food Research and Technology*, 249(6), 1411-1430.
- [37] Brucato, A., Ciofalo, M., Grisafi, F., & Micale, G. (1998). Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches. *Chemical Engineering Science*, 53(21), 3653-3684.
- [38] Deen, N. G., Solberg, T., Hjertager, B. H. (2002). Flow generated by an aerated Rushton impeller: Two-phase PIV experiments and numerical simulations. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 80(4), 1-15.
- [39] Moštěk, M., Kukukova, A., Jahoda, M., Machoň, V. (2005). Comparison of different techniques for modelling of flow field and homogenization in stirred vessels. *Chemical Papers*, 59(6a), 380-385.
- [40] Patel, H., Dhib, R., Ein-Mozaffari, F. (2010). Computational fluid dynamics study of a styrene polymerization reactor. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 33(2), 258-266.
- [41] Manna, P., & Chakraborty, D. (2004). Numerical investigation of conjugate heat transfer problems. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*, 166-175.
- [42] Çengel, Y., Boles, M. (2008). Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla. Beşinci baskı
- [43] Cornelissen, R. (1997). Thermodynamics and sustainable development.
- [44] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.

- [45] T. Kotas, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis,” *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, 1985, doi: 10.1016/C2013-0-00894-8.
- [46] Başaran, A., Yılmaz, T., & Çivi, C. (2023). Experimental investigation and evaluation of the thermodynamical performance of a novel hybrid design for milk pasteurization. *Thermal Science and Engineering Progress*, 44, 102028.
- [47] Başaran, A., Yılmaz, T. & Çivi, C. (2020). Energy and exergy analysis of induction-assisted batch processing in food production: a case study—strawberry jam production. *J Therm Anal Calorim* 140, 1871–1882



EKLER

Ek Tablo 1. Sıvı suyun yoğunluğu tablosu

Sıcaklık		Yoğunluk		Sıcaklık		Yoğunluk	
K	°C	g/cm ³	kg/m ³	K	°C	g/cm ³	kg/m ³
273.15	0	0.99987	999.87	323.15	50	0.98807	988.07
277.15	4	1.00000	1000.00	333.15	60	0.98324	983.24
283.15	10	0.99973	999.73	343.15	70	0.97781	977.81
293.15	20	0.99823	998.23	353.15	80	0.97183	971.83
298.15	25	0.99708	997.08	363.15	90	0.96534	965.34
303.15	30	0.99568	995.68	373.15	100	0.95838	958.38
313.15	40	0.99225	992.25				

Ek Tablo 2. Sıvı suyun fiziksel özellikleri tablosu

Doymuş su — Sıcaklık tablosu

Sıcaklık., T °C	Doymuş basıncı., P_{doym} kPa	Özgül hacim, m^3/kg		İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg			Entropi, kJ/(kg.K)		
		Doymuş sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302