

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**BİR KOMBİDE KULLANILAN PLAKALI ISI
DEĞİŞTİRİCİSİNDE BİRİKİNTİ OLUŞUMUNUN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

MUSTAFA PEKGÜZELSU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 03.08.2015

Bornova-İZMİR

2015

Mustafa PEKGÜZELSU tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Bir kombide kullanılan plakalı ısı değıştiricisinde birikinti oluşumunun deneysel olarak incelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerdendirilerek savunmaya değerdere bulunmuş ve 03/08/2015.tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliğı ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri :

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Raportör Üye : Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Üye : Prof. Dr. Recep YUMRUTAŞ



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bir kombide kullanılan plakalı ısı değiştiricisinde birikinti oluşumunun deneysel olarak incelenmesi.” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

03/08/2015



Mustafa PEKGÜZELSU

ÖZET**BİR KOMBİDE KULLANILAN PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE
BİRİKİNTİ OLUŞUMUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

PEKGÜZELSU, Mustafa

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Ağustos 2015, 179 sayfa

Kireçlenme sadece plakalı ısı değıştiricilerinin değil; boruların, vanaların hatta bütün tesisat elemanlarının en büyük düşmanıdır. Kireçlenmeye karşı her geçen gün yeni çözümler aranmakta ve bu problemin önüne geçilmeye çalışılmaktadır.

Asimetrik tipteki lehimli plakalı ısı değıştiriciler, sağladıkları yüksek ısı transferi nedeniyle kombi ısıtma sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Lehim kaynağından dolayı, bakım servisleri tarafından çıkarılamayan bu tip ısı değıştiricilerin özel kimyasallarla kısa zamanda müşteri gözetiminde temizlenmesi çok etkili sonuçlar vermemektedir.

Bu tez, Bosch Termoteknik Isıtma ve Klima San. Tic. A.Ş. şirketinin Manisa Ar-Ge Bölümü'nde TÜBİTAK tarafından sanayi Ar-Ge projeleri destekleme programı (TEYDEB-1501) kapsamında 3120300 proje numarası ile desteklenen proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kurulan deney düzeneğinde, merkezi ısıtma suyu sıcaklığının ve kullanım suyu debisinin, plakalı ısı değıştiricisinin kullanım suyu kanalındaki kireçlenmeye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, merkezi ısıtma suyu sıcaklıkları 60°C ve 85°C arasında, kullanım suyu debisi ise 3 lt/dk ve 15 lt/dk arasında değışen değerlerde tutulup, Manisa şebeke suyu esas alınıp, kombi ısıtma sistemi gerçek çalışma şartlarına benzetilerek gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Plakalı ısı değıştirici, kombi, kireç oluşumu, kirlenme

ABSTRACT**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FOULING IN A PLATE
HEAT EXCHANGER USED IN A COMBI HEATING SYSTEM**

PEKGÜZELSU, Mustafa

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

August 2015, 179 pages

Fouling is the biggest enemy of not only plate heat exchangers but also pipes, valves and even entire plumping elements. Recently, new solutions against fouling are under investigation in order to overcome this known problem.

Asymmetric type Braze Plate Heat Exchangers (BPHEs) are mostly used in combi heating system for the the reason of their increased heat transfer. The disassembly of BPHEs is not possible due to the copper braze plates; therefore the effectiveness of the cleaning process is questionable since it depends on the service conditions such as time, chemical type, etc.

This thesis is done in the Department of R&D of Bosch Termoteknik Isıtma ve Klima San. Tic. A.Ş Company, Manisa and supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), in the scope of industry and R&D collaboration programme (TEYDEB-1501) with Project number 3120300. Effect of temperature and mass flow rate of water circulated in the combi heating system on fouling is investigated in a specific test set up for investigation of fouling in BPHE is designed. The experiments are conducted in the condition, where the temperature of water in the central heating system is selected between 60°C and 85°C, where the flow rate of sanitary water is between 3 l/min and 15 l/min based on Manisa sanitary water by representing the real working conditions of a combi heating system.

Keywords: Plate heat exchanger, combi-boiler, scaling, fouling

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca; öncelikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA'ya, sonra geliştirdiğim altyapının oluşumuna hizmet eden BOSCH Termoteknik Isıtma ve Klima San. Tic. A.Ş.'ne, daha sonra TEYDEB proje ekibine ve son olarak benden hiçbir desteği esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1 GİRİŞ	1
2 PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ	8
2.1 Contalı Tip Plakalı Isı Değiştiricileri	8
2.1.1 Genel özellikler	10
2.1.2 Malzeme	10
2.1.3 Performans	13
2.2 Kaynaklı (Lehimli) Tip Plakalı Isı Değiştiricileri	17
2.2.1 İmalat	18
2.2.2 Performans	18
2.2.3 Kullanım yeri	19
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	20
4 ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE KİRLENME DAVRANIŞI	31
4.1 Giriş	31
4.2 Çökelme Direnci	34
4.3 Kirlenme Türleri	38
4.3.1 Partikül çökmesi	43
4.3.2 Kristalizasyon çökmesi (Presipitasyon)	48
4.4 Çökelme Prosesleri	61
4.5 Çökelme ve Uzaklaşma Mekanizmaları	63
4.6 Çökelme Eğrileri	68
4.7 Çökelme Masrafları	72
4.7.1 Artan sermaye yatırımları	73
4.8 Çökelmeyi Etkileyen Parametreler	75
4.8.1 Akışkan akış hızı	75

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.8.2 Yüzey sıcaklığı	76
4.8.3 Yüzey malzemesi	77
4.8.4 Yüzey pürüzlülüğü.....	77
4.8.5 Akış özellikleri.....	78
4.8.6 Yabancı maddeler ve askıdaki katı maddeler	79
4.8.7 Isı geçiş süreci.....	80
4.8.8 Tasarımda göz önünde bulundurulması gerekenler	80
4.8.9 Basınç düşüşü üzerinde çökelmenin etkisi	82
5 ÇÖKELME DURUMLARI İÇİN ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI	84
5.1 Giriş.....	84
5.2 Isı Değiştirici Tipinin Seçimi	84
5.3 Malzeme Seçimi.....	86
5.4 Gövde ve Boru Tipi Isı Değiştiriciler.....	87
5.5 Diğer Isı Değiştirici Tipleri.....	91
5.5.1 Plakalı ve çerçeveli ısı değiştiriciler	92
5.5.2 Kanatlı plakalı ısı değiştiricileri.....	93
5.5.3 Baskılı devre ısı değiştiricileri	94
5.5.4 Polimer kompakt ısı değiştiricileri.....	95
5.5.5 Cam-SiC (Silisyum Karbür) ısı değiştiricileri	95
6 DENEYSEL ÇALIŞMA	97
6.1 Deney düzeneği özelliklerinin belirlenmesi.....	97
6.2 Deney düzeneği sistem tasarımının yapılması	97
6.3 Deney Düzeneğinin Teknik Özellikleri	99
6.3.1 Yapı özellikleri	99
6.3.2 Ön soğutma devresi	113
6.3.3 Ana soğutma devresi.....	114
6.3.4 LabView parametre kontrolleri.....	116
6.3.5 Deney düzeneği hata ikaz sistemi.....	116
6.3.6 Test düzeneği tasarımının sonuçlandırılması.....	117
7 SONUÇLARIN ANALİZİ.....	123

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.1 Kirlenme Direnci Hesaplaması.....	125
7.2 Sınır Koşulları	126
7.3 1 No’lu deney Seti	129
7.4 2 No’lu Deney Seti	133
7.5 3 No’lu Deney Seti	137
7.6 4 No’lu Deney Seti	141
7.7 5 No’lu Deney Seti	144
7.8 6 No’lu Deney Seti	146
7.9 7 No’lu Deney Seti	148
7.10 8 No’lu Deney Seti	150
7.11 3 ve 4 No’lu Deney Setlerinin Kimyasal Analizi	152
7.11.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analiz sonuçları.....	152
7.11.2 3. Deney setine ait EDX analizleri.....	154
7.11.3 4 No’lu deney setine ait EDX analizleri	160
7.11.4 XRD analiz sonuçları.....	164
8 SONUÇ VE ÖNERİLER	166
8.1 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	166
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	170
ÖZGEÇMİŞ	180

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Bir kombide yer alan parçaların şematik gösterimi.....	1
2.1 Contalı tip plakalı ısı değiştiricinin temel elemanları.....	9
2.2 Contalı tip plakalı ısı değiştiricisinde plaka elemanı (Alfa Laval Inc.)	10
2.3 Contanın plaka üzerine yerleşimi (Radian Inc.).....	12
2.4 Basınç kaybı (Δp), kirlilik faktörü (R_f) ve toplam ısı transfer katsayısı (U) ilişkisi (Rafferty, 2006)	13
3.1 Deneysel düzeneğin şematik bir diyagramı (Kho, Müller-Steinhagen, 1999).....	21
3.2 Deneysel düzeneğin şematik diyagramı (Andritsos, Karabelas, 2003)	23
3.3 PHE’de deney akış kanalları (Bipan et al., 2000).....	25
3.4 Deney düzeneği (Bipan et al. , 2000)	26
3.5 1 μ m Filtreli ve filtresiz deneylerde zamana bağlı kirlenme direnci	27
3.6 Anlık kirlenme direnci ölçebilen deney düzeneği	28
3.7 Çökelme incelemeleri için phe deney düzeneği	29
4.1 Çökelme direncinin 2003’ten 2008’e kadar tasarlanan 2000 kabuk boru tipi ısı değiştirici üzerindeki etkisi (HTRI)	37
4.2 İki madde için çözünürlük (Lim, 2010)	50
4.3 Sıcaklıkla kalsiyum karbonat çözünürlüğünün değişimi (Lim, 2010).....	50
4.4 25°C’de kalsiyum karbonat-ph çözünürlük grafiği (Lim, 2010)	51
4.5 Çözelti içerisindeki CaSO_4 çözünürlüğü ve NaCl miktarı (Lim, 2010)	52
4.6 Çökelme prosesleri	62
4.7 Çökelme prosesinin şematik diyagramı (Awad, 2003).....	63
4.8 Kireçlenme mekanizması.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9 Kirlenme faktörü - zaman eğrileri (Awad, 2003).....	69
4.10 Pratik çökelme eğrileri (Awad, 2003)	72
4.11 Akışkan akış türünün çökelme üzerindeki etkisi (Awad, 2003)	79
5.1 Boru malzemesinin biyokirlenme üzerindeki etkisi (Knudsen, 1998)	86
5.2 Isı transfer katsayısının pulpa milinde kraft siyah likörünün buharlaşması sırasında azalması (Epsitien, 1988)	86
5.3 Isı değiştirici geometrisinin ve gözlemlenen çökelme oluşumunun şeması (a) değiştirici e-1 (b) değiştirici e-2.....	89
5.6 Farklı ısı değiştiricisi tasarımları (a) sarmal değiştirici perdeleri (b) genişletilmiş metal perdeleri (c) kıvrılmış borular (Müller-Steinhagen, 2003) 90	
5.7 Plakalı çerçeveli ısı değiştiricileri ile gövde ve boru tipi ısı değiştiricilerindeki çökelmenin karşılaştırılması (Cooper, 1980)	93
6.1 Isıtma suyu devresinde kullanılan sirkülasyon pompası (Grundfos, 2015)	101
6.2 Isıtma suyu devresinde kullanılan genişleme tankı (Wilo, 2015)	102
6.3 Isıtma suyu devresi 200 lt sıcak su tankı.....	103
6.4 Air spirovent marka hava purjörü (Air Spirovent, 2015).....	103
6.5 IFM marka debi ölçer (IFM, 2015)	104
6.6 Elimko marka sıcaklık sensörü (Elimko, 2015)	104
6.7 Dönüş suyu soğutucu plakalı ısı değiştiricisi	106
6.8 Kullanım suyu tankı 200 lt	107
6.9 Cuno marka pislik tutucu filtre (Cuno, 2015)	109
6.10 Sitrans P250 basınç fark okuyucu (Siemens, 2015).....	110
6.11 Testomat 200 online su sertlik ölçüm cihazı (Lenntech, 2015)	111

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.12 Dulcometer online ph ölçüm cihazı (Dulcometer , 2015)	112
6.13 Alfa Laval TL16-BFM ısı değıştirici ve hesaplaması (Alfa Laval, 2015)	114
6.14 Alfa Laval TL3 ısı değıştiricisi ve hesaplaması (Alfa Laval, 2015).....	115
6.15 Merkezi ısıtma suyu devresi debi ayarı labview arayüzü.....	116
6.16 Kireçlenme deney düzeneği şematik çizimi	118
6.17 Kireçlenme deney düzeneği ön görünüşü.....	119
6.18 Kireçlenme deney düzeneği üst görünüşü	120
6.19 Kireçlenme deney düzeneği 3D çizimi.....	121
7.1 Akış analizinin sonuçları	128
7.2 1 Numaralı deney setinden çıkan ısı değıştirici kesiti	130
7.3 1 Numaralı deney setinden çıkan ısı değıştirici kesitinin yandan görünümü	130
7.4 1 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği.....	131
7.5 Plakalı ısı değıştiricisi giriş ve çıkış sıcaklıklarının kısaltmaları.....	132
7.6 1 Numaralı deney setine ait, şofben hattı (DHW) ve kalorifer hattı (CH) sıcaklık farkı-zaman grafiği.....	132
7.7 1 Numaralı deney setine ait, şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları-zaman grafiği	133
7.8 2 Numaralı deney setinden çıkan ısı değıştirici kesitinin yandan görünümü	134
7.9 2 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği.....	135
7.10 2 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları-zaman grafiği	136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.11 2 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı sıcaklık farkı - zaman	137
7.12 3 Numaralı deney setinden çıkan ısı değiştirici kesitinin yandan görünümü	138
7.13 3 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği	138
7.14 3 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları -zaman grafiği.....	139
7.15 3 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı sıcaklık farkı - zaman grafiği.....	140
7.16 4 Numaralı deney setinden çıkan ısı dğiştirici kesitinin yandan görünümü	141
7.17 4 Numaralı deney setine ait çökelme direnci-zaman grafiği.....	142
7.18 4 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları -zaman grafiği.....	143
7.19 4 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı sıcaklık farkı- zaman grafiği.....	144
7.20 5 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği	145
7.21 5 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları -zaman grafiği.....	146
7.22 6 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman.....	147
7.23 6 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları-zaman grafiği grafiği	147
7.24 6 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı sıcaklık farkı - zaman grafiği.....	148
7.25 7 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı çıkış sıcaklıkları -zaman grafiği	149

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.26 7 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği.....	150
7.27 8 Numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği.....	151
7.28 8 Numaralı deney setine ait şofben hattı ve kalorifer hattı sıcaklık farkı - zaman.....	151
7.29 Birikinti SEM analizi görüntüsü.....	153
7.30 Birikinti SEM analizi görüntüsü.....	154
7.31 1 Numaralı elektron resmi	155
7.32 3 Numaralı elektron resmi	158
7.33 5 Numaralı elektron resmi	160
7.34 6 Numaralı elektron resmi	163
7.35 Kalsiyum karbonat kristal kümeleri yoğunluğu	165
7.36 Deney 3 ve deney 4 numunelerinin argonit ile benzerlik kümesi	165
8.1 Sıcaklık dağılımının simülasyon sonucu	166

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.2 EN 13203-Part 2- 2006 Maksimum ve minumun su kullanım değerleri (Europa, 2015)	6
2.1 Sık kullanılan conta malzemeleri ve yaklaşık sıcaklık dayanımları (Rafferty, 2006)	11
4.1 Farklı çökeltilerin ısı iletkenliği (Müller-Steinhagen, 2003).....	34
4.2 Farklı endüstrideki ısı değıştiricilerde kirlenme türleri (Garrett-Prince, 1985).....	35
4.3 Su için TEMA kirlenme direnci (m^2K/W) (Pritchard, 1988)	39
4.4 Kabuk-boru tipi ısı değıştiricilerindeki petrol rafineri akışı için TEMA kirlenme dirençleri. (m^2K/W) (Pritchard, 1988)	40
4.5 Kabuk-boru tipi ısı değıştiricilerinde çeşitli işlem akışları için kirlenme dirençleri (m^2K/W) (Pritchard, 1988).....	41
4.6 Plakalı ve çerçevesiz ısı değıştiricilerindeki kirlenme dirençleri (m^2K/W) (Tay, Yang 2006).....	42
4.7 Genişletilmiş yüzeylerdeki yanıcı gazların çökelme dirençleri (m^2K/W) (Puckorius, 1972).....	42
4.8 Evaporatörlerdeki çökelme dirençleri (m^2K/W) (Chenoweth, 1988).....	42
4.9 Çeşitli ısı değıştiricisi uygulamaları için arttırılmış yüzey alanları ($R_f =$ $0,36 m^2K/W$) (Müller-Steinhagen H., Dr.H. U Zettler, 2000)	43
4.10 Soğutma suyu bileşenleri (Chamra, 2006).....	49
4.11 Bazı kalıntıların ısı iletkenliği (Awad, 2003)	71
4.12 Bazı ülkelerde kirlenmenin yıllık giderleri (1992 tahmini) (Tay, Yang 2006).....	73
4.13 Çökeltide birikmiş kabuk basınç düşüşünün temiz kabuk tarafı basınç düşüşüne oranı (Coulson et al, 1985)	83
5.1 Isı değıştirici seçme kılavuzu (Müller-Steinhagen, 2003).....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.2 Yoğuşturuculardaki soğutma suyu akış hızları (Paikert, 1983)	91
5.3 25°C'lik yüzey sıcaklığı için Ren nehri suyunun çökelme oranı (Novak, 1982).....	93
7.1 Deney setleri.....	125
7.2 Kirlenme direnci formülü.....	125
7.3 Plakalı ısı değiştirici malzeme özellikleri	126
7.4 Model verileri için sınır koşulları.....	127
7.5 1 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	129
7.6 2 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	133
7.7 3 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	137
7.8 4 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	141
7.9 5 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi Değerleri.....	144
7.10 6 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	146
7.11 7 Numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri.....	148
7.12 8 Numaralı deney detine ait sıcaklık ve debi değerleri	150
7.13 Spektrum 1 Kimyasal içeriği.....	156
7.14 Spektrum 3 Kimyasal içeriği.....	157
7.15 Spektrum 7 Kimyasal içeriği.....	159

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Isı Transfer Yüzeyi Alanı, m^2
A_c	Temiz Durumlar İçin Isı Transfer Yüzeyi Alanı, m^2
A_f	Çökelen Durumlar İçin Isı Transfer Yüzeyi Alanı, m^2
ΔA	Çökelmeye Bağlı Yüzde Değişimi A, %
ΔC	Isı yüzeyinde dolaşan çözelti derişimi ve doyma derişimi arasındaki derişim farkı (% ağırlıkça)
c	Derişim, kg/m^3
c_b	Akışkanın Kütlesindeki Derişim, kg/m^3
C_s	Isı yüzeyinde doymuş derişim (% ağırlıkça)
c_s	Yüzeydeki Derişim, kg/m^3
C_p	Özgöl Isı $kJ/kg.K$
D_1	Yayılma oranı
E_a	Aktivasyon Enerjisi, $kJ/kmol$
F	Basınç kaybı ve kirlilik faktörü
f	Sürtünme Katsayısı - Faktörü
G	Kütle hızı
h	Akan Akışkanlar İçin Isı Transfer Katsayısı, $W/m^2.K$
k	Transfer Katsayısı
k_1	Çökelme Katsayısı – Kütle Transfer Katsayısı
k_d	Kütle Transfer Katsayısı
k_r	Kristalasyon oranı katsayısı
k_m	Kütle Transfer Katsayısı, m/s
K_{sp}	Çözünürlük oranı
k_{spi}	Duvar Sıcaklığında Kalsiyum Karbonat Çözünürlük Ürünü
m_f	Biriken Kütle, kg/m^2
$\dot{m}_f$	Kütle Birikme Oranı, $kg/m^2.s$
$\dot{m}_d$	Çökelme Oranı (Kütle Birimi), $kg/m^2.s$
$\dot{m}_r$	Çıkarılma Oranı (Kütle Birimi), $kg/m^2.s$
$\dot{m}_p$	Mineral Kristallenmesi Nedeniyle Kütle Birikimi Oranı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
m^*_f	M_f 'nin Asimtotik Değeri, kg/m^2
Nu	Nusselt Sayısı
Δp	Basınç Düşüşü
Pr	Prandtl Sayısı
Q	Isı Transfer Oranı, W
q	Isı Akışı, W/m^2
Δq	Çökelmeye Bağlı Q'nun Azalma Yüzdesi, %
Re	Reynolds Sayısı
R_f	Çökelme Direnci, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
R_f^*	Asimtotik Çökelme Direnci, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
R_g	Evrensel Gaz Sabiti, $\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$
R_t	Isı Transferine Toplam Isıl Direnç
S	Aşır Doygunluk oranı
Sc	Schmidt Sayısı
T	Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$
T_b	Akışkan Kütle Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$
T_i	Çökelme Yüzeylerinin Kelvin Cinsinden Sıcaklığı
ΔT_m	Logaritmik Sıcaklık Farkı
P	Yapışabilirlik
T_s	Yüzey Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$
t	Zaman, s
ΔU	Çökelmeye Bağlı U'nun Azalma Yüzdesi, %
U_c	Temiz Durumlar İçin Toplam Isı Transfer Katsayısı, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
U_f	Çökelen Durumlar İçin Toplam Isı Transfer Katsayısı, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
V	Akışkan Akış Hızı, m/s
x_f	Çökelen Katmanın Kalınlığı, m
β	factor = $1/t_c$, s^{-1}
ξ	Sürtünme katsayısı
λ	Isıl İletkenlik, $\text{W/m} \cdot \text{K}$

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Yunan Harfleri

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
λ_f	Çökelen Katmanın Isıl İletkenliği, W/m.K
λ_w	Duvar Malzemesinin Isıl İletkenliği, W/m.K
ζ	Basınç Düşüşü, mbar
μ	Akışkan Viskozitesi, N.s/m ²
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ρ_f	Çökelen Katmanın Yoğunluğu, kg/m ³
τ	Akışkan Kayma Gerilimi, N/m ²
Φ_d	Çökelme Oranı (Isıl Direnç Birimi), m ² .K/W
Φ_r	Çıkarılma Oranı (Isıl Direnç Birimi), m ² .K/W
ψ	Tortu Kuvvet Katsayısı, N/m ²
Ω	Su Karakterizasyon Katsayısı
κ_f	Tortu Kalınlığı, mm

Alt indisler

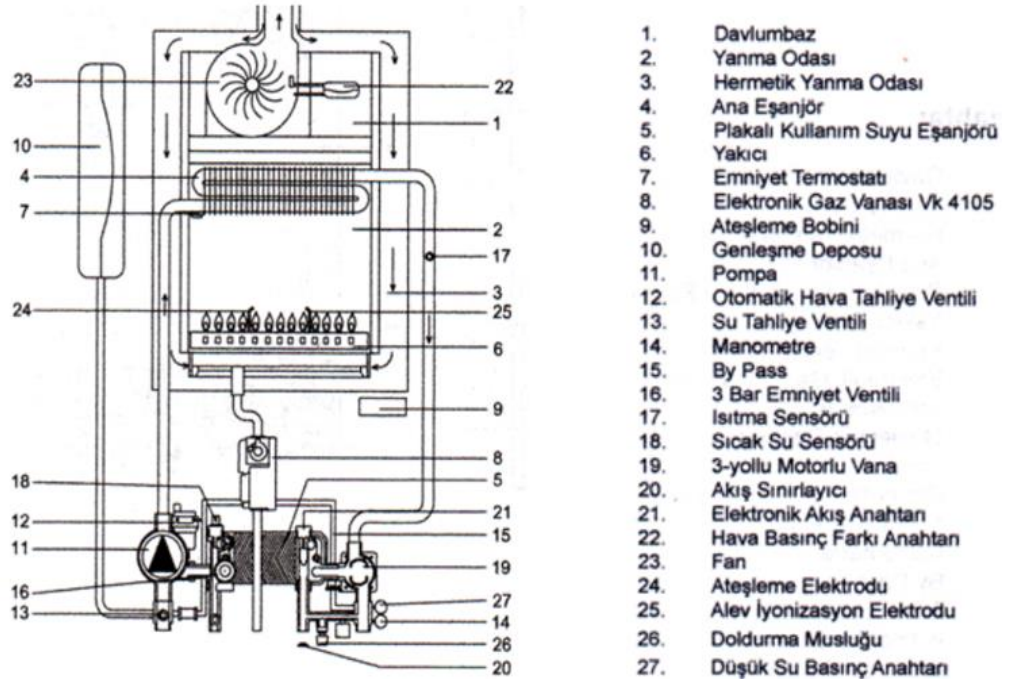
avg	Avarage (Ortalama)
b	Kütle
c	Temiz Durumlar
d	Çökelme
f	Çökelen Durumlar
i	İç
o	Dış
p	Partikül
r	Çıkarılma
s	Yüzey
w	Duvar

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
BPHE	Brazed type Plate Heat Exchangers
3D	Üç Boyutlu
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
AŞ	Anonim Şirketi
CF	Temizlik Faktörü (Cleaning Factor)
CFD	Computational fluid dynamics
CH	Central Heating
DEA	Diethanolamine
DEG	Di-Ethylene Glycol
DPHE	Double-Pipe Heat Exchanger
ESDU	Engineering Sciences Data Unit
FMI	Fluid Metering Inc.
GSMH	Gayrisafî Milli Hâsıla
HTRI	Heat Transfer Research Inc.
LNG	Liquid Natural Gas
LSI	Langelier Dolgunluk Endeksi
MEA	Monoethanolamine
MTR	Malzeme test reaktörü
PCHE	Printed Circuit Heat Exchanger
PLC	Programmable Logic Controller
PHE	Plate Heat Exchanger
ppm	Particule per million
PTFE	Polytetrafluoroethylene (Teflon)
TEG	Tetraethylene Glycol
TEMA	Tubular Exchangers Manufacturers Association

1 GİRİŞ

Kombilerde iki adet ısı değiştirici bulunur. Bunlardan ilki brülörün hemen üzerinde yer alan alevle doğrudan temas eden "birincil ısı değiştirici". Bir diğeri ise "plakalı ısı değiştiricidir". Plakalı ısı değiştirici birincil ısı değiştiriciden beslenir. Yani alev önce birincil ısı değiştiricideki suyu ısıtır, ısınan bu su ile de şebekeden plakalı ısı değiştiriciye giren soğuk su ısıtılarak sıcak kullanım suyu elde edilir. Bu nedenle bu ısı değiştiricilere "ikincil ısı değiştirici" de denir. Kombi ısıtma sisteminde bulunan bütün parçalar ile plakalı ısı değiştiricisi Şekil 1.1’de verilmiştir.

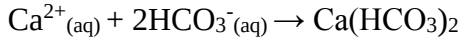


Şekil 1.1 Bir kombide yer alan parçaların şematik gösterimi

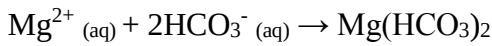
Doğada kireç oluşumu incelendiğinde; yağmur suları atmosferde yeryüzüne doğru ilerlerken atmosferde mevcut karbondioksit ve oksijen ile temas ederek karbondioksiti ve oksijeni bünyesine alır ve zamanla karbondioksit ve oksijence zenginleşir. Karbondioksitçe zengin olan yağmur suları, yer kabuğunda kireç (kalsiyum veya magnezyum karbonat ya da kalsiyum veya magnezyum sülfat) tuzlarıyla temas ettiğinde içerisindeki karbondioksit sayesinde kireç tuzlarının çözünmesine sebep olur ve temas edilen kireç tuzlarının türüne bağlı

olarak suda çözünmüş kalsiyum veya magnezyum bikarbonatlar veya sülfatlar oluşur. Kalsiyum veya magnezyum bikarbonatlar, kararlı bileşikler olmayıp, sıcaklığa bağlı olarak karbondioksitin kolaylıkla sudan ayrılmasıyla halk arasında kısaca "kireç" olarak bilinen kalsiyum veya magnezyum karbonatlara dönüşür. Borularda, tesisatlarda ve su kullanılan cihazlarda zamanla oluşan kireç tabakasının kaynağı, sudaki bikarbonatların bu şekilde karbonatlara dönüşmesidir. Genelde su sıcaklığı arttıkça kireç oluşumu artmakla birlikte, söz konusu etkenlerin olumsuz olması durumunda, düşük kireçli sularda düşük sıcaklıklarda, meydana gelmesi gerekenden daha fazla kireç oluşabilmektedir. Aksine söz konusu etkenlerin olumlu olması durumunda da yüksek kireçli sularda yüksek sıcaklıklarda, meydana gelmesi gerekenden daha az kireç oluşabilir. Kalsiyum Karbonat (kireç) ve magnezyum Karbonat maddeleri su soğukken eriyik halde kalır ve su ısındıkça kristalleşerek katı hale dönüşür. Kalsiyum Karbonatın kimyasal mekanizmasının oluşumu aşağıdaki gibidir:

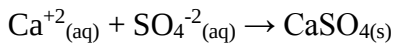
Kalsiyum karbonatın kimyasal mekanizmasının oluşumu aşağıdaki gibidir:



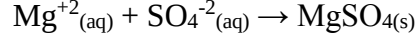
Kalsiyum karbonat miktarına göre suda daha az miktarlarda bulunan Magnezyum Karbonat da yüksek sıcaklıklarda katı faza geçerek çökelmeye neden olan bir diğer çökelti tipidir. Mekanizma olarak Kalsiyum karbonata çok benzeyen Magnezyum Karbonatın kimyasal mekanizmasının oluşumu aşağıdaki gibidir:



Kalsiyum tuzu çözeltisi ancak derişik olduğu zaman seyreltik sülfürik asit veya sülfat tuzu çözeltisiyle beyaz renkli kalsiyum sülfat çökeltisi verir.



Magnezyum tuzu çözeltisi ancak derişik olduğu zaman seyreltik sülfürik asit veya sülfat tuzu çözeltisiyle beyaz renkli kalsiyum sülfat çözeltisi verir.



Isıtıcı kombilerde kullanılan ve su ile temas eden tüm bileşenler kirlenme problemi ile karşı karşıya kalmaktadır. Kirlenme problemi en çok plakalı ısı değıştiricilerde karşımıza çıkmaktadır ve büyük sorunlara yer açmaktadır. Kirlenme sonucunda akış kanalları daralarak, basınç kayıpları artmakta ve ısı transferi azalmaktadır. 9 mm' lik birikinti tabakası ile kaplı bir kazanın ısınması için yaklaşık %53 daha fazla enerjiye ihtiyacı vardır. Kısacası yüksek performansa sahip bir cihaz belli bir zaman sonra plakalı ısı değıştiricide kirlenme nedeniyle ya yüksek enerji tüketimi artmakta ya da %50 daha az performans ile çalışmaktadır. Bu nedenle plakalı ısı değıştiricilerindeki kirlenme etkilerinin anlaşılabilmesi hem ısı değıştirici üreticiler hem de ısıtma sektörü için büyük önem taşımaktadır. Kirlenmeye etki eden parametreler kombi sektöründe net olarak bilinmemekte olup kirlenme ile ilgili uyulması gereken herhangi bir standart bulunmamaktadır.

Kombide kirlenme, merkezi ısıtma devresinde kısıtlı seviyede gerçekleşir. Çünkü su, kapalı sistemde birincil ısı değıştiricisinde ısıtılarak dolanımı sağlanır. Su, ısınmasıyla ve gerekli ortamın oluşmasıyla birlikte içerisinde barındırdığı kirlenme oluşturan bileşenleri bırakır ve bu bileşenler yüzeye yapışır. Ancak bu olay, çok büyük su miktarlarında olur. Kombide su değışimi arıza haricinde pek olmadığından, mevcut su yeni içerdiği kirlenme bileşenlerini bıraksa bile bu yüzeyi kaplamayacak kadar düşük miktardadır. Bu yüzden birincil ısı değıştiricisindeki kirlenme problemi ihmal edilebilir seviyededir. Ancak bu durum plakalı ısı değıştiricisi için bu kadar basit değildir. Kullanım suyunun kullanıldığı anlarda, plakalı ısı değıştiricisine giriş yapan sert ve kirlenme bileşenlerini içeren şebeke suları, uygun fiziksel ortamın oluşmasıyla plaka yüzeyinde katılaşarak çökmeye başlar. Bu çökelen bileşenler, plakalı ısı değıştiricisinde zamanla birikerek birçok istenmeyen duruma yol açmaktadır. Kirlenme sorunu, sadece plakalı ısı değıştiricilerin değil, boruların, vanaların hatta bütün tesisat elemanlarının en büyük düşmanıdır. Ülkemizde de hemen

hemen her yerde sular sert ve kireçlidir. Kireçlenmeye karşı her geçen gün yeni çözümler aranmakta ve bu problemin önüne geçmek için çalışmalar yürütülmektedir. Buna rağmen sektörde kullanılan gerek elektromanyetik aparatlar gerekse kimyasallar henüz tam olarak kirlenme probleminin önüne geçememiştir. Plakalı ısı değiştiricisinde akışkan sıcaklıkları sürekli değişken olduğundan ve akış kanalları diğer tesisat elemanlarına göre daha dar olduğundan kirlenmenin etkisi daha çabuk ve daha etkili bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

Kirlenmenin yol açtığı problemler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Gerçekleşen ısı geçişi olumsuz olarak etkilemektedir. Bu durum; kullanıcının istediği su sıcaklığına ulaşılması için, kombi cihazında daha fazla yakıt tüketmesi anlamına gelmektedir.
- Isıtma sistemlerinde kirlenme oluşumu, tesisata zarar vermekte ve ısınma maliyetlerini arttırmaktadır.
- Kullanım ömürlerini önemli ölçüde kısaltarak, ısı transferinde azalmalara neden olmaktadır.
- Borularda birikerek suyun akış hızını azaltır, yüksek katlara su çıkmasını engeller ve su giderlerinde tıkanıklığa neden olmaktadır.
- Teknik servis maliyetlerini arttırmaktadır.

BOSCH Termoteknik Isıtma ve Klima San. Tic. A.Ş., daha önce yurt dışından ithal ettiği lehimli plakalı ısı değiştiricilerini kendi bünyesinde geliştirmeyi başarmış ve Manisa'daki üretim tesislerinin yanı sıra yurtdışına da bu ısı değiştiricilerin ihracatını gerçekleştirmektedir. Halen lehimli asimetrik plakalı ısı değiştiricileri üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam etmektedir. Plakalı ısı değiştiricilerinde yaşanan ve büyük önem taşıyan konulardan biri de kirlenme sorunudur. Bu projede plakalı ısı değiştiricilerde kirlenme oluşumunun net olarak anlaşılması, ilerleyen yıllarda geliştirilecek

yüksek ömre sahip yeni nesil plakalı ısı değiştirici tasarımlarının elde edilmesine ışık tutacaktır.

Proje kapsamında ısıtıcı kombi sektöründe ilk kez lehimli asimetrik plakalı ısı değiştiricilerde kirlenme davranışı incelenmiştir. Bu güne kadar kirlenme oluşumuna etki eden en önemli parametrelerin (sıcaklık ve hız) kombi cihazlarında kullanılan lehimli plakalı ısı değiştirici kirlenme davranışına etkileri deneysel olarak, akış modellemeleriyle ve kimyasal analizlerle desteklenerek yeterince incelenmediği kaynak araştırmalarında görülmüştür.

Bu çalışmada belirlenen test parametreleri ve test planları doğrultusunda tasarlanan ve geliştirilen özel test düzeneğinin özellikleri tayin edilmiştir. Deney düzeneğinin sahip olacağı teknik özellikler belirlendikten sonra, düzeneğin şematik tasarımı yapılmıştır. Tasarım ve tedarik süreci tamamlandıktan sonra test düzeneğinin kurulumu ve montajı gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bu test cihazının dışarıdan alınması mümkün olmayıp, yapılan testlere ve incelenen parametrelere özel olarak tasarlanmıştır. Test düzeneğinin mekanik montajı tamamlandıktan sonra, sistemin otomasyon ve PLC tasarımı yapılarak, sistem üzerine entegrasyonu sağlanmıştır.

PHE'ye giren merkezi ısıtma hattının sıcaklığı kirlenmeyi etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bunun nedeni, bu sıcaklığın PHE'nin kullanım suyu (çözelti) kanalındaki duvar sıcaklığını doğrudan etkileyen etmenlerden biri olmasıdır. Kombi tasarımlarında kalorifer hattı olarak da adlandırılan bu hat, genellikle plakalı ısı değiştiricisine maksimum 80°C civarında girer. Bu gerçek ışığında, deneylerde kullanılacak maksimum sıcaklık, normalin 5°C daha üzerine çıkarak 85°C seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Kirlenme oluşumu yüksek sıcaklıklarda etkin olduğu gerçeğiyle birlikte en yüksek merkezi ısıtma hattı sıcaklığında nasıl bir sonucun ortaya çıkacağı gözlemlenecektir. Deneylerde kullanılacak minimum limit ise yine kombi tasarımlarından yola çıkılarak 60°C olarak alınacaktır. Literatürdeki araştırmalarda kirlenme için eşik sıcaklık değerinin de bu sıcaklıklara denk geldiğinden bahsedilmektedir.

Deneylerde değiştirilecek ve kirlenme oluşumu mekanizmasına olan

etkisi incelenecek bir diğer parametre kullanım suyu hattının debisi olacaktır. Debi, deney düzeneğinde istenilen seviyede ayarlanıp, çalışma boyunca sabitlenecektir. Bu deneylerde alınacak maksimum debi değeri 16 lt/dk olarak seçilmiştir. Bir kombi sisteminde, şebeke suyundan ısıtılmak üzere kombiye giren su, maksimum limiti 12 lt/dk ile 14 lt/dk arasında değişen kısıtlandırıcılardan geçerek PHE'ye girer. Bu demektir ki, gerçek şartlarda bir kombi ısıtıcısında şebeke suyu maksimum 14 lt/dk ile PHE'ye girebilir. Bir diğer yandan EN 13203-Part 2- 2006 standardında tanımlanan şebeke suyu kullanım tiplerindeki maksimum kullanım, — duş + banyo olup 16 lt/dk olarak tanımlanmıştır (Şekil 1.2).

Debinin yanında su sertliği de, kirlenme oluşumunu etkileyecek en önemli parametrelerden biridir. Dünya üzerinde farklı bölgelerdeki şebeke sularının farklı su sertliklerine sahip olduğu açıkça bilinmektedir.

Çizelge 1.1 EN 13203-Part 2- 2006 Maksimum ve minimum su kullanım değerleri
(Europa, 2015)

Kullanım suyu tipi	Enerji (kWh)	45 K'lik sıcaklık artışına ait sıcak su debisi (lt/dk)
Ev içi temizlik	0.105	3 ± 0.5
Küçük	0.105	3 ± 0.5
Yüzey Temizliği	0.105	3 ± 0.5
Bulaşık Temizliği	0.315	4 ± 0.5
Bulaşık Temizliği	0.420	4 ± 0.5
Bulaşık Temizliği	0.735	4 ± 0.5
Büyük (döngü no:1)	0.525	4 ± 0.5
Duş	1.400	6 ± 0.5
Duş (döngü no:4 – no:5)	1.800	6 ± 0.5
Banyo	3.605	10 ± 0.5
Banyo (döngü no:4)	4.420	10 ± 0.5
Duş + Banyo (döngü no:5)	6.240	16 ± 0.5

Yine kombi tasarımı düşünüldüğünde, kullanım suyu talebini ve miktarını algılayan debi ölçer aygıtın minimum akış algılama seviyesi 3 lt/dk seviyesindeki kullanım suyu talepleridir. Bu değer altında bir değerde talep gelirse, kombi cihazları su geçişini algılamamakta ve herhangi bir yanma/ısıtma

işlemi gerçekleştirmemektedir. Diğer yandan EN 13203-Part 2- 2006 Kullanım suyu verimliliği standardında tanımlanan şebeke suyu kullanım tiplerindeki minimum kullanım, —ev temizliği ya da —küçük kullanımlı gibi adlandırmalarla 3 lt/dk olarak tanımlanmıştır (Şekil 1.2). Bu iki referans bilgi ışığında deneylerde ayarlanacak çözelti hattındaki debinin en alt değeri 3 lt/dk olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada, deney düzeneğinin kurulmuş olduğu Manisa Organize Sanayi Bölgesi'ndeki şebeke suyu kullanılmış olup, su sertliği belirli aralıklarla ölçülmüştür. Ölçümler 11-13 °dH aralığındaki Alman sertliği olarak görülmüştür.

Merkezi ısıtma suyu hattındaki yüksek sıcaklıkta (~85°C'ye kadar) su elde etmek için, Bosch Termoteknik firmasının Buderus Logomax GB162 100 kW'lık modeli kullanılarak deneyler boyunca sürekli olarak istenilen sıcaklıkta kullanım suyu elde edilmiştir.

Deney girdilerine bağlı olarak çözeltinin, PHE'den çıktığı sıcaklık bir çıktı olarak takip edilmiştir. Kirlenme, kullanım suyu hattı plakaları üzerinde oluşmaya başladıkça, plakalar arasında ısı geçişinin azalması nedeniyle kullanım suyu çıkış sıcaklığı zamanla azalmıştır. Bu davranışın nasıl bir eğilim gösterdiği deneylerle ortaya konmuştur.

Kaynak araştırmalarında da görüleceği üzere kirlenme seviyesini gösterecek en önemli parametre kirlenme direnci(R_f) olmuştur. Bu değer her bir deney düzenlemesiyle beraber bir aylık bir deney süresine karşılık hesaplanıp değerlendirilmiştir.

2 PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Contalı Tip Plakalı Isı Değiştiricileri

Isı geçişi sistemlerinin tasarımında, plakalı ısı değiştiricileri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ısı değiştirici tipleri avantajlı karakteristik özellikleri sayesinde kullanımda cazip hale gelmektedir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

i) Yüksek ısı performans:

Plakalı ısı değiştiricileri, gövde-boru tipi değiştiricilerle kıyaslandığında, 10°C'lik sıcaklık farklarında bile, daha iyi özellikler göstermektedir. Örneğin, plakalı ısı değiştiricilerinde elde edilen toplam ısı geçiş katsayısı (U), gövde-boru tipi ısı değiştiricilere göre üç ile dört kat daha yüksektir (Rafferty, 2006).

ii) Korozyona dirençli birçok alaşımın kullanılabilirliği:

Plakalı ısı değiştiricileri ince plakalardan oluştuğu için paslanmaz çelik ve diğer alaşım malzemelerin maliyetleri gövde-boru tipi ısı değiştiricilere kıyasla oldukça düşüktür. Bunun sebebi yukarıda belirtildiği üzere ısı değiştiricinin aynı ısı transfer kapasitesine sahip gövde boru tipi ısı değiştiricilere nazaran çok daha kompakt yapıda ve küçük boyutlarda olmasıdır.

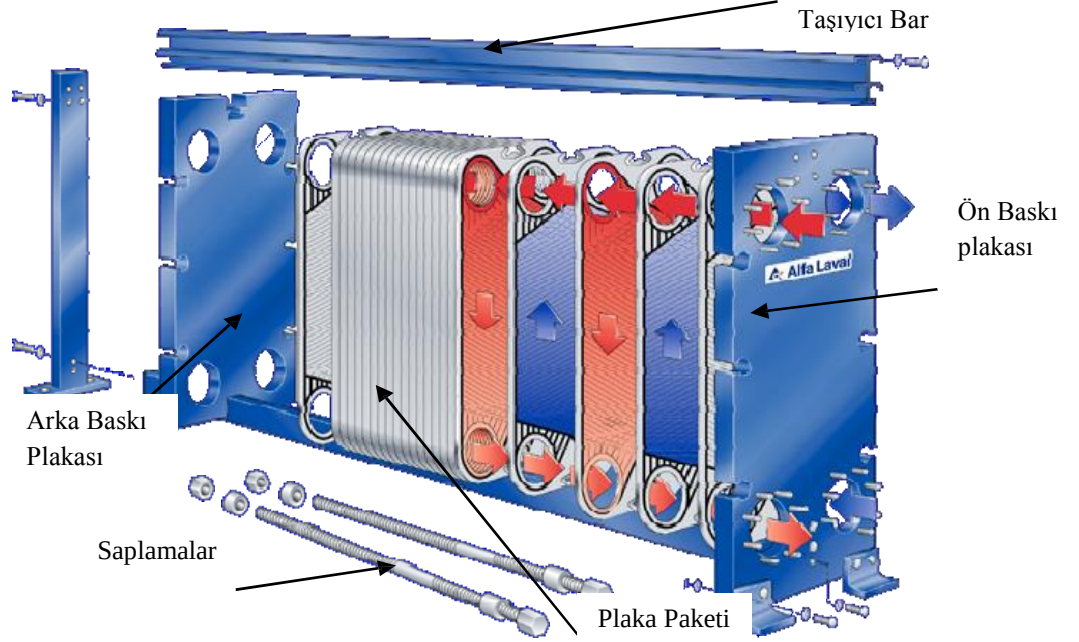
iii) Bakım kolaylığı:

Isı değiştiricinin demonte tasarımı, ısı transfer alanlarının (plakaların) rahatça incelenip, temizlenebilmesine imkân vermektedir. Üstelik söküm işlemi sadece birkaç vidanın gevşetilmesi gibi basit adımlardan ibarettir

iv) Kompakt tasarım:

Plakalı tip ısı değıştiriciler kullanıldığı alanda yer tasarrufu sağlamakta, boyutları sebebi ile tasarım kolaylığı getirmektedir. Bir plakalı ısı değıştirici için gerek duyulan hacim, gövde boru tipi bir ısı değıştirici için ihtiyaç duyulan hacimden %10-%50 oranında daha azdır (Rafferty, 2006).

Şekil 2.1’de plakalı (contalı) tip bir ısı değıştirici gösterilmiştir. Plakalı ısı değıştirici temelde iki çerçeve arasında sıkıştırılmış bağımsız plakalar serisidir. Bütün bu düzenek uzun civatalar sayesinde bir arada tutulmaktadır. Plakalar üst taşıyıcı bara asılıdır ve alt taşıyıcı bar ile yönlendirilirler. Tek geçişli bir devre için soğuk ve sıcak akış bağlantıları genellikle sabit uçlarda yer alır. Çok geçişli devrelerde ise bu bağlantılar hem sabit hem de hareketli uçlarda olabilmektedir.



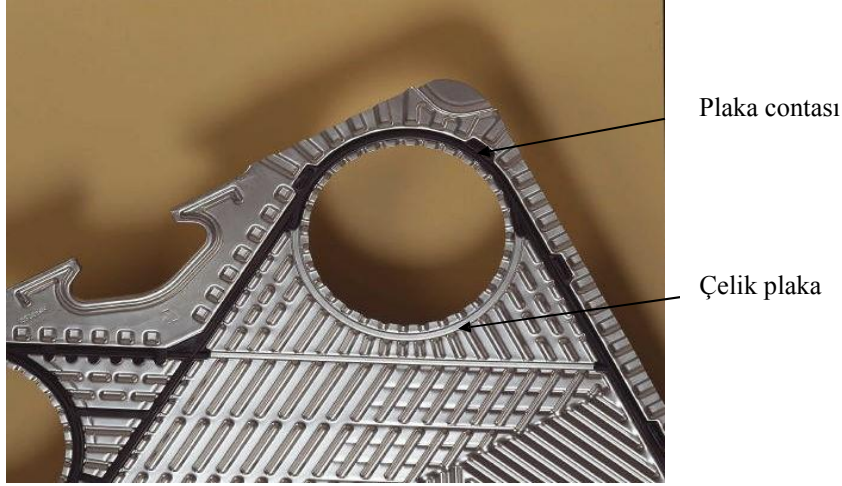
Şekil 2.1 Contalı tip plakalı ısı değıştiricinin temel elemanları
(Alfa Laval Inc.)

Şekil 2.1’de plakalı ısı değıştirici içinde akışkanın izlediği yol da gösterilmiştir. Birincil ve ikincil akışkanlar plakaların her iki yüzeyinde de birbirlerine zıt olarak akmaktadır. Su akışı contalar yardımı ile kontrol edilmektedir. Contanın konumu değıştirilerek akışkana yön verilebilmektedir. Contalar herhangi bir yıpranma durumunda akışkanların birbirleri ile karışmasını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda, bütün contaların dış yüzeyleri dış ortama açık olduğundan herhangi bir kaçak dışarıdan kolaylıkla gözlemlenebilmektedir.

2.1.1 Genel Özellikler

Gövde-boru tipi ısı değıştircisi ile karşılaştırıldığında plakalı tip ısı değıştircisi daha düşük basınç ve sıcaklık değerlerinde çalışmaktadır. Günümüzde birçok üretici firma, sıcaklık için 400°F (200°C), basınç için ise 300 Psi (20 Bar) maksimum tasarım değerleri ile üretim yapmaktadır. Bu sıcaklık ve basınç kısıtlamalarının en büyük nedeni ise kullanılan contaların dayanım özellikleridir.

Plaka alanları 0,03 m²'den 2 m²'ye kadar değişim göstermektedir. Birçok plakadan oluşan bir ısı değıştircisi için maksimum toplam ısı geçiş alanı ise yaklaşık 1207 m² olarak üretilebilmektedir. Minimum ve maximum çalışma kapasiteleri ise 0,5 kg/dak ile 22000 kg/dak aralığında değişmektedir (Rafferty, 2006).



Şekil 2.2 Contalı tip plakalı ısı değıştircisinde plaka elemanı (Alfa Laval Inc.)

2.1.2 Malzeme

Plakalı ısı değıştircilerinde için malzeme seçimi için en önemli iki unsur, plakalar ve plaka aralarında kullanılan contalardır. Daha önce de belirtildiği üzere plakalı ısı değıştircilerinin çalışma aralıklarını belirleyen temel unsur bu iki bileşendir. Bu bileşenler aynı zamanda ısı değıştircisinin kullanım ömrünü ve ilk yatırım maliyetini de belirlemektedir.

a) Plakalar

Plakalı ısı değiştiricilerin ısı geçiş yüzeylerinin imalatında çok çeşitli korozyon önleyici alaşımlar kullanılabilmektedir. Bu zellik, bu tip ısı değiştiricinin jeotermal alanlarda kullanımda büyük avantaj sağlamaktadır. 304 / 316 / 317 paslanmaz elik, titanyum, tantalyum, incaloy 825, hastelloy, inconel, alüminyum bronz ve monel en yaygın olarak kullanılan plaka malzemeleridir. Birçok retici firma 304 veya 316 paslanmaz elik kullanımını tercih etmektedir. Bunlara ek olarak özel sipariş üzerine üretilen pek çok alaşım da mevcuttur.

Plakalar için malzeme seçiminde en önemli unsur, plaka malzemesinin korozyona uğrama ihtimalidir. Çalışma sıcaklığı ile klor içeriğinin yüksek olduğu uygulamalarda korozyon direnci yüksek olan titanyum benzeri malzemeler tercih edilmeli, çalışma sıcaklığı ve klor içeriğinin nispeten daha düşük olduğu uygulamalarda ise maliyet etkin plaka seçimleri yapılmalıdır.

Plaka malzemesi olarak titanyum kullanımına en uygun örnek yüzme havuzlarındaki ısıtma sistemidir. Isıtılan havuz suyu ikinci devreyi oluşturmakta olup, hem yüksek oranda klor hem de bol oksijen içerdiğinden bu sistemlerde plaka malzemesi olarak titanyum kullanımı oldukça yaygındır.

b) Contalar

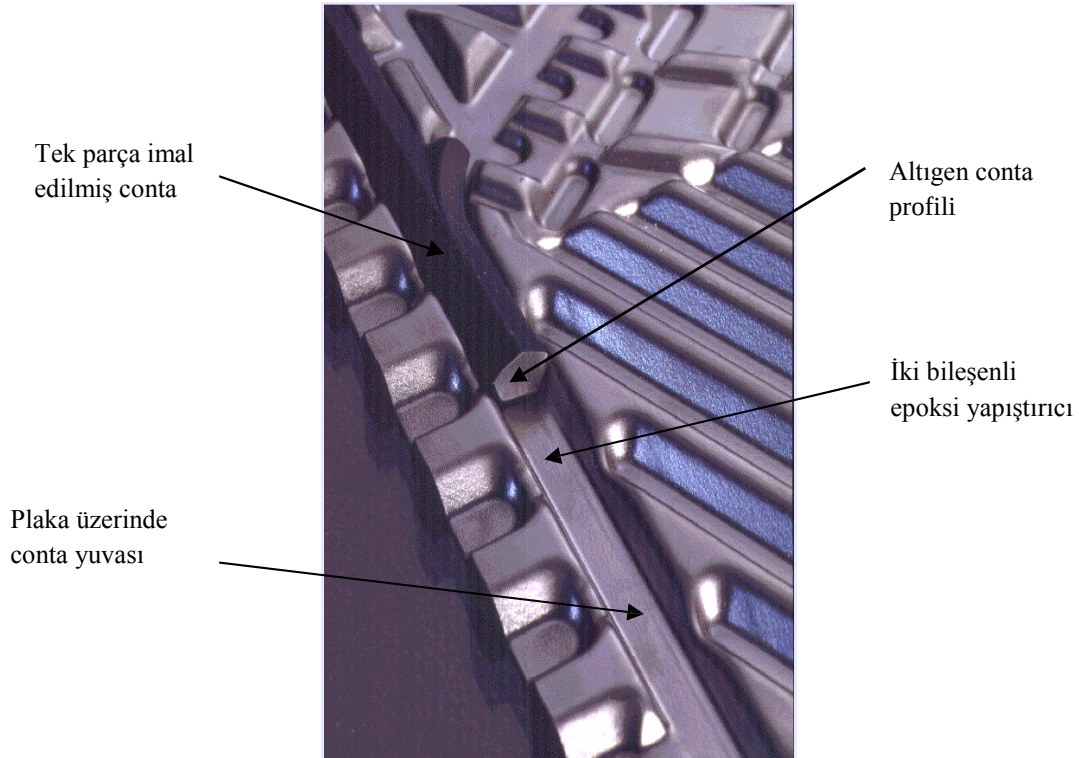
Plaka malzemelerinde olduğu gibi conta malzemesi olarak da oldukça geniş seçenekler mevcuttur. Sık kullanılan conta malzemeleri izelge 2.1’de gösterilmiştir.

Radian Inc., yaptığı testler sonucunda yüksek sıcaklık söz konusu olduğunda “Viton” isimli malzemenin en iyi performansı sunduğunu bildirmiştir. Aynı firmanın bir diğer testinde ise Buna-S isimli malzemenin yüksek basınçlı çalışma koşullarında iyi bir performans sergilediği açıklanmıştır (Ellis and Connover, 1981). Viton malzemesi en iyi ısııl performansı sergilemesine rağmen yüksek maliyeti nedeni ile ancak sıcaklık dayanımının kesinlikle gerekli olduğu yerlerde kullanılabilir.

Çizelge 2.1 Sık kullanılan conta malzemeleri ve yaklaşık sıcaklık dayanımları (Rafferty, 2006)

Malzeme	Ticari Adı	Maximum sıcaklık (°C)
Sitren-Bütadiyen	Buna-S	85
Neopren	Neopren	121
Akrilonitril-Bütadiyen	Buna-N	135
Etilen/Propilen	EPDM	149
Florokarbon	Viton	149
Reçineli Bütıl	Reçineli Bütıl	149
Sıkıştırılmış Asbestos	Sıkıştırılmış Asbestos	260

Gerek plaka malzemesi, gerekse conta malzemesinin uygun seçimi daha çok ısı değıştirici içinde akmakta olan akışkanların termo-fiziksel özelliklerinin iyi bir şekilde bilinmesi ile mümkün olabilmektedir. Şekil 2.3 plaka ve conta birleşimini ayrıntısı ile göstermektedir.



Şekil 2.3 Contanın plaka üzerine yerleşimi (Radian Inc.)

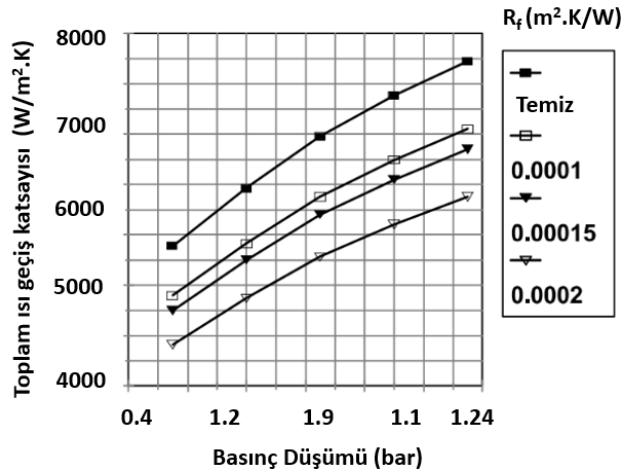
c) Çerçeveseler ve sabitleme cıvataları

Birçok plakalı ısı değıştirici çerçeveleri karbon-çelikten imal edilmekte ve genellikle epoksi bazlı boyalar ile boyanmaktadır. Sabitleme cıvataları da aynı şekilde karbon-çelikten imal edilmekte ve üzerlerine nikel kaplama uygulanmaktadır.

2.1.3 Performans

Yüksek ısıl performans plakalı ısı değıştiricilerin en avantajlı özelliğidir. Gövde-boru tipi ısı değıştiricilerle karşılaştırıldığında 3-4 kat daha yüksek toplam ısı geçiş değeri elde edilir (Rafferty, 2006). Bu yüksek performans aynı zamanda iki akışkan arasındaki çok düşük sıcaklık farklılıklarında da sistemin oldukça verimli çalışmasını sağlar.

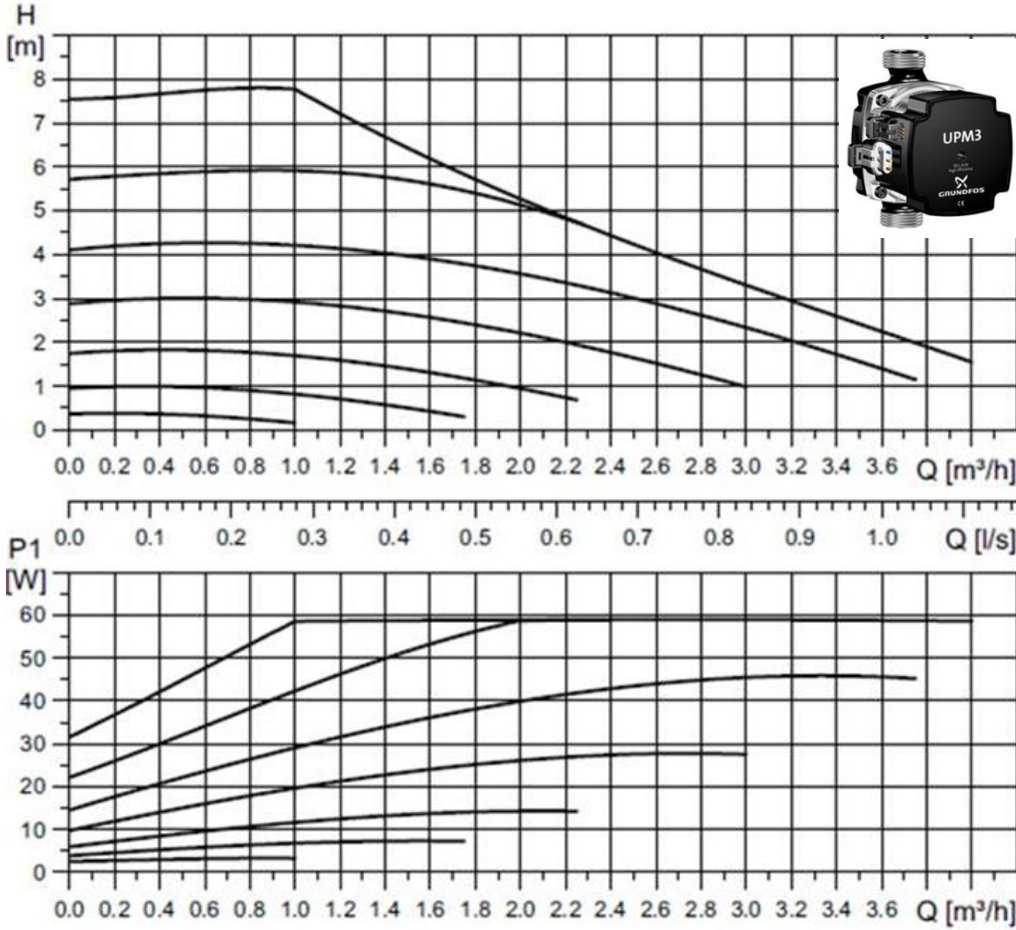
Fakat bu tip değıştiricilerin yüksek ısıl performansının yanında yüksek basınç kaybı gibi önemli bir dezavantajı söz konusudur (Engin ve Güngör, 1996). Şekil 2.4, ortalama ısı geçiş katsayısı ile basınç kaybı arasındaki ilişkiyi değışik kirlilik faktörleri üzerinden ortaya koymaktadır. Görüldüğü üzere, toplam ısı geçiş katsayısı arttıkça sistemdeki basınç düşümü de artmaktadır. Bu sebepten bir ısı değıştirici tasarımında, istenen ısıl verim ile makul düzeyde basınç düşümü arasında optimizasyon yapılması önem taşımaktadır.



Şekil 2.4 5 Basınç kaybı (ΔP), kirlilik faktörü (R_f) ve toplam ısı transfer katsayısı (U) ilişkisi (Rafferty, 2006)

Kirlenme nedeniyle plakalı ısı değıştiricilerde meydana gelen kesit daralmalarının neden olduğı basınç kayıplarından dolayı, kombi ısıtma sistemlerinde sirkülasyon pompasının daha yüksek güçlerde çalışarak elektrik tüketiminin artacağı bilinen bir gerçektir. Modülasyon özelliğı olan yeni nesil pompaların kullanımının artmasıyla, zamanla artan basınç kayıpları pompa tarafından algılanıp rpm değeri artmasıyla daha fazla basma yüksekliğı

sağlanır. Bu şekilde kirlenmenin neden olduğu basınç kayıplarının düşük debilere neden olacak etkisi ortadan kaldırılabilir. Şekil 2.5’de kombi ısıtma sistemlerinde kullanılan yeni nesil modülasyonlu Grundfos UPM3 model bir pompanın performans eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.5 Grundfos marka UPM3 tip modülasyonlu sirkülasyon pompası performans eğrisi

Oluşan basınç kayıplarını yenmek adına, daha yüksek rpm ile çalışacak olan sirkülasyon pompası daha fazla güç çekecek (Şekil 2.6), daha fazla elektrik tüketimine neden olacak (Şekil 2.7), son kullanıcı için daha fazla elektrik faturasının ödenmesine yol açacak (Şekil 2.8) ve ihtiyaç duyulan fazladan enerjinin elde edilmesi için doğaya daha fazla karbondioksit (CO_2) emisyonu salınacaktır (Şekil 2.9). Tüm bunların etkilerini ölçülebilir olarak göstermek için bir gün içerisinde 6 saat boyunca kombi ısıtma sisteminde çalışan Grundfos UPM3 tipindeki bir pompanın kirlenmeden dolayı oluşan farklı basınç kayıplarında oluşturacağı tüketimler Şekil 2.6’da hesaplanmıştır. Bu hesaplardan karbondioksit emilim değeri, termik bir santralden elektrik

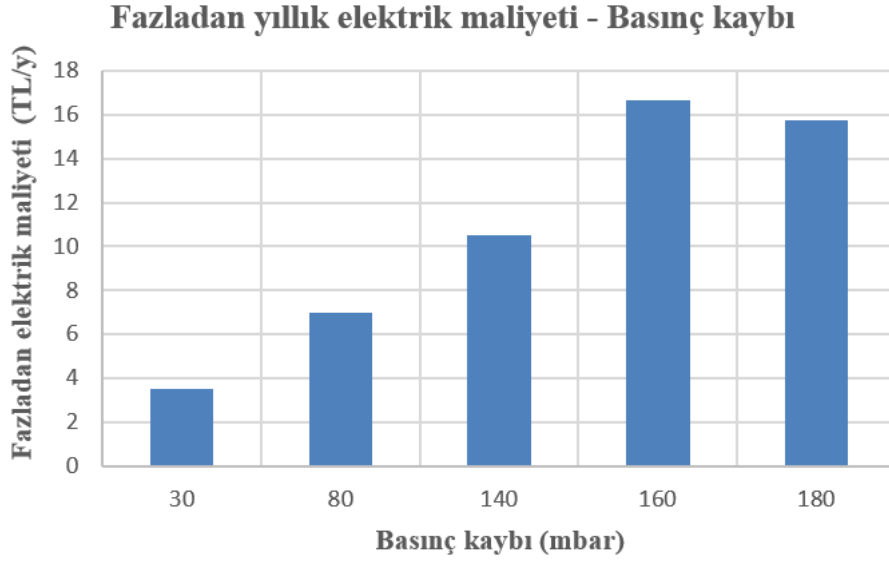
tüketiminin sağlandığı durum için verilmiştir. Sonuçlar açıkça göstermektedir ki; kireçlenme hem performans hem de ekonomik olarak kayıplara yol açmaktadır



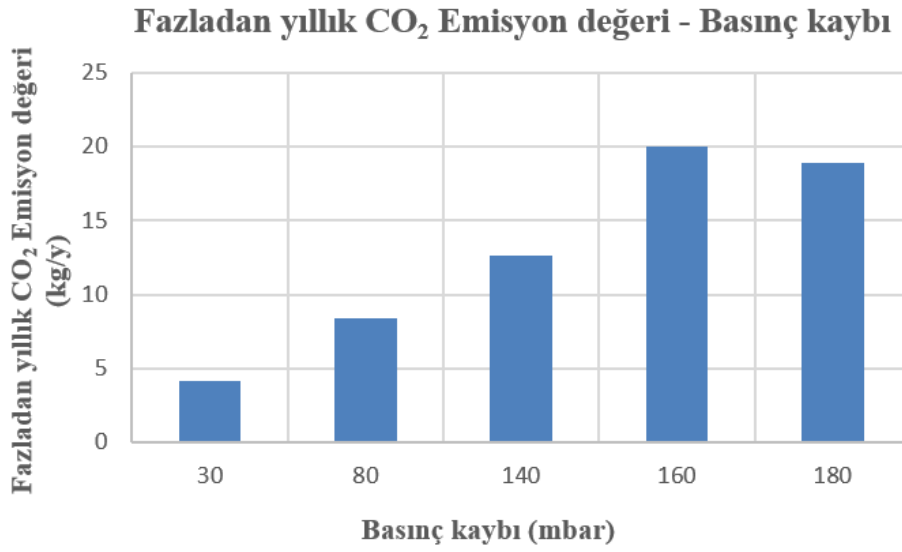
Şekil 2.6 Birikinti nedeniyle oluşan basınç kaybına karşı fazladan harcanan pompa gücü



Şekil 2.7 Birikinti nedeniyle oluşan basınç kaybına karşı fazladan elektrik tüketimi



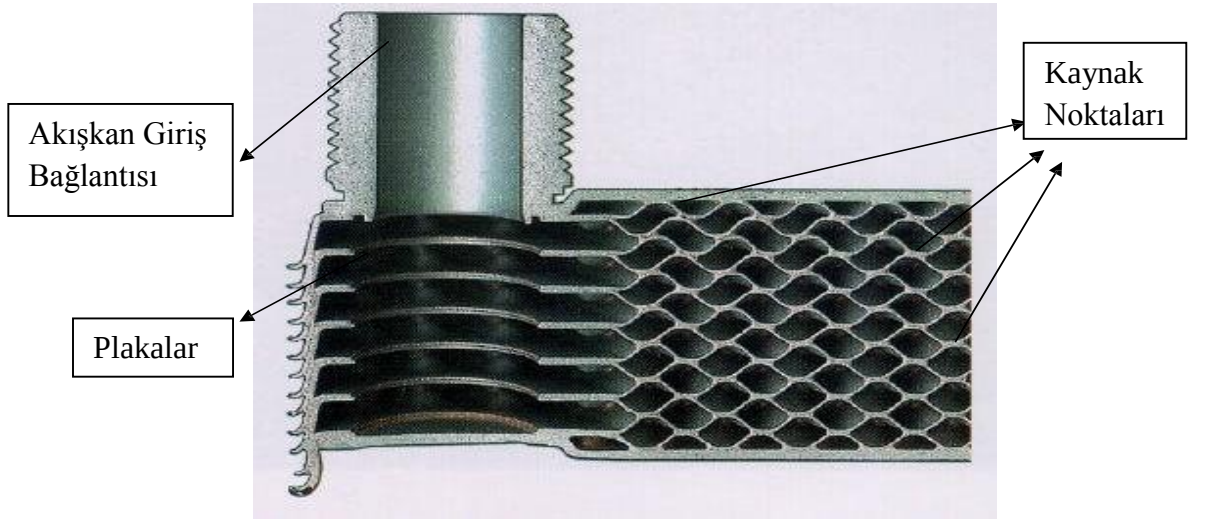
Şekil 2.8 Birikinti nedeniyle oluşan basınç kaybına karşı fazladan yıllık elektrik maliyeti



Şekil 2.9 Birikinti nedeniyle oluşan basınç kaybının fazladan getirdiği yıllık emisyon değerleri

2.2 Kaynaklı (Lehimli) Tip Plakalı Isı Değiştiricileri

Kaynaklı tip plakalı ısı değiştiriciler için de aynı contalı tiplerde olduğu gibi yüksek ısıl performans değerleri, korozyona dirençli alaşım çeşitliliği ve kompakt tasarımdan söz etmek yanlış olmayacaktır. Bakım kolaylığı konusunda ise contalı tiplere göre oldukça dezavantajlıdırlar. Isıl karakteristik bakımından contalı tiplerle birebir uyum gösterirler ve şekil 2.4'deki grafik bu tip plakalı ısı değiştiriciler için de geçerlidir.



şekil 2.10 Kaynaklı tip plakalı ısı değiştirici kesiti (Alfa Laval Inc.)

şekil 2.10'da gösterilen kaynaklı tip plakalı ısı değiştirici, contalı tip ısı değiştiricilerin başında ve sonunda bulunan çerçevesleri, cıvata ve contaları içermez. Bunun yerine plakalar birbirlerine bakır veya nikel kaynakla birleştirilmiş durumdadır. Bu da daha az karmaşık, daha düşük ağırlıkta ve çok daha kompakt bir ısı değiştirici elde edilmesini sağlar. Bu tip ısı değiştiricinin en büyük avantajı ise contalı tip olanlara karşın oldukça uygun maliyetler ile imal edilebilmeleridir. Bu imalat tekniği getirdiği avantajlarla birlikte, plakaların sökölüp değiştirilmesine veya temizlenmesine imkân vermemesi gibi bir dezavantaja da sahiptir. Aynı zamanda kullanım esnasında plaka eklenmesi ve çıkartılması da mümkün olmadığından ısı değiştiricinin kapasitesin ayarlanmasına da imkân yoktur.

Isı değiştiricinin temizlik imkânı kısıtlı olsa da bu tip ısı değiştiricileri içinde geçiş yapan akışkan oldukça yüksek türbülansla akmakta olduğundan, ısı geçiş alanlarının kirlenmesi de gövde-boru tipi ısı değiştiricilere göre oldukça düşük seviyededir (Yılmaz ve omaklı, 1999).



şekil 2.11 Kaynaklı tip plakalı ısı değiştirici (Alfa Laval Inc.)

2.2.1 İmalat

Kaynaklı tip ısı değiştiriciler, bakır veya nikel kaynak malzemesinin, plaka birleşim yerlerine çok yüksek sıcaklık ve vakum altında tatbik edilmesi ile elde edilir (Shah ve Sekulic, 2003). Plaka birleşim yerlerinden ayrıca, plaka etrafına da aynı işlem uygulanır (şekil 211). Sızdırmazlık işleminin contalar yerine bakır veya nikel dolgu malzemesi ile gerçekleştirilmesi, kaynaklı tip ısı değiştiricilerin daha yüksek basınçlar altında çalışmasına imkân tanır.

2.2.2 Performans

Contalı tip plakalı ısı değiştiricilerde çalışma şartlarını olumsuz etkileyen en önemli öğe olan “conta” malzemesi kaynaklı tiplerde bulunmadığından, bu

tip ısı değiştiricilerin çalışma aralıkları daha geniştir. Contalı tiplerde genellikle maksimum 20 bar ve 200°C olan basınç ve sıcaklık değerleri kaynaklı tip ısı değiştiricilerde, kaynak malzemesinin özelliklerine göre 30 bar ve 400°C olabilmektedir. Aynı zamanda 0,5 kW ile 400 kW arasında değişen çalışma menziline sahiptirler (Rafferty, 2006).

2.2.3 Kullanım yeri

Kaynaklı tip plakalı ısı değiştiricileri, contalı tiplerin kullanıldığı ve işlem gören akışkanın içindeki, tortu, oksijen ve korozyon yaratıcı diğer etkenlerin ısı değiştiriciyi kullanım dışı bırakmayacak uygun seviyede olduğu her türlü uygulamada kullanılabilir. Özellikle soğutma sistemleri ve ısı pompalarında, gerek buharlaştırıcı gerekse yoğuşturucu olarak yaygın biçimde kullanılır. Aynı zamanda kızgın su kullanılan ısıtma sistemlerinde kapalı devre su sistemleri için uygun bir ısıtıcıdır. Sanayi tesislerinde, başta yağ soğutma amaçlı kullanımı olmak üzere yaygın bir kullanımı vardır. Nikel kaynaklı ısı değiştiricilerin piyasaya çıkması ile daha önce kullanım yeri olmayan jeotermal uygulamalarda da yerini almıştır.

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüze kadar plakalı ısı değıştirciler üzerine sayısız çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasına yönelik olarak, plakalar üzerinde kirlenme ile ilgili çalışmalar araştırılıp bu bölümde özetlenmiştir. Özellikle deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile gerçekleştirilen çalışmalar daha fazla incelenmiştir.

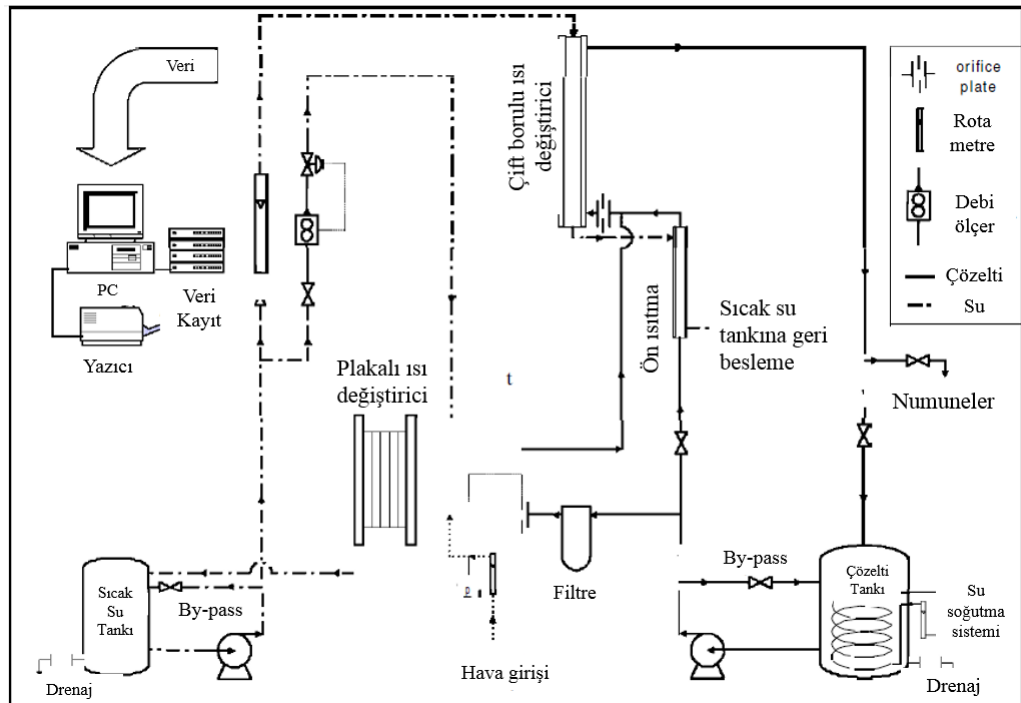
1990 yılında Yeni Zelanda Ticaret Bakanlığının, yaklaşık 200 farklı şirketin 2000 ısı değıştirci üzerinde yaptığı bir ankette, kirlenme probleminin çok büyük bir sorun oluşturduğu grlmştir. Bu ankette incelenen ısı değıştircilerin %14'ünün plakalı ısı değıştirci olmasından dolayı, kirlenmenin oluşumunun arkasındaki mekanizmayı anlamak ve mevcut plakalı ısı değıştirci tasarımlarını kirlenme oluşumunu azaltacak şekilde geliştirmek önemli bir hal almıştır.

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, plakalı ısı değıştircilerde akışkan giriş ve çıkış bölgelerindeki akış dağıtıcıların önemi ortaya konulmuştur. Örneğin APV TR1 tipi ısı değıştircilerinin giriş ve çıkışlarındaki akış yönlendiricilerinin iyileştirilmesi ile Alfa Laval P01 tipi ısı değıştircilere kıyasla daha yüksek ısı transferi ve daha düşük basınç kaybı değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, plaka tiplerindeki akışı etkileyen tasarım farklılıkları, plaka kanallarındaki kirlenme oranlarını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bu nedenle, akış dağılımının kirlenme üzerine olan etkisini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemek son derece önemlidir.

Bu farklılıkları incelemek amacı ile, Kho ve Müller (Kho ve Müller, 1999) bir çalışmasında düz bir plakalı ısı değıştircisi (PHE) ile beraber, farklı akış tiplerine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmış PHE plakalarının kirlenmeye olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca bilgisayar destekli akış analiz programları kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel bulgular kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmada, plakalı ısı değıştircisinde kristalizasyon kirlenmesi olarak CaSO_4 'nin davranışı incelenmiştir. Burada, CaSO_4 'n ters çözünürlüğe sahip olan bir tuz olduğu anımsanmalıdır. şekil 3.1'de deney

düzeneginin detaylı bir akış çevrimi gösterilmiştir. Deney düzeneginde her ne kadar 2 adet PHE ve 1 adet boru tipi ısı değiştiricisi bulunsa da, incelemede ısıtıcı akışkan olarak su ve proses akışkanı olarak CaSO_4 çözeltisi dikkate alınmıştır. Hem suyun hem de çözeltinin kapalı akış çevriminde dolanımı sağlanmıştır. Isıya dayanıklı polimer tüpler ve contalar hariç deney düzeneginin tamamı paslanmaz çelikten yapılmıştır.

Deney düzeneginin PHE kısmı, üç adet akış kanalından oluşturulmuştur. Bu düzenek, iki adedi en dıştaki plakalar olmak üzere toplam dört adet plaka içermektedir. Çözelti akışının olduğu kanal, sıcak su akışının olduğu iki adet kanalın ortasında konumlandırılmıştır. Çökeltme deneylerinin çoğunda Alfa Laval P01 ve Alfa Laval M3 plakaları kullanılmış olmasında rağmen, bu çalışmada kullanılan PHE'ler 2 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik ve düz plakalardan ibarettir. Tüm deneylerden önce, düz plaka yüzeyleri zımparalanarak, tüm deneylerdeki yüzey pürüzlülük şartları eşdeğer seviyeye getirilmiştir.



Şekil 3.1 Deneysel düzenegın şematik bir diyagramı (Kho, Müller-Steinhagen, 1999)

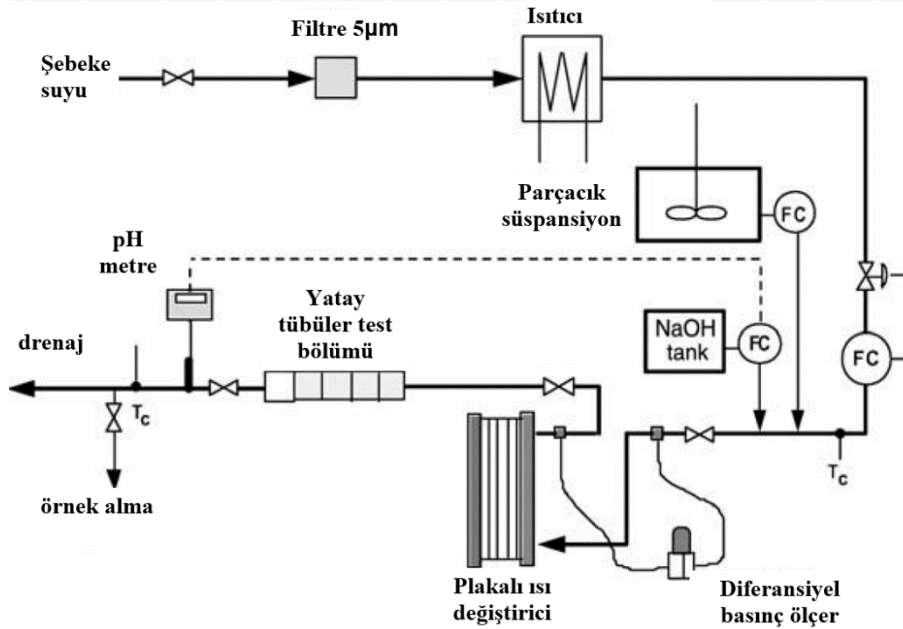
Çalışmada çökelme görsel olarak zamana bağlı izlenmiştir. Çökelme ilk olarak, çözeltinin plaka çıkış noktasının karşısındaki sağ üst plaka köşesinde oluşmuştur. Bunun nedeni, yüksek sıcaklık ve düşük akış hızlarıdır. Daha sonra bu bölgenin tam karşı çaprazındaki, bir diğer düşük hızlı akışın olduğu sol alt plaka köşesinde çökelme oluşumu başlamıştır. Plaka kenarlarında başlayan çökelme, merkeze doğru büyümeye başlamıştır. Kirlenme ana akışın olduğu bölgeye doğru ilerlemiş ve büyümüştür. Büyüme oranı plakanın sağ üst bölgesinde daha fazla olmuştur. Bunun nedeni de çözelti sıcaklığının bu bölgede daha yüksek olmasıdır.

Farklı dağıtıcı tasarımlarının çökelme üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla, çeşitli şekillerdeki tasarımlar düz plaka üzerine uygulanmıştır. 5 farklı plaka tasarımı aynı deney koşulları altında test edilmiştir. Büyük çökelti bölgelerinin olduğu yerlerin, uzun yönlendiricilerin etrafındaki zayıf bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun yönlendiricilerin, kısa yönlendiricilere kıyasla çökelme yönünden zayıflığını ortaya koymaktadır. Çökelme oluşumu ilerlemeye başladıkça, akışkanın plaka üzerindeki akış karakteristikleri tamamen değişmeye başlayabilir. Örneğin çökelme artışı, plakanın verimli olduğu genişliği düşürebilir, bu da akış bölgesinin kesitinin azalmasına neden olur. Bunun yanında, uzun yönlendiricilerin kullanılması kanallardaki basınç kayıplarının artmasına da neden olur. Tüm bu nedenlerden dolayı, düşük akış hızına ve yüksek basınç kayıplarına sahip bölgelerin oluşumunu engellemek için, bu yönlendiricilerin tasarımına ayrıca dikkat edilmelidir. Tasarımda vurgu sadece giriş bölgesindeki yönlendiricilerde değil, düşük akış hızına sahip diğer bölgelerin oluşumuna da verilmelidir. Ayrıca, uzun yönlendiricilerden ziyade kısa yönlendiriciler tasarımda tercih edilmelidir.

Çalışmanın devamında, düz ya da yönlendiricili plakalardaki akış, deneysel çalışmalara paralel olarak aynı şartlar altında CFD analizi ile de incelenmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara olan yakınlığı gözlemlenmiştir. Düz plakalarda daha homojen akış dağılımının sağlanması için uygulanabilecek yollardan bir tanesinin, plaka tasarımlarını tekrar gözden geçirerek çökelmenin meydana geldiği giriş ve çıkış bölgelerinde, özellikle köşelerde oluşan girdapları yok etmek olduğu sonucu elde edilmiştir.

Bir başka deneysel çalışma Andritsos ve Karabelas (2003) tarafından yürütülmüş, çalışmada üç farklı tipteki ticari partiküllerin plakalı ısı değiştiricisi içerisindeki CaCO_3 kireçlenme oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karmaşık kireçlenme mekanizmasının basite indirgenmesi amacıyla, deneyler izotermal koşullarda yapılmıştır. Testler sadece başlangıç çökeltme koşulları için yürütülmüştür. Çalışmalar için deneysel bir düzenek kullanılmış olup (Şekil 3.2), deneylerde şebeke suyu kullanımı tercih edilmiştir. pH seviyesi NaOH eklemesi ile ayarlanmıştır. Su öncelikle bir filtreden geçirilerek muhtemel partiküllerden arındırılmış, daha sonra bir elektrikli ısıtıcıdan geçirilmiştir. Akış debisi otomatik kontrol vanası ile kontrol edilmiş olup, birbirine seri olarak bağlanan iki adet rotametre ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Su sıcaklığı, plakalı ısı değiştiricisi üzerinde konumlandırılmış, K tipi termokupllar sayesinde ölçülmüştür. Partikül süspansiyonu (damıtılmış su içerisinde bulunan ticari partiküllerin pH değeri 8'e ayarlanmıştır) sürekli olarak karıştırılmış ve akış hattına FMI pompa vasıtasıyla yollanmıştır.

Şekil 3.2 Deneysel Düzenek Şematik Diyagramı (Andritsos, Karabelas, 2003)

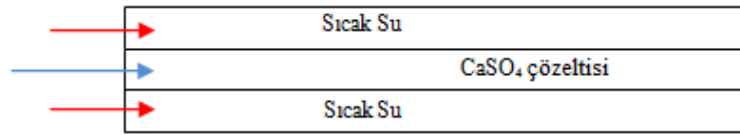


PHE sekiz adet plakadan oluşmakta ve aşırı doymuş su, üç adet akış kanalı arasından geçmektedir. PHE çıkışında akış yönünde, tübüler test bölümü bağlanarak, belirli zaman aralıklarında kütle birikimi ölçülerek, aynı bölgedeki çökeltme miktarları kıyaslanmıştır.

Akış hızının, kireçlenme yapısı üzerinde önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir. Ancak saf CaCO_3 çökmesinin olduğu durumlarda, yüksek akış hızının daha yüksek çökme oranı ile sonuçlandığına da çalışmada değinilmektedir. Bunun nedeni çökme prosesinin kütle transferi ile kontrol edilmesidir. Deneylerin sonucunda düşük derişimdeki aragonit partiküllerinin varlığı sadece sinerjik bir role (çökelen kütleyi önemli seviyede arttırmaktadır) sahip olmamakla beraber daha düşük aşırı doyma değerlerinde çökmeyi tetiklediği izlenmiştir. Ayrıca, çökme oluşumunun artmasının PHE içerisindeki akış yönünden bağımsız olduğu ancak artan akış hızı ile bu oluşumun azaldığı kaydedilmiştir. Özellikle aşırı düşük doygunluk seviyelerinde, aragonit partiküller çökmeye neden olan nükleonlar gibi davranabildiği ve artan akış hızları başlangıçta çökelen partiküllerin bir miktarını çökme bölgesinden uzaklaştırabildiği rapor edilmiştir. Küçük TiO_2 partiküllerinin ya da geniş kalsit kristallerinin (100 mg/l'ye kadar) eklenmesinin çökme oluşumunda önemli bir etkiye neden olmadığı belirtilmiştir.

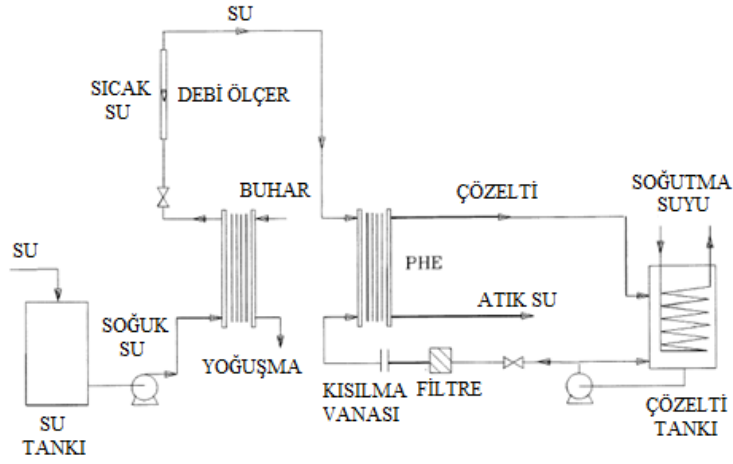
Fahmy ve arkadaşları (2012), malzeme test reaktörlerindeki (MTR) plakalı ısı değıştiricilerin kristalizasyon çökme prosesinin modellenmesini amaçlayan bir çalışma sunmuştur. Model çalışmasının geliştirilecek bir mühendislik denklem çözümleme programı ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, çalışmada birincil ve ikincil çevrimlerin her birinde çökelti kalınlığının oranı ve akışkan hızının çökme direncine etkileri de incelenmiştir. Oluşturulan modelde Kern-Seaton modeli temellerine dayanılmış ancak kalsiyum sülfat çökmesinde zaman, derişim, akışkan hızı gibi parametreler de dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda, derişiminin artmasıyla akışkan partiküllerinin de artmakta olduğu ve bunun da çökelen kalsiyum sülfat ağırlığını arttırdığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar detaylı incelendiğinde, akışkan hızının, hem çökelti taneciklerinin ısı transferi yüzeyine difüzyonunu kolaylaştırdığı hem de çökelen partikülleri yüzeyden uzaklaştırmaya yardımcı olduğu görülmüştür. Akışkan hızlarının düşük olduğu bölgelerde çökmenin arttığı kanıtlanmıştır. Diğer taraftan yazarlar akış hızının artmasıyla, ısı performansta da bir artış olduğunu sonuçlarında rapor etmektedirler.

Bipan Bansal, Hans Müller-Steinhagen, Xiao Dong Chen'in (2000) yürütmüş olduğu bir başka deneysel çalışmada iki farklı geometriye sahip PHE'de CaSO_4 çökmesi incelenmiştir. Çökme süreci kapalı çevrimde gerçekleşmiş ve PHE dışında oluşan çökteleri tutmaya yarayan filtre kullanımına uygun test çözeltisi kullanılmaya çalışılmıştır. Çökelmenin başlıca parametreleri olan akış hızı, yüzey sıcaklığı ve çözelti derişimi dikkate alınarak plaka tasarımı ile çökelti yatkınlığı arasındaki bağ açıklanmaya çalışılmıştır. Her bir testten sonra PHE' ler açılarak çökeltilerin nerelerde olduğu ve miktarları gözlemlenmiştir. Çalışmada çökme hızını belirlemek için çökeltilerin kimyasal yapısı incelenmiştir. Araştırmacılar deneylerinde üç akış kanalına sahip PHE kullanmış ve ortadaki kanaldan CaSO_4 çözeltisi, etrafındaki kanallardan da sıcak su geçirmişlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 PHE'de deney akış kanalları (Bipan et al. , 2000)

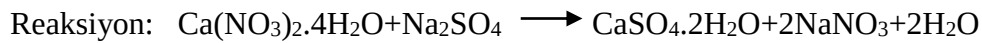
Kullanılan deney düzeneği ile sıcaklık (K tipi termokupl), basınç farkı ve debinin kontrolü, otomatik kontrol düzeneği ile sağlanmış ve bilgisayar veri kaydı sistemi ile de sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Deney Düzenegi (Bipan et al. , 2000)

Çalışmalar süresince CaSO_4 çözeltinin PHE 'de çökelerek çeşitli yerlerde daralmalara neden olduğu gözlenmiştir. Bu durum ayarlanan debi miktarlarını değiştireceğinden gerektiğinde sisteme müdahale edilerek düzeltmeler yapılmıştır. Oda sıcaklığında kalsiyum sülfatın çözünmesi denendiğinde çözünmeyen katı partiküllerinin fazlalığından dolayı iki farklı bileşiğin tepkimeye sokulmasıyla problem giderilmeye çalışılmıştır.

- Kalsiyum nitrat tetrahidrat, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Sodyum sülfat, Na_2SO_4

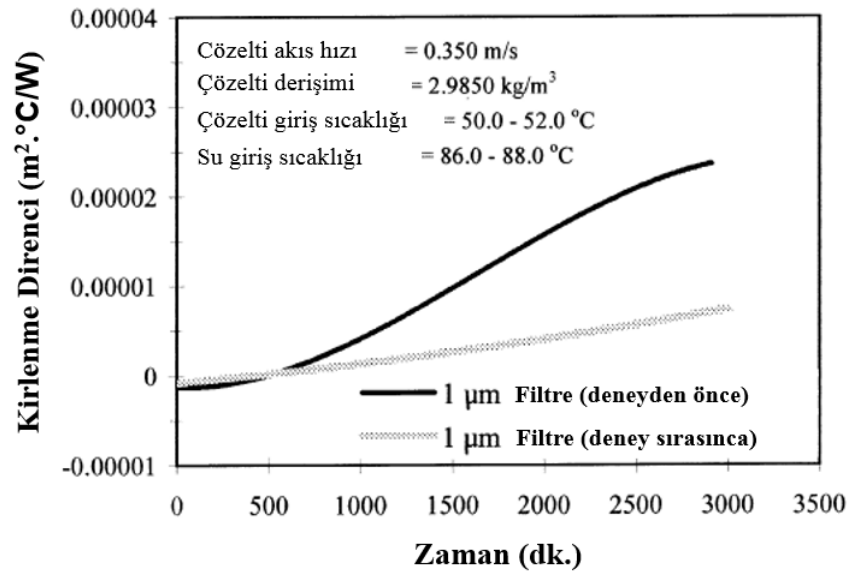


Bu reaksiyon ile kalsiyum sülfat herhangi bir zorluk olmadan, kalsiyum nitrat ve sodyum sülfatın sudaki yüksek çözünürlük özelliği sayesinde hazırlanabilir. Ayrıca deney sırasında çözünmemiş partiküllerin miktarı minimize edilmesi sağlanmıştır.

Deney düzeneğinin kapalı çevrimde çalışması nedeniyle katılaşmaya uğramış bir çözeltinin akışın etkisiyle tekrar tekrar PHE yüzeyine nüfus ederek ısı transferine etki etmesini önlemek için bir filtreleme önlemi alınmıştır. Deneylerde kullanılan iki farklı ısı değiştiricisi de çavuş tipi plakalara sahiptir. İkinci tip ısı değiştiricisini diğerinden ayıran özellik, akışın giriş ve çıkış bölgesindeki toplayıcı ve dağıtıcı tasarımlarının farklılığıdır. Ayrıca aynı

verilerle ancak düzeneklerin birinde filtre kullanılmak üzere test edildiğinde filtre kullanılmadığı durumlarda sertleşme başlangıcına kadar geçen süre kısalmış ve çökelme direnci artmıştır ( ekil 3.5).

Aynı  alışma koşulları altında, farklı ısı değiştiricisi plakaları çökelme açısından farklı performans gösterebilirler. Isı transferi bölgelerinde benzer tasarımlar olmasına rağmen, deneylerde ikinci tip plakadaki çökelme miktarı birinci tip plakalıya göre daha fazladır. Bunun nedeni giriş bölgesindeki akış dağıtıcı    enlerin varlığıdır.

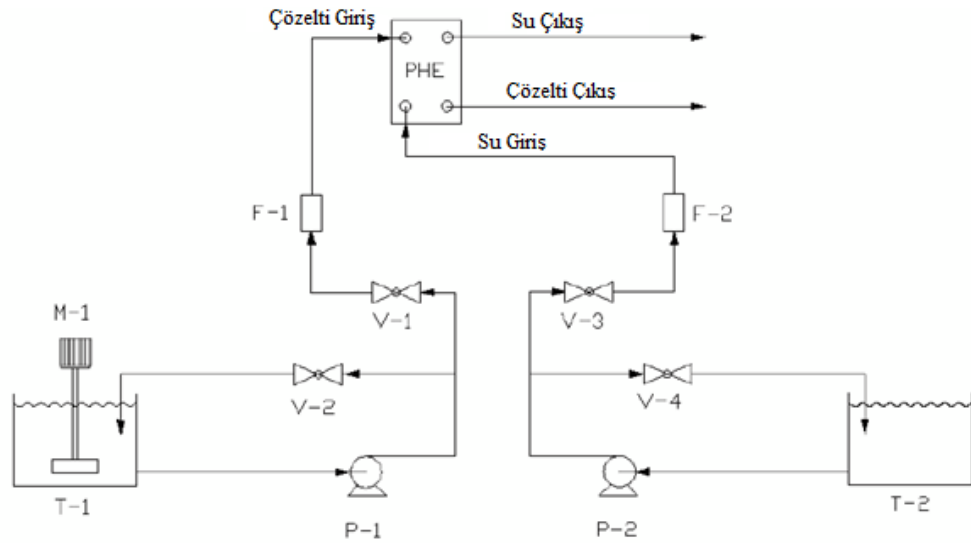


Şekil 3.5 1  m filtreli ve filtresiz deneylerde zamana bağlı kirlenme direnci (Bansal ve arkadaşları, 2000)

Quan Zhenhua ve arkadaşları (2008) anlık kirlenme direncini g zlemleyebilecekleri bir deney düzeneği oluşturmuşlar ( ekil 3.6) ve çökelme davranışlarını farklı faktörlerin etkisi altında incelemişlerdir. Bu faktörler arasında yine akış hızı, su sertliği, alkalinite, çözelti sıcaklığı ve duvar sıcaklığı gibi parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler doğrultusunda sonuçların eldesi için tüm veriler özel bir bilgisayarda 20 kanallı bir veri sistemi yardımıyla toplanmıştır. Çalışma sıvısı olarak saf su seçilmiş ve çökelme direncini hesaplamak amacıyla dört farklı pozisyonadaki sıcaklıklar  l  m şt r (Soğutma suyu giriş ve çıkışı, sıcak su giriş ve  ıkışı). Bunun yanında sıcaklık, basınç ve basınç farkı gibi parametreler farklı noktalarda  l  m şt r. Tüm deney

çalışmaları sırasında plakalı ısı değıştiricisindeki çökelmeyi incelemek amacıyla üç boyutlu modellerden elde edilen bilgiler ışığında en fazla çökelmenin, sıcaklığın ve akış hızının en yüksek olduğu bölgelerde (plakanın ikinci veya üçüncü oluk başlangıcında) olduğu görülmüştür.

Akış düzenleri ve akışkan profillerini incelemek üzere modelleme çalışması ile birlikte şekildeki deney düzeneği kurulmuş (Şekil 3.7) ve kalsiyum karbonat çökelmesinin en az gerçekleştiği plaka açısının bulunması amaçlanmıştır. Şekildeki düzenekte plakalar 10/10, 55/10 ve 55/55 gibi farklı açılarla yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Çökelme incelemeleri için PHE deney düzeneği

Model çalışmalarında akış düzeni karakteristikleri ve akışkan dağılımının plaka açısıyla olan ilişkisi incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda model sonuçları, deneysel sonuçlarla uyumluluk sağlamış ve iki yaklaşımla da yüksek giriş hızının ve plakalar arasındaki büyük açının çökelmeyi oldukça azalttığı sonucuna varılmıştır. Çökelme, düşük hız ve akışkan dolaşımının olduğu bölgelerde gözlenmiştir. Çalışma sonucunda deneyde kullanılan GX-12 plakasına en uygun tasarımın 55/55 kesişim açısı olduğu saptanmıştır.

Genel olarak yukarıda incelenen akademik yayınlar, deneysel içerikleri dikkate alınarak projede yapılacak olan çalışmalara ışık tutabilmesi açısından seçilmiş ve incelenmiştir. Kurulan deney düzenekleri kapalı çevrimler olarak

tasarlanmıştır. Çökelme kimyasalı olarak, genelde CaSO_4 , özellikle de CaCO_3 seçilerek deney çözeltilerinin su sertlik seviyeleri kontrol altında tutulmaya çalışılmıştır. Çökelme sürecinin ve analizinin karmaşıklığından dolayı doğal şartlarda çökelmeye neden olan birden çok kimyasal tuz bulunmasına rağmen, literatür çalışmalarında konunun daha sade incelenebilmesi için genellikle tek bir kimyasal tuz deneylerde kullanılmıştır. Yine endüstriyel kullanımlar dikkate alındığında, plakalı ısı değiştiricilerinin birden çok plaka içermesine rağmen, akademik çalışmaların çoğunda konuyu mikro seviyede inceleyebilmek için, bir sıcak akış kanalı bir de soğuk akış kanalı içeren kontrol alanları hem deneylerde hem de hesaplamalı analizlerde incelenmiştir. Deney düzeneklerinin bazılarında, sistemde oluşan çökeltilerin PHE bölgesinden koparak, tekrar kapalı çevrime karışmasını engellemek için sisteme filtreler konulmuştur. Deneysel çalışmaların çoğunda, bilgisayar destekli akış analizleri ile hem sıcaklık hem de akış hız dağılımları dikkate alınarak, deneysel sonuçlarla tutarlılıkları sorgulanmıştır. Yapılan incelemelerin bütününe bakıldığında, sıcaklığın yüksek olduğu ve akış hızının düşük olduğu bölgelerde çökelmenin sıklıkla oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeler, soğuk akışkanın PHE'yi ısıtarak terk ettiği ve girdap (akış hızının düşük) bölgelerinin oluştuğu çıkış noktalarına yakın köşeler olarak raporlanmıştır. Çökelme problemine en önemli etkisi olan bir diğer parametre bilindiği üzere su sertliğidir. Yapılan çalışmalarda birim su hacmindeki CaCO_3 veya CaCO_4 miktarı arttırılarak, kirlenme direncine olan etkileri araştırılmıştır. İncelenen konulardan biri de alkalinite seviyelerinin, çökelme üzerindeki etkileri olmuştur. Bu çalışmalarda deneylerde şebeke suyu kullanılmıştır ve sisteme sürekli olarak NaOH eklenerek pH seviyesi ayarlanmıştır. Alkalinitenin artmasıyla, çözelti sıcaklığı ve ısı geçiş yüzey sıcaklığının artmasıyla; çökelme hızının ve asimptotik kirlenme direncinin arttığı görülürken, çökelme başlama süresinin kısaldığı görülmüştür. Birçok araştırmada da, PHE plaka tasarımının çökelme mekanizmasında nasıl rol aldığı ortaya konmaya çalışılmıştır. Plaka tasarımındaki açılar ve temas noktalarının akış profillerine doğrudan etki etmesi nedeniyle, artan ve azalan hızların çökelmeyi açıkça etkilediği hem deneysel hem de hesaplamalı akış analizleri ile görülmüştür.

4 ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE KİRLENME DAVRANIŞI

4.1 Giriş

Kirlenme, genellikle "istenmeyen malzemelerin, sistem elemanlarının yüzeyinde birikimi" olarak tanımlanır. Kirlenme oluşumu; çökelme, kristallenme, korozyon, kimyasal tepkime, biyolojik kirlenme biçiminde meydana gelir. En sık karşılaşılan kirlenme türü çökelme kirlenmesi kristallenme kirlenmesi ve kimyasal tepkime kirlenmesidir. Bu üç kirlenme mekanizması ayrı ayrı veya birlikte görülebilir. Bu durum, yüzeyin tasarlandığı sıcaklık farkı koşullarında, ısı geçiş kapasitesini ciddi bir şekilde kötüleştirebilir. Isı geçiş yüzeylerinde kirlenme oluşumu, ısı geçiş cihazlarındaki en önemli problemlerden biridir ve fazlasıyla karmaşık bir olaydır. Temelde kirlenme; kararsız durum, momentum, kütle ve ısı geçişi gibi faktörlerin bir arada meydana geldiği bir problem olarak nitelendirilebilir. Bu probleme bazen kimyasal ve biyolojik süreçler, çözünürlük ve korozyon süreçleri de dâhil olabilir. Kirlenme, ısı geçişi sırasında gerçekleşen ve çözülmemiş temel problem olarak tanımlanmaktadır.

Birçok araştırmacıya göre kirlenme akışkan ya da katı herhangi bir yüzeyde meydana gelebilir ve ısı geçişini azaltmaktan başka olumsuz etkileri de olabilir. Tasarım ve işletme sırasında meydana gelen bu problemin varlığı evrensel olarak kabul edilmektedir. Kirlenme oluşumu, cihazların işletme sürecini iki şekilde etkileyebilir; İlk olarak, kirlenme katmanının düşük ısı iletkenliği vardır. Bu durum, ısı geçişine karşı olan direnci artırır ve ısı değiştiricilerinin verimliliğini azaltır. İkinci olarak, kirlenme oluşumu ilerledikçe akış kesit alanı azalır ve dolayısıyla, cihaz boyunca meydana gelen basınç düşüşünde bir artış meydana gelir.

Isı geçiş yüzeylerindeki kirlenme oluşumu, endüstride geçerliliği kabul edilen fakat yeterli derecede anlaşılamayan bir olaydır. Çoğunlukla kimya sanayinde ve süreç endüstrilerinde meydana gelir. Örneğin; petrol rafinerileri, pompa ve kağıt üretimi, polimer ve lif üretimleri, desalinasyon, gıda işleme, süt endüstrisi, elektrik üretimi ve güç geri kazanımı bu endüstrilerden bazılarıdır.

Kirlenme, birçoğu tarafından ısı değiştircilerinin tasarımındaki en bilinmeyen faktör olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, yıllar boyunca birikmiş işlemsel tecrübeler ve literatürde kirlenme oluşumu üzerine yapılan toplam çalışmaların zenginliğine rağmen böyledir. Anlayıştaki bu eksiklik, endüstriyel cihazlarda meydana gelen kirlenme oluşumunun karmaşık yapısından kaynaklanmaktadır. Endüstrideki süreç buharlarının ve işletme koşulların çok çeşitliliği, kirlenmenin görüldüğü birçok durumu özgül kılmaktadır. Bu yüzden bu problemlerle ilgili genel bir analiz ifade etmek güçtür.

Genel olarak, verimli bir şekilde ısı geçişinin sağlanabilmesi, birçok endüstriyel sürecin en belirleyici özelliğidir. Bundan dolayı; ısı geçiş mekanizmalarına dair anlayışı geliştirmek, ısı değiştirici tasarımlarına uygulanabilecek uygun teknikleri ve bağıntılarını geliştirmek ağırlıklı olarak ele alınan konulardır. Bunun yanı sıra, ısı değiştircilerindeki yüzey kirlenmesi problemine çok fazla önem verilmemektedir.

Bu bölümün başlıca amacı, kirlenme probleminin içyüzüne dair bir takım bilimsel ve teknolojik bakış açıları sağlamaktır. Problemin ve yüzeyde kirlenme oluşumunun neden olan mekanizmaların daha iyi anlaşılması, bazı durumlarda azaltılmalarına ve hatta yol edilmelerine imkân sağlayabilir.

Kirlenme, sıcaklık ve hız gibi işlemsel koşullarla birlikte, elde edilen akışkanların ve onların bileşenlerinin bir sonucu olarak meydana gelebilir. Neredeyse her katı ve yarı katı malzeme, ısı değiştircide kirlenme oluşumuna yol açaabilir. Endüstriyel işlemlerde kirlenme oluşumu olarak karşımıza çıkabilecek bazı malzemeler şunları içermektedir

İnorganik malzemeler

- Havadan gelen toz ve kum taneleri
- Sudan gelen balçık ve silt
- Kalsiyum ve magnezyum tuzları
- Demir oksit

Organik malzemeler

- Biyolojik organizmalar; bakteriler, mantarlar, algler, vs.
- Sıvıyağlar, kimyasal yağlar ve makine yağı
- Ağır organik birikintiler; polimerler, zift
- Karbon

Enerji korunumu, özel süreçlerin ekonomik boyutlarını değerlendirirken sıklıkla ön plana çıkan bir faktördür. Aynı zamanda, süreç cihazları dikkate alındığında, ısı değiştiricilerini kurmak için gerekli olan sermaye miktarı geri kalan diğer cihazlara oranla kısmen düşüktür. Çoğu kirlenme problemi belirli bir süreç ve ısı değiştirici tasarımına özgüdür. Bu yüzden, ısı değiştirici kirlenmesi eskiden beri ihmal edilmektedir. Sermaye miktarının düşük olması da büyük ihtimalle bu ihmal edilme sebebiyledir. Dolayısıyla ısı değiştiricilerdeki kirlenme problemi, tasarımcılar, teknoloji uzmanları ve bilim adamları için ciddi bir zorluk teşkil etmektedir. Bu problem sadece ısı geçiş teknolojisiyle sınırlı değildir; aynı zamanda ekonomiyi, çevresel kabul edilebilirliği ve olayın insani boyutunu da içermektedir.

Birçok endüstriyel süreçte, ısı geçişini sağlayan akışkanlar ya belirli miktarlarda çözölmüş-asılı madde içerir ya da biyolojik organizmaların büyümesi için uygun koşullar sağlar. Isı değiştiricilerinin tasarımı ve işletmesi, hala büyük ölçüde geçiş yüzeyindeki süreçle ilgili kirlenme oluşumları sayesinde belirlenmektedir. Bu gibi çökeltilerin ısı iletkenliği düşük olduğu için, (Çizelge 4.1) ısı geçişine karşı dirençleri temiz akışkanların gösterdiği direnci aşabilmektedir. Bu durum, ısı değiştiricisinin performansının önemli derecede azalmasıyla sonuçlanabilmektedir. Sonuç olarak, tasarım sırasında güvenlik paylarına, sıcak/soğuk akışkanlar için ön işleme ve cihazların düzenli olarak temizlenmesine ihtiyaç duyulabilmektedir.

Birçok endüstriyel süreçte, ısı geçişi yapan akışkanlar ya belirli miktarlarda çözölmüş-asılı madde içerir ya da biyolojik organizmaların büyümesi için uygun koşullar sağlar. Isı değiştiricilerinin tasarımı ve operasyonu, hala büyük ölçüde transfer yüzeyindeki süreçle alakalı çökelti oluşumları sayesinde belirlenmektedir. Bu gibi çökeltilerin ısı iletkenliği düşük

olduğu için (Çizelge 4.1), ısı geçişine karşı dirençleri temiz akışkanların gösterdiği direnci aşabilmektedir. Bu durum, ısı değiştiricisinin performansının önemli derecede azalmasıyla sonuçlanabilmektedir. Sonuç olarak, tasarım sırasında güvenlik paylarına, sıcak/soğuk akışkanlar için ön işleme ve ekipmanların düzenli olarak temizlenmesine ihtiyaç duyulabilmektedir.

4.2 Çökelme Direnci

Genellikle ısı geçiş yüzeylerindeki kirlenme oluşum olasılığı, ısı değiştiricilerinin tasarımı sırasında dikkate alınır. Bu durum, kirlenme direncini toplam ısı geçiş katsayısının (U) hesaplanmasında önemli bir etkidir.

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{h_1} + R_{f.1} \right) \frac{A_2}{A_1} + R_{wall} + \frac{1}{h_2} + R_{f.2} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1 Farklı çökeltilerin ısı iletkenliği (Müller-Steinhagen, 2003)

Sodyum alüminyum silikat	0,2-0,4 W/m.K
Süt bileşenleri	0,5-0,7 W/m.K
Hematit (ısıtıcı çökeltilisi)	0,6 W/m.K
Biyofilm	0,7 W/m.K
Kalsiyum sülfat (ısıtıcı)	0,8-2,2 W/m.K
Kalsit (ısıtıcı çökeltilisi)	0,9 W/m.K
Serpantin (ısıtıcı çökeltilisi)	1,0 W/m.K
Alçıtaşı (ısıtıcı çökeltilisi)	1,3 W/m.K
Kalsiyum sülfat	1,0 W/m.K
Magnezyum fosfat	2,3 W/m.K
Kalsiyum	2,3 W/m.K
Fosfat	2,6 W/m.K
Kalsiyum karbonat	2,9 W/m.K
Mıknatıslı demir oksitler	2,9 W/m.K

Çizelge 4.2 Farklı Endüstrideki Isı Değiştiricilerde Kirlenme Türleri
(Garrett-Prince, 1985)

Sanayi Grubu	Çökelme Tipi	Problem Derecesi
Gıda ve Benzeri Ürünler	Kimyasal Reaksiyon Kristallenme Biyolojik Katı parçacık Korozyon	Yüksek Yüksek Orta Düşük/Yüksek Düşük
Dokuma Fabrikası Üretimleri	Katı Parçacık Biyolojik	
Odun ve Kâğıt	Kristallenme Katı Parçacık Biyolojik Kimyasal Reaksiyon Korozyon	Yüksek Düşük Düşük Düşük Orta
Kimyasal ve Benzeri	Kristallenme Katı Parçacık Biyolojik Kimyasal Reaksiyon Korozyon	Orta Düşük/Yüksek Orta Düşük/Yüksek Orta
Petrol Rafinerileri	Kimyasal Reaksiyon Kristallenme Katı Parçacık Biyolojik Korozyon	Yüksek Orta Düşük/Yüksek Orta Orta
Cam, Beton	Katı Parçacık	Düşük/Yüksek
Elektrik Üretimi	Biyolojik Kristallenme Katı Parçacık Donma Korozyon	Yüksek Orta Yüksek Yüksek Düşük

Denklem (4.1)'de, h , A , R_f ve R_{wall} , ısı değişimi yapan akışkanlar için, sırasıyla ısı taşınım katsayısını, ısı geçiş alanını, kirlenme direncini ve ayırma duvarının ısı direncini temsil eder. Kirlenme direnci, toplam ısı geçiş katsayısı olan U 'yu azaltır ve dolayısıyla var olan bir ısı değiştiricisinde ısı geçişinin azalmasına ya da yeni bir ısı değiştiricisinin tasarımında ek yüzey gereksinimine neden olur. Kamu hizmet endüstrisinde çökelme direnci, R_f , yerine temizlik faktörü (CF) yaygın olarak kullanılır;

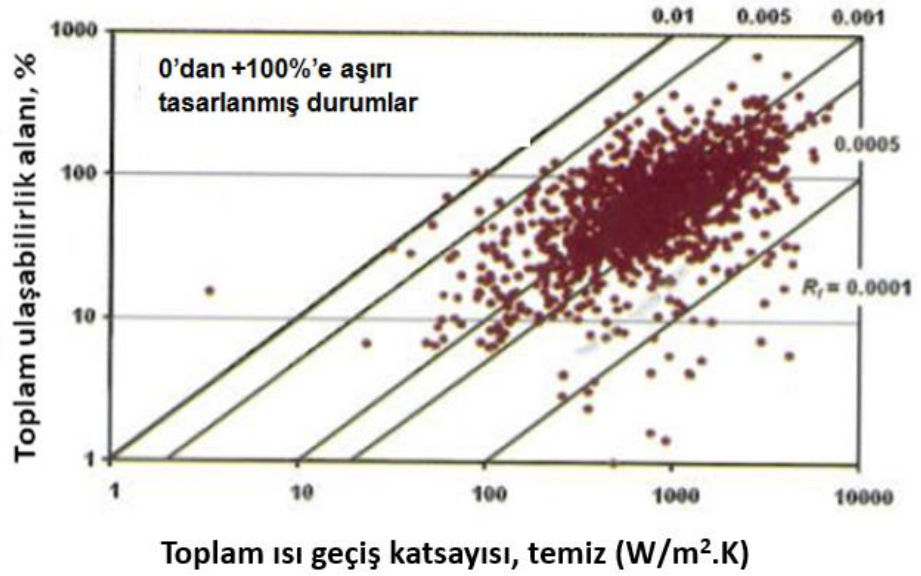
$$CF = \frac{k_f}{k_c} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de (Müller-Steinhagen H. , Dr.H. U Zettler, 2000) belirtilen CF, boru malzemesinin, akış hızının ve soğutma suyunun kirlenme oluşum eğiliminin bir fonksiyonudur. Genellikle, temizlik faktörleri daha az fazladan yüzey ekledikleri için kirlenme dirençlerinden daha gerçekçidirler. Bu değer, kirlenmiş koşullar için toplam ısı geçiş katsayılarının bir oranı olmakla birlikte tamamen deneyseldir. Dolayısıyla, kirlenme oluşum mekanizmalarını ve işletme koşullarının potansiyel etkilerini anlamaya imkân sağlamamaktadır.

Kirlenme dirençlerinin ana kaynağı “Borulu ısı değiştiricisi üreticileri birliği” (Tubular Exchanger Manufacturers Association(TEMA tarafından önerilen yaklaşık 100 değerdir ve Çizelge 4.1’de gösterilmişlerdir. Aslen TEMA çizelgeleri, gövde-boru tipi ısı değiştiricilerin tasarımı için sadece ön tasarım bir kılavuz olmasına rağmen, maalesef sıklıkla kesin değerler olarak da dikkate alınabilmektedirler. Bu durum, oldukça önemli yanılgılara sebep olabilmektedir:

1. Bu değerler 1949’da geliştirilmiş ve o zaman kullanılan ısı değiştiricilerinin tasarımı için elle ölçülerek hesaplanmışlardır. Hesaplama yöntemleri gelişmiş olmasına rağmen TEMA tarafından verilmiş olan değerler ilk yayımlandıklarından bu yana değişime uğramamıştır.
2. Kirlenme direnci, kirlatici olmayan bilinen akışkanlar için de geçerlidir; örneğin soğutucu akışkanlar, demineralize su, sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG), polimerleşmemiş yoğunlaştırıcı gaz, ya da ısı değiştiricilerinin çalışma koşulları dâhilinde kirlenmeyen herhangi bir akış.
3. Çizelgedeki R_f değerleri yeterli mühendislik bilgisi olmadan kullanıldığı için normalden daha büyük değiştiricilere yol açmaktadır. Örneğin Şekil 4.1 2003’ten 2008’e kadar HTRI’a verilen

farklı durumları incelemektedir. Bu durumların aşırı tasarımlanmalarının yüzde cinsinden özetlerini içerir. Şekilde görüldüğü gibi çoğu ısı değiştirici, varsayılan kirlenme dirençleri temel alınır, 50-500% oranında daha büyüktür. Bu durum, gereksiz ölçüde yatırım giderlerine ve kötü tasarımı nedeniyle kirlenmenin olduğu ısı değiştiricilere neden olmaktadır.



Şekil

4.1 Çökelme direncinin 2003'ten 2008'e kadar tasarlanan 2000 kabuk boru tipi ısı değiştirici üzerindeki etkisi (HTRI)

4. R_f değeri sadece belirli bir sayıda süreç akışkanında ve süreç şartında mevcuttur.
5. Çizelgede verilmiş R_f değerleri, akış hızı, kirlenme direncindeki akışkan ve duvar sıcaklığı gibi süreç parametrelerinin etkisi hakkında sınırlı bilgi vermektedir. Bu parametrelerin ısı geçiş yüzeyinde kirlenme oluşumuna kayda değer etkileri vardır.
6. Sabit kirlenme direnci kullanılarak, kirlenme sürecinin kalıcı olmayan karakteri ihmal edilmiş olur. İlk başta aşırı tasarımlanmış ısı değiştiricisinin şartları, kirlenmeyi teşvik etmiştir. Böylelikle, kirlenmeyi kendini gerçekleştiren bir kehanet durumuna getirmiştir.

7. TEMA değerleri, plakalı ısı değiştiriciler, kompakt ısı değiştiriciler ya da kanatlı boru gibi alışılmış gövde-boru tipi ısı değiştiriciler dışındakilere uygulanmaz. Tablo 4.8’de diğer ısı değiştiricileri için bazı kirlenme dirençleri verilmiştir.

Çizelge 4.3, seçilen kirlenme dirençlerinin, ısı değiştiricilerinin boyutlandırılmasındaki önemini açıklamaktadır. Eğer her iki akışkan için de tipik bir TEMA çökeltme direnci olan $0,18 \text{ m}^2\text{K/kW}$ kullanılırsa, bu çizelge, çeşitli ısı değiştirici tipleri için gerekli olan fazla ısı geçiş yüzeylerini gösterir. Aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, sabit bir ısı geçişi için gerekli olan fazla yüzey alanının yüzdesi, temiz ısı geçiş katsayısı arttıkça artar.

$$\frac{A_f}{A_c} = 1 + k_c R_f \quad (4.3)$$

Denklem 4.3’te de görüldüğü üzere, ısı değiştiricileri için kirlenme direncinin etkisi, ısı geçiş katsayıları yüksek olduğunda daha da ciddi olmaktadır (Müller-Steinhagen H. , Dr.H. U Zettler, 2000).

Chenoweth’e (Chenoweth,1987) göre güvenilir olmayan tasarım süreçlerinden ve işlemsel problemlerden dolayı, ısı değiştiricileri %70-%80 oranında aşırı tasarlanmakta ve bu oranın %30-%50’si de çökelmeyle sonuçlanmaktadır. Çökelmeye sebebiyet veren kir ve toz birikimine karşı bir çözüm üretilmemesi nedeniyle ısı geçişindeki azalma kaçınılmaz olmaktadır. Akışkanlar için ön işlem, kirlenmeye karşı montajlamalar ve düzenli temizleme, birçok durumda hala gerekli olabilmektedir.

4.3 Kirlenme Türleri

Isı geçiş yüzeyi üstünde birçok farklı tür kirlenme oluşumu meydana gelir. Sınıflandırma yöntemi, farklı fiziksel ve kimyasal süreçlere dayalıdır. Bu yöntemi kullanarak temel kirlenme türleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

Çizelge 4.3 Su için TEMA Kirlenme Direnci (m^2K/W) (Pritchard, 1988)

Isıtma Ortamı Sıcaklığı	115°C'ye kadar		115°C ile 200°C arası	
Su Sıcaklığı	50°C		50°C üstü	
	Su Akış Hızı m/s		Su Akış Hızı m/s	
	1.0 ve altı	1.0 ve üstü	1.0 ve altı	1.0 ve üstü
Soğutma Kulesi ve Yapay Göl Oluşturma				
İşlenmiş	0,000088	0,000088	0,00017	0,00017
İşlenmemiş	0,00035	0,00017	0,00053	0,00035
Şehir Veya İyi Su	0,00017	0,00017	0,00035	0,00035
Nehir Suyu				
En Düşük	0,00035	0,00017	0,00053	0,00035
Ortalama	0,00053	0,00035	0,0007	0,00053
Bulanık veya alüvyonlu	0,00053	0,00035	0,0007	0,00053
Sert (250ppm üstü)	0,00053	0,00053	0,00088	0,00088
Motor ceket	0,00017	0,00017	0,00017	0,00017
Damıtma veya Kapalı Çevrim				
Yoğuşma	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088
Kombi Arıtılmış Su Beslemesi	0,00017	0,000088	0,00017	0,00017
Kombi Gaz Bırakımı	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
Deniz Suyu	0,00009	0,00009	0,00018	0,00018
Acı (Tuzlu) Su	0,00035	0,00018	0,00054	0,00035

Çizelge 4.4 Kabuk-boru tipi ısı değıştiricilerindeki petrol rafineri akışı için TEMA kirlenme dirençleri. (m²K/W) (Pritchard, 1988)

Ham Petrol ve Vakumlanmış Ünite Gazları ve Buharları						
Hava Kulesi Üzerindeki Buharlar				0,00018		
Zayıf Petrol				0,00018		
Vakum Üstündeki Buharlar				0,00035		
Ham Petrol ve Vakum Sıvıları						
Saf Yağ						
0 ile 120°C Akışkan Hızı (m/s)				120-175°C Akışkan Hızı (m/s)		
	<0.6	0.6-1.2	>1.2	<0.6	0.6-1.2	>1.2
Kuru	0,00053	0,00035	0,00035	0,00053	0,00035	0,00035
Tuz*	0,00053	0,00035	0,00035	0,00088	0,0007	0,0007
175 ile 230°C Akışkan Hızı (m/s)				230°C ve üstü Akışkan Hızı(m/s)		
	<0,6	0,6-1,2	>1,2	<0,6	0,6-1,2	>1,2
Kuru	0,0007	0,00053	0,00053	0,00088	0,0007	0,0007
Tuz*	0,0011	0,00088	0,00088	0,0012	0,0011	0,0011
				*120'C de tuzsuzlaştırıldığı varsayılmıştır		
Benzin				0,00035		
Nafta ve Zayıf Damıtma Ürünleri				0,00035-0,00053		
Gazyağı				0,00035-0,00053		
Zayıf Gaz Yağı				0,00035-0,00053		
Kuvvetli Gaz Yağı				0,00053-0,00088		
Kuvvetli Akaryakıt yağları				0,00088-0,0012		
Asfalt ve tortu						
Vakum Kulesi Tortusu				0,0018		
Hava Kulesi Tortusu				0,0012		

Çizelge 4.5 Kabuk-boru tipi ısı değıştiricilerinde çeşitli işlem akışları için kirlenme dirençleri
(m²K/W) (Pritchard, 1988)

Hidrokarbonlar:	Akaryakıt No 2	0,35
	Akaryakıt No 6	0,88
	Transformatör Yağı	0,18
	Yağlama Yağı	0,18
	Hidrolik Yağı	0,18
	Sulandırılmış yağ	0,7
	Zift Yağı	0,8
	Asfalt Yağı	0,9
	Bitkisel Yağ	0,53
Gazlar ve Buharlar:	Buhar (Saf Yağ)	0
	Buhar (Kirlenmiş Yağda)	0,18
	Soğutucu Buhar(Kirlenmiş Yağda)	0,35
	Alkol Buharı	0
	Organik Buhar	0,09
	Amonyak	0,18
	Karbondioksit	0,35
	Yanma Gazı(Kömür)	0,18
	Yanma Gazı(Doğal)	0,18-0,35
	Dizel Eksoz Gazı	1,8
	Sentez Gazı	1,8
	Sıkıştırılmış Gaz	0,18-0,35
	Doğal Gaz	0,18
	Nitrojen	0,18-0,35
	Sabit Sütun üstü verim	0,18-0,35
Sıvılar:	Soğutucu	0,10-0,18
	Organik Isı geçiş sıvısı	0,18-0,35
	Amonyak(Saf Yağ)	0,18
	Amonyak (Kirlenmiş Yağ)	0,53
	Metanol Çözeltisi	0,35
	Ethanol Çözeltisi	0,35
	Glikoz Çözeltisi	0,35
	LPG, LNG	0,18-0,35
	MEA-ve DEA Çözeltisi	0,10-0,35
	DEG-VE TEG Çözeltisi	0,35
	Sabit Kenarlı Sütunda Akış	0,18-0,35
	Sabit Alt Sütun Akışı	0,18-0,35
	Aşındırıcı Çözelti	0,35
	Siyah Likör	0,7-1,4

Çizelge 4.6 Plakalı ve çerçeveli ısı değıştiricilerindeki kirlenme dirençleri (m²K/W)
(Tay, Yang 2006)

Akışkan	Çökelme Direnci(m ² K/kW)
Su	
Minerali Giderilmiş ya da damıtılmış	0,009
Yumşak	0,017
Sert	0,043
İşlenmiş soğutucu kule suyu	0,034
Kıyı Deniz Suyu	0,043
Okyanus Deniz Suyu	0,026
Nehir Suyu	0,043
Motor Bloğu	0,052
Yağlama Yağı	0,017-0,043
Bitkisel Yağlar	0,017-0,052
Organik Çözücüler	0,009-0,026
Buhar	0,009
Genel Proses Akışkanları	0,009-0,052

Çizelge 4.7 Genişletilmiş yüzeylerdeki yanıcı gazların çökelme dirençleri (m²K/W)
(Puckorius, 1972)

Yakıt	Kirlenme Direnci (m ² K/kW)	Akışkan Hızı m/s
Doğal Gaz	0,09-0,53	30-40
Propan	0,18-0,53	
Bütan	0,18-0,53	
Temiz Enerji Gaz	0,18	
Kısmi Temiz Enerji Gazı	0,27-0,5	25-30
Zayıf Yakıt	0,36-0,7	
Diesel Yakıt	0,53	
Güçlü Yakıt	0,53-1,24	18-24
Ham Petrol	0,7-2,7	
Kömür	0,89-8,85	15-21

Çizelge 4.8 Evaporatörlerdeki çökelme dirençleri (m²K/W) (Chenoweth, 1988)

	Kirlenme Direnci (m ² K/kW)
Yanma Ortamı	
Hidrokarbon C ₁ -C ₄	0-0,18
Yüksek Hidrokarbonlar	0,18-0,5
Olefinler ve Polimerize Hidrokarbonlar	0,5-0,9
Isınma Ortamı	
Yoğuşmalı Buhar	0-0,09
Yoğuşmalı Organik Su Buharı	0,09-0,18
Organik Sıvı	0,09-0,052

Çizelge 4.9 Çeşitli ısı değiştiricisi uygulamaları için arttırılmış yüzey alanları
($R_f = 0,36 \text{ m}^2\text{K/W}$) (Müller-Steinhagen H. , Dr.H. U Zettler, 2000)

Uygulama	Toplam Temizlik Katsayısı	Artış Yüzdesi
Gaz/gaz gövde ve boru tipi ısı değiştiricisi	50 W/m ² K	1,8%
Sıvı/gaz gövde ve boru tipi ısı değiştiricisi	150 W/m ² K	5,4%
Sıvı/sıvı gövde ve boru tipi ısı değiştiricisi	1000 W/m ² K	36%
Sıvı/sıvı plakalı ve çerçeveli ısı değiştiricisi	3000 W/m ² K	108%
Su-Soğutmalı gövde ve boru buhar kondanseri	4500 W/m ² K	162%

4.3.1 Partikül Çökmesi

Süreç buharında asılı kalmış parçaların, ısı geçiş yüzeyine çökmesidir. Eğer bu durum, diğer çökme mekanizmalarının yanı sıra yerçekimine bağlı olarak da gerçekleşirse, elde edilen partikül çökmesine "sedimentasyon" çökmesi denir. (Awad ve arkadaşları 2007) Böylece partikül çökmesi, ısı değiştiricilerinde kullanılan akışkanlardaki (sıvı ve/veya gaz süspansiyonu) partiküllerinin ısı geçiş yüzeyine birikimi şeklinde tanımlanabilir. Çoğu kez bu tür çökelmeler şunları içerir; akışkanın içine dağılmış korozyon maddeleri, nehir suyundaki toprak ve mineral partikülleri, soğutma suyunda asılı kalmış katılar, yetersiz yanmadan çıkan kurum partikülleri, ekonomizördeki manyetik partiküller, desalinasyon sistemlerindeki tuz çökmesi, hava soğutucularındaki toz partiküllerinin çökmesi, buhar kazanının ateş yanı (gaz tarafı) çökmesinde kısmen meydana gelen partiküller, vs. Partikül çökmesi şu faktörlerden etkilenebilir; asılı kalmış partiküllerin derişimi, akışkanın akış hızı, çökmenin meydana geldiği yüzeydeki sıcaklık koşulları (ısıtılmış ya da ısıtılmamış) ve ısı geçiş yüzeyindeki ısı akışı. Parçacık çökmesi esas olarak akışkandaki katı maddelerin toplu halde askıda kaldığı durumlarda görülür. Soğutma kuleleri içerisinde asılı parçacıkların iki olası farklı tipi vardır:

a) Kristalize parçacıklar: Kristalizasyon sırasında oluşturulan fakat kırılğan olması nedeniyle çökelme işlemi sırasında koparılarak yüzeyden kaybolan parçacıklar. Bu parçacıklar daha sonra sürüklenme işlemi ile birikir.

b) Kristalize olmayan parçacıklar: Muller-Steinhagen ve Middis (1989) plakalı ısı değıştiricisi içinde dolaşan sudaki parçacıkların çökelmesini incelemiştir. Akış hızı, ısı akısı ve parçacık derişimini araştırmanın ana parametreleridir. Çalışma süspansiyon çökeltileri olarak Al_2O_3 kullanılmıştır. Giriş sıcaklıkları ve her iki akış debileri testler boyunca sabit tutulmuştur. Çökelme direnci bir asimptotik değere ulaşana kadar testler yapılmıştır. Çalışma, asimptotik çökelme direncinin artan akış hızıyla birlikte düştüğünü göstermiştir ancak asimptotik çökelme direnci ısı akısından etkilenmemiştir. Muller-Steinhagen ve Middis 1,6 mikron çaplı parçacıklar için asimptotik çökelme direncinin, parçacık derişimi ile doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Derişim 900 ppm'e ulaşana kadar bu eğilim fark edilmiştir.

Thonon ve arkadaşları (1999) plakalı ısı değıştiricisinde parçacık çökmesi üzerinde geometri ve akış koşullarının etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Thonon ve arkadaşları çökelen parçacık olarak deneylerinde $CaCO_3$ seçmiştir. Isı değıştirici içerisindeki kristalizasyonu önlemek amacıyla, duvar sıcaklığı olabildiğince düşük tutulmuştur. Akışkan sıcaklığı 22,0 ile 24,2 °C arasında sabit tutulmuştur ve duvar sıcaklığının akışkan sıcaklığından en fazla 10°C daha sıcak olduğu görülmüştür. Deneylerde kullanılan plakalı ısı değıştiricilerindeki yiv açıları 30°, 60°, 30° ve 60° birleşimden oluşan açılardır. Bu çalışma sonucunda, kanal geometrisi ve akış hızının bir plakalı ısı değıştiricisindeki çökelme davranışını etkileyen iki büyük faktör olduğu sonucuna varıldı. Muller-Steinhagen ve arkadaşlarının (1988) tespitinin aksine, Thonon parçacık derişiminin parçacık çökelme oranını önemli ölçüde etkilediğini bulamadı.

Müller-Steinhagen ve arkadaşları (1988), ısı geçiş yüzeyleri üzerine asılı alümina parçacıkların çökelme hızı ve parçacık büyüklüğünün etkisi ile ilgili testler yaptılar. Testler, bir halka içinde ısıtılmış bir silindirik çubuk ve çapraz akışlı sargılı bir tel kullanılarak yapıldı. Test koşulları 1,2 cm/s ve 3,0 cm/s

arasında değişen akış hızları ve 14400 W/m^2 ve 5500 W/m^2 arasında değişen ısı akısından oluşmaktadır. Müller-Steinhagen ve arkadaşları her iki farklı parçacık çapı (2 mikron ve 0,45 mikron) için de deneylerde sabit derişim kullanmıştır. Araştırmacılar testlerde asimptotik çökme direncinin daha küçük parçacık çapı ile daha fazla arttığını göstermiştir. Bu sonuç Chamra ve Webb (1993) tarafından gerçekleştirilen model sonuçları ile de desteklenmektedir. Araştırmacılar Kern ve Seaton orijinal modelini değiştirerek, geliştirilmiş borularda sıvı tarafındaki parçacık çökmesi için yarı deneysel bir model geliştirmişlerdir.

Webb (1994), Kristallenme çökmesi, parçacık çökmesi ve kristallenme-parçacık kombinasyonu çökmesi modellerinin geliştirilmesi için girişimlerde bulundu. Parçacık çökme hızı aşağıdaki denklem ile ifade edilir. (Webb, 1994)

$$\dot{m}_d = K_m(C_p - C_s) \quad (4.4)$$

K_m =Kütle transfer katsayısı $\left(\frac{m}{s}\right)$

C_p =Parçacıkların kütle derişimi $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

C_s =Yüzeye yapışmış tanecik derişimi $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Yüzeye yapışmış taneciklerin derişimi, genellikle sıfır alınır. Parçacık çökme süreci nedeniyle birikme işlemi parçacıkların duvara taşınması ve parçacıkların duvara yapışması olarak ikiye ayrılabilir.

Birikme katsayısı (K_m) askıdaki katı parçacıkların çap büyüklüğüne bağlı olarak üç farklı taşıma mekanizmasına ayrılmaktadır. Boyutsuz parçacık gevşeme süresi (t_p^+) taşıma mekanizmasını tanımlamak için kullanılır (Lim, 2006).

$$t_p^+ = \frac{d_p^2 \rho_p (V^*)^2}{18\mu^* V} \quad (4.5)$$

$$V^* = \text{Sürtünme Hızı} = \bar{V}^* \sqrt{\frac{f}{2}} \left(\frac{m}{s}\right) \text{ ve } \left(\frac{ft}{s}\right)$$

$$f = \text{Fanlama sürtünme faktörü} = \frac{1774}{\beta^{1,026} * Re}$$

$$\bar{V} = \text{Sıvı hızı artışı} \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$d_p = \text{Biriken katı madde çapı (m)}$$

$$\rho_p = \text{Parçacık yoğunluğu} \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

$$\mu = \text{Sıvı viskozitesi} \left(\frac{kg}{m.s}\right)$$

Gudmundsson (1981) üç farklı taşıma mekanizmasının varlığını açıklarken ve Papavergos ve Hedley (1984) her bir taşıma mekanizması için boyutsuz hızın (k_m^+) bir ampirik bir denklemi olduğunu açıklamıştır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- **Yayılım :**

Yayılım rejiminde, asılı parçacıklar Brownian hareketi ile ısı değiştiricinin duvarına taşınmaktadır. Brownian hareketi, partikülleri çevreleyen moleküller tarafından oluşturulan parçacıklar üzerinde kombine uygulanan kuvvetlerin dengesizliği nedeniyle akıştaki parçacıkların rastgele hareketidir. Bu rejim, zaman $t_p^+ < 0.02$ olduğunda oluşmaktadır. Papavergos ve Hedley (1984) bu rejim için boyutsuz hızın (k_m^+) bir ampirik denklemini sunmuştur:

$$k_m^+ = 0,07Sc^{-2/3} \quad (4.6)$$

- **Atalet**

Atalet rejiminde, söz konusu parçacıklar viskoz alt tabaka üzerinde hareket etmek için sıvıya hareket kazandırmak için yeterli büyüklüktedir.

Bu rejim $0,02 < t_p^+ < 20$ anında gerçekleşir.

Papavergos ve Hedley (1984) önerisi şu şekildeydi:

$$k_m^+ = 0,0035 * (t_p^+)^2 \quad (4.7)$$

- **Sıkıştırma:**

Bu rejimde, $t_p^+ > 20$ yerde parçacıkların yeterince büyük olduğunda, parçacıkların hızının sürtünme hızına yaklaşık olarak eşit olduğunu söyler.

Papavergos ve Hedley (1984) önerisi aşağıda verilmiştir:

$$k_m^+ = 0,18$$

Tüm rejimler için kütle geçiş katsayısı, aşağıdaki eşitlikten belirlenir:

$$K_m = V^* \cdot K_m^+ \quad (4.8)$$

Duvara yapışan parçacıkların mukavemeti, birikme gücü faktörü ile karakterize edilir. Bu değer birikinti yapısı, derişim, askıda kalan katı madde tipi ve akış hızı gibi değerlere bağlıdır. Parçacıkların yapışma kabiliyeti, çökelme işlemi sırasında parçacık kopma oranını etkileyen bir parametredir. Birikme gücü faktörü sadece aşağıdaki denklemi kullanarak deneysel verilerden çıkarılabilir.

$$\psi = \tau_w \cdot \frac{R_f^*}{R_{f_0}} \quad (4.9)$$

$\tau_w = \text{Duvar Kayma Gerilmesi (pa) veya (psi)}$

$R_f^* = \text{Asimptotik çökelme direnci} \left(\frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{W} \right)$

$R_{f_0} = \text{ilk çökelme direnci} \left(\frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{W} \right)$

4.3.2 Kristalizasyon Çökmesi (Presipitasyon)

Doygun çözeltilerdeki çözülmüş tuzun kristalizasyonudur. Bu durum, sıcaklık değişimlerine ve sonrasında ısı geçiş yüzeyinde oluşan çökelmelere bağlı olarak gerçekleşir. Genellikle, sulu çözeltilerde ve diğer ısıtılan/soğutulan çözülmüş tuz çözeltilerinde meydana gelir.

Isıtılmış yüzeylerde ters çözünürlükteki tuzların çökmesi genellikle kireçlenme olarak adlandırılır ve çökelen katman sert, kuvvetlidir. Normal çözülebilen tuzların soğutulmuş yüzeylerdeki çökmesinde ise bu katman, genellikle gözenekli ve peltemsi bir yapıdadır. İşlenmemiş su, deniz suyu, jeotermal su, tuzlu su, sodyum hidroksit sulu çözeltisi ve diğer tuzlar ısı değiştiricilerinde kullanıldığında kristalizasyon çökmesi yaygındır. Bu tür çökelmelerin dâhil olduğu en önemli olay, birincil çekirdeklerin oluşumunu gerektiren çökme sırasındaki kristal büyümesini içerir. Bu prosesi kontrol eden mekanizma çekirdeklenmedir. Bunun ısı geçiş yüzeylerindeki kirlilik nedeniyle heterojen bir şekilde olması kaçınılmazdır (Awad, 2007).

Kristalizasyon çökmesi soğutma kuleleri suyunda çok fazla karşılaşılan çökme çeşididir. Bu tip çökelmeler, dışarıdan gelen su içerisindeki tersine çözünür minerallerin varlığında oluşur ve ısı değiştiricisinin iç yüzeylerine tutunur.

Birçok araştırmacı, su kalitesinin kristalizasyon çökmesine katkı sağlayan belirgin faktörlerden biri olduğuna dair raporlar sunulmuştur. Soğutma kulesi suyu kalitesi coğrafi açıdan değişiklik göstermektedir.

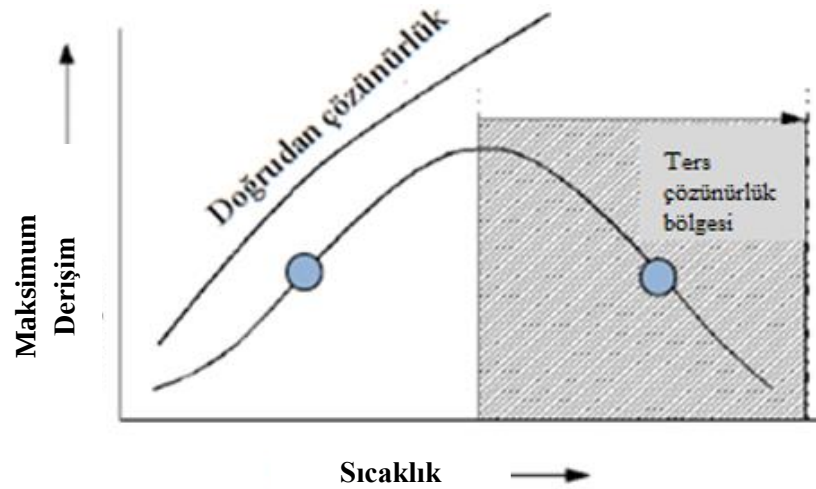
Chamra (2006), Çizelge 4.10’de listelenen soğutma kulesi suyunda bulunabilecek bileşenleri sunmuştur. Bu bileşenler, onların kristalizasyon çökmesine, katı parçacık çökmesine ve su bakım kimyasalları nedeniyle oluşan birikintilere katkıları dikkate alınarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 4.10’da listelenen bileşenlerden birçoğu, atmosfere açık olmaları nedeniyle soğutma kulelerinde bulunmaktadır. Su, dış havadan gelen ve mikrobiyolojik büyümeye katkı sağlayan ciddi miktarda kir ve toz içermektedir.

Ayrıca kent suyu kaynakları genellikle kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonat gibi ters çözünürlükteki mineralleri içermektedir. Mineral çözünürlüğü üç farklı parametreye göre değişiklik gösterir. Bunlar çözelti sıcaklığı, çözelti pH'ı ve diğer minerallerin varlığıdır. Şekil 4.2 de çözelti sıcaklık etkisi açıklanmıştır.

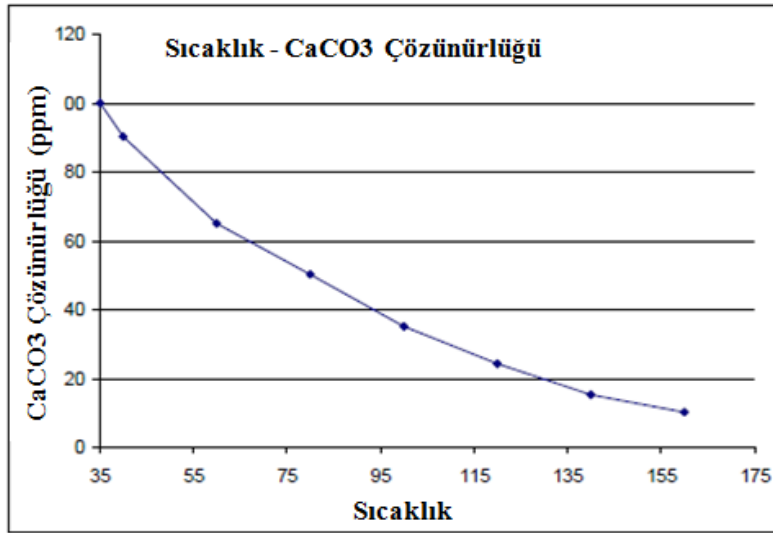
Çizelge 4.10 Soğutma Suyu Bileşenleri (Chamra, 2006)

Soğutma Suyu Bileşenleri	Ters Çözünebilir	Asılı Tanecikler	Su Arıtım Kalıntıları
Kalsiyum Karbonat	x		
Kalsiyum Sülfat	x		
Magnezyum Tuzları	x		
Silisyum Oksit	x		
Demir Oksit	x		
Slika		x	
Kil		x	
Çamur(Balçık)		x	
Doğal Organikler		x	
Çözünmüş Demir		x	
Kum		x	
Birikinti		x	
Aşındırıcı Ürünler			x
Fosfatlar			x
Organik Seyreltici			x
Üç Değerli Kromyum			x
Mikro Organizmalar			x



Şekil 4.2 İki madde için çözünürlük (Lım, 2010)

Şekil 4.2 bize gösteriyor ki bazı mineraller sıcaklığın artmasıyla birlikte daha büyük miktarlarda çözünmektedirler. Bu tip minerallere örnek olarak NaCl ve CaCO_3 gösterilebilir. Diğer taraftan, ters çözünürlüğe sahip mineraller sadece belli sıcaklık değerlerine kadar çözünürlüklerini arttırabilirler. Bu sıcaklığın üstünde, maddeler sıcaklığın artmasıyla çözünürlüklerinin azaldığı bölgeye ulaşır. Eğer, aynı maksimum derişimde ters çözünürlükteki mineralleri içeren iki çözelti varsa, daha yüksek sıcaklığa sahip olan çökelecektir. CaCO_3 ve CaSO_4 ters çözünürlükteki mineral örneklerinden, çözelti sıcaklığına bağlı olarak kalsiyum karbonat çözünürlüğünün nasıl değiştiği gösterilmiştir (Şekil 4.3).

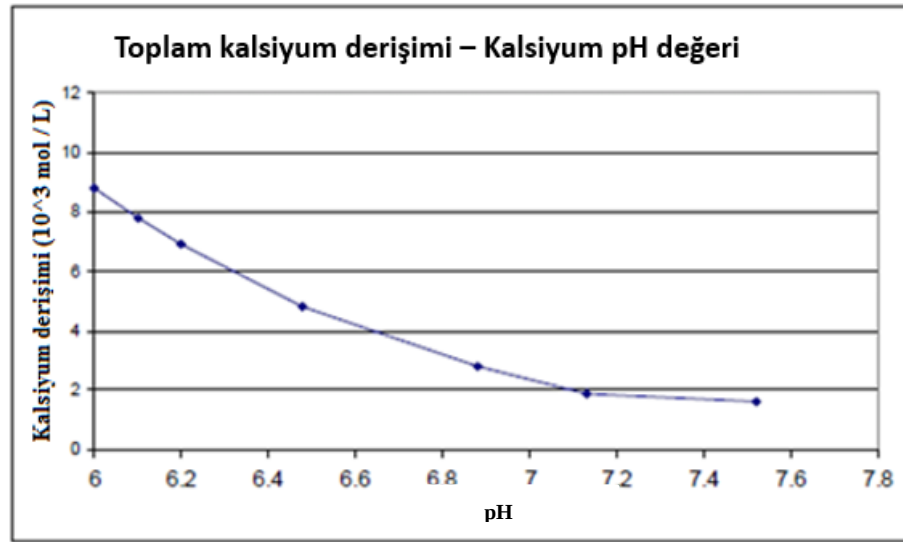


Şekil 4.3 Sıcaklıkla kalsiyum karbonat çözünürlüğünün değişimi (Lım, 2010)

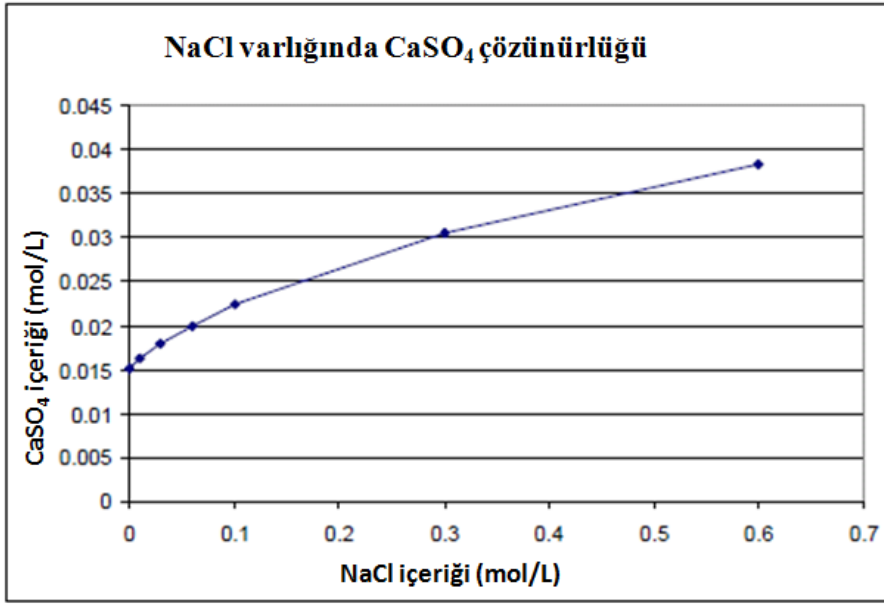
Ayrıca ters çözünürlüğe sahip minerallerin çözünürlüğü pH tarafından etkilenir. Örneğin, asidik özellikteki çözeltilerde CaCO_3 çok fazla çözülemez. Nakayama (1968) pH etkisiyle CaCO_3 çözünürlüğü üzerine deneysel çalışmalar

yapmıştır. Deneysel sonuçlar CaCO_3 çözünürlüğü ile çözeltinin pH değerinin ters orantılı olarak değiştiğini Şekil 4.4 'deki gibi göstermektedir.

Çözelti pH ve sıcaklığından başka, bir mineralin çözünürlüğü diğer minerallerin miktarı ve varlığı ile de etkilenir. Kemmer (1979), çözelti içindeki magnezyum varlığının CaCO_3 çözünürlüğü üzerine etkisini örnek olarak vermiştir. Kemmer, magnezyumun CaCO_3 ile birlikte kristalleşme çökmesine uğradığı durumda, kalan kalsiyum miktarının (tepkimeye girmemiş) artabileceğini rapor etmiştir. (Kemmer, 1979). Çözelti içindeki NaCl miktarı değişimiyle CaSO_4 'ün çözünürlüğü de değişmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.4 25°C'de Kalsiyum karbonat-pH Çözünürlük Grafiği (Lim, 2010)



Şekil 4.5 Çözelti içerisindeki CaSO_4 çözünürlüğü ve NaCl miktarı (Lım, 2010)

Çözünmemiş mineraller çökmeye başlamadan önce, bir çözelti doyma fazına erişmelidir. Çözeltinin, doymun bir çözeltiden daha fazla çözünmüş mineral içermesi durumunda aşırı doymunluk fazına ulaşması mümkündür. Doymuş çözelti, çözelti sıcaklığı artırıldığında veya azaltıldığında elde edilebilir. Ortaya çıkan çözelti, aşırı doymunluğa erişmiştir ve genellikle dengede değildir. Sadece sıcaklık değil buharlaştırma işlemi suyu aşırı doymunluk fazına getirebilir. Buharlaştırma işlemi çözünmüş katının derişimini artırır. Eğer işlem, yeterli süre devam ettirilirse, çözeltinin doymunluğa ulaşması ve sonunda aşırı doymunluğa ulaşması sağlanabilir. (Bott, 1994).

Tipik bir soğutma kulesinde bulunan su içinde bulunan çok sayıda ters çözünürlükteki mineral olmasına rağmen, kalsiyum karbonat (CaCO_3) çökelme sürecinde baskın mineral olarak ön plana çıkmıştır. Bu nedenle, ısı değıştiricilerinde CaCO_3 kristallemesi ile oluşan çökelme, son yirmi yılda pek çok araştırmacının ana odak noktası olmuştur. Çökelme ile ilgili ilk çalışma Langelier (1936) tarafından yapılmıştır. Langelier şimdi yaygın Langelier Doymunluk Endeksi (LSI) olarak bilinen "Langelier Endeks" önerdi. LSI suda CaCO_3 çözünürlüğünü tahmin etmek için kullanılır. LSI değerleri belirlemek için kullanılan parametreler toplam çözünmüş katılar, kalsiyum sertliği, toplam alkalinite, akışkan sıcaklığı ve gerçek pH değerleridir.

Ritter (1981) iki farklı mineral (Lityum sülfat ve kalsiyum sülfat) kullanarak boru tipi ısı değıştiricisindeki kristallenme çökelmesini incelenmiştir. Ters çözünlükteki mineraller içeren dolaşım çözeltisi, damıtılmış su ve su dolanım sisteminin uyarlandığı bir ortamda hazırlanmıştır. İstenen test koşulu elde edilene kadar çözelti çevrimde döndürülmüştür. Deneyler, ısı değıştiricisi içerisindeki çözelti akış hızını değıştirerek 0,18288 -3,9624 m/s arasında gerçekleştirilmiştir. Bu sırada su sıcaklığı 37,2 – 105,5°C arasında iken ısı akıları $245,3 \cdot 10^6$ - $5,72 \cdot 10^9$ kg/s arasında değışmektedir. Isı geçiş katsayıları, boru giriş ve çıkışındaki sıcaklık değerlerinden ve ölçülen ısı girdilerinden yola çıkılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki parametreleri kullanarak ilişkilendirilmiştir:

- **Aşırı Doygunluk**

Aşırı doyguluk, aşağıdaki denklemi kullanarak ölçülen sıcaklığa karşılık gelen mineral çözünlüğü kullanılarak hesaplanır:

$$S = \frac{\Delta C}{C_s} \quad (4.10)$$

ΔC = Sıcak yüzey-çözelti ara yüzeyindeki çözelti derişimi ve doyguluk derişimi arasındaki fark (% ağırlıkça)

C_s = Sıcak yüzey-çözelti ara yüzündeki çözelti derişimi (% ağırlıkça)

- **Kütle geçiş katsayısı (k_1)**

Lim (2006), Kütle geçişi boru içerisindeki türbülanslı akış için, Colburn benzeşimini kullanarak hesaplanmıştır (Denklem 4.11):

$$\frac{k_1}{G} \left(\frac{\mu}{\rho D_1} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{h}{C_p G} (Pr)^{\frac{2}{3}} = \frac{f}{2} \quad (4.11)$$

$$k_1 = \text{Kütle transfer katsayısı} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$G = \text{kütle hızı} \left(\frac{kg}{m^2 s} \right)$$

$$\mu = \text{Çözelti Viskozitesi} \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

$$D_1 = \text{Yayılma oranı} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

$$\rho = \text{yoğunluk} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$C_p = \text{Çözelti Özgül Isısı} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$$

$$h = \text{Isı transfer katsayısı} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

$$P_r = \text{Prandtl Sayısı}$$

$$f = \text{Sürtünme Faktörü}$$

➤ **Birikinti duvarında kayma gerilmesi (τ)**

Isı değiştiricisi içinde yüzey kayma gerilmesi(τ_s), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır: (Lim, 2006)

$$\tau_s = \frac{f\rho V^2}{2} \quad (4.12)$$

$$f = \text{Yerel sürtünme faktörü}$$

$$\rho = \text{Akışkan yoğunluğu} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$V = \text{Akışkan Hızı} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Reynolds sayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.13)$$

$$\rho = \text{Akışkan Yoğunluğu} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$V = \text{Akışkan Hızı} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$\mu = \text{Çözelti Viskozitesi} \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

Yukarıdaki parametrelerin çoğu çalışma sıcaklıkları ve işlem debilerine bağlıdır. Yukarıdaki parametrelerin çoğunda çoklu regresyon yöntemleri vardır. Çoklu regresyon metotları listelenen parametrelerin önemini değerlendirmek için uygulanmıştır. Aşırı doygunluk, Ritter'in deneylerde kullandığı her iki mineralin de çökelme dirençleri arasındaki ilişkiyi kurabilmek için en önemli parametre olduğu bulunmuştur. Diğer parametrelerin önemi, partikül minerallerinin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu, yüzey sıcaklığına bağlı olarak zamanla çökeler. Örneğin CaSO_4 , yüzey sıcaklığına bağlı olarak çökelebilen iki farklı kristal yapıya sahiptir. Her kristal formu kendine has bağlanma kuvveti karakteristiğine sahiptir. Bu da parçacıkların kristallenme boyunca mı yoksa tekrar karışma işlemi sırasında mı çökeceğini tanımlamaktadır. Analiz işlemi gerçekleştirildikten sonra, CaSO_4 çökelme hızının kütle geçiş katsayısı ile kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Böylece, çökelme direnci ile kütle geçiş hızı arasındaki bağlantı aşağıdaki denklemde verilmiştir: (Lim, 2006)

$$R_f = C \cdot k_1 \left(\frac{\Delta C}{C_s} \right)^2 \quad (4.14)$$

$C = 3.8(10)^{-5}$ IP birimi için ve $1.9(10)^{-9}$ SI birimi için.

Li_2SO_4 Çökelme hızı, bir diğer yandan, yüzey sıcaklığından ötürü fazlasıyla etkilenmiştir. Li_2SO_4 için çökelme eğrisi aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir.

$$R_f = A \cdot \left(\frac{\Delta C}{C_s} \right) \exp \left(\frac{B}{T_s} \right) \quad (4.15)$$

$A = 570$ ve $B = -650$ IP birimi için

$A = 0,028$ ve $B = -3630$ SI birimi için

Andritos ve arkadaşları (1996) izotermal koşullar altında boru duvarlarında CaCO_3 oluşumunu çalışarak, pH, doygunluk, akım hızları ve sıvı sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Deneyler, 0,2- 2,4 m/s akış hızı aralığında, 15-

55 °C aralığında ve 8-13 pH aralığında gerçekleştirilmiştir. Çökelme hızı pH 8,5-9 arasında keskin bir artış gösterirken ve pH> 9 iken nispeten sabit bir davranış gösterdiği kaydedilmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda sıvı sıcaklığı artışının daha yüksek çökelme oranına katkıda bulunduğunu açıklamışlardır. Bu sonuçlar, ters çözünürlükteki bir mineralin çözünürlüğünün artan sıvı sıcaklığı ve pH değeri de azaldığını doğrulamaktadır. Araştırmacılar, CaCO_3 oluşumu için termodinamik itici güç kullanarak aşırı doymuluk oranı (S) hesaplamışlardır:

$$S = \left[\frac{(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})}{K_{sp}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

$$K_{sp} = \text{Çözünürlük çarpımı} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right)^2$$

S yaklaşık 7-8 seviyelerine ulaştığında çökelme hızı sert bir şekilde yükselmiştir ve daha yüksek doyma oranlarında dengede kalmıştır.

Bansal ve arkadaşları (1993), sıvıdan sıvıya ısı geçişinin gerçekleştiği bir plakalı ısı değiştirici içindeki kristallenme çökmesi çalışmasını gerçekleştirmiştir. Test edilen plakalı ısı değiştiricisinde her biri 2,4 mm yüksekliğinde sahip üç adet kanal bulunmaktadır. Kalsiyum sülfat çözeltisi arıtılmış su ile hazırlanmış ve 50 litre tankta depolanmıştır. Çözünmemiş minerallerin deney sırasında yeniden sürüklenme işlemini ortadan kaldırmak için filtre edilmiştir. Akış hızı, duvar sıcaklığı ve çökelme hızlarına CaSO_4 derişimi etkileri incelenmiştir. Araştırmacılar ısı geçişi yüzey alanı kristal boyutunun küçük ve neredeyse fark edilemez olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu nedenle; çökelme sürecinin başında, çökelen kristallerin boyutlarının çok küçük olduğunu ve yüzeyden kopma işleminin oluşmadığını tespit etmişlerdir. Bir süre sonra, kristallerin boyutu artmakta birlikte daha kırılğan bir hal almakta ve çökelen maddelerin yüzeyi üzerinde daha yüksek kayma kuvveti oluşmaktadır. Bu koşullar kristallerin yüzeyden kopmasına ve uzaklaşmasına neden olur. Diğer bir olası durum da, çökelme kalınlığı artması ve akış alanının azalması nedeniyle, akışkan hızı artmaktadır. Yerel hızın artışı, çözelti sıcaklığını 2-3 ° C düşmesine neden olmaktadır. Ters çözünürlükteki tuzların doğasına bağlı

olarak, sıcaklığın azalması minerallerin çökelme hızında düşmesine neden olmaktadır. Bu olayların, zamanla çökelme hızında meydana gelen düşüşün temel nedeni olduğu sonucuna varılmıştır. Akışkan hızının kristallenme çökmesi üzerindeki güçlü etkisi Hasson (1962), Watkinson ve Martinez (1975) tarafından bildirilmiştir.

Knudsen ve Story (1978), soğutma kulesi suyunda kirlenme davranışı, üzerinde, ısı geçişi yüzey sıcaklığı etkisinin olduğunu model çalışması ile elde etmiştir. Soğutma kulesi suyu, şebeke suyu ile farklı derişimlerde oluşturulan çözeltilerden elde edilmiştir. Su kalitesinin her ne kadar sabit tutulması gereken bir faktör olması gerekse de, test sonuçlarına göre, deneyler boyunca sabit bir su kalitesini korumanın mümkün olmadığı görülmüştür. Çökelmenin olduğu yüzeyin sıcaklığı periyodik olarak kaydedildi ve makul seviyede sabit bir çökelme direnci oluşması için gereken süre olan 50-100 saate kadar çalışma devam etti. Veriler Taborek modeli (1972)'ne uydurularak şu şekilde sunuldu:

$$R_f^* = (3 \times 10^{11}) \exp\left(\frac{-1100}{RT_s}\right) \quad (4.17)$$

Yukarıdaki denklemde katsayı (3×10^{11}), Knudsen ve Story tarafından kullanılan test koşulları için geçerlidir. Denklem (4.17) yüzey sıcaklığının asimptotik çökelme değerleri ile ters orantılı olduğunu gösterir. Yüzey sıcaklığı etkisini incelemenin yanı sıra, Knudsen ve Öykü aynı zamanda asimptotik çökelme direnci üzerinde alkalinitenin etkisini görmüştür. Başka bir çalışmada, Morse ve Knudsen (1977) modellenen soğutma kulesi suyundaki kireçlenmesindeki alkalinite etkisini daha detaylı araştırmıştır. Testler boyunca, akışkan hızı ve ısı akısı sırasıyla 0,22 m/sn. ve 276 kW/m² sabit değerlerinde muhafaza edilmiştir. Alkalinite her çalışma başında CaCO₃ 116-187 ppm arasında değişmektedir. Görülen genel bir eğilim, yüksek su alkalinitesinin yüksek asimptotik çökelme direncini beraberinde getirdiğidir. Alkalinitedeki değişiklik, sudaki diğer farklı ters çözünürlükteki minerallerin çözünürlük oranlarını değiştirir. Bu gözlemlerle, Morse ve Knudsen asimptotik çökelme

hızlarının su alkalinitesine bağlı olduğunu aynı zamanda da, sudaki minerallerin çözünürlüğüyle karmaşık bir ilişki içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıdaki araştırma aslında doğada deneysel olarak vardır; Hasson ve arkadaşları (1970) iyonik difüzyon teorisi kullanılarak, CaCO_3 çökeltme hızını tahminleyen bir çökeltme modeli sundu. Bu modelde verilen pH, kalsiyum derişimi, toplam alkalinite ve sıvı akış parametre değerleri ile ısı değıştiricisi borularında oluşan kalsiyum karbonat çökeltmesinin tahminlenmesine izin vermektedir. Buna ek olarak, Hasson ve arkadaşları kristallenme çökeltmesini etkileyen bir parametre olarak akış sıcaklığını göz önünde bulundurmıştır. Modeli aşağıdaki gibi sunulmuştur:

$$\dot{m}_p = \frac{k_d[\text{Ca}^{2+}]}{2a} \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) \quad (4.18)$$

$$a = 1 - \frac{4k_2k_r}{k_1k_d} [\text{Ca}^{2+}] \quad (4.19)$$

$$b = \frac{4k_2k_r}{k_1k_d} [\text{HCO}_3^-] + \frac{k_{spi}k_r}{k_d} \frac{1}{[\text{Ca}^{2+}]} + \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{Ca}^{2+}]} \quad (4.20)$$

$$c = \frac{k_{spi}}{k_d} \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{Ca}^{2+}]} - \frac{4k_2k_r}{k_1k_d} \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{Ca}^{2+}]} \quad (4.21)$$

$$\dot{m}_p = \text{mineral kristallenmesi nedeniyle kütle geçiş hızı} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

k_1' ve k_2' = karbonik asit, birinci ve ikinci ayrılma sabitleri

k_{spi}' = Duvar sıcaklığında kalsiyum karbonat çözünürlük derişimi (mol/L)

k_r = Kristalizasyon hızı katsayısı (mol / L)

$$\ln k_r = 41.04 - \frac{10417.7}{T_i} \quad (4.22)$$

Kristalizasyon hızı katsayısı (k_r) denklem 4.22 ile hesaplanır.

T_i =Çökeltme yüzeylerinin Kelvin cinsinden sıcaklığı

k_d = kütle geçiş katsayısı

Kütle geçiş katsayısı denklem 4.23 kullanılarak:

$$k_d = 0.023 \nu Re^{-0.17} Sc^{-2/3} \quad (4.23)$$

ν = Su akış hızı (m/s)

Re = Reynolds Sayısı

Sc = Schmidt sayısı

Wiechers ve arkadaşları (1975) kalsiyum karbonatın bileşenlerinin çözünürlüğünü hesaplamak için, karbonik asitin birinci ve ikinci çözünürlük çarpanları ile modeller ortaya koymuştur:

$$K_1 = 10^{-\left(\frac{17052}{T_{w.avg}} + 215.21 \cdot \log(T_{w.avg}) - 0.12675 \cdot (T_{w.avg}) - 545.56\right)} \quad (4.24)$$

$$K_2 = 10^{-\left(\frac{2902.39}{T_{w.avg}} + 0.02379 \cdot T_{w.avg} - 6.498\right)} \quad (4.25)$$

$$K_{spi} = 0.01183 \cdot (T_{w.avg} - 273) + 8.03 \quad (4.26)$$

- **Kimyasal Tepkime Çökmesi;** Bu durumda çökme, bir ya da daha fazla kimyasal tepkimenin bir sonucudur. Sistem içinde dolanan akışkanlar, bu tepkimelere takılan tepkenleri barındırırlar. Yüzey malzemeleri ne tepken görevi görür ne de herhangi bir şekilde tepkimeyi katılır. Buna rağmen ısı geçiş yüzeyi; çatlama, koklaştırma, polimerizasyon ve otoksidasyon süreçlerinde olduğu gibi katalizör görevi görebilir. Asfalten ve protein gibi kimyasal bileşenlerin ısıl değişkenliği de çökme belirtilerini tetikleyebilir. Bu çökme, çevre sıcaklığından 1000°C'ye kadar olan geniş bir sıcaklık aralığında meydana gelebilir, fakat yüksek sıcaklıklarda daha etkilidir. Bu tür çökelmelerin mekanizmaları, ısı geçiş süreci sırasında meydana gelen istenmeyen kimyasal tepkimelerin bir sonucudur. Süreç endüstrisinin birçok uygulamasında kimyasal tepkime çökmesine rastlanmıştır. Petro-kimya

endüstrisi, petrol rafineleri, buhar fazında piroliz, yağların ve gazların soğutulması ve proses monomerlerinin polimerizasyonu bu endüstrilere örnek olarak verilebilir. Ayrıca, ısı geçiş yüzeylerinin biyolojik akışkanlar aracılığıyla çökmesi, karmaşık heterojen kimyasal tepkimeleri ve fizikokimyasal süreçleri de içerebilir. Eğer koruma görevi gören oksit tabakasının oluşumu kısıtlanırsa, kimyasal tepkimeleri çökmesinin yol açtığı tortular yüzeyde korozyona neden olabilir.

- **Korozyon Çökmesi;** Isı geçiş yüzeyinin kendisiyle akışkan akımı arasındaki kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeleri içerir. Bu tepkimeler, korozif maddeler üreterek yüzeyin ısı özelliklerini değiştirir ve çökmeye neden olurlar. Korozyon, iki şekilde çökmeye yol açabilir. İlk olarak, korozif maddeler birikerek yüzeyde toplanabilir ve ısı geçişine karşı direnç oluşturabilir. İkinci olarak ise bu korozif maddeler, partikül malzemeleri olarak korozyona uğrayan bölgeden taşınabilir ve sistemdeki başka bir bölgenin ısı geçiş yüzeyinde partikül çökmesi şeklinde çökebilir. Örneğin, buhar kazanının su bölgesinde meydana gelen çökmeye, yoğunlaştırucuda oluşmuş korozif maddeler sebep olmuş olabilir. Korozyon çökmesi, kimyasal tepkime çökmesinin dâhil olduğu ve yüzeyde koruyucu oksit tabakasının oluşmadığı birçok uygulamada yaygın olarak görülür. Buhar kazanlarının tasarımında ve fosil yakıt ateşlemeli elektrik tesislerindeki yoğunlaştırucularda önemi büyüktür.
- **Biyolojik Çökme;** Makroorganizmaların ve/veya mikroorganizmaların (ve onların ürünlerinin) ısı geçiş yüzeyine bağlanmasına ve büyümesine denir. Genelde "biyoçökme" olarak adlandırılır ve çoğunlukla su yataklarında meydana gelen bir problemdir. Biyolojik çökme, temelde iki alt gruba ayrılabilir; mikrobiyal ve makrobiyal. Mikrobiyal çökme; alg, mantar, maya, bakteri ve küf gibi mikroorganizmaların birikimidir. Makrobiyal çökme ise istiridye, kaya midyesi, kum midyesi gibi makroorganizmaların birikimi ya da deniz suyundaki veya nehir ağzı soğutma suyundaki bitki örtüsünün birikimi olarak tanımlanabilir. Mikrobiyal çökme, makrobiyal tortu oluşumundan önce gelir ve bu yüzden esas ilgi alanı olarak kabul edilebilir. Biyolojik çökme genellikle

yüzeydeki yapışkan bir tabaka ya da biyofilm formundadır. Düzenli olmayan, ipliksi, bozunabilir fakat çıkarması zor bir çökelmedir. Uygun şartlardaki sıvı akışlarında da oluşabilir, fakat genellikle açık resirkülasyonla ya da soğutma sulu açık devre sistemleriyle bağlantılıdır. Biyolojik çökeltme, yapışkan tabakanın altında korozyon çökeltmesine yol açabilir.

- **Katılaşma ya da Donma Çökeltmesi;** Saf bir sıvının ya da sıkıştırılmış ve soğutulmuş bir yüzeydeki çok bileşenli çözeltinin daha yüksek erime noktalı bileşenlerinin donmasıdır. Katılaşma çökeltmesinin bazı örnekleri şunlardır; sıcak akışlarla waxların soğutucu bir yüzeye etkileşime geçerek ayrılması, soğutulmuş su üretimi ya da nemli havanın soğutulması sırasında ısı geçiş yüzeyindeki buz formasyonu, fenol soğutucularında oluşan tortular ve parafin gibi maddelerin karışımlarının soğutulması sırasında oluşan tortular. Bu çökeltme mekanizması düşük sıcaklıklarda; yerel basınç koşullarına bağlı olarak çevre sıcaklığında ya da daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Katılaşma çökeltmesini etkileyen temel faktörler aracı akışkanın kütle debisi, sıcaklık, kristalizasyon koşulları, yüzey koşulları ve akışkanda oluşan ilk katıların derişimidir. Birden fazla çökeltme mekanizmasının dâhil olduğu birçok uygulamada, çökeltme probleminin sinerjistik etkisiyle birlikte çok daha karmaşık bir hal aldığı dikkate alınmalıdır. Çökeltme prosesini biçimlendirmek için tek, birleştirilmiş bir teoriden bahsedilemeyeceği açıktır. Bu süreçte oluşabilecek altı mekanizma türü yukarıda belirtilmiştir. Aynı zamanda çoğu süreç sırasında, bu çökeltme mekanizmalarının birden fazlası sinerjik etkileriyle birlikte ortaya çıkar.

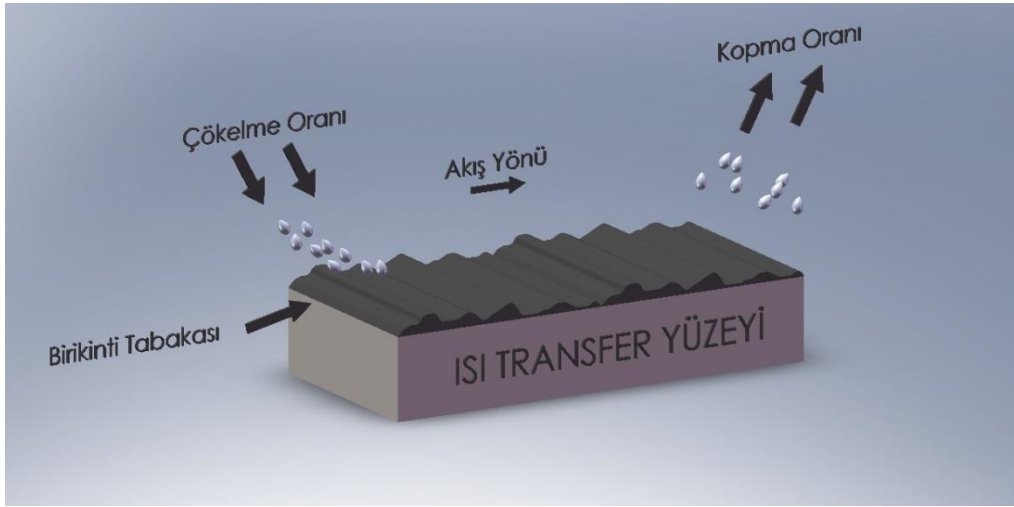
4.4 Çökeltme Prosesleri

Toplam çökeltme prosesi genelde iki eş zamanlı alt prosesin net sonucu olarak değerlendirilir; tortulaşma prosesi ve çıkarılma (yeniden katılma) prosesi. Çökeltme prosesinin şematik bir gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Bütün alt prosesler şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Akışkanın kütlelerinde tortu kalıntıları oluşumu
- ✓ Tortu kalıntılarının tortu-akışkan ara yüzüne taşınması

- ✓ Tortu-akışkan ara yüzünde birikim / oluşum reaksiyonu
- ✓ Çökelen tortunun çıkarılması (parçalanma ya da tortu tabakasının çamurlaşması)
- ✓ Tortu-akışkan ara yüzünden akışkanın kütlesine taşınması

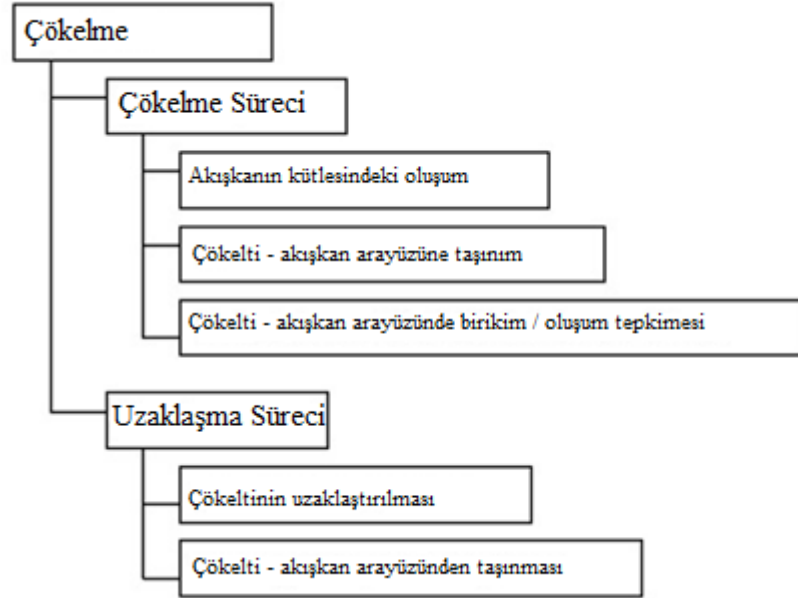
Çökeltme prosesinin şematik bir diyagramı da Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu alt proseslerin bazılarının belirli çökeltme durumlarına, örneğin korozyon çökeltmesi, uygulanamayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.6 Çökeltme Prosesleri

Bir başka yol olarak, akışkanın izlediği yol dâhilinde yüzeylerde oluşan tortularla ilgili üç ana madde tanımlanabilir:

1. Tortu kalıntılarının yayınımsal taşınımı ya da bu kalıntıların akışkan akımı içerisindeki belirtilerinin, katı yüzeye komşu olan sınır tabakaları boyunca, yayınımsal taşınımı
2. Tortunun yüzeye ve kendisine adezyonu
3. Malzemelerin yüzeyden uzağa taşınımı



Şekil 4.7 Çökelme prosesinin şematik diyagramı (Awad, 2003)

Bu basit öğelerin bir araya gelmesi yüzeyde tortunun büyümesine neden olur. Matematiksel ifadelerde tortunun büyüme oranı(çökelme direnci ya da çökelme faktörü, R_f), çökelme oranıyla çıkarılma oranının arasındaki fark olarak kabul edilir:

$$R_f = \Phi_d - \Phi_r \quad (4.27)$$

Bu eşitlikte Φ_d ve Φ_r çökelme ve çıkarılma oranlarını temsil eder. Çökelme faktörü, R_f , çökelme oranı, Φ_d ve çıkarılma oranı, Φ_r ; ısı direnç birimi olan m^2K/W ile kalınlık değişim oranı birimi olan m/s ile ya da kütle değişim birimi olan kg/m^2s ile ifade edilebilir.

4.5 Çökelme ve Uzaklaşma Mekanizmaları

İkinci bölümde tartışılan ve birçok farklı çökelme mekanizması için geçerli olan deneysel bulgular, bütün çökelme mekanizmalarının benzer bir olaylar dizisini izlediğini göstermektedir. Çoğu durumda birbirini izleyen olaylar, Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Bu olaylar, toplam çökelme prosesini kontrol eder ve ısı değiştirici performansı üzerindeki en son etkisini belirler. Bazı durumlarda, belirli olaylar çökelme prosesine hâkimdir ve çökelme türünün

sürdürülebilmesi üzerinde direk etkileri vardır. Bu olayların en temel olan beşi şu şekilde özetlenebilir:

- Bazen yakıt yanma gecikmesi sırasında geçen zaman ya da endüksiyon zamanı, Şekil 4.9'da gösterildiği gibi t_d , çökeltme prosesindeki ilk olaylardan (akışkanın kütlesinde tortu kalıntılarının oluşumu ya da çökeltmenin başlaması) önce gelir. Geçen bu zamanlara dâhil olan temel mekanizma heterojen çekirdeklenmedir. t_d daha kısadır ve daha yüksek bir çekirdeklenme oranına sahiptir. t_d 'yi etkileyen faktörler; sıcaklık, akışkan hızı, çökeltme akışının bileşimi ve ısı değiştirici yüzeyinin yapısı ile durumudur. Düşük enerjili yüzeyler (ıslanmaz), yüksek enerjili yüzeylerden (ıslanabilir) daha uzun endüksiyon zamanları ortaya koyarlar. Kristalizasyon çökeltmesinde t_d , artan derecede aşırı doygunluk ile azalma eğilimi gösterir. Kimyasal tepkime çökeltmesinde t_d , artan yüzey sıcaklığıyla birlikte azalır. Bütün çökeltme mekanizmalarında, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte (çekirdeklenme için uygun ve mevcut alanlara, adsorpsiyona ve adezyona bağlı olarak) t_d azalır.
- Bileşenlerin taşınımı, çökeltme bileşenlerinin akışkanın kütlesinden ısı geçiş yüzeyine taşınımı anlamına gelir. Bileşenlerin taşınımı, bütün bu sıralı olayların içinde en çok anlaşılanıdır ve aşağıdaki mekanizmaların bir ya da birkaçının faaliyetleri aracılığıyla meydana gelir:
 - Yayılım: Çökelen bileşenler ile ilgili bir kütle geçişi gerçekleşir. Bu transfer, akışkan ile yüzeye komşu olan akışkanın kütleleri arasındaki derişim farkından kaynaklanır ve akmakta olan akışkandan ısı geçiş yüzeyine doğrudur.
 - Elektroforez: Elektriksel kuvvetlerin etkisi altında, elektriksel yük taşıyan ve çökelen partiküller yüklü bir yüzeye doğru ya da yüzeyden uzağa hareket edebilirler. Bu özellik yüzeyin ve partiküllerin polaritesine bağlıdır. Elektroforeze bağlı tortu oluşumu, akışkanın elektriksel iletkenliğinin azalmasıyla, akışkanın sıcaklığının artmasıyla ve akışkan hızının artmasıyla birlikte artar. Aynı zamanda çözeltinin pH'ına da

bağlıdır. London-Van der Waals ve elektriksel çift tabakanın etkileşim gücü gibi yüzey kuvvetleri, genellikle elektroforezin etkilerinden sorumludur.

- Termoforez: Isıl bir kuvvetin ince parçacıkları, negatif sıcaklık eğimi yönünde, sıcak bir bölgeden soğuk bir bölgeye hareket ettirmesi olayıdır. Böylelikle, sıcak bir duvara yakın olan yüksek sıcaklık eğimi partiküllerin çökmesine engel olacaktır. Fakat, aynı eğim değeri soğuk bir duvara yakinken tam tersi şekilde partikül çökmesini destekleyecektir. Termoforez etkisi, sıvılara oranla gazlar için daha büyüktür.
- Difüzyon forez: Akışkanın difüzyonu ile oluşan parçacıkların hareketine denir. Gaz buharlarının bir yüzeyde yoğunlaşmasına yol açar.
- Sedimentasyon: Pas, kil, toz ve toprak tanecikleri gibi partikül malzemelerinin yüzey üstüne, yer çekimine bağlı olarak çökmesidir. Sedimentasyonun meydana gelmesi için aşağıya doğru olan yer çekimi kuvvetinin yukarı sürüklenme kuvvetinden daha büyük olması gereklidir. Düşük akışkan hızları ve büyük partiküller için sedimentasyon önemlidir. Soğutma kulesi sularında ve diğer endüstriyel proseslerde sık sık görülür. Bu endüstriyel proseslerde pas, kil, toz gibi partiküller katalizör gibi davranabilir ve/veya karmaşık reaksiyonlara girebilir.
- Eylemsizliğe Bağlı Sıkışma: "Büyük" partiküller yeterli seviyede eylemsizliğin etkisi altında akışkanların akım hattını izleyemeyecek duruma gelir ve sonuç olarak yüzeye çöker.
- Türbülanslı Aşağı Süpürme: Viskoz alt tabaka, türbülanslı bir sınır tabakada gerçekten kararlı bir durumda değildir ve akışkan, yüzey boyunca türbülanslı aşağı süpürmelerle taşınır. Bu türbülanslar, şiddeti tüm yüzeye rastgele dağıtılmış emiş bölgeleri olarak da düşünülebilir.

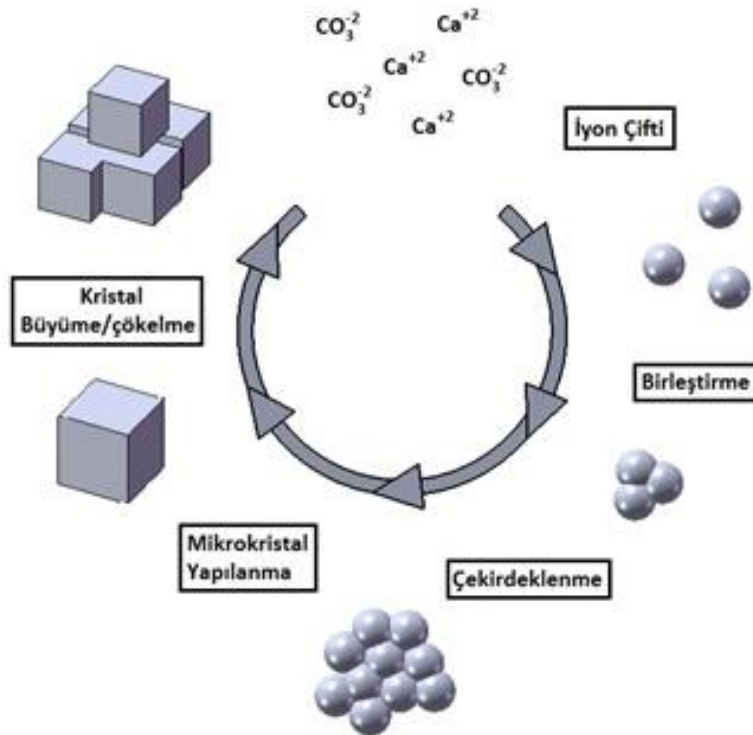
- Çökelen bileşenlerin yüzeye bağlanması hem fiziksel hem de kimyasal süreçleri içerir ve tam olarak anlaşılamaz. Birbiriyle bağıntılı üç faktör bu bağlanma prosesinde önemli rol oynar; yüzey koşulları, yüzey kuvvetleri ve bağlanma ihtimali. Bu üç faktörün bir arada ve eşzamanlı olarak meydana gelmesi bağlanma olayını büyük ölçüde açıklamaya yeterlidir.
- Yüzey özellikleri: Bağlanma için önemli olan yüzey koşullarının özellikleri şunlardır; yüzey serbest enerjisi, ıslanabilirlik(kontak açısı, yayılabilirlik) ve daldırma ısısı. Islanabilirlik ve daldırma ısısı, duvarın yüzey serbest enerjisiyle komşu akışkan tabakası arasındaki fark arttıkça artar. Islanmaz ya da düşük enerjili yüzeyler, ıslanabilir ya da yüksek enerjili yüzeylerden daha uzun endüksiyon zamanlarına sahiptir. Bu yüzden polimerlerde ve seramik kaplamalarda olduğu gibi bu yüzeylerde çökeltme, ıslanabilir ya da yüksek enerjili yüzeylere oranla daha düşük bir risk teşkil eder. Yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin etkin kontak alanını artırır ve çekirdeklenme için uygun alan sağlayarak çökeltmeyi teşvik eder. Dolayısıyla pürüzlülük, ıslanabilir yüzeylerin ıslanabilirliğini artırırken ıslanmaz yüzeylerin ise ıslanmazlığını azaltır.
- Yüzey kuvvetleri: En önemlileri, apolar moleküller arasındaki moleküller arası çekim kuvvetini arttıran ve hep çekici bir güç olan London-van der Waals kuvvetleridir. Elektriksel çift tabaka etkileşim gücü, hem çekici bir kuvvet hem de itme kuvveti görevi görebilir. Viskoz hidrodinamik kuvvetler, duvara doğru hareket eden partiküllerin bağlanmasını etkiler. Bu bağlanma ihtimali, partikül düzgün yüzeylere doğru hareket ederken artar.
- Bağlanma ihtimali: Duvara ulaşan ve herhangi bir yeniden katılma olayı başlamadan önce orada kalan partikül parçalarını temsil eder. Bağlanma olayının karmaşıklığını analiz etmek ve açıklamak için planlanmış, yararlı, istatistiksel bir kavramdır.
- Çökeltinin yüzeyden uzaklaşması, çökeltmeyle eş zamanlı gerçekleşebilir/gerçekleşmeyebilir. Uzaklaşma süreci, şu mekanizmaların tek başlarına ya

da eş zamanlı olarak meydana gelmesine bağlı olarak ortaya çıkar; kayma kuvveti, birikintileri parçalayan türbülans oluşumları, tekrar çözünme ve aşınma.

- Kayma kuvveti, çökelen tabakada akmakta olan akışkan tarafından uygulanan kayma geriliminin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Çökme büyüyüp kuvvetlendikçe, akış için olan kesit alanı azalır, böylece hem sabit bir kütle debisi için akışkanın ortalama hızı hem de kayma gerilimi artar. Sadece çökeltinin bağlanma direncinin, katı-akışkan ara yüzünde geçerli olan kayma kuvvetinden büyük olduğu durumlarda yeni çökelti oluşur.
- Rastgele dağılmış olan (herhangi bir anda, yaklaşık olarak %0,5'den az) ve periyodik olarak oluşan türbülanslar, minyatür bir hortum görevi görür ve çökelen malzemeleri parçalayarak yüzeyden kaldırır. Bu akışkanların çökeltiyi parçalamasının devamında ise şiddeti daha hafif olan akışkanların arkadan gerçekleştirdiği süpürmeler gelir. Böylece tekrar çökmeye yol açılır.
- Tekrar çözünme: Çökeltinin tekrar çözünme yöntemiyle çıkarılması direk olarak çökelen malzemenin çözünürlüğüyle alakalıdır. Oluşmaya başladığı zamanlarda, çökmekte olan tortu tabakası büyük ihtimalle tekrar çözünmez, bu yüzden ayrışma sadece belirli koşullar altında meydana gelir. Bu koşullar; sıcaklığın, hızın, alkaliliğin ve diğer işlemsel değişkenlerin yerel değişimlerine bağlıdır. Bu değişimler; çökeltinin, akan akışkanın ya da her ikisinin özelliklerinde bir değişikliğe sebep olur. Örneğin, yeterli derecede yüksek ya da düşük sıcaklıklar biyolojik bir çökeltiyi öldürerek yüzeyle olan bağlantısını zayıflatabilir. Böylece çamurlaşmaya veya çökeltinin tekrar çözünmesine yol açabilir. Enerji üretim sistemlerindeki korozyon çökeltilerin çıkarılması, düşük alkalilikte tekrar çözünme yöntemi ile gerçekleştirilir. Tekrar çözünme yöntemi, iyonik ya da moleküler formlardaki malzemelerin çıkarılması ile bağıntılıdır.
- Aşınma, toplam uzaklaşma süreci olarak tanımlanır. Çökelti kalıntılarının kayma kuvvetine ve eğer varsa, eğimli ısı değiştirici yüzeylerinin

uzunluğuyla dikliğine yüksek derecede bağlıdır. Aşınma, partikül yapısındaki malzemelerin uzaklaşmasıyla ilişkilidir. Eğer çökelen tabaka, iyi kristalleşmiş saf malzemelerden (güçlü oluşumlar) oluşuyorsa uzaklaşma mekanizması büyük ölçüde etkisiz hale gelir; fakat eğer her birinin farklı kristal özelliklerinin olduğu çeşitli tuzlardan oluşuyorsa oldukça etkilidir.

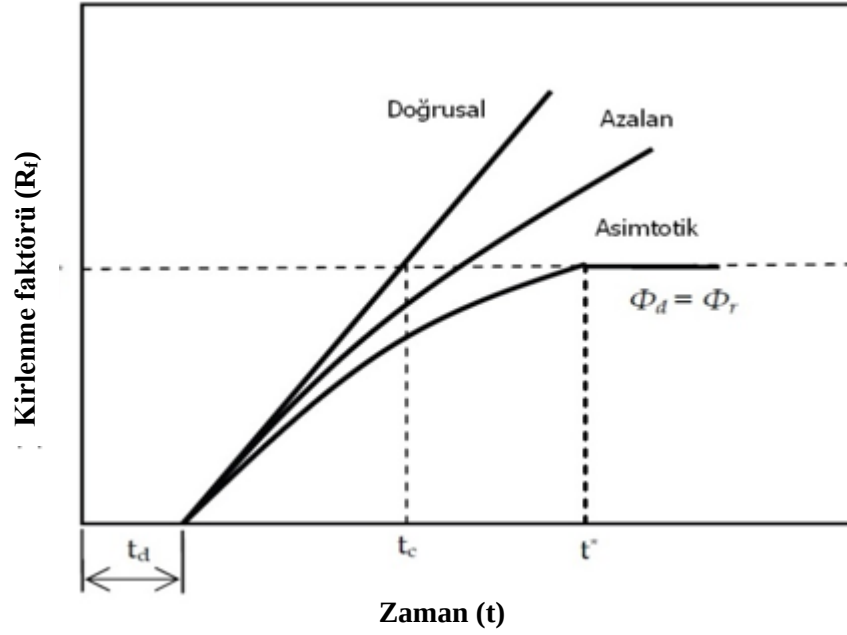
- Bir kere çökelti çamurlaştığında, çökelti-akışkan ara yüzünden akışkanın kütlesine doğru taşınabilirler/taşınmayabilirler. Bu durum, çamurlaşmış parçanın kütlesine, hacmine ve akan akışkanın hidrodinamik kuvvetlerine bağlıdır. Eğer çamurlaşmış parça yeterince büyükse, korozyif maddeler gibi yüzeyden taşınabilir ve sistemdeki başka bir bölgeye çökebilir. Aşınmanın etkisiyle çıkarılmış bütün çökelti akışkanın kütlesine taşınır. Bu olay gerçekleşmeden aşınma prosesi tamamlanmış olmaz. Çamurlaşan çökeltiyi etkileyen önemli bir parametre de çökeltinin yaşlanmayla birlikte güçlenmesi/zayıflamasıdır.



Şekil 4.8 Kireçlenme Mekanizması

4.6 Çökme Eğrileri

Çökelmenin dâhil olduğu toplam süreç kirlenme faktörü, R_f ile gösterilir. Çökelme faktörü, ya bir deneme kesitiyle ya da işleyen bir ısı değiştiricinin azalan kapasitesini ölçerek bulunabilir. Birçok farklı kirlenme biçiminin zamana göre değişiminin gösterimine kirlenme faktörü- zaman eğrisi denir. Tipik kirlenme faktörü – zaman ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Kirlenme faktörü - Zaman Eğrileri (Awad, 2003)

Gecikme süresi, t_d , başlangıçta çökelmenin meydana gelmediği bir zaman aralığının geçebileceğini göstermektedir. t_d 'nin değeri tahmin edilemez, fakat verilen bir yüzey ve sistem için; doğada kısmen düzensiz gibi ya da bir ortalama değerinde normal dağılıma sahip gibi ya da en azından bir frekans faktörüne bağlı gibi görünür. Kirlenmenin olduğu yüzeylerin temizlenmesinden ve tekrar kullanılmasından sonra, gecikme süresi, t_d , genellikle ilk defa kullanılan yüzeylerinkine oranla daha kısadır. Kirlenme faktörü-zaman eğrisinin yapısının t_d 'nin bir fonksiyonu olmadığı dikkate alınmalıdır. Tipik kirlenme faktörü zamanla değişimi doğrusal, azalan, asimtotik olur

- Doğrusal çökelme eğrisi, ya sabit bir çökelme hızıyla, Φ_d , ihmal edilebilir bir uzaklaşma hızının, Φ_r , olduğunu(örneğin $\Phi_d = \text{sabit}$, $\Phi_r \cong 0$) ya da Φ_d ve Φ_r arasındaki farkın sabit olduğunu(örneğin $\Phi_d - \Phi_r = \text{sabit}$) gösterir. Bu durumda, çökeltinin kütlesi zamanla birlikte artar ve "a"nın doğrunun eğimi olarak tanımlandığı bir sistemde sabit eğimli düz bir doğru ($R_f = a.t$) ortaya çıkar.
- *Azalan çökelme eğrisi*, ya azalan bir çökelme hızıyla, Φ_d , sabit bir uzaklaşma hızının, Φ_r , olduğu durumlarda ya da azalan bir çökelme hızıyla, Φ_d , artan bir uzaklaşma hızının, Φ_r , olduğu durumlarda ortaya çıkar. Bu durumda, çökeltinin kütlesi zamanla birlikte artar fakat doğrusal değildir ya da asimtotik değerde olduğu gibi kararlı bir hale ulaşmaz.
- Asimtotik çökelme eğrisi,, sabit bir çökelme hızının, Φ_d , olduğunu ve asimtotta $\Phi_d = \Phi_r$ olana kadar çökelti kalınlığıyla doğru orantılı bir uzaklaşma hızının, Φ_r , olduğunu gösterir. Bu durumda, çökelme hızı zamanla birlikte azalır ve dolayısıyla, sonunda kararlı hale ulaşır. Kararlı hale gelindiğinde yüzeyde net çökelme artışı yoktur ve ek bir çökelme olmadan cihazların işleminin devam etmesi olasıdır. Uygulamalı endüstriyel durumlarda, asimtota ulaşılabilir ve asimtotik kirlenme faktörü, R_f^* , birkaç dakikada ya da işlem şartlarına bağlı olarak birkaç haftada/ayda elde edilebilir. Denklem 4.28'te bu davranışı açıklayan genel denklem verilmiştir. Bu tür bir durum, endüstriyel uygulamalarda fazlasıyla ortaya çıktığı için en önemli olandır. Saf partikül çökmesi bu türe aittir. Bütün çökelme türleri için birim alan başına çökelen malzeme miktarı, m_f kirlenme direnciyle (R_f), çökelti kalıntılarının yoğunluğuyla (ρ_f), ısıl iletme katsayısı (λ_f) ve çökelti kalınlığıyla (x_f) bağıntılıdır:

$$m_f = \rho_f x_f = \rho_f \lambda_f R_f \quad (4.28)$$

Bu formülde R_f ;

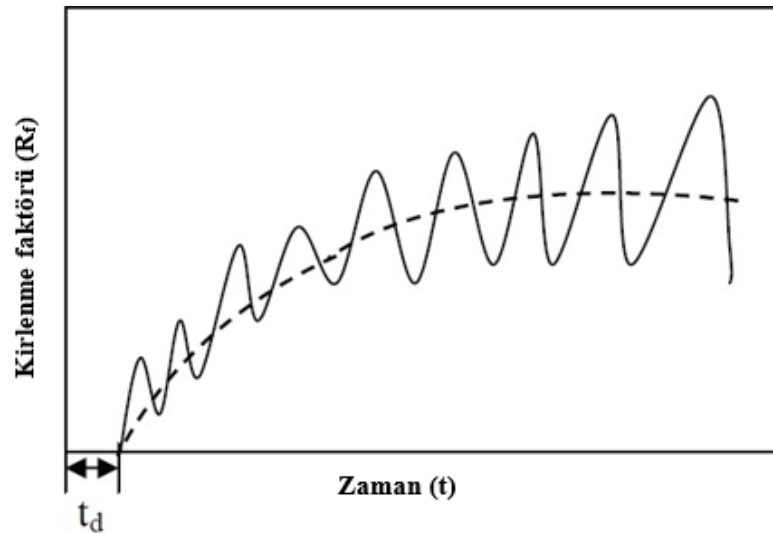
$$R_f = \frac{x_f}{\lambda_f} \quad (4.29)$$

Bazı çökelti kalıntılarının ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Bazı kalıntılarının ısı iletkenliği (Awad, 2003)

Çökelti Kalınlıkları	Isıl İletim Katsayısı (W/m.K)
Alümin	0,42
Biyofilm (etkin olarak su)	0,6
Karbon	1,6
Kalsiyum Sülfat	0,74
Kalsiyum Karbonat	2,19
Magnezyum Karbonat	0,43
Titanyum Oksit	8
Wax	0,24

Şekil 4.10’te gösterilen eğrilerin ideal endüstriyel koşullar için geçerli oldukları göz önünde bulundurulmalıdır. İdeal durumlar her zaman sağlanamayabilir. Asimtotik pratik çökeltme eğrilerinin daha gerçekçi bir gösterimi Şekil 4.10’teki gibi olabilir. “Testere dişi” etkisi, çökeltinin bir kısmının parçalanmaya ya da çamurlaşmaya bağlı olarak yüzeyden uzaklaştırılmasının bir sonucudur. Bu olayın sonucu olarak, kısa zamanda hızlı bir çökelti birikimi meydana gelir.



Şekil 4.10 Pratik Çökelme Eğrileri (Awad, 2003)

Kesik çizgilerle gösterilen ortalama eğri, Şekil 4.10'daki ideal asimtotik eğriyi göstermektedir. Çökelmenin kısmen çıkarılmasının ve çökelmesinin buna benzer etkileri, farklı tür çökelme eğrilerinde de görülebilir.

4.7 Çökelme Masrafları

Çökelme, ısı değiştiricilerinin hem ilk yatırım masraflarını hem de işletme masraflarını etkiler. Isı değiştiricilerin tasarımında çökelme sebebiyle gereken ekstra yüzey alanı, azımsanamayacak bir miktardır. Belirli ülkelerde, belirli süreçler için çökelmenin toplam masraflarını tahmin etme denemeleri yapılmıştır. Birçok masraf azaltma stratejisinin verimliliğini hesaplarken çökelme ekonomisine dair güvenilir bilgi bulunması çok önemlidir. Çökelmeyle ilgili toplam masraflar aşağıda görüldüğü gibi dört ana maddeye ayrılabilir:

- I. Ekstra yüzey alanı (%10-50) nedeniyle normalden büyük olan işletmelerin sermaye masrafları, fazladan yüzey masrafları, artan taşıma ve kurulum masrafları
- II. Isıl verimliliğin düşmesinden ve basınç düşüşündeki artışlardan dolayı olan enerji kayıpları
- III. Çökelmenin temizlenmesi nedeniyle planlanan/planlanmayan fabrika kapanışlarının yol açtığı üretim kayıpları
- IV. Isı geçiş cihazlarının temizlenmesinin ve çökelmeyi önleyici maddelerin kullanılmasının dâhil olduğu bakım süreci

Genellikle ısı geçiş verimliliğindeki kayıp, yetersiz verimliliği gidermek için sistemde başka bir yerde fazladan enerjiye ihtiyaç duyulduğunu gösterir. Isı değiştirici boyunca artan basınç düşüşü, aynı akış hızını korumak için gerekli olan pompalama enerjisindeki artışı temsil eder. Eğer çökelme gerçekleşmiyorsa kullanılan çökelme direnci, tasarımın yüzey alanında gerekli olana oranla yaklaşık %50'lik bir artışa neden olur. Çökelmenin sonucu olan fazladan bakım ihtiyacı farklı yollarla ortaya çıkabilir. Genel olarak kapsamlı herhangi bir çökelme, ısı değiştiricisinin ısı geçiş kapasitesi kaybını telafi etmek için, düzenli

olarak temizlenmesi gerektiği anlamına gelir. Pritchard'a göre, yüksek derecede sanayileşmiş ülkeler için toplam ısı değiştirici çökelme masrafları, ülkelerin Gayrisafi Milli Hâsılları'nın (GSMH) yaklaşık %0,25'ini oluşturur. Çizelge 4.12'de, birkaç farklı ülke için 1992'deki tahminlerden yola çıkarak hesaplanmış yıllık çökelme masrafları gösterilmiştir.

Bu çizelgede de açıkça görüldüğü gibi, çökelme masrafları azımsanmayacak miktarlardadır. Bu masraflardaki herhangi bir azalma, toplam kazanca ve rekabet yeteneğine büyük katkı sağlayacaktır.

Temizleme sıklığı, çökelmenin ciddiyetine bağlıdır ve bir haftadan bir yıla kadar sürebilecek, hatta daha da uzayabilecek geniş bir zaman aralığını kapsayabilir. Sık sık görülen temizlenme süreci nedeniyle ısı değiştiricinin sökülüp tekrar kurulması, en sonunda küçük ya da büyük derecede hasarlara yol açacaktır. Bu durum da cihazların faydalı ömrünün kısalmasına neden olacaktır. Çökelme, petrokimyasal fabrikalarda ve rafinerilerde fazlasıyla masraflı olabilir. Bu durumun sebebi, yarıda kesilen işlemler ve üretim kayıpları nedeniyle yakıt kullanımının ve beraberinde bakım masraflarının artmasıdır.

Çizelge 4.12 Bazı ülkelerde kirlenmenin yıllık giderleri (1992 tahmini) (Tay, Yang 2006)

Ülke	Çökelme Masrafları (milyon \$)	Çökelme Masrafları / GSMH (%)
ABD	14175	0,25
Birleşik Krallık	2500	0,25
Almanya	4875	0,25
Fransa	2400	0,25
Japonya	10000	0,25
Avustralya	463	0,15
Yeni Zelanda	64,5	0,15

4.7.1 Artan Sermaye Yatırımları

Potansiyel çökelme durumlarını hesaba katmak için ısı geçiş yüzeyi alanı, temiz koşullara oranla daha büyüktür. Çökelmeyle alakalı ısı geçiş kapasitesi

düşüşünü uygun hale getirmek için, boru tipi değiştiriciler genellikle %20-50 ekstra yüzeyle, kompakt ısı değiştiricilerse %15-25 ekstra yüzeyle tasarlanır. Isı değiştiricilerin boyutu dışında da olası artan sermaye ücretleri vardır. Örneğin, bir partikül ısı değiştiricisinin ciddi/zor bir çökeltme geçirebileceğinin tahmin edildiği yerde, çevrimdışı temizleme bölgeleri gerekli olacaktır. Temizleme sırasında kolay ulaşılabilir ısı değiştirici bölgelerini, daha uygun yerlerde çalışan ve az miktarda çökeltme görülen/hiç çökeltme görülmeyen benzer ısı değiştiricileriyle karşılaştırıldığında, fazladan boru hattı ve daha büyük pompalar gerektirebilir. Buna ek olarak, eğer çökeltme probleminin geniş çaplı olacağı düşünülüyorsa, boru hattı temelleri ve desteğiyle birlikte yedek bir değiştirici kurmak da gerekebilir. Böylece, bir ısı değiştirici temizlenirken ve bakımı yapılırken diğeri gerekli işlemleri gerçekleştirebilir.

Bu şartlar altında, ek sermaye masraflarının, temiz koşullarda çalışan bir ısı değiştiricinin masraflarının iki katından fazla olması, hatta ağır kirlenme oluşumu hesaba katıldığında 4-8 katı kadar olması muhtemeldir. Ek sermaye masrafları, Taprogge sisteminde ve diğer sistemlerde olduğu gibi çevrimiçi temizleme için de uygun görülebilir. Ancak, çevrimiçi temizlemenin çok verimli olabileceği ve ek sermaye masraflarının azalan işlemsel masraflar sayesinde dengelenebileceği belirtilmelidir. Bundan başka, ek alanın nasıl düzenleneceği de çökeltme oranını etkileyebilir. Örneğin eğer ek alan sonuçları öyle gösteriyorsa, azalan hızda çökeltme oranı tahmin edilenden daha yüksek olabilir ve ek alanın değeri, ağır tortuların etkileri nedeniyle fazlasıyla arttırılmış olabilir. Mesela ek yüzey alanının rastgele bir şekilde kullanılması, özellikle yapım sırasında egzotik ve pahalı malzemelerin gerektiği durumlarda yüksek sermaye masraflarına yol açabilir.

Kirlenmeyi temizleme giderlerinin, kimyasal giderlerinin ve çökeltme karşıtı donanımlar için gerekli olan diğer çalıştırma ürünlerinin giderlerinin bir toplamıdır. Pritchard ve Thackery'ye göre, süreç tesislerinin bakım masraflarının %15'e yakını ısı değiştiricilerine ve kazanlara atfedilirken, bu oranın %50'sinin de büyük ihtimalle kirlenme nedeniyledir. Garrett price ve arkadaşları, Amerika'da, 1982'de ısı değiştiricileri için çevrimiçi ve çevrimdışı

temizleme donanımı, temizleme servisi ve kimyasal madde sağlayan şirketlerin yıllık satışlarının 2,000 milyon Amerikan doları olduğunu hesaplamıştır.

Ekstra taşıt masrafları şu durumlarda geçerlidir; kirlenmenin fırın ve kazanların içinde ekstra yakıt tüketimine neden olduğu durumlar, çökeltmenin etkisini yenmek için elektrik ve proses buharı gibi sekonder enerjilerin gerektiği durumlar. Thackery, 1978'deki ek yakıt masraflarını 100-200 milyon € (290-480 milyon Amerikan doları) olarak hesaplamıştır. Garrett prince ve arkadaşları (Garrett-Prince, 1985) ise endüstri sektörünün harcadığı enerjinin %1 - %5'inin çökeltmeyi yenmek için kullanıldığını bulmuştur. Bu sonuçlar, çökeltmenin yol açtığı yakıt masraflarının 700 ile 3,500 milyon Amerikan doları arasında olduğunu göstermektedir.

4.8 Çökeltmeyi Etkileyen Parametreler

Çökeltme prosesi, çökeltme üzerinde belirgin etkileri olan birçok işlemsel ve tasarımsal parametrenin dâhil olduğu dinamik ve kararsız bir prosestir. Çökeltme problemini açıklamak için ve tasarımcıların modifikasyonları üzerinde etkileri olduğu için temelde bu değişkenler incelenir. Akışkan akış hızı, akışkan özellikleri, yüzey sıcaklığı, yüzey geometrisi, yüzey malzemesi, yüzey pürüzlülüğü, asılı kalmış partiküllerin derişimi ve özellikleri, vs. bu parametrelerden bazılarıdır. Bir sürü araştırmacıya göre, en önemli parametreler şunlardır:

4.8.1 Akışkan akış hızı

Akış hızının çökeltme oranı üzerinde ciddi bir etkisi vardır. Çökeltme hızının ise hem birikme oranı hem de türbülans ve yüzeydeki kayma gerilimi gibi hidrodinamik etkiler sayesindeki uzaklaşma hızı üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Bir yandan da akış hızı; çökelti kuvvetini (ψ), kütle geçiş katsayısını (k_m) ve yapışabilirliği (P) de dolaylı olarak etkiler. Artan akış hızının ısı değıştircinin ısıl performansını arttırmaya ve çökeltme hızını düşürmeye eğilimli olacağı saptanmıştır. Isı geçiş yüzeyini geçmiş üniform ve sabit proses akışkanlarının akışları, çökeltmeye daha az eğilimlidir. Proses akışkanında asılı

kalmış tortu kalıntıları düşük hızlı bölgelerde, özellikle ısı değiştirici su haznesi ve kabuk tarafının üstü gibi hızın çabuk değiştiği yerlerde çökeler. Yüksek kayma gerilimi, tortuların yüzeyden sürüklenmesine neden olur. Sedimentasyon etkisini ve tortu birikimini azaltmak için ısı değiştiricisi boyunca kısmen üniform olan hız değerlerini korumak gerekir.

4.8.2 Yüzey sıcaklığı

Yüzey sıcaklığının çökme oranı üzerindeki etkisinden birçok araştırmada bahsedilmiş ve bu araştırmalarda, yüzey sıcaklığının rolünün iyi tanımlanmamış olduğunu belirtilmiştir. Bu konudaki literatürlerin de göstermiş olduğu gibi " artan yüzey sıcaklığı çökme oranını azaltabilir, arttırabilir ya da hiç etki etmeyebilir ". Bu davranış çeşitliliği, bu konu üzerindeki anlayışımızın geliştirilmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu konuda izlenebilecek pratik bir çözüm, sıcaklık arttıkça daha fazla çökme gerçekleşeceğini varsaymaktır. Bu durum kirlenme eğiliminden, artan korozyon oranından, daha hızlı reaksiyonlardan, kristal formasyonundan, polimerizasyondan ve bazı çökme karşıtı malzemelerin etkinlik kaybından dolayı gerçekleşir. Daha düşük sıcaklıklar, daha yavaş çökme artışlarına ve genellikle kolayca çıkarılabilen tortulara yol açar. Fakat, bazı proses akışkanları için, düşük yüzey sıcaklığı kristalizasyonu ve katılaşma çökmesini teşvik eder. Bu problemleri aşabilmek için her durumda kullanılacak optimum bir *yüzey sıcaklığı* vardır. Muhtemel bir kireçlenme riski olan soğutucu sular için, istenen maksimum yüzey sıcaklığı yaklaşık 60°C'dir. Biyolojik çökme ise sıcaklığa fazlasıyla bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda, kimyasal ve enzimatik reaksiyonlar, daha yüksek bir oranda ilerlerler ve hücre büyüme oranında birbirini takip eden artışlar görülür. Mukherjee'ye göre, herhangi bir biyolojik organizma için, belirli bir sıcaklık değeri altında üreme ve büyüme durur, belirli bir sıcaklık değeri üstünde ise organizma hasar görür ya da ölür. Ancak sıcaklık dengeli bir seviyeye kadar arttırılırsa, bazı ısıya duyarlı hücreler ölebilir.

4.8.3 Yüzey Malzemesi

Yüzey malzemesinin seçimi, korozyon çökmesiyle mücadele etmek için önem teşkil eder. Karbon çeliği, daha ucuz bir malzeme olmasına rağmen koroziftir. Bakır ise suda biyosidal etki gösterir fakat kullanımı belirli uygulamalarla sınırlıdır:

1. Bakır, sülfat indirgeyen bakteriler de dâhil olmak üzere biyolojik organizmaların saldırısına maruz kalır. Bu durum kirlenmeyi arttırır.
2. Bakır alaşımları, yüksek basınçlı buhar santrali ısı değiştiricilerinde yasaklanmıştır. Çünkü bakır alaşımlarının korozyon tortuları taşınır ve yüksek basınçlı buhar jeneratörlerinde çöker. Bu durum da türbin kanadının sonradan tıkanmasına neden olur.
3. Bakır, denizler için zehirli bir maddedir. Bu yüzden çevre korunması, bakırın ırmaklarda, göllerde ve deniz suyunda kullanılmasını sınırlamıştır. Titanyum ve nikel gibi korozif olmayan malzemeler korozyonu engelleyecektir, fakat bunlar pahalı ve biyosidal etkisi olmayan malzemelerdir. Cam, grafit ve teflon borular genellikle çökmeyi engeller ve/veya temizlemeyi iyileştirir fakat düşük ısı iletkenliğe sahiptirler. Yapım malzemesi çökmeyi engellemek için daha önemli olmasına rağmen yüzey işlemleri de tortu birikimini en aza indirecektir. Bu işlemler plastik, camsı emaye, cam ve bazı polimerler kullanılarak yapılır.

4.8.4 Yüzey Pürüzlülüğü

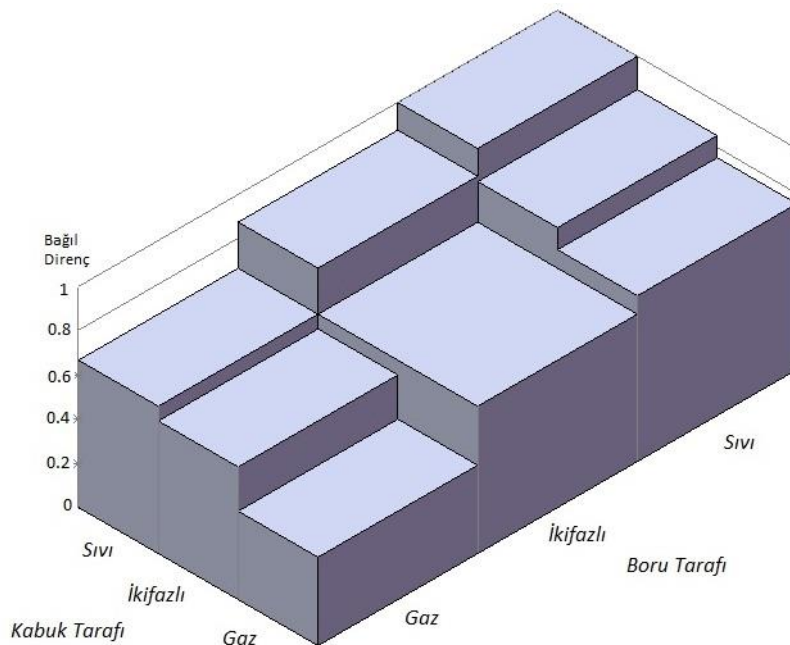
Yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilen etkileri şunlardır:

1. Çekirdeklenme bölgeleri başlangıç birikintilerinin yüzeye tutunmasına yardımcı olmak.
2. Akan akışkanlarda türbülans etkileri ve akışmaz alt tabakada dengesizlik yaratmak. Daha iyi yüzey pürüzlülüğünün çökelmenin gecikmesini etkilediği ve temizlemeyi kolaylaştırdığı gösterilmiştir. Buna benzer

olarak, akışmaz yüzeyler de çökelmeyi geciktirir. Pürüzlü yüzeyler partikül çökmesini teşvik eder ve önemli ölçüde bir tortu yapışmasına neden olur. Çökme başladıktan sonra, pürüzlülük etkilerinin devamlılığı çökelmenin kendisinin bir fonksiyonu olacaktır. Zamanı geldiğinde pürüzsüz yüzeyler bile kireçtaşı oluşumunun, korozif madde oluşumunun ya da aşınmanın etkisiyle pürüzlü hale gelebilir.

4.8.5 Akış Özellikleri

Çökelmenin akış özellikleri, viskozite ve yoğunluk gibi niteliklere bağlıdır. Viskozite, çökme prosesinin yer aldığı alt tabakanın kalınlığında önemli bir rol oynar. Diğer bir yandan, viskozite ve yoğunluğun, çıkarılma prosesinin temel ögesi olan kayma geriliminin üzerinde önemli bir etkisi vardır. Akışkan akış türünün çökme direnci üzerindeki etkisini göstermek için Chenowet, 700'ün üstünde kabuk ve boru tipi ısı değiştiricinin bilgilerini toplamıştır. Bu kabuk ve boru tarafı çökme dirençlerinin bilgileri (her bir tarafın yan girişini toplayarak), derlenerek her bir akışkan tarafında sıvı, iki fazlı ve gazın dokuz kombinasyonuna bölünmüştür. Her iki akışkan kombinasyonu için toplam R_f değerinin aritmetik ortalaması alınmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de, 0 ile 1,0 arasındaki bir ordinat aralığında gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Akışkan akış türünün çökeltme üzerindeki etkisi (Awad, 2003)

Bu şekilden yola çıkarak maksimum değerin 1,0 olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu değer sıvı-sıvı ısı değiştiricileri kullanarak elde edilebilir. Minimum değer ise 0,5'tir ve gaz-gaz ısı değiştiricileri kullanıldığı zaman elde edilir. Eğer sıvı kabuk tarafındayken gaz boru tarafındaysa, buna bağlı çökeltme direnci 0,65'tir. Ancak, sıvı boru tarafındayken gaz kabuk tarafındaysa, bu değer 0,75 olur. Birçok endüstriyel uygulamanın prosesi gazlardan daha kirli olan sıvılarla uğraştığından dolayı, genel olarak sıvılar için gazlara oranla daha büyük çökeltme dirençleri tanımlanır. Aynı zamanda, eğer sıvı-gaz bir ısı değiştiricinin sıvı tarafında çökeltme öngörülürse ve daha büyük bir çökeltme direnci tanımlanmamışsa, bu çökeltme genellikle temizlenme amacıyla boru içerisine yerleşmiştir. Bütün bunlar şekilde açıkça görülmektedir. Fakat Şekil 4.11'in güncel çalışmaları temel alarak çizildiği ve bilimsel bir dayanağı olmadığı da belirtilmelidir. Sıvılar için daha büyük çökeltme dirençlerinin tanımlanmasının, sıvı-sıvı değiştiricilerin yüzey alanı gereksinimleri üzerinde gaz-gaz değiştiricilerinkine oranla daha fazla etkisi vardır. Bunun sebebi, sıvıların çökeltme dirençlerinin, gazlarınkine oranla daha yüksek ısı geçiş katsayılarının olmasıdır.

4.8.6 Yabancı Maddeler ve Askıdaki Katı Maddeler

Akışkanların saf olması çok nadirdir. Yok denecek kadar az yabancı maddelerin ihmalı, çökeltme başlatabilir ya da çökeltmeyi önemli derecede arttırabilir. Bu maddeler ya bir tortu tabakası şeklinde çökeler ya da çökeltme prosesinde katalizör görevi görür (Weierman,1982).Örneğin, kimyasal reaksiyon çökeltmesi ya da rafineri hidrokarbon akışının polimerizasyonu, oksijen girişine ve/veya Va, Mo gibi eser elementlerine bağlıdır. Kristalizasyon çökeltmesinde yabancı maddelerin küçük partikülleri, kabarcıklanma vasıtasıyla çökeltme prosesini başlatabilir. Buna rağmen bazı durumlarda birçok çökeltme karşıtı kimyasalın temelini de oluşturabilir. Bazen soğutucu sudaki kumun ya da diğer asılı kalmış yabancı maddelerin bir oyulma etkisi olabilir ve böylece çökeltme azalabilir/yok olabilir (Bansal, 1997).

Askıdaki katı maddeler, sedimentasyonla ya da yer çekiminin etkisiyle ısı geçiş yüzeyine yerleşerek partikül çökmesine yol açabilir. Partikül çökmesi hıza bağlı olduğuna göre eğer durgun bölgelerden kaçınılırsa çökme engellenebilir. Su için, 1m/s'nin üstündeki yüksek hızlar partikül çökmesini engellemeye yeter. Genellikle yukarı akımı filtreleme ekonomik bir çözümdür.

4.8.7 Isı Geçiş Süreci

Aynı akışkan için çökme direnci, farklı koşullarda önemli ölçüde değişebilir. Bu değişim ısıнын hissedilir ısıtma, soğutma, kaynama ya da yoğunlaşma yöntemlerinden hangisiyle transfer edildiğine bağlıdır.

4.8.8 Tasarımda Göz Önünde Bulundurulması Gerekenler

Ekipmanın tasarımı, çökmenin artmasına ya da azalmasına yardımcı olabilir. Örneğin, boru aynası boyunca uzanan ısı değiştirici boruları hızlı çökelmeye neden olabilir. Çökmenin bazı yönleri, ekipman tasarımı sırasında göz önüne alınmalıdır:

- Daha Çok Çökelen Akışkanlı Boru Tarafına Yerleştirme

Genel bir bilgi olarak, temizlemeyi kolaylaştırmak için tercihen çökelen akışkan boru tarafına yerleştirilir. Aynı zamanda, boru tarafında düşük hızlı ya da durgun bölgelere rastlama olasılığı daha azdır.

- Kabuk Tarafı Hız Akışı

Kabuk tarafında hız genellikle boru tarafına oranla daha düşüktür. Aynı zamanda bu bölgede akış daha az üniformdur ve akışın etkisiyle oluşan titreşim de sınırlıdır. Kabuk tarafındaki durgun ya da düşük hızlı bölgeler, tortu kalıntılarının birikmesi için idealdir. Eğer kabuk tarafında çökme bekleniyorsa, perde tasarımının seçimine özen gösterilmelidir. Eğer aralık bırakma ya da perde kesme oranı doğru değilse, bölümsel perdelerin zayıf akış dağılımına eğilimi vardır. Fazla düşük ya da yüksek oranlar, çökelmeye neden olabilecek istenmeyen akış rejimlerine yol açabilir.

- Düşük Kanatlı Boru Tipi Isı Değiştiricileri

Reynolds sayısının düşük olduğu akışlarda, az sayıda kanat tüpleri içeren ısı değiştiricilerine de rastlanmaktadır. Bu ısı değiştiricilerinin çökelmeye düz borulardan daha elverişli olduğu gibi genel bir düşünce vardır. Çökelme, kısmen temiz gazlarla işlem gören kanatlı yüzeyler için çok etkili değildir. Kanat yapısı çökelme hızını etkilemez, fakat çökelmenin olduğu bölgeler ısı geri kazanım değiştiricisi tarafından etkilenir. Aynı yoğunlukta ve yükseklikte olan düz ve dişli kanat modelleri, aynı zaman diliminde aynı kalınlıkta çökelme artışlarına sahiptir.

- Contalı ve Plakalı Isı Değiştiricileri

Yüksek türbülans, durgun bölgelerin yokluğu, üniform akışkan akışı ve pürüzsüz plaka yüzeyi çökelmeyi ve sık sık temizlenme ihtiyacını azaltır. Dolayısıyla plakalı ısı değiştiricilerinde gerekli olan çökelme faktörleri, kabuk ve boru tipi ısı değiştiricilerde kullanılanların normalde %10-25'idir.

- Spiral Plakalı Isı Değiştiricileri

Yüksek türbülans ve oyulma etkisi, spiral plakalı değiştiricilerde çökelmeyi en aza indirgeyebilir. Bu durum, düşük çökelme faktörlerinin kullanımına izin verir.

- Mevsimsel Sıcaklık Değişimleri

Soğutma kulesi suları soğutma suyu olarak kullanıldığı zaman, sıcaklığın sıfıra yakın ya da daha düşük sıcaklıklarda olduğu kış koşullarına dikkat edilmelidir. Soğuk mevsimlerde artan sıcaklık farkı, daha belirgin bir aşırı tasarımlanmaya ve dolayısıyla, aşırı performans problemlerine neden olur. Bu durum, eğer çevre sıcaklığı başına olan su/hava akışı oranını çeşitlendirmek için bir kontrol mekanizması kurulmamışsa geçerlidir. Aynı zamanda, güç kondenserlerinde kullanılan soğutucu suyun kütle sıcaklığı mevsimsel olarak değişir. Bu değişim çökelme oranını bir dereceye kadar etkiler.

4.8.9 Basınç Düşüşü Üzerinde Çökelmenin Etkisi

Yüzey pürüzlülüğünün artması ve akışın kesit alanının sınırlı olması sebebiyle, ısı geçiş yüzeyindeki çökelti oluşumu, sürtünmeye bağlı basınç düşüşünün artmasına neden olur. Chenoweth'e (1987) göre, aşırı basınç düşüşü nedeniyle işlevsiz hale gelen ısı değiştiricileri, düşük ısı geçişi nedeniyle işlevsiz hale gelenlerden daha fazladır.

➤ Boru tarafındaki basınç düşüşü

Eğer çökelmenin borunun içine eşit bir şekilde dağıldığı varsayılırsa, boru tarafındaki basınç düşüşünün kaba bir tahmini yapılabilir. Silindirik borulardaki sürtünmeye bağlı basınç düşüşü şu şekilde ölçülebilir: (Lim, 2006)

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \xi \frac{\rho u^2}{2d_i} \quad (4.30)$$

Pürüzsüz borular için sürtünme katsayısı: (Lim, 2006)

$$\xi = 0.014 + 1.056Re^{-0.42} \quad (4.31)$$

Eğer çökeltme direnci ve ısıl iletkenlik biliniyorsa, çökeltme oluşan borunun iç çapı aşağıdaki formüllerle belirlenebilir: (Lim, 2006)

$$R_f = \frac{d_i}{2\lambda_d} \ln\left(\frac{d_i}{d_f}\right) \quad (4.32)$$

$$d_f = d_i \exp\left(\frac{-2\lambda_d R_f}{d_i}\right) \quad (4.33)$$

Çökeltme oluşan borunun basınç düşüşü, formül (4.30) ve formül (4.31) ile bağlantılı olarak, formül (4.19)'den elde edilebilir. Genellikle yukarıdaki formüllerin, çökelmenin basınç düşüşü üzerindeki etkisini normal değerlerinden

daha düşük hesapladığı görülmüştür. Bu durum, çökeltmenin ısı geçiş yüzeyine eşit bir şekilde dağıldığını varsaydıkları için gerçekleşmektedir.

➤ Kabuk tarafındaki basınç düşüşü

Çökeltmenin, kabuk tarafındaki basınç düşüşü üzerindeki etkisi Coulson et al.'daki Çizelge 4.13 kullanılarak ölçülebilir.

Çizelge 4.13 Çökeltide birikmiş kabuk basınç düşüşünün temiz kabuk tarafı basınç düşüşüne oranı (Coulson et al, 1985)

Çökelti Isı Geçiş Katsayısı	Kabuk çapı/perde yerleşimi		
	1.0	2.0	5.0
Laminer Akış:			
1/R _f =6000 W/m ² K	1,06	1,20	1,28
1/R _f =6000 W/m ² K	1,19	1,44	1,55
1/R _f <6000 W/m ² K	1,32	1,99	2,38
Türbülantlı Akış:			
1/R _f =6000 W/m ² K	1,12	1,38	1,55
1/R _f =6000 W/m ² K	1'',37	2,31	2,96
1/R _f <6000 W/m ² K	1,64	3,44	4,77

5 ÇÖKELME DURUMLARI İÇİN ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI

5.1 Giriş

Bütün ısı değıştircilerinin kirlenmeyle ilgili ciddi problemleri yoktur; birçoğu temizlenmeden uzun zaman yeterli bir derecede işleyebilir. Ancak, kirlenme görölmesi ihtimaline karşı ısı değıştircisinin tasarımında bir kısım ihtiyat payı bırakılmalıdır.

Doğru değerlerin seçimi, bahsedilen yaklaşımdan bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Deneysel ve teorik araştırmaların sonuçları yerine geçmiş tecrübelerden kaynaklanan mühendislik hükümlerine dayandırılmaktadır. Isı değıştirci kirlenmenin, ısı değıştircilerin tasarım evresinde etkin bir şekilde azaltılabileceğini akılda tutmak önemlidir. Güvenilir işlemler için ısı değıştirci tasarlamak:

- i. Uygun bir ısı değıştirci tipi seçmeyi,
- ii. Kirlenmeye sebep olabilecek çalışma şartlarını ihmal etmeye çalışmayı,
- iii. Isı değıştircide sıcak noktaları, by-pass akışını ve ölü bölgeleri ihmal eden, hızları uygun ideal bir tasarım yapmaya çalışmayı,
- iv. Temizlemeyi kolaylaştıran bir tasarım yapmayı gerektirir.

Bu, sıklıkla gündeme gelen ve ekonomik olarak önemli olan bir konudur. Bundan dolayı ESDU, ham petrol ön-ısı-değıştircilerinde kirlenmeyi ve tatlı/tuzlu suları gibi soğutma ortamları için ayrıntılı bir alıştırma rehberi hazırlanmıştır. Bu raporlar en güncel, en gelişmiş temel bakış açılarını ve endüstriyel uygulamaları içermektedir.

5.2 Isı Değıştirci Tipinin Seçimi

Eğer önemli ölçülerde kirlenme varsa seçilen ısı değıştircisinin tipini ve boyutunu kontrol etmekte yarar vardır. Bu durum, kirlenmenin ciddiyetine göre

farklı ısı değiştirici tipleri öneren Çizelge 5.1’de açıkça gösterilmiştir. Diğer örneklerse şunlardır:

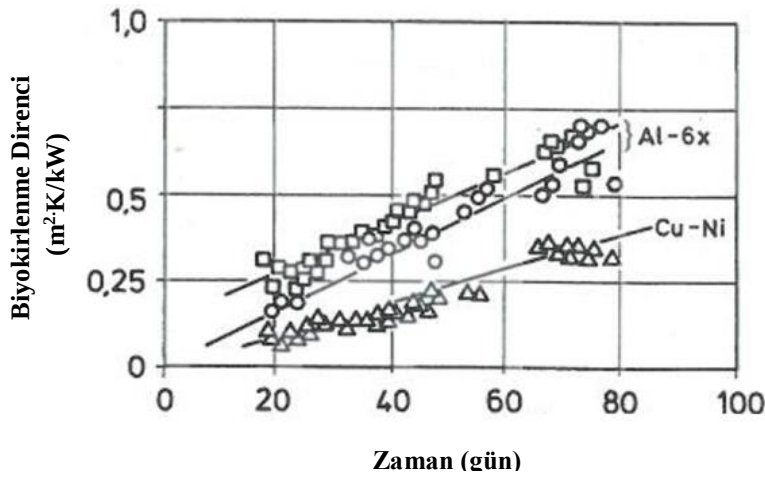
- Gövde ve boru tipi ısı değiştiriciler kirletici akışkanlar için çok uygun değildir, ama iyi tasarım alıştırmaları (Müller-Steinhagen H. , Dr.H. U Zettler, 2000) ve özel perde ve boru tasarımları kirlenmeyi azaltmaya yardımcı olabilir.
- Plakalı ve çerçevesi ısı değiştiricileri, temizleme ve sterilizasyon gerektiğinde kolayca sökülebileceği için cazip bir seçim olabilir.
- Sarmal plakalı ısı değiştiricilerinde yerel düşük hız alanları yoktur. Bu yüzden, yüksek yoğunlukta asılı kalmış katı madde içeren akışkanlarla iyi performans gösterirler.
- Aşınmış ısı değiştiricileri, açıları değişen yönlendiriciler sayesinde ısı geçiş yüzeyindeki tortuları sürekli kaldırarak ısı geçişini geliştirir.
- Akışkan yataklı ısı değiştiricileri, akışkan partiküllerin gömülü borulardaki tortuyu çıkarabileceği yerlerde kullanılabilir.
- Doğrudan temasla ısı geçişi yararlı bir alternatif olabilir.
- Temizlenmeleri zor olduğundan, ciddi kirlenme durumlarında kompakt ısı değiştiricilerinden uzak durulur.

Çizelge 5.1 Isı Değiştirici Seçme Klavuzu (Müller-Steinhagen, 2003)

Beklenen Kirlenme	Kazan veya Kombi	Su ısıtıcısının yatay kabuk tarafı	Su ısıtıcısının dikey borusu tarafı	Zorlanmış Akış
Kirlenme Yok	iyi	iyi	iyi	Zor
Orta Derece	riskli	iyi	çok iyi	Zor
Yoğun	zayıf	riskli	çok iyi	iyi
Çok Yoğun	zayıf	zayıf	riskli	en iyi

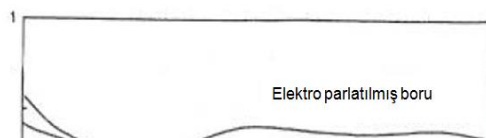
5.3 Malzeme Seçimi

Küçük aşınmalar diğer kirlenme mekanizmalarını arttırabilir. Bu yüzden ikinci en önemli nokta, doğru ısı değiştirici malzemesini seçmektir. Ayrıca boru malzemesinin kendisi bizzat çökmeyi etkileyebilir. Örneğin tuzlu su çökmesi için biyoçökme pirinç borularla azaltılabilir (Şekil 5.1). Ham petrol kirlenmesi de dikkatli malzeme seçimiyle minimize edilebilir.(Hewitt, 2003)



Şekil 5.1 Boru malzemesinin biyokirlenme üzerindeki etkisi (Knudsen, 1998)

Yüzey pürüzlülüğü yüzeydeki temas alanını arttırır, öyle ki doğru temas alanı görünen temas alanından çok daha büyük kalır. Bu farkın bir sonucu olarak pürüzlü yüzeylerde daha fazla adezyon görülür. Şekil 5.2’de gösterilen bu durum, elektrikli parlatılmış borularda Kraft siyah likörüyle yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır.



Şekil 5.2 Isı transfer katsayısının pulpa milinde Kraft siyah likörünün buharlaşması sırasında azalması (Epsitien, 1988)

Son senelerde artan ilgiyle karşılanan bir yöntem de tortu kirlenmesini azaltmak için ısı geçiş yüzeyinde kullanılan yüzey kaplamasıdır. Örneğin, PTFE ve Säkaphen gibi organik malzemelerin birçok akışkanda, mesela tuzlu su buharlaşması ve Kraft siyah likörünün ısı geçişi sırasında, kirlenmeyi azalttığı gösterilmiştir. Böyle malzemelerin/kaplamaların çok kullanılmamasının temel sebebi zayıf ısı iletkenliklerinin olması ve ısı geçişine karşı ek bir direnç oluşturmalarıdır. Bu ek direnç, TEMA'nın soğutucu sular için tanımladığı kirlenme dirençleriyle karşılaştırılabilir büyüklüktedir. Eğer çok ince kaplamalar kullanılırsa, aşınmaya ve diğer mekanik gerilimlere karşı olan direnç büyük oranda önlenmiş olacaktır. Bu problemler, birçok özgün kaplama yöntemiyle engellenebilir. İnce ve sabit kaplamaların, taşınımlı ve kaynayan ısı geçişi sırasında kireçtaşı oluşumunu önlediği bulunmuştur.

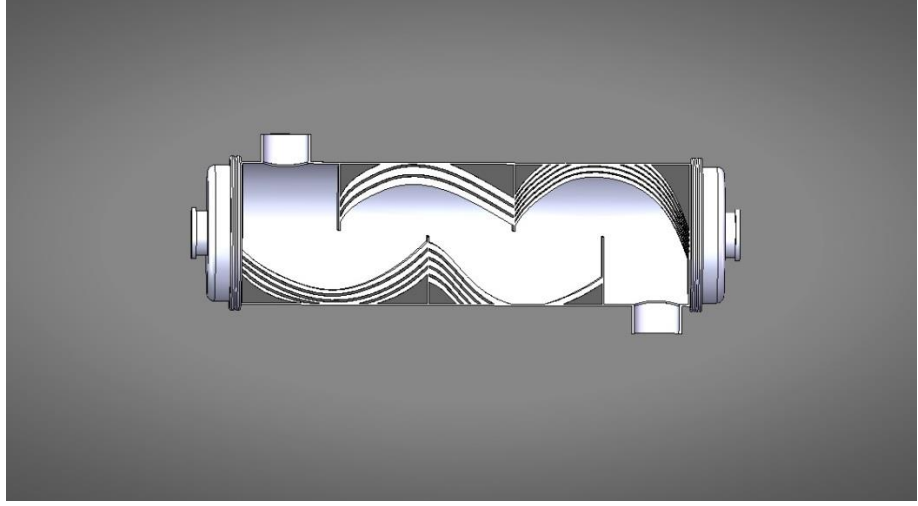
5.4 Gövde ve Boru Tipi Isı Değıştiriciler

Geçmişteki tecrübelerden yola çıkarak, daha yüksek akış hızlarında ve daha düşük boru yüzey sıcaklıklarında kirlenmenin genellikle azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu yüzden, durgun ve düşük hızdaki bölgeleri elemek için yapılan düzenlemelerin yol açtığı toplam kirlenme daha azdır. Genel bir kural olarak, daha çok çökelen ve aşınan akışkanlar boru tarafında olmalıdır. Boruların

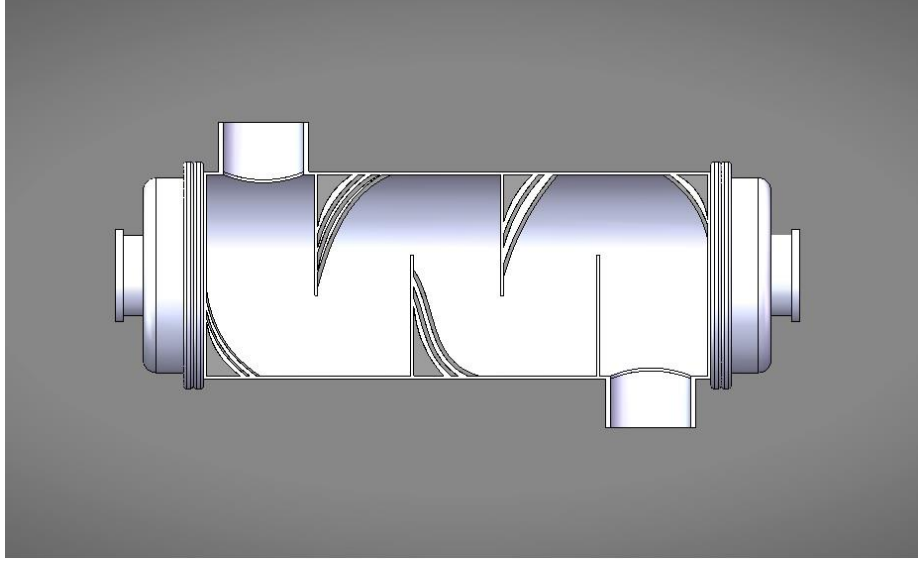
içleri dışlarından daha kolay temizlenebilir ve borular, maliyeti kabuklardan daha düşük olan ekzotik alaşımlardan yapılabilir.

Bir ısı değiştiricinin yönelimi, temizlenme ve partikül çökmesi görülme kolaylığını etkiler. Eğer partikül çökmesi öngörülebilirse, düşey ve aşağı yönelen akış, katıların değiştirici boyunca hareket etmesini sağlar. Eğer yatay yönelim kaçınılmazsa, slurry harcını boru kısmına yerleştirilmeli ve birçok boru geçiş tasarımı kullanarak, aşağıya doğru olan akıştan emin olunmalıdır. Normalde yatay bir ısı değiştiricinin kabuk tarafına slurry harcı yerleştirilmesi önerilmez, fakat düşey kesimde, çift bölümlü perdeler kullanılarak bazı başarılarla imza atılmıştır. Çünkü bu tip perdeler çökeltinin değiştirici boyunca hareket etmesine izin verirler. Isı değiştiricileri eskiden 1 m/s civarındaki boru tarafı akış hızları için tasarlanırken, modern tasarım hızları 1,8 m/s civarındadır. Çizelge 5.2, birçok boru malzemesinin soğutucularının optimum ve minimum soğutucu su hızlarını göstermektedir.

Isı değiştirici tasarımındaki 20 yıllık tecrübeye dayanarak, Gilmour “Birçok uygulamada, eğer ısı değiştirici iyi tasarlanmışsa sadece ihmal edilebilir çökme oluşur. Yetersiz bir performans gösteren kabuk ve boru tipi ısı değiştiricilerin çoğunun performansı, kabuk tarafı akış yolunun tasarımındaki hatalardan dolayı düşer.” demiştir. Özellikle, şartlar ne olursa olsun düşük akış hızı olan ve by-pass akışı olan bölgelerden kaçınılması gerektiğini vurgulamıştır. Eğer yarımay perdeler kullanılırsa perde kesiti, kabuk içi çapının %20’sini geçmemelidir. Düşey perdeler sadece yoğunlaşma veya buharlaşma için kullanılmalıdır, hassas ısı geçiş durumlarında ise kullanılmamalıdır. Çünkü bu durumlarda akış katmanlaşır ve dolayısıyla asılı kalmış partiküller çökler. Şekil 5.3, aynı ısı geçişi için iki farklı kabuk ve boru tipi ısı değiştiricisindeki çökelti oluşumunu göstermektedir. Uygun perde mesafesi ve perde kesitiyle tasarlanmış ısı değiştiricileri ne kadar küçük olursa, ısı geçiş katsayıları o kadar yüksek, çökelmeleri de o kadar düşük olur.



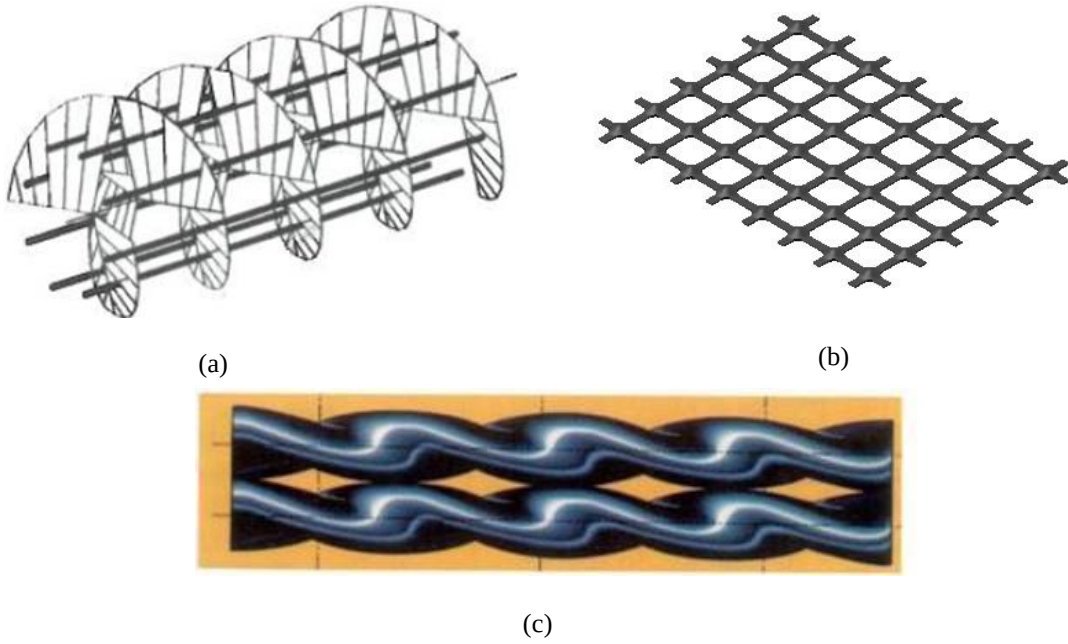
(a) Değişirici E-1



(b) Değişirici E-2

Şekil 5.3 Isı Değişirici Geometrisinin ve Gözlemlenen Çökelme Oluşumunun Şeması
(a) Değişirici E-1 (b) Değişirici E-2

Sarmal akış perdeleri Şekil 5.5’de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde kullanılmışlardır. Çünkü hem akışın katmanlaşmasının hem de durgun akış bölgelerinin oluşmasının önüne geçmişlerdir. Shell Global Solutions tarafından geliştirilen ve Şekil 5.5’de gösterilen EM-perde tasarımının çökelmeyi azalttığı bildirilmiştir.



Şekil 5.4 Farklı ısı değıştiricisi tasarımları (a) Sarmal değıştirici perdeleri (b) Genişletilmiş metal perdeleri (c) Kıvrılmış borular (Müller-Steinhagen, 2003)

Genellikle, kanatların tabanındaki düşük akış hızı bölgeleri yüzünden, kanatlı boruların çökelmeye daha eğilimli olduğu düşünülür. Çökelme mekanizmalarında meydana gelen bu problemler akış hızına fazlasıyla bağlıdır, fakat buna rağmen kanatlı boruların kullanılmasıyla çökelmenin azaldığı bir takım uygulamalar da vardır (biyolojik çökelmede ve partikül çökmesinde olduğu gibi). Bu durum, kanatlı boruların tek tip olmayan ısıl genleşme özellikleriyle açıklanabilir. Kanatlardaki sıcaklık profili sayesinde gerçekleşen ısıl genleşme farklılıkları, katı ve yapışkan çökeltilerin gücünü azaltabilir.

Çökelme üzerine yapılan araştırmalarda, kanat geometrisinin çökelti oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmış ve kanatlı borular karşılaştırılmıştır. Son zamanlarda Esawy, kanatlı yüzeylerdeki kabarcıklı kaynamalar sırasında kireçtaşının, önemli derecede azaldığını bildirmiştir. Bilindiği üzere pürüzsüz yüzeylerde kabarcık oluşumu çökelme oranını artırır. Buna rağmen, çökelme için kanatlı boru seçilirken, her zaman kanatlı yüzey temizliğinin çok zor hatta imkânsız olduğu varsayılmalıdır. (Müller-Steinhagen, 2000)

Klaren tarafından tanımlanan akışkan yataklı ısı değıştiriciler, ciddi çökelme eğilimi gösteren akışkanların ısı geçişleri için umut verici bir

çözümdür. Küçük katı parçacıklar (cam, seramik, metal), yukarıya doğru sıvı akışı vasıtasıyla paralel boruların içinde akışkanlaştırılır. Katı parçacıklar düzenli olarak viskoz sınır tabakalarını kırıp geçerler, böylece düşük akış hızlarına rağmen iyi bir ısı geçişi başarılmış olur. Daha da önemlisi, katı parçacıkların ısı değiştirici borularının duvarları üzerinde aşındırıcı etkileri vardır, böylece daha başlangıç evrelerinde çökeltinin çoğu çıkartılır. Akışkan yataklı ısı değiştiricileri, su dağıtım şebekelerine, kâğıt fabrikalarına, yiyecek ve süt fabrikalarına, jeotermal fabrikalara ve birçok kimya tesisine kurulmuştur. Her durumda çökeltmenin önemli derecede azalması başarılmıştır.

Çizelge 5.2 Yoğuşturuculardaki soğutma suyu akış hızları (Paikert, 1983)

Boru Malzemesi	Tavsiye edilen hız	Minimum Hız
Arsenikli bakır	< 1.5 m/s	1 m/s
Admiralti	1,4-2,0 m/s	1 m/s
Alüminyum pirinç	1,8-2,2 m/s	1 m/s
90/10 bakır-nikel	1,8-2,5 m/s	1,5 m/s
90/30 bakır-nikel	2,4-3,5 m/s	1,8 m/s
Bakır	1,5-2,0 m/s	1 m/s
Çelik	2-4,0 m/s	1 m/s

5.5 Diğer Isı Değiştirici Tipleri

Kompakt ısı değiştiricilerinin kurulumu, küçük geçitlerin çökeltme oluşumundan daha fazla etkilendiği algılayışı yüzünden aksamaktadır. Kompakt ısı değiştiricilerinin büyük partiküllü malzemeler ve atıklar içeren akışkanlar için uygun olmadığı açıktır. Fakat yapılan birçok araştırma, bazı faktörlerin çökeltmenin oluşmasını ve ısı transfer yüzeyine yapışmasını engellediğini göstermiştir. Yüksek kayma kuvveti, duvarın düşük derecede aşırı ısıtılması ve homojen akış dağılımı bu faktörlerden birkaçıdır. Daha fazla aşınmaya dayanıklı malzemenin ve daha pürüzsüz ısı transfer yüzeylerinin kullanılması, ileride çökeltme oluşumunu azaltmaktadır. Birçok kompakt ısı değiştiricisi kimyasal olarak temizlenmek zorundadır. Ne yazık ki kompakt ısı değiştirici tiplerinin çökeltmesi ve temizlenmesiyle ilgili yayımlanmış çok az bilgi bulunmaktadır.

Sabit ısı geçişi sırasında, temiz ısı geçiş katsayısının artmasıyla birlikte ısı transfer yüzey alanının fazlası da artar (Denklem 4.3). Bu durum, plakalı ve

çerçevesi ısı değıştiricileri gibi kompakt ısı değıştiricileri için ciddi bir sorun teşkil edebilir. Çünkü bazen, bilgisizlik ve dikkatsizlik sebebiyle kabuk ve boru tipi ısı değıştiriciler için olan TEMA çökelme dirençleri kompakt ısı değıştiricilerinde kullanılabilir. Plakalı ve çerçevesi ısı değıştiricileri için olan toplam ısı geçiş katsayısı yaklaşık $3000 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken gövde ve boru tipi ısı değıştiricileri için bu değeri yaklaşık $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dır. $0.3 \text{ m}^2\text{K/kW}$ 'luk bir çökelme direnci tasarımı gövde ve boru tipi ısı değıştiricileri için %30'luk, plakalı ve çerçevesi ısı değıştiriciler için ise %90'lık bir aşırı tasarımlanmaya neden olur.

5.5.1 Plakalı ve Çerçevesi Isı Değıştiriciler

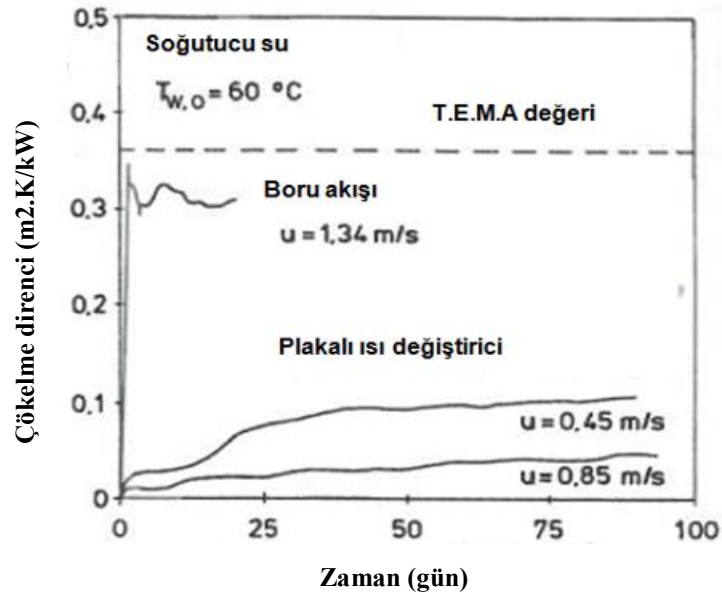
Kimyasal proses endüstrisinde plakalı ısı değıştiricilerin kullanımı hızla artmaktadır ve geleneksel olarak kullanılan birçok borulu ısı değıştiricisinin yerini bu değıştiriciler almaktadır. Cooper, soğutucu su çökmesini APV model R405 plakalı ısı değıştirici kullanarak araştırmıştır. Suya, ısı değıştiriciye girmeden önce kimyasal bir müdahalede bulunulmuştur. Şekil 5.7'de gösterildiği gibi tipik düşük akış hızlarına rağmen, plakalı ve çerçevesi ısı değıştiricilerinin içindeki çökelme direnci, kabuk ve boru tipi ısı değıştiricilerinkinden önemli derecede azdır. Kabuk ve boru tipi ısı değıştiricilerde olduğu gibi, eğer akış hızı arttırılırsa çökelme direnci azalır. Novak, Mannheim (Almanya) yakınlarındaki Rhine Nehri suyunun ve İsveç'teki Öresund deniz suyunun çökelme davranışını incelemiş ve iki su için de temel biyolojik çökelme gözlemlenmiştir. Çökelme dirençleri, gözlemlenen zaman aralığında neredeyse doğrusal bir şekilde artmaktadır. Çizelge 5.3, akış hızının çökelme oranı üzerindeki etkisini özetlemektedir.

Plakalı ısı değıştiricilerindeki tipik çökelme direnci değeri Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çoğu plakalı ve çerçevesi ısı değıştirici üreticisi, ek yüzeyin, ısı geçiş yüzeyi alanının %25'ini geçmemesini önermektedir. Basınç düşüşünün artışları, çökelme direncinin ortalama tortu kalınlığı kullanılarak tahmin edilen değeri beliren bir şekilde yüksektir. Bu, akış dağılımının ve çökelti oluşumunun tek tipli olması sayesindedir.

Çizelge 5.3 25°C'lik yüzey sıcaklığı için Ren nehri suyunun çökeltme oranı (Novak, 1982)

Akışkan	u, m/s	ζ , Pa	dR_f/dt , $10^4 \text{ m}^2 \text{ K/kWh}$
Plakalı ısı değiştirici	0,13	6,7	7,4
Plakalı ısı değiştirici	0,19	14,5	4,3
Plakalı ısı değiştirici	0,77	190	0,6
Spiral plakalı değiştirici	0,43	7,5	5

Asıl plaka geometrisi (dalgaların büyüklüğü ve dalga boyu) çökelti oluşumunu etkiler (Zetter, 2005). Delpace ve arkadaşları (Delpace, 1997) çevron plakasındaki peynir altı suyu proteini çözeltilerini incelemiştir. Diğer bütün şartlar aynı tutulduğunda, bu çözeltilerde görülen çökeltmenin düz dalgalarındaki çökeltmenin sadece yarısı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.5 Plakalı çerçeveli ısı değiştiricileri ile gövde ve boru tipi ısı değiştiricilerindeki çökeltmenin karşılaştırılması (Cooper, 1980)

5.5.2 Kanatlı Plakalı Isı Değiştiricileri

Kanatlı plakalı ısı değiştiricileri sert lehimli/kaynaklı kompakt ısı değiştiricilerdir ve ısı geçiş yüzeylerinin yoğunluğu borulu ısı değiştiricilerinden 10 kat daha fazladır. Tipik uygulamaları kriyojenik, kimyasal/petrokimyasal kurulumlar ve hidrokarbon açık deniz kurulumlarıdır. Partikül malzemelerini ya da ısı geçiş yüzeyinde donabilecek bileşenleri kaldırmak için, kriyojenik kurulumlarda moleküler elekler ve 100 μm filtreler kullanılır. Bugüne kadar,

partikül çökmesi (Masri, 1997) ve nehir suyu çökmesi (Pritchard, 1992) hakkında sistematik araştırmalar yapılmıştır.

Suda asılı kalmış 3 µm demir oksit partikülleri için, düz kanat ya da dalgalı kanat kanallarında tıkanma gözlenmemiştir. Ayrıca, dalgalı kanat kanalları düz kanat kanallarından daha çok çökmüştür. Bütün bu araştırmalar asimptotik davranış gösterir. En yüksek çökme değerleri, izotermik olmayan durumlarda ve daha büyük yığın sıcaklıklarında elde edilmiştir. En yüksek çökme, 1500 Reynolds rakamı (Masri, 1997) civarındadır.

Lifli ve biyolojik malzemeler nehir suyuyla birlikte kullanıldığında, alüminyum plaka kanatların test bölümü girişlerini kısmen bloke ederler. Kullanılan nehir suyu, 1 mm gözenekli filtrelerde süzülür. Alüminyumun aşındığı bazı bölgelerde çökme bulunmuş ve dalgalı kanat test bölümünde ince bir çamur birikintisi gözlenmiştir. Düz kanatlar için basınç düşüşü zamanla doğrusal bir şekilde artar ve dalgalı kanatlarda asimptotik davranış gözlenir. Basınç düşüşü-zaman eğrisinin başlangıç eğimi, düz kanatlar için $5.8 \times 10^{-8} \text{s}^{-1}$ ve dalgalı kanatlar için $1.71 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 'dir. Bu sürecin sonunda, başlangıçtaki çökme oranı, $4.8 \times 10^{-12} \text{s m}^2 \text{K/W}$ ve asimptotik çökme direnci, $6 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{K/W}$ olarak ölçülmüştür (Thackery, 1980).

5.5.3 Baskılı Devre Isı Değiştiricileri

Baskılı devre ısı değiştiricileri (PCHEs) içindeki geçitlerin derinliği normalde 0,3 mm ile 1,5 mm arasındadır. Özel tasarımları $500\text{-}2/500 \text{m}^2/\text{m}^3$ 'lük hacimsel ısı geçiş alanına sebep olur, bu da kabuk ve boru tipi ısı değiştiricilerinden daha yüksek bir büyüklük kertesidir. Kew çökmeninin PCHE'lerde ve çift borulu ısı değiştiricilerinde (DPHEs) neden olduğu performans düşüşünü karşılaştıran deneyler anlatılmıştır. Aşınmaya, kireçtaşı oluşumuna ve biyoçökmeye karşı soğutucu suya müdahale edilmiş ve partikül çökmesini azaltmak için 0,5/1,0 mm'lik filtreler kurulmuştur. 500-660 saatlik bir işlem sürecinden sonra, PCHEs ısı verimliliğinde hiçbir değişim gözlenmemiş ama partikül malzemesinin çökmesine bağlı olarak basınç düşüşü %55 oranında artmıştır. Lifli malzemenin çıkarılması için paslanmaz çelik bir

elek gözünün eklenmesi, basınç düşüşündeki artışı belirgin bir şekilde azaltmıştır. Paralel DPHE’de ise hiçbir çökme gözlenmemiştir.

Kew PCHE’leri tuzlu su ile gaz soğutmak için kullanılmıştır. 200 µm filtreler ısı değiştiricilerin yukarısına kurulmuş ve karşı biyoçökelmeye klor eklenmiştir. Bu süreçle alakalı hiçbir işlemsel problem rapor edilmemiştir. Bu konunun başka bir uygulaması ise nitrik asit fabrikalarındaki artık gazların yoğunlaşmış buhar kullanılarak ısıtılmasıdır. 18 aylık bir uygulamadan sonra hiçbir kanal tıkanması belirlenmemiştir.

5.5.4 Polimer Kompakt Isı Değiştiricileri

Polimer ısı değiştirici, aşındırıcı gaz ya da akışkan içeren düşük basınçlı işlemler için kullanılmaktadır. Düşük yüzey enerjisi ve yapılış malzemelerinin (polipropilen, floropolimer gibi) pürüzsüz yüzeyi birçok tortunun yapışabilirliğini azaltır. Temiz ısı geçiş katsayıları hâlihazırda düşük olduğu için (150-200 W/m²K) bu ısı değiştiricileri, fazladan bir çökme direncine metal ısı değiştiricilerinden daha az tepki gösterirler.

5.5.5 Cam-SIC (Silisyum Karbür) Isı Değiştiricileri

Cam ısı değiştiricileri kimyasal ve farmasötik sektörlerde olduğu kadar birçok farklı endüstride de yaygın bir şekilde kullanılır. Bu durum, 3,3 borosilikat cam malzemesinin ve seçilen diğer malzemelerin özel karakteristiklerinden kaynaklanmaktadır. 3,3 borosilikat, cam basınçlı tank üretmek için kullanılması onaylanmış bir malzemedir. Kimyasal ve farmasötik endüstrilerde, eylemsiz ve metalik olmayan malzemelerden yapılan ısı değiştiricilerine sık sık ihtiyaç duyulur. Bu ısı değiştiricileri, prosesle değiştirici malzemeleri arasındaki etkileşimi önlemelidir. Kimyasal dirence ek olarak aşındırma direnci ve temizlenme kolaylığı da bu aletler için önemli gereksinimlerdir.

Avantajları:

- Üstün aşınma direnci

- Pürüzsüz ve gözenekli yüzey
- Saydamlık
- Katalitik etkisinin olmaması
- Koku etkisinin olmaması
- Fizyolojik olarak zararsız olması
- Yanıcı olmaması
- Ekolojik olarak zararsız olması

Bu gereksinimleri karşılayan ve metalik olmayan maddelerden yapılmış olan borular normalde eritilemez ya da bir boru plakasına kaynak yapılamaz, dolayısıyla iç boru ile boru plakası arasındaki yalıtımın önemi büyüktür.

125 W/m²K'lik yüksek ısı iletkenliği ve aşınma direnciyle silisyum karbür, yüksek kalite bir ısı değiştirici iç borusu için olan bütün bu ihtiyaçları karşılamaktadır

6 DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Deney düzeneği özelliklerinin belirlenmesi

Deney düzeneğinin temel prensibi, bir kombi ısıtıcı cihazında çalışan plakalı ısı değiştiricisi şartlarını deney ortamında da yaratılabilir olmasıdır. Plakalı ısı değiştiricisine giren merkezi ısıtma hattı sıcaklığı, kullanım suyunun plakalı ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı, kullanım suyu debisi, merkezi ısıtma hattı debisi ve kullanım suyu hattı debisinin istenilen seviyeleri deney düzeneğinin bilgisayar ortamındaki arayüzü sayesinde ayarlanabilir olması ve anlık değerlerin görüntülenebilir olmasının yanında kayıtlanabilir de olması gerekmektedir. Bilindiği üzere, kirlenmeyi etkileyen parametreler sadece akış debisi ve sıcaklık değil, akışkanın kalitesini de ortaya koyan pH değeri ve sertlik değeridir. Deney düzeneği bu iki değerinde anlık olarak ölçümlenebilir ve kayıt altında tutulabilir olmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

6.2 Deney düzeneği sistem tasarımının yapılması

Yapılması planlanan test standında kombilerde kullanılan plakalı ısı değiştiricinin, cihaza entegre edilmeden bağımsız olarak kirlenme testlerine tabi tutulması amaçlanmıştır. Test standı, üç adet hattan oluşan sıcak su kapalı çevrimine sahiptir. Bu kapalı çevrimi sıcak su ile besleyecek ısı kaynağı; test standından harici olarak test tipine, amacına göre değişebilmektedir. Bu ısı kaynağı test düzeneğinden bağımsız olarak test operatörü tarafından temin edilebilmektedir. Isı kaynağından sağlanacak sıcak su, boru hattıyla üç paralel boru hattına ayrılmaktadır. Bu üç boru hattı da birbirinden bağımsız üç adet plakalı ısı değiştiriciden geçerek, ısı kaynağına soğumuş olarak geri dönmekte ve kapalı çevrimi tamamlamaktadır. Bu kapalı çevrimde her bir hattın su debisi anlık olarak ölçülmekte ve bilgi aktarım sistemiyle veriler bilgisayara aktarılmaktadır. Aktarılan bu veriler LabView programı ile algılanıp akış kontrollü üç adet sirkülasyon pompası sayesinde istenilen debiler testlerde uygulanabilmektedir.

Test standındaki bir diğ er kapalı çevrim ise kullanım suyu kullanım  evrimidir. Bu  evrim, evlerde kullanılan Şebeke suyunun birebir test edilmesinin yanında, kullanım suyunu (Şebeke suyunu) modelleyecek olan çevrimdir. Bu çevrimdeki suyun PHE’de oluşturacağı kirlenme miktarının     lmesi, kirlenme testinin amacını oluşturmaktadır. Kapalı  evrim olarak yapılan deneylerde, sistemdeki test s uresi arttı a PHE’de meydana gelen kirlenme miktarı artacak ve kapalı çevrimdeki suyun kirlenme potansiyeli (kirlenmeye neden olan kimyasal iyonların Ca^{+2} vb.) deriŐimleri azalacaktır. Bu nedenle deney tipine g ore, bu kapalı çevrim ilk olarak damıtılmış su ile doldurulacak ve daha sonra çökelmeye neden olacak bileşenler ($CaSO_4$ ve $CaCO_3$ gibi) sisteme eklenebilecektir. Çökelme ile doğru orantılı olarak sistemde azalacak kullanım derişimi belirli aralıklarda kontrol edilerek, teste uygun olarak belirlenecek kullanım takviyesi sisteme yapılabilecektir. Bu kapalı çevrimde bulunan su, kullanım tankından üç adet sirkülasyon pompası yardımıyla, birbirinden bağımsız üç adet hatta dolaştırılmaktadır. Bu su, plakalı ısı değıŐtiricilerden geçerek sıcaklığı y ukseldikten sonra, soğutularak tekrar kullanım tankına geri d  nmektedir. Bu soğutma işleminde, merkezi soğutma suyundan(chiller suyu) plakalı ısı değıştirici vasıtasıyla yararlanılmaktadır.

Özellikle Şebeke suyu ile de test yapılabilmesine imkân tanımak amacıyla, deney düzeneğı taze Şebeke suyunun girişi ve anlık çıkışı olacak Şekilde de opsiyona açık olarak tasarlanılmıŐtır. Örneğın Manisa Şebeke suyu ile test yapılmak istendiğinde bu opsiyon ile testler tamamlanmıŐtır.

Test standı boyutları mümkün olduğunca küçük tutulmuştur. Bu amaca ulaŐırken, ölçüm cihazlarının doğru sonuç verebildiğı montajlama prosedürlerine uyulmuŐtur. Debi metrenin, sirkülasyon pompasının vs. bir su hattında doğru pozisyonda konumlandırılmasına dikkat edilmiŐtır.

6.3 Deney Düzenekinin Teknik Özellikleri

6.3.1 Yapı Özellikleri

Yapılacak olan test standı iki ana kapalı devreden oluşacaktır;

- 1- Isıtma suyu (kalorifer) devresi
- 2- Kullanım suyu (şofben) devresi

Bunların yanında kullanım suyu devresinde plakalı ısı değiştiriciden çıkacak olan sıcaklığı artmış suyu soğutmak için iki adet plakalı ısı değiştiriciden yardım alınmıştır. Bu iki soğutma çevrimi:

- 1- Ön soğutma devresi: Plakalı ısı değiştiriciden ısınarak çıkan kullanım suyu bir plakalı ısı değiştiriciden (birincil ısı değiştirici) geçirilerek ön soğutma işlemine tabi tutulur. Bu plakalı ısı değiştiriciden geçirilecek soğutma suyu, fabrika tesislerinde kullanılan şebeke suyudur.
 - 2- Ana soğutma devresi: Plakalı ısı değiştiriciden ısınarak çıkan kullanım suyu, gerektiği durumda (yüksek sıcaklıkta olduğu durum) ön soğutma amacıyla birincil plakalı ısı değiştiriciden geçirilir. Daha sonra ikincil plakalı ısı değiştiriciden geçirilerek, kullanım istenilen sıcaklıkta tanka geri yollanmış olur. İkincil plakalı ısı değiştiriciden geçirilecek soğutma suyu, Bosch Manisa tesislerinde kullanılan chiller suyudur.
- Test standının ölçüleri ``Boy x En x Derinlik`` olarak ``2,30 m x 2,40 m x 1,80 m`` şeklinde belirlenmiştir.
 - Yukarıda bahsedilen tüm kapalı çevrimlerin su boruları birbirlerinden tamamen bağımsız olarak tasarlanmıştır.
 - Test düzeneğinde ısı kaynağı olarak uygun bir kombi cihaz kullanılacaktır. Bu kombi cihazın test sistemine asılabilmesi için 0,80 m (en) x 1,20 (boy) ölçülerine sahip tahta bir panel kullanılmıştır.

- Tesisatta kullanılan su boru çapları Ø28 olarak seçilmiştir.
- Tesisatta kullanılan su boruları tamamen paslanmaz çelik olarak seçilmiştir.
- Test standının ana gövdesi için standart profil (45x45) kullanılmıştır.
- Isıtma suyu devresi boruları kırmızı ve kullanım suyu devresi boruları mavi olarak işaretlenmiş ve boru üzerlerinde akış yönünü gösterir oklar kullanılmıştır.
- Test standındaki tüm su borularının üzeri yalıtım malzemesi ile kaplanarak, sıcaklık değerlerindeki sapma minimize edilmiştir.

6.3.1.1 Isıtma suyu (kalorifer) devresi

- a) Kapalı ısıtma suyu devresinde; ısı kaynağında sıcaklığı artırılarak, su sisteme birbirinden bağımsız debi kontrollü üç adet sirkülasyon pompası ile boru hattında dolaştırılabilmektedir.
- b) Bu devrede kullanılacak debi kontrollü sirkülasyon pompaları (Grundfos marka), her bir hattın debi set değerlerini ayrı ayrı kontrol edebilecek kabiliyettedir. Her bir ısıtma suyu çevriminden (toplam üç adet) geçirilmesi istenilen debi miktarı, test standı bilgisayarında kurulan LabView programında parametre set değeri olarak girilmektedir. Her bir çevrimde ayrı ayrı bulunan debi ölçerler sayesinde, kapalı çevrimdeki anlık debi miktarına göre sirkülasyon pompası elektronik kontrolle uygun devire getirilmektedir.
- c) Test standında, kirlenme testlerinde kullanılacak olan PHE'lerin montajlanacağı tablalar (yataklar), hem küçük tip hem de büyük tip PHE'lerin montajlanabileceği şekilde paslanmaz çelikten üretilmiştir.
- d) Isıtma suyu devresinde, üç bağımsız hat bulunmaktadır ve her bağımsız hattan sirkülasyon pompası yardımı ile geçebilecek maksimum debi 25lt/dk olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bu ihtiyaca cevap vermek için Şekil

6.1’de özellikleri görülen Grundfos Magna 25-100 elektronik kontrollü sirkülasyon pompası kullanılmıştır.

- e) Sistemdeki genleşmelere karşı 30 lt hacminde (10 bar basınca dayanıklı) genleşme tankı kullanılmıştır. Bu kapsamda, uygun özelliklerde Şekil 6.2’de gösterildiği gibi Wilo marka bir genleşme tankı seçilmiştir.

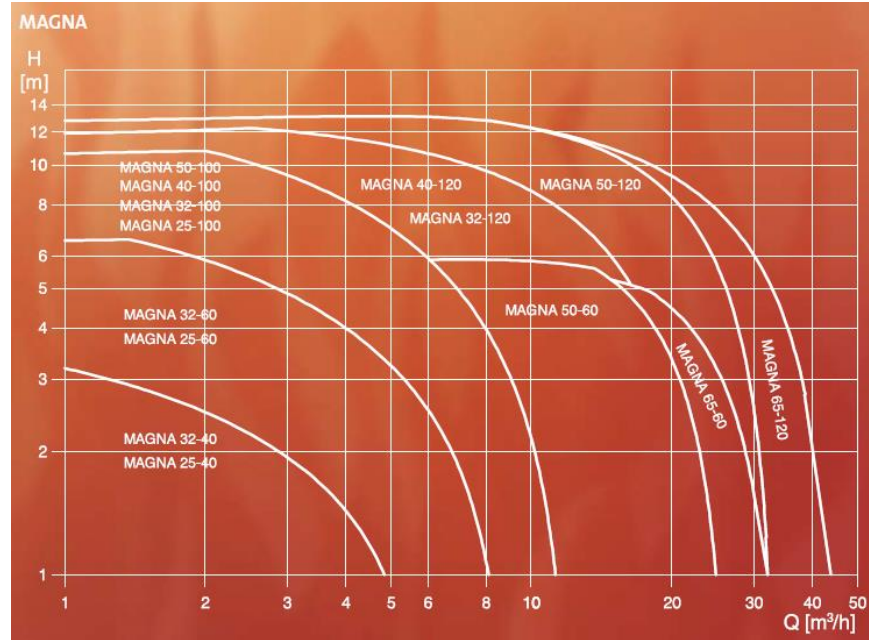


MAGNA 25-100

Sirkülasyon pompaları, elektronik kontrollü

Önemli not! Ürün resmi verimlilik, ürünler tarafından farklı olabilir.

Conditions of Service	Pump Data	Motor Data
Akış: 1.5 m³/h	Maksimum çalışma basıncı: 10 bar	P1 max: 10 .. 185 W
Basma yüksekliği: 6.01 m	Sıvı sıcaklık aralığı: 2 .. 95 °C	Nominal voltaj: 230-240 V
Verim: 29.8 %	Maksimum ortam sıcaklığı: 40 °C	Ana frekans: 50 Hz
Sıvı: Su	Onaylar: CE, TSE, PCT	IP sınıfı: X4D
Sıcaklık: 60 °C	Boru bağlantısı: G 1 1/2	Yalıtım sınıfı: F
NPSH gerekli: 1 mm²/s	Ürün numarası: 96281015	
Özgül Ağırlık: 0.985		



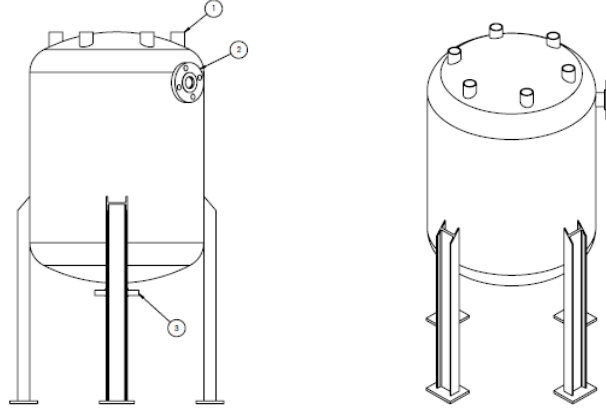
Şekil 6.1 Isıtma suyu devresinde kullanılan sirkülasyon pompası (Grundfos, 2015)

- f) Genleşme tankından hemen sonra sistem üzerine konacak emniyet vanası minimum 3 bar olacak şekilde seçilmiştir.
- g) Devrenin dönüşüne içerisindeki suyun boşaltılması için bir drenaj bağlantısı konulmuştur. Bu drenajdan atılacak su, şebeke atık suyu hattına bağlanmıştır. Deney düzeneği şematik görünümünde de görüleceği üzere bu drenajın yeri, soğuyan suyun kombi cihazına girişinden hemen öncesi olarak gösterilmiştir.
- h) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üzerine manüel göstergeli sıcaklık ölçer konulmuştur.



Şekil 6.2 Isıtma suyu devresinde kullanılan genleşme tankı (WILO, 2015)

- i) Isı kaynağından çıkan sıcak su 200 lt'lik paslanmaz çelik bir tank içerisine boşaltılmaktadır (Şekil 6.3). Bu şekilde deneylerde kullanılmak istenen suyun sıcaklığının stabil olması sağlanmıştır.



Şekil 6.3 Isıtma suyu devresi 200 lt sıcak su tankı

- j) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üzerine basınç ölçer manometre konulacaktır.
- k) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üç hatta ayrılır ayrılmaz, her hat üzerine bir adet küresel vana konulmuştur. Bu sayede, üç farklı ısıtma hattından herhangi biri istenildiğinde çevrim dışı bırakılabilecektir.
- l) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üç hatta ayrıldıktan sonra, her bir hat üzerinde Air Spirovent marka otomatik hava purjörü kullanılmıştır. (Şekil 6.4) Bu sayede boru içerisindeki hava sistemden uzaklaştırılmıştır.



Şekil 6.4 Air Spirovent marka hava purjörü (Air Spirovent, 2015)

- m) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üç hatta ayrıldıktan sonra, her bir hat üzerinde bir adet su debisini gösteren ölçüm elemanı kullanılmıştır. Debi Ölçer: 1-100 lt/dk, 0,1 lt/dk hassasiyetinde olacak şekilde 15 bar

basınca dayanıklı 180°C sıcaklığa kadar akışkan geçişine izin verebilen IFM marka debi ölçer seçilmiştir. (Şekil 6.5)

n)



Şekil 6.5 IFM marka debi ölçer (IFM, 2015)

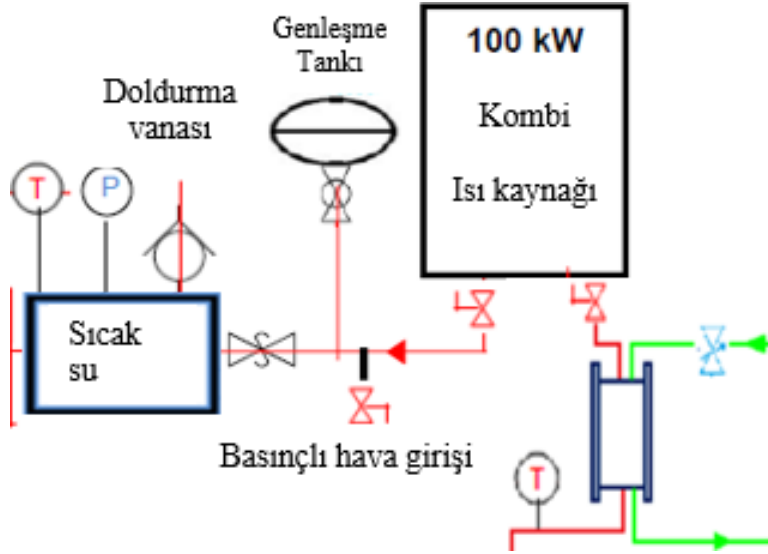
o) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üç hatta ayrıldıktan sonra, plakalı ısı değiştiricilere girişten hemen önce her bir hat üzerine sıcaklık sensörü (PT100) bulunmaktadır ve sıcaklık bilgileri test standı bilgisayarındaki Labview programına anlık olarak gönderilmektedir. 500°C'lere kadar ölçüm yapabilen Elimko marka TC03 model sıcaklık sensörü deney düzeneğinde kullanılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Elimko marka sıcaklık sensörü (Elimko, 2015)

p) Isı kaynağının çıkışındaki ana sıcak su borusu üç hatta ayrıldıktan sonra, plakalı ısı değiştiriciden çıkıştan hemen sonra her bir hat üzerine sıcaklık sensörü (PT100) kullanılmıştır. Sıcaklık bilgileri test standı bilgisayarındaki Labview programına anlık olarak gönderilmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

- q) Isıtma suyu devresindeki sıcak su girişinin başladığı noktaya bir adet küresel vana koyulmuştur.
- r) Isıtma suyu devresindeki sıcak su çevriminin sonuna (soğuyarak dönen suyun ısı kaynağı cihaza girdiği nokta) bir adet küresel vana koyulmuştur.
- s) Isıtma suyu devresinin çalışacağı sıcaklık aralığı 30°C-95°C olacaktır. Bu sıcaklık şartları altında çevrimdeki tüm ölçüm aletleri fonksiyonunu kaybetmeden çalışabilecektir.
- t) Isıtma suyu devresinde, PHE'den çıkan sıcak su hatlarına (üç adet) geri akış önleyici vana konmuştur. Bu sayede üç hattın da birbirinden bağımsız hale gelmesi sağlanmıştır. Bu sayede geri akış olasılığının önüne geçilecektir. (hatlardan herhangi birinin test süresince iptal edildiği, akışın olmadığı bir durum için ya da hatlardaki farklı debilerde su kullanımı için)
- u) Isıtma suyu devresi üç hatta ayrıldıktan sonra, PHE hemen öncesinde ve PHE hemen sonrasında birer adet (her bir hat için 2 adet, toplam 6 adet) küresel vana konmuştur. Bu vanaların konma amacı, herhangi bir anda bu vanaların kapatılarak PHE'nin dışarı alınıp kirlenmeye neden olan çökelti ölçümlerinin yapılabilmesidir.
- v) Isıtma suyu devresine, testlere başlamadan önce su doldurulması amacıyla bir adet doldurma vanası eklenmiştir. Bu doldurma vanası tek yönlü akışa elverişli şekildedir ve ana şebeke suyu hattına bağlanmıştır.
- w) Isıtma suyu devresine, hattın PHE'lerden dönerek tek bir boru üzerinde birleşip, ısı kaynağı olan kombiye geri dönmeden hemen önce soğutucu bir plakalı ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Bu ısı değiştiricinin amacı kirlenme etkisi nedeniyle sıcaklığı test edilen PHE'lerde düşmeyen ısıtma suyunun kombiye yüksek sıcaklıkta girmesi durumunu önlemektir. Yüksek sıcaklıkla dönen su ($T \geq 65^{\circ}\text{C}$) kombi cihazının kendini kapatmasına neden olur. Bu bölgeye konacak bir soğutucu ısı değiştiricisinden şebeke suyu ($\sim 24^{\circ}\text{C}$) geçirilerek, ısıtma suyu devresi dönüş sıcaklığı düşürülebilir (Şekil 6.7).

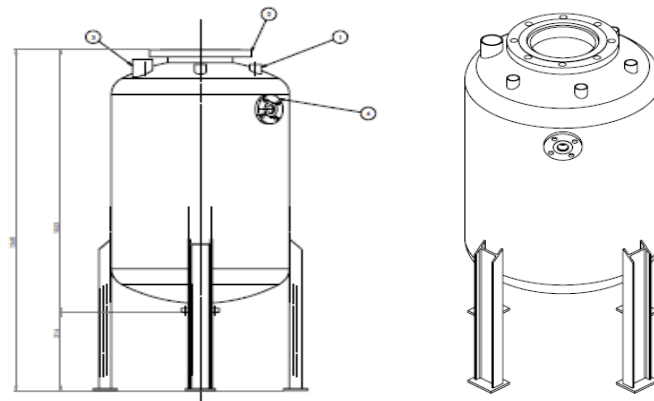


Şekil 6.7 Dönüş Suyu Soğutucu Plakalı Isı Değiştiricisi

6.3.1.2 Kullanım suyu (şofben) devresi

- Kapalı kullanım suyu devresinde; kullanım tankındaki su, sisteme birbirinden bağımsız debi kontrollü üç adet sirkülasyon pompası ile dolaştırılmaktadır.
- Bu devrede kullanılacak debi kontrollü sirkülasyon pompaları (Grundfos), her bir hattın debi set değerlerini ayrı ayrı kontrol edebilecek yetenekte seçilmiştir. Her bir ısıtma suyu çevriminden (toplam üç adet) geçirilmesi istenilen debi miktarı, test standı bilgisayarında kurulacak LabView programında parametre set değeri olarak girilmektedir. Her bir çevrimde ayrı ayrı bulunan debi ölçerler sayesinde, kapalı çevrimdeki anlık debi miktarına göre sirkülasyon pompası elektronik kontrolle uygun devire getirilebilmektedir.
- Kullanım suyu devresinde, üç bağımsız hat bulunmaktadır ve her bağımsız hattan sirkülasyon pompası yardımı ile geçebilecek maksimum debi 18 lt/dk olarak belirlenmiştir. Bu ihtiyaca cevap vermek için Şekil 6.7’de özellikleri görülen Grundfos Magna 25-100 elektronik kontrollü sirkülasyon pompası kullanılmıştır.

- d. Devrenin dönüşüne içerisindeki kullanım suyunun boşaltılabilmesi için bir drenaj bağlantısı konulmuştur. Bu drenajdan atılacak su, kullanım sıvısının çeşitli kimyasallar içermesi olasılığından dolayı şebeke atık suyu hattına bağlanmıştır.
- e. Kullanım suyunun depolanacağı tankın hacmi 200 lt olarak seçilmiştir. Ayrıca bu tank, 16 barlık basınca dayanıklı olacak şekilde üretilmiştir.
- f. Kullanım suyu tankının üzerinde, iyi bir şekilde izole edilmiş kolay açılabilir/kapanabilir bir kapak bulunmaktadır. Bu kapak ile kullanım tankına gerektiği durumda sulu çözeltiler ilave edilebilmektedir.
- g. Kullanım tankındaki ve sistemdeki suyu homojen olarak tutabilmek amacı ile kullanım tankının içerisinde bir karıştırıcı bulunmaktadır. Bu ve yukarıdaki kullanım tankı özelliklerini karşılayacak şekilde paslanmaz çelik bir kullanım tankı içerisinde motorlu bir karıştırıcı ile kullanılmaktadır ve LabView üzerinden açıp kapatma fonksiyonları kontrol edilmektedir (Şekil 6.8).
- h. Kullanım suyu tankının hemen çıkışına bir adet elle ayarlanabilir göstergeli sıcaklık ölçer konulmuştur.



Şekil 6.8 Kullanım suyu tankı 200 lt

- i. Sistemde dolaştırılan kullanım suyu sıcaklığını kontrol etmek amacıyla, kullanım tankından hemen önce bir adet elle ayarlanabilen göstergeli sıcaklık ölçer konulmuştur.
- j. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrılır ayrılmaz, her hat üzerine bir adet küresel vana konulmuştur. Bu sayede, üç farklı kullanım suyu hattından herhangi biri istenildiğinde çevrim dışı bırakılmaktadır.
- k. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrıldıktan sonra, her bir hat üzerinde otomatik hava purjörü (Air Spirovent) kullanılmıştır. Bu sayede boru içerisindeki hava sistemden uzaklaştırılmaktadır.
- l. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrıldıktan sonra, her bir hat üzerinde bir adet su debisini gösteren ölçüm elemanı bulunmaktadır.
Debi Ölçer: 1-100 lt/dk, 0,1 lt/dk hassasiyetindedir ve LabView program ara yüzünde anlık olarak izlenebilmektedir.
- m. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrıldıktan sonra, her bir hat üzerinde bir adet 1 µm büyüklüğünde gözeneklere sahip olan filtre kullanılmaktadır. Bu sayede, katılaşıp yüzeyden kopan çökelti ler PHE'ye tekrar yollanmadan sistemden uzaklaştırılmaktadır. Bu özellikleri sağlayacak Cuno marka bir filtre kullanılmıştır (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 Cuno marka pislik tutucu filtre (Cuno, 2015)

- n. Sistemde kullanılacak bu filtreler zamanla tıkanarak; akış fonksiyonunun yerine getirilemediği durumda, bu filtreler temizlenerek sistemin başlangıç konumuna getirilebilir durumdadır.
- o. Kullanım suyu devresindeki (üç bağımsız çevrim), PHE'den sonraki noktalara geri akış önleyici vana konmuştur. Bu sayede üç hattın birbirlerinden bağımsız hale gelmesi sağlanmıştır. (Hatlardan herhangi birinin test süresince iptal edildiği bir durum için)
- p. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrıldıktan sonra, PHE'lere girişten hemen önce her bir hat üzerine sıcaklık sensörü (PT100) bulunmaktadır ve sıcaklık bilgileri test standı bilgisayarındaki LabView programına anlık olarak gönderilmektedir.
- q. Kullanım tankından çıkan su borusu üç bağımsız hatta ayrıldıktan sonra, PHE'lerden çıkıştan hemen sonra her bir hat üzerine sıcaklık sensörü (PT100) konulmuştur ve sıcaklık bilgileri test standı bilgisayarındaki LabView programına anlık olarak gönderilmektedir.
- r. Kullanım suyu devresindeki çevrimlerde (üç adet), PHE'lerin girişinde ve çıkışında basınç farkını gösterecek olan diferansiyel basınç ölçer

kullanılmıştır. (0-100 mbar) Bu cihaz sayesinde ölçülecek bilgiler, test standı bilgisayarındaki LabView programına anlık olarak gönderilmektedir. Bu özellikleri karşılayacak şekilde Sitrans P250 marka basınç fark ölçer kullanılmıştır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 Sitrans P250 basınç fark okuyucu (Siemens, 2015)

- s. Kullanım suyu devresindeki plakalı ısı değiştirici çıkışlarında numune alımı için kullanılacak üç adet küçük musluklar konulmuştur.
- t. Kullanım suyu devresinde bulunan suyun sertliği ppm cinsinden anlık olarak ölçülebilmektedir ve bu bilgi test standı bilgisayarındaki LabView programına anlık olarak gönderilerek kaydedilmektedir. Bu ölçüm cihazı deney düzeneğine uyarlanarak data aktarımı için 4-20 mA bağlantıları yapılmıştır. Bu istenilen ölçüm özelliklerini karşılayacak olan Testomat 2000 online su sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.11).



Teknik Bilgiler

- Elektrik kullanımı: max. 30 VA
- Koruma sınıfı: IP 65
- Çalışma ortamı sıcaklığı: 10–45 °C (50–113°F)
- Su sıcaklığı: 10–40 °C (50–104°F)
- Çalışma basıncı: 0,3–8 bar
- Ağırlığı: Yaklaşık 9,5 kg
- Ölçüleri (W x H x D): 380 x 480 x 280 mm

Ölçüm Aralıkları

- 0,05–25 °dH Su sertliği
- 0,5 – 20 °dH Karbonat sertliği
- 1 - 15 mmol/l p değeri
- 0,05 – 0,5 mmol/l -m değeri

Şekil 6.11 Testomat 200 online su sertlik ölçüm cihazı (Lenntech, 2015)

- u. Kullanım suyu devresinin çalışacağı sıcaklık aralığı 10°C-80°C olacaktır. Bu sıcaklık şartları altında çevrimdeki tüm ölçüm aletleri fonksiyonunu kaybetmeden çalışabilmektedir.
- v. Kullanım suyu devresine, şebeke suyu ile kirlenme testlerine başlamadan önce su doldurulması amacıyla bir adet doldurma vanası eklenmiştir. Bu doldurma vanası tek yönlü akışa elverişlidir ve ana şebeke suyu hattına bağlanmıştır.
- w. Kullanım suyu devresinde, PHE'den çıkan sıcak su hatlarına (üç adet) geri akış önleyici vana konmuştur. Bu sayede üç hattın da birbirinden bağımsız hale gelmesi sağlanmıştır. Hatlar arasındaki geri akış olasılığının önüne geçilecektir. (hatlardan herhangi birinin test süresince iptal edildiği, akışın olmadığı bir durum için ya da hatlardaki farklı debilerde su kullanımı için)
- x. Kullanım suyu devresinde üç hatta ayrıldıktan sonra, plakalı ısı değiştirici hemen öncesinde ve plakalı ısı değiştirici hemen sonrasında birer adet (her bir hat için 2 adet, toplam 6 adet) küresel vana konulmuştur. Bu vanaların konma amacı, herhangi bir anda bu

vanaların kapatılarak plakalı ısı değıştiricinin dışarı alınıp kütleel ölçümlerin yapılabilmesidir.

- y. Kullanım tankına bir adet drenaj hattı bağlanmıştır. Bu hattın kontrolü elle ayarlanarak küresel vana ile gerçekleştirilmiştir. Kullanım tankı içerisindeki kimyasalların drenaj edilmesi durumunda bu yöntem kullanılacaktır.
- z. Kullanım tankı üzerine bir adet hava purjörü konulmuştur. Bunun nedeni, CaSO_4 ve CaCO_3 gibi kimyasalların tank içerisinde reaksiyonu sonucu ortaya çıkabilecek CO_2 gibi gazların sistemden uzaklaştırılmasıdır.
- aa. Kullanım suyu devresinde bulunan suyun pH değeri anlık olarak ölçülebilmektedir ve bu bilgi test standı bilgisayarındaki LabView programına anlık olarak gönderilerek kaydedilebilmektedir. pH ölçüm cihazı, deney düzeneğine adapte edilerek data aktarımı için 4-20 mA bağlantıları yapılmıştır. İstenilen ölçüm özelliklerini karşılayacak olan Dulcometer online pH ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.12).



Measurement range	pH	0.00 - 14
	Redox	-1000 - +1000 mV
Resolution of pH	pH	0.01 pH
	Redox	1 mV
Correction variable	Temperature for pH via Pt 1000	
Temperature correction range	32 - 248 oF	
Control behavior	P/PID control	
Control	Control in one direction (raise/lower)	
Signal current output	1 x 4 - 20 mA electrically isolated	

Şekil 6.12 Dulcometer online pH ölçüm cihazı (Dulcometer , 2015)

6.3.2 Ön soğutma devresi

- a) Kullanım suyu devresindeki PHE'den ısı çekerek sıcaklığı yükselen kullanım suyunun sıcaklığının tekrar düşürülerek kullanım tankına yollanması amacıyla 35 kW kapasitesinde bir plakalı ısı değiştirici kullanılarak gerekli durumlar için ön soğutma sağlanmaktadır.
- b) Bu ön soğutma işleminde plakalı ısı değiştiriciye girecek kullanım suyunun debisi maksimum 54 lt/dk olarak belirlenmiştir.
- c) Bu ön soğutma devresinde soğutucu sıvı olarak şebeke suyu kullanılmaktadır. Bu suyun ortalama sıcaklığı 24°C ve debi miktarı maksimum 100 lt/dk seviyelerindedir. Bu bilgiler ışığında yapılan ısı değiştirici hesaplarına göre kullanılacak olan PHE Alfa Laval firmasının TL6-BFM isimli ısı değiştiricisi seçilmiştir.
- d) Bu ön soğutma devresinin bağlantısı yapılırken, şebeke suyu plakalı ısı değiştiricisine girmeden önce küresel bir vana ile kontrol edilmektedir. Bu sayede ön soğutma devresi sadece ihtiyaç olduğu durumlarda devreye alınacaktır.

ISI TRANSFER MIKTARI: 169.0 kW

Birincil Devre

Akışkan cinsi	Su
Akış debisi	54 l/min
Giriş sıcaklığı	70.0 °C
Çıkış sıcaklığı	24.0 °C
Basınç düşümü	0.1333 bar

İkincil Devre

Akışkan cinsi	Su
Akış debisi	100 l/min
Giriş sıcaklığı	23.0 °C
Çıkış sıcaklığı	47.3 °C
Basınç düşümü	0.4438 bar

No	Adet	Açıklama
1	1	PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİ TL6-BFM, PLAKALI PLAKA MALZEMESİ : ALLOY 316 CONTA MALZEMESİ : NBRB Clip-On BAĞLANTI ÇAPLARI : 59.0 mm



Şekil 6.13 Alfa Laval TL6-BFM ısı değıştirici ve hesaplaması (Alfa Laval, 2015)

6.3.3 Ana soğutma devresi

- Testlerde kullanılan merkezi soğutma suyunun (chiller) ortalama sıcaklığı 10°C ve alınabilecek maksimum su debisi 12 lt/dk'dır.
- Test standının ana soğutma devresinde; kullanım hattında dolaşan ve deney PHE'lerine giren kullanım suyu ısınarak tekrar kullanım tankına yol alır. Deneylerde istenilen kullanım suyu PHE giriş sıcaklığına göre, dönen kullanım sıvısının ana soğutma devresindeki plakalı ısı değıştiricisi vasıtasıyla soğutulmaktadır. Bu bilgiler ışığında yapılan ısı değıştirici

hesaplarına göre kullanılacak olan en uygun PHE Alfa Laval firmasının TL3 isimli ısı değiştiricisi seçilmiştir (şekil 6.14).

ISI TRANSFER MIKTARI: 11.27 kW

Birincil Devre

Akışkan cinsi	Su
Akış debisi	54 l/min
Giriş sıcaklığı	24.0 °C
Çıkış sıcaklığı	21.0 °C
Basınç düşümü	0.3932 bar

İkincil Devre

Akışkan cinsi	Su
Akış debisi	12 l/min
Giriş sıcaklığı	10.0 °C
Çıkış sıcaklığı	23.4 °C
Basınç düşümü	0.02669 bar

No	Adet	Açıklama
2	1	PLAKALI ISI DEğİşTİRİCİ TL3-BFG, PLAKALI PLAKA MALZEMESİ : ALLOY 316 CONTA MALZEMESİ : NBRP Clip-On BAğLANTI ÇAPLARI : 30.0 mm

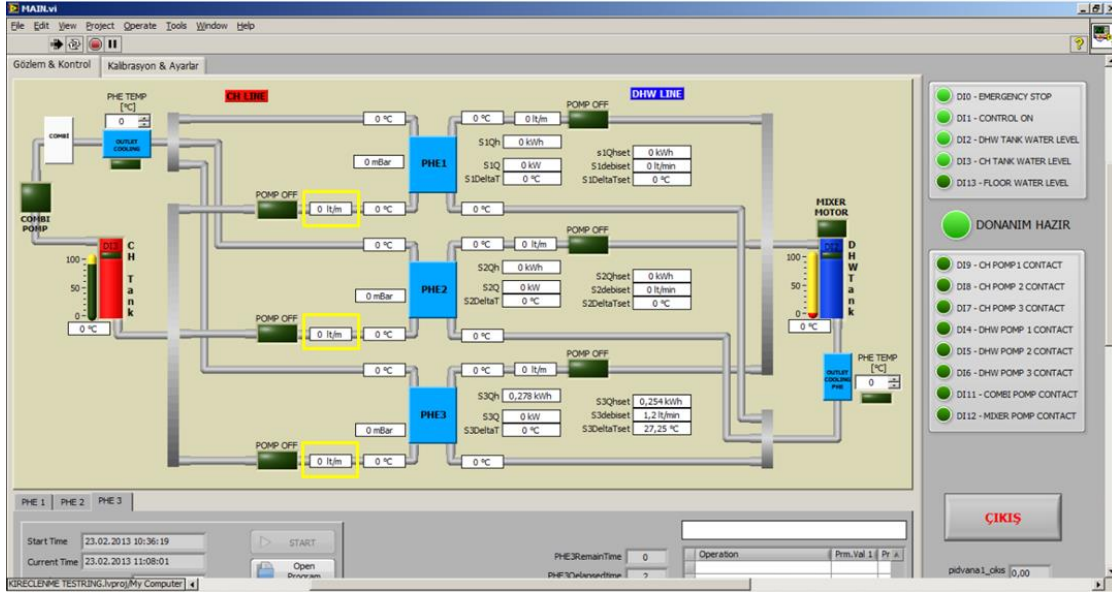


şekil 6.14 Alfa Laval TL3 ısı değiştiricisi ve hesaplaması (Alfa Laval, 2015)

- c) Ana soğutma devresinde kullanılacak chiller suyunun debisi, debi ayarlı selenoid valf ile sağlanmaktadır. Kullanım tankından çıkacak suyun sıcaklığı PC ortamındaki LabView programından set edilmektedir. Kullanım tankının hemen çıkışında bulunan PT 100 sıcaklık sensörü anlık veri olarak set edilen sıcaklık değerine ulaşmaya çalışmaktadır. Bu durumu sağlamak için, chiller suyu debisini ayarlayacak selenoid valf uygun şekilde çalışacaktır. Sonuç olarak set edilen kullanım suyu çıkış sıcaklığı otomatik olarak sağlanmaktadır.

6.3.4 LabView parametre kontrolleri

- a) Isıtma suyu devresindeki üç adet sıcak su hattından her biri için test sırasında set edilmek istenen debi miktarları, programın ara yüzünde bulunan aşağı sarı ile gösterilen bölgelere girilmektedir. (Şekil 6.15)



Şekil 6.15 Merkezi ısıtma suyu devresi debi ayarı LabView arayüzü

- b) Set edilen debi değeri ile sistemde sirküle olan gerçek debi arasındaki sapma $\pm 0,2$ lt/dk'dan fazla değildir.
- c) Her bir merkezi su hattında dolaşan suyun debisi anlık olarak, kullanım programının ara yüzünde görülmektedir.
- d) Her bir merkezi su hattında dolaşan suyun debisi anlık olarak, test operatörü tarafından seçilebilecek bir dosyanın altına excel (.xls) dosyası formatında kayıt edilmektedir. İki kayıt değeri arasındaki süre, program ara yüzünde test operatörü tarafından belirlenebilmektedir. (Örn: 1 sn, 10 sn ya da 30 sn)

6.3.5 Deney düzeneği hata ikaz sistemi

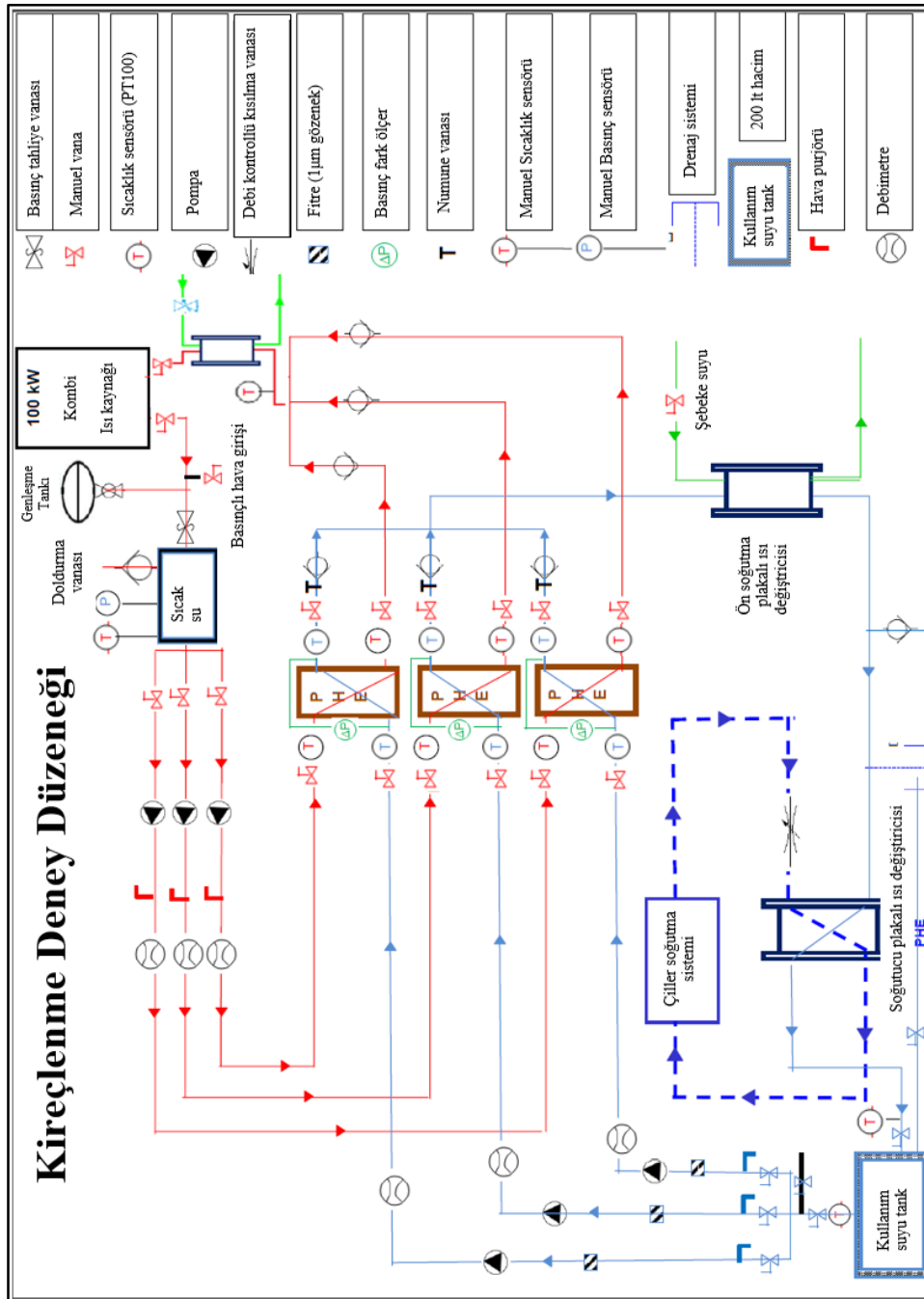
Kirlenme testlerinin uzun süre laboratuvar ortamında test operatörü nezaretinde olmaksızın devam edeceği için, herhangi bir problemin anlık olarak test operatörüne gönderilerek hataya hızlı müdahale hedeflenmiştir. Bu

kapsamda, test düzeneği bilgisayarında Bosch IT bölümü tarafından bir Outlook hesabı açılacaktır. Bu hesap sayesinde aşağıda belirtileni kritik durumlarda, test operatörü tarafından yazılımda uygun bir arayüzde belirtilecek mail adreslerine uyarı / bilgilendirme maili gidecektir. Bu sayede deneylere anlık müdahalelere olanak sağlanacaktır.

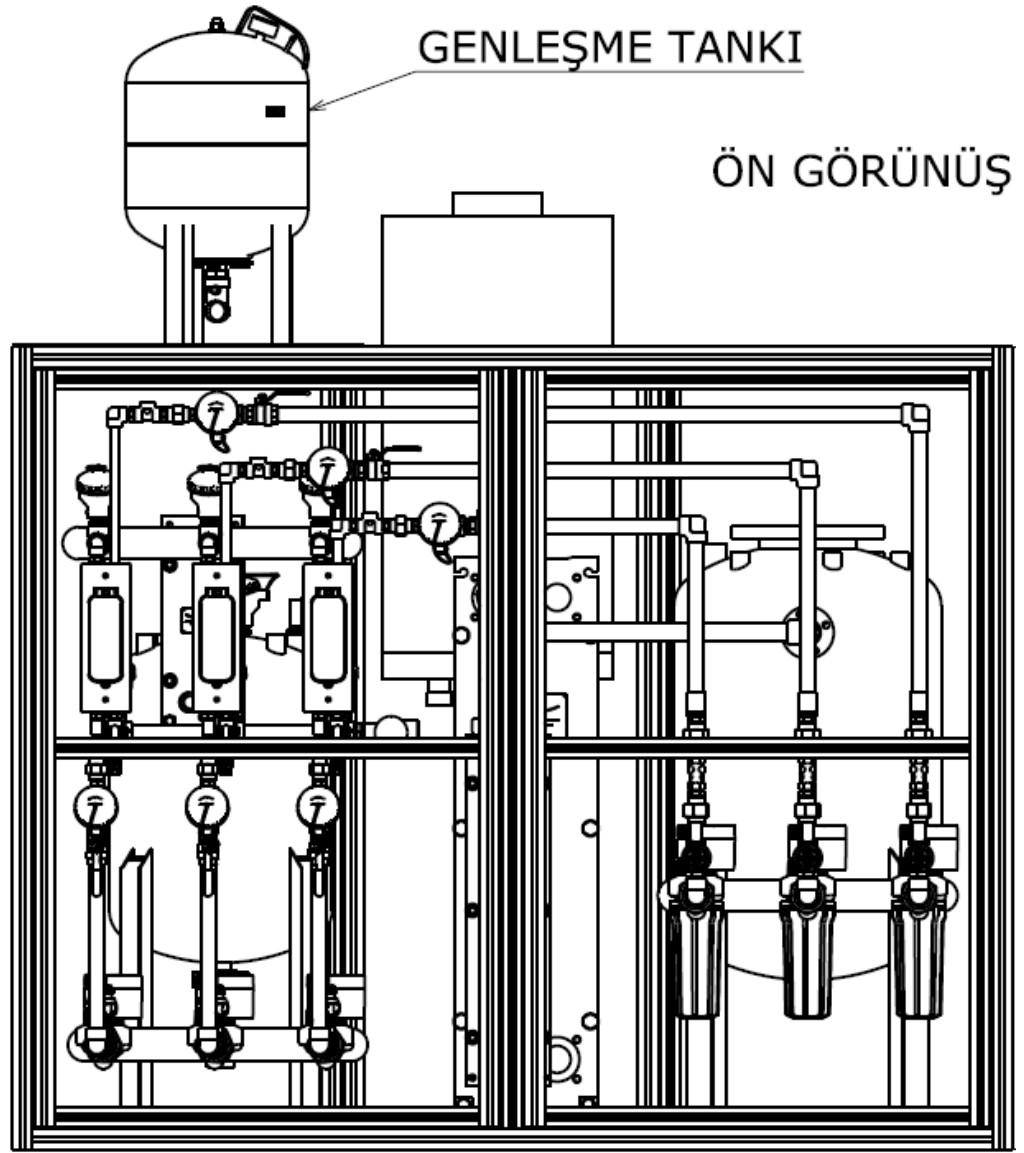
Uyarı / bilgilendirme maili yollanacak durumlar: Deneylere başlamadan önce operatör tarafından LabView arayüzüne input olarak set edilen parametre değerlerinde/aralıklarında; deney süresi boyunca ortaya çıkacak anlık sapmaların en az 1 dk boyunca devam etmesi. Örnek: Hem ısıtma suyu devresinde (kırmızı hat) hem de kullanım suyu devresinde (mavi hat) en az bir hattın; akış debileri deney set değeri tolerans değerlerinin ($\pm 0,2$ lt/dk) dışına çıktığı anda, (hangi hatta problem olduğu da uyarı mailindeki bilgide yer alacaktır.)

6.3.6 Test Düzeneği Tasarımının Sonuçlandırılması

Tasarımı gerçekleştirilen deney düzeneğine ait şematik ve 3D tasarım resimleri Şekil 6.16, 6.17, 6.18 ve 6.19'daki gibidir.

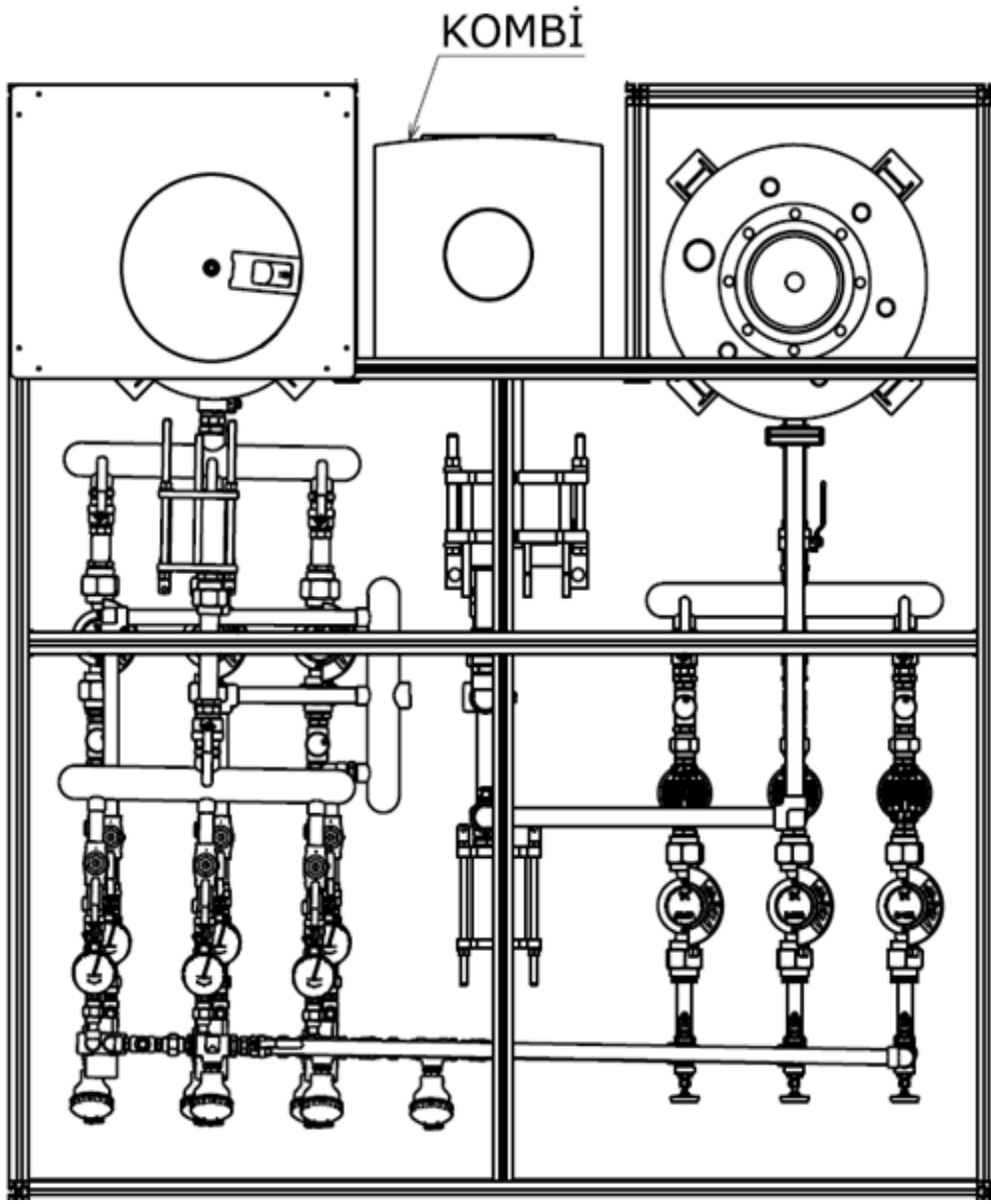


Şekil 6.16 Kireçlenme Deney Düzenegi Şematik Çizimi

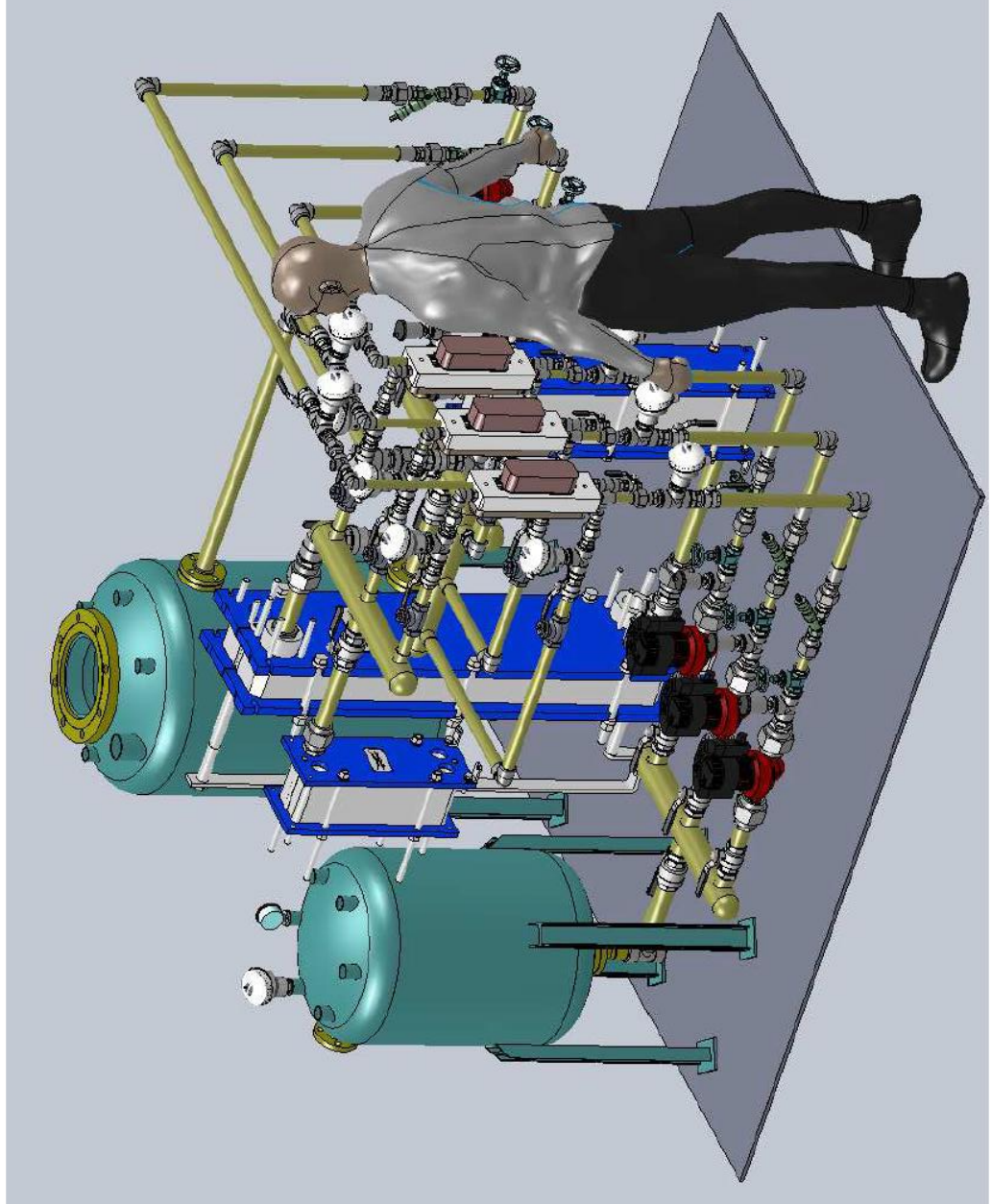


Şekil 6.17 Kireçlenme Deney Düzeneği Ön Görünüşü

ÜST GÖRÜNÜŞ



Şekil 6.18 Kireçlenme Deney Düzeneği Üst Görünüşü



Şekil 6.19 Kireçlenme Deney Düzeneği 3D Çizimi



Şekil 6.20 Kireçlenme Deney Düzeneği ve Plakalı Isı Değiştiricisi Montaj Fotoğrafı

7 SONUÇLARIN ANALİZİ

Ülkemizde hemen hemen her yerde sular sert olup kirlenmeye neden olmaktadır. Kirlenmeye karşı her geçen gün yeni çözümler aranmakta ve bu problemin önüne geçilmeye çalışılmaktadır, fakat gerek elektromanyetik aparatlar gerekse kimyasallar henüz tam olarak bu problemin önüne geçememiştir. Plakalı ısı değiştiricilerde akışkan sıcaklıkları sürekli değişken olduğundan ve akış kanalları diğer tesisat elemanlarına göre daha dar olduğundan kirlenmenin etkisi daha çabuk ve daha etkili bir biçimde ortaya çıkar.

Plakalı ısı değiştiricilerde kirlenmenin etkileri:

- Akış kanallarının daralması
- Basınç kayıplarının artması
- Isı geçişinin azalması

Olarak gözlenir ve bunun sonucunda enerji kayıpları ve kullanılabilirliğin azalması gibi sonuçlar doğurur.

Çökelme ve kristallenme, diğer kirlenme türlerine göre temizlenmesi en zor olan kirlenme tipidir. Çökelme ve kristallenmeye neden olan moleküller ilk tutunmadan sonra üst üste birikerek çok hızlı bir şekilde artmaya devam eder. Çökelme, kristallenme sonucunda, ısıtma yüzeyinde ısı geçişine karşı ek ısı dirence neden olan bir katman oluşur. Oluşan bu katman aşırı yakıt sarfıyatı ve verim düşüşüne neden olarak ısı geçiş yüzeylerinde sıcaklığı arttıracaktır. Kullanılan cihazların ömrünü arttırmak ve ısı geçişine engel oluşturacak sıkıntıları ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalar hala devam etmektedir. Bu doğrultuda kirlenme davranışını incelemek, kirlenmenin oluşmaya başladığı sıcaklık ve debiyi saptamak ve bu doğrultuda uygun bir plakalı ısı değiştirici tasarlamak amacıyla deney düzeneği kurulmuş ve çalışmalara başlanmıştır.

Model ve Test Çalışmaları

- Belirlenen parametreler ile kirlenme testlerinin yapılması
- Test sonuçlarının değerlendirilmesi
- Akış ve sıcaklık analizlerinin yapılması (model çalışmaları)

Yapılan literatür çalışmalarında kirlenme oluşumunda en önemli parametrelerin sıcaklık ve akışkanın hızı olduğu gözlenmiştir. Deney düzeneğinde seçilen parametrelere bu bilgiye göre karar verilmiştir. Yüksek sıcaklık ve düşük debi ile çalışıldığında kirlenme oluşumunun fazla olması beklenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için farklı sıcaklıklar ve debilerde de testler yapılmıştır. Kirlenmede etkili diğer önemli parametrelerden olan pH ve su sertliği, kullanım koşullarına uygunluğu sağlamak amacıyla, Manisa suyundan örnek alınıp analizlenmiştir. Sonuçlara göre pH ve su sertliği değerleri Manisa suyuna göre alınmıştır.

Deney sonuçlarında alınan verilerin kimyasal analizleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği bölümünde yapılmıştır. İlk iki deney setinin sonucunda ısı değiştiricilerde çok fazla kireçlenme görülmemesi ve analiz ihtiyacı oluşmamasından dolayı kimyasal analiz yapılamamıştır. Ancak 2014 boyunca uygulanacak deney setlerinde sıcaklığın ilk iki deney setiyle kıyaslandığında daha yüksek olması sebebiyle, stantlardaki ısı değiştiricilerde daha fazla kirlenme oluşumu gözlenmiş ve kimyasal analizleri yapılabilmektedir.

Çizelge 7.1’de şu ana kadar yapılan deney setleri görülmektedir. Bu tablodaki girdilere göre alınan sonuçlar tek tek açıklanmıştır.

Çizelge 7.1’de deney düzeneğinde yapılan testler görülmektedir. Farklı sıcaklıklar kirlenme oluşmaya başladığı sıcaklık noktasını saptamak amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ve debi değerleri yapılan literatür çalışmalar ve gerçek kullanım koşullarında EN formları göz önüne alınarak, Minitab programı yardımıyla saptanmıştır. Kullanılan ısı değiştiriciler asimetrik tasarıma sahip 18 plakalıdır. Bu ısı değiştiricilerde toplamda 17 su grubu bulunmaktadır. Bunlardan 9 tanesi sıcak 8 tanesi ise soğuk su akışına sahiptir.

Deney sonuçlarından alınan verilere göre kirlenme direnci hesaplanmış ve kirlenme oluşumu ve bu oluşumun ısı geçişine etkileri incelenmiştir.

Çizelge 7.1 Deney Setleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
1	12-13	7-8	60	26	11	3
2	12-13	7-8	60	26	11	12
3	12-13	7-8	85	26	15	3
4	12-13	7-8	85	26	15	12
5	12-13	7-8	80	26	5	15
6	12-13	7-8	80	26	15	3
7	12-13	7-8	72,5	26	5	15
8	12-13	7-8	72,5	26	15	3

7.1 Kirlenme Direnci Hesaplaması

Kirlenme direnci hesaplanması için referans ısı geçiş katsayısı U_o ve zamanla değişen ısı geçiş katsayısı olan U kullanılır. Aşağıdaki tablo kirlenme direnci hesaplamasını tanımlamaktadır.

Çizelge 7.2 Kirlenme Direnci Formülü

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{\log \text{mean}}} \quad , \quad R_f = \left(\frac{1}{U} \right) - \left(\frac{1}{U_o} \right)$$

R_f : Kirlenme direnci : (m².K)/W
 U : Isı geçiş katsayısı: W/(m².K)
 U_o : Isı geçiş katsayısı: W/(m².K)
 $\dot{Q}$: Isı geçiş: m.C.Δt

Yukarıdaki formülle hesaplanan kirlenme direncinin zamana göre değişimi incelendiğinde sıcaklığın ve debilerin etkileri daha net görülmektedir.

Deney setlerinden alınan sonuçları kıyaslayabilmek ve gerçek sonuçları model sonuçları ile karşılaştırmak için 1 ve 2 numaralı deney setleri için akış ve sıcaklık analizleri yapılmıştır. Bu analizler; CFD analizi için ANSYS 14.0 ve Fluent kullanılmıştır. Model çalışmasında;

1. ANSYS Design Modeller 14.0 kullanılarak su domaini CAD modeli ile hazırlanmıştır.
2. Model MESHING 13.0 module ile meshlenmiştir.
3. Model paralel işleme metoduyla Fluent ile çözülmüştür. Bu analiz için toplam 8 işlemci kullanılmıştır.
4. İncelenen veriler CFD-post ile işlenmiştir.
5. Resimler ve şekiller CorelDRAW X5 ile hazırlanarak gösterilmiştir (Çizelge 7.3).

Analizler boyunca kullanılan paslanmaz çelik malzeme özellikleri, ANSYS malzeme bankasından alınan sınır koşulları ve çözüm parametreleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3 Plakalı Isı Değiştirici Malzeme Özellikleri

Suyun Termodinamik Özellikleri	
Yoğunluk (sıcaklığa bağlı olarak)	$-0.0035T_2 + 1.7938T + 768,62 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Dinamik Viskozite (sıcaklığa bağlı olarak)	$-2.13.10^{-9}.T_3 + 2.241.10^{-6}.T_2 - 0.00079038T + 0,0937614 \text{ [kg/ms]}$
Özgül ısı (sıcaklığa bağlı olarak)	$0.0124T_2 - 7.7879T + 5406,9 \text{ [J/kgK]}$
Plakalı Isı Değiştiricisinin Malzeme Özellikleri	
Yoğunluk	$8030 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Özgül Isı	$502,48 \text{ [J/kgK]}$
Isıl İletkenlik	$16,27 \text{ [W/mK]}$

7.2 Sınır Koşulları

1. Deney Seti

DHW hattındaki kütle debisi, $m=3$ lt/dk, tek bir plaka için: 0,006232 kg/s

CH hattındaki kütle debisi, $m=11$ lt/dk, tek bir plaka için: 0,04 kg/s

DHW hattı giriş sıcaklığı, $T=26$ °C

CH hattı giriş sıcaklığı, $T=60$ °C

Plaka kalınlığı: 0,3 mm

2. Deney Seti

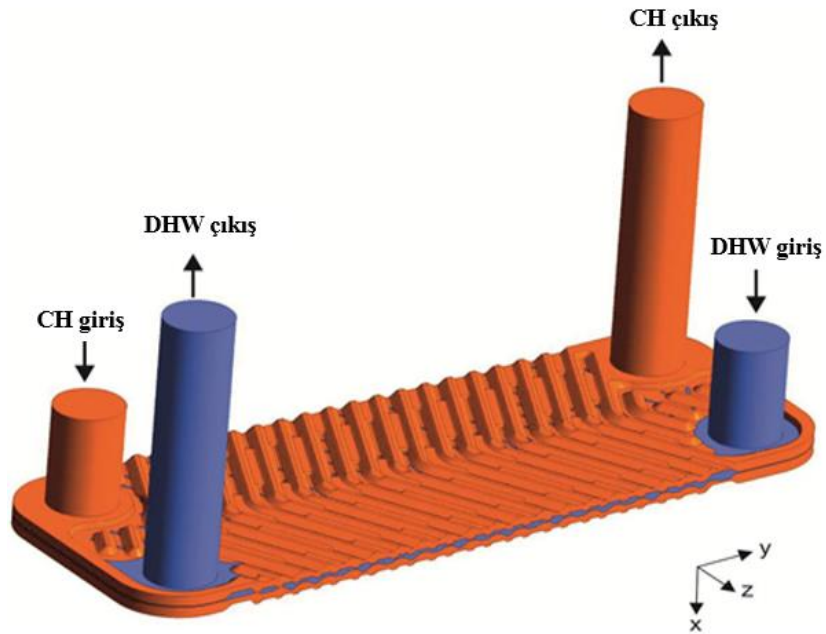
DHW hattındaki kütle debisi, $m=12$ lt/dk, tek bir plaka için: 0,024928 kg/s

CH hattındaki kütle debisi, $m=11$ lt/dk, tek bir plaka için: 0,04 kg/s

DHW hattı giriş sıcaklığı, $T= 26$ °C

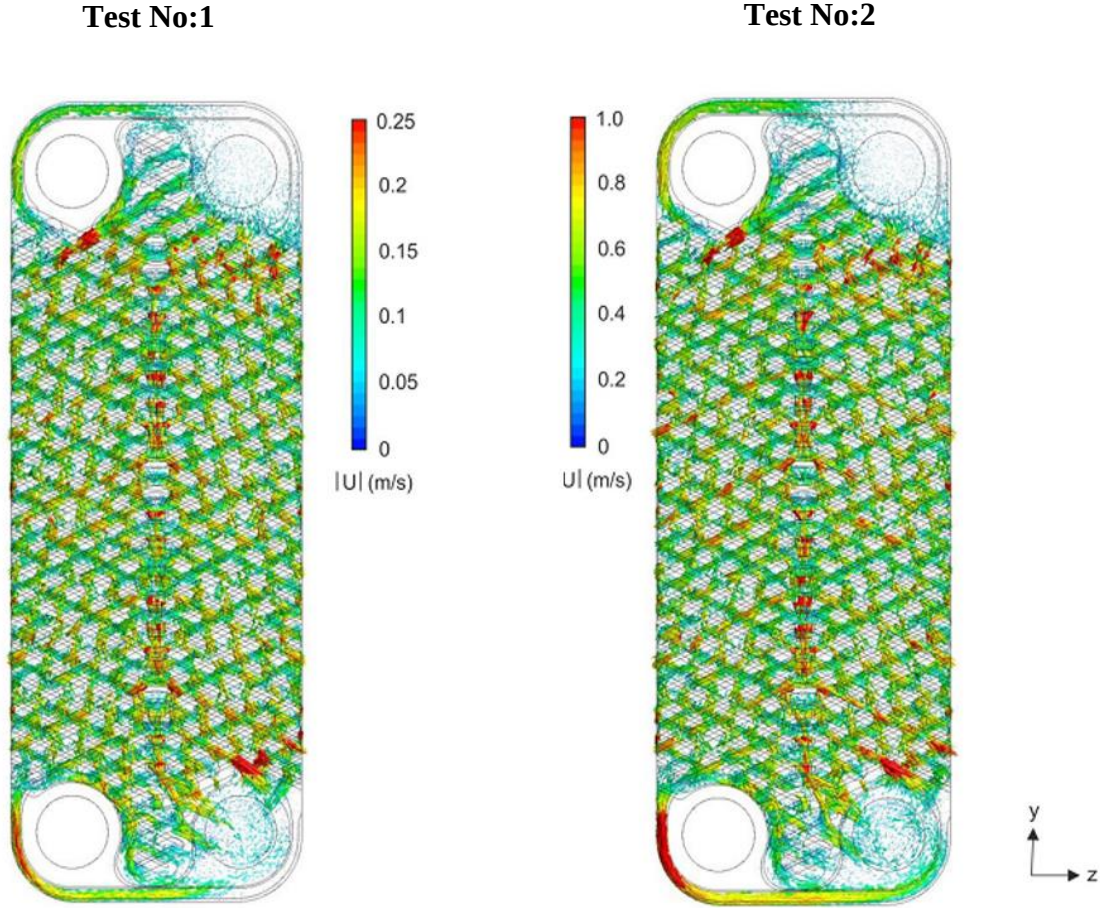
CH hattı giriş sıcaklığı, $T= 60$ °C

Çizelge 7.4 Model Verileri İçin Sınır Koşulları



Deney No	Kullanım Suyu Çıkış Sıcaklığı $T_{DHW, çıkış}$ (°C)	Isıtma Suyu Çıkış Sıcaklığı $T_{CH, çıkış}$ (°C)	Isı Akısı W/m^2	Kullanım Suyu Basınç Kaybı ΔP (Pa)
1	57,5	55,1	30004	810
2	43,9	48,86	68207	11300

Model sonuçlarına göre hız vektörünün dağılımı Şekil 7.1’de görülmektedir. Şekildeki akış dağılımlarına göre kirlenmenin nerelerde ve hangi yoğunluklarda oluşabileceği görülür. Hızın en yüksek olduğu kırmızı bölgelerde en az kirlenme beklenir.



Şekil 7.1 Akış Analizinin Sonuçları

Üç boyutlu vektörler hızın şiddeti ile süperpoze edilmiştir.

Kirlenmedeki en önemli parametre olan sıcaklığın dağılımını görebilmekte model çalışmaları fazlasıyla yol göstericidir. Yukarıdaki şekle bakıldığında en sıcak bölgeler olan kırmızı bölgelerde kireçlenmenin en fazla olması beklenir.

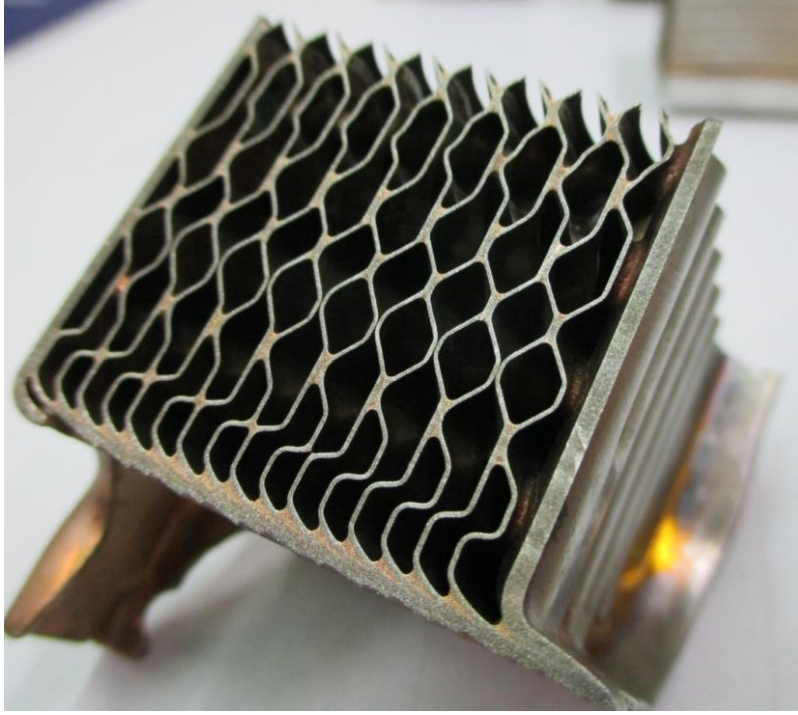
Deney setlerinden çıkan gerçek sonuçlar, yapılan model çalışmaları ile karşılaştırılıp yorumlanmıştır. İstenen sınır koşulları için sıcaklık ve basınç kaybı analizlerinin çözümleri ile ilgili çalışmalar yüksek hızlı bilgisayarlar da yapılmıştır.

7.3 1 No'lu Deney Seti

1 no'lu deney Çizelge 7.5'de verilen değerlerle gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda tel erezyon yöntemiyle boyunca kesilen numune Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere belirgin bir kirlenme oluşumu gözlenmemiştir. Bunun nedeni kullanılan kalorifer suyu sıcaklığının deney süresince, suyun debisi düşük olduğu halde kirlenme oluşumunu sağlayacak sıcaklıkta olmamasıdır. Belirgin bir kirlenme tabakasına rastlanmayan bu ısı değiştiriciden kirlenme oluşumu ile ilgili örnek alınamamış, dolayısıyla kimyasal analizi yapılmamıştır.

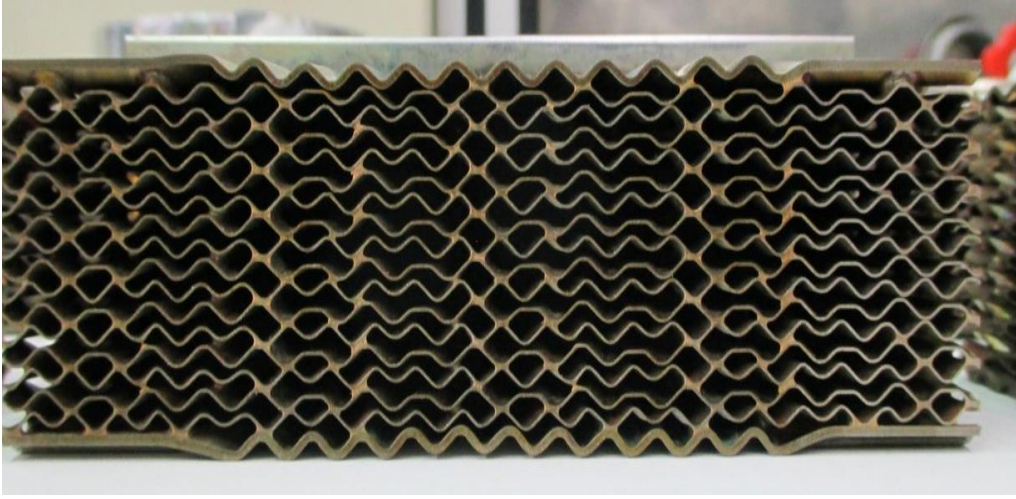
Çizelge 7.5 1 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
1	12-13	7-8	60	26	11	3



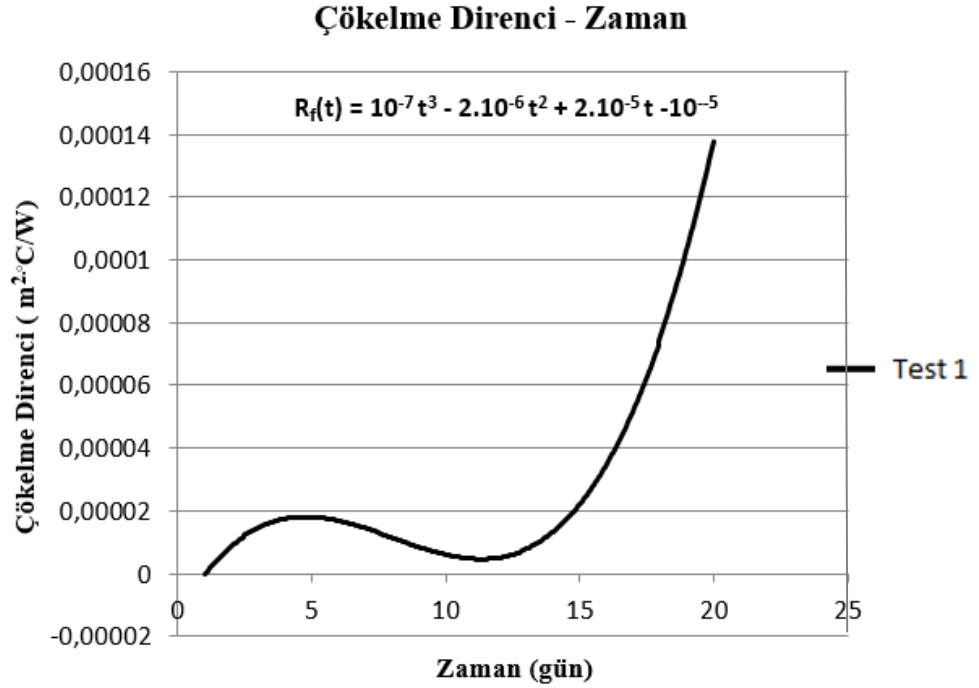
Şekil 7.2 1

Numaralı Deney Setinden Çıkan Isı Değiştirici Kesiti



Şekil 7.3 1 Numaralı Deney Setinden Çıkan Isı Değiştirici Kesitinin Yandan Görünümü

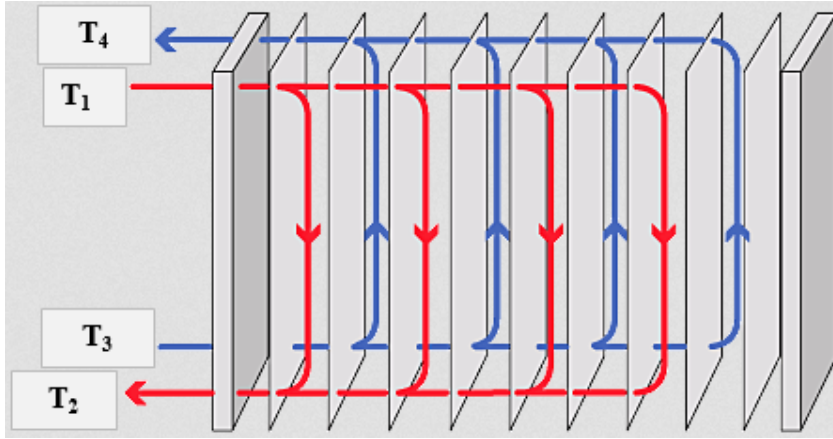
Isı değiştiricinin daha önce kullanılmadığı düşünülür ise ısıl direncin sıfırdan başlaması beklenen bir sonuçtur. Literatür araştırmasında da görüldüğü gibi, bazı durumlarda ilk tutunan kirlenme katmanının ısı geçişini arttırdığı ve bu yüzden direncin negatif değerleri bulduğu görülse de yapılan testlerde kirlenmenin bu tip bir etkisine rastlanmamıştır.



Şekil 7.4 1 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman Grafiği

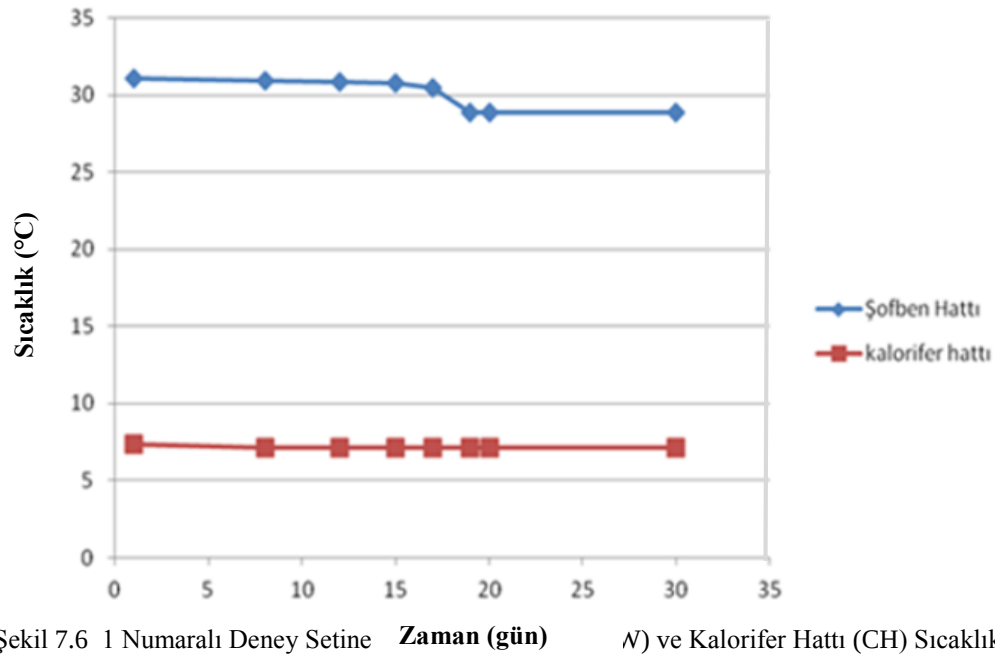
Kirlenme direncinin özellikle 15. Gün ile 20. Gün arasında yüksek bir ivmelenmeyle artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 7.4). 20. günden itibaren tutunan kirlenme miktarında bir artış gözlenmemiş, oluşum kararlı bir hal almıştır. Bu davranış Quan ve arkadaşlarının (2008) çalışmaları ile tamamen paralel bir kirlenme oluşum davranışı olup gerçekleşmesi daha önceden öngörülmüştür. Grafikte artan bir görünüş gözlense de analiz için dahi yeterli örnek alınamamasının nedeni çalışma sıcaklığının kirlenme oluşumuna göre düşük sıcaklıkta olmasından kaynaklanmaktadır.

Deneyler boyunca şofben ve kalorifer hattındaki plakalı ısı değiştirici öncesi ve sonrasındaki sıcaklıklar ölçülmüş ve aradaki sıcaklık farkları da grafiklendirilmiştir. Grafiklerin kolayca anlaşılır olması adına; kalorifer hattındaki plakalı ısı değiştiricisi girişi T_1 , çıkışı ise T_2 olarak adlandırılacak. Benzer şekilde şoben hattı giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla T_3 ve T_4 olarak ifade edilecektir.



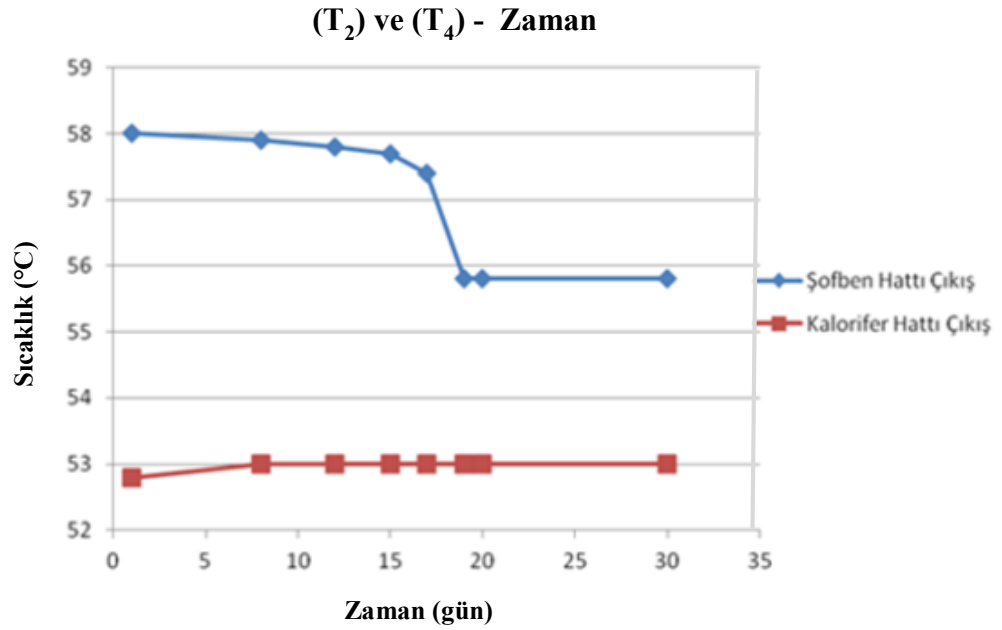
Şekil 7.5 Plakalı ısı değıştiricisi giriş ve çıkış sıcaklıklarının kısaltmaları

(T_1-T_2) ve (T_4-T_3) - Zaman



Şekil 7.6 1 Numaralı Deney Setine $\mathcal{N}$ ve Klorifer Hattı (CH) Sıcaklık Farkı-Zaman Grafiğı

Çizelge 7.5' den hatırlayacağımız üzere sıcak su tarafının debisi soğuk tarafa göre daha fazladır. Her zaman şofben hattı açık çevrim olduğundan kirlenme bu kısımda görülür. Dolayısıyla kirlenmenin etkileri bu kısımda daha fazla görüleceğinden sıcaklık farkındaki değişim şofben (DHW) hattında her zaman daha fazla olacaktır (Şekil 7.6). Sıcaklık farkı olarak tanımlanan bu değer, ısı değiştirici öncesi ve sonrasındaki su sıcaklığının farkıdır. Şekil 7.6'da zamanla şofben hattı su giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkının azaldığı açıkça görülmektedir. Bu durumun nedeni, kirlenmeyle beraber çok düşük seviyelerde azalan ısı geçişi nedeniyle plakalı ısı değiştirici çıkışındaki sıcaklıkların zamanla düşmeye başlamasıdır (Şekil 7.7). Ancak kirlenme oluşumunun net bir şekilde oluşmamasından dolayı sıcaklık düşme seviyeleri birkaç dereceyi geçmemiştir.



Şekil 7.7 1 Numaralı Deney Setine Ait, Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Çıkış Sıcaklıkları-Zaman Grafiği

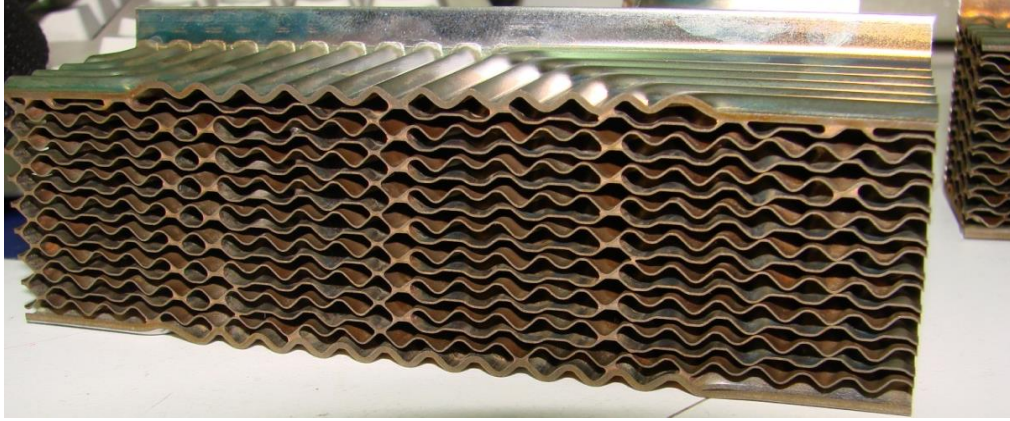
7.4 2 No'lu Deney Seti

1 numaralı deney seti ile elde edilen sonuçlardan sonra, kullanım suyu debisinin sonuçlar üzerine etkisini gözlemlemek adına daha önce 3 lt/dk olan kullanım suyu debisi 12 lt/dk'ya arttırılmıştır (Çizelge 7.6).

Çizelge 7.6 2 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

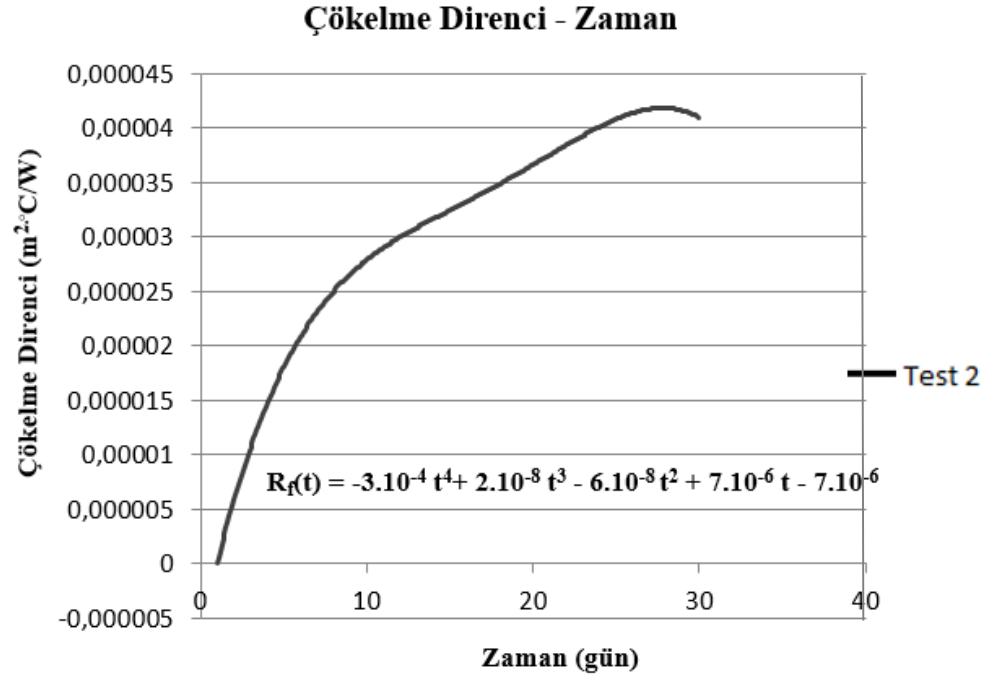
Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
2	12-13	7-8	60	26	11	12

Bir ay boyunca bu sabit sıcaklık ve debi özellikleriyle deney altında tutulan plakalı ısı değiştiricisi numunesi, yine birkaç parçaya kesilerek, kanallar arasındaki kirlenmeler incelenmiş ve resimlendirilmiştir. Göz ile görülür kirlenme oluşumuna deney testi 1’de olduğu gibi yine rastlanmamıştır (Şekil 7.9). Bu durum bu deney setlerinde de kimyasal analiz yapılamamasına yol açmıştır.

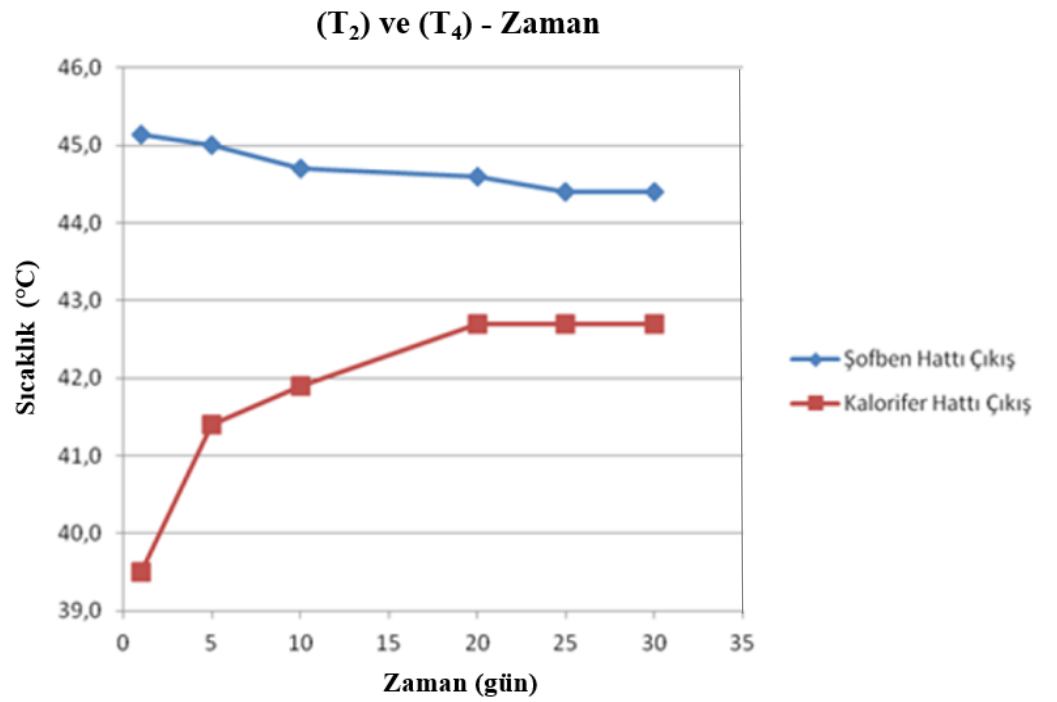


Şekil 7.8 2 Numaralı Deney Setinden Çıkan Isı Değiştirici Kesitinin Yandan Görünümü

Deney seti 2’de analiz edilebilecek kirlenme oluşumunun gözlenmediği yukarıda belirtilmişti. Buna paralel olarak Şekil 7.9’dan kirlenme direncinin profili genel olarak 1 numaralı deney sonuçlarına benzer durumdadır. Sonuçlar incelendiğinde kirlenme direnci sayısal olarak 1 numaralı deney testine göre daha azdır (Şekil 7.9). Bunun nedeni deney seti 1’den farklı olarak soğuk su hattının debisinin 3 lt/dk dan 12 lt/dk ya çıkarılması yani daha yüksek alınması olarak kabul edilebilir.



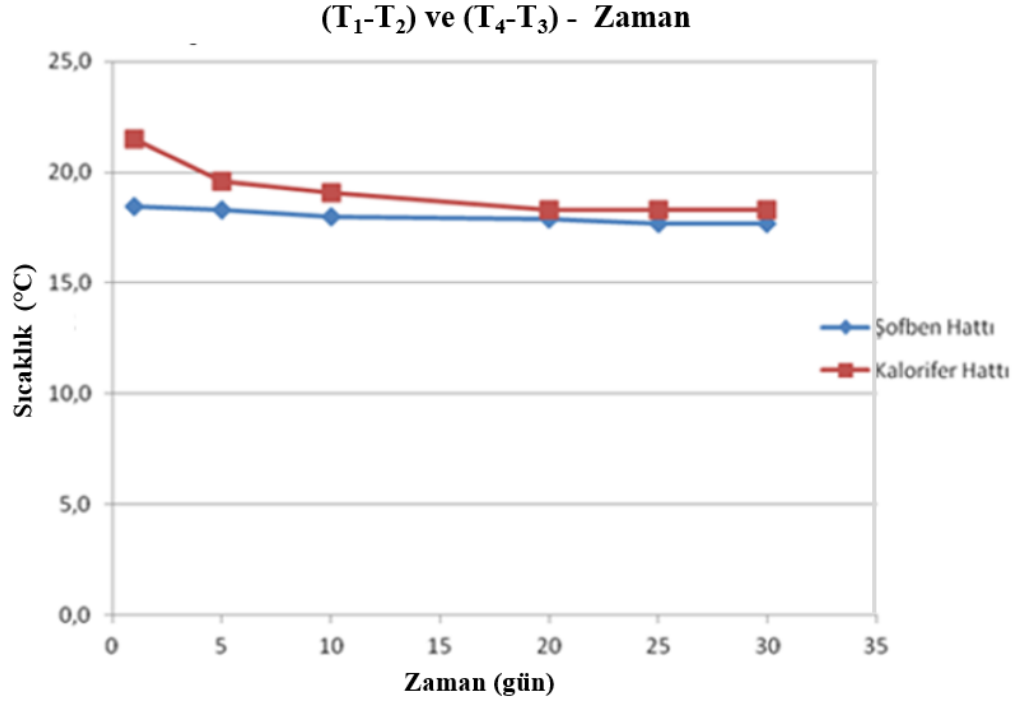
Şekil 7.9 2 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman Grafiği



Şekil 7.10 2 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı
Çıkış Sıcaklıkları-Zaman Grafiği

Sıcak su hattındaki sıcaklık farkının soğuk olana göre biraz daha yüksek olması enerjinin korunumu yasasına dayanır. Alınan ısının verilen ısıya eşit olabilmesi için kütle debisi daha yüksek olan soğuk şofben hattının sıcaklık değişiminin de daha düşük olması bir gerekliliktir.

Kirlenmenin düşük olduğu bu deney setinde ısı kaybının az olması beklenmektedir. Şekil 7.10’da plakalı ısı değiştiricisi kanallarının giriş ve çıkışları arasındaki sıcaklık farklarının çok farklı olmaması bu durum ile açıklanabilir. Şekil 7.6 ile bu sonuçları kıyasladığımızda sonuçların benzer olduğu, yani zamanla ne şofben ne de kalorifer hattındaki giriş ve çıkış suyu arasındaki sıcaklık farkı önemli sevilere ulaşmamıştır. Bu sonuçlar, örnek kesit resimleriyle de örtüşen şekildedir. Bir ay boyunca bu sabit sıcaklık ve debi özellikleriyle deney altında tutulan plakalı ısı değiştiricisi numunesi, yine birkaç parçaya kesilerek, kanallar arasındaki kirlenmeler incelenmiş ve resimlendirilmiştir. Göz ile görülür kirlenme oluşumuna deney testi 1’de olduğu gibi yine rastlanmamıştır (Şekil 7.9). Bu durum bu deney setlerinde de kimyasal analiz yapılamamasına yol açmıştır.



Şekil 7.11 2 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Sıcaklık Farkı - Zaman

7.5 3 No'lu Deney Seti

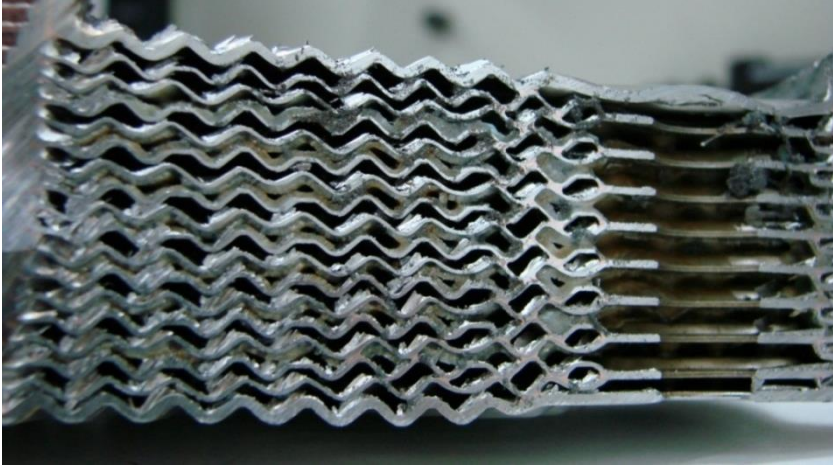
1 ve 2 no'lu deney setlerinde ısıtma suyu giriş sıcaklığı düşük bir seviye kabul edilebilir olan 60°C olarak sabit tutulmuştu. Bir kombi ısıtıcı cihazında plakalı ısı değiştiricinin kirlenme riski altında olduğu ısıtma suyu sıcaklığı daha bu sıcaklık değerinin altında olmasından dolayı bu deney setinde 85°C gibi yüksek bir değer sabit tutulmuştur (Çizelge 7.7). Bunun yanında ısıtma suyu debisi de 15 lt/dk seviyelerine getirilmiştir. Çünkü bir kombi ısıtıcı cihazındaki, kullanım suyu kullanımı anındaki ısıtma suyu debisi sıklıkla bu değerlerdedir.

Çizelge 7.7 3 numaralı deney setine ait sıcaklık ve debi değerleri

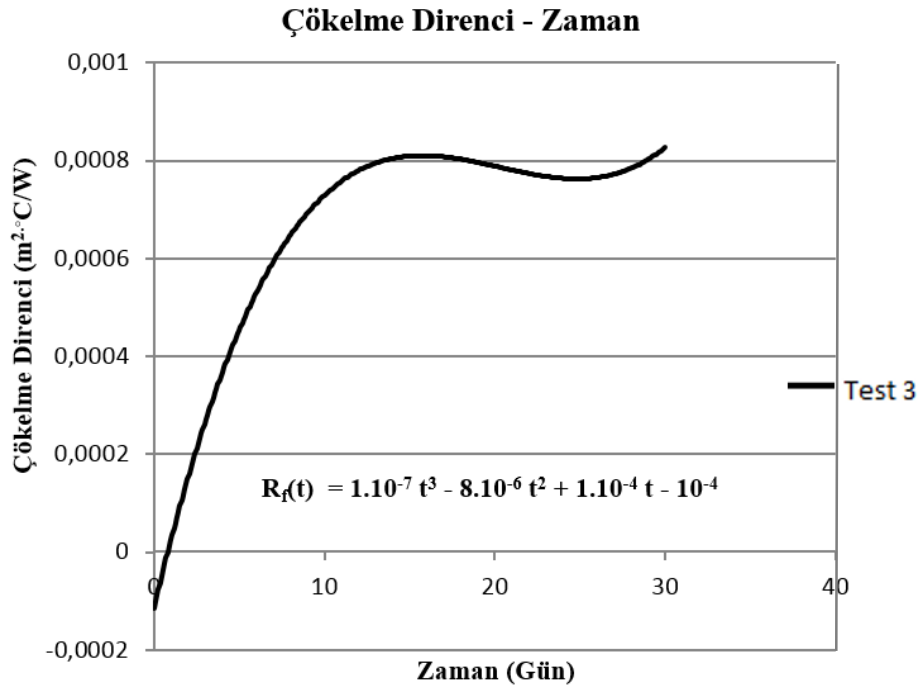
Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
3	12-13	7-8	85	26	15	3

Şekil 7.12'de görüldüğü üzere deney seti 3, ilk iki deney setine göre gözle görülür bir biçimde farklı numuneler elde etmemizi sağlamıştır. Bu numuneyle

beraber ilk defa numunemizde kirlenme oluşumu tespit edilmiş bulunup kimyasal element ve kristal analizi yapılmıştır. Resimler dikkatli olarak incelendiğinde, kanal yüksekliklerinin neredeyse tamamını tıkayarak birçok kanalda akışa izin vermeyerek tıkanmalara neden olan sert kirlenmeler görülmektedir.



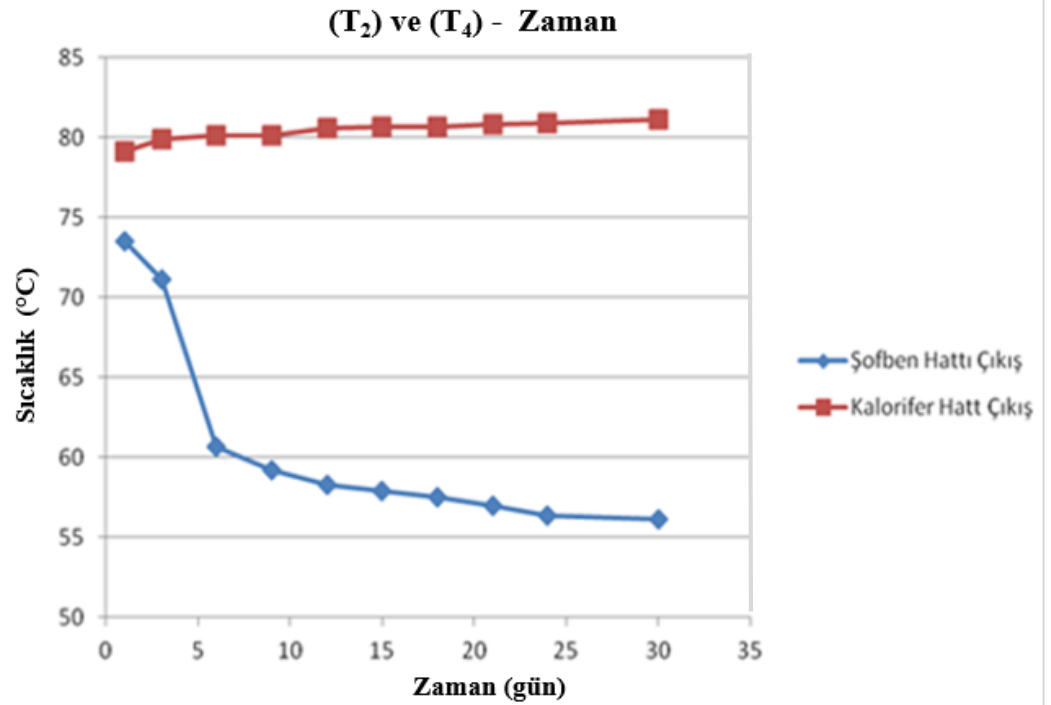
Şekil 7.12 3 Numaralı Deney Setinden Çıkan Isı Değiştirici Kesitinin Yandan Görünümü



Şekil 7.13 3 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman Grafiği

Şekil 7.13'deki grafiğe bakıldığında kısa bir süre için kirlenme oluşumunun yavaşça arttığı ardından hızlı bir artışa geçtiği görülür. Daha sonra

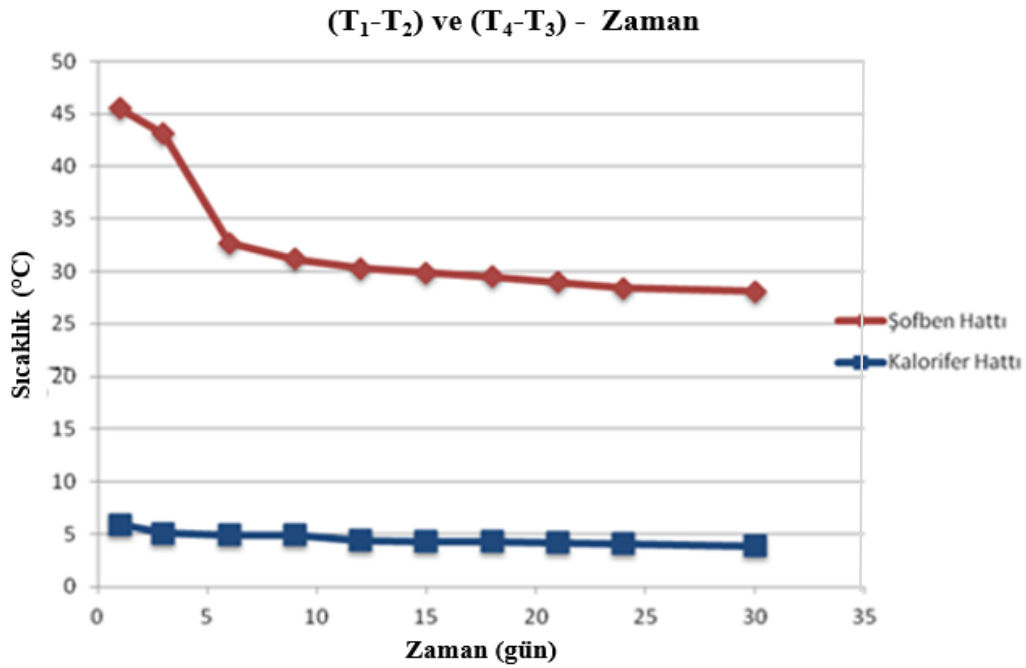
tekrar oluşum hızı yavaşlar ve daha kararlı bir hal alır. Deneye ilk başlandığında kirlenme oluşumunun hızlı artması yüksek ısı geçişi ve düşük debiden kaynaklanmaktadır. Zamanla kirlenme oluşumu nedeniyle ısı geçişi azalacaktır. Belirli bir debi ve giriş suyu sıcaklığında çalışıldığından, zamanla sıcaklık farkının azalması ısı geçişini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla belirli bir noktadan sonra kirlenme oluşumu ısı geçişine engel olur. Dolayısıyla ısı geçişi azalacağından kirlenme oluşumu da deneye ilk başlandığı zamandaki artış hızını göstermeyecektir.



Şekil 7.14 3 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Çıkış Sıcaklıkları -Zaman Grafiği

Şekil 7.14'e göre, kirlenme oluşmadan önce kalorifer giriş hattı mevcut ısıyı doğrudan transfer edebildiğinden kalorifer hattı çıkış sıcaklığı, giriş

sıcaklığına yakın bir değerde gözlenir. Zamanla kirlenme oluşumu ısı geçişine engel olacağından ısı değiştiricideki ısı verimli aktarılamamıştır ve kalorifer çıkış hattı sıcaklığında artış olmuştur. Benzer şekilde kirlenme oluşmadan önce soğuk olarak giren şofben giriş hattına, kalorifer giriş hattı tarafından daha fazla ısı aktarılacağından şofben çıkış hattı yüksek sıcaklıklarda çıkmaya başlar ancak zamanla ısı geçişi azalacağından azalarak devam eder.



Şekil 7.15 3 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Sıcaklık Farkı -Zaman Grafiği

Enerjinin korunumu yasasına göre alınan ısının verilen ısıya eşit olması gerekmektedir. Yüksek debide olan kalorifer hattında oluşan sıcaklık farkının şofben hattına kıyasla çok az olmasının nedeni yine bu yasayla ilintilidir. Alınan

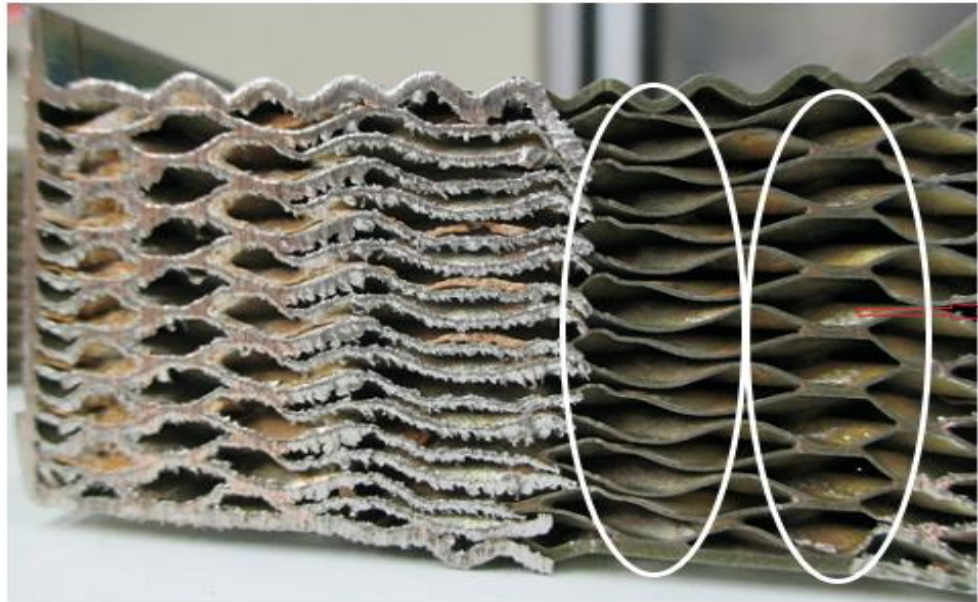
ısı verilen ısıya eşit olacağından düşük debide ki şofben hattında sıcaklık değişimi daha yüksek olur (Şekil 7.15). Ancak zamanla oluşan sıcaklık farklarında ki azalma kireç oluşumun olumsuz etkisini göstermektedir. Çökelti oluşumundan dolayı ısı değişimi azalmıştır.

7.6 4 No'lu Deney Seti

3 no'lu deney setinin sonucunda kullanım suyu kanalında oluşan kirlenmeler net bir biçimde görülmesiyle beraber, kullanım suyu debisinin etkisinin bir kez daha incelenmesi amacıyla debi 3 lt/dk'dan 12 lt/dk'ya çıkarılmıştır (Çizelge 7.8)

Çizelge 7.8 4 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

Bir aylık deney süresi sonucunda, kesilerek kanallardaki kirlenme davranışı incelenmiştir (Şekil 7.16). Kanal yüzeylerinde detaylı olarak görülüyor ki, kullanım suyu kanalı çıkışına doğru bazı birikinti parçacıkları mevcuttur. Bu kirlenmelerin çıkışa doğru oluşmasının esas nedeni, kanal boyunca artan sıcaklıktır.



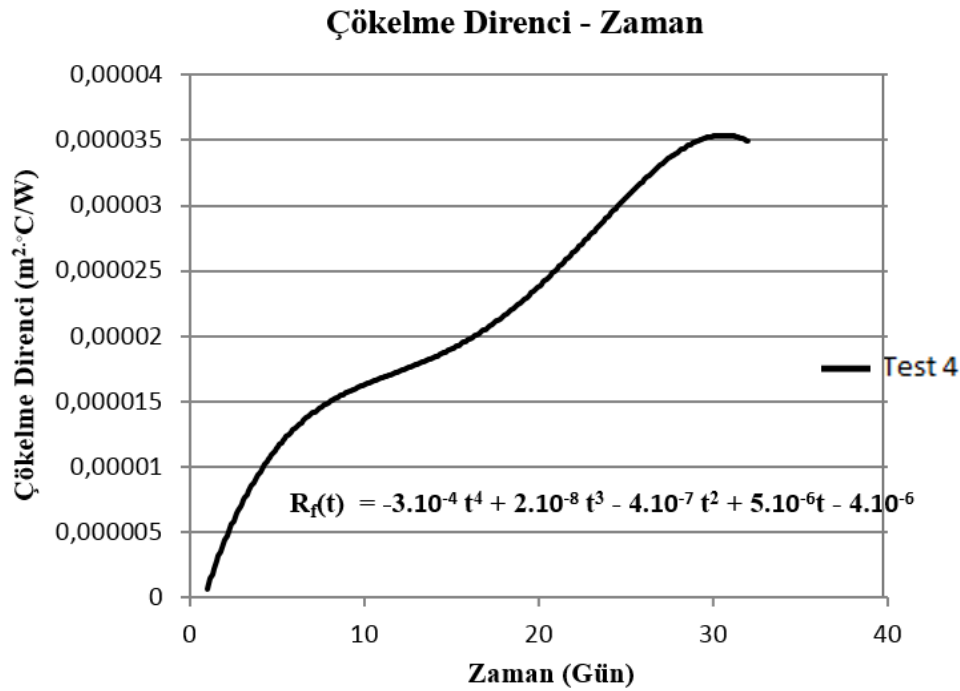
Şekil 7.16 4 Numaralı Deney Setinden Çıkan Isı Dğıştirici Kesitinin Yandan Görünümü

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
4	12-13	7-8	85	26	15	12

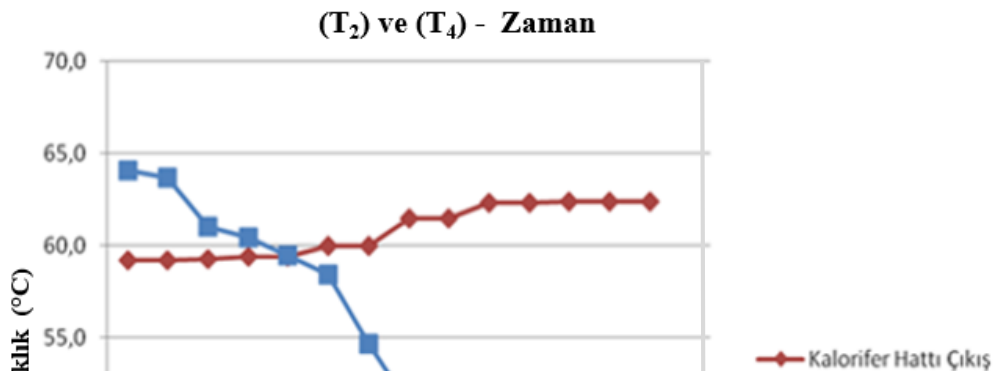
Bu deney setinde

kullanım suyu debisi, hızı daha yüksek olduğundan kirlenmenin bir önceki deneye kıyasla (deney no 3) daha yavaş olması beklenmiştir. Şekil 7.17'ye göre onuncu güne kadar kirlenme oluşumunun yavaşça arttığı onuncu günden sonra hızlı bir artışın olduğu görülür.

Bir önceki deneyde kirlenme oluşumundaki artış beşinci günden itibaren başlamaktadır (Şekil 7.13). Her iki durumda da kireçlenmenin hızlı artmasının nedeni partiküllerinin birbirini tutmasıdır. Ancak belli bir noktadan sonra tekrar azalmalar görülür.

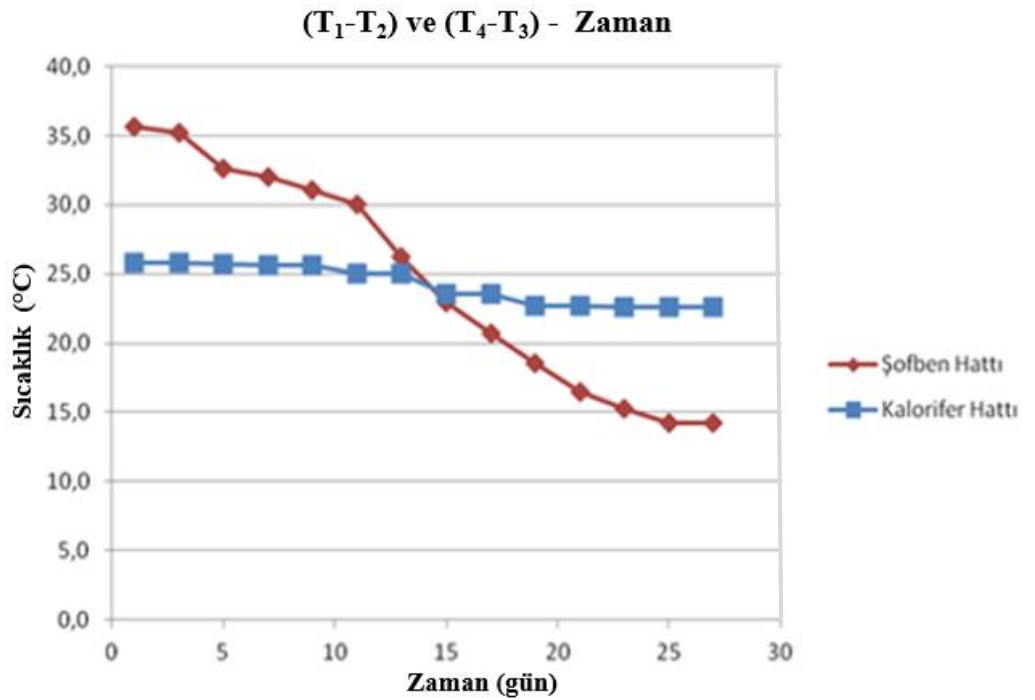


Şekil 7.17 4 Numaralı Deney Setine Ait Çökelme Direnci-Zaman Grafiği



Şekil 7.18 4 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Çıkış Sıcaklıkları -Zaman Grafiği

Şekil 7.18’de beklenildiği üzere kirlenme oluşumunun ısı geçişini azaltmasından dolayı kalorifer çıkış hattı sıcaklığı zamanla artmıştır. Aynı etkiden dolayı şofben çıkış hattı sıcaklığı da zamanla azalmıştır. Ayrıca deney no 3 ile kıyaslandığında sıcaklık farkı-zaman eğrilerinde daha belirgin bir sapmanın gözlenmesi şofben giriş hattı kısmının debisinin deney no 3’e oranla daha yüksek olmasından kaynaklanır.



Şekil 7.19 4 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Sıcaklık Farkı-Zaman Grafiği

Şekil 7.19’da grafik sıcaklık farkları zamana bağlı değişimlerini göstermektedir. Şekil 7.19’a göre sıcaklık farkları zamanla azalmaktadır. Kalorifer hattındaki azalma şofben hattına göre daha fazla değildir. Bu durum beklenen bir durumdur çünkü kalorifer hattı sıcak, şofben hattı soğuk kısımdır. Sıcaklık farklılıklarının zamanla azalmasının nedeni kirlenme oluşumundan dolayı azalan ısı geçiştir. Kirlenme oluşumu ısı geçişini yeterli düzeyde sağlamasına engel olacağından zamanla daha az ısı geçişi olur.

7.7 5 No’lu Deney Seti

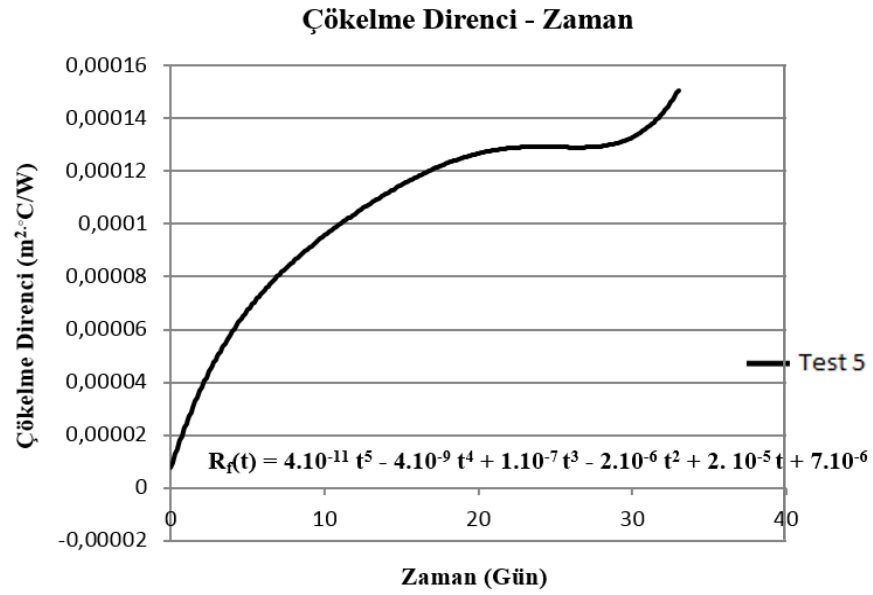
Bir kombi ısıtıcı cihazının, çok soğuk bölgelerde kış günlerinde merkezi ısıtma hattına yolladığı suyun sıcaklığı genellikle 80°C seviyelerinde olmaktadır. Son kullanıcı için kombi ayar düğmelerinde kalorifer petek sıcaklıkları için de bu sıcaklık seviyeleri cihazlarda sunulmaktadır. Bu nedenle, bu deney setinde ısıtma suyu giriş sıcaklığı bir önceki deneye göre bir miktar düşürülerek 80°C olarak sabitlenmiştir. Kullanım suyu debisi ise yüksek su kullanım şartlarında ortaya çıkabilecek olan 15 lt/dk olarak deney boyunca sabit tutulmuştur (Çizelge 7.9).

Çizelge 7.9 5 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık Ve Debi Değerleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
5	12-13	7-8	80	26	5	15

Bu deney sonucunda önemli bir kirlenme ortaya çıkmamıştır. Bu sonuçlarla, örtüşen zamana bağlı bir kirlenme direnci hesaplanmıştır (Şeil 7.19). Bu sonucun en büyük nedeni bu deney setinde kullanım suyu debisinin yüksek,

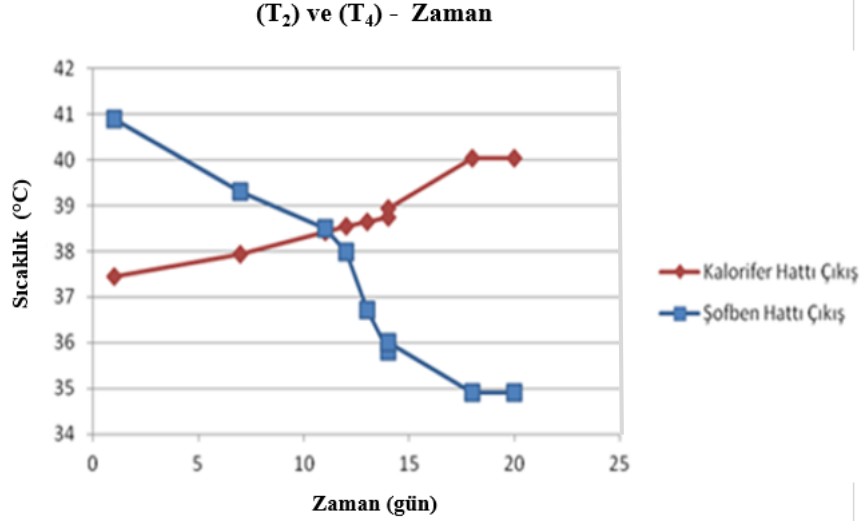
ısıtma suyu debisinin düşük olmasından dolayı; kullanım suyu çıkış sıcaklığının kirlenme için kritik olan 60°C seviyelerinin altında kalmasıdır (Şekil 7.20).



Şekil 7.20 5 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman Grafiği

Şekil 7.20’ a bakıldığında ilk on gün çökelme direnci doğrusal bir şekilde artmış ancak sonraki beş günden itibaren hızlı bir artış yapmıştır. Bu hızlı artış süreci, kirlenme oluşturan moleküllerin birbirini tutması sonucu daha hızlı çökelme olması ile yorumlanabilir. Daha sonra artış yavaşlamış ve bir süre sonra sabit kalmıştır. Kısa bir süre için kirlenmenin yavaşça arttığı ardından hızlı bir

artışa geçtiği görülür. Daha sonra tekrar oluşum hızı yavaşlar ve daha kararlı bir hal alır. Bu duruma paralel olarak, sıcaklık farkı da şofben hattında kalorifer hatına kıyasla daha fazla olmaktadır.



Şekil 7.21 5 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Çıkış Sıcaklıkları -Zaman Grafiği

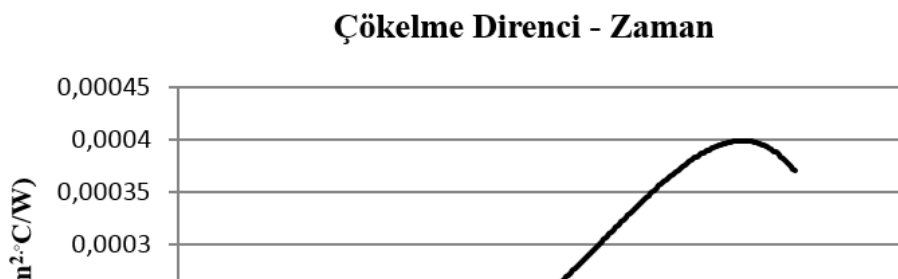
7.8 6 No'lu Deney Seti

Çizelge 7.10'da verilen sıcaklık ve debi girdileriyle gerçekleştirilen deneylerde, Şekil 7.22'de görüldüğü üzere kirlenme direnci beşinci günden sonra hızlı bir artış göstermiştir.

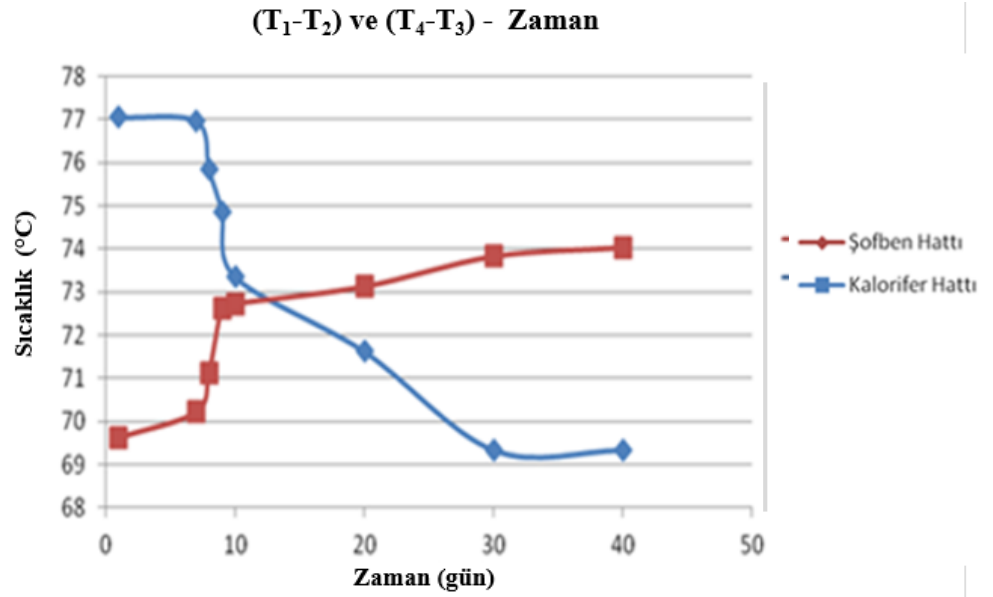
Çizelge 7.10 6 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
6	12-13	7-8	80	26	15	3

Bu deney setine bakıldığında kirlenmenin, aynı sıcaklıkta bulunan 5 numaralı deney setinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, bu deney setinde kullanım suyu debisinin 3 lt/dk gibi düşük seviyelerde sabit tutulmasıdır. Bu sayede, kullanım suyunun plakalı ısı değiştiricisini sonlarına doğru 70°C'nin üzerinde terk ettiği görülmektedir (Şekil 7.22).



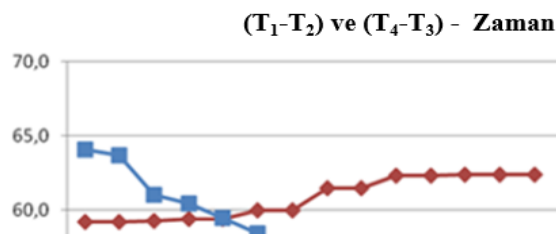
Şekil 7.22 6 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman



Şekil 7.23 6 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı

Çıkış Sıcaklıkları-Zaman Grafiği Grafiği

Şekil 7.23’de gösterilen çıkış sıcaklıklarına bakıldığında şofben hattındaki azalma yaklaşık 8°C olarak görülür. Bu değer bir önceki deney olan 80°C ve 15 lt/dk şofben hattı debisi ile yapılan testle kıyaslandığında, iki deney seti arasında 2°C gibi bir fark gözlenmektedir. Düşük debide çalışılan bu deney setinde ki azalma 2°C daha fazla olmuştur.



Şekil 7.24 6 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Sıcaklık Farkı -Zaman Grafiği

Şekil 7.24’deki görüldüğü üzere sıcaklık farkındaki değişim açık çevrim olan şofben hattında kalorifer hatına kıyasla daha fazla olmaktadır. Bu durum kirlenmenin şofben hattında oluşmasından kaynaklanır.

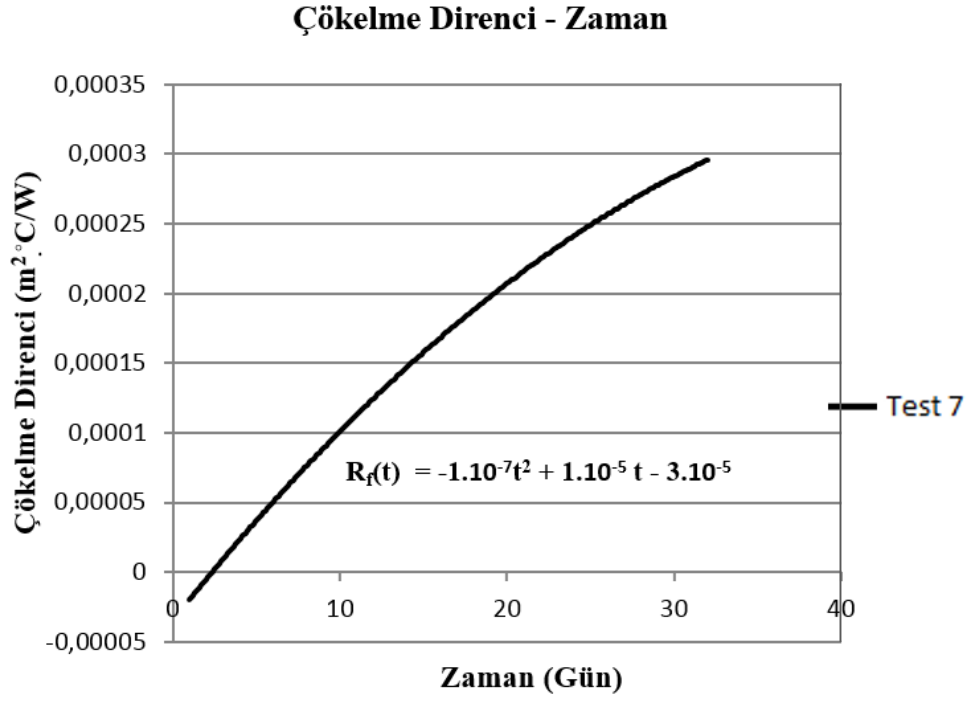
7.9 7 No’lu Deney Seti

Çizelge 7.11’de belirtilen bu deney setinde kalorifer hattının debisi düşük iken, şofben hattının debisi yüksektir. Kirlenme direnci eğrisi (Şekil 7.25) yine literatür araştırmalarında karşılaşılan bir profilde devam etmiştir.

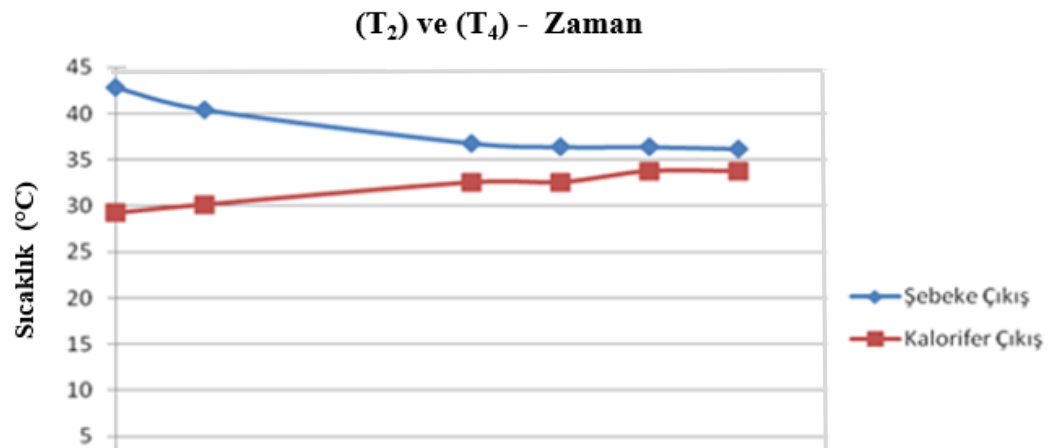
Çizelge 7.11 7 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
7	12-13	7-8	72,5	26	5	15

Şekil 7.25’de görüldüğü üzere, sıcaklık farkındaki değişim açık çevrim olan şofben hattında kalorifer hatına kıyasla daha fazla olmaktadır. Bu durum kirlenmenin şofben hattında oluşmasından kaynaklanır. Kirlenme miktarı az olduğu için sıcaklık farklarındaki değişim miktarı çok yüksek değildir.



Şekil 7.25 7 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Çıkış Sıcaklıkları - Zaman Grafiği



Şekil 7.26 7 Numaralı Deney Setine Ait Kirlenme Direnci-Zaman Grafiği

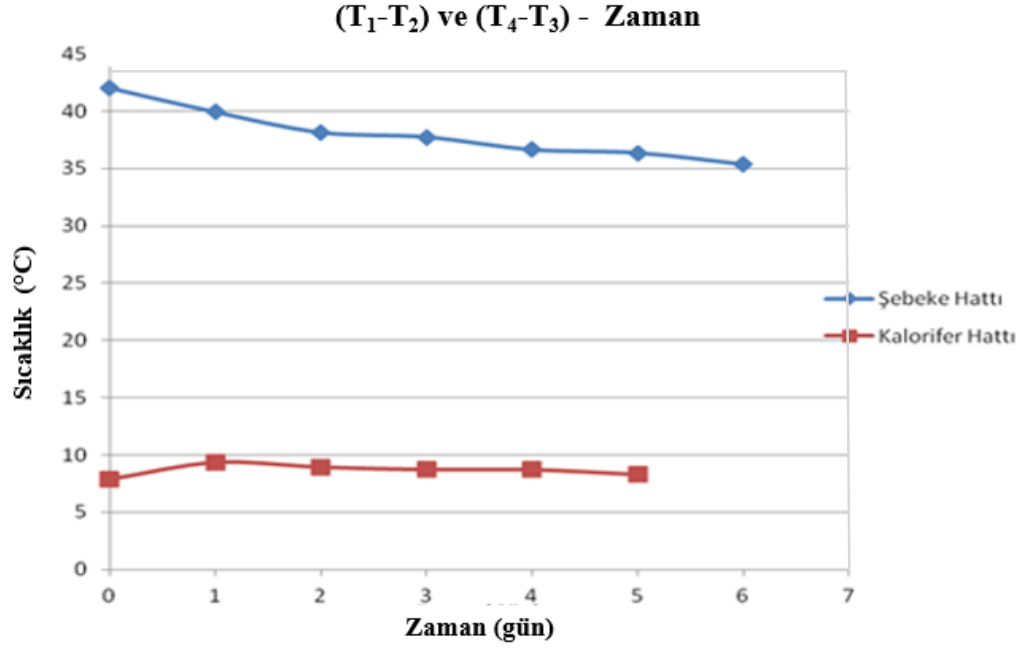
7.10 8 No’lu Deney Seti

72,5°C’ sabit ısıtma suyu giriş sıcaklığı ile çalışılan 7 ve 8 numaralı deney setlerinde çökelme dirençlerinin farklı olmasının (Şekil 7.25 ve Şekil 7.27) nedeni, debilerdeki değişimden kaynaklanmaktadır. Çizelge 7.12’de görüldüğü gibi ısıtma suyu debisi 15 lt/dk ve kullanım suyu debisi de 3 lt/dk olarak deney boyunca dengede tutulmuştur.

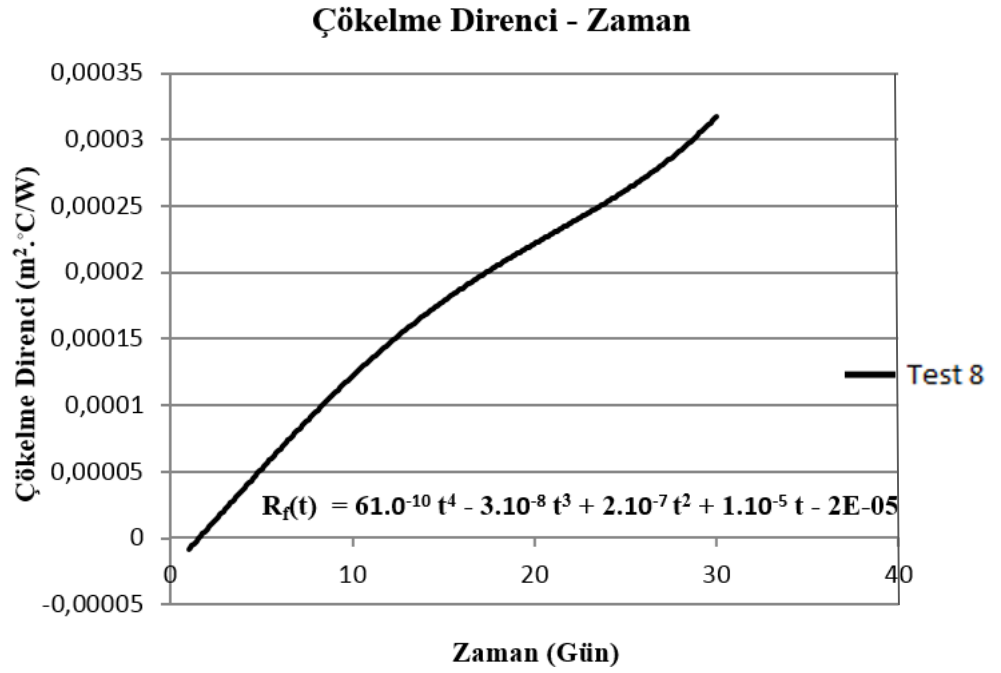
Çizelge 7.12 8 Numaralı Deney Setine Ait Sıcaklık ve Debi Değerleri

Deney No	Su Sertliği (°dH)	pH	Isıtma Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Kullanım Suyu Giriş Sıcaklığı (°C)	Isıtma Suyu Debisi (lt/dk)	Kullanım Suyu Debisi (lt/dk)
8	12-13	7-8	72,5	26	15	3

Bu deney setinde, plakalı ısı değiştiricisinin kullanım suyu kanalında kirlenmelere rastlanmıştır. Bu durumu doğrularcasına, Şekil 7.26’da görüldüğü gibi kirlenme direncinde bir önceki deney setine göre artış oluşmuştur.



Şekil 7.27 8 numaralı deney setine ait kirlenme direnci-zaman grafiği



Şekil 7.28 Numaralı Deney Setine Ait Şofben Hattı ve Kalorifer Hattı Sıcaklık Farkı -Zaman Grafiği

Deneyleri gerçekleştirilen 8 farklı girdilerin bir aylık süre sonunda kirlenme direnci grafikleri çizdirilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen kirlenme direncinin zamana bağlı fonksiyonu her bir deney seti için aşağıda verilmiştir.

$$\text{Test 1: } R_f(t) = 10^{-7} t^3 - 2.10^{-6} t^2 + 2.10^{-5} t - 10^{-5} \quad (7.1)$$

$$\text{Test 2: } R_f(t) = -3.10^{-4} t^4 + 2.10^{-8} t^3 - 6.10^{-8} t^2 + 7.10^{-6} t - 7.10^{-6} \quad (7.2)$$

$$\text{Test 3: } R_f(t) = 1.10^{-7} t^3 - 8.10^{-6} t^2 + 1.10^{-4} t - 10^{-4} \quad (7.3)$$

$$\text{Test 4: } R_f(t) = -3.10^{-4} t^4 + 2.10^{-8} t^3 - 4.10^{-7} t^2 + 5.10^{-6} t - 4.10^{-6} \quad (7.4)$$

$$\text{Test 5: } R_f(t) = 4.10^{-11} t^5 - 4.10^{-9} t^4 + 1.10^{-7} t^3 - 2.10^{-6} t^2 + 2.10^{-5} t + 7.10^{-6} \quad (7.5)$$

$$\text{Test 6: } R_f(t) = -6.10^{-10} t^5 + 2.10^{-8} t^4 - 9.10^{-8} t^3 - 2.10^{-6} t^2 + 4.10^{-5} t - 4.10^{-5} \quad (7.6)$$

$$\text{Test 7: } R_f(t) = -1.10^{-7} t^2 + 1.10^{-5} t - 3.10^{-5} \quad (7.7)$$

$$\text{Test 8: } R_f(t) = 6.10^{-10} t^4 - 3.10^{-8} t^3 + 2.10^{-7} t^2 + 1.10^{-5} t - 2.10^{-5} \quad (7.8)$$

7.11 3 ve 4 No'lu Deney Setlerinin Kimyasal Analizi

Daha önceki raporlarda belirtildiği üzere, her bir deney setinin süresi dolduğunda sistemin çalışması durdurulmakta ve ısı değiştiriciler alınarak kesim işlemi yapılmak üzere 'tel erozyon' kesim atölyesine verilmektedir. Buradan kesilmiş şekilde alınan ısı değiştiricilerin kanallarında biriken bütün maddeler numune kabında toplanmakta ve kimyasal analizi yapılmaktadır. Bu maddeleri kanallardan almak için çoğu zaman sarsmak yeterli olurken bazı durumlarda (çökelti tabaka halinde yapışmış ise) kanallardan bir alet yardımıyla kazımak gerekmektedir.

Proje kapsamında deneylerde oluşan çökelti örnekleri üç temel analiz yöntemiyle incelenmektedir. Bu metodlar sırasıyla 'Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri', 'ICP-AES Analizleri' ve 'XRD Analizleri' dir.

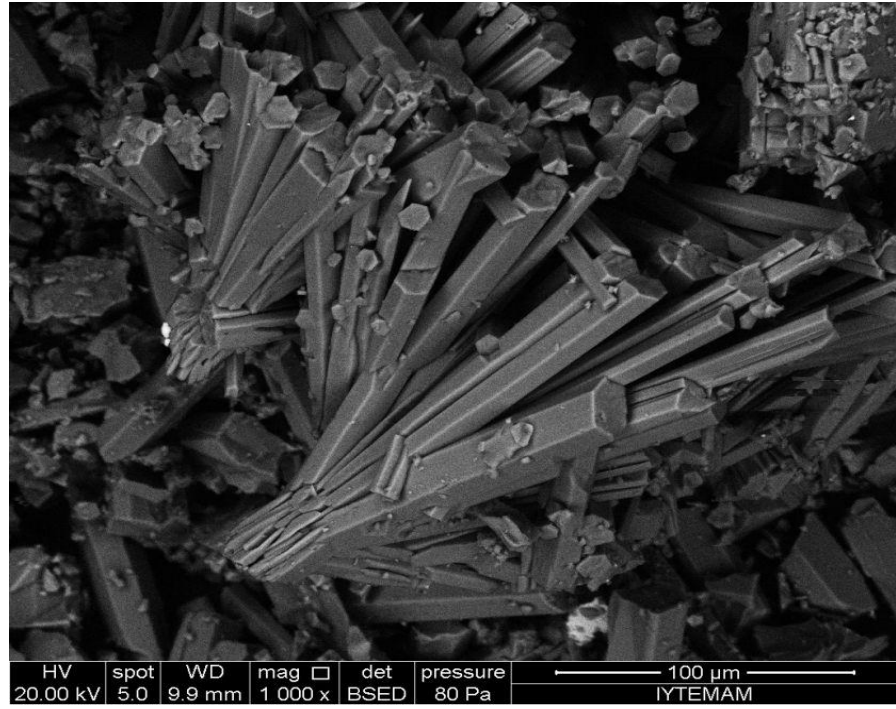
7.11.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analiz Sonuçları

Elektron mikroskobu görüntüleri (SEM images) ve elemental analiz (EDX) raporları bu analizin temelini oluşturmaktadır. Elektron mikroskobu numunelerin fiziksel özelliklerine mikron derecelerinde inmemizi sağlarken, EDX maddelerin farklı ışık kırınımından yararlanarak analiz yapabilmekte ve ayrıntılı olarak içerik hakkında bilgi alabilmekteyiz.

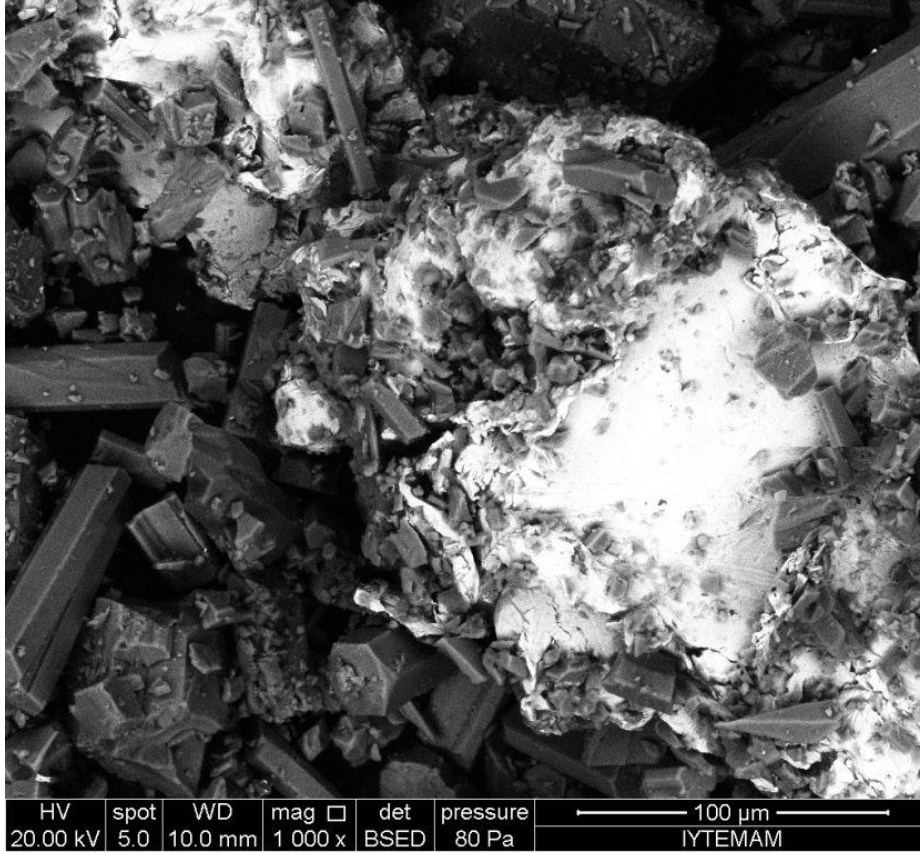
Alınan sonuçlarda Şekil 7.29'de görüldüğü gibi; çökeltinin çubuğumsu kristal yapılardan oluştuğu gözlenmiştir. Koyu renkli olan bu yapıların CaCO_3 (kalsiyum karbonat) olduğu EDX analizlerinden anlaşılmıştır. Bu sonuçları

XRD analizleri doğrulamıştır. Oluşan çubukların uzunluğunun ortalama 100 mikron civarındadır. Görüntülerde parlak olarak görülen yerlerde ise demir, bakır, nikel ve krom bulunduğunu göstermiştir. Yani alınan sonuçlarda koyu renkli olan bölgeler CaCO_3 'a ait sonuçlar olup açık renkli bölgeler safsızlıkları belirtmektedir. Fakat bu metallerin miktarı kalsiyum karbonata göre çok azdır.

Şekil 7.30'da bahsettiğimiz parlak alanları görebiliriz. Bunlar koyu bölgelere göre saflığı düşük olan bölgelerdir.



Şekil 7.29 Birikinti SEM Analizi Görüntüsü

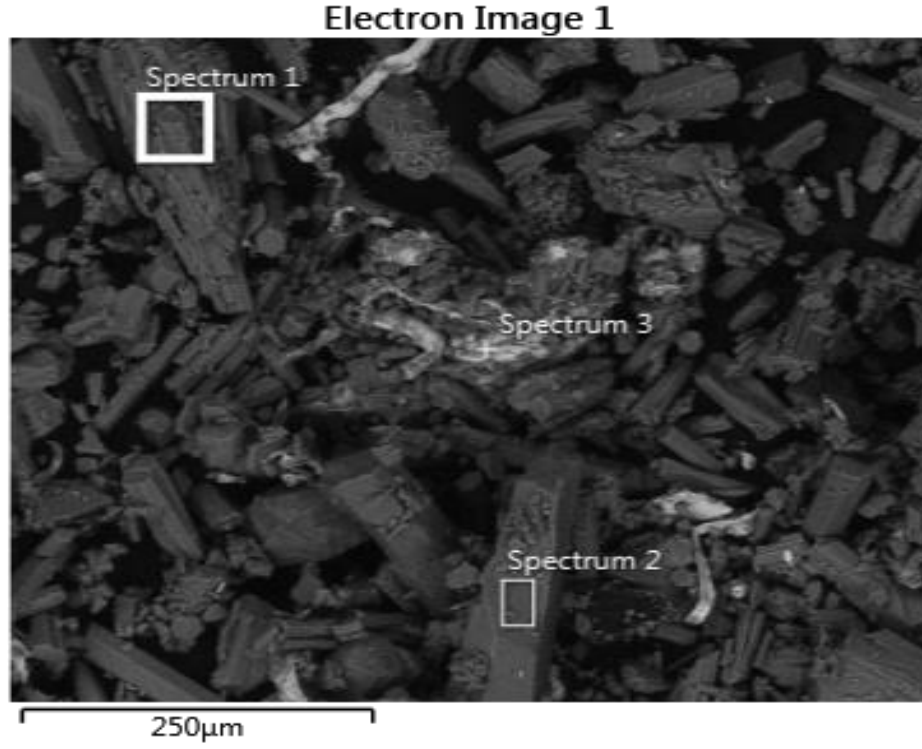


Şekil 7.30 Birikinti SEM Analizi Görüntüsü

EDX analizleri sayesinde yukarıdaki SEM analiz görüntülerine (Şekil 7.28 ve Şekil 7.29) ek olarak, maddelerin elemental analizleri ortaya konulmuştur. Bu süreç, numunenin farklı noktalarına ışınlar göndererek her nokta için ayrı bir element sınıflandırması temeline dayanır.

7.11.2 3. Deney setine ait EDX analizleri

Yukarıda bahsedildiği üzere spektrumlarda ki koyu renkli bölgeler CaCO_3 yoğunluğun daha fazla olduğunu belirtmektedir daha açık renk kimi zaman beyaz olan bölgeler de eser miktarda bulunan diğer elementlerin varlığı söz konusudur. Bu bilgiler, Şekil 7.31'daki elektron spektrum resmi ile desteklenmiştir.

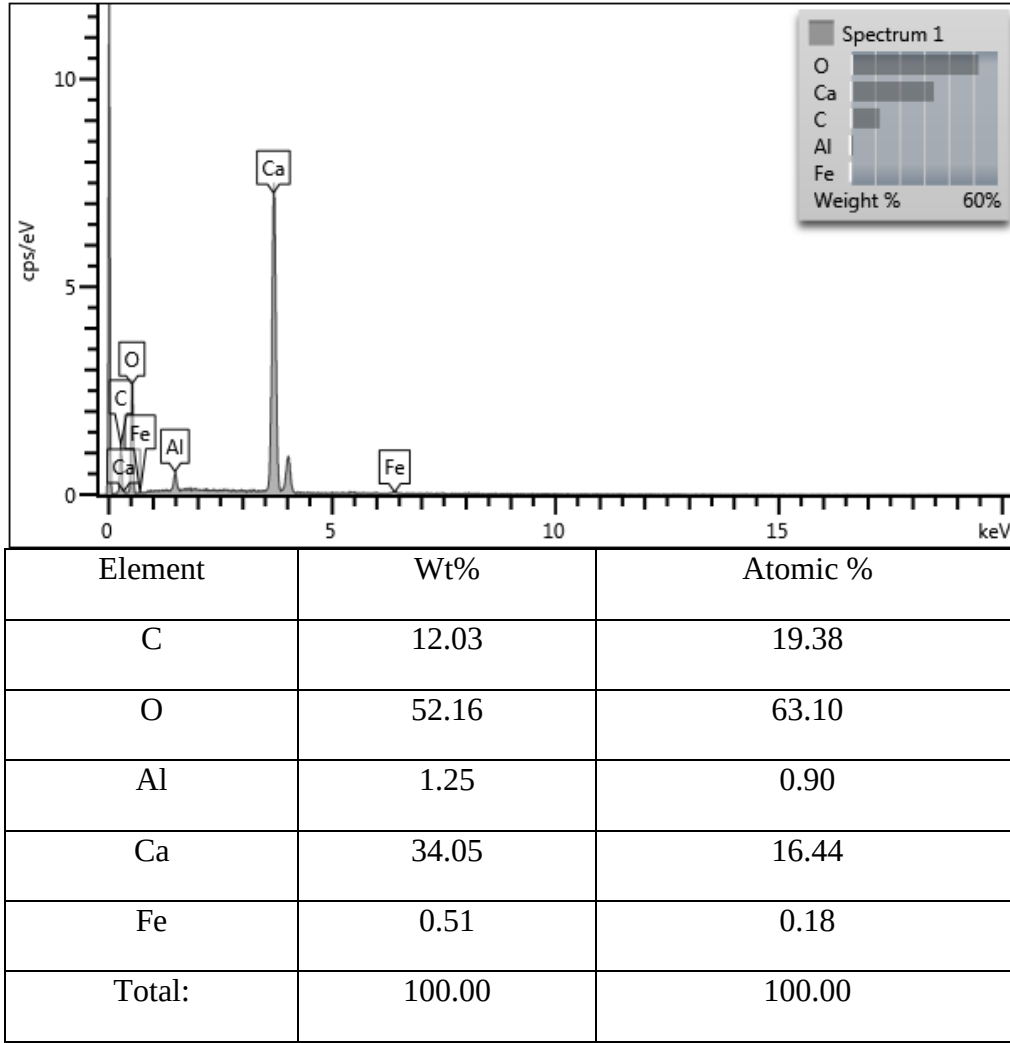


Şekil 7.31 1 Numaralı Elektron Resmi

7.11.2.1 Spektrum 1 Analiz Sonuçları

Şekil 7.31’da gösterilen 1 numaralı spektrumda oldukça koyu renkte oluşan bölgeye göre kalsiyum (Ca) varlığı yüksek beklenmektedir. Aynı şekilde alınan spektrumda (Çizelge 7.13) %16,44 oranında atomik bir ağırlığa sahip kalsiyum (Ca) , birikinti oluşumunu desteklemektedir. Elementlerin miktarının dağılımına bakıldığında kalsiyum (Ca)’un hem yüzdece hemde atomik olarak diğer metallerden daha fazla olduğu görülür.

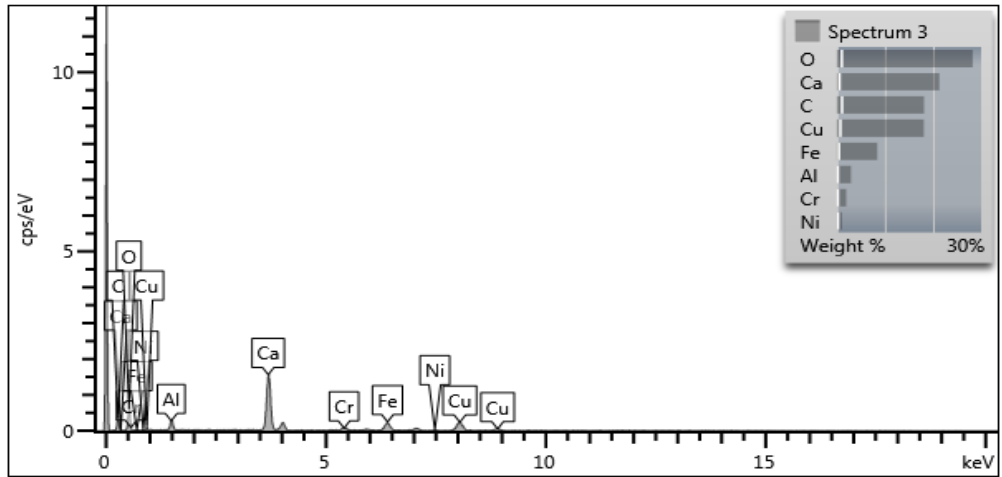
Çizelge 7.13 Spektrum 1 Kimyasal İçeriği



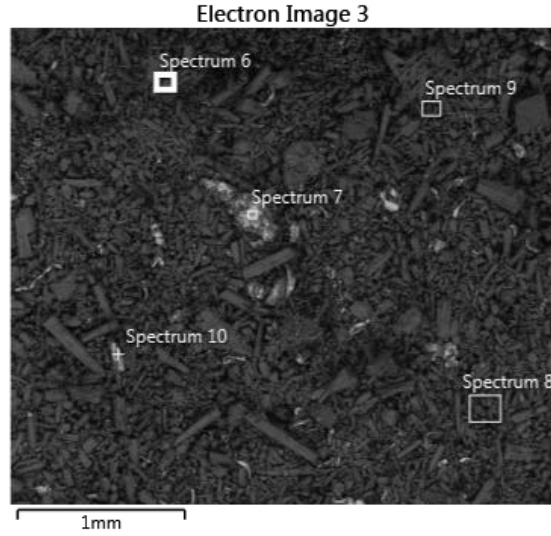
7.11.2.2 Spektrum 3 Analiz Sonuçları

Şekil 7.32'deki 3 numaralı spektrum incelendiğinde SEM görüntüsünün oldukça açık renkte olduğu görülür. Bu veriye göre o bölgedeki kalsiyum (Ca) derişiminin az olduğu öngörülür. Spektrum incelendiğinde kalsiyuma (Ca)'a ait pik şiddetinin ve yüzdesinin diğer spektrumlara kıyasla oldukça düşük olduğu görülür (Çizelge 7.14). Örnekte her türlü kalsiyum elementinin diğer elementlerden fazla olmasına rağmen, sadece o bölgedeki derişimi 1 nolu spektruma göre daha azdır.

Çizelge 7.14 Spektrum 3 Kimyasal İçeriği



Element	Wt%	Atomic %
C	18.12	34.27
O	28.24	40.09
Al	2.93	2.47
Ca	21.30	12.07
Cr	1.95	0.85
Fe	8.38	3.41
Ni	1.01	0.39
Cu	18.06	6.45
Total:	100.00	100.00



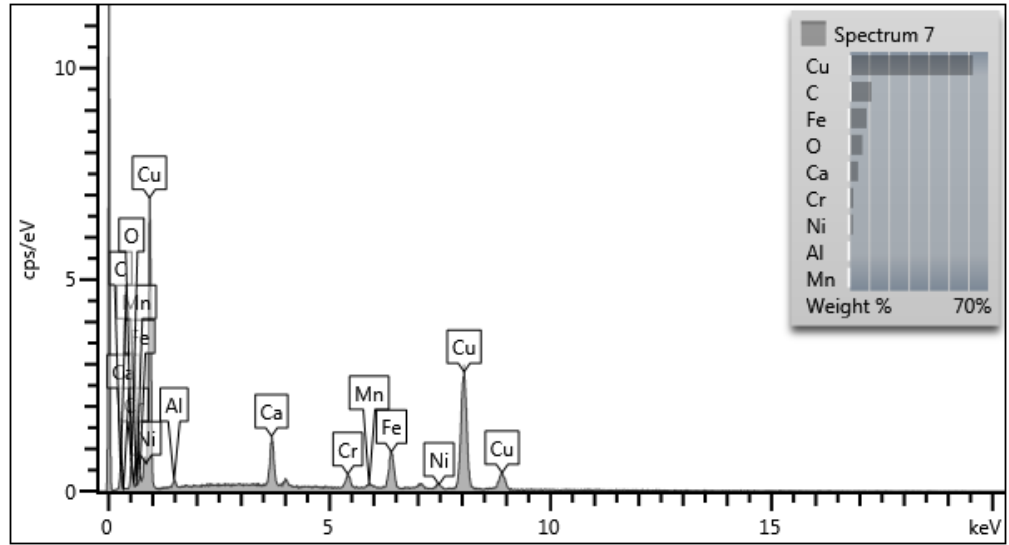
Şekil 7.32 3 Numaralı Elektron Resmi

7.11.2.3 Spektrum 7 Analiz Sonuçları

Çizelge 7.15’de görüleceği üzere, ilgili spektruma baktığımızda açık renk dikkat çekmektedir spektrum incelendiğinde diğer grafiklere kıyasla daha fazla bir elementel dağılım gözlenir. Aynı şekilde ağırlıkça yüzdelere baktığımız zaman kalsiyum (Ca) derişimi oldukça az görülür. Hatta eser miktarda beklenen metaller daha yoğundur. Bir kireç analizinde böyle bir veri gözlenmesinin nedeni; analiz için gelen örneğin içeriğinden kaynaklanır. Örnek analiz için hazırlanırken PHE içinden kimi zaman kazınarak çıkartılır. Bu kazıma esnasında PHE ye ait bileşenler de örnekle birlikte analizlenir. Diğer önemli bir faktör de şebeke suyunun geldiği borulardır. Su sisteme gelirken geçtiği borularda çeşitli metalleri sürüklemiş olabilir. Dolayısıyla örnekte ki maddelerin dağılımı homojen olmadığından analizde kimi yerlerde farklı farklı elementler görmek mümkündür. 7 numaralı spektrumda gözlenen yüksek bakır (Cu) yüzdesinin bu durumlardan kaynaklandığı söylenebilir.

Deneyde kullanılan şebeke suyu sisteme gelirken geçtiği borulardan korozyon ile çeşitli elementler taşımış olabilir ayrıca kullanılan PHE bakır ve çelik kullanılarak yapılmıştır. Çelik, demir ve karbon elementleri ile oluşan bir alaşımdır ve Fe (demir) miktarı karbona oranla daha fazladır. Bu analizler yapılırken örneğin farklı noktalarından veriler alınarak yapısal tayin yapılmaya çalışılır. Bu nedenle birden fazla spektrum alınır.

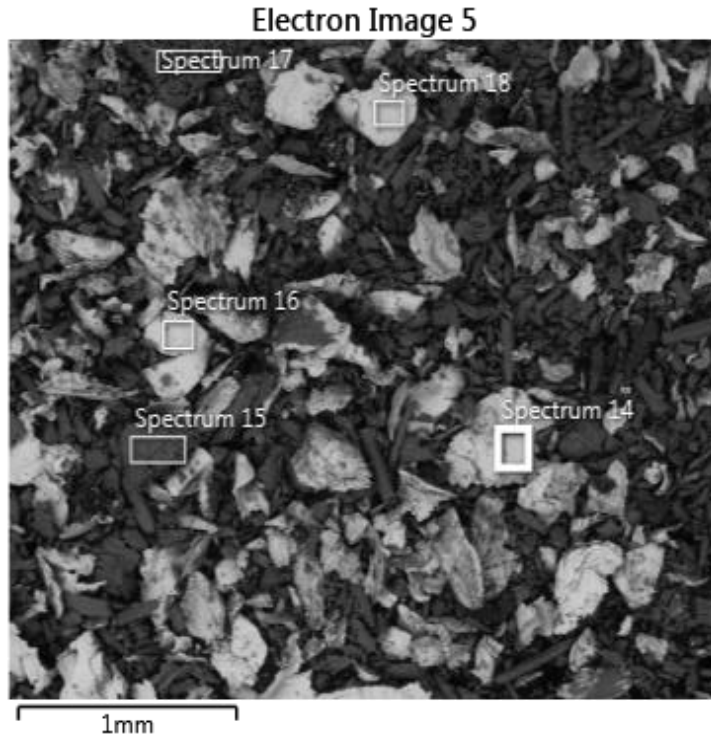
Çizelge 7.15 Spektrum 7 Kimyasal İçeriği



Element	Wt%	Atomic %
C	11.45	34.52
O	6.95	15.73
Al	0.75	1.00
Ca	4.69	4.23
Cr	2.35	1.63
Mn	0.46	0.30
Fe	9.02	5.84
Ni	2.09	1.29
Cu	62.25	35.46
Total:	100.00	100.00

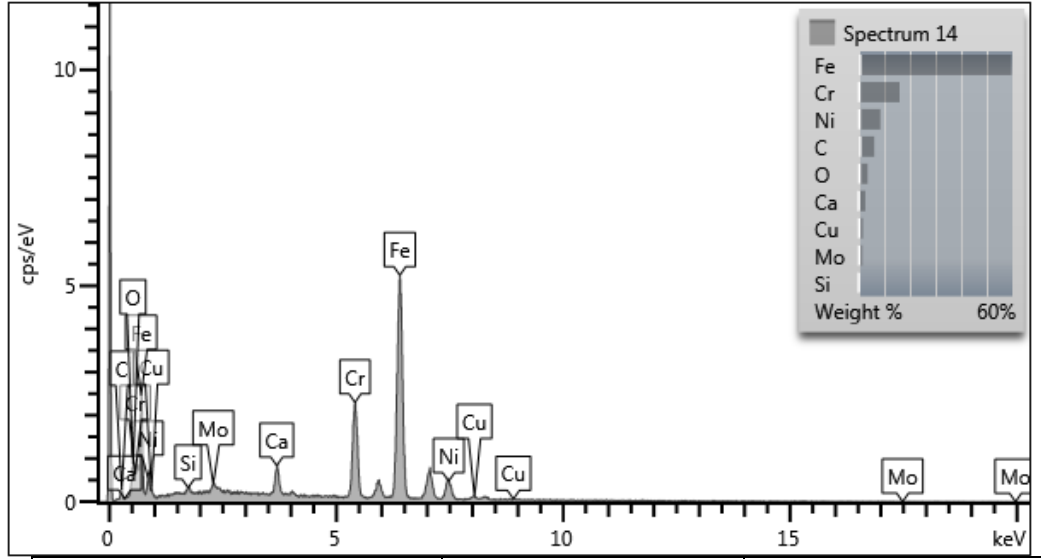
7.11.3 4 No'lu Deney setine ait EDX analizleri

Şekil 7.33'de gösterilen spektrumlar deney testi 4'e aittir. Sonuçların deney testi 3'e benzer özellik göstermesi beklenir. Genel olarak spektrum 14'de yüksek demir (Fe) yüzdesi açıkça görülmektedir (Çizelge 7.16). Bu durumun nedeni, yukarıda da açıklandığı gibi sistemden ve büyük oranda bu deney setinde örnek alabilmek için kesilen PHE yapısından gelen çelikten kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.33 5 Numaralı Elektron Resmi

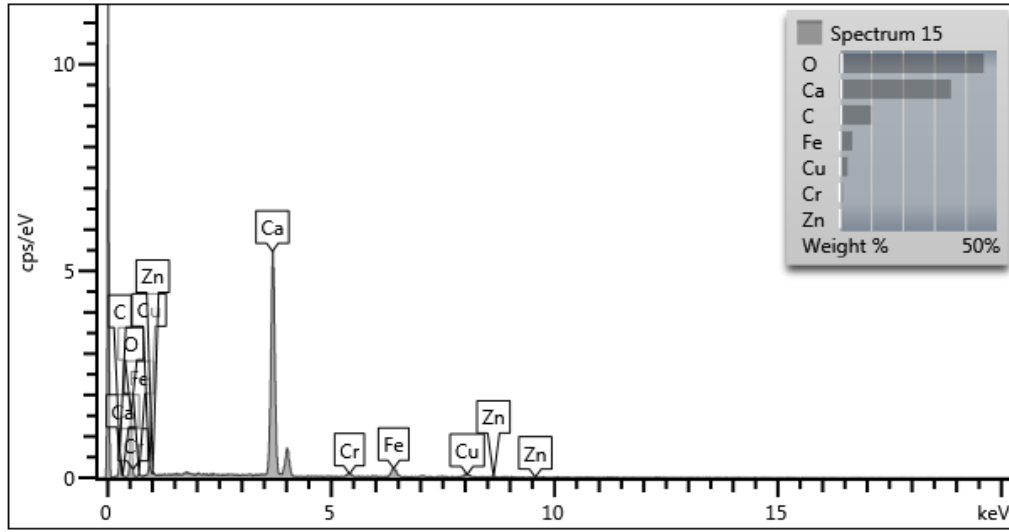
Çizelge 7.16 Spektrum 14 Kimyasal İçeriği



Element	Wt%	Atomic %
C	6.05	21.25
O	3.54	9.34
Si	0.48	0.72
Ca	2.57	2.71
Cr	16.03	13.02
Fe	59.66	45.09
Ni	8.51	6.12
Cu	1.65	1.09
Mo	1.51	0.67
Total:	100.00	100.00

Çizelge 7.17’de gösterildiği üzere, 15 numaralı spektrumda kalsiyum (Ca) miktarı beklenildiği üzere fazla bulunmakta diğer metaller eser düzeydedir.

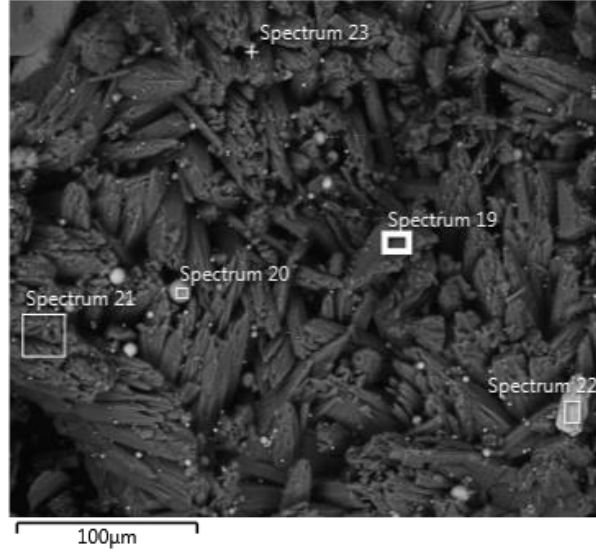
Çizelge 7.17 Spektrum 15 Kimyasal İçeriği



Element	Wt%	Atomic %
C	10.13	17.79
O	45.81	60.43
Ca	35.41	18.65
Cr	1.05	0.43
Fe	4.13	1.56
Cu	2.58	0.86
Zn	0.89	0.29
Total:	100.00	100.00

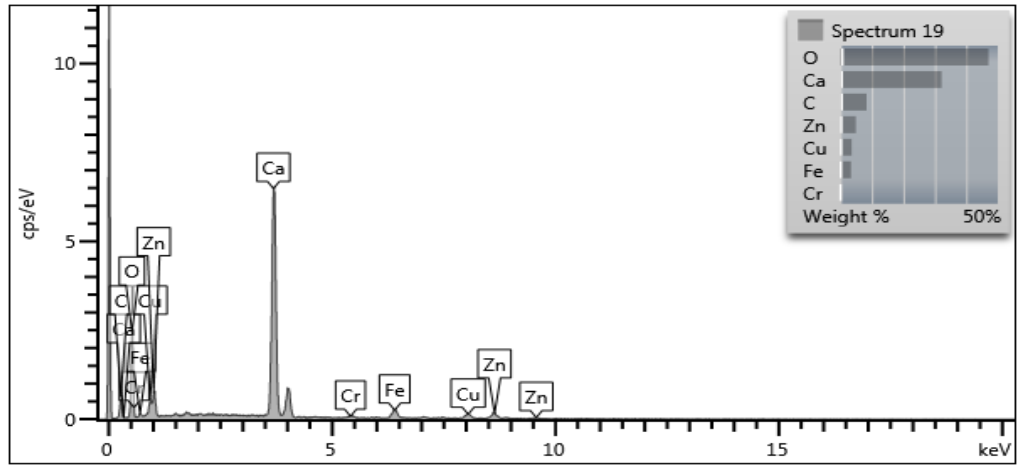
Şekil 7.34’de verilen 6 numaralı elektron resmi incelendiğinde, 19 numaralı spektrumun SEM görüntüsündeki koyuluğundan kalsiyum (Ca) derişiminin yüksek olmasını bekleriz. Çizelge 7.18’deki EDX analizine baktığımızda ağırlıklı yüzdesi %32,17 gibi olan kalsiyum (Ca) miktarı öngörümüzü desteklemektedir.

Electron Image 6



Şekil 7.34 6 Numaralı Elektron Resmi

Çizelge 7.18 Spektrum 3 Kimyasal İçeriği



Element	Wt%	Atomic %
C	8.33	14.94
O	47.05	63.38
Ca	32.17	17.30
Cr	0.54	0.23
Fe	3.41	1.32
Cu	3.56	1.21
Zn	4.94	1.63
Total:	100.00	100.00

7.11.4 ICP-AES Analiz Sonuçları

Metodun gerektirdiği şekilde ısı değiştiricilerinden alınan katı numunelerin eritişleri yapılarak sıvı faza geçmeleri sağlanmıştır.

Sıvı faza dönüşümü sağlamak için kullanılan fırınlardan çıkarılıp 2 gün süre ile karıştırılmasına rağmen hala askıda katı maddeler olduğu gözlemlenmiştir. Bu da malzemenin bir kısmının çözünmediğini kanıtlamıştır. CaCO_3 çözünme özelliğini doğrulamak üzere, yüksek saflıkta CaCO_3 (başka ortamdan elde edilen) eritildi ve çözüldüğü görüldü. Bunun sonucu birikintilerin içerdiği safsızlıklardan dolayı tam eritiş yapılamadığı sonucuna varılmıştır. Birikinti numunelerin mümkün olduğu optimum miktarda eritişleri yapıldıktan sonra ICP-AES cihazında analizleri yapıldı. Analiz sonucunda birikintilerin içinde Ca, Na ve Fe olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.19). Ca ve Na deneyde kullanan sudan gelmektedir. Ancak demirin bu yüksek miktarda bulunması numune alma esnasında plakadan ve deney sisteminde dolaşırken geçtiği göstermektedir. Su analizi yapıldıktan sonra Fe'nin nereden geldiği netlik kazanacaktır.

Çizelge 7.19 EDX Analiz Sonuçları

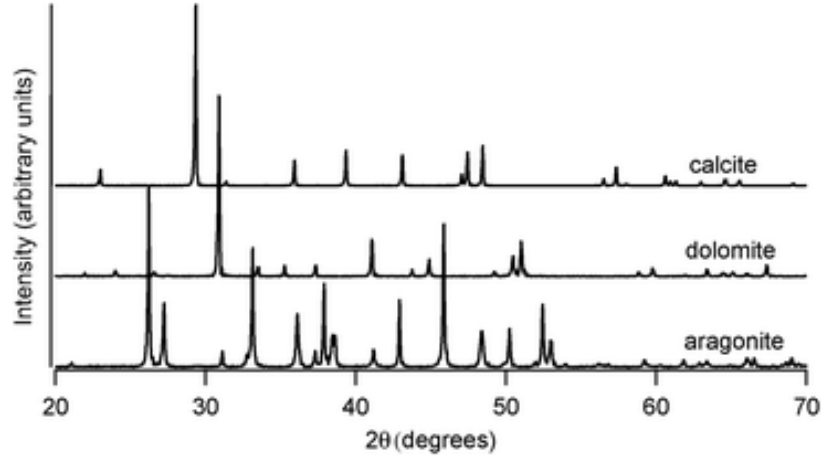
	Ca	Fe	Na
Deney Seti 3	57.210 ppm	57.652 ppm	127.50 ppm
Deney Seti 4	59.398 ppm	59.788 ppm	110.92ppm

7.11.4 XRD Analiz sonuçları

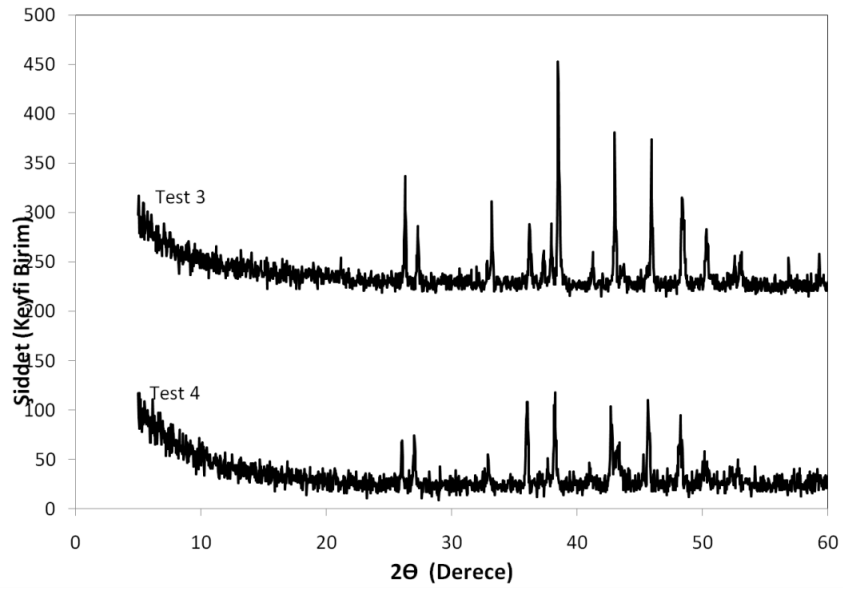
XRD kristal yapısına göre atom kümelerini sınıflandıran bir bilimsel analiz yöntemidir. Deney 3 ve deney 4 sonunda alınan birikinti numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 7.35'de verilmiştir.

XRD desenleri, biriken toz malzemelerin kalsiyum karbonat (CaCO_3) olduğunu göstermektedir. Birikintiler aragonite kristal yapısına sahiptir. Kireç yapısı gereği üç ana formda oluşabilir. Bunlar kalsit, dolomit ve aragonit 'dir.

Dolomit yapısında Ca ve Mg elementlerini bir arada bulundurur. Kimyasal formülü $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ şeklindedir. Kalsit ve aragonit ise aynı kimyasal formüle sahiptir ancak yapısal farklılıkları vardır. Kalsit romboedrik aragonit ise ortorembik şekildedir. Bu şekilde kimyasal formülü aynı fakat fiziksel davranışları farklı olan yapılara polimorf mineraller denir.



Şekil 7.35 Kalsiyum Karbonat Kristal Kümeleri Yoğunluğu



Şekil 7.36 Deney 3 ve deney 4 numunelerinin Argonit ile Benzerlik Kümesi

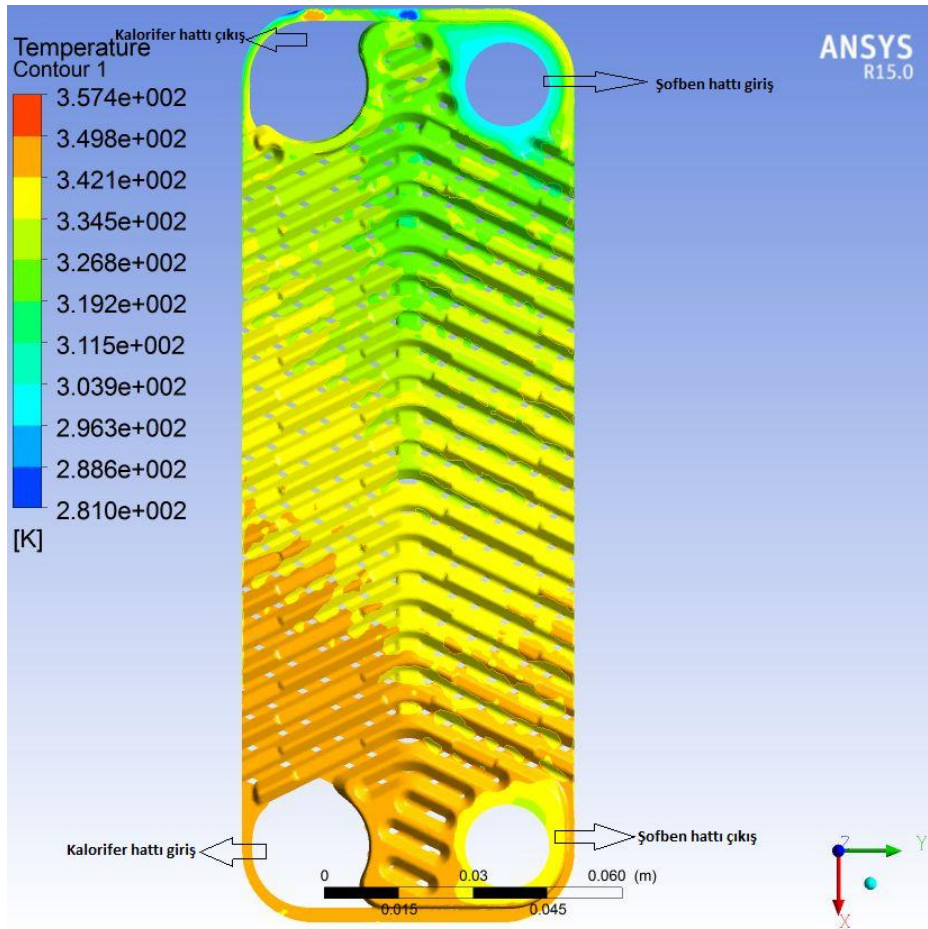
Şekil 7.36 da görüldüğü üzere numunelerin kristal yapısı aragonite ile benzerlik göstermektedir.

8 SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada plakalı ısı değiştiricide kirlenmeyi etkileyen parametrelerin incelenerek, kirlenme davranışının anlaşılması, geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Plakalı ısı değiştiricilerde kirlenmeye etki eden parametreler belirlenmiş, deneyler sonunda alınan plakalı ısı değiştiriciler kesilerek kirlenmenin olduğu bölgeler saptanmıştır. Bu sayede kirlenme oluşumu, testlerin yapıldığı sınır koşulları kullanılarak eş zamanlı CFD model çalışmaları yapılmış ve bu çalışmaların sonuçları, kesilerek gözlemlenen gerçek sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İki durum da göz önüne alınarak akış ve sıcaklık dağılımına uygun plakalı ısı değiştirici tasarımı yapılması hedeflenmiştir.

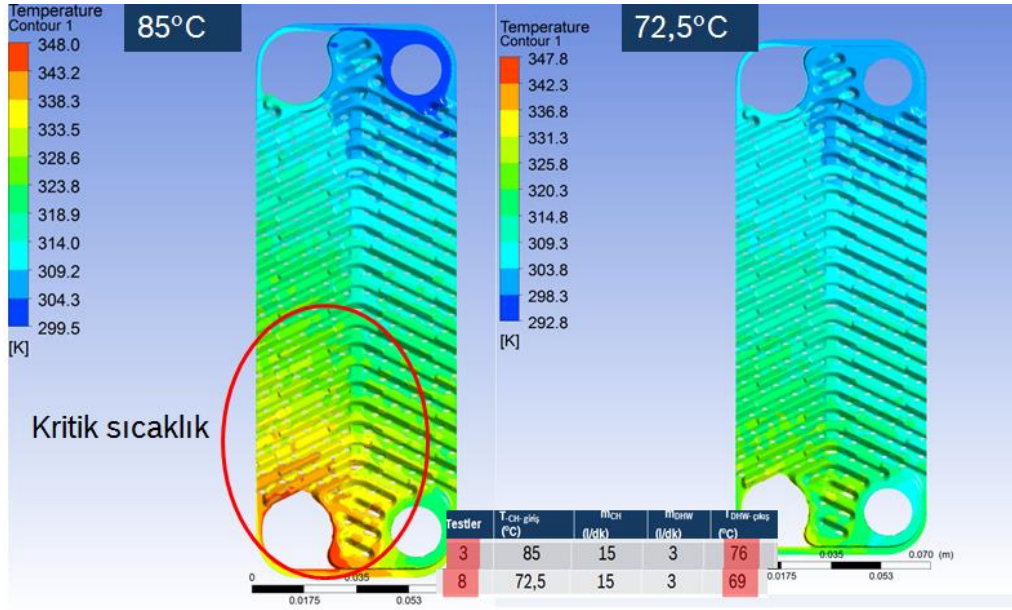


Şekil 8.1 Sıcaklık Dağılımının Simülasyon Sonucu

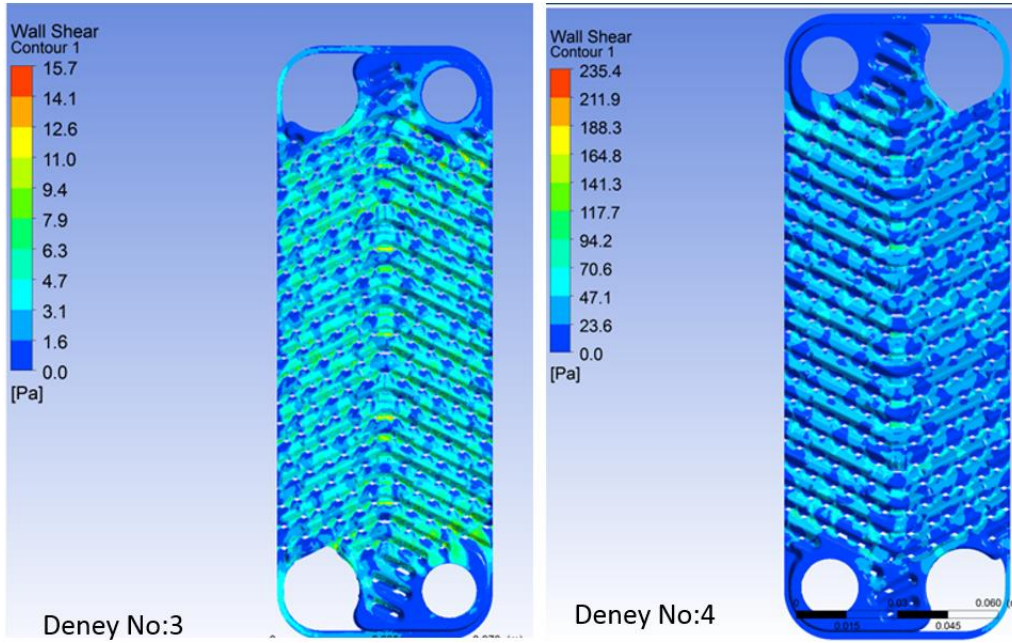
Şekil 8.1'e göre en sıcak kısım kalorifer giriş hattı olarak gözlenir. Ancak kalorifer hattı kapalı çevrim olduğundan, kalorifer hattında kirlenme görülmez. Kalorifer hattından sonra en yüksek sıcaklık şofben çıkış hattındadır. Açık çevrim olan şofben hattında, sürekli taze su bulunduğundan yüksek sıcaklıkta kirlenmeye fazlasıyla yatkındır. Şekil 8.1'de görüldüğü üzere, deney sonuçlarında kirlenme şofben çıkış hattında gözlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda literatüre göre en yüksek sıcaklık olarak 85°C ve en düşük sıcaklık 60°C seçilmiştir. Seçilen sıcaklıklarda farklı debilerde çalışılarak, sıcaklığın yanında suyun akış hızının etkisinin de kirlenme oluşumu üzerine olan etkileri gözlenmeye çalışılmıştır. Kirlenme oluşumunda sıcaklık kadar hız da önemlidir. Plakalı değiştiricinin tasarımından dolayı, su ısı değiştirici içinde farklı hızlarda hareket etmektedir. Bu sonucu daha net görebilmek amacıyla, model çalışmaları yapılmıştır. Deneylerden alınan sonuçlar, model çalışmaları ile karşılaştırılmış, Şekil 8.3'deki gibi hızın fazla olduğu bölgelerde kirlenme, plakalının diğer bölmelerine göre daha az olarak gözlemlenmiştir. Yine model çalışmalarına göre kirlenmenin en yoğun olduğu bölge şofben hattının çıkış kanalıdır (Şekil 8.1). Deney sonuçlarında ısı değiştirici içindeki kirlenme dağılımını incelenmek amacıyla tel erozyon yöntemi kullanılarak ısı değiştirici kesilerek çökelmenin yoğun olduğu bölgeler tespit edilmiş, kanal tasarımının etkisi gözlenmiştir. Alınan sonuçlar, model çalışmalarında olduğu gibi şofben hattının çıkış kanalında yoğunluk olduğunu göstermektedir.

Şekil 8.2'de görüleceği üzere sıcaklık analizlerine kirlenme miktarının çok yüksek olduğu deney no 3 ve deney no 8 ile devam edilmiştir. Sıcaklığın üst seviyelere çıktığı bölgeler, özellikle çıkış noktalarına doğru oluşmuştur. 3 numaralı deney setinde kullanım suyu çıkış sıcaklığının 76°C'lere vardığı kırmızı bölgelerde açıkça görülmektedir. 8 numaralı deney setinde ise kullanım suyu çıkış sıcaklığı kısmen daha düşük seviyelerde, 69°C, kalmasına rağmen kirlenmenin net bir şekilde görüldüğü deney setlerinden biri olmuştur. Şekil 8.3'de ise deney no 3 ve deney no 4 için Wall shear analizleri verilmiştir. 3 lt/dk debi ile yapılan deney no 3'de oluşan Wall shear çok düşük seviyelerdedir. Deney no 4'de ise aynı debi 12 lt/dk olduğu için tersi bir durum vardır.

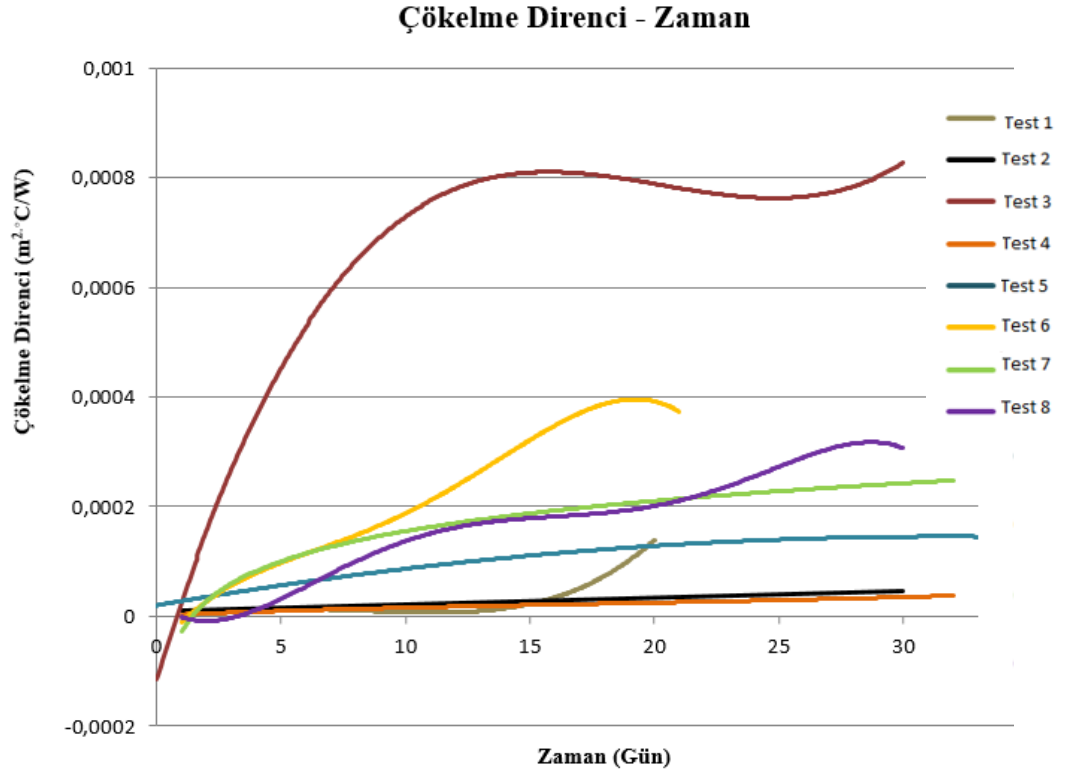


Şekil 8.2 Deney no 3 ve deney no 8'in sıcaklık analiz sonuçları



Şekil 8.3 Deney no 3 ve deney no 4'ün wall shear sonuçları

Şekil 8.4'de tüm deney setlerinin kirlenme dirençleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere kirlenme en fazla 3 numaralı deney setinde oluşmuştur. Deneyler arasındaki en yüksek sıcaklık ve en düşük şofben hattı debisi bu deney setinde bulunmaktadır. Benzer şekilde, en düşük sıcaklık olan 60°C ile çalışılan, ayrıca yüksek debili olan 2 numaralı deney setinde hiç kirlenme gözlenmemiştir.



Şekil 8.4 Kirlenme Dirençleri Karşılaştırma Grafiği

Bu sonuçlar, literatür çalışmaları göz önüne alındığında, kirlenme oluşumuna sadece yüksek sıcaklığın neden olmadığını, suyun akış hızının, dolayısıyla plaka tasarımının oldukça önemli olduğunu vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alfa Laval** “Isı değiştirici” <http://www.alfalaval.com/products-and-solutions/pages/products-and-solutions.aspx> (Erişim Tarihi: 1 şubat 2015)
- Aguirre, F.J** “Reviewing the use of fouling factors in heat exchanger design” <http://www.ChemicalProcessing.com> (February 15,2006)
- Andritsos, N., Kontopoulou, M., Karabelas, A. J. and Koutsoukos, P. G.,** 1996, Calcium carbonate deposit formation under isothermal conditions, Canadian Journal of Chemical Engineering, 74(6), 911-919 pp.
- Andritsos N. and Karabelas A.J.,** 2003, Calcium carbonate scaling in a plate heat exchanger in the presence of particles, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4613-4627 pp.
- Awad M. M.,** 2003, Effect of Flow Oscillation on Surface Fouling, Mansoura Engineering Journal (MEJ), Vol.28, No2, M47-M56 pp.
- Awad M. M., I. Fathy and H. E. Gad,** 2007, Effect of Surface Temperature on the Fouling of Heat Transfer Surfaces, 11th International Water Technology Conference, Sharm El Sheikh, Egypt.
- Awad, M. M., S. M. Abd El-Samad, H.E. Gad and F.I. Asfour,** 2007, Effect of Flow Velocity on the Surface Fouling, Mansoura Engineering Journal (MEJ), Vol.32, No1, M27-M37 pp.
- Bansal, B. and Muller-Steinhagen, H.,** 1993, Crystallization fouling in plate heat exchangers, Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 115(3), 584-591 pp.
- Bansal, B., Muller-Steinhagen, H. and Chen, X. D.,** 1997, Effect of suspended particles on crystallization fouling in plate heat exchangers, Journal of Heat Transfer, 119(3), 568-574 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bansal B. , Muller-Steinhagen H. and Chen X.D,** 2000, Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling investigation with an in-line filter, Chemical Engineering and Processing, Vol. 39, 507-5019 pp.
- Belmiloudi, Aziz,** 2011, “Heat Transfer - Theoretical Analysis”, Experimental Investigations and Industrial Systems, InTech, 544 pp.
- Benli, H., Gül, H. ve Durmuş, A.,** 2006, Değişik yüzey profiline sahip tek geçişli plaka tipli ısı değiştiricilerinde ısı transferinin incelenmesi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 18-4, 569-575 s.
- Bott, T. R.,** 1995, "Fouling of Heat Exchangers", Elsevier Science & Technology Books.
- Bott, T. R.,** 1990, "Fouling Notebook", Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK.
- Bennett, C.A, Kistler, R.S., Lestina, T.G. and King, D.G,** 2007, “Improving heat exchanger Designs” ,CEP ,40-45 pp.
- Bennett, C.A.** “Using a non traditional approach to account crude oil fouling in heat exchangers”, <http://www.ChemicalProcessing.com> (September 30, 2005)
- Chamra, L. M.,** 2006, Waterside Fouling Inside Smooth and Augmented Copper Alloy Condenser Tubes in Cooling Tower Applications, Mississippi State University.
- Chamra, L. M. and Webb, R. L.,** 1993, Effect of particle size and size distribution on particulate fouling in enhanced tubes, Journal of Enhanced Heat Transfer, 1(1),65-75 pp.
- Chenoweth, J. M.,** 1988, "Final Report of the HTRI/TEMA Joint Committee to Review the Fouling Section of the TEMA Standards", Heat Transfer Research, Inc., Alhambra, Calif..

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chenoweth, J.M., 1987, General Design of Heat Exchangers for Fouling Conditions, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Advances in Fouling Science and Technology, Alvor, Portugal.

Cuno “ Pislík tutucu” http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/3M-Purification-Inc/3MPI-US/ (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)

Crittenden, B.D., Kolaczowski, S.T. and Takemoto, T., 1993, Use of in Tube Inserts to Reduce Fouling from Crude Oils, AIChE Symp. Series, 295, 89, 300- 307 pp.

Çengel, Y. ve Boles, M.A., 2002, “Thermodynamics An Engineering Approach”, McGraw-Hill, 930 pp.

Dulcometer “ pH Ölçüm Cihazı ”
<http://www.prominent.com/Products/Measuring-Control-and-Sensor-Technology/Controllers/Measuring-and-control-device-DULCOMETER-Compact.aspx> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)

Delplace, F., Leuliet J.C. and Bolt T.R., 1997, Influence of Plate Geometry on Fouling of Plate Heat Exchangers by Whey Protein Solutions in Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchangers Equipment , Begell Hse. Inc. , 565-576 pp.

Engin, T. ve Güngör, K.E., 1996, Gövde-boru tipi ısı değıştirgeçlerinin tasarım ve maliyet parametrelerine göre optimizasyonu, Tr. J. Of Engineering and Environmental Sciences, 20, 313-322 pp.

Epstein, N., 1982, On Minimizing Fouling of Heat Transfer Surfaces, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers (S. Kakac, R. K. Shah, and A. E. Bergles, eds.), Hemisphere, Washington, D.C., 973-979 pp.

Elimko “Sıcaklık Sensörü” <http://www.elimko.com.tr/files/insetinsetli.pdf> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ellis, P. and P. Conover**, 1981. Materials Selection Guidelines for Geothermal Energy Utilization Systems, USDOE (DOE RA270226-1), Washington, DC.
- Europa** “EN 13203- Part2: Gas-fired domestic appliances producing hot water. Part 2. Assessment of energy consumption”
http://ec.europa.eu/index_en.htm (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Esawy, M., Malayeri M.R. and Müller-Stenhagen, H.**, 2010, Crystallization fouling of finned tubes during pool boiling: Effect of fin density, Int. J. Of Heat and Mass Transfer, 1167-1176 pp.
- Fahmy A.A. , EL Fawal M.M. ve Taher B.M.**, 2012, Prediction of Thickness and Fouling Rate in Plate Heat Exchanger of MTR Reactor, Journal of American Science 2012, 8(3), 377-383 pp.
- Fryer, P. J.**, 1986, "Modelling Heat Exchanger Fouling", Ph.D Thesis, University of Cambridge, UK.
- Garrett-Price, B.A., Smith, S.A., Watts, R. L., Knudsen, J. C., Marner, W.J., and Suitor, J.W.**, 1985, Fouling of Heat Exchangers Characterisitics, Costs, Prevention, Control and Removal, Noyes Publications, Park Ridge, NJ.
- Grundfos**, “Magna Pump”, <http://www.grundfos.com/products/find-product/magna-upe.html> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Gudmundsson, J. S.**, 1981, “Fouling of Heat Transfer Equipment” Washington D.C: Hemisphere.
- Hasson, D.**, 1962, Rate of Decrease of Heat Transfer due to Scale, DECHEMA Monogr, 47, 233-282 pp.
- Hasson, D. and Zahavi, J.**, 1970, Mechanism of calcium sulfate scale deposition on heattransfer surfaces, 9(1), 1-10 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hewitt, G. and Müller-Steinhagen, H.**, 2000, Heat Exchanger Fouling in Crude Oil Distillation Units, ESDU, 1-80 pp.
- Hewitt, G. and Müller-Steinhagen, H.**, 2003, Fouling in Cooling Water Systems Using Seawater, ESDU, 1-100 pp.
- Hewitt, G. and Müller-Steinhagen, H.**, 2007, Fouling in Cooling Systems Using Fresh Water, ESDU, 1-172 pp.
- Hughes, D.T., Bott, T.R. and Pratt, D.C.F.**, 1988, Plastic Tube Heat Transfer Surfaces in Falling Film Evaporators, Proc. Second UK Nat. Conf. on Heat Transfer, Vol. 2, 1101 – 1113 pp.
- Iwai, H., Tatsumi, K. and Suzuki, K.**, 2006, Effect of the plate thermal resistance on the heat transfer performance of a corrugated thin plate heat exchanger, Heat transfer- Asian Research, 35-3, 209-223 pp.
- IFM “Debi Ölçer”** http://www.ifm.com/ifmtr/web/pmain/040_030_030.html
(Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Kemmer, F.**, 1979, “*The NALCO Water Handbook*”, McGRAW-Hill Book Company.
- Kern, D.Q. and Seaton, R.E.**, 1959, A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling, Brit. Chem. Eng. 14, No. 5, 258 pp.
- Kew, P.**, 1991, An Investigation into Fouling of a Printed Circuit Heat Exchanger Future Practice Report 13, Energy Efficiency Enquiries Bureau, Harwell.
- Kim, W.T., Y. I. Cho, and C. Bai**, 2001, Effect of Electronic Anti-Fouling Treatment on Fouling Mitigation with Circulating Cooling Tower Water, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, vol. 28, No.5, 671-680 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Knudsen, J. G. and Story, M.**, 1978, Effect of heat transfer surface temperature on the scaling behavior of simulated cooling tower water. AIChE Symposium Series, 74(174), 25-30 pp.
- Knudsen, J. G.**, 1981, Apparatus and Techniques for Measurement of Fouling of Heat Transfer Surface in Fouling of Heat Transfer Equipment, Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment, Hemisphere, Washington, D.C., 57-81 pp.
- Knudsen, J.G.**, 1981, Fouling of Heat Transfer Surface: An Overview, in Power condenser – Heat transfer technology, (P.J. Marto and R.H. Nunn, eds.), 375-424 pp.
- Kho T. and Müller-Steinhagen H.**, 1999, An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer Fouling and Fluid Flow in Flat Plate Heat Exchangers, IChemE Transactions 77, Part, 124-130 pp.
- Kuppan, T.**, 2000, "Heat Exchanger Design Handbook", Marcel Dekker, Inc., New York.
- Lentech**, "Thermostat",
<http://www.lenntech.com/products/measurement/testomat/testomat.htm>
 (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Lim E.**, 2006, "A Preliminary investigation of fouling in Brazed plate Heat Exchangers", Bachelor of Science in Mechanical Engineering, Seattle University, 3-31 pp.
- Masri, M.A and Cliffe, K.R.**, 1997, Investigation into the Fouling of a Plate and Frame Heat Exchanger in Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment, Begell Hse. Inc. , 549-561 pp.
- Müller-Steinhagen H. and Dr.H. U Zettler**, 2000, Heat Exchanger Fouling Mitigation and Cleaning Technologies, Inst of Chemical Engineers UK.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Müller-Steinhagen, H., Reif, F., Epstein, N. and Watkinson, A. P.**, 1988, Influence of Operating Conditions on Particulate Fouling, Canadian Journal of Chemical Engineering, 66(1), 42-50 pp.
- Müller-Steinhagen, H. M. and Middis, J.**, 1989, Particulate fouling in plate heat Exchangers. Heat Transfer Engineering, 10(4), 30-36 pp.
- Mukherjee, R.**, 1996, "Conquer heat exchanger fouling", Hydrocarbon Processing, January, 121-127 pp.
- Nakayama, F. S.**, 1968, Calcium acitivity, complex and ionpair in saturated CaCO_3 solutions, Soil Science, 106, 429-434 pp.
- Nesta J.M and Bennett, C.A.**, 2004, Reducing Fouling in Shell and tube heat exchangers, Hydrocarbon Processing, 77-82 pp.
- Novak, L.**, 1982, Comparison of the Rhine River and Öresund Sea Water Fouling and its Removal by Chlorination, Journal of heat Transfer, Vol 104, 50-55 pp.
- Oğulata, R.T. ve Doba, F.**, 1996, Levhalı tip çapraz akışlı ısı değıştirgeçlerinin incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fak.Dergisi, 11-1, 209-220 s.
- Paikert, P.**, 1983, Verschmutzung von Kondensatoren und Kühltürmen. GVC Weihnachtstagung, 371-390 pp.
- Pana-Suppamassadu K., Jeimrittivong P., Narataruksa P. and Tungkamani S.**, 2009, Effects of Operating Conditions on Calcium Carbonate Fouling in a Plate Heat Exchanger, World Academy of Science, Engineering and Technology, No:53, 1204-1215 pp.
- Papavergos, P. G. and Hedley, A. B.**, 1984, Particle deposition behaviour from turbulent flows, Chemical Engineering Research and Design, 62(5), 275-295 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pritchard A. M.**, 1988, The Economics of Fouling, Fouling Science and Technology, (L. F. Melo et al, eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 31-45 pp.
- Puckorius P. R.**, 1972, "Controlling Deposits in Cooling Water Systems", Mater. Protect. Perform. November, 19-22 pp.
- Palen, J.W.**, 1983, "Shell and Tube Re-Boilers, Heat Exchanger Design Handbook", Hemisphere Publ. Corp..
- Pritchard, A.M. ,Clarke, R.H., and de Block, M.X**, 1992, Fouling of Small Passages in Compact heat Exchangers in Fouling Mechanisms, Eurotherm Seminar , 47-56 pp.
- Quan Z. , Yongchang C. ,Chongfang M.**, 2008, Experimental Study of Fouling on Heat Transfer Surface During Forced Convective Heat Transfer, Journal of American Science 2012;8(9)
- Rafferty, K.D.**, 2006, "Heat Exchangers", Gene Culver, Chapter 11, 261-277 pp.
- Radiant Eng.** <http://radiantengineering.com/> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Ritter, R. B.**, 1981, Crystalline Fouling Studies. American Society of Mechanical 148, Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD, 17, 67-72 pp.
- Shah, R.K. ve Sekulic, D.P.**, 2003, "Fundamentals of Heat Exchanger Design", John Wiley and Sons, 941 pp.
- Shah, R. K.**, 1983, "Heat Exchanger Basic Design Methods, in Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers", S. Kakac, R. K. Shah, and A. E. Bergles, eds., Hemisphere Publishing, Washington, DC, 21-72 pp.
- Smith, E.M.**, 2005, "Advances in Thermal Design of Heat Exchangers", John Wiley and Sons, 503 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Stegelman, A. F. and Renfflen, R.**, 1983, "On-Line Mechanical Cleaning of Heat Exchangers", Hydrocarbon Processing, 95-97 pp.
- Spiroterm**, "Air Eliminators" <http://www.spirotherm.com/products> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Siemens**, "Basınç Fark Okuyucu", <http://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/pressure-measurement/Pages/sitrans-p250.aspx> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)
- Taborek, J., Aoki, T., Ritter, R.B., Palen, J.W. and Knudsen, J.G.**, 1972, Predictive Methods for Fouling Behavior, Chem. Eng. Prog. 68, No. 7, 69 – 78 pp.
- Tay S. N. and C. Yang**, 2006, Assessment of The Hydro-Ball Condenser Tube Cleaning System, Hydro-Ball Technics Sea Pte. Ltd, Singapore.
- TEMA**, 1978, "Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association", 6th ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York.
- TEMA**, 1999, "Standard of the Tubular Exchanger Manufacturers Association", 8th ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York.
- Thonon, B., Grandgeorge, S. and Jallut, C.**, 1999, Effect of geometry and flow conditionson particulate fouling in plate heat exchangers, Heat Transfer Engineering, 20(3), 12-24 pp.
- Unuvar, A. ve Kargici, S.**, 2004, An approach for the optimum design of heat exchangers, International Journal of Energy Research, 28, 1379-1392 pp.
- Yilmaz, M., Comakli, O. and Yapici, S.**, 1999, Enhancement of Heat Transfer by Turbulent Decaying Swirl Flow. *Energy Converse Management*, 40(13), 1365-1376 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zelver, N., Roe, F. L. and Characklis, W. G.,** 1985, Monitoring of Fouling Deposits in Heat Transfer Tubes: Case Studies, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 201-208 p.
- Zubair, S. M. and R. K. Shah,** 2001, Fouling in Plate-and-Frame Heat Exchangers and Cleaning Strategies, in Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries, Begell House, New York, 553–5651 p.
- Zettler, H.U., Weiss, M. Zhao, Q. and Müller-Sheinhagen, H.,** 2005, Influence of Surface Properties/Characteristics on Fouling in Plate Heat Exchangers, Heat Transfer Engineering, Vol 26, 3-17 p.
- Watkinson, A. P. and Martinez, O.,** 1975, Scaling of Heat Exchanger Tubes by Calcium Carbonate. Journal of Heat Transfer, 97 Ser C(4), 504-508.
- Watkinson A.p.,** 1980, “Process Heat Transfer: Some Practical Problems”, Can. J. Chem. Eng., 58, 553-559 p.
- Webb, R. L.,** 1994, “Principle of Enhanced Heat Transfer”, Michigan: Wiley.
- Wiechers, H. N. S., Sturrock, P. and Marais, G. v. R.,** 1975, Calcium carbonate crystallization kinetics, Water Research, 9(9), 835-845.
- Wilo,** ‘’ Tank ‘’ <http://www.wilo.com.tr/anasayfa/#.VOyXvPmsWgY> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2015)

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında İzmir'in Konak ilçesinde dünyaya gelen Mustafa Pekgüzelesu, ilköğrenimini Bornova Dokuz Eylül ilkokulunda, orta öğrenimini Yahya Kemal Beyatlı Ortaokulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Buca Anadolu Lisesi (İngilizce)'nde gerçekleştirmiştir. Lisans eğitimini Porto Üniversitesi'nde (Erasmus programı ile) ve Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde bitirip halen aynı bölümde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Akademik kariyerinin yanı sıra; sırasıyla Vestel Beyaz Eşya ve Indesit Company şirketlerinde Buzdolabı fabrikası AR-GE bölümlerinde geliştirme mühendisi olarak görevler almıştır. 2011 yılından bu yana çalışmakta olduğu Bosch Termoteknik Isıtma ve Klima San. Tic. A.Ş. firmasında AR-GE bölümünde Takım Lideri olarak mesleğini icra etmeye devam etmektedir.