




Süt Endüstrisinde Kullanılan Isı Değiştiricilerde Kalıntı Oluşumu

Hatice Kübra Kızılay , Firuze Ergin , Muammer Demir , Ahmet Küçükçetin  ✉

Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Antalya

Geliş Tarihi (Received): 13.05.2018, Kabul Tarihi (Accepted): 24.10.2018

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): kucukcetin@akdeniz.edu.tr (A. Küçükçetin)

☎ 0 242 310 65 69 📠 0 242 310 63 06

ÖZ

Isı değiştiricilerde biriken süt kalıntısı, sütte uygulanan ısıl işlemin etkinliğinin azalmasına neden olmakta ve fazladan ısı direnci oluşumuna bağlı olarak sistemde ısı iletim kayıplarına yol açmaktadır. Ayrıca ısı değiştiricilerde oluşan kalıntı tabakası, ısı iletim yüzeylerinde halk sağlığını tehdit eden mikroorganizmalar için besi ortamı olarak görev yapmaktadır. Süt endüstrisinde ısıl işlem sırasında kalıntı oluşumu, ekonomik kayıplara neden olan ve uzun yıllardır çözümü üzerinde çalışılan bir sorun olmuştur. Isı değiştiricilerde süt kalıntısı sorununun çözümüne yönelik çalışmalarda, kalıntı oluşum ve temizleme mekanizmalarının anlaşılması ve kalıntı oluşumuna etkisi olan parametrelerin belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu derlemede sütün bileşiminin, kullanılan ısı değiştiricinin yüzey özelliklerinin ve uygulanan ısıl işlem parametrelerinin süte uygulanan ısıl işlem sırasında kalıntı oluşumuna etkisi ve oluşan kalıntının tespit edilmesinde ve temizlenmesinde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Isı değiştirici, Süt kalıntısı oluşumu, Temizleme yöntemleri

Fouling In Heat Exchangers Used In Dairy Industry

ABSTRACT

Milk fouling in heat exchangers results in a loss of heat transfer in the system due to additional heat resistance, and leads to a reduction in the effectiveness of heat treatment applied to milk. Furthermore, the presence of fouling layers in heat exchangers serves as broth for microorganisms in heat transfer surface, which may threat public health. Fouling during heat treatment has been a problem to be solved for many years, which causes economic losses in dairy industry. Studies to overcome this problem in heat exchangers have focused on understanding the formation and cleaning mechanisms of fouling and determining parameters that affect the formation of fouling. The aim of this review is to give information on the effects of milk composition, surface properties of utilized heat exchanger and applied parameters in heat treatment on the formation of milk fouling during heat treatment, and methods used for the detection and cleaning of milk fouling.

Keywords: Heat exchanger, Formation of milk fouling, Cleaning methods

GİRİŞ

Çiğ süte, patojen mikroorganizmalar ile normal depolama koşullarında süt ve süt ürünlerinde bozulmaya neden olabilecek mikroorganizmaların inhibe edilmesi ve çeşitli enzimlerin kısmen veya tamamen inaktif hale

getilmesi için ısıl işlem uygulanmaktadır. Süt endüstrisinde kullanılan başlıca ısıl işlem uygulamaları pastörizasyon, sterilizasyon ve termizasyon olarak sıralanabilmektedir [1]. Süt işleme tesislerinde söz konusu ısıl işlem uygulamaları, ısı değiştirici veya eşanjör adı verilen, farklı sıcaklıklardaki iki ya da daha

çok akışkanın ısılarının birinden diğerine aktarılmasını sağlayan cihazlarda gerçekleşmektedir. Isı değiştiricilerde ısı transfer yüzeyi yardımı ile birbirinden ayrılan akışkanlar arasında enerji alışverişi olmakta ve ortama ısı verme veya ortamdaki ısıyı çekmeye gerek kalmadan akışkanlar denge sıcaklığına gelmektedir. Kabuk ve borulu, hava soğutmalı, karbon bloklu, bobinli ve ceketli ısı değiştiriciler gibi farklı tür ısı değiştiriciler de kullanılmakla birlikte, kullanımı en yaygın olan ısı değiştirici türleri borulu ve plakalı ısı değiştiricilerdir. Borulu ısı değiştiriciler en basit tasarımlı ısı değiştiriciler olup, silindirik bir boruda ürün akarken ısıtıcı veya soğutucu akışkan borunun dışında bulunan gövdeden akmaktadır [2]. Borulu ısı değiştiriciler, süt ve çeşitli süt ürünlerinin daha çok UHT (Ultra High Temperature-Ultra Yüksek Sıcaklık) yöntemi ile sterilizasyonunda kullanılmaktadır. Süt endüstrisinde sıklıkla kullanılan diğer bir ısı değiştirici türü ise plakalı ısı değiştiricilerdir. Düşük viskoziteli akışkanlar için oldukça yaygın olarak kullanılan plakalı ısı değiştiricilerde plakalar birbirlerine kenetlenmiş durumda olup, aralarında conta boşluğu bulunmaktadır. Isıtılacak veya soğutulacak akışkanlar plakalar arasından akmaktadır [3]. Gıda endüstrisi özellikle de süt endüstrisi için hacimsel kapasitelerinin küçük olmasına karşı çok geniş yüzey alanlarına sahip olmaları ve plaka sayısının artırılması veya azaltılması ile işlenecek süt kapasitesinin ayarlanabilmesi plakalı ısı değiştiricileri diğer ısı değiştiricilere göre avantajlı hale getirmektedir [2]. Farklı türdeki ısı değiştiriciler kullanılarak uygulanan ısı işlem ile mikrobiyal güvenliği sağlanmış, raf ömrü uzun süt ve süt ürünleri üretilebilse de, ısı değiştiricilerin temizliği ve bakımı süt endüstrisinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biridir. Isıl işlem uygulaması sırasında ısı kaynaklı reaksiyonlar sonucunda sütün bazı fiziksel, kimyasal ve duyuşsal özellikleri değişebilmekte, ayrıca ısı değiştiricilerin yüzeylerinde süt bileşenlerinin spesifik reaksiyonlarından kaynaklanan kalıntı birikimi sorunu ortaya çıkmaktadır [4]. Kalıntı oluşumu, süt bileşenlerinin özellikle de proteinlerin ve mineral maddelerin ısı transfer yüzeylerinde birikmesi ve katılaşması ile meydana gelmektedir [5]. Isı değiştiricilerde biriken kalıntı, borularda veya plakalarda ısı transferi etkinliğini azaltıp basınç düşüşünü artırması ve buna bağlı olarak da sistemde istenilen sıcaklığa ulaşamamasından dolayı süt işletmelerinde hem ekonomik hem de ürün kalitesi bakımından önemli kayıplara neden olmaktadır. Isı değiştirici yüzeylerinde kalıntı oluşumunu en aza indirmek ve kalıntı birikiminden dolayı oluşacak kayıpları kontrol altına alabilmek için kalıntı oluşumuna neden olan faktörlerin ve mekanizmaların anlaşılması önem taşımaktadır [6]. Bu derlemede süt endüstrisinde kullanılan ısı değiştiricilerde meydana gelen kalıntının oluşum mekanizması, kalıntı birikimini etkileyen faktörler, kalıntının tespiti ve temizlenmesi hakkında bilgi verilmesi amaçlanmaktadır.

KALINTI OLUŞUM MEKANİZMASI

Süt; elde edildiği canlı türene göre bileşimi değişen, karmaşık ve beslenme değeri yüksek bir gıdadır. Sütün içeriğinin büyük kısmını su oluşturmakla birlikte, geri kalan kısmını süt yağı, laktoz, protein, mineral maddeler ve eser miktarda bulunan diğer bileşenler

oluşturmaktadır [7]. Süt bileşenlerinden özellikle protein ve mineral maddelerin ısı değiştiricilerde kalıntı oluşumuna neden olduğu bildirilmektedir [8]. Süte ısı işlem uygulaması sırasında protein denatürasyonu ve mineral madde presipitasyonu (çökme) reaksiyonları gerçekleşmektedir. Protein denatürasyonu sonucu oluşan kalıntının çoğunluğu ısıya duyarlı peyniraltı suyu proteinlerinin özellikle de β -laktoglobulinin denatürasyonu ile meydana gelmektedir. Kazein, ısıya dirençli bir protein olduğu için sütün pH'sının normal değerlerde (pH 6.6-6.8) olduğu koşullarda kalıntı birikiminin oluşumunda etkin değildir [9]. Süt 65°C'nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında β -laktoglobulin, kararsız hale geçmekte ve iki farklı mekanizma ile kalıntı oluşumunda rol oynamaktadır. Birinci mekanizmada β -laktoglobulin, 1. dereceden denatürasyona uğramakta ve -SH bağlarının açığa çıkması ile aktif hale geçip, ısıtma yüzeyine adsorbe olmaktadır. Sütteki mineral maddelerden en önemlisi olan kalsiyum iyonları ise denatüre β -laktoglobulinin oluşturduğu kalıntı içerisinde kalarak yapının stabilize olmasını desteklemektedir [10]. İkinci mekanizmada ise denatüre olmuş aktif β -laktoglobulinler, ortamda bulunan diğer aktif β -laktoglobulinlerle veya sütün diğer proteinleri (kazein, α -laktalbumin vs.) ile geri dönüşümsüz olarak 2. dereceden polimerizasyon reaksiyonuna girerek, çözünmeyen agregatlar oluşturmakta ve ısıtma yüzeyine taşınarak adsorbe olmaktadır [11]. Ancak konu ile ilgili literatür incelendiğinde, ısıtma yüzeyinde ilk olarak birinci mekanizma sonucu oluşan denatüre proteinlerin mi yoksa ikinci mekanizma ile oluşan agregatların mı kalıntı birikimine yol açtığı konusunda farklı yaklaşımlar olduğu görülmektedir. Agregat olmuş proteinin yapısal olarak denatüre proteine göre daha büyük olmasından dolayı ısı transfer yüzeyine taşınımının daha zor olacağından iki mekanizma sonucu oluşacak kalıntıların birikme hızlarının farklı olabileceği bildirilmiştir [12]. Isı değiştiricilerde peyniraltı suyu proteinlerinin yanı sıra sütün ısıtılması sırasında kalsiyum fosfat tuzlarının da çözünürlüğünün azalarak kalıntı birikimine sebep olduğu belirtilmektedir [13]. Kalsiyum fosfat, kazein miselleri yüzeyine çökebileceği gibi β -laktoglobulinin de üzerine çökerek birikmeye neden olabilmektedir. Protein agregatlarının ve kalsiyum fosfatın kalıntı oluşumuna neden olurken birbirlerinden bağımsız olmayabileceği belirlenmiştir. Protein kalıntısının olduğu sıcaklık aralığında (80-105°C) ortamda kalsiyum iyonlarının bulunması halinde kalıntı birikiminin arttığı tespit edilmiştir [10, 14]. Süte, 100°C'den daha yüksek sıcaklık değerlerinde ısı işlem uygulandığında ise kalıntının ana bileşeni kalsiyum fosfat olup, küçük protein agregatları kalsiyum fosfatın açık ağ yapısındaki boşluklarına hapsolarak kalıntı yapısını oluşturmaktadır [7].

Isı değiştiricilerin yüzeylerinde kalıntı oluşumu başlangıç ve birikim olmak üzere iki safhada meydana gelmektedir. Kalıntı oluşumunun fark edilebilir bir hale gelmesi için başlangıç safhasının olması gerekmektedir [15]. Başlangıç safhasında kalıntı ince bir tabaka şeklinde olup, ısı transferine karşı ihmal edilebilir bir direnç oluşturmakla birlikte, ısı değiştiricilerin yüzey pürüzlülüğünü artırarak ısı transfer katsayısını düşürmektedir [16]. Borulu ısı değiştiricilerde başlangıç safhasının süresi sıcaklık, akış hızı ve yüzey

özelliklerine bağlı olarak 1 ile 60 dakika arasında değişmektedir. Plakalı ısı değiştiricilerde ise karıştırmanın şiddetli olması ve akışın yüksek türbülansla gerçekleşmesinden dolayı kalıntı oluşması için gerekli süre çok daha kısa olmakta, hatta anlık oluşumlar görülebilmektedir [17]. Birikim safhası ise kalıntının ısı transfer direnci oluşturacak kadar birikmesi ile başlamaktadır. Birikim safhası, ısı transfer yüzeyi üzerinde biriken moleküllerin yüzey ile bağ oluşturmasını ve protein-protein arasında oluşan etkileşimlerin birikme hızını kontrol ettiği kararlı halde bir kalıntı oluşumunu ifade etmektedir [18].

KALINTI BİRİKİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Isı değiştiricilerde kalıntı birikimi süt endüstrisinde sürekli karşılaşılan, pratik olarak engellenemeyen ve aynı zamanda oluşumunda birden çok değişkenin etkili olduğu bir sorundur. Isı transfer yüzeylerinde kalıntı birikmesine sebep olabilecek değişkenler; sütün bileşimi, ısı değiştiricinin türü, sütün işleme koşulları, ısı değiştiricinin yüzey materyalinin özellikleri ve sütün mikrobiyal yükü olarak sıralanabilmektedir [9].

Süt Bileşiminin Etkisi

Sütün bileşimi sütün elde edildiği canlıya ve mevsimsel geçişlere bağlı olarak değişmektedir. Bu da ısı değiştiricilerde sütün neden olduğu kalıntının bileşiminde değişikliklere neden olmaktadır [6, 8, 19]. Isı değiştiricilerde en çok kalıntı oluşumuna neden olan ve kalıntı yapısını şekillendiren süt bileşeni peyniraltı suyu proteinleridir [5]. Bu nedenle birçok araştırmacı sütün ısı değiştirici yüzeylerinde oluşturduğu kalıntının bileşimini belirleyebilmek, kalıntı oluşum mekanizmalarını ortaya koyabilmek ve kalıntı temizleme yöntemleri geliştirebilmek gibi amaçlarla ısı ile oluşturulmuş peyniraltı suyu proteini jellerini model sistem olarak kullanmıştır [19, 23].

Fickak ve ark. [24] peyniraltı suyu protein konsantrasyonunun kirlilik oluşumu üzerine etkisini belirlemek üzere yaptıkları çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (%2, 4 ve 6 [w/v]) peyniraltı suyu protein konsantrasyonu içeren çözeltileri 70°C'de 5 dakika ısıttıktan sonra yüzey sıcaklığı 81°C olan ısı değiştirici içerisinde sirküle ederek kalıntı oluşumu sağlamışlardır. Çalışmada ısı transfer katsayıları ve ısı değiştirici yüzeyi ile kullanılan çözeltiler arasındaki sıcaklık farkı takip edilmiş olup, ısı transfer yüzeylerinde kalıntı oluşumunda ısı transfer katsayısının düşüşü indikatör olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak daha yüksek oranda peyniraltı suyu protein konsantrasyonu içeren çözeltilerin daha fazla kalıntı oluşturduğu belirlenmiştir.

Isıl işlem sırasında peyniraltı suyu proteinleri dışındaki süt bileşenleri de kalıntı oluşumunu etkilemektedir. Sütün pH değerine bağlı olarak, β -laktoglobulinler kazein miselleri üzerinde birikerek kazein miselinin yüzeyinde ya da süt serumunda serbest halde bulunan κ -kazein fraksiyonları ile reaksiyona girerek bağ oluşturmaktadır. Kazein miselleri ile peyniraltı suyu proteinlerinin ısı işlem sırasında reaksiyona girmesi, kalıntı oluşumunu büyük ölçüde kısıtlaya da ortamda

kazein misellerinin olması kalıntı oluşumunun az da olsa artmasına neden olabilmektedir [25]. Ortamda denatüre peyniraltı suyu proteinleri olması kalıntı oluşum sürecinde önemlidir. Isıl işlem sırasında denatüre β -laktoglobulinler, ısı transfer yüzeyi ile diğer β -laktoglobulinler ve kazein molekülleri arasında yapışkanlık sağlayıcı ajan olarak davranarak kalıntı tabakasının oluşumuna neden olmaktadır [5]. Kalıntı bileşimlerinde az miktarda laktoz da bulunmaktadır. Suda çözünür olduğu için laktozun genel olarak kalıntı oluşum sürecinde çok önemli bir rolü bulunmamaktadır [17]. Ancak ısı işlem sırasında çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığında (>100°C) laktoz, karamelizasyon ve Maillard reaksiyonları sonucu kalıntı oluşumunda rol oynayabilmektedir [26]. Süte uygulanan ısı işlem sırasında süt yağı globül membranında bulunan bazı protein yapısındaki bileşenler peyniraltı suyu proteinleri ile etkileşime girmekte ve kalıntı katmanlarında protein matriksi içerisine hapsolarak kalıntı bileşiminde yer almaktadır. Sütteki mineral maddeler kalıntı oluşumunun erken evrelerinde etkili olmaktadır [5]. Bu etki; kalsiyum fosfatın çözünürlüğü ile ortam sıcaklığı arasında ters ilişki bulunmasından, kalsiyumun peyniraltı suyu proteinlerinin denatürasyonuna ve kazeinin çökmesine neden olmasından kaynaklanmaktadır [10]. Kalsiyum konsantrasyonu azaltılan veya artırılan sütün ısı işlem sırasında stabilitesinin azalmasından dolayı kalıntı oluşturma potansiyelinin normal kalsiyum içeriğine sahip süte göre yüksek olduğu bildirilmiştir [8].

Gıda endüstrisinde uygulanan ısı işlem, geri dönüşümlü olabilmekle birlikte sistem basıncına bağlı olarak sütün içerisindeki havanın giderilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak özellikle yüksek akış hızı ve düşük basınç altında uygulanan ısı işlem ile havanın çözünürlüğü azalabilmekte ve hava boşlukları oluşabilmektedir [27]. Bununla birlikte sistemde kurulu olan genişleme vanaları ve serbest düşüşe izin veren borulu düzeneklerin etkisi ile oluşan mekanik kuvvetler de hava boşluklarının oluşumunda etkili olabilmektedir [8]. Sütün içindeki hava boşlukları, ısı işlem sırasında ısı değiştirici yüzeyinde süt kalıntı oluşumunu teşvik etmektedir. Isı değiştiricilerde akışkan içerisine hapsolmuş hava boşlukları, ısıtma yüzeyinde kabarcıklar oluşturup ısı transfer yüzeyinde kalıntının oluşmaya başlamasında ve artmasında rol oynayabilmektedir [28]. Hava boşluklarının olduğu yerlerde sütün evaporasyonu gerçekleşirse konsantrasyon fazlalığı nedeni ile süt proteinleri birikmeye başlamaktadır. Süt proteinleri yüksek sıcaklığın etkisi ile söz konusu yerlerde çökmeye başlayıp kalıntı oluşturabilmektedir [8].

Sütün bileşenlerinin stabilitesi için kritik olan süt pH'sı kalıntı oluşumunda etkili olan bir diğer faktördür [14]. Süt, pH değerindeki düşüş ile birlikte ısı işlem sırasında ısı değiştiricilerin yüzeyinde pıhtılaşmaktadır. Kalıntı oluşumu ve süt pH'sı arasındaki ilişki doğrusal olmamakla beraber, sütün pH'sı düştükçe ısı işlem sırasında oluşan kalıntı miktarı artmaktadır [29, 31]. Düşük pH değerine sahip süte ısı işlem uygulandığında ısı değiştiricilerdeki kalıntı miktarı artışının, sütteki kalsiyum aktivitesindeki artıştan ve kazein misellerinin düşük pH değerlerinde stabilitesinin azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [32]. Süt pH'sının

kalıntı bileşimi ve kalıntı oluşum hızı üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada UHT uygulaması yapılmadan önce sütlerin pH'ları 1M hidroklorik asit ile pH 6.54'e ve 1M laktik asit ile pH 6.51'e ayarlanmıştır. pH değerleri ayarlanan sütler UHT işlemi öncesi 24-30 saat boyunca 5°C'de depolanmıştır. Plakalı ısı değiştirici kullanılarak süte 140°C'de 2-3 saniye olacak şekilde UHT işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası ısı değiştiricideki plakalar sökülüp gece boyu 65°C'de bekletilmiştir. Kalıntı miktarını belirlemek amacıyla yıkama öncesi ve sonrası plakalar tartılmıştır. pH'sı ayarlanmamış (pH 6.7) olan tam yağlı sütün plakalı ısı değiştiricinin rejenerasyon bölümünde oluşturduğu kalıntının bileşiminde %43.6-51.4 protein, %5.3-6.0 süt yağı ve %20.1-46.2 mineral madde bulunduğu belirlenmiştir. Plakalı ısı değiştiricinin rejenerasyon bölümünde oluşan kalıntının bileşimi ile karşılaştırıldığında buharla ısıtma bölümünde oluşan kalıntının daha fazla mineral madde (%50.8-63.1) ve daha az protein (%20.4-22.3) içerdiği tespit edilmiştir. pH'sı ayarlanmamış tam yağlı sültere uygulanan ısı işlem sırasında oluşan kalıntının bileşiminin belirlenebilmesine yönelik çalışmalarda plakalı ısı değiştiricinin sadece buharla ısıtma bölümünden yeterli miktarda örnek alınabilmektedir. Plakalı ısı değiştiricide pH'sı 6.54'e ayarlanmamış tam yağlı süte uygulanan ısı işlem sırasında oluşan kalıntının %34.1-36.1 protein, %50.1-54.9 süt yağı ve %6.3-6.5 mineral madde içerdiği belirlenmiştir. pH'sı 6.51'e ayarlanmamış yağsız süte (%0.05 yağ) uygulanan ısı işlem sırasında plakalı ısı değiştiricinin buharla ısıtma bölümünde oluşan kalıntının %66.5-73.6 protein ve %17.0-24.4 mineral madde içerdiği saptanmıştır. pH'sı 6.51'e ayarlanmamış yağsız süte uygulanan ısı işlem sırasında plakalı ısı değiştiricide oluşan kalıntı miktarının, pH'sı ayarlanmamış tam yağlı süte göre %69 oranında fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu artışın kalıntı bileşiminde yer alan protein miktarındaki artıştan kaynaklandığı saptanmıştır. pH'sı 6.54'e ayarlanmamış tam yağlı süte uygulanan ısı işlem sırasında ise plakalı ısı değiştiricide oluşan kalıntının bileşimindeki protein ve yağ miktarlarının arttığı; ancak mineral madde miktarının azaldığı tespit edilmiştir. [33]

Isı transfer yüzeylerinde oluşan kalıntı, süt içerisindeki mikroorganizmaların kolay bir şekilde kalıntı yüzeyine tutunmasına neden olmakta ve kalıntı bölgesinde çoğalmalarını teşvik ederek süte uygulanan ısı işlemin etkinliğini azaltmaktadır. Mikroorganizmaların ısıtma yüzeylerinde birikip biyolojik kalıntı oluşturması "biyolojik kirlilik" olarak adlandırılmaktadır. Biyolojik kirlilik, süt endüstrisinde ısıtma yüzeylerinde ilk önce mikroorganizma birikimini teşvik edici yüzeyin yani kalıntı tabakasının oluşumu ile başlamakta ve bu tabaka mikroorganizmaların tutunup çoğalmalarına imkan sağlayarak biyofilm oluşumuna neden olmaktadır [34, 35]. Bu durum ısı işlem ünitelerinin temizliğini zorlaştırmakla birlikte, süt ve süt ürünlerinde mikrobiyal kontaminasyona ve dolayısı ile ürünlerde kalite kayıplarına neden olmaktadır. Isı transfer yüzeylerinde kalıntı tabakasının oluşumu, yüzeyin enerji, hidrofobisite ve elektrostatik yük gibi fizikokimyasal özelliklerini değiştirmektedir. Böylece mikroorganizmanın yüzeye tutunmasında etkili olan Van der Waals kuvvetleri,

elektrostatik etkileşimler, hidrodinamik koşullar ve hücre-hücre arası etkileşimler değişmektedir [36].

Isıl İşlem Koşullarının Etkisi

Isıl işlemin uygulandığı sıcaklık, sıvının akış hızı ve tipi ısı değiştiricilerde kalıntı oluşum mekanizmasında etkili işlem koşullarıdır [37]. Süte uygulanan ısı işlem sıcaklığı, kalıntı bileşimindeki protein ve mineral madde oranlarının değişmesinde ve kalıntı birikiminin kontrol altına alınmasında büyük rol oynamaktadır [13]. Süte uygulanan ısı işlemin sıcaklık derecesine bağlı olarak A ve B tipi olmak üzere iki farklı kalıntı oluşumu gözlenmekle birlikte, sıcaklığın artışı ile kalıntının yapısı A tipinden B tipine doğru değişmektedir. A tipi kalıntı ısı işlem sırasında 75-110°C sıcaklık değerleri arasında oluşmakta ve oluşan kalıntı beyaz renkte, yumuşak, süngerimsi yapıda, bileşim olarak %50-70 protein (çoğunlukla β -laktoglobulin), %30-40 mineral madde ve %4-8 süt yağı içermektedir. Isıl işlem sıcaklık değerinin 110°C'nin üzerinde olduğu durumlarda oluşan B tipi kalıntı ise gri renkli, sert, sıkı ve granüler yapıda olup, bileşim olarak %70-80 mineral madde (çoğunlukla kalsiyum fosfat), %15-20 protein ve %4-8 süt yağı ihtiva etmektedir [9].

Isı değiştiricilerde sıvının akış hızı ve Reynold sayısı kalıntı oluşumunu etkilemektedir. Sıvının akışı sonucu oluşan mekanik etkinin yani kayma geriliminin oluşabilecek kalıntıyı giderme yönünde etkisi bulunmaktadır [5]. Düzgün bir tüp şeklindeki düzeneğe akan sıvının Reynold sayısı 2100'e ulaşana kadar akış laminar olmaktadır, Reynold sayısı 10000'in üzerine çıktığında akış gelişmiş türbülans olmaktadır. Söz konusu iki değer arasında oldukça karmaşık olan geçiş rejimi oluşmaktadır. Belmar-Beiny ve ark. [19] yaptıkları çalışmada, 73°C'ye ısıttıkları %1 oranında peyniraltı suyu konsantrasyonu içeren çözeltiyi farklı Reynold sayılarında (1800, 5200 ve 7500) olacak şekilde borulu ısı değiştiriciye 1 saat süre ile besleyerek 83°C'ye ısıtmışlardır. Çözeltinin Reynold sayısının 1800 olduğu durumda kalıntı birikiminin borunun uzunluğu boyunca arttığı belirlenmiştir. Reynold sayısı arttıkça borunun giriş ve çıkışı arasında biriken kalıntı miktarları arasındaki farklılık artış gösterse de, borunun toplam alanında biriken kalıntı miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Söz konusu azalmanın, yüzey kayma gerilmesinin ve yüksek karışma sağlayan türbülans düzeyinin artmasından ve ısı transfer yüzeyine tutunmak yerine aktif moleküllerin akışkan içerisinde bir araya gelmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Genel olarak, artan akış hızı, oluşan kayma gerilimi sayesinde kalıntı oluşturan bileşiklerin yüzeye adsorbe olma olasılığını azaltmaktadır. Artan akış hızıyla oluşan türbülans akış rejimi, laminar sınır katmanlarının azalmasına, dolayısı ile ürün ile cidar arasındaki sıcaklık farkının azalması, protein agregatlarının ısıtma yüzeyinden ziyade ürün içerisinde oluşumuna imkan vermektedir [5]. Bunun yanında, yüksek düzeyde türbülans akış, kalıntı tabakası içerisinde çökmüş olan proteinlerin yeniden sürüklenmesine neden olabilmektedir [38]. Gordon ve ark. [31] akış hızındaki artış ile borulu ısı değiştiricilerde kalıntı miktarının azaldığını, plakalı ısı değiştiricilerde ise kompleks akış geometrileri nedeniyle akış hızı ile kalıntı

miktarının ilişkilendirilmesinin zor olduğunu bildirmişlerdir. Ancak oluklu plakalarla ve nispeten düşük akış hızlarında çalışıldığından plakalı ısı değiştiricilerin genelde türbülans koşullar altında kalıntı oluşumuna daha az eğilimli oldukları belirtilmektedir. Kalıntı oluşumları çoğunlukla artan yüzey gerilimi ile azalmaktadır. Yüzey gerilimi, Reynold sayısının bir fonksiyonu olan sürtünme faktörünü belirlemekte ve dolayısı ile akış hızı ile ilişkilendirilebilmektedir. Reynold sayısının süt kalıntısı oluşumu üzerine etkilerini inceleyen çoğu çalışmada geçiş rejimi kullanılmıştır. Bu yüzden de kalıntı miktarındaki azalmanın yüzey kayma geriliminin arttırmasından mı yoksa akış rejiminin laminardan türbülansa geçerek değişmesinden mi kaynaklandığı konusu belirsizliğini korumaktadır [26].

Yüzey Özelliklerinin Etkisi

Isı değiştirici yüzeylerinde ilk kalıntı katmanının oluşabilmesi proteinlerin, mineral maddelerin ve termofilik mikroorganizmaların yüzey materyali ile etkileşime girmelerine bağlıdır. İlk kalıntı katmanının oluşmasında yüzeyin hidrofobitesisi, enerjisi ve pürüzlülüğü gibi özellikler kalıntı birikimini etkileyen ve kontrol eden temel değişkenlerdir [39]. İlk kalıntı katmanı oluşuktan sonra ısı transfer yüzeylerinin özellikleri kalıntı oluşumunda önemini yitirmektedir [7]. Artan yüzey pürüzlülüğünün daha fazla yüzey alanına neden olmasından dolayı pürüzlü yüzeyin pürüzsüz yüzeye göre daha yüksek yüzey enerjisine sahip olduğu ve sonuç olarak pürüzlü yüzeylerde süt kalıntısının adezyonunun daha kuvvetli olduğu bildirilmektedir [6, 40]. Yoon ve Lund [40] yaptıkları bir çalışmada, manyetik alan uygulamalı ısı işlem cihazında titanyum, standart 304 numaralı paslanmaz çelik, elektropolisajlı paslanmaz çelik, teflon ve polisiloksan kaplamalı plakaların yüzey özelliklerinin kalıntı oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Süt, ısı işlem cihazına 11°C'de 0.14 m/s akış hızında beslenmiş ve 115°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra oluşan kalıntının bileşimi belirlenmiştir. Titanyum, standart 304 paslanmaz çelik, elektropolisajlı paslanmaz çelik, teflon ve polisiloksan kaplamalı plakaların temas açılarının ortalama değerlerinin sırasıyla 29, 26, 45, 90 ve 76 derece olduğu ve teflon ile polisiloksan kaplamalı yüzeylerin hidrofobitesilerinin standart 304 numaralı paslanmaz çeliğe göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Tüm yüzeylerde oluşan kalıntının %32 ile 35'ini protein ve %52 ile 55'ini mineral maddelerin oluşturduğu ve kalıntı bileşiminin plakanın yüzey özelliklerine göre değişmediği; ancak plakanın yüzey özelliklerinin kalıntının fiziksel görünüşünü üzerinde önemli düzeyde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Kalıntının, yüksek hidrofobik özelliğinden dolayı teflon kaplı plakadan kendiliğinden ayrıldığı belirtilmiştir. Isıl işlem sırasında oluşan ortalama kalıntı miktarlarının ise titanyum, standart 304 numaralı paslanmaz çelik, elektropolisajlı paslanmaz çelik, teflon ve polisiloksan kaplamalı plakalarda sırasıyla 2.54, 3.29, 2.72, 3.66 ve 3.02 g olduğu saptanmıştır. Konu ile ilgili bir diğer çalışmada ise Britten ve ark. [41] çeşitli polimerlerle kaplanmış yüzeylerin ara yüzey özelliklerinin oluşan kalıntının miktarı ve adezyon kuvveti üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kaplama materyali olarak 316 numaralı paslanmaz çelik üzerine

polimetilmetakrilat, polistiren, naylon 66, selüloz triasetat, selüloz asetat ve agaroz kullanılmıştır. Tam yağlı süt, 5°C'de 1 gün süre ile bekletildikten sonra pH'sı 6.5'e ayarlanıp 100°C'de 60 dakika ısı işlemine tabi tutularak kalıntı oluşumu sağlanmıştır. Isıl işlem sonrasında kalıntı bileşimindeki proteinler ve fosfatlar belirlenmiştir. Kalıntı oluşum miktarları açısından benzer davranışlar gösterebilir de yüzeylerin adezyon kuvvetleri farklılık göstermiştir. Herhangi bir polimerle kaplanmamış kontrol yüzeyi ile polimerlerle kaplanmış yüzeyler karşılaştırıldığında, polimerle kaplanmanın yüzeyde kalıntı oluşumunda azalma sağlamadığı, hatta agaroz ile kaplanmış yüzeyde kontrol yüzeyine göre daha fazla kalıntı oluştuğu saptanmıştır. Bunlara ek olarak Naylon 66 ve agaroz ile kaplananlar dışındaki yüzeylerde mineral madde adezyonunun protein adezyonundan fazla olduğu belirlenmiştir.

KALINTI OLUŞUMUNUN TESPİTİ

Isı değiştiricilerde oluşan kalıntı, süte uygulanan ısı işlemin etkinliğini azaltmakta ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Kalıntı sorununun çözümüne dair ilk adım ısı işlem değişkenlerinin ölçümü ve kontrolü ile kalıntının tespit edilmesidir [42]. Kalıntının tespit edilmesi için doğrudan ya da dolaylı indikatörler kullanılabilir. Doğrudan indikatörler yüzeyden alınan kalıntının mikroskop altında incelenmesine, bileşimini belirlemeye yönelik analizlere tabii tutulmasına ve kalınlık ölçümlerine dayanmaktadır. Doğrudan indikatörler ile kalıntının tespitinde, üretimin durdurularak kalıntı örneğinin alınması ve laboratuvar çalışmaları ile incelenmesi gerekmektedir. Kalıntı tespitinde doğrudan indikatörlerle çalışmanın zorluğundan dolayı, online görüntüleme yapılabilmesine ve üretim süreci içerisinde kalıntının belirlenebilmesine imkan veren dolaylı indikatörler geliştirilmiştir. Dolaylı indikatörler ile kalıntı tespitinde üretim hattının istenilen bölgelerine yerleştirilen basınç, sıcaklık ve akış hızı gibi ısı işlem parametrelerindeki değişimleri belirleyebilen sensörler kullanılmaktadır [26]. Ayrıca, elektrik direnci ile iletkenlik ölçen sensörler, akustik ve optik özelliklerdeki değişimleri tespit edebilen sensörler kalıntı oluşumunun online olarak tespit edilmesini sağlamaktadır [42,43]. Söz konusu sensörler ile elde edilen veriler yapay sinir ağları, destek vektör makinası gibi sayısal yöntemlerle işlenerek kalıntı varlığı veya oluşum süreciyle ilgili tahminler yapılabilmektedir [44].

Süte uygulanan ısı işlemin neden olduğu kalıntı oluşumunu belirlemeye yönelik yapılan bir çalışmada, iki rejenerasyon, iki ısıtma ve bir soğutma olmak üzere beş bölümden oluşan bir plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır. Kalıntı oluşumunun belirlenebilmesi için süte uygulanan ısı işlem süresince ısı akış, sıcaklık ve basınç sensörleriyle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bölüme bir tane ısı akışı ölçen sensör ve sistem içindeki basınç düşüşlerinin belirlenmesi amacıyla her bölümün giriş ile çıkışlarına da basınç ölçen sensörler yerleştirilmiştir. Sütün ve ısı değiştirici yüzeyin sıcaklıklarının ölçümü için 2 tane sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Isıl işlem sıcaklık ve süresi 75°C'de 15 s olarak belirlenmiş ve sensörlerden toplanan verilerin işlenmesi için tek katmanlı yapay sinir ağları oluşturulmuştur. Çalışmada tek katmanlı yapay

sinir ağları, ısı akışı ve sıcaklık değerlerini nöron girdisi olarak kullanabilecek ve kalıntı kalınlığını tek çıktı olarak verebilecek şekilde programlanmıştır. Hesaplanan teorik değere göre 9 saat süresince sürekli uygulanan ısı işlem sonrası ısı değiştiricinin birinci bölümünde kritik seviyede kalıntı oluştuğu ve söz konusu süre sonunda ısı değiştiricinin durdurulması gerektiği belirlenmiştir. Teorik olarak hesaplanan verinin doğrulanması için belirtilen süre boyunca çalıştırılan ısı değiştiricide oluşan kalıntının kalınlığı ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, gerçek deneme sonucunda elde edilen veriler ile tek katmanlı yapay sinir ağları kullanılarak hesaplanan değerlerin benzer olduğu saptanmıştır [44].

KALINTININ TEMİZLENMESİ

Gıda endüstrisinde kullanılan ısı değiştiricilerde oluşan kalıntının temizlenmesi insan sağlığı, ürün kalitesi ve işletme giderleri açısından önem taşımaktadır. Bir ısı değiştiricinin temiz olarak kabul edilebilmesi için yüzeyinde optik olarak veya diğer fiziksel yöntemlerle tespit edilebilen bir kalıntının, analitik olarak ölçülebilecek herhangi bir kimyasal bileşiğin ya da mikroorganizmanın bulunmaması gerekmektedir [5]. Isıl işlem ünitelerine uygulanan temizlik işlemi kalıntı tipine göre değişmektedir. Protein bazlı kalıntının sodyum hidroksit içeren çözeltilerle temizliği, şişme ve difüzyon, erozyon ve bozulma olmak üzere üç evreden oluşmaktadır. Şişme ve difüzyon evresinde alkali ile temas eden kalıntıdaki protein matriksi açılmakta ve büyük boşluklu bir yapı oluşturmaktadır. Oluşan şişkin tekdüze yapı, yüzey gerilimi ve difüzyon etkisi ile erozyon evresinde uzaklaşmaktadır. Bozulma evresinde ise önceki evrelerde uygulanan işlemlerle kalınlığı oldukça azalmış olan protein kalıntısı, kütle transferi ve yüzey gerilimi etkileri ile yüzeyden uzaklaşarak izole olmuş adacıklar haline dönüşmektedir. Oldukça karmaşık olan bu temizleme işleminde alkali ile protein matriksi arasındaki ilişkinin alkalinin konsantrasyonuna bağlı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bozulma evresindeki temizleme hızının seçiminde, yüzey geriliminin dikkate alınarak diğer evrelere göre daha hassas olunması gerektiği belirtilmiştir [5]. Borulu ısı değiştiricide oluşan peyniraltı suyu proteinlerinin yoğunlukta olduğu A tipi kalıntının temizleme mekanizmasının belirlenmeye çalışıldığı bir araştırmada, ısıl direnç ölçümü için ısı akış sensörü kullanılıp kalıntının uzaklaşma hızı takip edilmiştir. Öncelikle peyniraltı suyu konsantratu kullanılarak ters akışla borulu ısı değiştiricide kalıntı oluşumu sağlanmıştır. Kalıntı temizliği için ise %0.5'lik sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Araştırmada; hızlı gerçekleşen bir evre olduğundan şişme ve difüzyon evresi göz ardı edilmiş ve sadece erozyon ve bozulma evreleri üzerinde çalışılmıştır. Erozyon evresinde kalıntı temizleme hızının, kalıntı ile temizleme çözeltisinin ara yüzeyinin sıcaklığına bağlı olduğu saptanmıştır. Bozulma evresinde ise kalıntı temizleme hızının sıcaklığa bağlı olduğu ve en etkin kalıntı temizleme sıcaklığının 50°C olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kalıntı temizlik hızında etkin parametrelerin temizlik evreleri için değişkenlik gösterdiği ortaya konulmuştur [22].

Gıda işletmelerinde üretim sırasında ve üretim sonrasında yapılmak üzere iki ayrı kalıntı temizleme yöntemi bulunmaktadır. Üretim sırasında temizlik yapılmasının amacı yüksek işlem verimliliği için ısı transfer yüzeylerini temiz tutabilmektir. Üretim sırasında ve sonrasında fiziksel, mekanik ve kimyasal yöntemlerle temizlik yapılabilmektedir. Üretim sırasında uygulanan ısıl şok, ısı değiştirici yüzeyinin kısa süreli ve aşırı ısınmasına, yüzey ile kalıntının farklı ısıl genleşme özelliklerine sahip olmasından dolayı kalıntı katmanının çatlamasına neden olmakta ve temizleme işlemini kolaylaştırmaktadır. Akış yönünde veya akış hızında belirli aralıklarla değişiklikler yapılması da zayıf olarak tutunmuş kalıntının giderilmesi için kullanılan yöntemler arasında sayılmaktadır. Isı değiştirici içerisine kısa süreli olarak sıkıştırılmış hava veya azot gazı basılmasıyla ortaya çıkan yüksek düzeyde türbülanslı gaz-sıvı akışı, neden olduğu yüksek kayma kuvveti ve basınç dalgalanmalarıyla kalıntının temizlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca ısıl işlem ünitelerinde kalıntı temizliği için ısıl işleme tabi tutulan hammadde içerisine inhibitörler veya bazı katkı maddeleri de ilave edilebilmektedir. Ancak bu gibi yöntemlerde ilave edilecek maddenin dozunun doğru belirlenmesi ve sağlığa zararlı olmayacağını gösterir nitelikteki çalışmaların yapılmış olması gerekmektedir [45]. Gıda endüstrisinde üretimden sonra makinalar sökülerek yapılan mekanik temizlik, mikrobiyolojik kontaminasyona neden olma ve parçaların yüzeylerine zarar verme risklerinden dolayı tercih edilmemektedir. Süt ve süt ürünleri üretimi yapılan tesislerde üretim sonrasında kimyasal temizleme yöntemlerinden olan CIP (Cleaning in Place-Yerinde Temizleme) sistemi, diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir. Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan CIP sisteminde makinalar sökülmeden içerisinden farklı hızlarda ve sıcaklıklarda asit veya alkali çözeltileri geçirilerek temizlik yapılabilmektedir. Protein gibi organik yapıda olan kalıntıların temizlenmesinde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi güçlü alkaliler kullanılmaktadır. Temizlemede kullanılan suyun sertliğinin azaltılması için polifosfatlar, nitrilotriasetik asit tuzları, EDTA (etilendiamin tetraasetik asit), glukonatlar, fosfonatlar ve poliakrilatlar alkali çözeltilere eklenmektedir. Bunların yanında yüzey aktif ajanlar, ara yüzey gerilimini azaltıcı etkiye sahip iyonik olmayan maddeler ve köpük oluşumunu kontrol eden bileşikler de temizliğin doğru yapılması için kullanılabilir. Ayrıca yüksek düzeyde mineral madde içeriğine sahip olan kalıntının temizlenebilmesi ise alkali çözelti ile temizlik yapılmadan önce veya yapıldıktan sonra kuvvetli asit (nitrik asit, fosforik asit vb.) çözeltileri de kullanılarak temizlik işlemi yapılabilmektedir [22]. Üretim sonrası yapılan kimyasal temizleme metodlarının etkinliğini artırmak için ısı değiştirici yüzeylerinin modifikasyonu yapılarak süt kalıntılarının ısı transfer yüzeylerine tutunması azaltılıp temizliğinin kolaylaştırılması sağlanabilmektedir. Gıda endüstrisinde en çok kullanılan yüzey materyali paslanmaz çeliktir. Ancak paslanmaz çeliğin yüzey enerjisi oldukça yüksektir ve yüzey enerjisini düşürülebilmek için kaplama, elektrokimyasal cilalama, kimyasal işlemler ve manyetik alan uygulama gibi bazı yöntemler geliştirilmiştir [7, 46].

SONUÇ

Oluşum mekanizması ve temizlenmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen ısı değiştiricilerde biriken süt kalıntısı, süt endüstrisi açısından sorun oluşturmaya devam etmektedir. Sütün ısı değiştiricilerde kalıntı oluşturmaya; uygulanan ısı işlem çeşidi, kullanılan ısı değiştiricinin türü ve yüzey özellikleri, sütün bileşimi ve uygulanan ısı işlemin hidrodinamik özellikleri gibi değişkenlere bağlıdır. Söz konusu değişkenler farklı yapılar da kalıntı oluşumuna neden olmakta ve sorunun genelleştirilerek basit bir çözüm bulunmasını engellemektedir. Kalıntı oluşumunu en aza indirmek için ısı işlem sürecinin takibi erken müdahale için oldukça önemlidir. Geliştirilen bazı sensörler ile ısı işlem sırasında ölçümler yapılabilme ve elde edilen veriler kullanılarak süt kaynaklı kalıntı oluşumu yönetilebilmektedir. Ayrıca son zamanlarda bazı yazılımlar ile kalıntı oluşum modelleri geliştirilmektedir. Kalıntı oluşumunu etkileyen dinamiklerin doğru tahmini ile ısı işlem koşulları ve ısı değiştiricilerin karakteristiğinin optimizasyonu sağlanabilmekte, böylelikle kalıntı oluşumu belirli düzeylerde kontrol altına alınarak enerji kayıpları azaltılabilmektedir. Enerjinin yüksek verimle kullanılması bir zorunluluk olan ülkemizde ısı işlem sırasında süt kaynaklı kalıntı oluşumu ile ilgili farkındalık düzeyinin özellikle doğrudan konu ile ilgili yapılacak araştırmalar ve bilimsel yayınlarla artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Urgan, M., Saatli, T.E., Türk, A., Koca, N. (2017). Isıl işlem görmüş içme sütlerinde (pastörize, UHT ve laktozsuz UHT süt) hidroksimetilfurfural içeriğinin belirlenmesi. *Akademik Gıda*, 15(3), 249-255.
- [2] Agarwal, P., Sikand, A., Shanthi, V. (2014). Application of heat exchangers in bioprocess industry: A review. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(1), 24-28.
- [3] Earle, R.L., Earle, M.D. (2004). Unit Operations in Food Processing, Web Edition 6: Heat transfer applications. <http://www.nzfst.org.nz/unitoperations>. Erişim tarihi: 16.04.2018.
- [4] Grijspeerd, K., Mortier, L., De Block, J., Van Renterghem, R. (2004). Applications of modelling to optimise ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling. *Food Control*, 15(2), 117-130.
- [5] Visser, H., Jeurnink, T.J.M., Delplace, F., Fryer, P., Schrami, J.E. (1997). Fouling and cleaning of heat treatment equipment. *Bulletin of the international Dairy Federation*, 328, 7-31.
- [6] Bansal, B., Chen, X.D. (2006). A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(2), 27-33.
- [7] Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Badarudin, A., Zubair, M.N.M., Dehkordi, B.L., Oon, C.S. (2013). A review of milk fouling on heat exchanger surfaces. *Reviews in Chemical Engineering*, 29(3), 169-188.
- [8] De Jong, P. (1997). Impact and control of fouling in milk processing. *Trends in Food Science and Technology*, 8(12), 401-405.
- [9] Bansal, B., Chen, X.D. (2009). Fouling of heat exchangers by dairy fluids: A review. *The Berkeley Electronic Press RP2*, 23, 149-57.
- [10] Delsing, B.M.A., Hiddink, J. (1983). Fouling of heat transfer surfaces by dairy liquids. *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 37, 139-148.
- [11] Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Dahari, M., Safaei, M.R., Sadri, R., Badarudin, A. (2015). A comprehensive review of milk fouling on heated surfaces. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(12), 1724-1743.
- [12] Traybal, R.E. (1981). Mass transfer operation. McGraw - Hill Book Company, Singapore.
- [13] Jeurnink, T.J., Walstra, P., De Kruif, C.G. (1996). Mechanisms of fouling in dairy processing. *Netherlands Milk Dairy Journal*, 50, 407- 426.
- [14] Burton, H. (1968). Deposits from whole milk in heat treatment plant: A review and discussion. *Journal of Dairy Research*, 35(2), 317-330.
- [15] Paterson, W.R., Fryer, P.J. (1988). A reaction engineering approach to the analysis of fouling. *Chemical Engineering Science*, 43(7), 1714-1717.
- [16] Jeurnink, T.J.M. (1996). Milk fouling in heat exchangers. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, 144p, Netherlands.
- [17] Visser, J., Jeurnink, T.J.M. (1997). Fouling of heat exchangers in the dairy industry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14(4), 407-424.
- [18] Fryer, P.J. (1989). The uses of fouling models in the design of food process plant. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 42(1), 23-29.
- [19] Belmarbeiny, M.T., Gotham, S.M., Paterson, W.R., Fryer, P.J. (1993). The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. *Journal of Food Engineering*, 19(2), 119-139.
- [20] Fryer, P.J., Robbins, P.T., Green, C., Schreier, P.J.R., Pritchard, A.M., Hasting, A.P.M. (1996). A statistical model for fouling of a plate heat exchanger by whey protein solution at UHT conditions. *Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part C*, 74(4), 189-199.
- [21] Davies, T.J., Henstridge, S.C., Gillham, C.R., Wilson, D.I. (1997). Investigation of whey protein deposit properties using heat flux sensors. *Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part C*, 75(2), 106-110.
- [22] Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M., Wilson, D.I. (1999). Cleaning-in-place of whey protein fouling deposits: Mechanisms controlling cleaning. *Food and Bioproducts Processing*, 77(2), 127-136.
- [23] Xin, H., Chen, X.D., Özkan, N. (2002). Whey protein-based gel as a model material for studying initial cleaning mechanisms of milk fouling. *Journal of Food Science*, 67(7), 2702-2711.
- [24] Fickak, A., Al-Raisi, A., Chen, X.D. (2011). Effect of whey protein concentration on the fouling and cleaning of a heat transfer surface. *Journal of Food Engineering*, 104(3), 323-331.
- [25] Tuan, T.H. (2001). Fouling of stainless steel

- surfaces by heated whole milk. Ph.D. Thesis, Massey University, Palmerston North, 212p, New Zealand.
- [26] Bennett, H.A.E. (2007). Aspects of fouling in dairy processing. Ph.D. Thesis, Massey University, Palmerston North, 172p, New Zealand.
- [27] Walstra, P., Jenness, R., Badings, H.T. (1994). *Dairy Chemistry and Physics*. Wiley, New York.
- [28] Burton, H. (1961). A laboratory method for the investigation of milk deposits on heat exchange surfaces. *Journal of Dairy Research*, 28(3), 255-263.
- [29] Burton, B.Y.H. (1965). A method for studying the factors in milk which influence the deposition of milk solids on a heated surface. *Journal of Dairy Research*, 32, 65-78.
- [30] Gordon, K.P., Hankinson, D.J., Carver, C.E. (1968). Deposition of milk solids on heated surfaces. *Journal of Dairy Science*, 51(4), 520-526.
- [31] Walstra, P., Geurts, T.J., Noomen, A., Jellema, A., Boekel, M.A.J.S. (2005). *Dairy technology: Principles of milk properties and processes*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- [32] Corredig, M., Dalgleish, D., (1996). Effect of temperature and pH on the interactions of whey proteins with casein micelles in skim milk. *Food Research International*, 29(1), 49-55.
- [33] Skudder, P.J., Brooker, B.E., Bonsey, A.D., Alvarez-Guerrero, N.R. (1986). Effect of pH on the formation of deposit from milk on heated surfaces during ultra high temperature processing. *Journal of Dairy Research*, 53, 75-87.
- [34] Kumar, C.G., Anand, S. (1998). Significance of microbial biofilms in food industry: A review. *International Journal of Food Microbiology*, 42(1), 9-27.
- [35] Yoo, J.A., Hardin, M.T., Chen, X.D. (2006). The influence of milk composition on the growth of *Bacillus stearothermophilus*. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 96-102.
- [36] Mozes, N., Marchal, F., Hermesse, M.P., Van Haecht, J.L., Reuliaux, L., Leonard, A.J. (1987). Immobilization of microorganisms by adhesion: Interplay of electrostatic and nonelectrostatic interactions. *Biotechnology and Bioengineering*, 30(3), 439-450.
- [37] Swartzel, K.R. (1983). Tubular heat exchanger fouling by milk during ultra high temperature processing. *Journal of Food Science*, 48(5), 1507-1511.
- [38] Rakes, P.A., Swartzel, K.R., Jones, V.A. (1986). Deposition of dairy protein-containing fluids on heat exchange surfaces. *Biotechnology Progress*, 2(4), 210-217.
- [39] Jindal, S., Anand, S., Huang, K., Goddard, J., Metzger, L., Amamcharla, J. (2016). Evaluation of modified stainless steel surfaces targeted to reduce biofilm formation by common milk sporeformers. *Journal of Dairy Science*, 99(12), 9502-9513.
- [40] Yoon, J., Lund, D.B. (1994). Magnetic treatment of milk and surface treatment of plate heat exchangers: Effects on milk fouling. *Journal of Food Science*, 59(5), 964-980.
- [41] Britten, B.Y.M., Green, M.L., Boulet, M. (1988). Deposit formation on heated surfaces - effect of interface energetics. *Journal of Dairy Research*, 55, 551-562.
- [42] Prakash, S., Datta, N., Deeth, H.C. (2005). Methods of detecting fouling caused by heating of milk. *Food Reviews International*, 21(3), 267-293.
- [43] Withers, P. (1996). Ultrasonic, acoustic and optical techniques for the non invasive detection of fouling in food processing equipment. *Trends in Food Science and Technology*, 7, 293-298.
- [44] Riverol, C., Napolitano, V. (2005). Estimation of fouling in a plate heat exchanger through the application on neural networks. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80(5), 594-600.
- [45] Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M.R., Watkinson, A.P. (2011). Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies. *Heat Transfer Engineering*, 32(3-4), 189-196.
- [46] Malayeri, M.R., Watkinson, A.P., Confernces, E., Irsee, K., Rosmaninho, R., Rizzo, G. (2013). Anti-fouling stainless steel based surfaces for milk heating processes. *The Berkeley Electronic Press* Rp2, (16), 97-102.