



**DİREKT BUHAR ENJEKSİYONLU ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI VE
YÜKSEK SICAKLIKTA UYGULAMASI**

Ece Asena EKİNCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ece Asena EKİNCİ

30/07/2021

DİREKT BUHAR ENJEKSİYONLU ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI VE YÜKSEK SICAKLIKTA UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ece Asena EKİNCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Sanayinin birçok alanında olduğu gibi gıda endüstrisine birçok farklı tipte ısı değiştirici kullanılmaktadır. Özellikle gıda endüstrisinde kullanılan ısı değiştiricilerin son ürün kalitesine etkisi çok büyüktür. Ürün sıcaklığı ve ısı değiştirici tipinde olan küçük değişiklikler dahi son ürün kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada direkt buhar enjeksiyon sistemleri incelenmiş ve iki farklı ürünün aynı direkt buhar enjeksiyon sistemi ile yüksek sıcaklıkta işlenmesi için gerekli tasarım ve analizler yapılmıştır. Üç farklı güvenlik katsayısı belirlenmiş olup, bu güvenlik katsayıları her bir ürünün buhar debisini belirlemek için kullanılacaktır. Başlanacak bir nokta olması açısından tasarım sıcaklıkları referans alınarak manuel olarak hesaplanan ilk değer, güvenlik katsayısı 1 olarak alınıp, bu güvenlik katsayısı ile yapılan analizler sonucuna göre ikinci bir güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Bu güvenlik katsayısı ile yapılan analiz sonucunda üçüncü bir güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Üçüncü güvenlik katsayısı ile analizler yapılmış ve bu analizler sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve Ansys Fluent ile yapılan analizlerin sonuçları CFD Post ile incelenmiş ve iki ürün içinde gerekli güvenlik katsayıları belirlenmiş ve incelenmiştir. Sonuç olarak iki farklı ürün için güvenlik katsayılarının farklı olması gerektiği görülmüştür. Aynı sistem iki farklı ürünün ısı işleme tabii tutulması için kullanılabilir ancak buhar debisini belirlemek için kullanılacak güvenlik faktörünün ürüne özel olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 92807
Anahtar Kelimeler : Buhar, Enjeksiyon, Eşanjör, UHT
Sayfa Adedi : 88
Danışman : Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

DIRECT STEAM INJECTION HEAT EXCHANGER DESIGN AND HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Ece Asena EKİNCİ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

There are plenty of different type heat exchangers in various fields of industry, as it is with food industry. Especially in food industry heat exchanger design is important for the product quality. Even slight changes in temperature and heat exchanger type has great effect on product quality. In this thesis direct steam injection systems are studied, and the necessary design and analysis were made for the processing of two different products at high temperature with the same direct steam injection system. Three different safety factors have been selected and used for determining the steam flowrate for each product. As a starting point steam flowrate is calculated manually with design temperatures as reference and this steam flowrate was taken as the safety factor 1. As a result of this analysis, a second safety factor is selected and after the analysis of the second safety factor, a third safety factor is selected and analyzed, and three safety factors have been compared. Analysis were made by Ansys Fluent and examined in CFD Post and safety factors for both products were determined and examined. As a result, it is seen that for two different products two different safety factors must be used. It is concluded that both products may be heat treated in the same system but the safety factor to which determine the steam flowrate must be individual to the product itself.

Science Code : 92807

Key Words : Steam, Injection, Heat Exchanger, UHT

Page Number : 88

Supervisor : Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yanı sıra, lisans ve yüksek lisans eğitimimin her aşamasında bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Kurtuluş BORAN’a, eğitim hayatım boyunca beni daha iyisini yapmam için motive edip desteğini asla esirgemeyen kıymetli anneme ve beni sürekli öğrenmeye iten, yaşadığım zorlukların üstesinden gelebilmemi ve olayları farklı bakış açısı ile görmemi sağlayan sevgili eşime teşekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. ISI DEĞİŞTİRİCİLER.....	13
3.1. Isı Değiştiricilerin Sınıflandırılması.....	13
3.1.1. Isı değiştiricilerin ısı değişim şekline göre sınıflandırılması.....	13
3.1.2. Isı değiştiricilerin akışkan sayısına göre sınıflandırılması	14
3.1.3. Isı değiştiricilerin ısı geçiş mekanizmasına göre sınıflandırılması.....	14
3.1.4. Isı değiştiricilerin yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması	15
3.1.5. Karıştırmalı kaplarda ısı transferi	21
3.1.6. Isı değiştiricileri akış tipine göre sınıflandırılması	21
3.1.7. Isı değiştiricilerin diğer sınıflandırılmaları.....	24
3.2. Isı Değiştiricilerin Çözümlemesi.....	25

	Sayfa
3.2.1. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi	27
3.2.2. Etkinlik NTU yöntemi	32
3.2.3. P-NTU yöntemi	34
3.2.4. Ψ -P yöntemi.....	35
3.3. Isı Değiştirici Seçimi, Tasarımı ve Optimizasyonu	35
3.3.1. Isı değiştiricisi seçim parametreleri	35
4. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ	39
4.1. Direkt Buhar Enjeksiyonu Sisteminin Gıda Uygulamalarında Kullanımı	41
5. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI.....	43
5.1. Ürün Özellikleri	43
5.1.1. Rekombine sütün fiziksel özellikleri	45
5.1.2. Sütlacın fiziksel özellikleri	49
5.2. Direkt Buhar Enjeksiyon Sistemi Proses ve Enstrüman Diyagramı	50
5.3. Sistem Tasarım Parametreleri ve Parametre Hesaplamaları	53
6. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ HAD ANALİZLERİ	61
6.1. HAD Yönteminin Matematiksel Temeli	61
6.2. HAD Çalışmaları Temel Basamakları	63
6.2.1. Modelin çözüme uygun hale getirilmesi	64
6.2.2. Modelin ağ yapısının belirlenmesi (mesh)	65
6.2.3. Çözüm.....	69

	Sayfa
6.3. CFD-POST ile analiz sonuçlarının izlenmesi	73
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Sütlaç içeriği	43
Çizelge 5.2. Rekombine süt formülasyonu	44
Çizelge 5.4. Rekombine süt için farklı sıcaklıklarda viskozite, spesifik ısı, termal iletkenlik ve yoğunluğu gösteren tablo.	48
Çizelge 5.5. Rekombine süt ve sütlaç için proses parametreleri.....	54
Çizelge 5.6. Doymuş su-sıcaklık tablosu.....	54
Çizelge 5.7. 6 bar buharın termodinamik özellikleri	55
Çizelge 6.1. Buhar giriş parametreleri	70
Çizelge 6.3. Rekombine süt için girilen olan ürün bilgileri	72
Çizelge 6.4. Sütlaç için girilen olan ürün bilgileri	72
Çizelge 6.5. Rekombine süt ve Sütlaç için farklı güvenlik katsayılarında ürün çıkış sıcaklıkları.....	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Isı değıştirci sıcaklık değışim grafiği.....	26
Şekil 3.2. a Yoğuşan bir akışkanın sıcaklık değışim grafiği b Kaynayan bir akışkanın sıcaklık değışim grafiği	27
Şekil 3.3. Farklı ısı değıştirciler için düzeltme faktörü.....	30
Şekil 5.1. Bir rekombine süt işleme tesissinin proses diyagramı.....	45
Şekil 5.2. %0,5, (+ mavi) %1,5 (Δ yeşil) ve %3,5 (o-kırmızı) yağ içeriğine sahip süt için dinamik viskozitenin sıcaklık ile değışim grafiği.	47
Şekil 5.3. %0,5 yağlı, %1,5 yağlı ve %3,5 yağlı süt için sıcaklık- termal iletkenlik grafiği	48
Şekil 5.4. Direkt buhar enjeksiyon sisteminin içinde bulunduğu sistemin proses ve enstrüman diyagramı	53
Şekil 6.1. Türbülanslı akışın hız bileşenleri	62
Şekil 6.2. Buhar hacmi için mesh boyutlandırması	66
Şekil 6.3. Buhar hacmi için mesh kenar boyutlandırması	67
Şekil 6.4. Ürün hacmi için mesh boyutlandırması	68
Şekil 6.5. Ürün hacmi için mesh kenar boyutlandırması	68

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Borulu ısı değıştiriciler	15
Resim 3.2. Gövde borulu ısı değıştirici	16
Resim 3.3. Plakalı ısı değıştirici	17
Resim 3.4. Spiral plakalı ısı değıştirici	18
Resim 3.5. Lamelli ısı değıştirici	18
Resim 3.6. Lehimli ısı değıştirici	19
Resim 3.7. Paralel akışlı ısı değıştirici	21
Resim 3.8. Ters akışlı ısı değıştiricisi	22
Resim 3.9. Çapraz akışlı karışan ve karışmayan ısı değıştiricile	23
Resim 3.10. Sıyırıcılı ısı değıştiricilerin çalışma prensibi	25
Resim 4.1. Direkt buhar enjeksiyon sistemi için şemalar, yukarı buhar merkezli, aşağı ürün merkezli	40
Resim 5.1. Pozitif deplasmanlı pompaların çalışma prensibi	51
Resim 5.2. Direkt buhar enjeksiyon sistemi 3 boyutlu çizimi a) tüm sistemin 3 boyutlu çizimi b) iç kısmın 3 boyutlu çizimi c) dış kısmın 3 boyutlu çizimi	59
Resim 6.1. Değıştirilmiş ürün hacmi modeli	65
Resim 6.2. Mesh oluşturulmuş buhar hacmi	67
Resim 6.3. Mesh oluşturulmuş ürün hacmi	69
Resim 6.4. Sütlaç için 1,05 güvenlik katsayısı ile yapılmış hesaplamanın hız ve basınç kontürleri	71
Resim 6.5. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı=1	73
Resim 6.6. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1.15	74
Resim 6.7. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1.05	76
Resim 6.8. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1	77
Resim 6.9. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1,15	78
Resim 6.10. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1,05	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A_s	Isı transfer yüzey alanı
c_{pc}	Soğuk akışkanın özgül ısısı
c_{ph}	Sıcak akışkanın özgül ısısı
C_t	Tüp tarafındaki akışkanın özgül ısısı
F	Düzeltilme faktörü
h_{fg}	Akışkanın buharlaşma entalpisi
$\dot{m}_c$	Soğuk akışkanın kütleli debisi
$\dot{m}_h$	Sıcak akışkanın kütleli debisi
U	Toplam ısı transfer katsayısı
P	Sıcaklık verimi
$\dot{Q}$	Isı transfer hızı
R	Akışkanlar arası kapasite oranı
$T_{cçıkış}$	Soğuk akışkanın eşanjör çıkışındaki sıcaklığı
$T_{cgiriş}$	Soğuk akışkanın eşanjör girişindeki sıcaklığı
$T_{hçıkış}$	Sıcak akışkanın eşanjör çıkışındaki sıcaklığı
$T_{hgiriş}$	Sıcak akışkanın eşanjör girişindeki sıcaklığı
ΔT	Sıcaklık farkı
ΔT_{lm}	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı
ε	Isı transfer etkinliği
Ψ	Ortalama sıcaklık farkının giriş sıcaklıklarına bölümü

Kısaltmalar

Açıklamalar

HVAC	Heating ventilating air conditioning
NTU	Isı transfer birim sayısı
NTU_t	Tüp tarafının ısı transfer birim sayısı

1. GİRİŞ

Isı değiştiriciler gıda, kimya, otomotiv, enerji, HVAC gibi endüstrinin birçok farklı alanında kullanılmaktadır. Tüm bu alanlarda kullanılan ısı değiştiricilerin doğru tasarımı ve uygulaması özellikle yüksek sıcaklıklarda, enerji verimi açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca özellikle gıda endüstrisinde ısı değiştiricilerin belirli sınırlar çerçevesinde tasarlanması ürün yapısının korunması için kritiktir. Gıda uygulamalarında, uygulanan ısıl işlemler ile ürün kalitesi, ürünün raf ömrü, rengi, kokusu, katı madde oranı gibi parametreler değiştirilebilir. Bu değişimler iyi tasarlanmış ısı değiştiriciler kullanıldığında ürün kalitesini arttırmaya yönelik olurken, tasarımı hatalı olan bir ısı değiştiricide ürün kalitesinde düşüşlere neden olabilmektedir.

Gıda proseslerinde özellikle sterilizasyon/pastörizasyon işlemleri ürün için en kritik ısıl işlemlerden biridir. Bu işlemde, ürün hızlı bir şekilde sterilizasyon/pastörizasyon sıcaklığına ısıtılır ve daha sonra hızlıca depolama sıcaklığına tekrar soğutulur ve bu sayede ürün içerisinde bulunan sağlığa zararlı bakteriler elimine edilir. Bu işlem sırasında ürün sıcaklığının sterilizasyon/pastörizasyon sıcaklığının altında kalması ürün sterilizasyon/pastörizasyonunun gerçekleştirilemediği anlamına gelir ve ürünün tekrar ısıl işleme tabii tutulması gerekir. İkinci bir ısıl işlem ürünün belirli bir sıcaklığın üzerinde kaldığı süreyi arttırdığı için ürün içerisinde bulunan proteinlerin denatürasyonuna, şekerlerin karamelizasyonuna ve minerallerin taşlaşmasına neden olmaktadır. Ürünün sterilizasyon/pastörizasyon sıcaklığının çok üzerine çıkartılması ise, yine aynı etkilere neden olmakta, ancak bu sefer bu bozulmalar uzun süren ısıl işlemde kaynaklı olarak değil, yüksek sıcaklıklı ısıl işlemde dolayı gerçekleşmektedir. Ürünün sterilizasyon /pastörizasyon işleminin gerçekleştirilmemesi durumunda ise ürün içerisinde bulunan zararlı bakteriler öldürülemeyeceğinden ürün insan sağlığına zararlı olacaktır.

Bu çalışmada, farklı yapıda olup farklı ısıl işlem ihtiyaçları olan rekombine süt ve sütlaç ürünlerinin sterilizasyonu için direkt buhar enjeksiyonlu bir ısı değiştirici tasarımı yapılmıştır. Endüstride standart olarak, rekombine süt ve benzeri ürünlerin ısıl işlemi için kullanılan ısı değiştirici tipi genel olarak contalı-plakalı ısı değiştiriciler olup, sütlaç ve benzeri ürünlerin ısıl işlemi için genel olarak borulu ve sıyrıcılı tip ısı değiştiriciler veya tank tipi (ısıtma ceketli tanklar) ısıtıcılar kullanılmaktadır. Bu iki ürünün aynı ısı değiştirici kullanılarak ısıl işlemde geçmesi ile bu iki ürünü veya bu iki ürüne benzer olan ürünleri

birlikte üretmek isteyen üreticilerin, ilk yatırım maliyeti ve fabrika kurulumu için gereken alanın azalması hedeflenmiştir.

Gıda proseslerinde kullanılan borulu, sıyrıcılı, contalı-plakalı tip ısı değiştiricilerin neredeyse tamamında ısıtma endirekt olarak gerçekleşmektedir, yani, ilk ısıtma akışkanı, bir ısı değiştirici yardımı ile ikinci bir ısıtma akışkanını ısıtmak amacı ile kullanılır. Bu ısıtma akışkanları genel olarak buhar ve buhar ile bir ısı değiştirici yardımı ile ısıtılan sudur. Bu tip sistemlerde, toplam verim ikinci bir ısı değiştirici kullanımı, ikincil ısıtma akışkanının sirkülasyonu için harcanan güç nedeni ile direkt buhar kullanımına göre daha düşüktür. Ancak böyle sistemlerde ürün içerisine buhar karışmayacağından dolayı buharın temizlenmesi ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Direkt buhar enjeksiyonlu sistemlerde ise, buharın gıdaya uygun olarak temizlenmesi ve filtrelenmesi ya da temiz buhar kullanılması gereklidir.

Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ısı değiştirici tipleri tanıtılacak, birbirlerine olan avantaj ve dezavantajları açıklanacaktır. Daha sonraki bölümlerde direkt buhar enjeksiyonu tanımlanacak, iki ürünün birden işlenebileceği bir direkt buhar enjeksiyon içeren ürün işleme sistemi için sistem tasarımı yapıp, direkt buhar enjeksiyon sisteminin her iki ürün için de farklı güvenlik katsayıları ile tasarımları yapılacaktır. Bu tasarımın doğruluğu için Ansys Fluent ile akış, ısı ve karışım analizleri gerçekleştirilerek sistemde iki ürünün de işlenmesi için en uygun sistem çalışma şartları araştırılacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kelleher vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada, direkt süpersonik buhar enjeksiyonu, direkt buhar infüzyonu ve indirekt tubuler ısıtma yöntemlerini proteini arttırılmış süt bazlı içecekler üzerinde uygulamış ve bu üç ısıtma yönteminin final ürün üzerinde etkisini incelemiştir. Üç yöntem ile ısıtma işlemi görmeden önce ürünün katı madde oranı, protein miktarı, viskozitesini kayıt altına alıp, ısıtma işlemi sonrası için aynı değerler ile karşılaştırma yapmışlardır. Ölçüm sonuçlarına göre süpersonik buhar enjeksiyonu infüzyon ve tubuler ısıtma işlemlerine göre kayda değer ölçüde daha az protein denatürasyonuna neden olduğunu görmüşlerdir. Son üründe, viskozite, partikül boyutu, raf ömrü gibi özelliklerde ise üç yöntem arasında kayda değer değişiklikler olmamasına rağmen, ısıtma işlemi nedeniyle özellikle tubuler ısıtma sonrasında kayda değer renk değişikliği olduğunu belirtmişlerdir. Toplam katı oranı ve protein miktarı ise süpersonik buhar enjeksiyonu ve tubuler ısıtma yöntemleri için kayda değer değişiklikler göstermemiş olsa dahi, buhar infüzyonu teknolojisi ile üretilen üründe, buharın ürüne karışmasından dolayı üründe gerçekleşen seyrelme ürün katı madde oranı ve protein miktarında düşüşe neden olmuştur (Kelleher vd., 2019).

Roux vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada, sıvı bebek mamasının direkt buhar enjeksiyonu ve devamlı omik ısıtma yöntemleri ile yüksek sıcaklıkta sterilizasyonu arasındaki farklar belirtilmiştir. Çalışma pilot bir sterilizasyon ünitesi ile aynı ön ısıtma ve holder koşullarında deneysel olarak yapılmıştır. Farklı holder süreleri ve sıcaklıklarda örnekler alınmış ve termal degradasyon reaksiyonları gözlemlenmiştir. Çözünabilir proteinler, C vitamini ve ürünün basit ve karmaşık maillard reaksiyonları kayıt altına alınmıştır. Bu çalışma sonucunda, devamlı omik ısıtma sonucunda açığa çıkan son ürünün, ekstrem holder süresi ve sıcaklık koşullarında maillard reaksiyonu sonucu açığa çıkan ürünler açısından daha zengin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu sonuçların açığa çıktığı şartların endüstride kullanımı temsil etmediği belirtilmiştir. Çalışmaya göre, çözünebilir proteinler açısından iki teknoloji arasına kayda değer farklılıklar olmasa da C vitamininin korunması ve üründe renk değişimi konularında omik ısıtma daha iyi sonuç vermiştir. Çalışma sonucunda, iki buçuk saat 140°C de işlem gören ürün sonrasında omik ısıtma sisteminde ürün yanması ve yapışması sonucunda oluşan kirlilik izine rastlanmadığı belirtilmiştir (Roux vd., 2016).

Karayannakidis, Apostolodis ve Lee'nin yaptığı 2014 yılında yayınlanan çalışmada, direkt buhar enjeksiyonlu ısıtma sistemi ile buhar ceketi ile ısıtma sisteminin mürekkep balığından

protein hidrolizi için kullanılması sırasındaki hidroliz ve enerji tüketimi performansları incelenmiştir. Hidroliz, yapıldıktan sonra, 75°C de pastörizasyon yapılmış ve 30 dakika holder yapılmıştır. Hidroliz performansı, üründe yapılan viskozite, hidroliz derecesi ve hidroliz sırasında protein profili ölçümleri ile belirlenmiştir. Direkt buhar enjeksiyonu ile ısıtma, buhar ceketli ile yapılan ısıtmaya göre daha az enerji tüketimine neden olmuştur. Aynı zamanda sistem rejime oturma ve ürün işleme süresinin daha kısa olduğu belirtilmiştir. Buhar ceketli ile ısıtma sürecinde ürün yanmasından dolayı tank ceketlerinde yapışma ve kirlilik gözlenirken, direkt buhar enjeksiyonlu sistemde kirlilik gözlenmemiştir. İki yöntem arasında hidroliz performansı açısından kayda değer bir fark gözlenmemiştir. Direkt buhar enjeksiyonu ile üretilen ürünün, buharın kondenzasyonu nedeni ile seyrelme sonucunda, daha düşük viskoziteye, daha düşük hidroliz derecesine ve daha zayıf protein yoğunluğuna sahip olduğu gözlenmiştir. Çalışmada buhar filtrasyon ünitesi kullanılması ile, ürün içine karışan kondens miktarının da azalacağı belirtilmiş ve direkt buhar enjeksiyon sisteminin enerji verimliliği yüksek, ve kirlenme olmayan bir süreç olduğundan diğer enzim bazlı protein hidrolizi için kullanılabileceği belirtilmiştir (Karayannakidis vd., 2014).

Lee, Barbano ve Drake tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, %2 yağlı süt için indirekt ısıtma ve direkt buhar enjeksiyon ile ultra pastörizasyon ile ESL süt üretim yöntemlerinin farkını incelenmiştir. Çalışmada pastörizasyon için endüstride HTST (yüksek sıcaklık kısa süre) pastörizasyon yönteminin kullanıldığından ve bakteriyel bozulma hızı nedeni ile 2-3 haftalık bir raf ömrü olduğundan bahsedilmiştir. Ultra pastörizasyon ürünün raf ömrünü uzatmak için kullanıldığından ancak yüksek sıcaklıklarda işlem gören sütün duyuusal özelliklerinin değiştiğinden ve tüketici tarafından HTST süte göre daha az tercih edildiğinden bahsedilmektedir. Çalışmada direkt ısıtma sistemleri olarak direkt buhar enjeksiyonu ve buhar infüzyonundan bahsedilmiştir. Direkt buhar enjeksiyonu ile üretilen ESL sütün içerisinde sülfür ya da yumurtamsı pişmiş süt tadının olmadığı gözlenmiştir (Lee vd., 2017).

Manji, Kakuda ve Arnott tarafından 1986 yılında yapılan çalışmada direkt ve indirekt ısıtma sistemi ile üretilen UHT sütlerin depolama sıcaklığının jelleşmeye etkisini incelemiştir. Jelleşmeyi, UHT sütlerde depolama sonrasında başlayan pıhtılaşmalar olarak tanımlamışlardır. İki farklı UHT prosesi ile üretilen sütlerde farklı depolama sıcaklıkları için pH ve viskozite grafikleri benzerlik göstermiştir. Plasmin ve plasminojen değerlerinde ise iki yöntem arasında kayda değer bir fark olduğu belirtilmiştir. Direkt sistem ile uygulanan

ısıtma işlemi sonucunda plasmin ve plasminojen seviyesinde olan artış endirekt sistem ile uygulanan ısıtma işlemine göre daha düşüktür. Çalışmada bunun nedeni olarak endirekt ısıtma sisteminde rejime girme ve işlem süresinin direkt ısıtma sistemine göre daha yüksek olmasından olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, süt proteinlerinin direkt ve endirekt ısıtma işlemi sonrasında tamamen bozunmadığı gözlenmiş ve jelleşmenin iki yöntem arasındaki fark ile ilişkisinin olmadığı söylenmiştir (Manji vd., 1986).

Pietrysiak, Denise M. Smith, Brennan M. Smith ve Ganjyal tarafından, 2018 yılında yapılmış olan çalışmada bezelye-pirinç proteinlerinin direkt buhar enjeksiyonu ile işlenmesi sonucunda protein tozu eldesi çalışması yapmışlardır. %5 konsantrasyonlu protein bulamaçları 66-107°C sıcaklıkları arasındaki buhar sıcaklıkları ile işleme sürecini incelemiştir. Direkt buhar enjeksiyonu ile işlemeden sonra protein bulamaçları dondurarak kurutulmuş ve protein tozu elde edilmiştir. Protein çözülme profillerine göre bu prosese en uygun direkt buhar enjeksiyon sıcaklığı şartları 107 °C seçilmiştir. Karışımda bulunan lizin enzimi azaltılamamıştır. Çözünabilirlik, köpük kararlılığı, emülsivite indeksi ve yağ tutma kapasitesi direkt buhar enjeksiyonu ile işlenen örneklerde işlenmemiş örneklere göre artış göstermiştir. Çalışma sonucunda, direkt buhar enjeksiyonu ile bezelye-pirinç proteinlerinin fonksiyonel özelliklerinin artırılarak işlemde sonra amino asit kompozisyonuna etkisi olmadan işlenebileceği belirtilmiştir. Yazarlar bir sonraki çalışma için direkt buhar enjeksiyonu ile işlenmiş ürün ile işlem görmemiş ürün arasındaki duyu özelliklerinin karşılaştırılması gerektiğini belirtmişlerdir (Pietrysiak vd., 2018).

De Bonis ve Ruocco tarafından 2010 yılında yapılmış çalışma, sıvı yiyecekler için direkt buhar enjeksiyonunun ısı ve kütle transferi modellemesini incelemektedir. Çalışmada analiz için turunçgil suyu kullanılmıştır. Turunçgil suyunun sıvı akışı, ısı transferi ve biyo indikatör kinetikleri ve taşınması açısından çok boyutlu nümerik analizleri yapılmıştır. Isıl işlemler için direkt buhar enjeksiyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada model olarak konsantre turunçgil suyu kuru doymuş buhar ile ısıl işlem görmüştür. Model, istenen her an için termal karakteristikleri gözlemlenebilecek şekilde oluşturulmuştur. Euler-ortalama, çok fazlı transfer notasyonu silindirik bir yapıda uygulanmış ve direkt buhar enjeksiyonu ile terminizasyonun etkisi gözlenmiştir. Akış ve sıcaklık grafikleri ve seyrelme efekti modellenmiştir (De Bonis ve Ruocco, 2010).

Srichantra, Newstead, Paterson ve McCarthy tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada homojenizasyonun ve ön ısıtma işleminin, taze, rekombine ve rekonstite süt için uht sterilizasyon ünitesinde kirlenmeye etkisi incelenmiştir. Uht prosesi öncesi süte ısıtma işlem uygulamanın (ön ısıtma) uht eşanjörlerinde kirlenmenin engellenmesinde etkili olduğunu öne süren çalışmalar olduğunu belirten yazarlar, aynı kaynaktan gelen taze süt, rekombine süt ve rekonstite süt için yüksek ve düşük sıcaklıklarda ön ısıtma uygulandıktan sonraki kirlenmeye etkisi karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda taze, rekombine ve rekonstite süt için yüksek sıcaklıkta ön ısıtma uygulandığında uht eşanjörü içerisinde kirlenmenin arttığı görülmüştür. Sonuçlar taze süt için ön ısıtma öncesinde ve sonrasında homojenizasyon yapıldığında veya hiç yapılmadığında değişmemiştir. Rekombine ve rekonstite süt için ise homojenizasyon sonucunda özellikle ön ısıtma yapılan örnekler için kirlenmeyi arttırdığı görülmüştür. Yazarlar, ön ısıtma işleminin protein denatürasyonuna neden olduğunu ve protein denatürasyonu nedeni ile süt içerisinde bulunan mineral konsantrasyonunun artıp, yüksek mineral konsantrasyonlu sütün uht eşanjöründe kirliliğe neden olduğunu savunmuşlardır (Srichantra vd., 2018).

Prakash, Hupperts, Karvchuk ve Deeth tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada çikolata aromalı süt için ultra yüksek sıcaklıkta işlenmesi incelenmiştir. Farklı karajenan ve şeker konsantrasyonlarına sahip çikolatalı sütler 145°C de 6 saniye holder süresi ile endirekt ısıtma ile işlenmiştir. Sütün ön ısıtma ve sterilizasyon bölmelerindeki sıcaklığı ve debisi, ısı transfer katsayısını hesaplamak ve kirlenmeyi gözlemleyebilmek için incelenmiştir. İncelemelerin sonucunda kappa karejenenin, lambda karejenene göre ürünü uht prosesinde kirlenmeye (yapışmaya) karşı daha iyi stabilize ettiği görülmüştür. Kappa karajenin ve şeker miktarının artırılması ile çikolatalı sütün viskozitesinin ve tortulaşma eğiliminin arttığı görülmüştür (Prakash vd., 2010).

Hagsten vd. tarafından 2009 yılında yapılan bir çalışmada, süt prosesinde uht ünitesinde kirlenmenin temizlenmesi için gerekli alkali oranı çalışılmıştır. Uht ünitesi eşanjöründe oluşmuş rijit mineral yapıları çöktürmenin, lazer nirengi sensörü ve bir kamera ile temizleme sırasında kirlilik kalınlığı ve yapısında değişiklikleri incelenmiştir. Proses alkali ve asit ile temizleme aşamalarında izlenmiştir. Kirlenmede izlenen koşullar altında alkali temizleme aşamasında bir değişiklik görülmemiştir. Ancak protein bazlı kirliliklerde kayda değer bir azalma görülmüştür ve bu asit ile temizlik aşamasının daha verimli geçmesine neden olmuştur. Sonuç olarak süt proteinlerinin temizlenmesi için alkali kullanımının gerekliliği

vurgulanmıştır. İyi bir temizlik işleminin kirliliği azaltarak daha iyi ısı transferine ve ürün kalitesini korumaya olumlu etkisi vurgulanmıştır (Hagsten vd., 2019).

Abu-Jdayill ve Mohmeed tarafından yapılan çalışmada, konsantre yoğurdun akış özelliklerinin depolama süresi ile değişimi incelenmiştir. Ticari ürün örnekleri 25°C de 0, 1, 2, 5, 8, 10 ve 14 gün bırakılarak shear kuvvetinin fonksiyonu olarak viskozite grafikleri çıkartılmıştır. Deneyler sonucunda ürünün depolama zamanına göre viskozitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun üründe zaman içinde jelleşme olması nedeni ile olduğu öne sürülmüştür. Labnenin farklı depolama zamanlarında shear kuvveti ile seyreltiği gözlenmiştir. Ürünün shear kuvveti karşısında gösterdiği davranış, power-law modeline uygundur (Abu-Jdayil ve Mohameed, 2002).

Zhang, Zhu, Mondejar ve Haglind tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, plakalı ısı değiştiricilerde ısı transferi verimini artırma teknikleri incelenmiştir. Bu çalışmada bir plakalı eşanjörün ısı transferi performansının, plakalı eşanjör geometrisinde iyileştirmeler yaparak ya da ısı transferi iyileştirme yöntemleri kullanılarak arttırılacağı belirtilmiştir. Çalışmada, chevron(zigzag) dalgalı eşanjörlerin geometrik parametrelerinin ve nano akışkan kullanımının eşanjör performansına etkileri incelenmiştir. Çalışmanın amacı plakalı ısı değiştiricilerde performansa etki eden çalışmaları birleştirmenin yanı sıra, farklı plakalı ısı değiştirici performansı artırma yöntemlerini değerlendirmek ve karşılaştırmak ve bu eşanjörlerdeki ısı transferi mekanizmalarını gözlemlemektir. İnceleme sonucunda chevron tipi geometriye sahip plakalı ısı değiştiricilerin performansında en etkili geometrik parametrenin chevron açısı olduğu görülmüştür. Isı iletiminde akış şeklinin yani chevron açısının önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır. İncelenen çalışmaların sonucunda, plakalı tip ısı değiştiricilerin termal/hidrolik performanslarının düşük reynolds sayılarında daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. İlave olarak kapsül tipi kabartmalı yüzeylerde ve mikro yapılı yüzeyler ve nano-mikro gözenekli yüzeyler kullanımının tek fazlı ısı transferinde en yüksek performans gösteren ısı değiştirici performans artırma yöntemleri içerisinde en verimli olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2019).

Mustafa Pekgüzelsu tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada, bir kombide kullanıla plakalı ısı değiştiricide birikinti oluşumunun deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Çalışmada, asimetric tipte lehimli plakalı ısı değiştiricilerde 60°C ve 85 °C arasındaki sıcaklıklar ve 3lt/dk. ve 15lt/dk. debilerde kullanım suyu esas alınmış olup, su sertliği açısından 11-13 dH

alman sertliğindeki şebeke suyu kullanılmıştır. Deneylerde, kirlenme arttıkça ısı geçişinin azaldığı ve su çıkış sıcaklığının zamanla bu nedenden olayı düştüğü görülmüştür. Kirlenmenin etkileri olarak ise, akış kanallarının daralması, basınç kayıplarının artması ve ısı geçişinin azalması olduğu belirtilmiştir. Faklı sıcaklık ve debilerde yapılan deneylerde akışkan hızının yüksek olduğu bölgelerde kirlenmenin diğer bölmelerde olduğundan daha az olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık için ise, sıcaklığın en yüksek olduğu bölgelerde kirlenmenin çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Deneyler arasında en yüksek sıcaklık ve en düşük debiye sahip olan eşanjörde görülürken, düşük sıcaklıklarda ve en yüksek debide çalışan eşanjörde kirlenme görülmemiştir. Çalışmada ayrıca eşanjör plaka tipinin de etkili olduğu belirtilmiştir (Pekgüzelsu, 2015).

Vasconcelos Segundo, Mariani, ve Coelho tarafınan 2019 yılında yapılan çalışmada falcon optimizasyon methodu kullanılarak ısı değiştirici tasarımı yapılmıştır. Falcon optimizasyon yöntemi, üç aşamalı karar verme mekanizmasına sahip bir algoritmadır. Simülasyonda falcon optimizasyon yönteminin verimliliği, etkinliği ve sağlamlığı diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin, shell and tube ve plakalı kanatlı ısı değiştiriciler için diğer optimizasyon methodlarına göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Plakalı kaatlı ısı değiştirici için verim %10 arttırılacak şekilde optimizasyon yapılmıştır. Sonuç olarak yeni bir optimizasyon yöntemi olan falcon optimizasyonu yönteminin literatürde bulunan yöntemlerden daha etkili olduğu raporlanmıştır (Vasconcelos Segundo vd., 2019).

Semih ÇAĞLAR tarafından 2019 yılında yapılan tez çalışmasında enerji sistemleri için kanatlı borulu ısı değiştiricisi dizaynı ve optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada, elektrik santrallerinde kullanılan dairesel kesitli, çelik borulu 15 mm çapında eş merkezli boru diziliminde eşanjörlerin dizaynı ve optimizasyonu için kritik performans karakteristiklerinin incelemesi yapılmıştır. Bu tip eşanjörlerde ısıl direncin en yüksek olduğu kısmın ısı transferinin hava ile gerçekleştiği bölgeler olduğu vurgulanmış, hava akışı tarafında gerçekleşen ısı transferi ve basınç kayıpları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmanın literatürde bulunan çalışmalardan faklı olarak, daha yüksek kapasitelerde, hava basınç kayıplarını azaltmak amacı ile literatürdeki şaşırtmalı boru dizilimi yerine, eş merkezli boru dizilimi yapılmıştır. 7 faklı hava hızında testler yapılmış ve korelasyonlar üretilmiştir. Literatürde yassı boru demetine sahip kanatlı borulu eşanjörlerin dairesel kesitli boru demetine sahip kanatlı borulu eşanjörlere göre daha iyi ısı transfer performansı ve daha düşük basınç kaybı olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmanın dairesel kesitli kanatlı borulu

eşanjör üzerine yapıldığı ve daha sonra yapılacak çalışmalarda, yassı boru demetine sahip bir eşanjör için tasarım ve iyileştirme yapılabileceği belirtilmiştir (ÇAĞLAR, 2019).

Ceyda Kocabaş tarafından yapılan çalışmada, farklı malzemelerden imal edilmiş plakalı ısı değiştiricilerin atık ısı kazanımı performanslarının deneysel analizi yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmada, alüminyum, polimer ve selülozik malzemelerden imal edilmiş ısı değiştiriciler kullanılarak ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Her bir ısı değiştirici belirlenen parametreler için analizlere tabi tutulmuşlardır. Her bir deney sonucunda elde edilen taze ve egzoz havası çıkış sıcaklıkları kaydedilmiş, bu değerler kullanılarak ısı hesaplamaları yapılmıştır. Sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki ısı transfer performanslarını yansıtan değerler grafikler ile gösterilmiştir. Taze hava ve egzoz havası sıcaklıkları ile havanın hızı parametreler olarak belirlenmiş ve sonuçlar bu parametreler üzerine elde edilmiştir. Hava hızı ve taze hava giriş sıcaklığı sabit tutulursa, egzoz havası giriş sıcaklığı arttıkça taze hava çıkış sıcaklıkları da sürekli olarak artmaktadır. Üç farklı ısı değiştirici birbiri ile kıyaslandığı zaman aynı hava hızı, egzoz havası giriş sıcaklığı ve aynı hava giriş sıcaklıklarında en yüksek taze hava çıkış sıcaklığının selülozik ısı değiştiricisi kullanıldığı zaman elde edilmiş, daha sonra sırası ile polimer ve alüminyum ısı değiştiricileri gelmektedir. Polimer ısı değiştiricisi alüminyum ısı değiştiricisine göre etkinlik değeri %12,6 daha fazla olmaktadır. Selülozik ısı değiştirici kullanıldığında ise polimer ısı değiştiriciye göre %14,5 daha fazladır (Kocabaş, 2014).

Ozan Mert Balcı tarafından yapılmış olan tez çalışmasında, faz değişim malzemesi içeren ısı değiştirici tasarımı yapılmıştır. Doğalgazlı kombilerin sıcak su sağlaması sırasında bacadan atılan gazdan ısı enerjisinin geri kazanımı için geliştirilen yeni bir yöntem incelenmiştir. Atık gazdan kazanılan ısı kullanım suyuna aktarılması ile verimli ve çevre dostu bir ısıtma sistemi elde edilmektedir. Önerilen ısı değiştirici atık gazdan ısı enerji depolama amacı ile faz değişim malzemesi içermektedir. Faz değişim malzemesinde depolanan enerji kullanıcı talebi olduğunda kullanım suyunu ısıtmak için kullanılabilir. Eşanjörün farklı çalışma koşulları ve tasarımlar için analizleri yapılmıştır. Faz değişim malzemesi ile kullanım suyunun sıcaklığı 9°C arttırılabilmektedir. Bu artış kullanıcının sıcak suyu daha kısa sürede elde etmesini ve atık gazın enerjisinden faydalandığı için enerji tüketiminin azalmasını sağlamıştır (Balcı, 2018).

Swati Kadam ve Ashis K. Datta tarafından yapılan çalışmada, pirincin süt içerisinde devamlı prosesinin ısı transfer ve termal özelliklerinin araştırılması yapılmıştır. Makalede, kheer olarak isimlendirilen, bir çeşit sütlacın, helisel coil ısı değiştirici ile devamlı proses ile pişirilmesi çalışılmıştır. Sütlacın termo-fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı denklemler olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda sütlü karışımın yanması derecesi ve yanma kalınlığı üzerine çalışma yapılmıştır. Yanma sonucu ısı değiştiricinin veriminin düşmesi nedeni ile ısıtma medyanı aynı kalırken, ürün çıkış sıcaklığının incelenmesi yapılmıştır. Isı değiştiricinin bir süre çalıştırılması ile, ısı değiştirici yüzeyinde yanıp yapışan ürünlerin birikmesi nedeni ile ısı değiştirici verimi düşmüş ve aynı nitelik ve nicelikte ısıtma medyanı kullanılmasına rağmen ürün sıcaklığında 11°C ye kadar düşme gerçekleşmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sütlac karışımının viskozite, spesifik ısı, ısı transfer katsayısı denklemlerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması yapıldığında %4 hata payı olduğu görülmüştür (Kadam ve Datta, 2015).

S. Thaiudom ve S Pracham tarafından yapılan çalışmada sütlac içerisindeki pirinç proteini ve stabilizatörlerin yasemin pirinci unu ile yapılmış sütlacın rheolojik ve tekstürel özelliklerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Çalışmada, yasemin pirinci ununun, pirinç ve buğday unu yerine kullanıldığı ve farklı koku ve aroması nedeni ile tercih edildiği belirtilmiştir. Çalışmada, sütlaca pirinç yerine pirinç unu ve yumurta ile değiştirilmiştir. İki farklı protein oranına sahip iki farklı pirinç unu kullanılmıştır. Sütlacın yapıldığı günden 6 gün sonrasına kadar tekstürel ve rheolojik özelliklerin incelenmiştir. Ürün sertliği, sakızlaşma ve çiğnenebilirliğinin, düşük proteinli pudinglerde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Thaiudom ve Pracham, 2018).

Christina Alamprese ve Manuela Mariotti tarafından yapılan çalışmada, süt yerine kullanıla farklı maddelerin sütlacın tekstürel ve rheolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada laktoz intoleransı ya da süt alerjisi olan bireyler için süt alternatifleri ile yapılan sütlacların tekstürel ve rheolojik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Pirinç sütü, light soya sütü, yarım yağlı süt e su ile sekiz farklı puding örneği hazırlanmıştır. Puding örnekleri üretim sırasında ve 3 gün dolapta soğutulmuş olarak teste tabi tutulmuştur. Pirinç sütlerinin final üründe sahip olduğu yapının sütlac için uygun olmadığı ve su ile benzer özellikler gösterdiği, ancak soya sütünün süt ile en benzer ürün olduğu sonucuna varmışlardır. (Alamprese ve Mariotti, 2011).

W. Kneifel tarafından 2003 yılında yapılan çalışmada, rekombine süt ürünleri üretimi için yağsız süt tozunun genellikle en sık kullanılan ürün olduğu vurgulanmış, rekombine süt ürünlerinin yüzdesel olarak içerikleri incelenmiş ve rekombine süt teknolojisi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir (Kneifel, 2003).

P S Tong tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, rekombine süt, rekombine evapore edilmiş süt, rekombine tatlandırılmış kondense süt, rekombine peynir ve rekombine peynirlerin içerikleri ve üretim prosesleri incelenmiştir. Tüm ürünler için proses tanımlamaları yapılmış ve ürünlerin içerisinde bulunması gereken içeriklerin özellikleri açıklanmıştır (Tong, 2011).





3. ISI DEĞİŞTİRİCİLER

Aynı veya farklı özelliklere ve yapılara sahip iki akışkan arasında birbirine karışmaksızın hızlı ve yüksek etkinlikte ısı transferi gerçekleştiren ekipmanlar ısı değiştirici olarak adlandırılır. Akışkanın soğutulması ve ısıtılması, buharlaştırılması ve yoğuşturulması amacı ile kullanılırlar. Genel olarak akışkanlar bir ısı transfer yüzeyi ile birbirlerinden ayrılırlar (Sevim, 2016).

Isı değiştiriciler, ısıl temasta olan iki veya daha fazla akışkan arasında ısı transferinin sağlandığı cihazlardır. Isı değiştiriciler endüstrinin en önemli cihazlarından olup, buharlaştırıcı, yoğuşturucu, ısıtıcı, soğutucu gibi farklı isimler altında, gıda tesislerinde, iklimlendirme sistemlerinde, atık su tesislerinde, kâğıt üretiminde, ilaç üretim tesislerinde, enerji üretim santrallerinde ve bir çok endüstride önemli kullanıma sahiptir (Kocabaş, 2014).

3.1. Isı Değiştiricilerin Sınıflandırılması

Isı değiştiriciler, kullanım amacına, ısı transfer şekline, akış türüne, akışkan sayısına, akışkanların faz değişimine göre sınıflandırılabilirler. Mühendislik uygulamalarında çok farklı tip, kapasite ve özelliklerde bulunabilen ısı değiştiricilerin tasarımı ve optimizasyonu kullanıldığı alana özel olmalıdır (Kocabaş, 2014).

3.1.1. Isı değiştiricilerin ısı değişim şekline göre sınıflandırılması

Isı değiştiriciler, akışkanların temas şekline göre doğrudan (direkt) veya dolaylı (endirekt) olarak iki sınıfta incelenebilir (Kocabaş, 2014).

Akışkanların doğrudan temas halinde olduğu ısı değiştiriciler

Bu tip ısı değiştiricilerde ısı, birbiri ile doğrudan temaslı soğuk ve sıcak akışkanlar arasında iletilir. Tek sınırlama, akışkanların birbiri ile karışmamasıdır. Soğutma kuleleri, püskürtmeli veya tablalı yoğuşturucular, bu tip ısı değiştiricilere örnek olarak kullanılabilir (Kocabaş, 2014).

Akışkanlar arasında doğrudan temas olmayan ısı değiştiriciler

Dolaylı temaslı ısı değiştiricilerinde ısı transferi, bir ısı transfer yüzeyi boyunca sıcak ve soğuk akışkanlar arasında gerçekleşir. Isı ayırıcı cidar boyunca (plaka, boru gibi) transfer edilirken, akışkanlar bu cidarın iki tarafından aynı anda akar ve birbirlerine karışmazlar (Kocabaş, 2014).

3.1.2. Isı değiştiricilerin akışkan sayısına göre sınıflandırılması

Isı değiştiriciler, iki, üç veya çok akışkanlı olarak sınıflandırılabilirler. Isı değiştiriciler çoğunlukla iki akışkanlıdır. Üç akışkanlı ısı değiştiriciler kriyojenide, hava ayırma sistemleri, hidrojenin sıvılaştırılması, amonyak sentezi gibi kimyasal endüstrilerinde kullanılırlar. Üç ve çok bileşenli ısı değiştiricilerin tasarımı oldukça karmaşıktır (Kocabaş, 2014).

3.1.3. Isı değiştiricilerin ısı geçiş mekanizmasına göre sınıflandırılması

İki tarafta da tek fazlı akış, bir tarafta tek fazlı, diğer tarafta çift fazlı akış, iki tarafta da çift fazlı akış, taşınım ve ışınlama birlikte ısı geçişi olmak üzere dört ana başlıkta sınıflandırılabilir (Kocabaş, 2014).

İki tarafta da tek fazlı akış olan ısı değiştiriciler

Isı değiştiricide sıcak akışkanda, soğuk akışkanda tek fazlıdır. Isı taşınımı bir pompa veya vantilatör ile tahrik edilen zorlanmış ya da yoğunluk farkından dolayı doğal olarak gerçekleşebilir. Oda ısıtıcıları, buhar kazanı ekonomizerleri, hava ısıtıcıları, taşıt radyatörleri gibi uygulamalar bu tip ısı değiştiricilere örnektir (Kocabaş, 2014).

Bir tarafta tek fazlı diğer tarafta çift fazlı akış olan ısı değiştiriciler

Bu ısı değiştiricilerde, bir tarafta tek fazlı akış varken, diğer tarafta kaynamakta ya da yoğunlaşmakta olan iki fazlı bir akış vardır. Örnek olarak termik santrallerin yoğunlaştırıcıları, soğutma sistemlerindeki evaporatör veya kondenserler, buhar kazanları ve doymuş buharın yoğunlaşma ısı enerjisinden yararlanan tüm uygulamalar sayılabilir (Kocabaş, 2014).

İki tarafta da çift fazlı akış olan ısı değıştirciler

Bir tarafta buharlaşma, diğerk tarafta yoğunlaşma işlemi olan ısı değıştircilerdir. Bunlar hidrokarbonların distilasyonu gibi uygulamalarda görülebılır (Kocabaş, 2014).

Taşınımla ve ışınlımla ısı transferi olan ısı değıştirciler

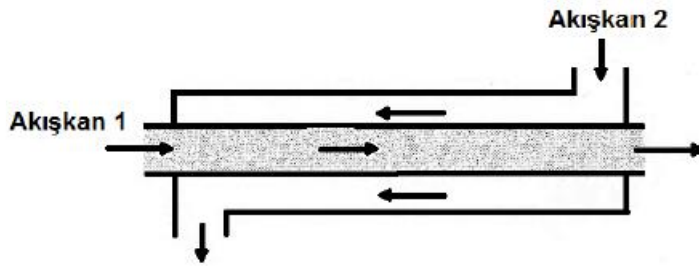
Özellikle bir tarafında yüksek sıcaklıktaki gazlar olan ısı değıştircilerde taşınımla ve ışınlımla ısı transferi bir arada görülebilmektedir. Yüksek sıcaklıkta dolgu maddeli rejeneratörler, fosil yakıt ile çalışan ısıtıcılar, buhar kazanları ve piroliz ocakları gibi örnekler verilebilir (Kocabaş, 2014).

3.1.4. Isı değıştircilerin yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması

Isı değıştirciler yapısal özelliklerine göre 5 ana kategoride toplanırlar.

Borulu ısı değıştirciler

Bir akışkan borunun içinden akarken, diğerk akışkan borunun dışından akmaktadır. Boru çapı, boru sayısı, boru uzunluğu, boru dizilimi değışebilir. Bu nedenle borulu ısı değıştircilerin tasarımı oldukça esnektir. Borulu ısı değıştirciler düz borulu, gövde borulu ve spiral borulu ısı değıştircilerden oluşmaktadır (Kocabaş, 2014).



Resim 3.1. Borulu ısı değıştirciler (Kocabaş, 2014).

Düz borulu ısı değıştirciler

Çoğunlukla çift borulu olmanın yanı sıra, boru demetinden yapılmış çeşitleri de mevcuttur. Çift borulu olanlar en basit ısı değıştirici tipidir. Sistem genellikle aynı eksenli iki borudan

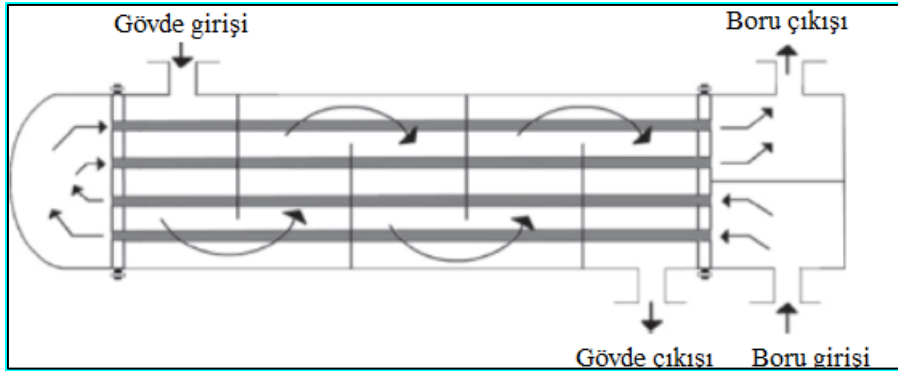
yapılır. Akışkanların biri içteki borudan akarken, diğeri dış borudan akar. Akışkanların akış yönleri birbirleri ile paralel veya zıt olabilir. (Kocabaş, 2014).

Spiral borulu ısı değıştiriciler

Bir veya birden fazla borudan yapılmış spiral ve bu spiralın dışındaki bir gövdeden meydana gelmektedir. Soğutma sistemlerinde kullanılan yan eksenel kondenser ve yan eksenel evaporatör olarak da tasarımı yapılabilir. Spiral boruların ısı transfer katsayısı düz boruların ısı transfer katsayısına göre daha yüksektir (Kocabaş, 2014).

Gövde borulu ısı değıştiriciler

En yaygın olarak kullanılan ısı değıştiricilerdir. Shell and tube ısı değıştiriciler olarak da bilinirler. Boru eksen, gövdenin eksenine paralel olacak şekilde büyük bir silindirik gövde içerisinde yerleştirilen birbirine paralel yuvarlak borulardan oluşmaktadır. Akışkanlardan biri bu boruların içinde geçerken, diğeri akışkan gövde tarafında boruların arasından paralel veya çapraz olarak akar. İçerisinde akışı yönlendiren ve borulara destek olan saptırma (baffle) levhaları kullanılabilir.



Resim 3.2. Gövde borulu ısı değıştirici (W.Serth ve G.Lestina, 2014)

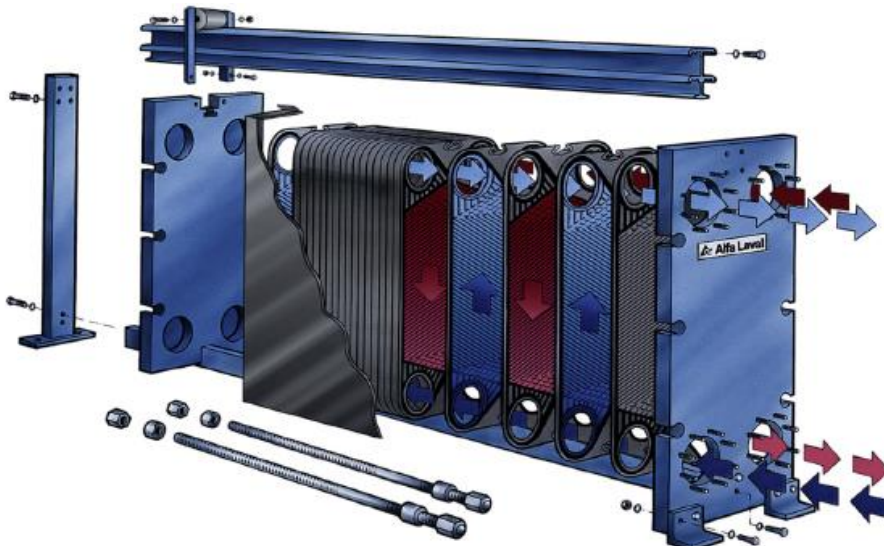
Plakalı ısı değıştiriciler

Plakalı ısı değıştiriciler akış kanallarını oluşturan ince plakalardan imal edilirler. Plakalar düz veya dalgalı olabilir. Plakalı ısı değıştiricilerinde plakalar sayesinde oluşturulan akış kanallarında plakalar üzerindeki özel şekiller vasıtası ile yüksek türbülanslı bir akış oluşturulur. Bu yüksek türbülanslı akış, yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşılmasını

sağlamaktadır. Bu eşanjörde kullanılan malzeme miktarını azaltarak daha düşük maliyetlerle ısı değiştirici imalatına olanak sağlamaktadır. Gaz, sıvı veya iki fazlı akışların herhangi biri için ısı transfer ortamı olarak kullanılabilirler. Bu eşanjörler, contalı-plakalı, spiral plakalı ve lamelli tiplerden oluşabilir (Kocabaş, 2014); (Sevim, 2016).

Contalı plakalı ısı değiştiriciler

Contalı plakalı ısı değiştiriciler, ince plakaların bir çerçeve içerisine sıkıştırılarak paket haline getirilmesi ile imal edilirler. Plakalar birleştirilip paket haline getirilirken, uygun contalar kullanılarak akışkanların birbiri ile karışması ve dışarıya sızması engellenir. Plakalar arası boşluklardan sıcak ve soğuk akışkanlar birbirlerine karışmadan akarlar. Rijitlik sağlamak, plakalar arası mesafeyi sabitlemek ve ısı transfer alanını arttırmak için plakalar dalgalı şekilde imal edilir. (Kocabaş, 2014) Contalı plakalı ısı değiştiricilerde akışkanlar plakaların iki yüzeyinde birbirlerine zıt olarak akmaktadır. Su akışı contalar yardımı ile kontrol edilmektedir. Contaların dış yüzeyleri dış ortama açık olduğu için herhangi bir kaçak durumunda kaçaklar dışarıdan kolay bir şekilde gözlemlenebilir (Pekgüzelsu, 2015).

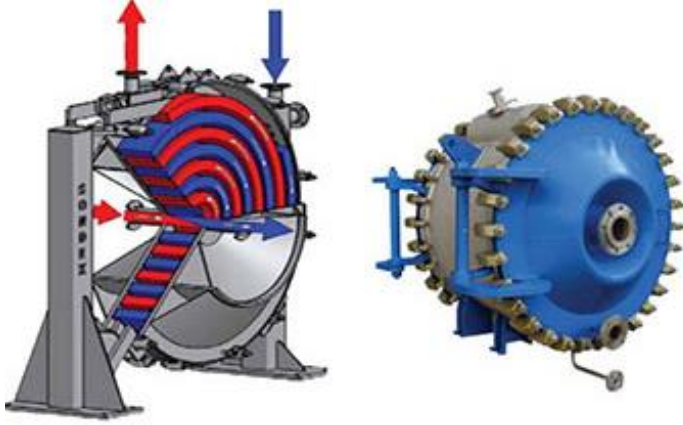


Resim 3.3. Plakalı ısı değiştirici (W.Serth ve G.Lestina, 2014).

Spiral plakalı ısı değiştiriciler

Spiral plakalı ısı değiştiriciler 150 ile 1800 mm genişliğinde uzun ince iki metal plakanın her biri bir akışkan için olmak üzere iki spirali paralel kanallar oluşturacak şekilde sarılması

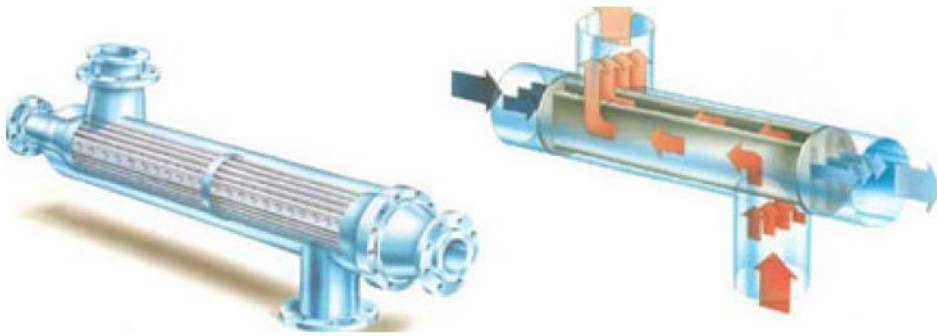
ile elde edilir. İki plaka arasına konulan saplamalar ile sabit bir aralık sağlanabilir. Levhaların iki tarafı contalı kapaklar ile kapatılır. Temizlenmesi kolay olduğundan bu ısı değıştirci tortu yapabilecek akışkanlar için uygundur (Kocabaş, 2014).



Resim 3.4. Spiral plakalı ısı değıştirci (Sandas Makine).

Lamelli ısı değıştirciler

Bir gövde içine yerleştirilmiş borulardan (lameller) yapılmış bir demetin yerleştirilmesi ile elde edilir. Akışkanlardan biri lamelli boruların içinden akarken diğerk akışkan lamellerin arasından akar. Gövde içinde şaşırtma levhaları yoktur. Akış tek geçişli olup aynı yönlü veya çapraz olarak kullanılabilir (Kocabaş, 2014).



Resim 3.5. Lamelli ısı değıştirci (Kaçar ve Erbay, 2013).

Lehimli (kaynaklı) plakalı ısı değıştirciler

Lehimli plakalı eşanjörlerde, contalı plakalı eşanjörlerde bulunan çerçeveler, contalar ve cıvataları içermez. Plakalar birbirlerine bakır veya nikel kaynakla birleştirilmiş durumdadır.

Bu da daha az karmaşık ve daha düşük ağırlığa sahip, daha kompakt bir ısı değiştirici ortaya çıkmasını sağlar. Sızdırmazlık işleminin contalar yerine bakır ve nikel dolgu malzemeleri ile sağlanması lehimli tip ısı değiştiricilerin daha yüksek basınçlar altında çalışmasını sağlar (Pekgüzelsu, 2015).

Lehimli ısı değiştiriciler, contalı plakalı eşanjörlere göre %25 ve klasik borulu tip eşanjörlere göre 10 kata kadar daha yüksek verime sahiptirler. Boyut olarak borulu tip eşanjörlerin %5-10'u kadar bir hacim kaplarlar. Bu avantajların yanı sıra, plakaların sökülüp temizlenmesi, değiştirilmesi ve kapasite artırımı için plaka eklenmesi mümkün değildir (Sevim, 2016). (Pekgüzelsu, 2015).



Resim 3.6. Lehimli ısı değiştirici (Alfa Laval).

Kanatlı yüzeyli ısı değiştiriciler

Ana ısı transfer yüzeyinde (boru ya da levha) kanatların ve diğer ilave çıkıntıların ısı transfer yüzeyini arttırmak amacı ile kullanıldığı ısı değiştiricilerdir. Gaz tarafında ısı transfer katsayısı sıvı tarafındakinden daha düşük olduğu için kanatlı ısı transfer yüzeyleri genel olarak gaz tarafında kullanılmaktadır. Kanatların profillerine göre levhalı kanatlı ısı değiştiriciler ve borulu kanatlı ısı değiştiriciler olarak ikiye ayrılır (Kocabaş, 2014).

Levhalı kanatlı ısı değiştiriciler

Genellikle düşük sıcaklık uygulamalarında ve akışkanlar arası sıcaklık farkının düşük olduğu (1°C ile 5°C arasında) uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Sahip oldukları akışa göre çeşitli şekillerde (paralel, ters ve çapraz akış) imal edilebilirler. Kanatlar, paralel levhalar halindeki yüzeyler arasına mekanik olarak preslenerek lehimlenerek veya kaynatılarak tutturulur. Kanatlar düz, delikli, tırtıklı ve zigzag şeklinde olabilir (Kocabaş, 2014).

Borulu kanatlı ısı değiştiriciler

Bu tip ısı bir tarafta gaz, diğer tarafta sıvı bulunduğu durumlarda kullanılırlar. Borulu-kanatlı ısı değiştiriciler kanatların boru dizilerinin dış tarafına sabitlendiği bir yapıdadır. Boru içinde kanatların kullanıldığı, soğutma sistemlerinde bulunan evaporatör ve kondenserler gibi uygulamalar da bulunmaktadır. Kanatlar boru cidarına döküm, kaynak lehim ve sıkı geğme gibi yöntemlerle tutturulabilirler (Kocabaş, 2014).

Rejeneratif ısı değiştiriciler

Bu ısı değiştiricilerde ısı önce sıcak akışkan tarafından bir ortamda depo edilmektedir. Depo edilen ısı enerjisi daha sonra soğuk akışkana verilir. Isı geğişi dolaylıdır. Rejeneratör içerisinde ısının depolandığı elemanlara dolgu maddesi ya da matris adı verilmektedir. Pratikte dönen ve sabit dolgu maddeli ile paket yataklı olmak üzere üç tip rejeneratör vardır (Kocabaş, 2014).

Sabit dolgu maddeli rejeneratörler

Bu ısı değiştiricilerde gaz akış yönü sabit dolgu maddesine ve sabit dolgu maddesinden başka yöne saptırılır. Sürekli bir çalışma sağlanabilmesi için aynı tipten en az iki rejeneratöre ihtiyaç vardır. Yüksek fırınlar, cam fabrikaları ve düşük sıcaklık işetmelerinde havanın ayrılmasına kullanılmaktadır (Kocabaş, 2014).

Döner dolgu maddeli rejeneratörler

Döner dolgu maddeli rejeneratörler disk ve silindir (kasnak) tipi olmak üzere iki grupta toplanabilir. Disk tipi olanlarda ısı transfer yüzeyi disk şeklindedir ve akış eksenel yöndedir. Kasnak tipinde ise dolgu maddesi içi boş bir silindir şeklinde olup akış radyal yöndedir. Gaz türbinleri ve taşıtlarda kullanılabılırler (Kocabaş, 2014).

Paket yataklı rejeneratörler

Paket yataklı rejeneratörler çok basit bir konstrüksiyona sahip olmalarına rağmen basınç kayıpları çok yüksektir (Kocabaş, 2014).

3.1.5. Karıştırma kaplarda ısı transferi

Karıştırma kaplar özellikle aralıklı olarak çalışan ısıtma ve soğutma sistemlerinde çok kullanılan cihazlardır. Karıştırıcı kaplar içerisindeki akışkanlar ya dış yüzeyden ceket tipi ya da kap içerisine yerleştirilen serpantinlerle ısıtılabilir ve soğutulabilirler (Kocabaş, 2014).

3.1.6. Isı değiştiricileri akış tipine göre sınıflandırılması

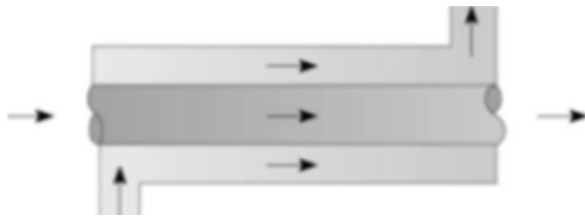
Isı değiştiricilerde akışların değişik şekillerde düzenlenmesi ortalama logaritmik sıcaklık farkı, etkinlik ve ısıl gerilmeler gibi faktörleri etkilemektedir. Akış şekline göre sınıflandırma, tek geçişli ve çok geçişli olarak iki ana grupta toplanabilir (Kocabaş, 2014).

Tek geçişli ısı değiştiriciler

İki akışkanın ısı değiştirici içerisinde birbirine göre sadece bir kez karşılaştığı ısı değiştirici tipleridir. Paralel, ters ve çapraz akımlı olarak üç grupta incelenebilirler (Kocabaş, 2014).

Paralel akışlı ısı değiştiriciler

Bu akış düzeninde ısı değiştirici içerisindeki iki akışkan ısı değiştiricinin aynı tarafından girip, birbirlerine paralel olarak akarlar ve ısı değiştiricinin diğer tarafından çıkarlar. ısıl gerilmelerin istenmediği durumlarda bu akış şekli tercih edilmektedir (Kocabaş, 2014).

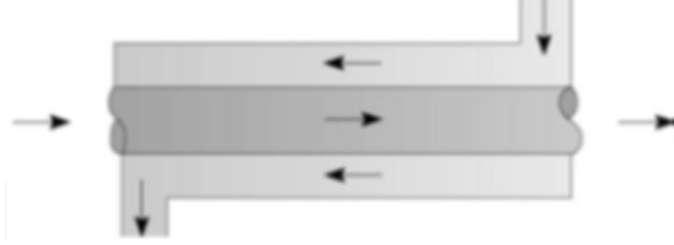


Resim 3.7. Paralel akışlı ısı değiştirici (Karataş, 2019).

Ters akışlı ısı değiştiriciler

Bu akış tipinde ısı değiştirici içerisindeki akışkanlar birbirlerine göre aksel olarak paralel fakat ters olarak akarlar. Plaka yüzeylerindeki hava akış yönleri ve daha uzun akış mesafeleri sonucu çapraz akışa oranla daha yüksek verime sahiptirler. Ters akışlı ısı değiştiricilerde

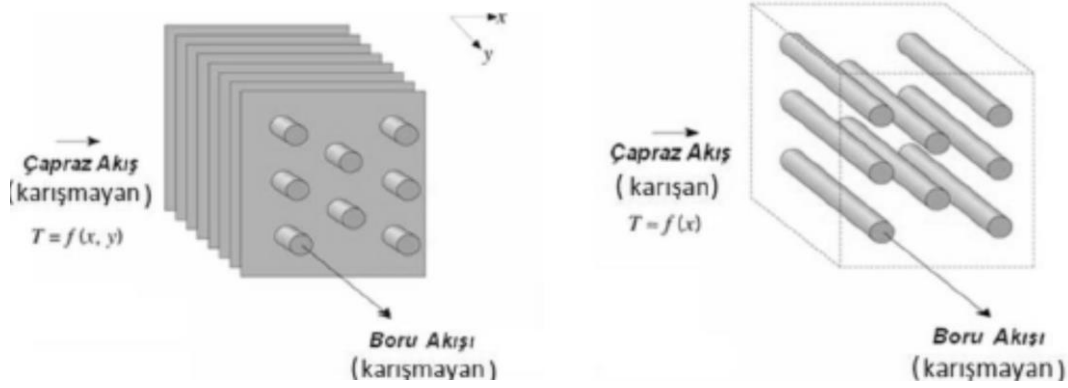
ortalama logaritmik sıcaklık farkı ve etkinlik değerleri diğer akış düzenlemelerine göre daha yüksektir (Kocabaş, 2014).



Resim 3.8. Ters akışlı ısı değiştiricisi (Karataş, 2019).

Çapraz akışlı ısı değiştiriciler

Bu akış tipinde, ısı değiştirici içerisinde bulunan akışkanlar birbirlerine göre dik olarak akarlar. Kanatlar ve şaşırtma levhaları yardımı ile, akışkanlar ısı değiştirici içerisinde ilerlerken kendi içerisinde karışabilir. Akışkan ısı değiştirici içinde bulunan bireysel kanallar veya borular içerisinde akıyorsa bitişik kanal içerisindeki akışkan ile karışmıyorsa, buna karışmayan akışkan denir. Ters durumda ise karışan akışkan adı verilmektedir. Isı transferi açısından, çapraz akışlı ısı değiştiricilerin etkinliği paralel akışlı ısı değiştiricilerden yüksek, ters akışlı ısı değiştiricilerden düşüktür. İmalat kolaylığı nedeni ile çapraz akışlı ısı değiştiriciler endüstride çok tercih edilmektedir. Ayrıca ters akışlı ısı değiştiricilere göre daha düşük hava direnci sağladıkları için avantajlıdır. Geniş plaka aralıkları ile daha yüksek hava hızlarında çalışma imkânı sağlarlar ve daha yüksek hava debilerinde çalışabilirler. Sütüne yüzeyinin kısa olmasından dolayı su plaka yüzeyinden kolayca uzaklaştırılabilmekte ve buzlanma riski azaltılmaktadır. Ters akışlı olanlara oranla daha fazla uygulamada kullanılabilmektedir (Kocabaş, 2014).



Resim 3.9. Çapraz akışlı karışan ve karışmayan ısı değiştiriciler (Karataş, 2019).

Çok geçişli ısı değiştiriciler

Tek geçişli eşanjörlerde paralel, ters ve çapraz olmak üzere üç esas geçiş şekli, ısı değiştirici içerisinde değişik şekillerde art arda eri halde düzenlenip, çok geçişli ısı değiştirici tipleri elde edilebilir. Çok geçişli ısı değiştiricilerin en büyük avantajı ortalama logaritmik sıcaklık farkı ve etkinliği artırarak tek geçişli ters akışlı ısı değiştiricilere yakın değerler elde edilebilmesidir. Isı değiştiricilerde geçiş sayısı ne kadar çok ise, ters akışlı akışa o kadar yaklaşılr. Çok geçişli ısı değiştiriciler, kanatlı yüzeyli, gövde borulu ve levhalı tiplerde değişik şekillerde kullanılabilir (Kocabaş, 2014).

Çapraz-ters ve çapraz-paralel akışlı ısı değiştiriciler

Bu düzenlerde çalışan ısı değiştiriciler genellikle kanatlı yüzeyli ısı değiştiricilerde tercih edilmektedir. İki veya daha fazla sayıda çapraz geçiş, arka arkaya ters veya paralel akışlı olarak seri halde bağlanır. Isı değiştirici etkinliği ve ortalama logaritmik sıcaklık farkı, geçiş sayısına ve her bir geçişteki akışkanların karışıp karışmadığına bağlıdır. Her iki durumda da geçiş sayısı arttıkça sistemin etkinliği, tek geçişli ters veya paralel akışlı düzenlemelere yaklaşabilir (Kocabaş, 2014).

Çok geçişli gövde borulu ısı değiştiriciler

Gövde akışkanlarının karıştırıldığı, paralel-ters, bölünmüş akışlı, ayırık akışlı, düzenlemeler pratikte en sık kullanılan tiplerdir. Borulu eşanjörlerde boru sayısı arttıkça sistem etkinliği, iki akışkanın da karıştığı çapraz akışlı ısı değiştiricilere yaklaşmaktadır (Kocabaş, 2014).

N paralel levha geçişli akışlı ısı değiştiriciler

Levha tipi ısı değiştiricilerde levhaların çeşitli şekillerde dzenlenesi ile çok geçişli akışlar elde edilebilir. Levha tipi ısı değiştiricilerde conta yeri değiştirilerek bu düzenlemeler yapılabilmektedir (Kocabaş, 2014).

3.1.7. Isı değiştiricilerin diğer sınıflandırılmaları

Mikro ısı değiştiriciler

Mikro- ve mikroscale ısı değiştiriciler bir akışkanın 1mm den küçük aralıklardan geçtiği ve silikon mikromakinalar ile imal edilen ısı değiştiricilerdir. Plakalar, büyük plakalı ısı değiştiricilerde olduğu gibi sandviç formunda dizilir. Tüm akış konfigürasyonları (paralel, ters, çapraz) mümkündür. Akışkan, mikrokanal adı verilen bir boşluktan akar. Çok sayıda küçük kanallara sahip oldukları için mikro ısı değiştiriciler yüksek ısı transfer katsayılarına sahiptir. Hafif ve küçük boyutlara sahiptirler. Genel olarak yakıt hücrelerinin geliştirilmesinde kullanılmakla birlikte, HVAC, hava araçları, elektroniklerin soğutulması gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Tüm avantajlarının yanı sıra, küçük hidrolik çaplara sahip akış kanalları nedeni ile basınç düşümleri yüksektir (Thulukkanam, 2013).

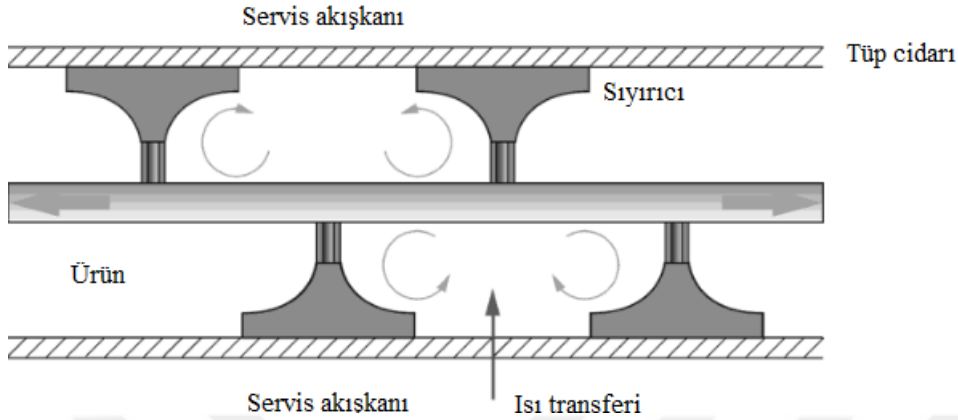
Basılmış devre ısı değiştiricileri

Bu ısı değiştirici tipi, 50 MPa a kadar basınç ve kriyojenik sıcaklıklardan 700°C sıcaklığa kadar dayanabilmektedir. Kompakttır ve yüksek verimliliğe sahiptir. Çapraz akış veya ters akış türlerinde kullanılabilir. Parçacık barındırmayan birçok sıvı ile kullanılabilir. Bir çok farklı konfigürasyonda retilabilmektedir (Thulukkanam, 2013).

Sıyırıcı yüzeyli ısı değiştiriciler

Sıyırıcı yüzeyli ısı değiştiriciler ısı transfer yüzeyinde yüksek miktarlarda katı madde yapışması yaşanabilecek proseslerde kullanılırlar. Birçok amur kıvamlı pompalanabilir sıvının ısıtılmasında, soğutulmasında, pişirilmesinde, dondurulmasında ve hatta karıştirılmasında kullanılabilir. Sıyırıcılı yüzeyli ısı değiştiricilerin kullanımı, ısı transfer yüzeyinde katı madde birikimini önlemek amacı ile kullanılır. Temelde, iki borulu bir ısı

değiştirici yapısında olan bu eşanjörler, ısı transfer yüzeyini sıyırılmakla görevli, yay ile yüklenmiş, döner sıyırıcı yüzeylerine sahiptir (Thulukkanam, 2013).



Resim 3.10. Sıyırıcılı ısı değiştiricilerin çalışma prensibi (Thulukkanam, 2013).

3.2. Isı Değiştiricilerin Çözümlemesi

Isı değiştiriciler genel olarak çalışma şartlarında değişiklik olmadan uzun süreler boyunca çalışan cihazlardır. Bu nedenle sürekli akış aygıtları olarak modellenebilirler. Her bir akışkanın debisi sabit kalır, girişte veya çıkışta akışkanların sıcaklık ve hız gibi özellikleri aynı kalır. Ayrıca akışkan akımlarının hızları ve yükseklikleri çok az değişmektedir. Bu demektir ki akışkanların kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir. Bir akışkanın özgül ısısı genellikle sıcaklığa bağlı olarak değişir. Belli bir sıcaklık aralığında özgül ısı, az bir duyarlılık kaybı ile ortalama bir değerde sabit olarak kabul edilebilir. Ayrıca ısı değiştiricinin dış yüzeyi, çevreye ısı kaybı olmayacak şekilde mükemmel yalıtılmış olarak kabul edilebilir (Çengel, 2011).

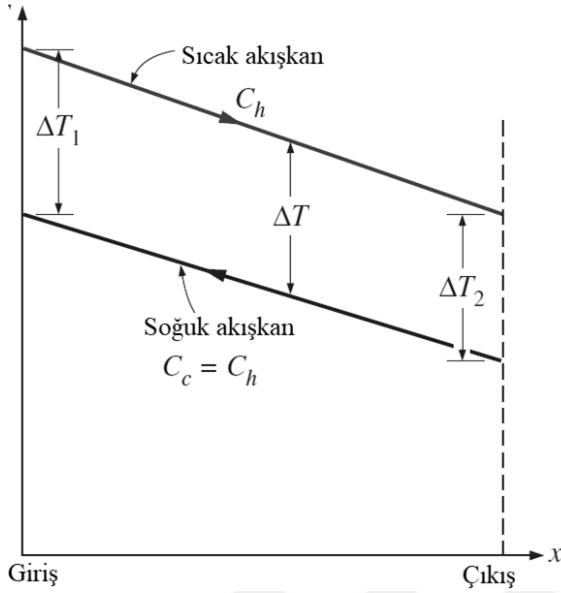
Uygulamada, yukarıda bahsedilen idealleştirmelere çok yaklaşılr ve bu idealleştirmeler bir ısı değiştirici çözümlemesini duyarlılıktan az miktarda ödün vererek basitleştirmektedir. Bu kabullerle termodinamiğin birinci kanunu, sıcak akışkandan olan ısı transfer hızının soğuk akışkana olan ısı transfer hızına eşit olmasının gerektirir (Çengel, 2011).

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_{pc} (T_{cçıkış} - T_{cgiriş})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{ph} (T_{hgiriş} - T_{hçıkış})$$

Burada c ve h indisleri sırası ile soğuk ve sıcak akışkanları ifade eder.

Isı transfer hızı, $\dot{Q}$ pozitif bir değer olarak alınmaktadır ve yönü termodinamiğin ikinci kanununa uygun olarak sıcak akışkandan soğuk akışkana doğrudur (Çengel, 2011).

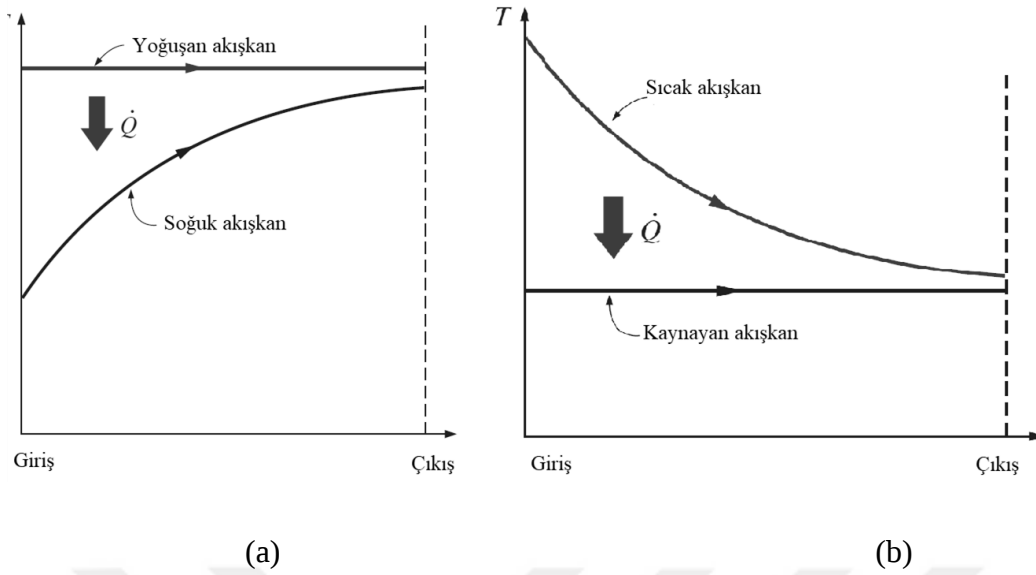


Şekil 3.1. Isı değiştirici sıcaklık değişim grafiği (Çengel, 2011).

Uygulamada geniş olarak kullanılan ısı değiştiricilerin iki özel tipi, evaporatörler ve kondenserlerdir. Bu tip ısı değiştiricilerde bir akışkan faz değiştirir ve ısı transfer hızı,

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg}$$

olarak ifade edilir.



Şekil 3.2. a Yoğuşan bir akışkanın sıcaklık değişim grafiği b Kaynayan bir akışkanın sıcaklık değişim grafiği (Çengel, 2011).

Şekilde görüldüğü gibi, bir akışkan faz değişimi süresince özellikle sabit sıcaklıkta büyük bir miktarda ısı soğurur veya salıverir. Sıcaklık değişimi pratik olarak sıfır olduğundan bir faz değişimi süresince akışkanın ısıl kapasite debisi sonsuza yaklaşmalıdır (Çengel, 2011).

Isı değiştiricilerin çözümlenmesinde kullanılan iki temel yöntem vardır. Bunlar, Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi ve Etkinlik-NTU yöntemidir (Çengel, 2011).

3.2.1. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi

İki akışkan arasında eşdeğer ortalama sıcaklık farkı bağıntısı geliştirmek için bir paralel akışlı çift borulu ısı değiştirici ele alırsak, sıcaklık farkı ısı değiştirici girişinde yüksektir ve çıkışa doğru üstel olarak azalır. Beklendiği gibi ısı değiştirici boyunca sıcak akışkanın sıcaklığı azalır ve soğuk akışkanın sıcaklığı artar fakat ısı değiştirici ne kadar uzun olursa olsun soğuk akışkan hiçbir zaman sıcak akışkanın sıcaklığını aşamaz (Çengel, 2011).

Isı değiştirici dış yüzeyinin ısı transferi sadece iki akışkan arasında olacak şekilde iyi yalıtıldığı kabul edilerek ve kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişimler ihmal edilerek ısı değiştiricinin bir diferansiyel bölgesinde her bir akışkan için enerji dengesi,

$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_h c_{ph} dT_h \quad (3.1)$$

Ve

$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_c c_{pc} dT_c \quad (3.2)$$

Olarak yazılabilir. Yani, ısı değiştiricinin herhangi bir kesitinde sıcak akışkanın ısı kayıp hızı, o kesitte soğuk akışkanın ısı kazanç hızına eşittir. Sıcak akışkanın sıcaklık değişimi bir negatif niceliktir. Yukarıdaki eşitlikler ΔT_h ve ΔT_c için çözülerek,

$$dT_h = \frac{\partial \dot{Q}}{m_h c_{ph}} \quad (3.3)$$

Ve

$$dT_c = \frac{\partial \dot{Q}}{m_c c_{pc}} \quad (3.4)$$

$$dT_c - dT_h = d(T_h - T_c) = \partial \dot{Q} \left(\frac{1}{m_h c_{ph}} + \frac{1}{m_c c_{pc}} \right) \quad (3.5)$$

Isı transfer hızı,

$$\delta \dot{Q} = U(T_h - T_c) dA_s \quad (3.6)$$

Eşitliği ile gösterilir.

$$\frac{d(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} = -U dA_s \left(\frac{1}{m_h c_{ph}} + \frac{1}{m_c c_{pc}} \right) \quad (3.7)$$

Sonuç olarak,

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (3.8)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklem logaritmik ortalama sıcaklık farkını verir (Çengel, 2011).

Karşıt akışlı ısı değıştirciler

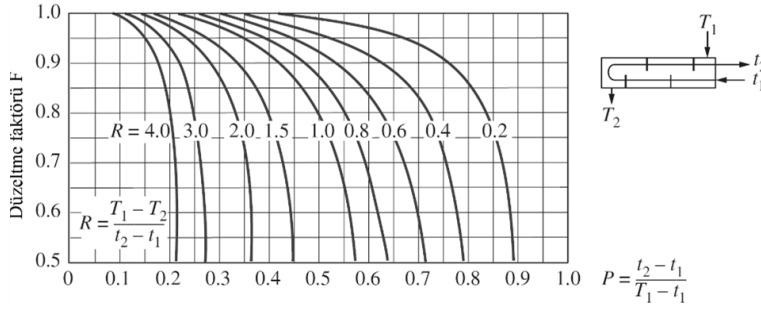
Karşıt akışlı ısı değıştircilerde sıcak akışkan ve soğuk akışkan ısı değıştirciye zıt yönlerden girerler. Bu durumda soğuk akışkanın çıkıştaki sıcaklığı, sıcak akışkanın çıkıştaki sıcaklığını geçebilir.

Çok geçişli ve çapraz akışlı ısı değıştirciler

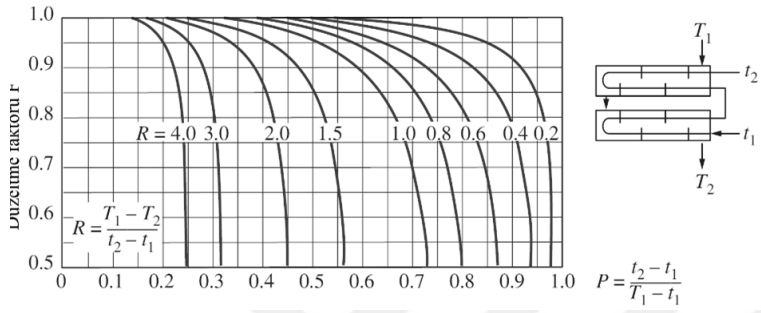
Daha önce elde edilen denklemin çok geçişli ve çapraz akışlı ısı değıştirciler için bir düzeltme faktörü kullanılır.

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \quad (3.10)$$

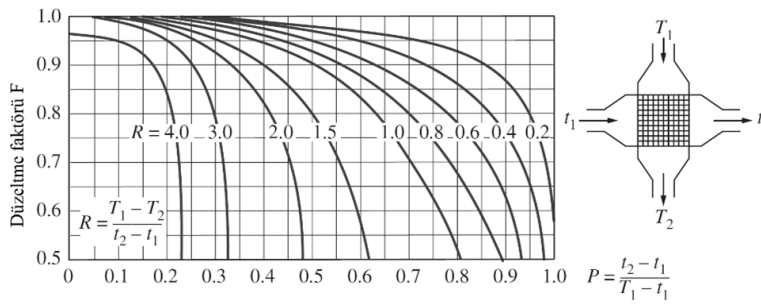
Düzeltilme faktörü, çapraz akışlı ve çok geçişli bir ısı değıştirci için 1'den küçüktür. F=1 değeri karşıt akışlı ısı değıştircidir. Düzeltme faktörleri için tablolar aşağıdadır (Çengel, 2011).



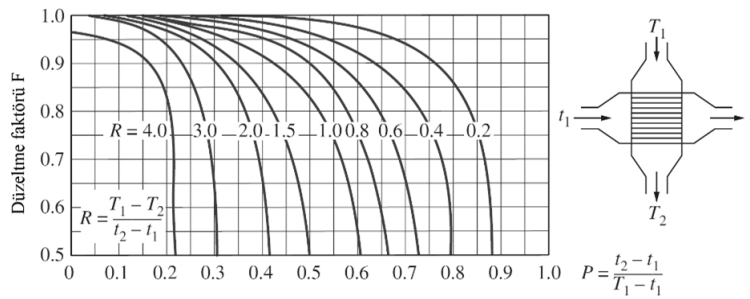
a



b



c



d

Şekil 3.3. Farklı ısı değıştirciler için düzeltme faktörü

a Bir gövde geçişli ve 2, 4, 6, boru geçişli

b İki gövde geçişli 4,8,12 boru geçişli

c İki akışkanı da karışmayan tek geçişli çapraz akış

d Bir akışkanı karışan diğeri karışmayan tek geçişli çapraz akış (Çengel, 2011).

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi ve düzeltme faktörleri kullanılarak termal analizi yapılan ısı değiştiriciler için aşağıdaki varsayımlar yapılabilir,

- a. Isı değiştiricinin tamamında ısı transfer katsayısı sabittir.
- b. Her bir akışkanın entalpisi, sıcaklığın lineer bir fonksiyonu olarak değişir. Tek fazlı bir akışkan için bu akış kapasitesinin sabit olduğu anlamına gelir.
- c. Isı değiştirici ve çevre arasında hiçbir ısı transferi yoktur.
- d. Paralel ve karşıt akışlı ısı değiştiriciler için, sıcaklık ısı değiştiricinin her bölgesi için uniformdur. Çok borulu ısı değiştiriciler için, her boru içerisindeki şartlar aynıdır.
- e. Birden çok geçişli ısı değiştiricilerde her geçişteki ısı transfer alanı aynıdır.
- f. Isı değiştirici içerisinde herhangi bir kimyasal reaksiyon nedeni ile bir ısı üretimi ya da tüketimi yoktur.
- g. Isı değiştiricinin uzunluğu boyunca eksenel ısı transferi yoktur (W.Serth ve G.Lestina, 2014).

Sıcak ve soğuk akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıkları bilindiği veya bir enerji dengesinden elde edilebilir olduğu durumlarda ısı değiştirici çözümlemesinde Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi uygun bir yöntemdir. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı yöntemi ile belirli ısı transferi gereksinimlerini karşılayacak bir ısı değiştirici seçimi için aşağıda verilen basamaklar izlenmelidir.

- a. Uygulama için uygun ısı değiştirici tipi seçilir.
- b. Enerji dengesi kullanılarak, bilinmeyen giriş ve çıkış sıcaklıkları ve ısı transfer hızı hesaplanır.
- c. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ve gerekli ise düzeltme faktörü hesaplanır.
- d. Toplam ısı transfer katsayısı seçilir veya hesaplanır.
- e. Isı transfer yüzey alanı hesaplanır. Bu ısı transfer yüzey alanına eşit veya daha büyük ısı değiştirici hesabı yapılır (Çengel, 2011).

Isı değiştiricinin tipi ve boyutu belirli olduğunda, ısı transfer hızı ve belirli kütleli debiler için sıcak ve soğuk akışkanların çıkış sıcaklıklarının belirlenmesi gereklidir. Bu durumda ısı değiştiricinin ısı transfer yüzey alanı bilinmemekte, ancak akışkanların çıkış sıcaklıkları bilinmemektedir. Bu durumda logaritmik sıcaklık farkı yöntemi, çok sayıda iterasyon gerektireceğinden, bu tip problemlerin çözümü için uygulanması zor olacaktır (Çengel, 2011).

3.2.2. Etkinlik NTU yöntemi

Isı transfer yüzey alanının bilindiği, ancak akışkan çıkış sıcaklıklarının bilinmediği durumlarda kullanılmak üzere, Kays ve London 1955 yılında Etkinlik-NTU yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem ısı transfer etkinliği ε olarak adlandırılan boyutsuz bir parametreye dayanmaktadır. Isı transfer etkinliği ε aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{\text{Gerçek ısı tranfer hızı}}{\text{Olabilecek makimum ısı transfer hızı}} \quad (3.11)$$

Bir ısı değiştiricide gerçek ısı transfer hızı sıcak ve soğuk akışkanlar üzerindeki enerji dengesinden bulunabilir ve

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,çıkış} - T_{c,giriş}) = C_h(T_{h,giriş} - T_{h,çıkış}) \quad (3.12)$$

Olarak yazılabilir. Burada $C_c = \dot{m}_c c_{pc}$ ve $C_h = \dot{m}_h c_{ph}$ sırası ile sıcak ve soğuk akışkanların ısı kapasite hızlarıdır.

Bir ısı değiştiricide olabilecek maksimum ısı transferi ısı değiştiricideki maksimum sıcaklık farkının sıcak ve soğuk akışkanların giriş sıcaklıkları arasındaki fark olacaktır. Yani,

$$\Delta T_{maks.} = T_{h,giriş} - T_{c,giriş} \quad (3.13)$$

Bir ısı değiştiricide, ısı transferi soğuk akışkan, sıcak akışkanın giriş değerine kadar ısıtıldığında veya tam tersi, sıcak akışkan soğuk akışkanın giriş değerine soğutulduğunda maksimum değerdedir. Sıcak ve soğuk akışkanların ısı kapasite hızları C_c ve C_h birbirine eşit olmadığı sürece bu iki koşul aynı anda sağlanamaz. Isıl kapasitesi daha küçük olan akışkanın sıcaklık değişimi daha büyük olacaktır dolayısı ile ısı transferinin durduğu noktada elde edilen sıcaklığa ilk önce erişecektir. Bundan dolayı, bir ısı değiştiricide olabilecek maksimum ısı transfer hızı,

$$\dot{Q}_{maks.} = C_{min.}(\Delta T_{maks.}) \quad (3.14)$$

$\dot{Q}_{maks.}$ ın bulunması için sıcak ve soğuk akışkanların giriş sıcaklıkları ve kütle debilerinin bilinmesi yeterlidir. Bu durumda gerçek ısı transfer hızı,

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{maks.} = \varepsilon C_{min.}(T_{h,giriş} - T_{c,giriş}) \quad (3.15)$$

ifadesi ile bulunabilir. Bu nedenle ısı değiştiricinin etkinliği, akışkanların çıkış sıcaklığının bilinmesine gerek duyulmadan ısı transfer hızının bulunmasını sağlar.

Bir ısı değiştiricinin etkinliği, akış düzenine ve ısı değiştiricinin geometrisine bağlıdır. Bu nedenle farklı tipteki ısı değiştiriciler için etkinlik bağıntıları farklıdır. Bu etkinlik bağıntıları boyutuz bir sayı olan NTU sayısını içerir. NTU, transfer birim sayısı olarak adlandırılır. Isı değiştiricinin toplam ısı transfer katsayısı ve ısı transfer yüzey alanı NTU ile doğru orantılıdır. Bu durumda NTU ne kadar büyük olursa, ısı değiştirici de o kadar büyük olacaktır.

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min.}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}c_p)_{min.}} \quad (3.16)$$

Çizelge 3.1. Farklı tip ısı değiştiriciler için etkinlik bağıntıları

Isı değiştirici tipi	Etkinlik bağıntısı
1 Çift borulu	
Paralel akışlı	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Karşıt akışlı	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 Gövde borulu Bir gövde geçişli, 2,4,... Boru geçişli	$\varepsilon = 2(1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp(-NTU\sqrt{1 + c^2})}{1 - \exp(-NTU\sqrt{1 + c^2})})^{-1}$
3 Çapraz akışlı, tek geçişli Her iki akışkan karışmayan	$\varepsilon = 1 - \exp(\frac{NTU^{0.22}}{c} \exp(-cNTU^{0.78} - 11))$
C_{max} karışan, C_{min} karışmayan	$\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp(1 - c[1 - \exp(-NTU)]))$
C_{min} karışan C_{max} karışmayan	$\varepsilon = 1 - \exp(\frac{1}{c} [1 - \exp(c - NTU)])$
4 C=0 olan tüm ısı değiştiriciler	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Etkinlik bağıntıları aynı zamanda grafiksel olarak da bulunabilir (Çengel, 2011).

3.2.3. P-NTU yöntemi

P-NTU yöntemi, ε -NTU yönteminin bir türevidir. ε -NTU yöntemi C_{min} 'a bağlıdır. Hatalardan kaçınmak amacı ile, ürün tarafının NTU ya bağlı bir fonksiyon olan sıcaklık verimi P değeri ile bir çözüm alternatifi oluşturulmuştur. Bu yöntem daha çok gövde borulu ısı değiştiriciler için kullanılmaktadır.

$$P = \phi(NTU, R) \quad (3.17)$$

Bu yöntemde, toplam ısı transfer katsayısı,

$$\dot{Q} = PC_t(\Delta T) \quad (3.18)$$

olarak ifade edilir.

P termal verim ifadesi olduğundan,

$$P = \frac{T_{c,çıkış} - T_{c,giriş}}{T_{h,giriş} - T_{c,giriş}} \quad (3.19)$$

olarak yazılabilir.

$$P = \frac{C_{min}}{C_t} \quad (3.20)$$

R, akışkanlar arasındaki kapasite oranıdır.

$$R = \frac{C_t}{C_s} \quad (3.21)$$

$$P_s = P \frac{C_t}{C_s} = PR \quad (3.22)$$

$$NTU_t = \frac{UA}{C_t} \quad (3.23)$$

3.2.4. Ψ -P yöntemi

Bu yöntem, Smith tarafından öne sürülmüş, Mueller tarafından düzenlenmiştir. Bu yöntemde, ortalama sıcaklık farkının giriş sıcaklıklarına bölümü ile elde edilmiş yeni bir ψ değeri vardır.

$$\psi = \frac{\Delta T_{maks}}{T_{h,giriş} - T_{c,giriş}} \quad (3.24)$$

ψ , ε ve NTU ile bağıntılı olarak yazılırsa,

$$\psi = \frac{\varepsilon}{NTU} = \frac{P}{NTU_t} \quad (3.25)$$

olur. Isı transfer hızı,

$$\dot{Q} = UA\psi (T_{h,giriş} - T_{c,giriş}) \quad (3.26)$$

olarak hesaplanır.

3.3. Isı Değiştirici Seçimi, Tasarımı ve Optimizasyonu

3.3.1. Isı değiştiricisi seçim parametreleri

Isı transfer hızı

Isı transfer hızı, bir ısı değiştirici için en önemli unsurdur. Bir ısı değiştirici, kütsel debisi belli olan bir akışkanda istenen sıcaklık değişimini sağlayabilecek bir ısı transfer hızına sahip olmalıdır.

Isı değiştirici tipi

Isı değiştiricisi gerektiren bir uygulama için yapılacak en önemli ve en temel seçim, ısı değiştirici tipinin seçilmesidir. Isı değiştirici tipi seçiminde temel kural benzer fonksiyonları yerine getirebilen ve benzer proses koşullarında çalışan, başarısı daha önceden kanıtlanmış

bir ısı değiştirici tipi seçmektir. İkinci aşamada ise, ısı değiştirici için üretim kolaylığı ve toplam maliyeti gelmektedir (Pehlivan, 2002).

Seçilecek ısı değiştirici tipi, öncelikle ısı değiştirici içerisinden geçecek akışkan tipine, boyut ve ağırlık sınırlamalarına ve herhangi bir faz değişimi olup olmadığına bağlıdır. Örneğin, ısı değiştiricinin amacı bir sıvıyı bir gaz ile soğutmak ise, ısı değiştiricinin gaz tarafındaki yüzey alanı sıvı tarafındakinin birkaç katı olmalıdır, öte yandan bir plakalı veya gövde borulu ısı değiştirici bir sıvının başka bir sıvı ile soğutulması için uygundur (engel, 2011).

Isı değiştiricisi malzemesi

Sürekli ve güvenilir kullanım için, ısı değiştiricinin imal edildiği malzemelerin, ısı değiştiricinin kullanım şartlarına uygun olması gereklidir. Servis akışkanının koroziyel özelliklerine dayanabilecek materyalde üretilmelidir. Ayrıca, prosesin gerektirdiği basınç ve sıcaklığa dayanıklı olmalıdır (Thulukkanam, 2013).

Isı değiştiricinin çalışma sıcaklığı ve basıncı

Tasarım basıncı, basına maruz kalan parçaların kalınlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Basınç ne kadar yüksekse, basına maruz kalacak parçaların kalınlığı o kadar artacaktır. Conta plakalı ısı değiştiricilerin basınç dayanımları plaka kalınlığının sınırlı olması ve conta malzemelerinin dayanımlarının sınırlı olmasından dolayı sınırlıdır.

Isı değiştiricinin imal edildiği malzemenin sıcaklık dayanımı operasyon sıcaklığına ve farklı sıcaklık yüklemelerine uygun olmalıdır. Düşük sıcaklıklı ve kriyojenik uygulamalarda, malzeme için sertlik önemli bir kriterdir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında ise, malzemenin sürünme direnci göstermesi gereklidir (Thulukkanam, 2013).

Isı değiştiricilerin tasarım sıcaklık ve basınç değerleri, farklı parametrelerin hesaba katılıp katılmayacağı konusunda da belirleyici olmaktadır. Örneğin, 15 atm. basınç ve 150°C altındaki uygulamalarda, ısıl veya yapısal gerilmelerin ısı değiştirici üzerindeki etkisinin göz önüne alınması gerekli olmayacaktır, ancak 70 atm. basınç ve 550°C üzerindeki sıcaklıklarda, sıcaklık ve basınç kaynaklı kısıtlamaların yansıması, ısıl ve yapısal gerilmeler de göz önüne alınmalıdır (engel, 2011).

Debi

Bir ısı değiştiricide debi, akış alanını belirler. Debi ne kadar yüksek olursa, akış alanı o kadar büyür. Akış alanının artışı, akışkanın ısı değiştirici içerisindeki hızını sınırlamak içindir. Hız ise, basınç dūřümü, erozyon oluşumu ve gövde borulu ısı değiştirici türleri için akış nedenli titreşimin önlemesi amacı ile sınırlanmaktadır (Thulukkanam, 2013).

Basınç dūřümleri

Isı deęiřtirici tasarımında basınç dūřümü önemli bir parametredir. Pompalama maliyetini dūřürmek ve proses sınırlamalarından dolayı basınç dūřümü sınırlandırılabilir. Isı deęiřtirici tasarımı verimsiz basınç dūřümlerini önleyecek řekilde tasarlanmalıdır(Thulukkanam, 2013).

Akışkanların basınç dūřümleri ile kütsel debilerinin en aza indirgenmesi, ısı değiştiricinin işletme maliyetinin dūřmesine neden olurken, boyutunun ve ilk yatırım maliyetini yükseltmektedir. Kütle debisinin iki katına çıkartılması ile, kaba bir hesapla, ilk yatırım maliyeti yarıya iner, ancak işletme maliyeti ise 8 kat artar (Thulukkanam, 2013).

Kirlenme eğilimleri

Kirlenme, ısı değiştirici yüzeylerinde istenmeyen birikintiler oluşmasıdır. Bu birikintiler, akışa bir direnç gösterir ve daha yüksek basınç dūřümüne neden olur. Ayrıca kirlenme oluşumu, ısı değiştiricinin termal performansının da zamanla azalmasına neden olmaktadır. Kirlenme endüstriyel proseslerde enerji tüketimini etkilerken, kirlenmeden dolayı kaybedilen ısı transfer alanını geri kazanmak için ihtiyaç duyulan ekstra ısı transfer alanı nedeni ile malzeme maliyeti de artmaktadır (Thulukkanam, 2013).

Bakım, temizlik, tamir ve kapasite artırımı

Isı değiştiricinin devamlılığının sağlanabilmesi için bakım yapılabilecek özelliklerde olmalıdır. Özellikle gıda, kimyasal ve ilaç sektörlerinde kullanılan ısı değiştiricilerin temizlenebilmesi, temizlendiğinin garanti edilebilmesi gibi nedenlerden dolayı, i parçalarına erişimin kolay olması gerekir. Ayrıca, gelecekte olabilecek kapasite artırımları dūřünülerek, kapasite artırımı için uygun bir eşanjör tipi seçilmelidir. Örneęin, plakalı

contalı ısı değiştiricilerde, kapasite artırımı için plaka eklemek kolayken, borulu ısı değiştiricilerde kapasite artırımı daha zordur (Thulukkanam, 2013).

Maliyet

Bir ısı değiştiricinin iki ana maliyet kalemi vardır: üretim maliyeti ve bakım maliyetlerini de içinde barındıran işletme maliyeti. Genel olarak, ısı değiştiricinin ısı transfer yüzey alanı ne kadar küçük, tasarımı ne kadar basit olursa, üretim maliyeti o kadar düşük olur. Bakım maliyetleri ise, pompalama maliyetleri, korozyondan dolayı oluşan yedek parça ihtiyaçları ve kirlenme önleyici bakımların maliyetleri toplamıdır (Thulukkanam, 2013).

Özet olarak, ısı değiştiricilerin aşağıdaki özelliklere sahip olması gereklidir.

- a. Yüksek termal verim
- b. Düşük basınç düşümü
- c. Güvenilirlik ve uzun ömür
- d. Kaliteli ürün ve güvenli operasyon
- e. Proses akışkanlarına uygun malzemeler
- f. Küçük boyut, kolay montaj
- g. Kolay servis ve bakım
- h. Olabildiğince hafif ama sağlam tasarım
- i. Üretim kolaylığı
- j. Düşük maliyet

4. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ

Direkt buhar enjeksiyon sistemi, hiçbir dış güç kaynağı ya da mekanik etkiye ihtiyaç duymadan çalışan bir ısı değiştiricisi türüdür. Direkt kontak kondenzasyon mantığı ile buhar ve sıvı arasında ısı transferi sağlar. Bir gövde borulu ısı değiştiriciden 1000 kat daha iyi ısı transfer performansına sahiptir (Miwa vd., 2017).

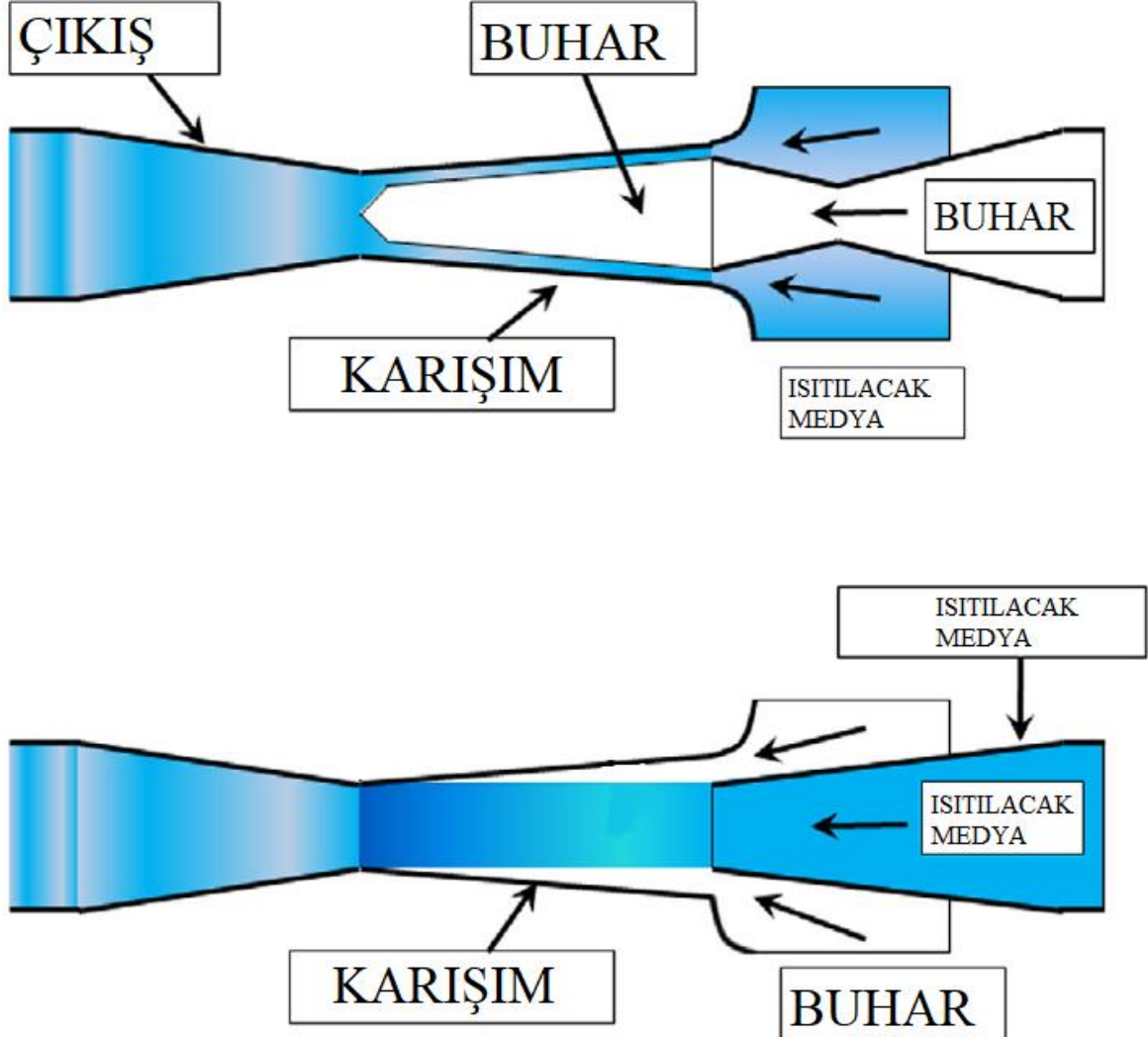
Direkt buhar enjeksiyon sistemleri, çoğunlukla plastik sektörü ve gıda proseslerinde kullanılmaktadır. Mikroorganizmaları öldürme ve enzim inaktivasyonunda da yer almaktadır (Morgan ve Carlson, 1960).

Direkt buhar enjeksiyon sistemlerinde buhar direkt olarak ısıtılacak sıvı içerisinde karıştırılır. Bu sistemler buhar enerjisini aktarmak için kullanılan efektif cihazlardır. Atmosfere ısı kaybı neredeyse sıfır olacak şekilde hızlı ısı transferi sağlarlar. Direkt buhar enjeksiyon sistemi bir mach difüzeri ile buharı dağıtan bir nozzle'a sahiptir. Yüksek hızlı buhar, buhar difüzyon nozzlelarından geçerek ısıtıcı içerisindeki borudan geçen yüksek hızlı aksenal akışa sahip sıvı ile karışır (Cinacotta ve Fisher, 2000).

Direkt buhar enjeksiyon sistemi, jet pompaları ile benzer bir fiziksel yapıya sahiptir. Direkt buhar enjektörü, buhar ve sıvı giriş nozzleları ve yön değiştirme ve karışım nozzlelarından oluşur. Bu nozzleların sıralama ve yönleri farklı olabilir, bazı buhar enjektörlerinde buhar ortada iken, bazılarında ısıtılacak medya ortadadır. Buhar nozzleları buharı ısıtılacak medyadan ayıran ve buharın karışım nozzle'ına taşınmasını sağlayan bölümdür. Medya nozzleları ısıtılacak medyanın buhar enjektörüne girdiği kısımdır. Karışım nozzleları ise direkt buhar enjektörünün en önemli parçalarındandır. Buharın direkt kontak kondenzasyonu ve ısıtılacak medya ile buhar arasındaki ısı transferi bu bölmede gerçekleşmektedir. Bu bölmede aynı zamanda kondense dönüştürülemeyen gaz ve fazla sıvıların atılması için bir taşkan bulunmaktadır. Bu taşkan, rejime alma anında havanın atılması için gereklidir. Ancak ısı transfer performansını kayda değer bir şekilde etkilemektedir (Miwa vd., 2017).

Direkt buhar enjeksiyon sistemleri verimli ve efektif çalışmasına rağmen, bazı uygulamalarda, buharın sıvı içerisinde büyük buhar baloncukları oluşturulması ile, yüksek titreşimlere neden olabilmektedirler. Bazı sistemlerde ayarlanabilir bir kapak ile buharın

içerisinden geçtiği difüzyon nozzleları kapatılarak sıvı içerisine girecek buhar miktarı ayarlanabilmektedir. Bu sistemde buhar basıncı ve debisi sabittir ve dışarıdan değiştirilmez. Bu sistemin avantajı, buhar-sıvı karışımı içerisinde büyük buhar baloncukları oluşmasını engeller (Cinacotta ve Fisher, 2000).



Resim 4.1. Direkt buhar enjeksiyon sistemi için şemalar, yukarı buhar merkezli, aşağı ürün merkezli. (Miwa vd., 2017).

4.1. Direkt Buhar Enjeksiyonu Sisteminin Gıda Uygulamalarında Kullanımı

Gıda sektöründe, ürün pastörizasyon sıcaklıkları yeni ürünler oluştuğunda yükselmiştir ve daha kısa sürelerde soğutma ihtiyacı duyulmuştur. Sıcaklıkların yükselip, sürelerin kısalması ile ultra yüksek sıcaklık uygulamaları (ultra-high-temperature, UHT) devreye girmektedir. UHT pastörizasyon uygulamalarında, ürün sıcaklığının hızlı bir şekilde istenilen sıcaklığa ulaşmasına ihtiyaç vardır ve bu ihtiyaç canlı buharın sürekli olarak ürün içine enjeksiyonu ile sağlanabilir (Peterson ve Jordan, 1963).

Meyve suyu, meyve ve sebze püreleri, süt gibi ürünler için pastörizasyon, sterilizasyon, enzim inaktivasyonu ve deodorizasyon (koku alma) gibi işlemler için direkt buhar enjeksiyonu ile sağlanabilir. Evaporatör uygulamalarında ürünü evaporatör öncesinde yüksek sıcaklıklara getirmek için de direkt buhar enjeksiyonu kullanılabilir (Lazar ve Smith, 1962)

Direkt buhar enjeksiyonu, sıvı gıda ürünlerinin yanı sıra, yüksek yoğunluklu ve yüksek viskoziteli püre benzeri ürünlerin ısıtılması için de kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda genellikle gıda proseslerinde kullanılan plakalı ve borulu eşanjörlerin kullanılması daha zordur. Plakalı eşanjörlerde özellikle katı parçacıklı ürünler tıkanmalara neden olurken, borulu eşanjörler de eşanjör içinde üretim sonunda kalan ürün miktarı daha fazladır. Direkt buhar enjeksiyonu bu avantajların yanı sıra, ürün yanmasını, yapışmasını ve karamelizasyonunu da engellemektedir. Bu avantaj son ürünün daha yüksek kaliteli olmasını sağlar. karamelizasyon ve yanmalar ürünün renk, koku ve tadında değişikliklere neden olmaktadır (Lazar ve Smith, 1962).

Direkt buhar enjeksiyonu bir gıda ürününün ısıtılması için kullanıldığında son ürün içerisine enjekte edilecek buhardan dolayı oluşacak ekstra su final ürün katı madde oranının tutturulması için dikkate alınmalıdır. Ürün içerisine enjekte edilen buhar, kondense dönüşür ve kondens son ürün içerisine karışır. Bu su miktarı buharın kütleli debisi hesaplanarak bulunabilir. Son üründe bulunan su miktarının istenilenden fazla olmaması için, direkt buhar enjeksiyonu ile ürün içerisine karıştırılacak su miktarı hesaplanmalı ve UHT öncesi ürün su oranı buna göre ayarlanmalıdır (Peterson ve Jordan, 1963).



5. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI

5.1. Ürün Özellikleri

Direkt buhar enjeksiyon sistemini iki farklı ürün ile çalışabilecek şekilde tasarlanacaktır.

İlk ve ana ürün olarak sütlaç (pirinçli puding) seçilmiştir. Pişirilmesi için 122 °C sıcaklığa ısıtılması gereken bu ürün, içerisinde pirinç tanecikleri, nişasta ve şeker barındırması nedeni ile standart ısı değiştiriciler ve kazanlarda yapılması ürün yapısının, renginin ve tadının istenen şekilde olmasını zorlaştırmaktadır. Direkt buhar enjeksiyon sistemi ile ürünün daha az yanma ve yapışmaya maruz kalması ile, bölgesel sıcaklık artışlarının önlenmesi ve daha homojen bir ısınma gerçekleşmesi hedeflenmektedir.

Endüstriyel üretim sürecinden geçen sütlaç, taze ya da rekombine süt, şeker, önceden pişirilmiş pirinç, jelatinize edilmiş pirinç nişastası, koruyucular ve çeşitli katkı maddelerinin karıştırılıp pişirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu karışım borulu, plakalı eşanjörler veya ısıtma kazanları içerisinde pişirilebilir.

Çizelge 5.1. Sütlaç içeriği

İçindekiler	% Oran
Taze/rekombine süt	84,1
Şeker	7,5
Piştirilmiş pirinç	6,0
Nişasta	2,2
Tuz	0,190
Koruyucular	0,048
Aroma vericiler	0,012

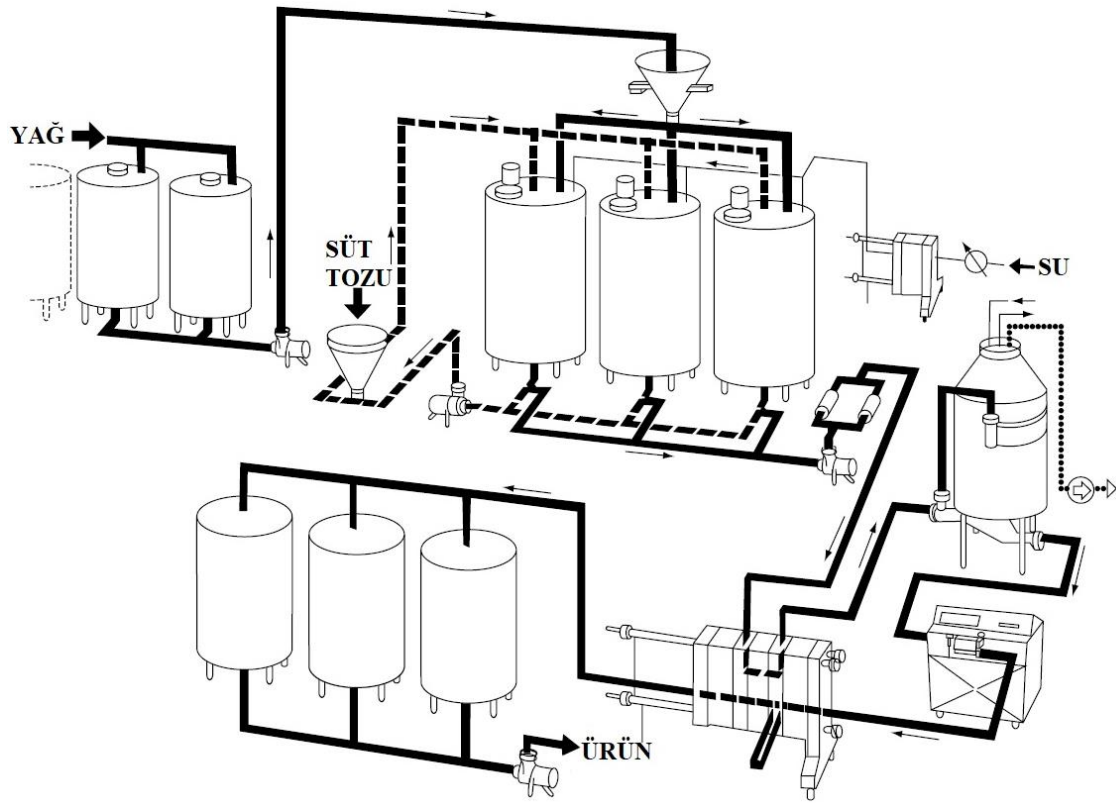
İkinci ürün ise rekombine süt olarak düşünülmüştür. Rekombine süt, süt ve süt ürünleri kullanılarak üretilen hammaddelerin (yağlı süt tozu, yağsız süt tozu, süt kreması tuzsuz tereyağı) su ile birleştirilmesi ile elde edilir. Sonuç olarak yüksek kalitede ve besleyici süt ürünleri elde edilmektedir. Bu ürünler taze çiğ süt üretimin olmadığı ya da zor olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Sütün soğutulup soğuk olarak taşınmadığı bölgelerde süt tozu, tereyağı gibi ürünler ile taşıma kolaylaştırılır. Süt tozu ile suyun karıştırılması ve gerektiğinde süt yağı ilavesi ile elde edilen rekombine süt, içme sütü, yoğurt, çeşitli yumuşak

ve sert peynirlerin yapımı, hazır kek, bisküvi üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dünyanın bazı kısımlarında maliyetlerin düşürülmesi için, bitkisel kaynaklı yağlar gibi katkı maddeleri de kullanılarak meyve suyu karışımları, proteinli içecekler, bebek mamaları gibi ürünlerde de rekombine süt kullanılmaktadır (Tong, 2011).

Çizelge 5.2. Rekombine süt formülasyonu (Tong, 2011).

İçindekiler	Ürün formülasyonu (kg t ⁻¹)	
	Rekombine süt	
Yağsız süt tozu	80.5	85
Yayık altı sütü	9.7	
Susuz süt yağı	33.3	35
Su	876.4	880
Karajenan		
Emülgatörler		
Sükroz		
Laktoz		

Rekombine süt işleme prosesleri, süt tozu ve katkı maddelerinin belirli bir reçeteye göre karıştırılması ile başlar, ısıtma işlemi, homojenizasyon ve paketlenme ile son bulur. Bu süreçte yapılan işlemler üretilen ürünlere göre birden fazla kez gerçekleştirilebilir ve değişebilir.



Şekil 5.1. Bir rekombine süt işleme tesisinin proses diyagramı (Tong, 2011).

5.1.1. Rekombine sütün fiziksel özellikleri

Yoğunluk

Süt ve süt ürünlerinin yoğunluğunun bilinmesi, kütleli debi ve hacimsel debi hesapları, yaklaşık katı madde oranının hesaplanması, kinematik viskozite hesabı gibi diğer fiziksel özelliklerin hesaplanmasını sağlamaktadır. Bir süt ürününün yoğunluğu, ölçüm anındaki sıcaklığına, ölçüm öncesindeki sıcaklık geçmişine (ısı işleme geçmişine), ürünün içeriğine (özellikle yağ oranı), ihtiva ettiği hava miktarına bağlı bir değerdir. Süt için tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğu takdirde yoğunluk değeri 1027 kg.m^{-3} ile 1033 kg.m^{-3} aralığındadır (Hlaváč ve Božiková, 2011).

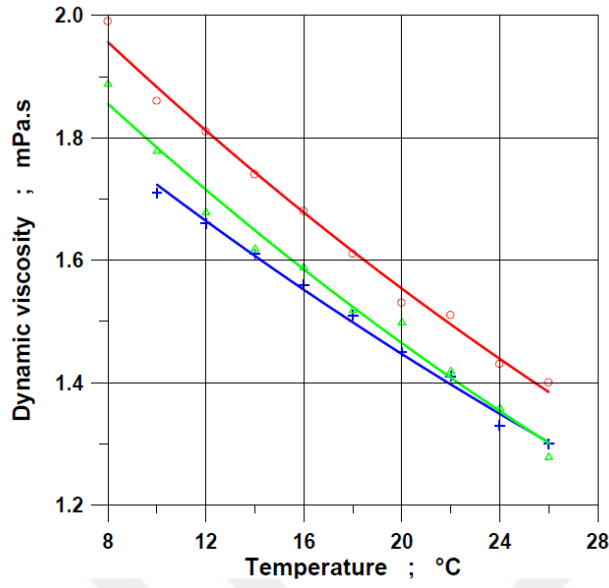
Çizelge 5.3. Farklı sıcaklıklarda süt ve süt ürünlerinin yoğunluk değerleri (Hlaváč ve Božiková, 2011).

Ürün	Sıcaklık(°C)			
	4,4	10	20	38,9
	Farklı sıcaklıklarda süt ürünlerinin yoğunluk değerleri (kg.m ⁻³)			
Taze süt	1035	1033	1030	1023
Homojenize süt	1033	1032	1029	1022
Yağsız süt	1036	1035	1033	1026
Light Krema	1021	1018	1012	1000
Krema	1008	1005	994	978

Viskozite

Süt ürünlerinin viskozitesi ısı ve kütle transferi hesapları, akış şartlarının belirlenmesi, kremalaşma oranının belirlenmesi gibi işlemler için gereklidir. Süt ve yağsız süt Newtonian akışkanlardır. Bu akışkanlarda viskozite, kesme hızı (shear rate) ile bağımlı değildir. Viskozite, pH ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Daha düşük sıcaklıklarda kasein kümelerinin hacimlerinin artması nedeni ile viskozite de yükselir. Ancak 65°C üzeri sıcaklıklara protein denatürasyonu nedeni ile viskozite artmaktadır. Ph artışları ve azalmalarında da kasein kümelerinin hacminde gerçekleşen atış nedeni ile viskozite yükselmektedir (Hlaváč ve Božiková, 2011).

Soğutulmuş çiğ süt, diğer süt çeşitlerine göre farklı olarak non-newtonian bir davranış gösterir ve kesme kuvveti ile viskozitesi değişir. Bunun nedeni, kesme kuvveti uygulanan sütün içerisindeki yağ globüllerinin parsiyel olarak birleşmesi (parsiyel yayıklama) nedeni ile viskozite değişkenlik gösterebilmektedir (Hlaváč ve Božiková, 2011).



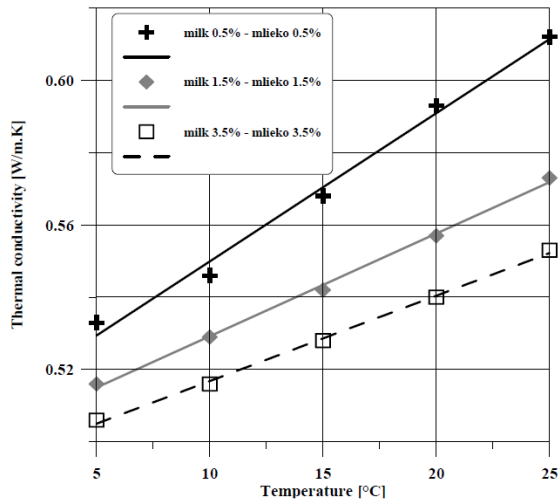
Şekil 5.2. %0,5, (+ mavi) %1,5 (Δ yeşil) ve %3,5 (o-kırmızı) yağ içeriğine sahip süt için dinamik viskozitenin sıcaklık ile değişim grafiği (Hlaváč ve Božiková, 2011).

Termal iletkenlik (λ)

Termal iletkenlik bir maddenin temeline dayalı bir değer olup, o maddenin ısı iletebilme yetisi ile ilgilidir. Termal iletkenlik, Fourier in yasası ile çözülebilir,

$$\vec{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (5.1)$$

Termal iletkenlik değerinin birimi W/mK dir.



Şekil 5.3. %0,5 yağlı, %1,5 yağlı ve %3,5 yağlı süt için sıcaklık- termal iletkenlik grafiği (Hlaváč ve Božiková, 2011).

Spesifik ısı

Bir ürünün spesifik ısısı, bir maddenin bir kg'lık örneğinin sıcaklığını 1 K arttırmak için ihtiyaç duyulan ısı miktarına tekabül eder. Sıcaklık ve ısı transferi analizleri için oldukça önemlidir.

Sütün farklı sıcaklıklarda spesifik ısıları, Alfa Laval Anytime isimli programdan alınmıştır. Aynı zamanda, termal iletkenlik, yoğunluk ve viskozite değerleri de bulunmaktadır.

Çizelge 5.4. Rekombine süt için farklı sıcaklıklarda viskozite, spesifik ısı, termal iletkenlik ve yoğunluğu gösteren tablo (Alfa Laval).

Sıcaklık	Viskozite	Spesifik ısı	Termal iletkenlik	Yoğunluk
°C	cP	kJ/(kg·K)	W/(m·K)	kg/m³
-1,0	3,565	3,976	0,5314	1.017,0
27,0	1,47	3,976	0,5676	1.005,0
55,0	0,7767	3,976	0,5927	993,5
83,0	0,4801	3,976	0,6103	981,7
111,0	0,3298	3,976	0,6241	969,9
139,0	0,2439	3,976	0,6379	958,1

Riskli sıcaklık limiti

Bu limit, ürünün içerisinde bulunan doğal şeker, yağ globülleri ve proteinlerin denatüre olma sıcaklığıdır. Bu sıcaklık ürünün işleme koşullarına göre değişmektedir. Örneğin pastörize süt üretimi için bu sıcaklık 110°C iken, UHT sterilizasyon işlemlerinde bu sıcaklık 145°C ye kadar çıkabilmektedir.

5.1.2. Sütlacın fiziksel özellikleri

Yoğunluk

Ürün yoğunluğu alfa lava Anytime isimli paket programın verileri kullanılarak elde edilmiştir.

Programa göre ürün yoğunluğu: 1,080 kg/m³ tür.

Viskozite

Viskozite, Alfa Laval Anytime isimli programdan alınmıştır.

Programa göre, sütlacın durağan haldeki viskozitesi: 50000cP

Akış halindeki viskozitesi ise 214,0 cP dir.

Termal iletkenlik

Sütlaç için termal iletkenlik, yoğunlukta olduğu gibi, içerisindeki protein, yağ, su, karbonhidratlar, lif ve külün termal iletkenliği kullanılarak elde edilmiş sıcaklığa bağlı bir denklem ile hesaplanacaktır (Kadam ve Datta, 2015).

$$C_{pf} = -6 * 10^{-6}T^2 + 0,0015T + 0,5061 \text{ W/mK} \text{ (Kadam ve Datta, 2015).}$$

Termal iletkenlik, tasarım tamamlandıktan sonra ürün sıcaklığına göre, hesaplanacaktır.

Spesifik ısı

Sütlaç için spesifik ısı, yoğunlukta ve termal iletkenlikte olduğu gibi, içerisindeki protein, yağ, su, karbonhidratlar, lif ve külün spesifik ısıları kullanılarak elde edilmiş sıcaklığa bağlı bir denklem ile hesaplanacaktır (Kadam ve Datta, 2015).

$$C_{pf} = 4 * 10^{-6}T^2 + 0,0002T + 3,7435 \text{ kJ/kgK (Kadam ve Datta, 2015).}$$

Bu değerler ürün sıcaklığına göre hesaplanacaktır.

Riskli sıcaklık limiti

Sütlaç için literatürde bir riskli sıcaklık limiti belirlenmemiştir. Bu çalışma özelinde, sütlaç için proses sıcaklığı 122°C olacağından, bu sıcaklık değerinin 10°C yukarısında bulunan 132°C riskli sıcaklık limiti olarak seçilmiştir. Bu sıcaklık, süt için riskli sıcaklık limitinin altındadır. Böylece ürün karışımı içerisinde kütleli olarak en yüksek miktara sahip olan sütün güvenliği sağlanacaktır.

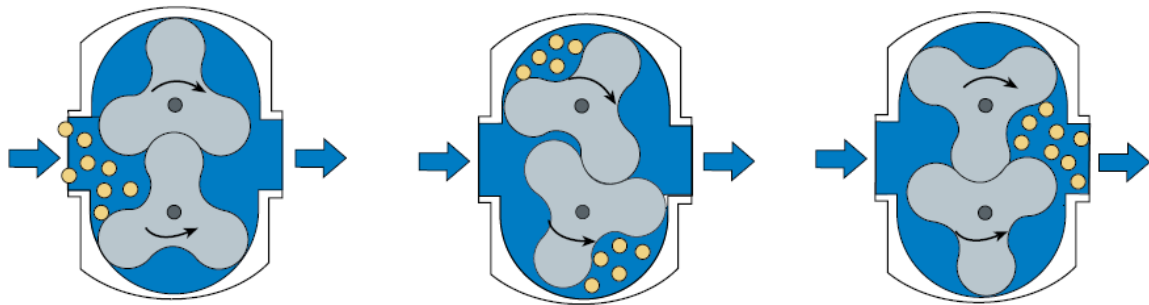
5.2. Direkt Buhar Enjeksiyon Sistemi Proses ve Enstrüman Diyagramı

Sistem çalışmasının daha kolay anlaşılabilmesi için bu bölümde, sisteme ait bir proses ve enstrüman diyagramı tasarlanacaktır.

Ürünün direkt buhar enjeksiyon sistemine giriş ve çıkışları arasındaki sıcaklık farkının yüksek olmaması ve ürünün sterilizasyon öncesinde homojenize edilebilme opsiyonunun bulunması için, ürüne ön ısıtma yapılmalıdır. Ürüne yapılacak ön ısıtma için kullanılacak eşanjörler, iki ürün arasındaki viskozite farkının yüksek olması nedeni ile borulu tip seçilmiştir. Ürün ön ısıtma sıcaklığı olarak 90°C seçilmiştir. Bu sıcaklığın seçilme nedeni, sistemin direkt buhar enjeksiyon sistemi devre dışı bırakıldığında, pastörize ürün yapmaya uygun olması gerekliliğidir. Sisteme beslenen süt, direkt buhar enjeksiyon sistemine ait buhar vanaları kapatılarak, pastörize ürün, direkt buhar enjeksiyon sistemine ait vanalar açılarak ise sterilize/UHT ürün yapılabilir. Ürün yapılabilmektedir.

Sisteme ürün girişinde, ısı değiştiricilerde meydana gelen basınç kaybını yenmek ve ürün akışını sağlamak için ürün pompası olmalıdır. Ürün pompası iki ürün için farklı olacaktır.

Süt için bir adet hijyenik santrifüj pompa kullanılacaktır. Ancak sütlaç için bu pompanın kullanılması, yüksek devirde ürünün çırpılması ve yapısının bozulması, pompa fanı ve gövdesi arasındaki küçük açıklıkta pirincin kırılacak olması ve kırılmayan pirinçlerin pompayı tıkkama olasılığı nedeni ile pozitif deplasmanlı (lobe) bir pompa kullanılacaktır. Pozitif deplasmanlı pompalar bir ürünün yerini değiştirmeye yarar. Santrifüj pompalara göre çok daha düşük devirlerde çalışırlar. Ürün aktarmak için kullanılan bölümleri santrifüj pompalara göre çok daha geniştir. Sütlaç için bu özellikleri açısından santrifüj pompalara çok daha uygun olan pozitif deplasmanlı pompaların, en önemli dezavantajı, düşük devirde çalıştıkları ve ürün aktarma bölmeleri çok daha büyük olduğundan, düşük viskoziteye sahip ürünlerde (süt, su gibi) pompa aktarma bölmesine giren ürünün, çıkışa ulaşmadan ürün aktarma bölgesinden ürün girişine doğru çıkmasıdır. Buna geri kaçırma denir. Düşük viskoziteye sahip ürünlerde geri kaçırma, ürünün pompa ürün basma hattına gidemeden, ürün giriş hattına dönmesine ve aynı ürünün pompa içerisinde defalarca kez çevrilmesine neden olur. Bu nedenlerden dolayı bir adet pozitif deplasmanlı pompa ve bir adet santrifüj pompanın paralel olarak bağlanıp, su ve süt için santrifüj, sütlaç için pozitif deplasmanlı pompanın kullanılması uygun görülmüştür.



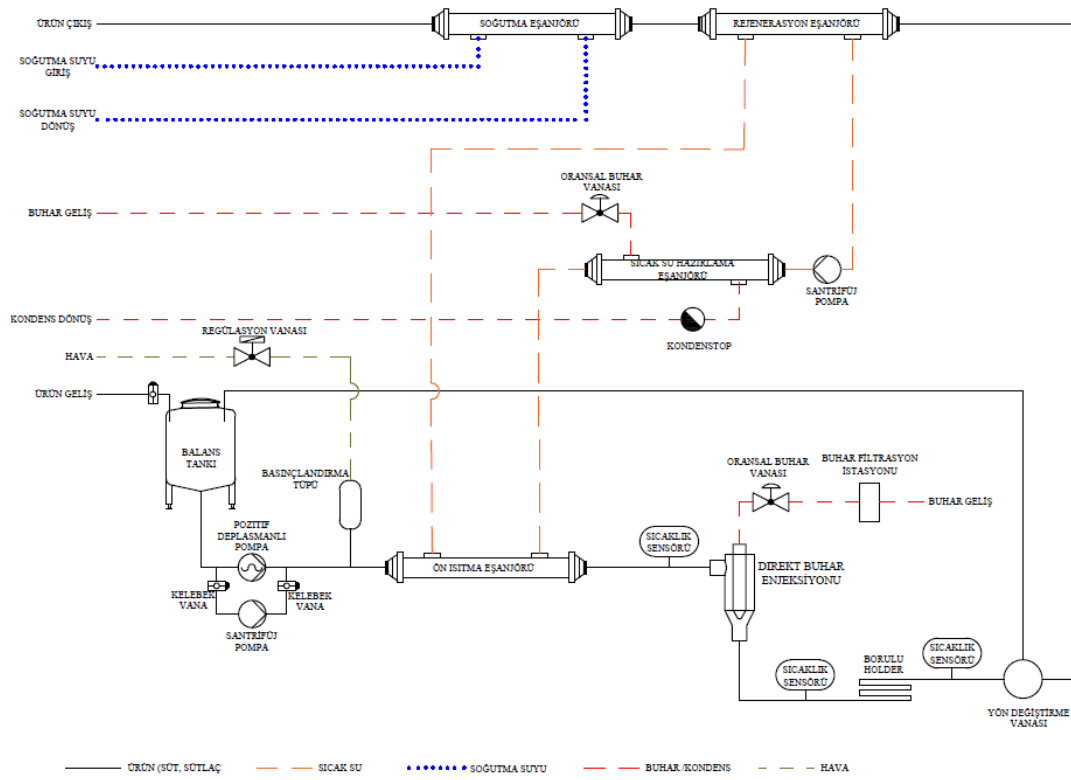
Resim 5.1. Pozitif deplasmanlı pompaların çalışma prensibi (TetraPak, 1995).

Direkt buhar enjeksiyon sisteminden çıkan ürün, sütlaç için 122 °C sıcaklıkta 360 saniye, sterilize süt için ise 140°C sıcaklıkta 3 saniye bekletilecektir. Bu bekleme sonrasında ürünler borulu soğutma eşanjörleri ile soğutulacak ve doluma hazır hale gelecektir. Sistemde ürün güvenliği için direkt buhar enjeksiyon sistemi girişinde, çıkışında ve holder borusunun çıkışında sıcaklık transmitterleri eklenmiştir. Eğer ürün sıcaklığı herhangi bir noktada istenen değerden düşük ise, sterilize olmamış ürünün sterilize ürün ile karışmasını önlemek için sterilize olmamış ürünü geri gönderecek bir yön değiştirme vanası eklenmiştir.

Sistemin borulu ısı değiştirici kısmında, ısıtma akışkanı olarak sıcak su kullanılacak, bu sıcak su, bir sıcak su hazırlama sistemi yardımı ile elde edilecektir. Sıcak su hazırlama sistemi kendi içinde sirkülasyon yapacak ve buhar ile suyun ısıtılabilmesi için bir eşanjör kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemde ürünün buhar yerine sıcak su ile ısıtılmasının amacı, ürün ile ısıtma akışkanının arasındaki sıcaklık farkını düşürmektir. Sıcaklık farkının düşmesi ile ürünün borulu eşanjör içerisinden geçerken, eşanjör yüzeyinin yüksek sıcaklıklı buhar nedeni ile ısınıp yüzeyde ürünün yanmasını önlenmektedir.

Direkt buhar enjeksiyon sisteminde ürün sıcaklıkları ürünün içerisinde bulunan en temel bileşen olan suyun kaynama sıcaklığından yüksek olduğu için ürünün basınçlandırılması gerekmektedir. Ürün basıncını kaynama sıcaklığını işlem sıcaklığının üzerine çıkartacak kadar yükseltmek için bir basınçlandırma tüpü eklenmiştir. Bu basınçlandırma tüpü, ürün hattından alınan bir bransman ile hatta bağlanır ve ürünün bir kısmının sürekli olarak içerisinde bulunan hazneye dolması sağlanır. Yukarıdan verilen yüksek basınçlı hava ile ürün basıncının yükseltilir. Ürün atmosfere açık olmadığı için, basıncı ve kaynama noktası yükselecektir.

Direkt buhar enjeksiyon sisteminin iç tasarımı bir sonraki bölümlerde detaylı olarak yapılacaktır. Sisteme verilecek olan buhar ürün ile karışacağından dolayı, kazandan temiz buhar olarak gelmeli, ya da direkt buhar enjeksiyon sisteminin girişinde bir buhar filtreleme istasyonu olmalıdır. Bu sistemde buhar filtreleme istasyonu kullanılacaktır.



Şekil 5.4. Direkt buhar enjeksiyon sisteminin içerisinde bulunduğu sistemin proses ve enstrüman diyagramı

5.3. Sistem Tasarım Parametreleri ve Parametre Hesaplamaları

Ürünler: sütlaç ve rekombine süt

Ürün debisi: 750 kg/sa. sütlaç, 1000l/sa. rekombine süt

Ürün debi seçimi, gelecekte prototip imalatı yapılabilmesi açısından kullanılabilir en küçük debi seçilmiştir. (Sütlaç viskozitesi daha yüksek olan bir ürün olduğu için aynı sistemde rekombine süte göre daha az debide üretilebilir.)

Gıda proses hatlarında kullanılması gereken idea akış hızı için 1,8 m/s dir (TetraPak, 1995).

Ürün debisi ve ideal akış hızı ile ürün için ideal boru çapı seçilebilir. Boru çapı gıda borularına genel olarak kullanılan standartta, yani DIN 11850 standardında seçilmelidir. Bu standartta ideal boru çapı DN25 olarak seçilmiştir. DIN11850 standardına göre, DN25 borunun iç çapı 25mm dış çapı ise 28 mm'dir.

Ürün sıcaklık programı

Her iki ürün için sıcaklık programları ve proses parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.5. Rekombine süt ve sütlaç için proses parametreleri

Ürün işleme adımı	Rekombine süt	Sütlaç
Ürün debisi	1000 l/sa.	750 kg/sa.
Ürün karışım sıcaklığı (°C)	20	20
Ön ısıtma çıkış sıcaklığı (°C)	90	82
Direkt buhar enjeksiyonu sonrası sıcaklık (°C)	140	122
Holder süresi (saniye)	4	360
Sistem ürün çıkış sıcaklığı (°C)	4	20

Ürün basıncı

Ürünlerin final sıcaklıkları içerlerinde ihtiva ettikleri suyun kaynama sıcaklığından yüksek olduğu için, ürünler bu sıcaklığa yükseltilirken atmosfer basıncında ürün içerisindeki suyun tamamı kaynayacak ve buharlaşacaktır. Bunu önlemek için ürün basınçları, kaynama noktası ürün sıcaklığının üzerine çıkacak şekilde yükseltilmelidir. Ürün sıcaklıkları sütlaç için 122°C ve rekombine süt için 140°C olduğundan, bu sıcaklık değerleri için doymuş su-sıcaklık tablosuna bakılmalıdır.

Çizelge 5.6. Doymuş su-sıcaklık tablosu (Çengel ve Boles, 2008 s: 890)

Sıcaklık (°C)	Doyma basıncı kPA
115	169,18
120	198,67
122	212,10
125	232,23
130	270,28
135	313,22
140	361,53
145	415,68
150	476,16

Sütlaç ve süt için kritik olan basınç değerleri yukarıdaki tabloda koyu renkli olarak çerçevelenmiştir. Ürün soğutma ünitesine gelene kadar bu basınç değerlerinin üzerinde tutulmalıdır. Direkt buhar enjeksiyonu çıkışında yaklaşık olarak 0,5 bar basınç kaybı olacağı

öngörülerek direk buhar enjeksiyonuna giren ürünlerin basınçlarına karar verilebilir. Sütlaç için, ürün basıncı 3 bar seçilmiştir. Rekombine süt için ise, ürün basıncı 4,5 bar seçilmiştir.

Buhar özellikleri

Isıtma için kullanılacak buharın basıncı, buhar hattı içerisine ürün kaçmasını önleyecek basınçta olmalıdır. Ürün basıncı 4,5 bar olarak belirlendiğine göre, buhar basıncı 4,5 barın üzerinde olmalıdır. Aynı zamanda buhar sıcaklığı, o basınçta ürün sıcaklığından yüksek olmalıdır. İki üründen yüksek sıcaklıkta işlenecek olanı süt olduğundan dolayı, buhar sıcaklığının 140°C den yüksek olması gereklidir. Buhar hali hazırda çalışan gıda tesislerinde çoğunlukla doymuş buhar olarak mevcut olduğundan, kızgın buhar seçilmemiştir.

Doymuş su-Basınç tabloları incelendiğinde, direkt buhar enjeksiyon sistemine verilmesi gereken minimum buhar basıncı değeri 5 bar olarak görülmektedir. Ancak bu değer, emniyet katsayıları olmadan hesaplanmış bir değer olduğundan emniyet için 6 bar seçilmiştir.

Çizelge 5.7. 6 bar buharın termodinamik özellikleri (Çengel ve Boles, 2008).

Basınç (bar)	Doyma sıcaklığı (°C)	Buharlaşma entalpisi (kJ/kg)	Buharlaşma entalpisi (kcal/kg)
6	158,83	2085,8	499

Buhar debisi hesabı

Buhar debisi hesabı, her iki ürün için ayrı ayrı yapılacaktır. Ürünlerin istenilen sıcaklığa ısıtılabilmesi için gerekli enerji bulunarak buhar debisi elde edilecektir. Enerjinin korunumu kanunu yardımı ile çözümleme yapılacaktır. Buhar debisi analizler için bir başlangıç değeri olarak kullanılacağından, hesaplamalar adyabatik şartlar için yapılacaktır. Kayıplar önemsizdir.

$$E_{buhar} = E_{ürün} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{buhar} h_{buhar} = \dot{m}_{ürün} h_{ürün} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{buhar} h_{buhar} = \dot{m}_{ürün} C_{p,ürün} \Delta T_{ürün} \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_{buhar} = \frac{\dot{m}_{ürün} C_{p,ürün} \Delta T_{ürün}}{h_{buhar}} \quad (5.5)$$

Sütlaç için

$$\dot{m}_{buhar \text{ sütlaç}} = \frac{\dot{m}_{sütlaç} C_{p,sütlaç} \Delta T_{sütlaç}}{h_{buhar}} \quad (5.6)$$

$$\dot{m}_{sütlaç} = 750 \text{ kg/sa}$$

$$C_{pf} = 4 * 10^{-6} T^2 + 0,0002T + 3,7435 \text{ kJ/kgK (Kadam ve Datta, 2015).} \quad (5.7)$$

$$C_{p,sütlaç} = 4 * -6T^2 + 0,0002T + 3,7435 \text{ kJ/kgK}$$

T=90 ° için,

$$C_{p,sütlaç} = 3,7939 \text{ kJ/kgK}$$

$$\Delta T_{sütlaç} = T_{sütlaç \text{ çıkış}} - T_{sütlaç \text{ giriş}}$$

$$\Delta T_{sütlaç} = 122 - 82$$

$$\Delta T_{sütlaç} = 40$$

$$\dot{m}_{buhar \text{ sütlaç}} = \frac{750 \times 3,7939 \times 40}{2085,8}$$

$$\dot{m}_{buhar \text{ sütlaç}} = 54,57 \text{ kg/sa}$$

Rekombine süt için

$$\dot{m}_{buhar \text{ rek.süt}} = \frac{\dot{m}_{rek.süt} C_{p,rek.süt} \Delta T_{rek.süt}}{h_{rek.süt}} \quad (5.8)$$

$$\dot{V}_{rek.süt} = 1000 \text{ l/sa}$$

$$\rho_{rek.süt} = 978,75 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{rek.süt} = 978,75 \text{ kg/sa}$$

$$C_{p,rek.süt} = 3,976 \text{ kJ/kgK } 90^{\circ}\text{C için interpolasyon ile bulunmuştur.}$$

$$\dot{m}_{rek.süt} = 978,75 \text{ kg}$$

$$\Delta T_{rek.süt} = T_{rek.süt} - T_{rek.süt}$$

$$\Delta T_{rek.süt} = 140 - 90$$

$$\Delta T_{rek.süt} = 50$$

$$\dot{m}_{rek.süt} = \frac{978,75 \times 3,976 \times 50}{2085,8}$$

$$\dot{m}_{buhar rek.süt} = 93,29 \text{ kg/sa}$$

Buhar hattı çap tayini

Buhar hatlarında, buhar için ideal hız 25 m/s dir. Buna göre buhar hat çapı tayin edilecektir.

Basınç Bar g	Hız m/s	15 mm	20 mm	25 mm	32 mm	40 mm	50 mm	65 mm	80 mm	100 mm	125 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
0.5	15	7	14	24	37	52	99	145	213	394	648	917	1606	2590	3678
	25	10	25	40	62	92	162	265	384	675	972	1457	2806	4101	5936
	40	17	35	64	102	142	265	403	576	1037	1670	2303	4318	6909	9500
0.7	15	7	16	25	40	59	109	166	250	431	680	1006	1708	2791	3852
	25	12	25	45	72	100	182	287	430	716	1145	1575	2816	4629	6204
	40	18	37	68	106	167	298	428	630	1108	1712	2417	4532	7251	10323
1.0	15	8	17	29	43	65	112	182	260	470	694	1020	1864	2814	4045
	25	12	26	48	72	100	193	300	445	730	1160	1660	3099	4869	6751
	40	19	39	71	112	172	311	465	640	1150	1800	2500	4815	7333	10370
2.0	15	12	25	45	70	100	182	280	410	715	1125	1580	2814	4545	6277
	25	19	43	70	112	162	295	428	656	1215	1755	2520	4815	7425	10575
	40	30	64	115	178	275	475	745	1010	1895	2925	4175	7678	11997	16796
3.0	15	16	37	60	93	127	245	385	535	925	1505	2040	3983	6217	8743
	25	26	56	100	152	225	425	632	910	1580	2480	3440	6779	10269	14316
	40	41	87	157	250	357	595	1025	1460	2540	4050	5940	10476	16470	22950
4.0	15	19	42	70	108	156	281	432	635	1166	1685	2460	4618	7121	10358
	25	30	63	115	180	270	450	742	1080	1980	2925	4225	7866	12225	17304
	40	49	116	197	295	456	796	1247	1825	3120	4340	7050	12661	19663	27816
5.0	15	22	49	87	128	187	352	526	770	1295	2105	2835	5548	8586	11947
	25	36	81	135	211	308	548	885	1265	2110	3540	5150	8865	14268	20051
	40	59	131	225	338	495	855	1350	1890	3510	5400	7870	13761	23205	32244
6.0	15	26	59	105	153	225	425	632	925	1555	2525	3400	6654	10297	14328
	25	43	97	162	253	370	658	1065	1520	2530	4250	6175	10629	17108	24042
	40	71	157	270	405	595	1025	1620	2270	4210	6475	9445	16515	27849	38697
7.0	15	29	63	110	165	260	445	705	952	1815	2765	3990	7390	12015	16096
	25	49	114	190	288	450	785	1205	1750	3025	4815	6900	12288	19377	27080
	40	76	177	303	455	690	1210	1865	2520	4585	7560	10880	19141	30978	43470

Şekil 5.5. Boru çapına göre yük taşıma kapasitesi (Maxval, 2018)

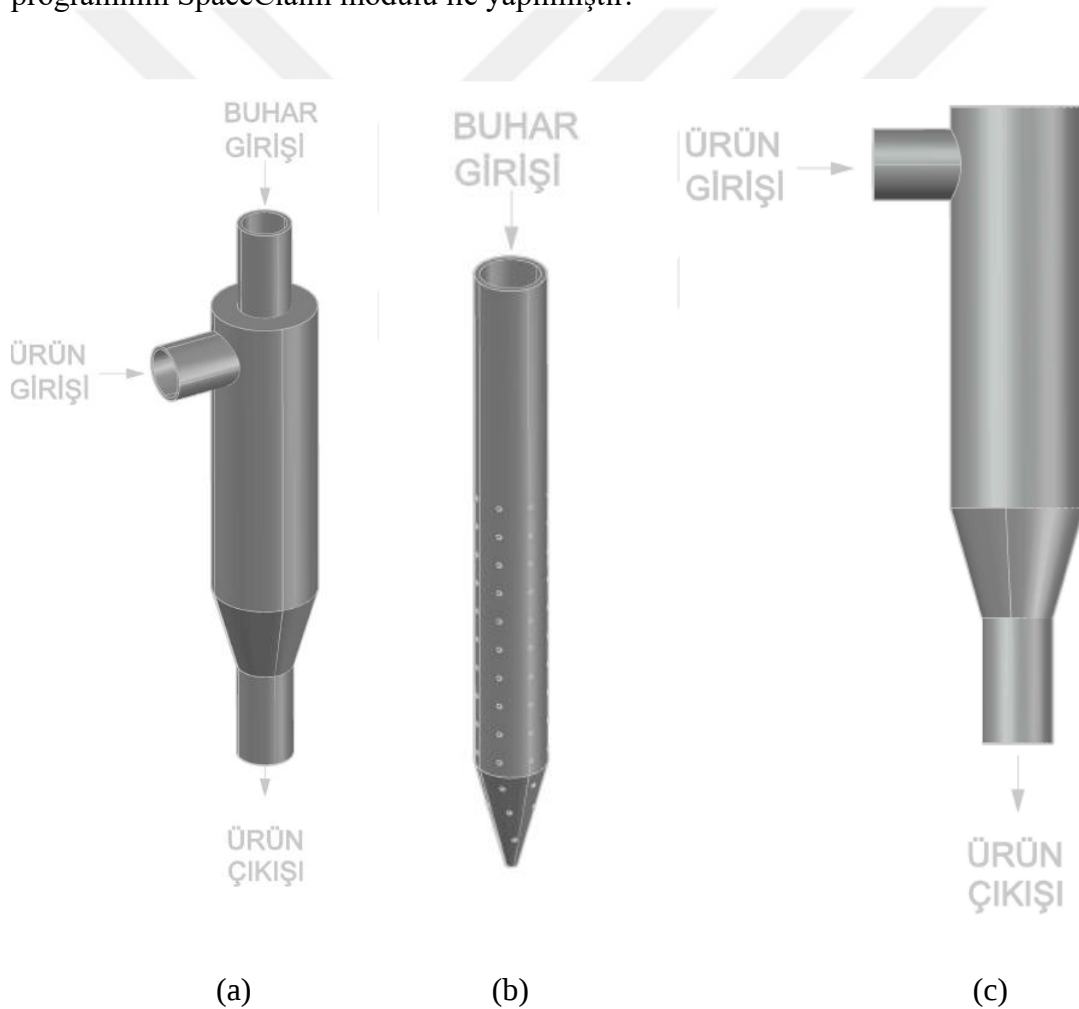
(Bkz Çizelge 5.8) görüldüğü üzere, 6 bar buhar için, 25m/s hızda, 93,29 kg/sa. buharı taşıyabilecek boru çapı 20 mm'dir. Buhar hatları genel olarak EN ISO 1127 boru standardında çekildiğinden dolayı, bu standartta iç çapı 20 mm ye en yakın olan boru 3/4" borudur. Bu borunun iç çapı 22,9mm olup, dış çapı 26,9 mm'dir. Aynı tablodan görüleceği üzere, 6 bar buhar için 20mm boruda, 55-60 kg/h geçmesi durumunda (sütlaç için) hız 15 m/s ye düşmektedir.

Buhar delik çaplarını ve sayılarını hesaplaması karmaşık olacağından, analizler ile optimum hale getirilecektir. Başlangıç değeri olarak her bir delik 2 mm çapında olacaktır. 2mm çapındaki borudan geçen buhar miktarı 1 kg/sa. olacaktır. 95 kg/sa. kapasiteyi karşılayabilmek için 95 adet delik olmalıdır. Buhar için kullanılacak borunun dış çapı 26,9 mm olacaktır. Boru çevresinde 8 sıra delik açılması ve bunun 10 kez tekrarlanması öngörülmüştür. Boru çevresine 8 sıra olarak açılan deliklerin merkezleri arasındaki mesafe çevreye bölünerek bulunmuştur ve 24 mm'dir. Boru çevresinde açılan 8 adet delik aralarında 12 mm mesafe olacak şekilde 10 kez daha tekrarlanarak tüm delikler açılacaktır. Açılan bu delikler, buhar enjektörünün silindirik yüzeyine dik olarak açılacaktır.

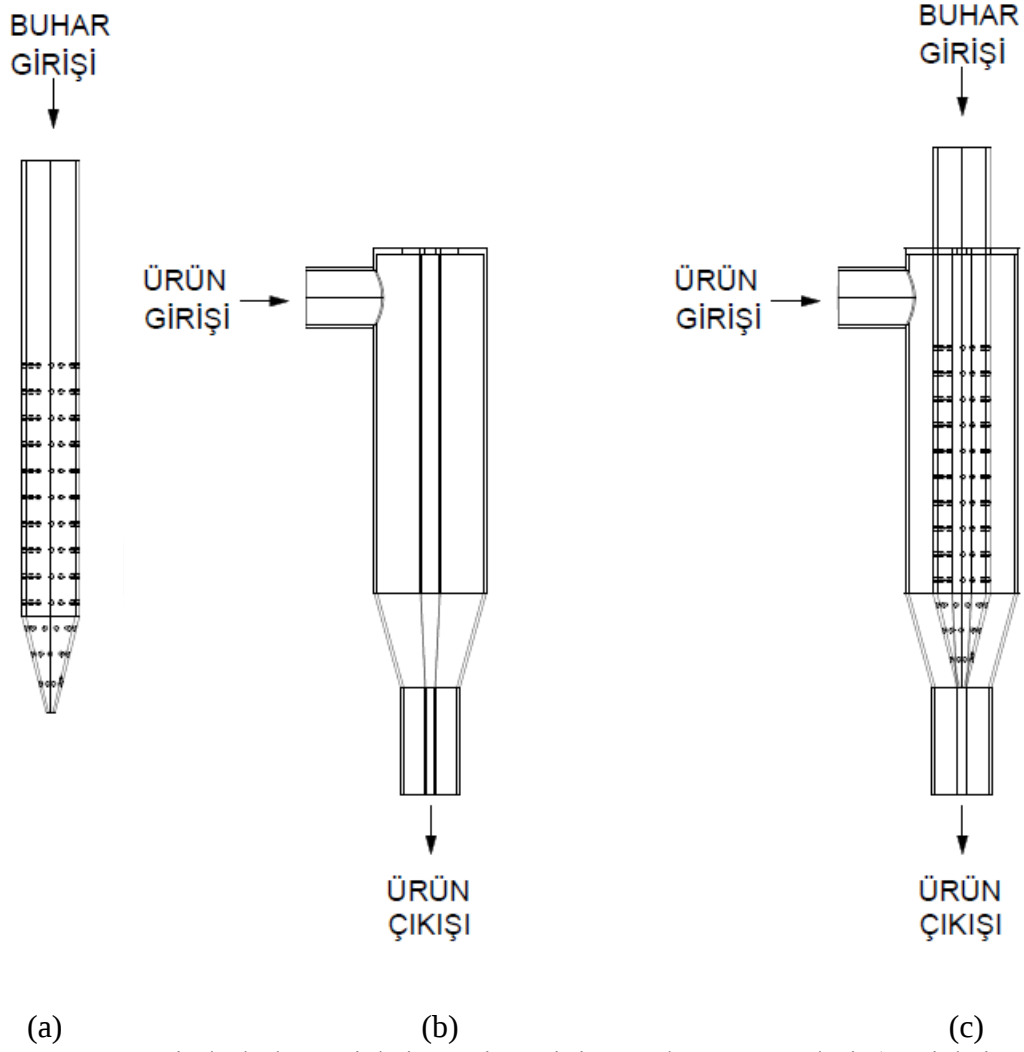
95 adet delikten 80 adedi boru yüzeyine açılırken, kalan 15 adet delik ise borunun redüksiyon ağzına açılacaktır. Borunun redüksiyon kısmında bulunan en uç noktası içeride kondens birikmesi olmaması için delinmiş olarak bırakılacaktır.

Ürün boru çapı DIN11850 normunda DN25 seçilmişti. Buhar ise EN ISO 1127 normunda 3/4" olarak belirlenmişti. Direkt buhar enjeksiyon sisteminde iki boru iç içe bulunacağından dolayı, dış gövdenin DIN 11850 normunda DN 50 (Dış çap= 53 mm iç çap: 50 mm) olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

Tüm bu parametrelere göre direkt buhar enjeksiyon sisteminin ilk tasarımı Ansys 2019 R1 programının SpaceClaim modülü ile yapılmıştır.



Resim 5.2. Direkt buhar enjeksiyon sistemi 3 boyutlu çizimi a) tüm sistemin 3 boyutlu çizimi b) iç kısmın 3 boyutlu çizimi c) dış kısmın 3 boyutlu çizimi



(a) (b) (c)
Resim 5.3. Direkt buhar enjeksiyon sisteminin yandan görünüşleri a) enjeksiyon sistemi b) dış kabuk c) tüm sistemi

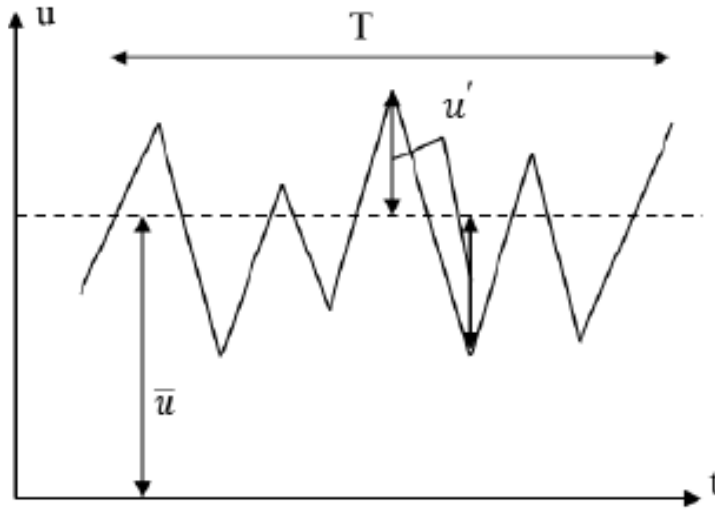
6. DİREKT BUHAR ENJEKSİYON SİSTEMİ HAD ANALİZLERİ

HAD/ CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği/ computational fluid dynamics) numerik analiz ve algoritmalar kullanılarak akışkan davranışları ile ilgili problemleri, bilgisayar simülasyonları kullanarak analiz eden bir mühendislik aracıdır. Ansys Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımıdır ve birçok endüstride kullanılmaktadır.

6.1. HAD Yönteminin Matematiksel Temeli

Akışkanlar dinamiği uygulamalarında, iki boyutlu veya üç boyutlu akışlar için reynolds sayısının belirli bir değer üzerinde olduğu durumlarda akış kararsız hale gelmektedir. Kararsız akışlar türbülanslı akış olarak adlandırılırken, kararlı akışlar laminar akış olarak adlandırılır. Türbülanslı akışlarda, akışkan partikülleri arasındaki etkileşim fazladır ve akışkan molekülleri rastgele hareket etmektedir. Akışkan basıncı ise zamana göre değişmektedir (Karataş, 2019).

Akış, kritik reynolds sayısının (2300) olması durumunda laminar, üzerinde olması durumunda türbülanslı olmaktadır. Türbülanslı akışlarda akışkanın kararsız hareketi, akışkan partiküllerinin hareketinden kaynaklanan hız gibi bileşenlerin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle hız bileşenlerini sadece zamanın fonksiyonu olarak değil, belirli bir zaman periyodunda hesaplanan ortalama hız değeri ile zamanın fonksiyonu olarak salınım yapan türbülans hız bileşenlerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir (Karataş, 2019).



Şekil 6.1. Türbülanslı akışın hız bileşenleri (Karataş, 2019).

$\bar{u}$ = hızın belirli bir zaman için t periyodundaki ortalama değeri

u' = zamanın fonksiyonu olarak salınım yapan türbülans bileşeni

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (6.1)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t) dt \quad (6.2)$$

Navier Stokes denklemlerinde, diğer akış özellikleri için de zamana bağlı bir fonksiyon olarak türbülans bileşenlerinin eklenmesi ile türbülanslı akış için daha karmaşık ifadeler ortaya çıkacaktır. Bu karmaşık ifadelerin denklemlerinin oluşturulması ve çözümü için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerden bazıları şunlardır:

Sıfır denklem modeli

Prandtl karışım uzunluğu modeli

Cebeci-Smith modeli

Baldwin-Lomax modeli

Tek denklem modeli

İki denklem modeli

Standart k- ϵ model

Nonlinear k- ϵ modeli

k- ϵ model

Large eddy simulation modeli (LES)

Direct numerical simulation modeli (DNS)

Reynolds Averaged Navier-Stokes modeli (RANS) (Karataş, 2019).

6.2. HAD Çalışmaları Temel Basamakları

Bu tez çalışmasında, bazı ön hesaplar ile oluşturulan geometrik modelin Ansys Fluent ile çözümlemeleri yapılacaktır. Bu çözümlemeler için izlenecek adımlar aşağıdaki verilmiştir:

Modelin çözüme uygun hale getirilmesi

Modelin ağ yapısının belirlenmesi (mesh)

Sınır şartlarının belirlenmesi

Çözüm

CFD-POST ile analiz sonuçlarının izlenmesi

Mesh bağımsızlık analizi

CFD-POST ile analiz sonuçları elde edildikten sonra incelemeleri yapılacak ve beklenmeyen bir sonuç elde edildi ise, geometri revize edilerek tekrar çözüm adımları izlenecektir.

Sonuçlar uygun ve beklendiği gibi ise, elde edilen sonuçların doğruluğunun kontrolü için, mesh bağımsızlık analizi yapılacaktır. Aynı geometri, sınır şartları için analiz daha yüksek

hassasiyetli bir ağ yapısı kullanılarak tekrarlanacak ve sonuçlar karşılaştırılacaktır. İki sonuç arasındaki fark tolerans değerler dışına çıkıyor ise, daha yüksek hassasiyetli bir mesh ile tekrar çözüm yapılarak sonuçlar arasındaki fark tolerans değerlerin içinde kalana kadar tekrarlanacaktır.

6.2.1. Modelin çözüme uygun hale getirilmesi

3 boyutlu çizimi yapılmış direkt buhar enjeksiyonu sisteminin çizimleri akışkanın olmadığı negatif volüme denilen kısımda yapılmıştır. Yani dış cidarların çizimleri yapılmış, ancak içerisinde bulunacak akışkanların çizimleri yapılmamıştır. Bunun için Ansys SpaceClaim kullanılarak dış cidarlardan hacim çıkartılmalıdır. (volume extract). Akışkan hacimleri buhar ve karışım olarak iki ayrı hacimde belirtilmiştir. Karışım hacmi, ürünün sistem içerisine girdiği noktadan başlayarak ürün ve buharın karışıp sistem içerisinden çıktığı noktaya kadar olan kısım olarak tanımlanmıştır. Buhar hacmi ise, direkt buhar enjeksiyon sistemi içerisindeki buhar bölmesinin iç kısmı olarak tanımlanmıştır.

Bu adımdan sonra, çözümü kolaylaştırmak adına, direkt buhar enjeksiyon sisteminin buhar hacminin enjeksiyon yüzeylerine kadar olan bölümü ayrılarak kendi başına çözülecek ve enjeksiyon yüzeylerinin buhar çıkışı ile, ürün içerisine girişi arasında kayıp olmadığı varsayılarak enjeksiyon yüzeyleri için elde edilen sonuçlar ürün içerisine giriş noktası olarak tanımlanacaktır.

Buhar hacmi için yapılan model değişiklikleri

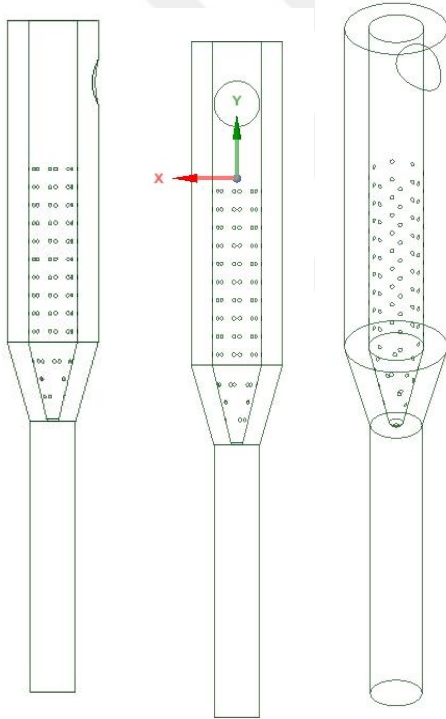
Buhar hacminde, buhar enjeksiyon kafasının et kalınlığından dolayı buhar hacmini oluşturulduğunda, her bir enjeksiyon deliği için buhar girişinden buhar çıkışına kadar olan 2mm'lik yol, ağ yapısında kaliteyi düşüreceğinden dolayı, buhar enjeksiyon hacminin çiziminden çıkartılmıştır. Buharın miktarını, yönünü ve hızını etkilemeyecek şekilde geometri basitleştirilmiş, çözüm süresi azaltılmış, ağ yapısının kalitesi ve buna bağlı olarak çözümün doğruluğu arttırılmıştır.

Buhar hacmi, silindirik bir hacim olduğundan ve yüzeyde bulunan detaylar nedeni ile sweep yöntemi ile mesh oluşturmanın kaliteli bir mesh ile sonuçlanmayacağı öngörüldüğünden dolayı, mesh kalitesini arttırabilmek için, geometri içerisinde 6 mm çapında bir delik açılmış

ve tekrar doldurulup başka bir katı model olarak kaydedilmiştir. İkinci katı modelin yüzeyleri daha sonra shared topology komutu ile birbirlerine bağlanmıştır. Böylece mesh oluşturulurken içeride bulunan yüzeylere de boyutlandırma eklenebilecektir.

Ürün hacmi için yapılan model değişiklikleri

Ürün hacmi için yapılan ilk analizler sonrasında, karışımın tam olarak gözlenebilmesi için ürün çıkış bölmesinde bulunan boru parçası uzatılmıştır. İlk yapılan analizlerde ürün çıkış noktasında ürün/ buhar karışımının izlenmesi için yeterli alan olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle ürün çıkış noktasının uzatılmasına karar verilmiştir. Analizin daha kıza sürmesi için ise, ürün girişindeki boru analiz yapılacak çizimden çıkartılmıştır.



Resim 6.1. Değiştirilmiş ürün hacmi modeli

6.2.2. Modelin ağ yapısının belirlenmesi (mesh)

Ağ yapısı ya da mesh, modelin çözümleme yapılacak küçük parçacıklara bölünmesi işlemidir. Bu parçacıklar ne kadar küçük olursa, parçacıklar arası mesafe o kadar kısalacak ve daha doğru bir çözüme gidilecektir. Ancak parçacıkların küçülmesi ile model üzerindeki parçacık sayısı artacağından çözümün yapılması için daha güçlü bir bilgisayar ve daha uzun

süreye ihtiyaç duyulacaktır. Mesh işlemi, ideal süre ile ideal doğrulukta bir çözüm için yapılmalıdır.

Buhar hacminin ağ yapısı

Buhar hacmi üzerinde bulunan giriş-çıkış yüzeylerinin isimlendirilmesi (named selection belirlenmesi) ile başlanmalıdır. Bu problemde, 95 adet olan buhar çıkış deliği yüzeyleri seçilerek, “steam_outlet” olarak isimlendirilmiştir. Buharın enjeksiyon kafasına gireceği yüzey ise, “steam_inlet” olarak isimlendirilmiştir. Bu isimlendirmelerde çözücüye gönder (send to solver) özelliğinin açık olması gereklidir. Bu işlemden sonra kontakt noktaları kontrol edildikten sonra mesh oluşturma işlemine başlanmıştır.

Mesh oluşturma (generate mesh) butonuna basılarak programın otomatik olarak oluşturacağı mesh görülmüştür. Bu mesh kalitesi istenilen kadar iyi olmayacağından dolayı, bazı boyutlandırmalara gidilmelidir. Burada, element size, growth rate ve max size değerleri girilmiş ve iyi bir mesh ortaya çıkana kadar küçültülerek tekrar denenmiştir.

Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	1,05
Max Size	1,e-003 m
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default (5,e-006 m)
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	Default (1,e-005 m)
Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	0,22435 m
Average Surface Area	2,2221e-004 m ²
Minimum Edge Length	2,9e-003 m

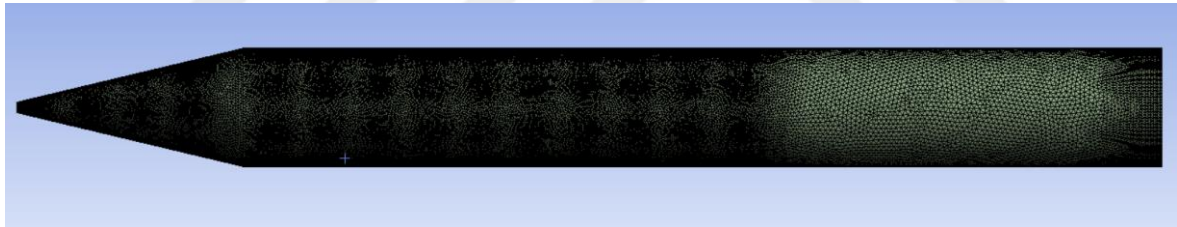
Şekil 6.2. Buhar hacmi için mesh boyutlandırması

Mesh boyutlandırması için, ilave olarak, kenar boyutlandırması (edge sizing) eklenmiştir. Buhar girişinde bulunan iki yüzeye ve en uçta bulunan buhar çıkış yüzeyi seçilerek bölme sayısı (number of division) şeklinde boyutlandırma yapılmıştır. Bölme sayısı denemeler sonunda 150 olarak belirlenmiştir.

Object Name	Edge Sizing 2
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
Number of Divisions	150
Advanced	
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Bias Type	No Bias

Şekil 6.3. Buhar hacmi için mesh kenar boyutlandırması

Mesh kalitesi kontrol edilmiş ve çok az sayıda mesh için kalite bozuklukları olduğu görülmüştür. Bu meshler yer olarak kontrol edilmiş ve göz ardı edilebilir olduklarına karar verilmiştir. Bu geometride 17 896 061 mesh elemanı bulunmakta ve bu mesh'ler 8 860 632 node'a bağlıdır.



Resim 6.2. Mesh oluşturulmuş buhar hacmi

Ürün hacminin ağ yapısı

Ürün hacminin mesh yapısı oluşturulmadan önce giriş çıkış noktalarına named selection verilecektir. Bu problemde, 95 adet olan buhar giriş deliği yüzeyleri seçilerek, “steam_inlet” ürün giriş yüzeyi seçilerek “product_inlet” ve ürün çıkış yüzeyi seçilerek “product_outlet” olarak adlandırılmıştır.

Mesh oluştur (generate mesh) butonuna basılarak programın otomatik olarak oluşturacağı mesh görülmüştür. Bu mesh kalitesi istenilen kadar iyi olmayacağından dolayı, bazı boyutlandırmalara gidilmelidir. Burada, element size, growth rate ve max size değerleri girilmiş ve iyi bir mesh ortaya çıkana kadar küçültülerek tekrar denenmiştir.

Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	1,05
Max Size	1,e-003 m
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default (5,e-006 m)
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	Default (1,e-005 m)
Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	0,37866 m
Average Surface Area	6,1749e-004 m ²
Minimum Edge Length	6,239e-003 m

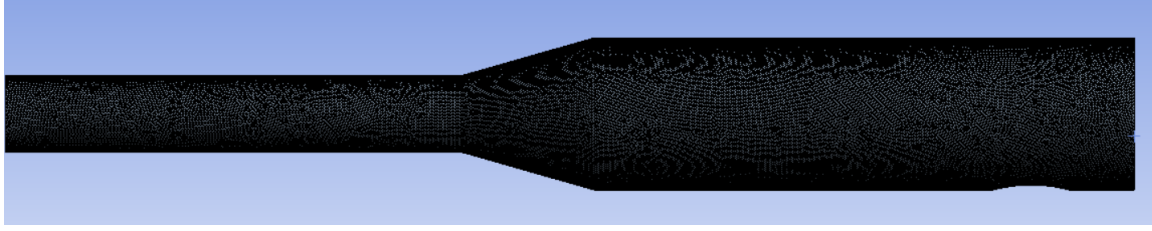
Şekil 6.4. Ürün hacmi için mesh boyutlandırması

Mesh boyutlandırması için, ilave olarak, kenar boyutlandırması (edge sizing) eklenmiştir. Ürün girişinde bulunan yüzey ve ürün çıkış yüzeyi seçilerek bölme sayısı (number of division) şeklinde boyutlandırma yapılmıştır. Bölme sayısı denemeler sonunda 150 olarak belirlenmiştir.

Object Name	<i>Edge Sizing</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
Number of Divisions	150
Advanced	
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Bias Type	No Bias

Şekil 6.5. Ürün hacmi için mesh kenar boyutlandırması

Mesh kalitesi kontrol edilmiş ve çok az sayıda mesh için kalite bozuklukları olduğu görülmüştür. Bu meshler yer olarak kontrol edilmiş ve göz ardı edilebilir olduklarına karar verilmiştir. Bu geometride 7 339 004 mesh elemanı bulunmakta ve bu mesh'ler 1 300 588 node'a bağlıdır.



Resim 6.3. Mesh oluşturulmuş ürün hacmi

6.2.3. Çözüm

Buhar hacmi için çözüm

Ansys Fluent içerisinde problem setup sekmesi açıldığında, modeller içerisinde enerji denklemi ve viskozite denklemi açılmalıdır. Zamana bağlı değil, steady çözüm yapılacaktır.

Sütlaç ve rekombine süt için buhar debileri farklı olduğundan dolayı, iki ürün için ayrı ayrı hesaplamalar yapılacaktır. Bu hesaplamalar öncelikle güvenlik katsayısı 1 alınarak yapıp, daha sonra güvenlik katsayısı 1,15 alınarak yapılacak ve incelenen sonuçlar neticesinde üçüncü bir güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen üçüncü güvenlik katsayısı 1,05 olacaktır.

Türbülans modeli seçimi

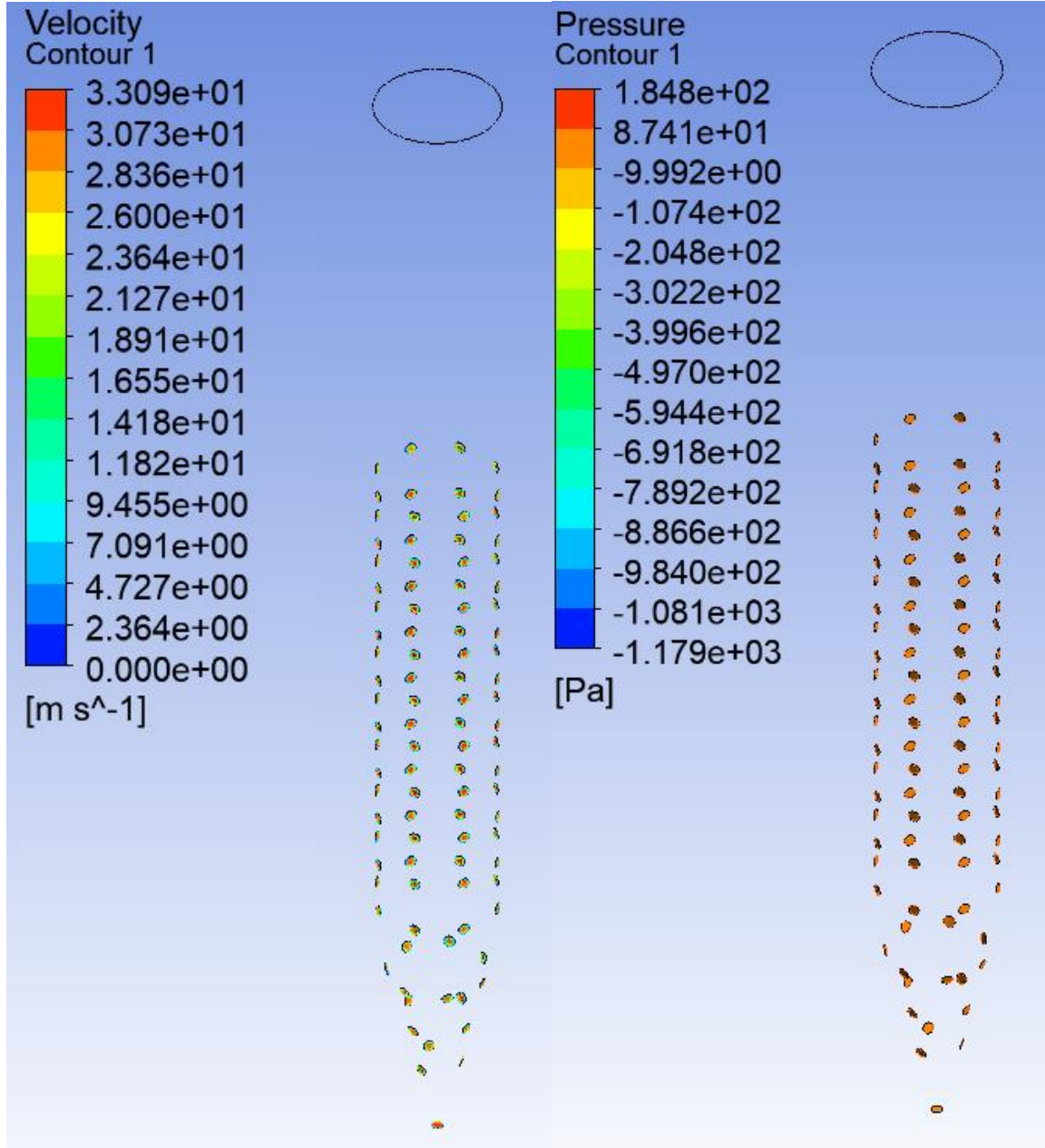
Had uygulamalarında türbülans modeli seçimi sonucun doğruluğunu oldukça etkilemektedir. Endüstriyel uygulamalarda genel olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmaktadır. Çalışılan akışın yapısı hakkında yeterince bilgi yoksa doğru türbülans modelini seçmek zor olabilir. Standart k- ϵ modeli analizlerde başlangıç türbülans modeli olarak seçilebilir. Basit bir türbülans modelidir ve geometriye bağlı değildir. (Karataş, 2019)

Buhar hacmi için sınır şartlarının belirlenesi

Buhar hacmi için buhar girişinde bir önceki bölümde belirlenmiş olan değerler girilecektir. Bu değerler güvenlik katsayısı 1 olarak kaydedilecektir.

Çizelge 6.1. Buhar giriş parametreleri

Ürün	Güvenlik katsayısı	Buhar basıncı (pascal)	Buhar hızı (m/s)
Rekombine süt	1	600 000	25
	1,05	600 000	26
	1,15	600 000	30
Sütlaç	1	600 000	15
	1,05	600 000	16
	1,15	600 000	17



Resim 6.4. Sütlaç için 1,05 güvenlik katsayısı ile yapılmış hesaplamının hız ve basınç kontürleri

Çizelge 6.2. Buhar çözüm sonuçları (CFD Post üzerinden alınan sonuçların ortalama değerleridir)

Ürün	Güvenlik katsayısı	Buhar çıkış basıncı (pascal)	Buhar çıkış hızı (m/s)
Rekombine süt	1	75	48
	1,05	80	50
	1,15	270	60
Sütlaç	1	78	30
	1,05	85	30
	1,15	411	35

Ürün hacmi için çözüm

Ansyst fluent programı içerisinde problem setup sekmesi açıldığında, modeller içerisinde enerji, viskozite ve multiphase denklemi seçilmelidir. Multiphase denklemi içerisinde volume of fluid modeli seçilip, eulerian faz sayısı 3 olarak seçilerek, fazlar için bilgiler girilecektir. Fazlar ürün, buhar ve kondens olarak tanımlanıp, ürün bilgisi olarak rekombine süt ve sütlaç için aşağıdaki bilgiler girilmiştir.

Çizelge 6.3. Rekombine süt için girilen olan ürün bilgileri

Sıcaklık	Viskozite	Spesifik ısı	Termal iletkenlik	Yoğunluk	Hız
°C	cP	kJ/(kg·K)	W/(m·K)	kg/m ³	m/s
90	0,44253	3,976	0,61375	978,75	1,8

Çizelge 6.4. Sütlaç için girilen olan ürün bilgileri

Sıcaklık	Viskozite	Spesifik ısı	Termal iletkenlik	Yoğunluk	Hız
°C	cP	kJ/(kg·K)	W/(m·K)	kg/m ³	m/s
82	214,0	3,7939	0,5925	1,080	0,6

Bu bilgiler girildikten sonra buhar için elde edilen sonuçlar buhar giriş parametresi olarak girilmiştir. Farklı güvenlik katsayıları için buhar hız ve basıncı değiştirilecek ancak ürün değişmeyeceğinden dolayı ürün parametreleri aynı kalacaktır.

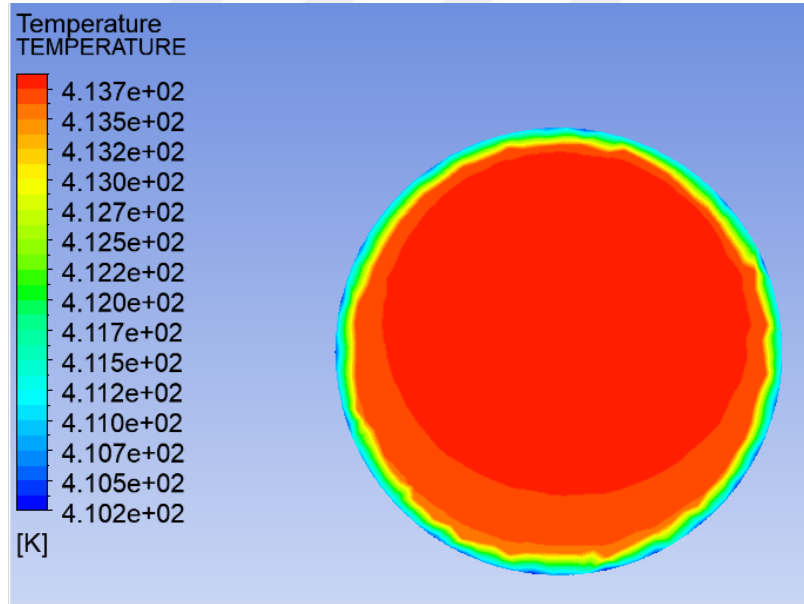
6.3. CFD-POST ile analiz sonuçlarının izlenmesi

CFD post ile analiz sonuçları incelenecek ve raporlanacaktır. Buhar için elde edilen sonuçlar ürün için yapılan hesaplamalarda kullanıldığı için bu sonuçlar bu bölümde incelenmemiştir.

Ürün çıkış sıcaklıkları Bölüm 5’te belirtilen sıcaklıklar ile karşılaştırılıp, riskli sıcaklık limitinin altında kalmasına dikkat edilmelidir.

Çizelge 6.5. Rekombine süt ve Sütlaç için farklı güvenlik katsayılarında ürün çıkış sıcaklıkları

Ürün	Güvenlik Katsayısı	Ürün çıkış sıcaklığı (°C)
Rekombine Süt	1	140,5
	1,15	156,3
	1,05	149,3
Sütlaç	1	128
	1,15	150
	1,05	148

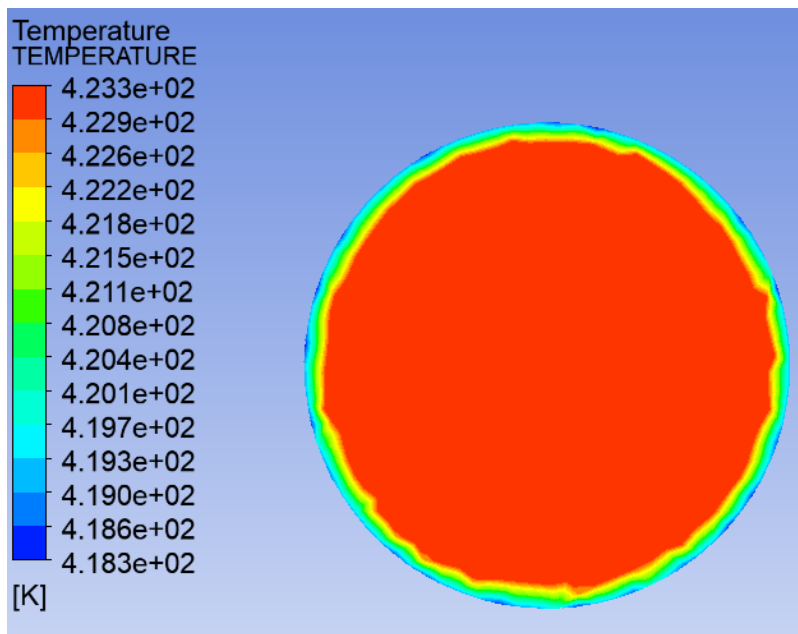


Resim 6.5. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı=1

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi rekombine süt için güvenlik katsayısı 1 seçildiğinde, ürün çıkış sıcaklığı ortalama 140,5 °C’dir. Bu sıcaklık, istenilen sterilizasyon sıcaklığının üzerinde olsa dahi, istenilen sterilizasyon sıcaklığının borulama ve

holder çıkışına elde edilmesi gereklidir. Holder ve borulama nedeni ile oluşacak ısı kaybının, ürün sıcaklığını 0,5 °C den daha çok düşüreceği öngörüldüğünden, sterilizasyon sıcaklığı holder çıkışına kadar sağlanamayacaktır. Direkt buhar enjeksiyon sistemine buhar beslemesi için kullanılan oransal vananın tepki süresi kısıtlı olduğundan, herhangi bir nedenden oluşabilecek sıcaklık düşümleri sırasında çıkış sıcaklığının ayarlanan değerler altına düşmesi kaçınılmazdır. Ayrıca direkt buhar enjeksiyon sistemi ile aynı buhar kazanından beslenen farklı ekipmanların olması mümkündür. Bu gibi durumlarda, buhar salınımını minimum seviyede tutmak için buhar kolektörlerinden ayrı hatlar çekilse dahi, buhar kazanında olan basınç ve debi salınımları, farklı bir ekipmanın devreye girmesi ile oluşacak bir debi azalması gibi sistemin çalışmasını etkileyen unsurlar ürün çıkış sıcaklığının düşmesine neden olacaktır. Bu problemlerin herhangi birinin oluşması ile meydana gelebilecek sıcaklık düşümü nedeni ile sterilizasyonun tamamlanamaması, ürünün kaybedilmesine veya tekrardan ısıl işleminden geçirilmesi ile ürün kalitesinde bozulmalar meydana gelmesine yol açacaktır. Bu durumların önlenmesi için, direkt buhar enjeksiyon sisteminin çıkış sıcaklığını doğrudan etkileyen bir güvenlik katsayısı kullanılacaktır.

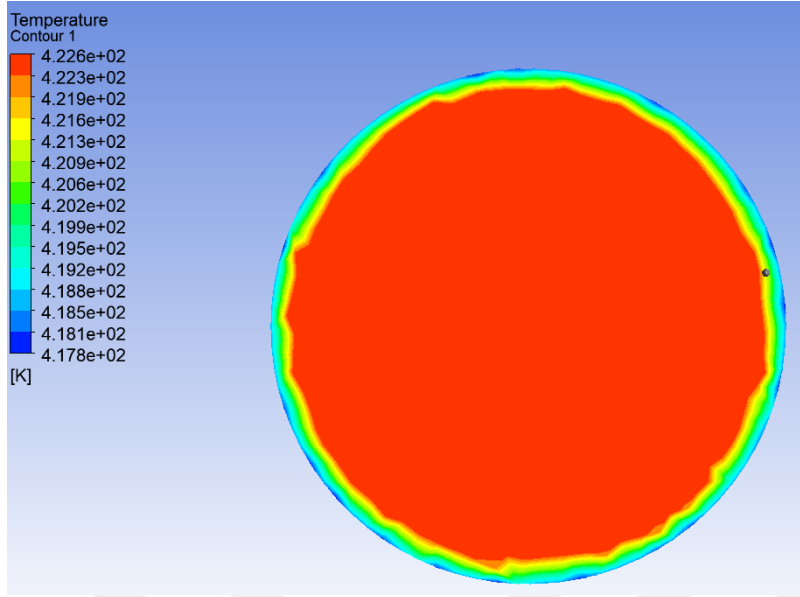
Ürün karışım yapısı incelendiğinde, ürün- buhar karışımının yeterince homojen olduğu görülmüştür. Sistem cidarlarına yakın kısımlarda ürünün cidarlara yapışarak akması dolayısı ile ürün sıcaklığı ve buhar karışımı azalmıştır. Bu durum toleranslar içinde olduğundan dolayı göz ardı edilebilir.



Resim 6.6. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1.15

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi rekombine süt için güvenlik katsayısı 1,15 seçildiğinde, ürün çıkış sıcaklığı ortalama 156,3 °C'dir. Bu sıcaklık, sterilizasyon sıcaklığının üzerinde olsa dahi, riskli sıcaklık limiti üzerindedir. Ürünün bu sıcaklığa çıkması, protein denatürasyonunun artması ve ürün içerisindeki minerallerin ayrılmasının artması nedeni ile ürünün direkt buhar enjeksiyon sistemi ve sonrasındaki borular içerisinde yanması ve cidarlara yapışması ile sonuçlanacaktır. Bu durum, ürün kalitesinde kayda değer bir düşüş ile sonuçlanacaktır. Bunun dışında ürün sıcaklığının bu kadar yükselmesi ile ürün içerisinde bulunan doğal şekerin karamelizasyonu sonucunda ürün rengi değişecektir. İlave olarak, sistem içerisinde artan yanmalar, yapışmalar ve karamelizasyon nedeni ile sistem iç yüzeylerinde kirlenmeler artacaktır. Bu kirlenmelerin temizlenmesi için kullanılacak temizleme solüsyonlarının daha yüksek sıcaklıklarda ve daha yüksek konsantrasyonlarda olması ve yanma yapışmanın daha çok gerçekleşmesi nedeni ile daha sık temizlik yapılması gereklidir. Bütün bunlar, gereken sıcaklığın çok üzerine çıkmak için kullanılacak buhar debisinin yükselmesi, temizlik için kullanılan solüsyonun daha çok ısıtılması ile gerekecek buhar debisinin yükselmesi, kimyasallarının daha sık ve daha yüksek konsantrasyonlarda kullanılması nedeni ile su ve kimyasal tüketiminin artması ve bu durumlara bağlı olarak işletme maliyetinin yükselmesi ile sonuçlanacaktır. Bu işletme maliyetlerinin yükselmesine rağmen, ürün sıcaklığının riskli sıcaklık limitini geçmesi nedeni ile ürün kalitesi de düşecektir.

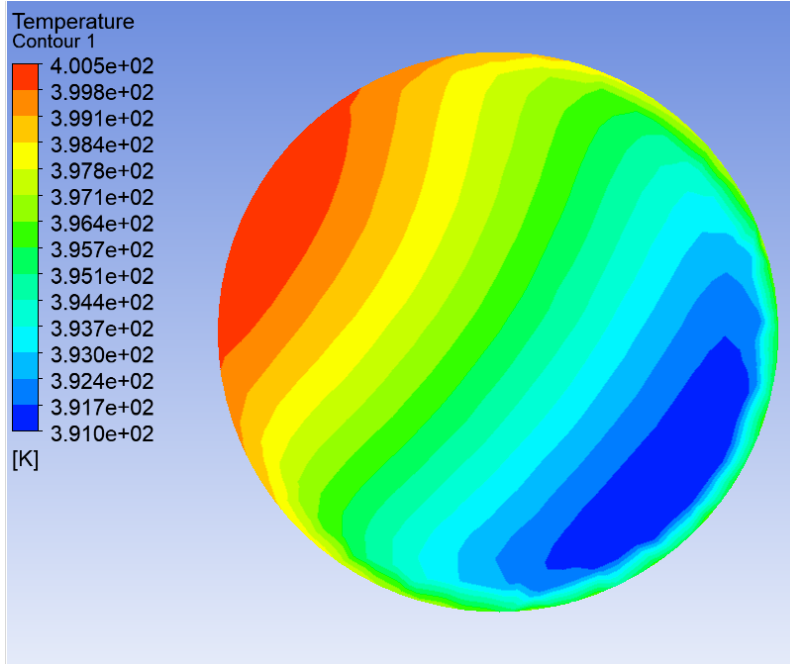
Ürün karışım yapısı incelendiğinde, ürünün sıcaklık ve karışım profilinin güvenlik katsayısı 1 olduğu duruma göre daha düzgün olduğu görülmüştür. Bu durum buhar hızının daha yüksek olması nedeni ile ürün içerisine daha kolay karışmasına neden olmuştur.



Resim 6.7. Rekombine süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1.05

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi rekombine süt için güvenlik katsayısı 1,05 seçildiğinde, ürün çıkış sıcaklığı ortalama 149,3 °C'dir. Bu sıcaklık rekombine süt ürünü için güvenlik katsayısı 1,15'de olduğundan daha uygun olmasına rağmen, yine de riskli sıcaklık limitinin üzerindedir. Riskli sıcaklık limitinin üzerinde olması başlı başına bir uygunsuzluk nedeni olmasına rağmen, riskli sıcaklık limitinin 4,3 °C üzerinde olması, tolere edilebilir değerlerin de üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu güvenlik katsayısının kullanımı uygun olmayacaktır.

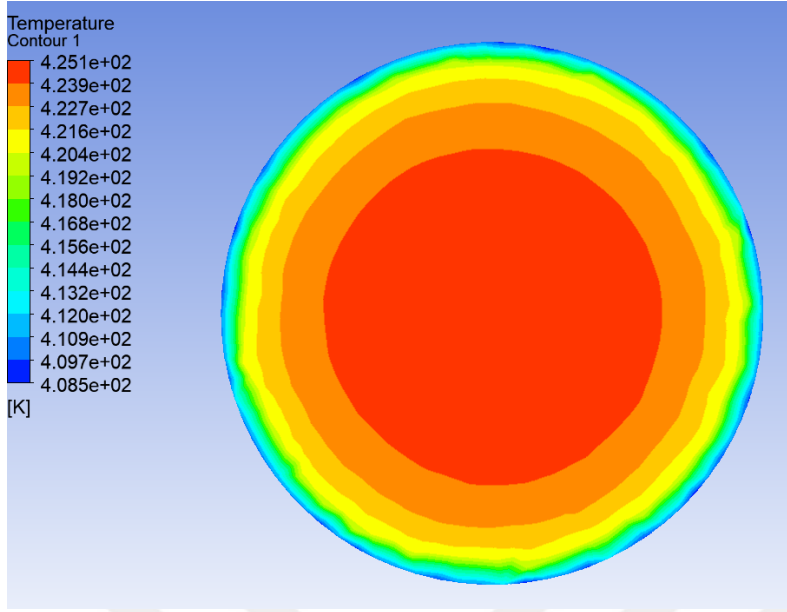
Bu güvenlik katsayısı için karışım profili incelendiğinde, karışım profilinin 1,15 güvenlik katsayılı olan analiz ile benzer olduğu görülmüştür. Buradan çıkartılabilecek sonuçların biri, buhar basıncının 80 pa ve buhar hızının 50 m/s üzerindeki olan yükselmesi (1,15 güvenlik katsayısı için buhar basıncı 270 pa ve buhar hızı 60 m/s'dir.) karışım açısından kayda değer değişikliklere neden olmamaktadır.



Resim 6.8. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi sütlaç için güvenlik katsayısı 1 seçildiğinde, ürün+ buhar çıkış sıcaklığı ortalama 128 °C'dir. Ancak karışım profili düzgün olmadığından ürün çıkış sıcaklığı tespit edilememiştir. Bu güvenlik katsayısı kullanıldığında, Resim 7.8 de görülebileceği gibi, en yüksek sıcaklığın olduğu noktada 132,5°C'dir en düşük sıcaklığın olduğu noktada ise, 118°C ye düşmektedir.

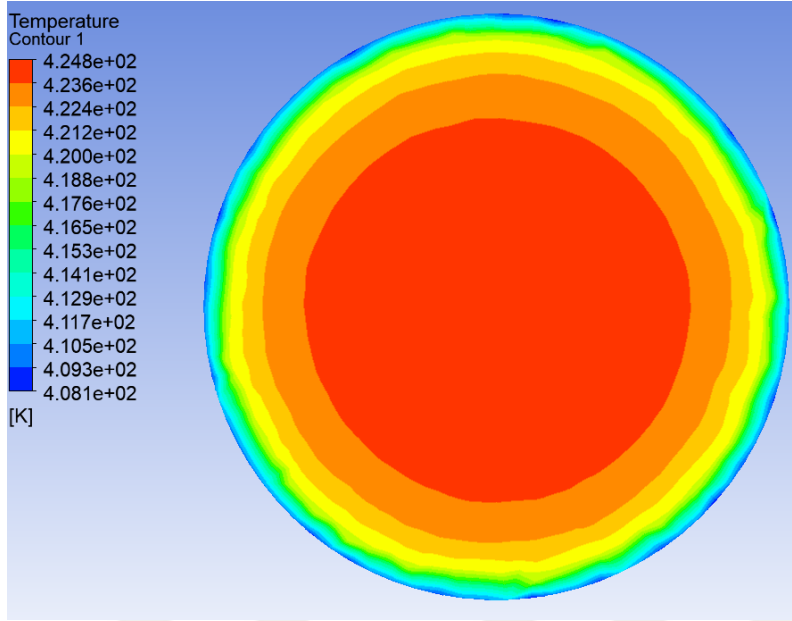
Karışım profili incelendiğinde, ürünün giriş noktasından aşağı doğru lineer bir şekilde aktığı ve borunun tamamını doldurmadan ilerlediği görülmektedir. Bu durumda ürün, çıkış noktasına ulaşana kadar karışımın gerçekleşmediği için ortalama ürün sıcaklık değerleri uygun olsa da karışım açısından uygun değildir.



Resim 6.9. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1,15

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi sütlaç için güvenlik katsayısı 1,15 seçildiğinde, ürün çıkış sıcaklığı ortalama 150 °C'dir. Bu sıcaklık sterilizasyon sıcaklığının üzerinde olmasına rağmen, riskli sıcaklık limitinin üzerindedir. Özellikle bu ürünün içerisinde bulunan ilave şeker nedeni ile riskli sıcaklık limitinin üzerinde olması üründe karamelizasyon ve renk değişimine neden olacaktır. Ürün içerisinde bulunan nişasta nedeni ile oluşacak yanma, yapışma ve yapı değişimleri nedeni ile ürün yapısında bozulmalar olacaktır. Bu karamelizasyon, yanma ve yapışmalar nedeni ile daha önce belirtildiği gibi, ürün kalıntılarının temizlenmesini zorlaştırıp, temizlik kimyasalları ve buhar tüketiminin artması nedeni ile işletme maliyetlerinin yükselmesine neden olacaktır.

Bu güvenlik katsayısı için karışım profili incelendiğinde, güvenlik katsayısı 1 olan analizin karışım profili ile karşılaştırıldığında, istenilene daha yakındır. Buna rağmen, rekombine süt için olan karışım profilleri ile karşılaştırıldığında sütlaç için karışma profilinin daha kötü olduğu görülecektir.



Resim 6.10. Sütlaç için süt sıcaklık kontürü güvenlik katsayısı= 1,05

Bu analizin sonucunda, (Bkz. çizelge 6.5)te görüleceği gibi sütlaç için güvenlik katsayısı 1,05 seçildiğinde, ürün çıkış sıcaklığı ortalama 148 °C'dir. Bu sıcaklık önceki analizlerden de anlaşılabileceği gibi uygun değildir. Bu durumda yine üründe yanmalar yapışmalar ve karamelizasyon gerçekleşeceğinden dolayı ürün yapısı bozulacaktır. Temelde, güvenlik katsayısı 1 seçildiği durumdaki sıcaklık en uygun sıcaklık olsa dahi, karışım profilinden dolayı uygun değildir.

Bu güvenlik katsayısı için karışım profili incelendiğinde, ürün ve buhar karışımının güvenlik katsayısı 1,15 olan sisteme göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak rekombine süt için olan ürün karışımları ile karşılaştırıldığında yine de karışımın ideal hale gelmediği ancak tolere edilebilir olduğu görülmektedir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada incelenen iki farklı ürün olan rekombine süt ve sütlaç için viskozite değerlerinin farklılığından dolayı, aynı ürün debileri, ürün basınçları buhar basınçları ve buhar debilerinin kullanılamayacağı çalışmanın başında belirtilmiş ve yapılan çözümler ile kanıtlanmıştır. Ancak bu çalışmaya başlandığında bilinmeyen ve analizler sonucunda ortaya çıkan olgu, bu derece farklı iki ürün için aynı buhar güvenlik katsayılarının kullanılması ürün açısından doğru olmayacağıdır. Eğer aynı güvenlik sayıları ve buhar basınçları kullanılacak ise, sütlaç debisi değiştirilmelidir. Ayrıca karışım profilinin düzeltilebilmesi için çalışmalar yapılmalıdır.

Analiz sonuçlarından görüleceği üzere, rekombine süt için 1,05 güvenlik katsayısı ürün güvenliğinin artırılması için doğru seçim olduğu halde, sütlaç için 1 güvenlik katsayısı daha doğru bir seçim olacaktır. Rekombine süt için 1,05 güvenlik katsayısı ile elde edilen ürün çıkış sıcaklığı riskli sıcaklık limitinin üzerindedir. Bu nedenle aslında bu çalışmada analizi yapılmayan 1 ile 1,05 arasında dördüncü bir güvenlik katsayısı belirlenip, (elde edilen analiz sonuçlarına göre, 1,025 dördüncü güvenlik katsayısı için doğru bir seçenek olabilir.) tekrar analizler yapılabilir.

Sütlaç için güvenlik katsayısının 1 olduğu durumun en doğru çıkmasının nedeni, ilk tasarım yapılırken hesaplanan buhar debisinin hesaplanması sırasında direkt buhar enjeksiyon sisteminin ürün işleme süreci başlamadan önce su ile devreye alınıp, buhar enjeksiyon yüzeyinin ısıtılmış olması ve buradan ürüne geçen ısının ilk tasarımda hesaplanmamış olması olabilir. Rekombine süt ve sütlaç arasında debi ve viskozite farkı olması nedeni ile rekombine sütün hızı sütlaçın hızından yüksek olacaktır. Sütlaç debisinin daha düşük olması normal bir ısı değiştiricide, ısı transfer verimini olumsuz yönde etkileyecektir, ancak tasarım yapılırken buhar basıncı iki ürün için de aynı seçilmiştir. Buhar debileri ürüne göre hesaplanmış olduğundan ve ürünlerin kapasiteleri ve iki ürün için spesifik ısı değerleri çok yakın olduğundan, hesaplanan buhar debileri aynı boru hattı içerisindeki hızı çok fazla değiştirmemektedir. Daha büyük kapasiteli sistemlerde, sütlaç için yapılacak hesaplamalarda daha yüksek güvenlik katsayıları kullanılması gerekebilir.

Sütlaç için yapılan hesaplamada, ürün çıkışında buhar ve ürünün tam olarak karıştırılmadığı görülmektedir. Yüksek viskoziteli ürünlerde direkt buhar enjeksiyon sistemlerinde

karışmanın sağlanabilmesi için daha yüksek hızda buhar kullanılabilir. Ancak bu buhar hızının sınırlanmış olması gerekir. Güvenlik katsayısı 1,15 seçildiğinde buhar hızı arttırılmış olmasına rağmen, karışım profili düzelmemiş, aksine daha çok ayrılma meydana gelmiştir. Direkt buhar enjeksiyon sistemi içerisinde ürünü baffle plakaları ya da daha yüksek kapasitelerdeki sistemler için motorize sıyrıcılar kullanılması ile bu durumun önüne geçilebilir.

Direkt buhar enjeksiyon sisteminde buharın sıcaklığının direkt olarak ürün ile karşılaştırılması ürünün yanmasına ve yapışmasına neden olabilmektedir. Direkt buhar enjeksiyon sistemlerinin alternatifi olan borulu veya sıyrıcılı ısı değiştiricilerden daha küçük yüzey alanına sahiptir. Bu yüzey alanının daha küçük olması ürünün yüksek sıcaklıklı yüzeyler ile temasını sınırlamaktadır. Sınırlanan temas yüzeyi nedeni ile direkt buhar enjeksiyonu ile ısıtılma işlemi tabii tutulan ürünlerde, diğer yöntemlerde ısıtılma işlemi tabii tutulan ürünlere göre daha az yanma ve yapışma gerçekleşecektir. Ancak buharın direkt olarak kullanılması, yanma ve yapışmanın olmasını önleyebilmek için gerekli sıcaklık limitleri içerisinde kalınması gerektiğinden, tasarımı zorlaştırmaktadır. Sıcaklığın olması gerekenin 0,5 °C üzerine çıkması ürün yapısını bozup yanma ve yapışmalara neden olurken, 0,5°C altına inmesi ise ürünün sterilizasyonunun tam olarak gerçekleşmemesi anlamına gelebilir.

Sterilizasyonun gerçekleşmemesi, ürünün kullanılamaz hale gelmesi ve kaybedilmesine veya tekrar ısıtılma işlemi tabii tutulması gerekliliğine neden olacaktır. Ürünün tekrar ısıtılma işlemi tabii tutulması yüksek sıcaklıkta kalacağı sürenin uzamasına neden olacaktır. Bu durum ürün yapısının bozulmasına neden olabilir.

Ürün sıcaklığının sterilizasyon sıcaklığının çok üzerinde çıkması, üründe yanma yapışma ve karamelizasyona neden olacaktır. Sıcaklık yükseldikçe, ürün içerisinde bulunan proteinin denatürasyonu artacak, ürün içerisinde bulunan doğal ve ilave şekerlerin karamelizasyonu artacak, ürün içerisinde bulunan mineraller sıcaklık nedeni ile üründen ayrılacaktır. Bütün bu durumlar, ürün yapısında değişikliklere ve ürün kalitesinin düşmesine neden olurken, aynı zamanda, sistem iç yüzeylerinde birikme ve kirlenmelere neden olacaktır. Bu birikme ve kirlenmelerin temizlenmesi için temizleme sıvılarının daha yüksek sıcaklıkta ve daha yüksek oranda kimyasal içermesine neden olacaktır. Ayrıca, bu yanma ve yapışmaların artması nedeni ile sistemin daha sık temizlenmesi gerekecektir. Bu nedenlerden dolayı, yıkama için kullanılacak buhar, su ve kimyasal tüketimleri artacaktır. Bu tüketimlerin

yükselmesi, ürün sıcaklığının yükselmesi nedeni ile oluşacak ilave tüketimler ile birleştirildiğinde, ürün sıcaklığının riskli sıcaklık limitinin üzerine çıkması sadece ürün yapısını bozmakla kalmayıp, sistemin toplam verimini düşürecektir. Bu nedenle ürün sıcaklığının gerekenden çok yükselmesinin birçok anlamda dezavantajı vardır.

Gıda proseslerinde kullanılan borulu veya sıyrıcılı ısı değiştiricilerde direkt buhar enjeksiyonundan farklı olarak, buhar direkt olarak kullanılmamakta ve bir ısı değiştirici yardımı ile sıcak su elde edilerek kullanılmaktadır. Bu işlem ürünün sterilizasyon sıcaklığı ile karşılaştığı ısıtma akışkanı arasındaki sıcaklık farkını düşürerek yanma ve yapışmaları azaltsa dahi ilave bir ısı değiştirici, sıcak su için bir sirkülasyon pompası, demineralize su elde ünitesi gibi ilave sistemler gerektirmektedir. Bu sistemler tesise ilave işletme ve bakım masrafları getirecektir. Ayrıca buharın direkt olarak kullanılmaması ve ısı değiştiriciden geçirilmesi, sıcak su için ilave borulara ihtiyaç duyulması nedeni ile ısı kayıpları yaşanacak ve buhar ihtiyacı artacaktır. Ancak direkt buhar enjeksiyonlu sistemlerde buharın direkt olarak ürün içerisine karıştırılması ile, temiz veya sterilize buhar kullanımı ihtiyacı doğmaktadır. Temiz buhar eldesi maliyetli ve kontrolü zor olduğundan dolayı birçok gıda prosesine ikincil bir ısıtıcı akışkan kullanımı ile endirekt ısıtma yapılması tercih edilmektedir. Kullanılacak proses ve ürünlere göre, temiz buhar eldesi ve direkt buhar enjeksiyonu kullanımı ile, temiz buhar eldesine ihtiyaç olmadan ikincil bir ısıtma devresi ile endirekt ısıtma yöntemlerinin hangisinin prosese daha uygun olduğunun belirlenmesi için gerekli fizibilite çalışmaları yapılmalıdır.

Direkt buhar enjeksiyon sistemlerinin borulu veya sıyrıcılı eşanjörlerden avantajlı olduğu diğer bir konu ise, sistem boyutudur. Borulu veya sıyrıcılı eşanjörlerin uzunlukları genellikle 3 ya da 6 metre olarak imal edilmektedir. Benzer kapasitede bu projede tasarımı yapılan direkt buhar enjeksiyon sisteminin uzunluğu 50-60 cm civarında olacaktır. Bu fabrika alanından tasarruf edilmesini sağlar.

Direkt buhar enjeksiyon sistemlerinde ürün içerisine buhar karıştırıldığı için ürün işlemlerinden sonra suyun uzaklaştırılması için ilave sistemler gerekecektir. Rekombine süt bazlı ürünler ile ilk reçetenin hazırlanması sırasında olması gerekenden daha az miktarda su ilave edilerek, eksik olan su direkt buhar enjeksiyon sisteminde eklenen buhar ile karşılanabilir. Rekombine süt bazlı olmayan ürünler için soğutma işlemi sırasında vakum soğutma kullanılarak fazla suyun uzaklaştırılması gerçekleştirilebilir ancak vakum soğutma

sistemleri komplike sistemler olup, kontrolü, işletmesi ve bakımı zor sistemlerdir. Bu nedenle direkt buhar enjeksiyon sistemlerinin rekombine ürünler ile kullanılması daha verimli olacaktır.

Özet olarak, direkt buhar enjeksiyon sistemi ile ısıtılacak ürünler özenle seçilmeli ve bu ürünler için gerekli tasarım şartları dikkatlice belirlenmelidir. Bu şartlar sağlandığında, direkt buhar enjeksiyon sistemleri diğer ısıtma sistemlerine göre çok daha avantajlı olabilmektedir. Ancak tüm avantajlarına rağmen, sistem tasarımının yapılmasının zorluğu nedeni ile kullanımı sınırlı olabilecektir. Özellikle yüksek viskoziteli ve tanecikli ürünlerde akışın doğal olarak gerçekleşmesi zor olduğundan yönlendirme plakalarının kullanılması gerekebilir. Sistem için temiz buhar kullanılması gerekliliği, ürün içerisinde enjekte edilen buharın kondense dönüşmesi nedeni ile ürünün katı madde oranı değişecektir. Bu değişiklik ürün direkt buhar enjeksiyon sisteminden çıktıktan sonra vakum soğutma kullanılması gerekliliğini getirebilmektedir. Bütün bu dezavantajlara rağmen, karışım ile hazırlanan (rekombine) ürünlerde, karışımın daha yüksek konsantrasyonda hazırlanması, vakum soğutma gerekliliğini ortadan kaldıracaktır. Direkt buhar enjeksiyon sistemlerinin avantajlarının kullanılabilmesi, iyi bir ön araştırma ve doğru bir tasarım ile mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abu-Jdayil, B., and Mohameed, H. (2002). Experimental and modelling studies of the flow properties of concentrated yogurt as affected by the storage time. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 359–365.
- Alamprese, C., and Mariotti, M. (2011). Effects of different milk substitutes on pasting, rheological and textural properties of puddings. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2019–2025.
- Balcı, O. M. (2018). *Design of A Heat Exchanger With Phase Change Material*, Master Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, İzmir.
- Çağlar, S. (2019). *Enerji Sistemleri İçin Kanatlı Borulu Isı Değiştiricisi Dizaynı Ve Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Çengel, Y. (2011). *Isı ve Kütle Transferi-Pratik Bir Yaklaşım*. (3. baskı) Türkiye:Güven Bilimsel, 609-642
- Çengel, Y., ve Boles, M. A. (2008). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla* (5. baskı). Türkiye:Güven Bilimsel. 883-933
- Cinacotta, B. A., and Fisher, D. L. (2000). Direct Contact Steam Injection Heater (Patent Sayı 6,082,712).
- De Bonis, M. V., and Ruocco, G. (2010). Heat and mass transfer modeling during continuous flow processing of fluid food by direct steam injection. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(3), 239–244.
- Hagsten, C., Innings, F., Trägårdh, C., Hamberg, L., Paulsson, M., and Nylander, T. (2019). Removal of UHT dairy fouling - an efficient cleaning process by optimizing the rate controlling alkaline cleaning step. *Food and Bioproducts Processing*, 113 (1), 101–107.
- Hlaváč, P., and Božiková, M. (2011). Effect of temperature on milk rheologic and thermophysical properties. *Utícaj Temp E Rture Mleka Na Reološke I Termofizi Č Ke Osobine*. 1821–4487(15), 17–22.
- Kaçar, E. N., ve Erbay, L. B. (2013). Isı değiştiricilerin tasarımına bir bakış. *Mühendis ve Makina*, 54(644), 14–43.
- Kadam, S., and Datta, A. K. (2015). Estimation of thermal properties and heat transfer study during continuous processing of rice in milk. *Chemical Engineering Communications*, 202(3), 345–355.
- Karataş, T. (2019). *Gövde - Boru Tipi Isı Değiştiricilerinde Had Uygulaması İle Akış Ve Isıl Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya

- Karayannakidis, P. D., Apostolidis, E., and Lee, C. M. (2014). Comparison of direct steam injection and steam-jacketed heating in squid protein hydrolysis for energy consumption and hydrolysis performance. *LWT- Food Science and Technology*, 57(1), 134–140.
- Kelleher, C. M., Tobin, J. T., O'Mahony, J. A., Kelly, A. L., O'Callaghan, D. J., and McCarthy, N. A. (2019). A comparison of pilot-scale supersonic direct steam injection to conventional steam infusion and tubular heating systems for the heat treatment of protein-enriched skim milk-based beverages. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52(1), 282–290.
- Kneifel, W. (2003). Recombined and filled milks. In B. Caballero (Eds.), *Encyclopedia of Food Science Food technology and Nutrition* Second Edition, Vienna. Academic Press pp 4921–4926.
- Kocabaş, C. (2014). *Farklı Malzemelerden İmal Edilmiş Plakalı Isı Değiştiricilerinin Atık Isı Geri Kazanım Performanslarının DeneySEL Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik
- Lazar, A. H. B. M. E., and Smith, T. W. G. S. (1951). Rapid heat processing of fluid foods by steam injection. *Journal Of Dairy Science* 43(12), 2949–2954
- Lee, A. P., Barbano, D. M., and Drake, M. A. (2017). The Influence of ultra-pasteurization by indirect heating versus direct steam injection on skim and 2% fat milks. *Journal of Dairy Science*, 100(3), 1688–1701.
- Manji, B., Kakuda, Y., and Arnott, D. R. (1986). Effect of storage temperature on age gelation of ultra-high temperature milk processed by direct and indirect heating systems. *Journal of Dairy Science*, 69(12), 2994–3001.
- Maxval Buhar Teknolojileri ve Vana San. Tic. A.Ş. (2018) *Buhar sistemleri* İstanbul: Maxval Buhar Teknolojileri ve Vana San. Tic. A.Ş (345)
- Miwa, S., Endo, H., Moribe, T., Sakashita, H., Mori, M., and Hibiki, T. (2017). Investigation of the thermal-hydraulic characteristics of supersonic steam injector. *Applied Thermal Engineering*, 109(2016), 261–271.
- Morgan, A. I., and Carlson, R. A. (1960). Steam injection heating. *Industrial and Engineering Chemistry*, 52(3), 219–220.
- Pehlivan, H. (2002). *Tek Geçişli Çapraz Akışlı Plakalı Isı Değiştirici Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Pekgüzelsu, M. (2015). *Bir Kombide Kullanılan Plakalı Isı Değiştiricisinde Birikinti Oluşumunun DeneySEL Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- Peterson, R. D., and Jordan, W. K. (1963). Characteristics of steam injection heating, dispersion of noncondensable gases as index to downstream flow patterns. *Journal of Dairy Science*, 47(4), 365–369.

- Pietrysiak, E., Smith, D. M., Smith, B. M., and Ganjyal, G. M. (2018). Enhanced functionality of pea-rice protein isolate blends through direct steam injection processing. *Food Chemistry*, 243(July 2017), 338–344.
- Prakash, S., Huppertz, T., Karvchuk, O., and Deeth, H. (2010). Ultra-high-temperature processing of chocolate flavoured milk. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 179–184. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.008>
- Roux, S., Courel, M., Birlouez-Aragon, I., Municino, F., Massa, M., and Pain, J. P. (2016). Comparative thermal impact of two UHT technologies, continuous ohmic heating and direct steam injection, on the nutritional properties of liquid infant formula. *Journal of Food Engineering*, 179, 36–43.
- Sevim, M. (2016). *Plakalı Isı Değiştiricisi Tasarım Parametrelerinin Isı Transfer Aktarımına Etkisinin Nümerik Yöntemler İle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- Srichantra, A., Newstead, D. F., Paterson, A. H. J., and McCarthy, O. J. (2018). Effect of homogenisation and preheat treatment of fresh, recombined and reconstituted whole milk on subsequent fouling of uht sterilisation plant. *International Dairy Journal*, 87, 16–25.
- TetraPak. (1995). *Dairy processing handbook*. Lund:LP Grafiska AB. 149-151
- Thaiudom, S., and Pracham, S. (2018). The Influence of rice protein content and mixed stabilizers on textural and rheological properties of jasmine rice pudding. *Food Hydrocolloids*, 76, 204–215.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook* (Second edition) Ohio: CRC Press.35-150
- Tong, P. S. (2011). Liquid Milk Products:Recombined and Reconstituted Products. In J.W. Fuquay (eds.), *Encyclopedia of Dairy Sciences* Second Edition Mississippi Academic Press pp 2401–2405.
- Vasconcelos Segundo, E. H. de, Mariani, V. C., and Coelho, L. dos S. (2019). Design of heat exchangers using falcon optimization algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 156, 119–144.
- W.Serth, R., and G.Lestina, T. (2014). *Process Heat Transfer* (Second Edition) Texas USA: Academic Press. 361-430
- Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., and Haglind, F. (2019). A Review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 305–328.



GAZİ GELECEKTİR..