



**FARKLI PÜSKÜRTME AÇISIYLA PÜSKÜRTÜLEREK ÜRETİLEN SÜT
TOZLARININ BAZI KALİTE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doğın Can SONGÜL

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2025

Bu tez çalışması 23.FEN.BİL.23 numaralı proje ile BAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI PÜSKÜRTME AÇISIYLA PÜSKÜRTÜLEREK
ÜRETİLEN SÜT TOZLARININ BAZI KALİTE
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Doğan Can SONGÜL

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Doğan Can SONGÜL tarafından hazırlanan “Farklı Püskürtme Açısıyla Püskürtülerek Üretilen Süt Tozlarının Bazı Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 02 / 10 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Senem GÜNER
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Durmuş SERT
NEÜ, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02 / 10 / 2025

Doğan Can SONGÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI PÜSKÜRTME AÇISIYLA PÜSKÜRTÜLEREK ÜRETİLEN SÜT TOZLARININ BAZI KALİTE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Doğan Can SONGÜL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ

Bu çalışmada, farklı püskürtme açılarında (15°, 30°, 45° ve 60°) sprey kurutma yöntemiyle üretilen süt tozu numunelerinin bazı fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, her bir numuneye nem, su aktivitesi, protein, yağ, kül, pH, titrasyon asitliği, HMF (hidroksimetilfurfural), yanmış partikül, renk (L*, a*, b*), DSC (termal özellikler), partikül büyüklüğü, yığın yoğunluğu, Carr indeksi, Hausner oranı, ıslanabilirlik, dağılılabilirlik, çözünebilirlik, köpürme kapasitesi, akış stabilitesi ve kek kuvveti analizleri uygulanmıştır.

Analiz sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerde nem ve su aktivitesi değerlerinin depolama açısından güvenli kabul edilen sınırlar ($\leq 5\%$ nem, düşük aw) içinde kaldığı belirlenmiştir. Bu bulgu, kurutma koşullarının etkin olduğunu ve mikrobiyal bozulma açısından risk oluşturmadığını göstermektedir. Protein, yağ, kül ve pH değerlerinde püskürtme açısına bağlı istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemesi, uygulanan prosesin süt bileşenlerinde yapısal bozulmaya yol açmadığını ortaya koymuştur. HMF ve yanmış partikül değerlerinde termal etkiden kaynaklı sınırlı artışlar tespit edilmiş olsa da bu artış endüstriyel limitleri aşmamış ve ürün kalitesi açısından sorun teşkil etmemiştir.

Fonksiyonel özellikler incelendiğinde püskürtme açısının, özellikle partikül morfolojisi ve rehidrasyon davranışı üzerinde belirleyici olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Geniş

püskürtme açıları (45° ve 60°) ile üretilen süt tozu örneklerinde daha gözenekli, daha iri ve düşük kompaktlığa sahip partikül yapıları oluşmuş, bu durum ıslanabilirlik sürelerinin kısalmasına, dağılıbilirlik ve çözünabilirlik değerlerinin artmasına ve akış kabiliyetinin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Buna karşılık dar açılarla (15° ve 30°) üretilen numunelerde daha kompakt ve daha küçük partiküller oluşmuş, bu da çözünme hızını yavaşlatmış, yığın yoğunluğunu artırmış ve partiküller arası yapışmanın artmasına bağlı olarak akışkanlık değerlerini düşürmüştür.

Partikül dağılım sonuçları, açı genişledikçe $D[4,3]$, $D[3,2]$ ve $d(0.9)$ değerlerinin yükseldiğini doğrulamış; bu durum, atomizasyon geometrisinin partikül büyüklüğü ve gözeneklilik üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. DSC analizleri sonucunda, cam geçiş sıcaklığı (T_g), denatürasyon sıcaklığı (T_d) ve denatürasyon entalpisi (ΔH) değerlerinin süt proteinlerinin yapısal stabilitesinin korunduğunu ortaya koyduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, püskürtme açısının süt tozunun fiziksel, yapısal ve fonksiyonel özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir proses parametresi olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, sprey kurutma proses kontrolünde yalnızca sıcaklık ve besleme oranı gibi değişkenlerin değil, aynı zamanda atomizasyon açısının da ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

2025, xiii + 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Süt tozu, Sprey Kurutma, Püskürtme Açısı, Kalite Parametreleri.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DETERMINATION OF SOME QUALITY PARAMETERS OF MILK POWDERS PRODUCED BY SPRAYING WITH DIFFERENT SPRAYING ANGLES

Doğın Can SONGÜL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Food Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Mehmet KILINÇ

In this study, the physicochemical and functional properties of milk powder samples produced at different spray angles (15°, 30°, 45° and 60°) by spray drying were investigated. For this purpose, each sample was analyzed in terms of moisture, water activity, protein, fat, ash, pH, titratable acidity, HMF (hydroxymethylfurfural), scorched particle content, color parameters (L*, a*, b*), DSC (thermal properties), particle size distribution, bulk density, Carr index, Hausner ratio, wettability, dispersibility, solubility, foaming capacity, flow stability, and cake strength.

The results showed that moisture and water activity values of all samples remained within safe storage limits ($\leq 5\%$ moisture, low aw), indicating efficient drying and microbiological stability. No statistically significant differences were observed between the spray angles for protein, fat, ash or pH values, confirming that the drying conditions did not cause structural deterioration in the milk components. Although slight increases in HMF and scorched particles were detected due to thermal exposure, all results remained below industrial quality limits and did not pose a risk for product safety.

Evaluation of the functional properties demonstrated that spray angle was a determining factor, particularly affecting particle morphology and rehydration behavior. Samples produced at wider angles (45° and 60°) exhibited larger and more porous particles with lower compactness, resulting in shorter wetting time, improved dispersibility and solubility, and better flow characteristics. Conversely, samples produced at narrower

angles (15° and 30°) formed smaller and more compact particles, which increased bulk density while negatively affecting solubility and flowability due to greater particle–particle adhesion.

Particle size distribution results confirmed that D[4,3], D[3,2] and d(0.9) values increased proportionally with wider spray angles, indicating a direct relationship between atomization geometry and particle structure. DSC analysis revealed that glass transition temperature (T_g), denaturation temperature (T_d), and denaturation enthalpy (ΔH) values remained within acceptable ranges, showing that the thermal stability of milk proteins was preserved.

In conclusion, the findings demonstrated that spray angle is a critical process parameter directly influencing the physical, structural, and functional characteristics of milk powder. The study emphasizes that, in addition to temperature and feed rate, atomization angle must also be considered during spray drying optimization, as it plays a decisive role in rehydration performance, flow behavior, and storage stability.

2025, xiii + 62 pages

Keywords: Milk Powder, Spray Drying, Spray Angle, Quality Parameters.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını 23.FEN.BİL.23 proje ile AKÜ-BAPK tarafından destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesine teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana yol gösteren, çalışmamın her aşamasında desteğini hissettiren tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan sevgili aileme, özellikle maddi ve manevi varlıklarıyla yanımda olan anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Doğan Can SONGÜL
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Sütün Tanımı, İçeriği ve Önemi	3
2.2 Süt Tozu.....	3
2.3 Süt Tozlarının Özellikleri	4
2.3.1 Nem İçeriği.....	4
2.3.2 Higroskopiklik	5
2.3.3 Serbest Yağ Seviyeleri	6
2.3.4 Aglomerasyon	6
2.3.5 Partikül Şekli ve Boyutu	7
2.3.6 Yoğunluk.....	7
2.3.7 Gözeneklilik	8
2.3.8 Akışkanlık	8
2.3.9 Islanabilirlik	9
2.3.10 Dağılabilirlik	9
2.3.11 Çözünabilirlik.....	10
2.3.12 Köpürme.....	11
2.3.13 Isı Stabilitesi.....	11
2.4 Gıdaların Muhafaza Edilmesi	12
2.4.1 Kurutma Teknolojisi	12
2.4.2 Kurutma Mekanizması	13
2.4.3 Gıda Kurutma Yöntemleri.....	14
2.5 Sütün Kurutulması	14
2.5.1 Püskürtme (Sprey) Metoduyla Kurutma	15

2.5.1.1 Atomizer.....	16
2.5.1.2 Kurutma Hücresi	17
2.5.1.3 Siklon Toplayıcılar ve Torba Filtreler.....	18
3. MATERYAL ve METOT	20
3.1 Materyal	20
3.2 Yöntem.....	20
3.2.1 Süt Tozu Örneklerinin Üretimi	20
3.3 Süt Tozlarına Uygulanan Analizler	22
3.3.1 Kimyasal Analizler.....	22
3.3.1.1 Nem	22
3.3.1.2 Protein	22
3.3.1.3 Kül.....	23
3.3.1.4 Yağ	23
3.3.1.5 pH.....	24
3.3.1.6 Titrasyon Asitliği.....	24
3.3.1.7 Hidroksimetilfurfural (HMF)	24
3.3.1.8 Renk Analizi.....	25
3.3.1.9 Yanmış Parçacık Analizi	25
3.3.1.10 Su Aktivitesi	26
3.3.2 Fonksiyonel Özelliklerin Belirlemesi İçin Analizler	26
3.3.2.1 Islanabilirlik.....	26
3.3.2.2 Dağılabilirlik	26
3.3.2.3 Çözünabilirlik.....	27
3.3.2.4 Köpük Oluşturma Kapasitesi ve Stabilitesi.....	27
3.3.2.5. Partikül Büyüklüğü Ölçümü.....	27
3.3.2.6 Termal Özelliklerin Belirlenmesi (DSC Analizi).....	28
3.3.2.7 Gevşek Yoğunluk (ρ_b) Tayini	29
3.3.2.8 Sıkıştırılmış Yoğunluk (ρ_t) Tayini	29
3.3.2.9. Carr İndeksi (CI) ve Hausner Oranı (HR)	30
3.3.2.10 Kek Kuvveti (Cake Strength) Ölçümü	31
3.3.2.11 Kohezyon İndeksi (Cohesion Index).....	31
3.3.2.12 Akış Stabilitesi	32
3.3.2.13 İstatistiksel Analiz	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	33

4.1 Nem (%).....	33
4.2 pH.....	34
4.3 Asitlik (% laktik asit eşdeğeri).....	34
4.4 Yağ (%).....	34
4.5 Protein (%).....	35
4.6 Kül (%)	35
4.7 Su Aktivitesi (aw)	35
4.8 HMF (mg/kg).....	36
4.9 Renk Analizi (L, a, b*)**	36
4.9.1 L (Açıklık)*.....	37
4.9.2 a (Kırmızı-Yeşil Eksen)*	37
4.9.3 b (Sarı-Mavi Eksen)*	38
4.10 Süt Tozlarının Akış Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	38
4.10.1 Sıkıştırılmış Yoğunluk (Bulk Density, g/cm ³)	39
4.10.2 Gerçek Yoğunluk (True Density, g/cm ³)	39
4.10.3 Carr İndeksi (%).....	39
4.10.4 Hausner Oranı	40
4.10.5. Yanmış parçacık analizi	40
4.11 Süt Tozlarının Termal Özelliklerinin Değerlendirilmesi (DSC Analizi).....	41
4.11.1 Cam Geçiş Sıcaklığı – Tg (°C)	41
4.11.2 Denatürasyon Sıcaklığı – Td (°C).....	42
4.11.3 Denatürasyon Entalpisi – ΔH (J/g)	42
4.12 Rehidratasyon ve Akış Özelliklerinin Değerlendirilmesi	43
4.12.1 Çözünabilirlik (%).....	43
4.12.2 Dağılabilirlik (%)	44
4.12.3 Islanabilirlik (sn)	44
4.12.4 Köpük Oluşturma (%).....	44
4.12.5 Kek Kuvveti (g) ve Ortalama Kek Kuvveti (g).....	45
4.12.6 Kohezyon İndeksi.....	45
4.12.7 Akış Stabilitesi	45
4.13 Parçacık Büyüklüğü ve Dağılım Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	46
4.13.1 Span Değeri	46
4.13.2 D[4,3] (Hacimsel Ortalama Çap, μm).....	47
4.13.3 D[3,2] (Yüzey Alanı Ağırlıklı Ortalama Çap, μm).....	47

4.13.4 Uniformity (Birimlik İndeksi).....	47
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	49
5.1 Sonuçlar	49
5.2 Öneriler	50
6. KAYNAKÇA	52



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat derece
a*	(a+) kırmızı ve (a-) yeşil renk değeri
a _w	Su aktivitesi
b*	(b+) sarı ve (b-) mavi renk değeri
cm ²	Santimetrekaare
D _{3,2}	Yüzey ağırlıklı ortalama
D _{4,3}	Hacimsel ortalama çap
D ₁₀	%10 kümülatif yüzdeye denk gelen boyut
D ₅₀	Hacme dayalı medyan
D ₉₀	%90 kümülatif yüzdeye denk gelen boyut
dk	Dakika
g	Gram
H ₂ SO ₄	Sülfirik asit
kg	Kilogram
L*	(0) siyah ve (100) beyaz renk değeri
mg	Miligram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
N	Normalite
NaOH	Sodyum hidroksit
rpm	Dakikadaki devir sayısı
s	Saniye
µm	Mikrometre

Kısaltmalar

AOAC	Association of Official Analytical Chemists
ADPI	Amerikan Süt Ürünleri Enstitüsü
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
GYG	Gevşek yığın yoğunluğu
LA	Laktik asit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SGG	Sıkıştırılmış yığın yoğunluğu
TSYA	Toplam serbest yağ asitliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kurutma hızının kurutma süresi ile değişimi.....	13
Şekil 2.2 Püskürtülerek kurutma işleminin bileşenleri.....	15
Şekil 2.3 Siklon tipi kollektör.....	19
Şekil 3.1 Süttozu üretim akış şeması.....	21
Şekil 3.2 Süt tozları için görünümüne göre yanık parçacıkların değerlendirme skalası.....	25



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Süt tozlarına ait fizikokimyasal analiz sonuçları.....	33
Çizelge 4.2 Süt tozlarına ait renk değerleri.....	36
Çizelge 4.3 Süt tozlarına ait fiziksel özellikler.....	38
Çizelge 4.4 Süt tozlarına ait DSC değerleri.....	41
Çizelge 4.5 Süt tozlarına ait fonksiyonel özellik değerleri.....	43
Çizelge 4.6 Süt tozlarına ait parçacık dağılım değerleri.....	46



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Nozullu püskürtücü.....	17
--	----



1. GİRİŞ

Süt, sayıları 4.500 civarında olan tüm memeli türlerinin dişileri tarafından yavrularına tam besin sağlamak için üretilen, çeşitli besin maddeleri ve biyoaktif bileşenleri içeren oldukça besleyici bir sıvıdır (Fox 2008).

Dengeli ve besleyici bir beslenme için gerekli olmasıyla beraber küresel süt üretiminin ana kaynağı olan inek sütü, ortalama olarak %87 su ve %13 kuru maddeden oluşmaktadır. Sütün kuru madde içeriği yaklaşık %3,7 yağ ve %4,9 karbonhidrat, %3,3 çözünür (peynir altı suyu proteinleri) ve çözünmez proteinler (kazeinler) ve %0,8 mineraller ve vitaminler içerir. Bu sebeple süt, zamanın başlangıcından bu yana dünyanın pek çok farklı ülkesinde insan beslenmesinde önemli bir rol oynamıştır (Haug vd. 2007, Foroutan vd. 2019, Roy ve Ye 2020). Süt ayrıca çeşitli gıda maddelerinin üretiminde (süt tozu, peynir, tereyağı, ayran vb.) ve bazı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Harding 1995).

Çeşitli kaynaklardan bünyesine nüfus eden mikropları hızlı ve verimli bir şekilde büyümesini desteklemesi sütün, yüksek oranda bozulabilir olmasına sebebiyet vermekte ve bu durum dezavantaj olarak kabul edilmektedir (Priyanka vd. 2021). Bu dezavantajın önüne geçmek için 19. yüzyılın başlarında taze sütlerin suyunun mümkün olduğu kadar uçurulması (en fazla %5 nem içeriği kalacak şekilde) ile ilk defa Fransa’da ticari olarak süt tozu üretilmiştir (Yetişemeyen 1983).

Püskürtmeli kurutma, savaşlar sırasında gıda ve diğer malzemelerin nakliyesi için ağırlığını azaltma ihtiyacı nedeniyle ortaya çıkmıştır. Patenti 1872 yılında Samuel Percy tarafından alınmış ve ilk olarak 1920’lerde süt tozu ve deterjan üretimi için endüstride kullanılmıştır (Killeen 2000, Yetişen 2021). Süt ürünleri endüstrisinde, diğer kurutma işlemlerinin yüksek ekonomik maliyeti nedeniyle ürünlerin kurutulması ve toz haline getirilmesi için 1970’li yıllardan itibaren sprey kurutma metodu en çok tercih edilen metot haline gelmiştir (Chegini ve Teheri 2013, Nireesha vd. 2013).

Püskürtmeli kurutma işlemi, yüksek yüzey-kütle oranına sahip ideal olarak eşit boyutlu

damlacıklar içeren kurutma odasında ısıtılmış bir gazın atomize bir sıvı ile temasıyla gerçekleşir ve bu süreç homojen ve hızlı bir şekilde çözücünün buharlaşmasını sağlar. Kurutma, kurutma havası için 180-230°C sıcaklıkta 3-10 s (saniye) gibi kısa bir süre içinde gerçekleşirken, ürün sıcaklığı 50-70°C civarında kalır (Megep 2012, Yetişen vd. 2021).

Hava giriş ve çıkışı, besleme girişi ve atomizer gibi püskürtmeli kurutucuyu oluşturan parçaların çeşitli parametrelerinin (sıcaklık, besleme hızı, atomizör çapı vb.) nihai ürünün kalitesini önemli ölçüde etkilediği kabul edilmektedir. Ayrıca süt tozundan elde edilen gıdaların genellikle taze ürünlerden daha düşük kalitede (ve dolayısıyla daha düşük değerli) olduğu düşünülmektedir (Sharma vd. 2012).

Kurutma performansını ve elde edilen tozun özelliklerini etkileyen birçok proses parametresi bulunmaktadır. Giriş ve çıkış hava sıcaklıkları, besleme hızı, süt konsantrasyonu, atomizasyon basıncı ve özellikle püskürtme açısı, ürünün fizikokimyasal, fonksiyonel ve morfolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Nijdam ve Langrish 2006, Saha vd. 2019). Püskürtme açısı, atomizerden çıkan sıvı damlacıklarının dağılımını, partikül büyüklüğünü, gözenekliliğini ve sonuç olarak ürünün akışkanlık, ıslanabilirlik, çözünabilirlik ve rehidrasyon gibi fonksiyonel özelliklerini belirleyen kritik bir parametredir (Nguyen vd. 2017, Fang vd. 2007).

Bu çalışmada, farklı püskürtme açılarında üretilen süt tozlarının fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri belirlenmiş ve püskürtme açısının ürün kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, süt tozu üretiminde püskürtme açısının optimize edilmesiyle ürünün rehidrasyon davranışını, akışkanlığını ve genel depolama stabilitesini geliştirmektir. Böylece elde edilen bulgular, süt tozu endüstrisinde üretim parametrelerinin iyileştirilmesine ve daha kaliteli, fonksiyonel açıdan üstün ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Sütün Tanımı, İçeriği ve Önemi

Süt, dişi memelilerde meme bezlerinin salgıladığı ve çok sayıda besin maddesi ve biyoaktif bileşen içeren karmaşık bir besindir (Foroutan vd. 2019). Yağ emülsiyon, protein kolloidal dispersiyon, laktoz ve mineral maddeler ise gerçek çözelti olarak bulunur ve sütü polidispers bir karışım haline getirir. Diğer gıda maddelerinin üretiminde ve bazı sanayi dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Çakmakçı vd. 1998, Metin 2001).

Yeterli protein alımı insan sağlığını korumak için çok önemlidir (Wu 2016) ve süt, insan beslenmesinde vücut için gerekli amino asitleri sağlayabilen değerli, sindirilebilir ve biyolojik olarak kullanılabilir proteinleri bünyesinde bulundurur. Ayrıca süt, immünolojik ve anti-inflamatuar özellikleri nedeniyle insan beslenmesinde oldukça elzemdir. Bahsedilen özellikler, sütü tüm dünyada yüksek taleple tüketilen en besleyici tek gıda haline getirmiştir (Pereira 2014, Foroutan vd. 2019, Priyanka vd. 2021, Fantuz vd. 2022).

2.2 Süt Tozu

Bir süt ürünü olan süt tozu, sıvı sütteki suyun çoğunun buharlaştırılması işlemiyle üretilir. Çiğ süt, uygun koşullarda saklandığında yalnızca iki ila üç günlük bir depolama ömrüne sahipken, sütün süt tozuna dönüştürülmesi, raf ömrünün uzamasına ve ortam sıcaklığında bile önemli bir kalite kaybı olmadan bir yıla kadar saklanmasına olanak tanır. Anlaşılabacağı üzere bu işlem sütün dayanıklılığını artırmakta ve süt üretiminin bol olduğu dönemlerde süt verimini ve kalitesini korumaktadır (Sharma vd. 2012 ve Fox ve McSweeney 2015).

Süt tozları sadece rekombinasyon veya rekonstitüsyon için değil, aynı zamanda hazır gıdalar, bisküviler, kekler, hamur işleri, bebek mamaları, çikolata kremaları, evcil hayvan mamaları, dondurma, şekerleme, peynir, yoğurt ve daha fazlası dahil olmak

üzere çeşitli endüstrilerde kullanılan, çok yönlü bir gıda bileşeni olarak uygulanmak üzere işsel fonksiyonel özelliklerinden yararlanılan bir üründür (Işıl vd. 2009, Sharma vd. 2012).

2.3 Süt Tozlarının Özellikleri

Süt tozunun fonksiyonel özellikleri, rekombinasyon ve gıda ürünlerinin üretiminde kullanıldığı için çok önemlidir. Bunlar arasında sütün fiziksel ve kimyasal etkenlerin sonucu olan birçok özellik yer alır (Sharma vd. 2012).

2.3.1 Nem İçeriği

Süt tozunun nem içeriği, raf ömrünü ve depolama stabilitesini yöneten kritik bir özelliktir (Saha vd. 2019). Elde edilen tozun nem içeriği, toplam kuru madde ve sıcaklık gibi besleme özellikleri, atomizasyon koşulları ve kurutma havasının koşulları (kurutma odası veya akışkan yatakların giriş ve çıkış sıcaklığı) gibi faktörlerin bir kombinasyonundan etkilenir (Straatsma vd. 1991, Saha vd. 2019).

Optimum kalite ve stabiliteyi sağlamak için süt tozlarında maksimum %5 nem içeriğinin korunması zorunludur. Bu sınırın aşılması, mikrobiyal gelişimi teşvik ederek ürünün raf ömrünü kısaltabilir. Aynı zamanda Maillard reaksiyonları, laktoz kristalleşmesi, protein denatürasyonu ve lipit oksidasyonu gibi kimyasal bozunma süreçlerini hızlandırarak süt tozunun renk, tat ve besin değerinde istenmeyen değişikliklere yol açabilir (Caric 1994, Skanderby vd. 2009, Hazlett vd. 2021).

Yüksek nem, partiküller arasındaki yapışma kuvvetlerinin artmasında önemli bir rol oynamaktadır ve bu da tozdaki akışkanlık özelliğini olumsuz etkiler (Palzer 2005, Hazlett vd. 2021). Bununla beraber yapışkanlığın artması depolama sırasında ciddi sorunlara yol açabileceği unutulmamalıdır (Saha vd. 2019).

Düşük nem içeriği, süt tozunun yağ oksidasyon oranını artırarak kalitesini düşürebilir (Van ve Jans 1991). Ayrıca, düşük nem seviyeleri partiküllerin kırılgenliğini artırır ve

tozun aşırı derecede higroskopik hale gelmesine ve dolayısıyla topaklanma riskinin yükselmesine neden olabilir (Saha vd. 2019, Hazlett vd. 2021). Bununla birlikte, bahsi geçen durum süt tozunun lezzet, aroma ve renk kalitesini düşürerek ürünün duyu özelliklerini olumsuz etkileyebilir (Saha vd. 2019).

2.3.2 Higroskopiklik

Süt tozu partiküllerinin çevresel nemle etkileşime girme potansiyeli yani çevresindeki havadan nem emme eğilimi olarak tanımlanan higroskopiklik, genellikle bilinen bir nem seviyesindeki havanın (genellikle 20°C'de %80 nem) dengeye ulaşılana kadar bir tozun üzerinden geçirilmesi ve ardından tozun ağırlık artışının ölçülmesiyle belirlenir (Tamime 2009, Fitzpatrick vd. 2016).

Higroskopik eğilimi yüksek olan süt tozları, depolama sırasında ortamdan nem alarak partiküllerinin yüzeyinde bir nem tabakası oluşturur. Bu nem birikimi, tozun suyla temas ettiğinde ıslanma ve çözünme süreçlerini olumsuz yönde etkiler; suyun partiküllerin içine nüfuz etmesini engelleyerek rehidrasyon süresini uzatır ve homojen su emilimini zorlaştırır. Ayrıca, yüksek higroskopiklik, tozun topaklanma riskini artırarak ürünün akışkanlığını ve genel fonksiyonel kalitesini düşürür. Süt tozunun optimum rehidrasyon performansının sağlanabilmesi için higroskopiklik kontrolünün, üretim ve depolama koşullarının titizlikle ayarlanması gerekmektedir. (Fitzpatrick vd. 2016, Selomulya ve Fang 2024).

Yüzey bileşenlerinin, özellikle de laktoz, yağ ve proteinin higroskopik davranış üzerinde önemli etkileri olduğu saptanmıştır. Ayrıca süt tozu gibi gıda tozlarının higroskopik davranışı, üretim sırasında elde edilen nem içeriği, partikül boyutu ve yüzey bileşimi gibi faktörlerden kaynaklanır. Düşük nem içeriğine sahip tozların mikroyapısında daha az su molekülü bulunmasına rağmen, çevresel nemle temas ettiklerinde hızlıca su çekme eğilimi gösterebilir. Bu durum, toz partiküllerinin yüzeyinde suyun yoğunlaşmasına ve topaklanma oluşmasına yol açar; dolayısıyla, rehidrasyon sırasında homojen bir çözelti elde edilmesi zorlaşır (Tamime 2009, Fitzpatrick vd. 2016, Selomulya ve Fang 2024).

Yüzeyde yağ veya benzeri hidrofobik bileşenlerin birikmesi, suyun partiküller tarafından emilimini engelleyerek higroskopik davranışı azaltabilir. Ayrıca küçük partiküller daha büyük bir yüzey alanına sahiptir ve bu da çevresel nemin daha fazla çekilmesine neden olur. Bu olgu, tozun ıslanma süreci üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir. Bu durumlar, depolama koşulları ve uygulanan işleme teknikleriyle de yakından ilişkilidir; kontrollü kurutma ve uygun depolama koşullarının sağlanması, süt tozunun higroskopik davranışının minimize edilmesinde önemli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sprey kurutma işlemi sırasında kullanılan sıcaklık, partiküllerin yüzey yapısını ve laktozun amorf ya da kristalize olma durumunu etkiler. Yüksek kurutma sıcaklıklarının laktozun kristalleşmesini teşvik ederek higroskopiklikte bir azalmaya yol açabileceği gösterilmiştir. Tersine, düşük kurutma sıcaklıkları daha higroskopik bir yapıyla sonuçlanabilir. Topaklanmayı önleyici maddelerin eklenmesi veya süt tozunu korumak için özel paketlenme yöntemlerinin uygulanması higroskopiklikle ilgili sorunları hafifletir (Fitzpatrick vd. 2016, Selomulya ve Fang 2024).

2.3.3 Serbest Yağ Seviyeleri

Serbest yağ seviyesindeki bir artış tozu oksidasyona eğilimli hale getirebilir ve tozun yeniden ıslanma özelliklerini zayıflatır ve tozun akışkanlığını etkileyebilir. Konsantrenin homojenizasyonu serbest yağın azaltılmasına yardımcı olur. Ancak püskürtmeli kurutucuda daha yüksek çıkış havası sıcaklığı, daha küçük nozullar ve daha yüksek nozul basıncının yüksek serbest yağ seviyelerine yol açabileceği ileri sürülmüştür (Twomey ve Keogh 1998, Kelly vd. 2002).

2.3.4 Aglomerasyon

Süt tozunun fiziksel özellikleri, aglomerasyon olarak bilinen, birincil partiküllerin birbirine sabitlendiği ve böylece daha büyük gözenekli ikincil partiküllerin (konglomeralar) olduğu bu süreçten önemli ölçüde etkilenir (Palzer 2005). Bahsi geçen durum, tozun çözünme özelliklerini artırarak hem perakende satış hem de endüstriyel kullanım için ideal hale getirir. Özellikle, aglomere edilmiş tozlar, suda hızlı

Çözünme sağlayarak tüketici deneyimini ve endüstriyel süreçlerin verimliliğini artırır. Buna karşın, aglomerasyonun bazı dezavantajları da vardır. Bu özellik partiküllerin yapışmasına ve topaklanmasına neden olarak akışkanlık kaybına yol açabilir. Ayrıca daha büyük partiküllerin oluşturduğu düşük yığın yoğunluğu, paketleme verimliliğini düşürür ve depolama ile nakliye maliyetlerini artırabilir (Thomas vd. 2004, Skanderby vd. 2009, Dhanalakshmi vd. 2011).

2.3.5 Partikül Şekli ve Boyutu

Bir toz partikülünün morfolojisi hammadde türüne, ısıt işlemlerine ve diğer bileşim ve işleme parametrelerine bağlıdır (Sharma vd. 2012). Parçacıkların düzensiz şekli aralarındaki sürtünmeyi artırarak sıkışmayı kolaylaştırır. Bu da tozun akışkanlık özellikleri üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir (Hazlett vd. 2021).

Süt tozunun partikül boyutunun, görünümü, sulandırma özellikleri ve akış özellikleri de dahil olmak üzere fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. Bu olgu, sütün doğal özelliklerinden, kullanılan işleme koşullarından ve kurutma işlemi sırasında kullanılan ekipman türünden etkilenmektedir. Püskürtmeli kurutmaya tabi tutulan toz partikülleri küresel şekildedir ve çapları 10 ile 250 µm (mikrometre) arasında değişmektedir. Yağsız süt tozlarının ortalama partikül boyutu 230 ile 250 µm arasında değişmektedir (Tuohy 1989). Hızlı dağılım elde etmek amacıyla, 150 ile 200 µm arasında değişen boyutta partiküllerin kullanılması gerekmektedir. Caric'in (1994) gösterdiği gibi, aglomere süt tozu partikülleri daha büyük ve daha düzensiz şekildedir. Büyük partikül boyutuna sahip tozun üstün dağılılabirlik sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, küçük partiküllerin (<90 µm) yüzdesi arttıkça tozun dağılılabirliğinin azaldığı bilinmektedir (Singh ve Newstead 1992).

2.3.6 Yoğunluk

Yığın yoğunluğu ekonomik, ticari ve işlevsel açıdan önemli bir özelliktir. Uzun mesafelere toz nakliyesi bağlamında, üreticiler nakliye hacmini en aza indirmek için yüksek yığın yoğunluğuna öncelik verirler. Bunun nedeni, yüksek yığın yoğunluğunun

gerekli paketleme malzemesi ve depolama alanı miktarını azaltmasıdır. Bununla birlikte, bazı tozlar için, estetik amaçlarla veya hızlı toz üretimini kolaylaştırmak için kasıtlı olarak düşük bir yığın yoğunluğu geliştirilir (Skanderby vd. 2009).

Saha ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada yığın yoğunluğu ile atomizasyon hava basıncı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ve atomizasyon hava basıncındaki artışın yığın yoğunluğunda artışa neden olduğunu göstermiştir. Artan atomizasyon basıncının partikül boyutunda küçülme ve partikül kompaktlığında artışa yol açtığı ve böylece yığın yoğunluğunu artırdığı gösterilmiştir. Sonuçta ortaya çıkan yüksek yoğunluklu süt tozları, alan gereksinimlerinde bir azalma sergiler ve böylece lojistik bir avantaj sağlar. Bununla birlikte, aşırı sıkıştırılmış tozların çözünürlüğü tehlikeye atabileceğine dikkat etmek önemlidir.

2.3.7 Gözeneklilik

Gözeneklilik, partiküllerin toplam hacmi içindeki boşluk oranı olarak tanımlanır ve suyun partikül içerisine nüfuz etme hızını belirler (Kim vd. 2002, Nguyen vd. 2017). Düşük gözenekliliğe sahip partiküller daha uzun sürede ıslanmakta ve çözünmektedir. Sprey kurutma işlemi sırasında sıcaklık ve besleme oranı gibi parametrelerin bahsi geçen özelliği önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır (Kim vd. 2002). Artan giriş havası sıcaklığı ve besleme konsantrasyonunun daha yüksek gözeneklilik ve partiküller arası hava hacmi ile sonuçlandığını gözlemlemiştir. Bu olgu, partiküller içinde daha gözenekli yapıların oluşmasına yol açan hızlandırılmış kurutma sürecine atfedilebilir. Bu da rehidrasyon kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, yığın yoğunluğunu ve akışkanlığı da etkileyebilir (Nguyen vd. 2017).

2.3.8 Akışkanlık

Akışkanlık, partiküllerin serbestçe hareket edebilme kabiliyeti olarak tanımlanır ve ürünün depolanması, taşınması ve işlenmesinde kritik bir faktördür. Süt tozunun akışkanlığı partikül boyutu, yüzey yapısı, nem içeriği ve serbest yağ miktarı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Thomas 2004). İyi akış özelliklerine sahip tozlar,

büyük aglomeralara ve az miktarda küçük partiküllere sahip olanlardır (Sharma vd. 2012). Küçük partikül boyutu, daha fazla yüzey alanı sağlayarak partiküllerin birbirine yapışmasına neden olur ve bu da akışkanlığı olumsuz etkiler (Hazlett vd. 2021). Artan nemin partiküller arasındaki yapışmayı artırarak serbest hareketlerini engellediği bilinmektedir. Akışkanlığı artırmak için, aglomerasyon ve granülasyon gibi süreçler, partiküllerin yüzeyinin homojenliğini ve pürüzsüzlüğünü sağlamak için kullanılabilir. Ek olarak, sıcaklık ve nem seviyeleri gibi depolama koşullarının süt tozunun akışkanlığının korunmasında çok önemli bir rol oynadığını belirtmek önemlidir (Üçüncü 2010).

Saha ve diğerlerine (2019) göre, püskürtmeli kurutma işlemi sırasında atomizasyon hava basıncındaki bir artış, daha düzgün ve yuvarlak şekilli partiküllerin oluşmasına yol açar. Bu da elde edilen tozun akışkanlığını artırır.

2.3.9 Islanabilirlik

Islanabilirlik, belirli bir miktardaki tozun belirli bir sıcaklıktaki suya yerleştirildiğinde tamamen ıslanması için gereken süre olarak tanımlanır ve bu özellik çözünürlüğün belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar (Nguyen vd. 2017, Lannes ve Gómez 2020). Genel olarak, toz partiküllerinin ıslanma özelliklerini belirleyen özellikler giriş havası sıcaklığı, besleme konsantrasyonu, partikül boyutu, yoğunluk, gözeneklilik, yüzey yükü, yüzey alanı, yağ içeriği, amfipatik maddelerin varlığı ve yüzey aktivitesidir (Kim vd. 2002, Nguyen vd. 2017). Giriş havası sıcaklığındaki ve besleme konsantrasyonundaki artışın ıslanma süresinde artışa, yani ıslanabilirlikte azalmaya neden olduğunu kanıtlanmıştır (Nguyen vd. 2017). Yüksek yağ içeriği, suyun partiküllere nüfuz etmesini zorlaştırırken, düşük yağ içeriği ıslanmayı kolaylaştırmaktadır. Islanabilirliği artırmak için partikül yüzey alanının artırılması ve aglomerasyon tekniklerinin kullanılması önerilmektedir (Fang vd. 2007).

2.3.10 Dağılabilirlik

Dağılabilirlik terimi, tozların suda dağılma kolaylığını ifade eder ve çözünebilir katı

madde yüzdesi cinsinden ifade edilir (Tuohy 1989). Süt tozunun suda homojen bir şekilde dağılması tüketiciler için çok önemli bir işlevsel özelliktir (Saha vd. 2019). Süt tozu partiküllerinin yüzey morfolojisinin ve bileşimlerinin dağılılabirlik üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle düzensiz partikül yapısına sahip tozların su içinde daha zor dağıldığı ve çökelti oluşturma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Süt tozunun dağılılabirliğini artırmak için üretim sürecinde sprey kurutma tekniklerinin optimize edilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Fang vd. 2007).

2.3.11 Çözünabilirlik

Çözünürlük, süt tozu partiküllerinin su ile temas ettiğinde tamamen çözünerek homojen bir çözelti oluşturma kabiliyetini ifade eder. Aynı zamanda bu özellik ürün kalitesi için kritik bir parametredir ve tüketici memnuniyeti ile endüstriyel uygulamaların önemli bir göstergesi olarak kabul edilir (Börjesson vd. 2013).

Çözünme süreci partikül boyutu, yüzey morfolojisi ve bileşimi, laktik asit varlığı, sütün ısı işleme tabi tutulması, sprey kurutma türü, tuz iyonlarının miktarları ve üretim öncesinde süte ısı stabilize edici bir maddenin eklenmesi gibi parametrelere bağlıdır. (Singh ve Newstead 1992, Börjesson vd. 2013).

Araştırmacılar, en düşük partikül boyutuna sahip süt tozu örneğinin aynı zamanda en fazla çözünen örnek olduğunu bulmuşlardır. Partiküllerin boyutunu küçültmek, çözünmek için kat etmeleri gereken mesafeyi azaltarak çözünabilirliği hızlandırabilir. Daha büyük parçacıklara sahip malzemeler nispeten dar bir yüzey alanına sahiptir ve bu da daha düşük çözünme oranlarıyla sonuçlanır (Sharma vd. 2015). Ayrıca partikül boyutu küçüldükçe çözünürlük değerlerinin artmasının nedeninin azalan yüzey alanı ile difüzyon mesafesinin azalması ve bunun da numunelerin çözünme hızını artırması olduğunu öne sürülmektedir (Saraç vd. 2021). Aynı zamanda daha küçük ve pürüzsüz yüzeylere sahip süt tozu partiküllerinin daha hızlı çözünme oranları sergilediğini, düzensiz ve gözenekli yapılara sahip partiküllerin ise daha uzun çözünme süreleri gösterdiğini belirtilmiştir (Börjesson vd. 2013). Bununla beraber Kim ve diğerleri (2002) tarafından yapılan çalışma, süt tozlarının yüzey özelliklerinin ıslanma süresini ve

Çözünme oranını belirlemede çok önemli olduğunu göstermiştir. Yüksek yüzey yağ içeriğinin varlığı suyun partiküller tarafından nüfuz etmesini engellerken, düşük yağ içeriği çözünme sürecini kolaylaştırır.

2.3.12 Köpürme

Süt tozu sulandırma işlemi sırasında sergilenen köpürme davranışı, dondurma, mus (tatlı), topping (sos), mereng (beze) ve hatta kahve dahil olmak üzere çeşitli gıdaların dokusunu geliştirilmesinde önemlidir (Sharma vd. 2012).

Köpürme, özünme sürecinin yüzey aktif maddeler ve hava arasında daha yüksek bir etkileşime yol açtığı ve daha belirgin bir köpük oluşumuyla sonuçlandığı aglomere olmayan süt tozlarında özellikle belirgindir. Bu olgu, çözünme sırasında yüzeyde uzun süreli tutunma sergileyen bu tür tozların protein ve lipid içeriğine bağlanmaktadır. Tersine, aglomerasyon süreci partiküllerin gözenekliliğini ve boyutunu artırarak hava kabarcıklarının hapsolmasını engeller ve köpürme eğilimini azaltır. Çözünme hızı, köpürme eğilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir; yavaş çözünen tozlar daha fazla köpürme eğilimi gösterir (Ji vd. 2016).

2.3.13 Isı Stabilitesi

Isı stabilitesi, sıcak içecekler, muhallebiler, beyaz sos karışımları, unlu mamuller ve en önemlisi rekombine süt ürünlerinin üretimi dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılan süt tozlarının çok önemli bir özelliğidir (Singh 2004).

Süt tozlarının termal stabilitesi, üretim sürecinde maruz kaldıkları sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Sprey kurutma sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalan süt proteinleri denatüre olabilir ve çözünmez madde miktarında artışa neden olabilir. Ayrıca, termal işleme bağlı olarak Maillard reaksiyonu meydana gelebilir, bu da tozun rengine koyulaşmaya ve aromatik bileşiklerin oluşmasına neden olabilir. Bu tür değişimler, ürünün raf ömrünü ve fonksiyonel özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, kurutma sıcaklıklarının dikkatli bir şekilde ayarlanması, süt

tozunun kalitesini korumak açısından büyük önem taşımaktadır (Hazlett vd. 2021).

2.4 Gıdaların Muhafaza Edilmesi

Neredeyse tüm gıdalar hayvan ve bitki kökenli canlı hücrelerden ve bazı durumlarda bazı mikroorganizmalardan biyoteknoloji yöntemleriyle elde edilmektedir. Dolayısıyla, gıdalar çoğunlukla yenilebilir biyokimyasallardan oluşur (Prokopov ve Tanchev 2007).

Gıda bilimcilerinin en önemli hedeflerinden birisi gıdaları mümkün olduğunca güvenli hale getirmektir. Gıda işleme, depolama ve muhafaza yöntemlerinin akıllıca uygulanması, gıda kaynaklı hastalık salgınlarının, yani kontamine gıdaların tüketiminden kaynaklanan hastalık veya rahatsızlıkların önlenmesine yardımcı olur. Her yıl milyarlarca kutu, kavanoz, paket ve poşet işlenmiş ve taze gıda ürününün tüketildiği düşünüldüğünde, işlenmiş gıda endüstrisi bu tür vakaları önleme konusunda üstün bir sicile sahiptir (Prokopov ve Tanchev 2007).

Gıda muhafazası, gıdaları istenen kalite seviyesinde tutmak için tasarlanmış eylemler veya yöntemlerdir. Ekonomik muhafaza ve güvenlik, beslenme ve duyuşsal açılardan tüketici memnuniyeti gibi güncel talepleri karşılamak için mevcut muhafaza tekniklerini kullanılmakta ve bir dizi yeni muhafaza tekniği geliştirilmektedir (Potter ve Hotchkiss, 1995).

2.4.1 Kurutma Teknolojisi

Kurutma hem ısı hem de kütle transferini içeren karmaşık bir süreçtir. Genel olarak, gıda ürünlerinden suyun uzaklaştırılması anlamına gelir. Kurutma işlemi, gıdadaki su aktivitesini azaltarak mikrobiyal ve enzim aktivitesini önemli ölçüde azaltır ve bu sebeple uzun süreli depolama için son zamanlarda tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkar (Demirkol vd. 2015).

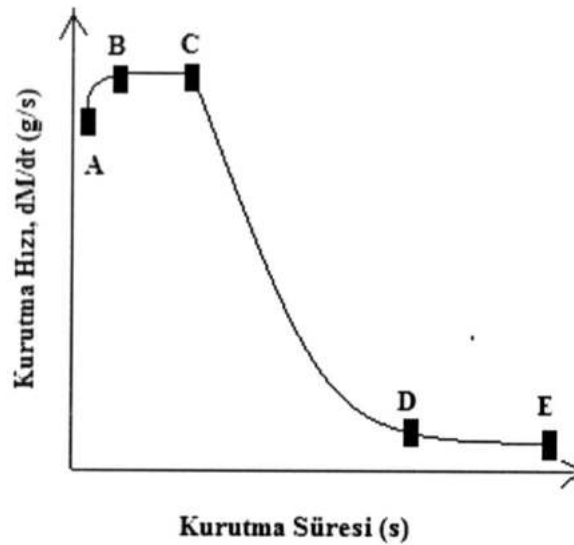
Kurutma işleminin amacı, su içeriğini %80-90'dan %4-20'ye düşürerek ürünün raf ömrünü artırmaktır. Bu, kurutulmuş ürünlerdeki mikrobiyolojik bozulmayı ve enzim

aktivitesini azaltarak depolanmasını ve daha düşük maliyetle sevk edilmesini kolaylaştırır. Kurutma, diğer yöntemlere göre daha az işçilik ve ekipman gerektiren uygun maliyetli bir muhafaza yöntemidir. Ayrıca, diğer muhafaza yöntemlerine kıyasla daha fazla besin maddesini, özellikle de lifleri korur (Cemeroğlu ve Özkan 2004).

2.4.2 Kurutma Mekanizması

Kurutma, uzun süreli gıda depolamada yaygın olarak kullanılan ve suyun uzaklaştırılmasını içeren bir yöntemdir. Bu aşamada uygun depolama koşulları çok önemlidir. Kurutma işleminden sonra ürünler nem, sıcaklık ve hava hızının ayarlanabildiği depolarda saklanmalıdır (Sarsılmaz 1998).

Kurutma süresi boyunca gıda maddelerinin nem içeriği azalır ve belli bir noktadan sonra stabilize olur. Kuruma hızı ilk saatlerde en yüksektir ve zaman içinde kademeli olarak azalır (Şekil 2.1). Kurutma süresi boyunca çeşitli parametreler kurutma hızını etkileyebilir. Kurutma hızını etkileyen ana faktörler; ürünün kimyasal bileşimi, miktarı, şekli, boyutu, kurutma havası hızı ve sıcaklığı, kuruluğu ve atmosferik basınçtır. Kurutma sıcaklığını ve hava hızını artırırken kurutulacak gıdanın kalınlığını ve miktarını azaltmak kurutma hızını arttırabilir (Demirkol vd. 2015).



Şekil 2.1 Kurutma hızının kurutma süresi ile değişimi (Demirtaş vd. 1998)

A-B bölgesi, gıda kurutma işlemlerinde denge bölgesi olarak kabul edilir. Bu bölgede kuruma hızı artıyor gibi görünse de bunun anlık bir durum olduğu ve bu nedenle ihmal edildiği unutulmamalıdır. B-C bölgesi, gıda ürünlerinin kurutulması sırasında kısa süresi ve sabit kurutma hızı ile karakterize edilen sabit hızlı kurutma bölgesidir. C-D bölgesi azalan kuruma periyodudur ve gerçek kuruma işleminin gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgedeki gıda maddelerinde difüzyon etkilidir. Bu bölgede kritik nokta (C noktası) olarak adlandırılan ilk kuruma noktası gözlenir. D noktasında ürün yüzeyi tamamen kurudur ve hızın azaldığı ikinci dönem başlar. Buharlaşma düzlemi yavaş yavaş yüzeyden içeri doğru hareket eder. Buharlaşma ısısı katı üzerinden buharlaşma bölgesine aktarılır (Demirtaş vd. 1998).

2.4.3 Gıda Kurutma Yöntemleri

Gıda kurutma, kökenleri antik çağlara kadar uzanan, en eski ve erişilebilir gıda muhafaza teknikleri arasında yer almaktadır. Kurutma işleminin birincil amacı, ürünün raf ömrünü uzatmak veya yeni bir ürün üretmektir. Kurutma, gıdanın ağırlığını azaltarak taşınmasını kolaylaştırır ve depolama ve nakliye maliyetlerini düşürür (Özbay ve Sarıçoban 2015).

Sıcak havalı kurutucular (sprey kurutucular, fırın kurutucular, kabin kurutucular, tünel kurutucular, bantlı kurutucular, sandık kurutucular), valsli kurutucular, vakum kurutucular, dondurarak kurutucular ve mikrodalga kurutucular gibi çeşitli endüstriyel kurutucular bulunmaktadır (Saldamlı ve Saldamlı 2000).

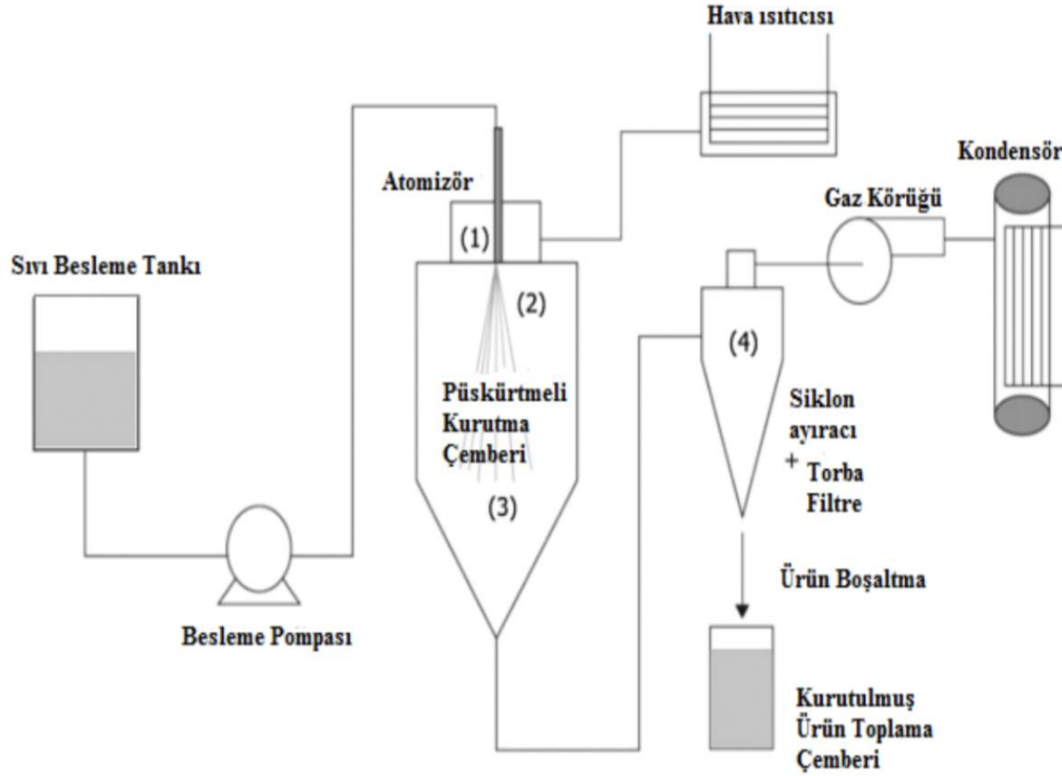
2.5 Sütün Kurutulması

Süt, çeşitli faktörler nedeniyle çabuk bozulabilen bir gıdadır. Bu sorunun önüne geçmek için süte kurutma işlemi uygulanır. Mikrobiyal büyümeye neden olan suyu uzaklaştırarak ürünün raf ömrünü uzatılır ve aynı zamanda sütün ağırlığı ve hacmi azaltılarak nakliye ve depolama maliyetlerinin düşmesi sağlanır (Yetişemeyen 2000).

Süt tozu üretiminde kurutma; püskürtmeli kurutma, silindir (merdaneli) kurutma ve

liyofilizasyon (dondurarak kurutma) işlemleri yardımıyla gerçekleşir (Megep 2012, Demirci vd. 2010).

2.5.1 Püskürtme (Sprey) Metoduyla Kurutma



Şekil 2.2 Püskürtülerek kurutma işleminin bileşenleri (Yetişen 2021)

Püskürtmeli kurutucular dört ana bileşenden oluşur: sıcak hava üretim sistemi, ürünün ince damlacıklarını üreten bir atomizer-nozul sistemi, sıcak hava ile atomize ürünün bulunduğu bir kurutma hücresi ve kurutma hücresinden çıkan toz ürünü kademeli olarak soğutan ve eleyen bir siklon toplayıcı. Ayrıca, sızdırmaz bir iletim sistemi, pompalar, yardımcı ekipman ve kontrol cihazları gibi bileşenlerin sistem içindeki ayrılmaz rolünü kabul etmek kaçınılmazdır. Şekil 2.2’ de kurutma bileşenleri gösterilmiştir (Megep 2012, Yetişen 2021).

Püskürtmeli kurutma çeşitli avantajlar sunar; kurutma koşulları stabil tutulduğunda toz özellikleri kurutma işlemi boyunca sabit kalır, tam otomatik kontrole uyarlanabilen sürekli ve kolay bir kurutma işlemidir ve özellikle süt gibi ısıya duyarlı gıdaların

dehidrasyonu için çeşitli uygulamalara uygun çok çeşitli kurutucu tasarımları mevcuttur (Vega-Mercado vd. 2001).

Süt ürünleri endüstrisindeki geleneksel tek aşamalı kurutma, yerini iki veya üç aşamalı kurutmaya bırakmaktadır. Bu değişim, homojen boyut dağılımı ve daha iyi akışkanlık gibi fonksiyonel özelliklerin iyileştirilmesinin yanı sıra aglomerasyon ve instantizasyonun geliştirilmesi arzusundan kaynaklanmaktadır. İki aşamalı ve çok aşamalı kurutucular, tek aşamalı kurutuculara göre daha enerji tasarrufludur ve süt tozu özelliklerine daha az zarar verir (Masters 1991).

2.5.1.1 Atomizer

Atomizer, kurutulacak sıvıyı yüksek basınca maruz bırakarak çalışır ve bu da sıvının 5 ila 100 μ arasında değişen boyutlarda parçacıklara ayrılmasına neden olur. Basınç ve diğer değişkenler de dahil olmak üzere bu süreci yöneten belirli parametreler değişebilir (Dinçel 2015). Atomizer, birkaç kritik faktör üzerindeki önemli etkisinden de anlaşılacağı üzere, sprey kurutma prosesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bunlar arasında kurutma kinetiği, toz kalitesi ve enerji verimliliği yer almaktadır (Atuonwu ve Stapley 2017). Temel amacı, hızlı kurutma elde etmek için yüzey/hacim oranını arttırmaktır. Bu işlemi sıvıdan küçük damlacıklar oluşturarak gerçekleştirir. Kurutma işleminin hızlı olması ısıya duyarlı bileşiklerin kaybını en aza indirir ve istenen morfoloji ve fiziko-kimyasal özelliklere sahip partikülleri korur (Selvamuthukumaran 2019).

Atomizer seçimi ve çalışma koşulları ürün verimliliği için çok önemlidir. Atomizer seçimi, üretim ölçeği, sıvı beslemenin fiziksel özellikleri (örn. viskozite) ve ürün gereksinimleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu seçim, püskürtülerek kurutulan nihai ürünün özellikleri ve kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Phisut 2012, Wisniewski 2015). Çeşitli tiplerde sprey kurutma atomizerleri vardır (Wisniewski 2015). Süt tozu üretim endüstrisinde yaygın olarak nozullu ile santrifüjlü (döner) atomizer olmak üzere iki tip atomizer kullanılır. Resim 2.1’ de nozullu püskürtücü gösterilmiştir (Megep 2012).



Resim 2.1 Nozullu Püskürtücü (Megep 2012)

2.5.1.2 Kurutma Hücresi

Kurutma hücresi, sprej kurutucunun ana bileşenlerinden biridir. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir ve dış kısmı iyi yalıtılmıştır. Yalıtım malzemesi koruyucu bir metal levha ile kaplanmıştır. Kurutma kulelerinin çapları ve yükseklikleri de dahil olmak üzere boyutları, kulenin belirlenen kurutma kapasitesine bağlıdır. Kulenin üst kısmı silindirik, alt kısmı ise koniktir (Megep 2012).

Kurutma odası, damlacığın kurutma havasıyla buluştuğu ilk noktadır ve sıvı beslemenin püskürtülmesini, damlacıklar ve sıcak hava arasındaki teması, damlacıkların kurutulmasını ve hava ile karışan kuru parçacıkların toplanmasını kolaylaştırır. Kurutma odasının boyutları, sprej kurutucu kapasitesine ve damlacık kurutma süresine bağlı olarak 8 ila 30 metre yükseklik ve 5 ila 10 metre çap arasında değişebilir (Zbicinski 2017).

Bahsi geçen sistemde giriş ve çıkış havası mevcuttur. Püskürtülerek kurutulan tozlar için, giriş havası sıcaklığındaki artış nemin hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasına ve toz partiküllerinin yüzeyinde sertleşmeye yol açarak daha düşük yağ sızıntısına neden olur. Toz partikül yüzeyinin sertleşmesi, düşük yığın yoğunluğuna yol açan sıkışmış havanın uzaklaştırılmasını kontrol eder (Nijdam ve Langrish 2006). Yüksek giriş havası

sıcaklıkları genellikle kurutma sırasında enerji verimliliği için tercih edilir ve toz partikül yüzeylerinde sertleşme riskinden kaçınıldığı sürece yığın yoğunluğunu artırabilir (Pisecky 1997).

Çıkış havası sıcaklığındaki bir artış ise, spreyle kurutulmuş süt tozunun partiküllerinin yüzeyinde çatlaklara neden olarak daha fazla yağ sızıntısına yol açabilir. Çatlaklar nemin hava ile uzaklaştırılmasını teşvik eder ve böylece yığın yoğunluğu azalır (Nijdam ve Langrish 2006). Genel olarak düşük çıkış hava sıcaklıkları, damlacıkların daha düzgün kurumasını, kontrollü partikül büzülmesini ve toz yığın yoğunluğunun artmasını sağladığı için tercih edilir (De Vilder vd. 1976).

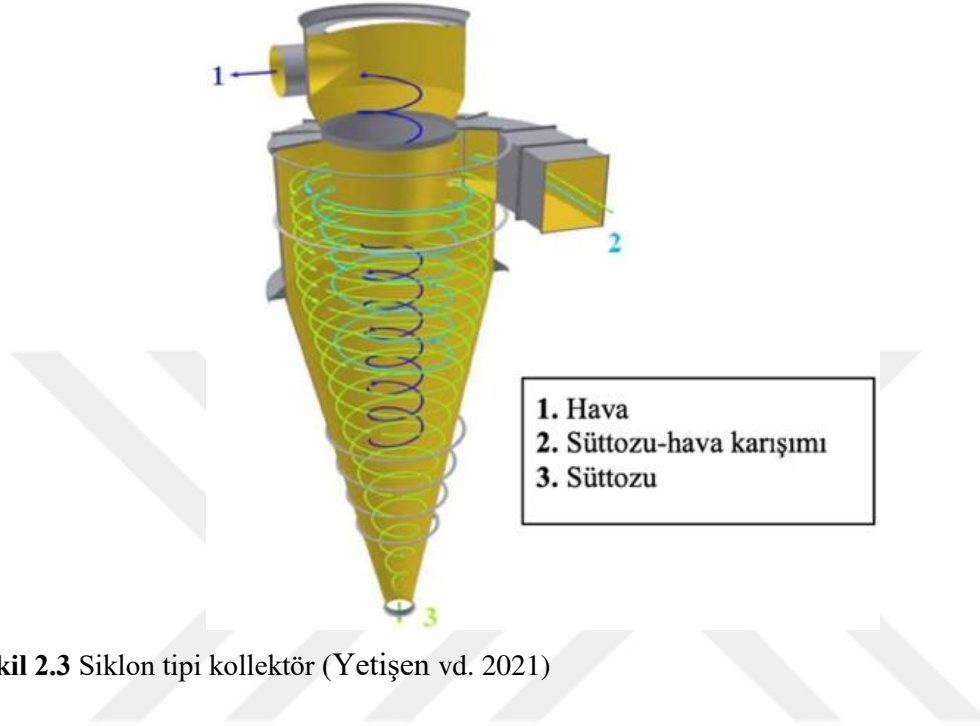
2.5.1.3 Siklon Toplayıcılar ve Torba Filtreler

Hava akımında asılı kalan katı partikülleri sıcak havadan ayırmak için genellikle siklon toplayıcılar ve torba filtreler kullanılır (Anandharamkrishnan ve Padma 2015, Wisniewski 2015). Ayrıca siklon toplayıcılar, katı partikülleri gazdan ayırmak için merkezkaç kuvvetini kullanırlar (Wisniewski vd. 2015).

Püskürtmeli kurutucunun üst bölümü silindirikdir. Katı partikülleri taşıyan gaz akımı kurutucuya koninin tepesinden teğetsel olarak girer ve aşağı doğru hareket ederek konide bir dış girdap oluşturur. Parçacıklar, üzerlerinde merkezkaç kuvveti uygulayan dış girdaptaki artan hava hızı nedeniyle gaz akışından ayrılır. Koninin alt kısmında gaz akımı bir iç girdap oluşturarak yönünü tersine çevirir ve üst kısımdan temiz gaz olarak çıkar. Partiküller ise siklonun altındaki haznede toplanır (Yetişen vd. 2021).

Torba filtrenin metal gövdesi sürekli çalışma ve otomatik temizleme için tasarlanmıştır. Partiküllü hava, torba filtrenin orta veya alt kısmında bulunan toplayıcıdan hazneye çekilir veya itilir. Ardından yüzeyindeki ürün partiküllerini yakalayan filtre torbasından geçer. Torbalar temiz havanın geçmesine izin verirken, torbalar üzerinde toz birikmesi üzerlerindeki basınç farkını artırır. Basınçlı hava valflerin açılmasına neden olur ve haznede depolanır. Her bir torba sırasının üzerinde, torbaların üzerindeki merkezi hava geçiş boşluğu ile hizalanmış deliklere sahip bir tüp vardır. Gaz akışını anlık olarak

tersine çevirmek için deliklerden basınçlı hava enjekte edilir ve torbaların dışındaki partiküllü malzeme uzaklaştırılır. Şekil 2.3'te siklon tipi toplayıcı bölümleri gösterilmiştir (Anandharamkrishnan ve Padma 2015, Yetişen vd. 2021).



Şekil 2.3 Siklon tipi kollektör (Yetişen vd. 2021)

3. MATERİYAL ve METOT

3.1 Materyal

Bu çalışmada süt tozu üretiminde kullanılan hammadde, Enka Süt A.Ş. (Konya) firmasından temin edilen günlük pastörize yağsız inek sütüdür. Süt, üretim öncesinde fiziksel ve kimyasal yönden kontrol edilmiştir. Süt numuneleri homojenizasyon ve pastörizasyon işlemlerinden sonra sprey kurutucuya besleme için uygun hale getirilmiştir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Süt Tozu Örneklerinin Üretimi

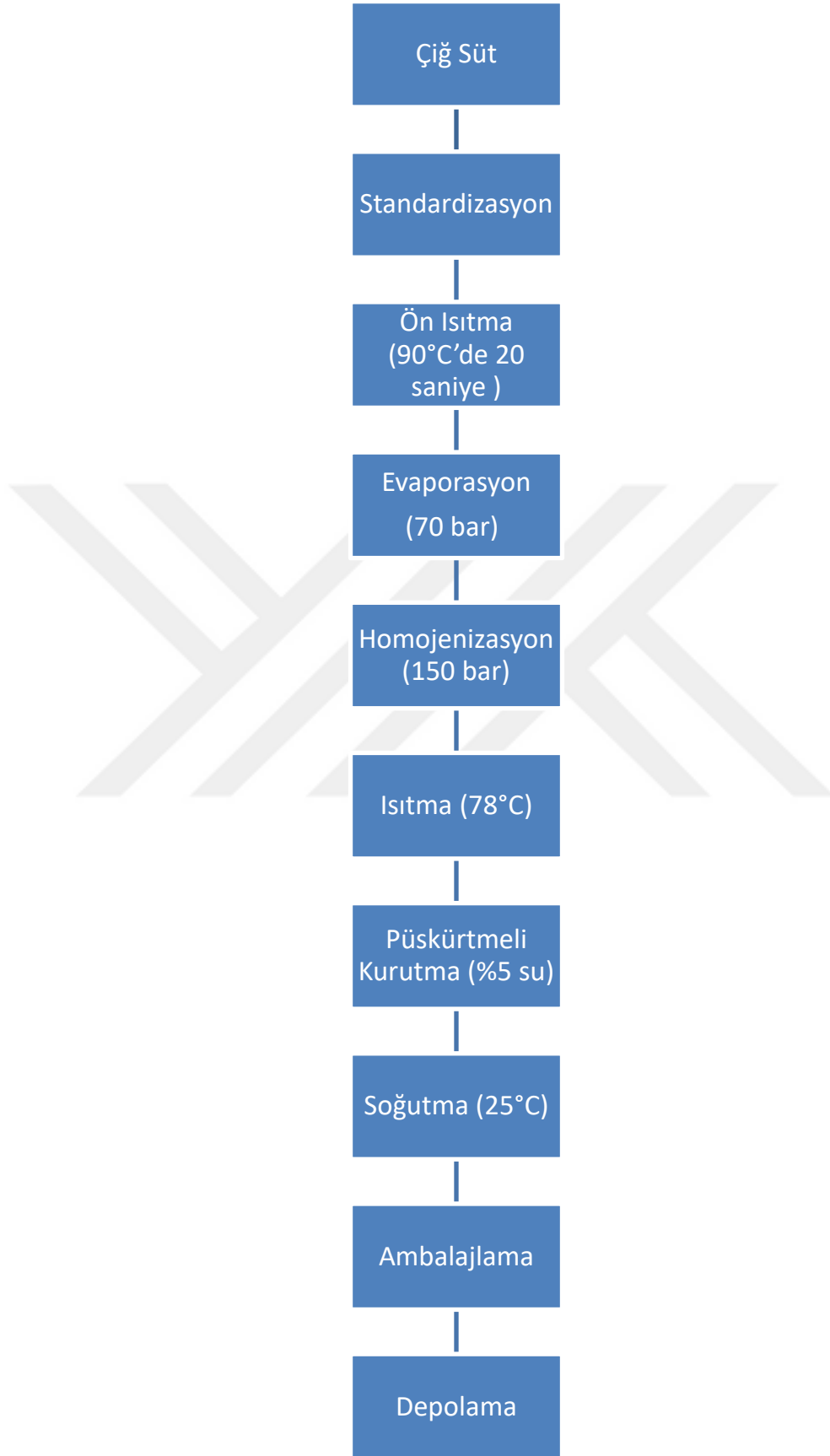
Süt tozu üretimi, püskürtmeli kurutma (spray drying) yöntemiyle yapılmıştır. Bu amaçla laboratuvar ölçekli Büchi Mini Spray Dryer B-290 (Flawil, İsviçre) cihazı kullanılmıştır. Üretim parametreleri ön denemeler ve literatür verileri (Nguyen vd. 2017, Saha vd. 2019) dikkate alınarak belirlenmiştir.

Kurutma işlemleri sırasında; giriş havası sıcaklığı: $180 \pm 2^{\circ}\text{C}$, çıkış havası sıcaklığı: $85 \pm 3^{\circ}\text{C}$, besleme hızı: 8 mL/dk, atomizasyon basıncı: 3 bar, aspiratör hızı: %100 ve son olarak pompa hızı: %20 olarak sabitlenmiştir.

Çalışmada dört farklı püskürtme açısı (15° , 30° , 45° ve 60°) kullanılmıştır. Farklı açılar, nozül geometrisi değiştirilerek ayarlanmış ve her açığa karşılık gelen numune A1 (15°), A2 (30°), A3 (45°) ve A4 (60°) olarak kodlanmıştır.

Kurutma işlemi sonunda elde edilen toz numuneleri, nem alımını önlemek için çift katmanlı alüminyum-laminat ambalajlarda saklanmış, doğrudan güneş ışığı almayan $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

Süt tozu üretim akış şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir (Üçüncü 2010).



Şekil 3.1 Süttozu üretim akış şeması (Üçüncü 2010)

3.3 Süt Tozlarına Uygulanan Analizler

3.3.1 Kimyasal Analizler

3.3.1.1 Nem

Süt tozlarının nem içeriğini belirlemek için yaklaşık 3 g süt tozu numunesi kurutma kaplarına tartılmış ve 3 saat boyunca 102±2°C sıcaklıktaki bir etüve konulmuştur. 3 saat sonra numune etüvden çıkartılmış, bir desikatörde oda sıcaklığına kadar soğuması beklendikten sonra tartılmıştır. Aşağıdaki formülü kullanarak süt tozlarının % nem içeriği hesaplanmıştır (GEA 2006a).

$$\%Nem = \frac{b-c}{b-a} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada;

a: Kurutma kabının darası (g),

b: Kurutma kabı + numune (g),

c: Kurutma kabı + kurutulmuş numune (g).

3.3.1.2 Protein

Süt tozlarının azot içeriği Kjeldahl yöntemi (AOAC 2005) kullanılarak belirlenmiştir. 1 g süt tozu hassas bir şekilde tartılmış ve Kjeldahl tüplerine aktarılmıştır. Daha sonra tüpe iki Kjeldahl tableti eklenmiş, üzerine 10 mL H₂SO₄ konulmuş ve tüpler gaz salınımı durana kadar 10 ila 15 dk arasında bekletilmiştir. Daha sonra, numune istenen berraklık düzeyine ulaşılan kadar 400 ila 420°C arasında değişen sıcaklıklarda bir yanma işlemine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numune daha sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Soğutulan tüplere 50 mL damıtılmış su ve 50 mL %40 NaOH ilave edilmiş ve damıtılmıştır. Damıtık, 50 mL %4 borik asit içinde toplanmış daha sonra 0.1 N HCl ile titrasyona tabi tutulmuştur. Numunenin protein içeriği, aşağıdaki denklemler uyarınca toplam azot bazında hesaplanmıştır.

$$\%Azot = \frac{(V_{\text{örnek}} - V_{\text{şahit}})}{m_{\text{örnek}} \times 1000} \quad (3.2)$$

Burada;

$V_{\text{örnek}}$ – $V_{\text{şahit}}$; örnek ve şahit için harcanan HCl hacmini,
 $m_{\text{örnek}}$; örnek ağırlığını ifade etmektedir.

$$\%Protein = Azot (\%) \times 6.38$$

3.3.1.3 Kül

Süt tozlarının kül içeriğini belirlemek için standart bir prosedür izlenmiştir. İlk olarak, porselen krezeller sabit tartıma getirilmiştir ve darası alınmadan önce bir desikatörde soğutulmuştur. Daha sonra, darası alınmış krezelere 2 g süt tozu numunesi tartılmış ve karbonsuz kül elde edilene kadar 525°C'de bir kül fırınında yakılmıştır. Yakma işleminden sonra krezeller bir desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve tartılmıştır. Son olarak, analiz sonucu aşağıdaki formülü kullanarak % kül olarak hesaplanmıştır (GEA 2004).

$$\%Kül = \frac{a-b}{c-b} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

a : Krozenin darası + yanmış örnek (g),

b : Krozenin darası (g),

c : Krozenin darası + örnek (g).

3.3.1.4 Yağ

Süt tozlarının yağ içeriğinin belirlenmesi, süt tozu bütirometresine 10 mL sülfürik asit (H_2SO_4) (1.816 g/mL), 8 mL distile su, 2.5 gram süt tozu ve 1 mL amil alkol (0.811 g/mL) eklenerek gerçekleştirilmiştir. Tıpa kapatılmış ve bir Gerber santrifüjünde (Funke Gerber, Almanya) 15 dakikalık bir santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak, süt tozlarının yağ içeriği bir bütirometre ölçeğinde yüzde olarak okunmuştur (GEA 2004).

3.3.1.5 pH

Süt tozları, yağsız kuru madde içeriği %10 olana kadar distile suda çözülmüştür. pH, Sentix 42 elektrotlu bir el tipi pH metre (WTW pH 3110, Almanya) kullanılarak ölçülmüştür. Kalibrasyon için standart tampon çözeltiler (pH 4.01 ve 7.01; WTW) kullanılmıştır.

3.3.1.6 Titrasyon Asitliği

Mevcut laktik asit miktarını belirlemek için süt tozları %10 yağsız kuru maddeye kadar sulandırılmıştır. Daha sonra fenolftalein indikatörü eklenmiş ve kalıcı pembe renk elde edilene kadar 0.1 N (normalite) sodyum hidroksit (NaOH) ile titre edilmiştir. Titrasyon asitlik değerleri aşağıdaki formül kullanılarak laktik asit (LA) yüzdesi olarak hesaplanmıştır (GEA 2006b).

$$\% \text{Laktik asit} = \frac{mL \times N \times 90 \times 100}{V \times 100} \quad (3.4)$$

Burada;

mL: Harcanan 0.1 N NaOH (mL),

N: NaOH'ın normalitesi,

V: Titrasyonda kullanılan numune (mL).

3.3.1.7 Hidroksimetilfurfural (HMF)

Süt tozlarının HMF içeriği Keeney ve Bassette (1959)'in yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Başlangıç olarak, 10 g yağsız süt tozu 100 mL su içinde sulandırılmıştır. Daha sonra, sulandırılmış sütün 10 mL'si bir test tüpüne eklenmiş ve ardından 5 mL 0.3 N oksalik asit ilave edilmiştir. Karışım daha sonra 1 saat boyunca kaynar su banyosuna yerleştirilmiştir. Tüpler su banyosundan çıkarıldıktan ve oda sıcaklığına soğumaya bırakıldıktan sonra 5 mL trikloroasetik asit (TCA; Sigma-Aldrich, Almanya) eklenmiş, karıştırılmış ve Whatman 42 filtre kağıdı kullanılarak süzölmüştür. Başka bir tüpe süzüntüden 4 mL alınmış ve 1 mL 2-tiyobarbitürik asit eklenip karıştırılmıştır. Bu

karışım 40°C su banyosunda 30-40 dakika bekletilmiş ve ardından tüpler çıkarılarak oda sıcaklığına soğutulmuştur. Soğutulan tüpler bir spektrofotometre (Biochrom, LibraS22, Cambridge-İngiltere) kullanılarak analiz edilmiştir. Absorpsiyon değerleri 443 nm dalga boyunda absorpsiyon değerleri belirlenmiştir. HMF miktarı absorbans değerleri ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

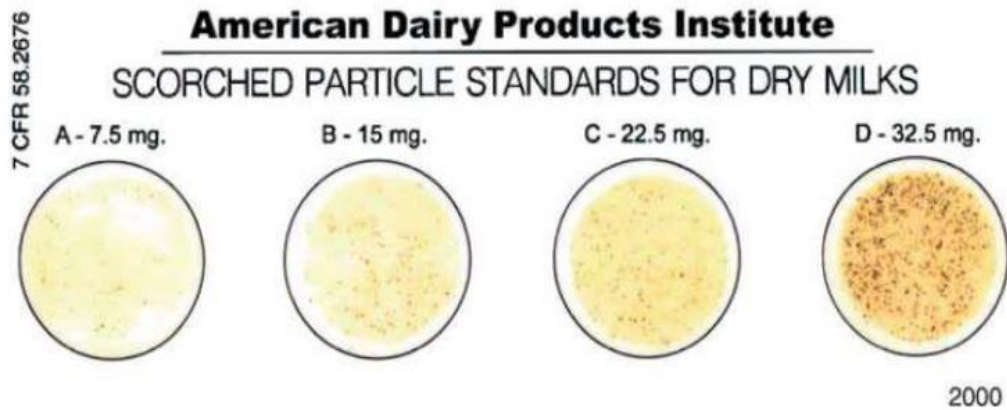
$$\text{HMF } (\mu\text{M}) = (\text{Absorbans} - 0.055) \times 87.5 \quad (3.5)$$

3.3.1.8 Renk Analizi

Renk analizi, süt tozu örneklerini ölçmek için bir Chroma Meter CR-400 (Minolta, Osaka, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler bir petri kabına eşit olarak dağıtılmış ve CIELAB renk aralığına göre parlaklık (L*), kırmızılık (a*) ve sarılık (b*) değerleri açısından analiz edilmiştir. Analizden önce cihaz bir referans tablosu ile kalibre edilmiştir (Francis 1998).

3.3.1.9 Yanmış Parçacık Analizi

Süt tozlarının yanmış partiküllerinin analizi, Amerikan Süt Ürünleri Enstitüsü Bülteni'nde (ADPI 2002) belirtilen yöntem izlenerek gerçekleştirilmiştir. Sulandırılmış süt tozları özel bir filtre kullanılarak süzölmüş, kurutulmuş ve Şekil 3.2'de verilen standart test şemasıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.2 Süt tozları için görünümüne göre yanık parçacıkların değerlendirme skalası

3.3.1.10 Su Aktivitesi

Süt tozlarının su aktivitesinin (a_w) belirlenmesinde Novasina LabTouch (Novasina AG, Lachen, İsviçre) cihazı kullanılmıştır.

3.3.2 Fonksiyonel Özelliklerin Belirlemesi İçin Analizler

3.3.2.1 Islanabilirlik

Süt tozlarının ıslanabilirliği Fuchs vd. (2006) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak değerlendirilmiştir. Islanabilirlik, 1 g tozun 100 mL saf su yüzeyinden 20°C'de çalkalama olmaksızın çözünmesi için saniye cinsinden ifade edilmiştir.

3.3.2.2 Dağılabilirlik

Süt tozlarının dağılabilirliğini analiz etmek için 250 mL'lik bir behere 20±2°C'de 100 mL su eklenmiştir. Ardından, suya 10 g yağsız süt tozu eklenmiş ve karışım bir spatula ile 15 saniye içinde 25 ileri geri hareketle karıştırılmıştır. Karıştırma aşamasını takiben, karışım 150 µm'lik bir metal elekten süzölmüş ve süzöntü daha sonra 105°C'ye ayarlanmış bir fırında 4 saat süreyle kurutulmuştur. Bu prosedür kuru madde içeriğini tespit etmek için gerçekleştirilmiştir. Örneklerin dağılabilirliği aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Schuck vd. 2012).

$$\text{Dağılabilirlik (\%)} = \frac{(100+a) \times KM}{a \times \left(\frac{100-b}{100}\right)} \quad (3.6)$$

Burada;

KM: Süzöntünün kuru madde içeriği (%),

A: Kullanılan süt tozu miktarı (g),

b: Süt tozunun nem oranı (%).

3.3.2.3 Çözünürlük

Süt tozlarının çözünürlüğü, Amerikan Süt Ürünleri Enstitüsü (ADPI) tarafından belirlenen yöntemle göre belirlenmiştir (ADPI 2002). Süt tozları, %10 yağsız katı madde içerecek şekilde yeniden oluşturulduktan sonra, 50 mL'lik dereceli özel çözünürlük test tüplerine (Art. No. 3634, Funke Gerber, Almanya) yerleştirilmiştir. Tüpün tabanında toplanan tortu hacmi, dakikada 1100 devirde (rpm) 10 dakikalık bir santrifüj işleminden sonra mililitre (mL) cinsinden ölçülmüştür. Numunelerin çözünürlüğünü hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Çözünürlük (\%)} = 100 - [2 \times (8)\text{sediment (mL)}] \quad (3.7)$$

3.3.2.4 Köpük Oluşturma Kapasitesi ve Stabilitesi

Köpük oluşturma kapasitesini belirlemek için 10 g yağsız süt tozu 20°C'de 100 mL suda çözündürülmüştür. Elde edilen karışım daha sonra bir ultraturaks (T 25, IKA WERKE, Almanya) ile 15800 rpm (dakikada devir sayısı)'de 30 saniye boyunca karıştırılarak köpük oluşturulmuştur. Köpük daha sonra toplam hacmi belirlemek için 250 mL'lik bir ölçüm silindrine dökülmüştür. Köpürme kapasitesi toplam hacim üzerinden yüzde (%) olarak hesaplanmıştır. Köpürme stabilitesinin belirlenmesi, Zouari vd. (2021) tarafından tarif edildiği gibi, toplam köpük hacminin %50'sinin azalması için gereken süreye (saniye) dayanmaktadır.

3.3.2.5. Partikül Büyüklüğü Ölçümü

Süt tozlarındaki partikül boyutunun ölçümü, kuru dispersiyon ünitesi (Aero S) ile donatılmış bir Malvern Mastersizer 3000 cihazı (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, UK) kullanılarak lazer difraksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Besleme hunisine yaklaşık 5 g süt tozu eklenmiş ve %1-5 arasında değişen bir “bulanıklık” değeri ile 0.1 bar besleme basıncında kuru bir dispersiyon sistemi aracılığıyla dağıtılmıştır. Besleme hızı %25 ve kırılma indisi 1.46 olarak ayarlanmıştır. $D_{4,3}$ ve $D_{3,2}$ dahil olmak üzere partikül boyutu dağılımı değerlerinin yanı sıra yayılma, homojenlik

ve spesifik yüzey alanının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir (Mercan 2019).

$D_{4,3}$ = Hacimsel ortalama çapı,

$D_{3,2}$ = Sauter ortalama çapı olarak da ifade edilen, hacim/yüzey alanı ortalama çapı,

D_{10} = Partiküllerin %10'unun belirlenen çapın altında olduğunu,

D_{50} = Partiküllerin %50'sinin belirlenen çapın altında olduğunu,

D_{90} = Partiküllerin %90'ının belirlenen çapın altında olduğunu belirtmektedir.

Span = Boyut dağılımının genişliğine işaret eder.

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{10}} \quad (3.8)$$

Üniformluk = Partikül boyutu dağılımının büyüklüğünü ve partikül boyutu dağılım eğrisinin gradyanını yansıtmaktadır.

Spesifik yüzey alanı = Partiküllerin toplam alanının, toplam ağırlığa bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

3.3.2.6 Termal Özelliklerin Belirlenmesi (DSC Analizi)

Süt tozlarının termal özelliklerini belirlemek amacıyla Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi yapılmıştır. Ölçümler, PerkinElmer DSC 8000 (ABD) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile örneklerin cam geçiş sıcaklığı (T_g), protein denatürasyon sıcaklığı (T_d) ve entalpi değişimi (ΔH) değerleri belirlenmiştir.

Analiz öncesinde numuneler, nemin etkisini azaltmak için oda sıcaklığında desikatörde 48 saat süreyle dengeye getirilmiştir. Her numuneden yaklaşık 7 mg alınarak hermetik alüminyum kapsüllere yerleştirilmiş ve sıkıca kapatılmıştır. Referans olarak boş hermetik kapsül kullanılmıştır.

Analizler azot gazı (N_2) atmosferinde, 30 mL/dk akış hızında ve 10°C/dk ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Tarama aralığı 25–200°C olarak ayarlanmıştır. Cihazın sıcaklık ve entalpi kalibrasyonu, Indium standardı ($T_m = 156.6^\circ\text{C}$) ile yapılmıştır.

Cam geçiş sıcaklığı (T_g) ısı akışı eğrisinde baz hattındaki kırılma noktası, protein denatürasyon sıcaklığı (T_d) ise pik tepe noktası olarak belirlenmiştir. Denatürasyon entalpisi (ΔH) pik altındaki alanın integrasyonu ile hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar üç tekerrürlü olarak analiz edilmiş ve ortalama ± standart sapma şeklinde raporlanmıştır (Fang vd. 2007, Sharma vd. 2015, Hazlett vd. 2021).

3.3.2.7 Gevşek Yoğunluk (ρ_b) Tayini

Gevşek yoğunluk, süt tozu partiküllerinin serbest haldeki kütlesinin, sıkıştırma uygulanmadan önce kapladığı hacme oranı olarak tanımlanır. Ölçüm için 100 mL hacimli, dar ağızlı, kuru ve temiz bir dereceli silindir kullanılmıştır. Her bir örnekten 10 ± 0.01 g numune tartılmış ve silindire aktarılmıştır. Silindirin yan yüzeyine hafifçe dokunularak tozun serbest şekilde yerleşmesi sağlanmış, yüzey bir spatula yardımıyla düzeltilmiş ve hacim değeri okunmuştur. Gevşek yoğunluk aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Saha vd. 2019):

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (3.9)$$

Burada;

ρ_b = gevşek yoğunluk (g/cm³),

m = numunenin kütlesi (g),

V_b = gevşek haldeki hacim (cm³).

3.3.2.8 Sıkıştırılmış Yoğunluk (ρ_t) Tayini

Sıkıştırılmış yoğunluk, süt tozu partiküllerinin belirli bir darbe veya titreşim etkisi altında yeniden düzenlenmesiyle oluşan sıkışık hacmin ölçülmesiyle belirlenmiştir. Aynı silindir kullanılarak, gevşek yoğunluk ölçümünden sonra silindir 10 cm yükseklikten 10 kez hafifçe masa yüzeyine vurulmuştur. Bu işlem, partiküller arasındaki hava boşluklarının azalmasını sağlayarak hacmin sabitlenmesini temin etmiştir. Vurulma işlemi sonunda ölçülen yeni hacim (V_t) kaydedilmiştir. Sıkıştırılmış yoğunluk aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Carr 1965):

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad (3.10)$$

Burada;

ρ_t = sıkıştırılmış yoğunluk (g/cm³),

m = numunenin kütlesi (g),

V_t = sıkıştırma sonrası hacim (cm³).

3.3.2.9. Carr İndeksi (CI) ve Hausner Oranı (HR)

Elde edilen gevşek ve sıkıştırılmış yoğunluk değerlerinden Carr İndeksi (CI) ve Hausner Oranı (HR) hesaplanmıştır. Bu iki parametre, süt tozlarının akış kabiliyetini ve kohezyon eğilimini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Vissotto vd. 2010, Fitzpatrick vd. 2016). Hesaplamalar aşağıdaki eşitliklerle yapılmıştır:

$$CI = \frac{(\rho_t - \rho_b)}{\rho_t} \times 100 \quad (3.11)$$

$$HR = \frac{\rho_t}{\rho_b} \quad (3.12)$$

Burada;

CI = Carr indeksi (%),

HR = Hausner oranı (boyutsuz),

P_t = Tapped yoğunluk.

P_b = Bulk yoğunluk.

Carr İndeksi'nin düşük olması partiküller arası sürtünmenin az, dolayısıyla akışkanlığın yüksek olduğunu; yüksek olması ise tozun kolay sıkıştığını ve düşük akışkanlık gösterdiğini ifade eder. Hausner Oranı ise tozun kohezyon derecesi ile ters orantılıdır; 1.00–1.25 aralığı iyi akışkanlık, 1.25–1.40 aralığı orta düzeyde akışkanlık, 1.40 ve üzeri değerler ise zayıf akış özellikleri olarak sınıflandırılmaktadır (Carr 1965, Fitzpatrick vd. 2016).

3.3.2.10 Kek Kuvveti (Cake Strength) Ölçümü

Kek kuvveti tayini, süt tozlarının mekanik sıkışmaya karşı gösterdiği direncin belirlenmesi için yapılmıştır. Ölçümler TA.XTplus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, İngiltere) cihazında gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde 40 mm çapında cam tüp içerisine 10 ± 0.1 g süt tozu numunesi yerleştirilmiş ve yüzeyi düzlenmiştir. Numune yüzeyi, cihazın 25 mm çapındaki düz silindirik probu (P/25) yardımıyla sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma hızı 2.0 mm/s olarak belirlenmiş ve prob, tozun yüzeyinden 10 mm derinliğe kadar inmiştir.

Probun geri çekilmesi sırasında kaydedilen maksimum sıkıştırma kuvveti (g) “kek kuvveti” olarak tanımlanmıştır. Her numunede üç tekrar yapılmış ve ortalama değer ortalama kek kuvveti (g) olarak hesaplanmıştır (Fitzpatrick vd. 2007).

$$\text{Ortalama kek kuvveti (g)} = \frac{\sum F_i}{n} \quad (3.13)$$

Burada;

F_i = her bir ölçümde elde edilen maksimum kuvvet (g),

n = tekrar sayısıdır.

3.3.2.11 Kohezyon İndeksi (Cohesion Index)

Kohezyon indeksi, partiküller arası bağlanma kuvvetinin göstergesidir. Numunelerin kohezyon indeksleri, kek kuvveti verileri kullanılarak hesaplanmıştır (Palzer 2005).

$$CI = \frac{F_{\text{cake}}}{A} \quad (3.14)$$

Burada;

CI = kohezyon indeksi (g/cm²),

F_{cake} = maksimum kek kuvveti (g),

A = probun temas yüzey alanı (cm²).

Kohezyon indeksi değerinin artması, partiküller arası etkileşim kuvvetlerinin güçlendiğini ve dolayısıyla tozun daha fazla kekleşme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

3.3.2.12 Akış Stabilitesi

Akış stabilitesi, süt tozlarının depolama koşullarında akış kabiliyetini koruma derecesini belirlemek için hesaplanmıştır. Bu amaçla, taze numunelerin Carr indeksi (CI_0) ile belirli süre (örneğin 15 gün, 25°C, %65 bağıl nem) depolanan numunelerin Carr indeksleri (CI_t) karşılaştırılmıştır. Akış stabilitesi aşağıdaki formül yardımıyla ifade edilmiştir (Fitzpatrick vd. 2016):

$$\text{Akış Stabilitesi (\%)} = \frac{CI_0}{CI_t} \times 100 \quad (3.15)$$

Değerin %100'e yakın olması, depolama süresince akış özelliklerinde önemli bir değişim olmadığını; %80'in altındaki değerler ise belirgin akış zayıflamasını göstermektedir.

3.3.2.13 İstatistiksel Analiz

Tüm analizler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler IBM SPSS Statistics v.26 yazılımı kullanılarak tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Örnekler arası farkların önem düzeyi $p < 0.05$ olarak kabul edilmiştir. Ortalama değerler arasındaki farklılıklar Tukey çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Süt tozlarına ait fizikokimyasal özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Süt tozlarına ait fizikokimyasal analiz sonuçları

Özellik	A1	A2	A3	A4
Nem (%)	2.82 ± 0.02 ab	2.79 ± 0.01 b	2.76 ± 0.01 a	2.79 ± 0.01 ab
pH	6.71 ± 0.01 ab	6.71 ± 0.01 ab	6.72 ± 0.02 a	6.67 ± 0.02 b
Asitlik (%)	0.085 ± 0.007 a	0.105 ± 0.007 b	0.110 ± 0.014 b	0.110 ± 0.000 b
Yağ (%)	0.50 ± 0.00 a	0.50 ± 0.00 a	0.50 ± 0.00 a	0.50 ± 0.00 a
Protein (%)	33.23 ± 0.81 ab	34.20 ± 0.64 ab	34.80 ± 0.45 a	34.18 ± 0.60 b
Kül (%)	8.33 ± 0.04 ab	8.47 ± 0.05 a	8.44 ± 0.01 a	8.37 ± 0.02 b
aw	0.153 ± 0.001 a	0.151 ± 0.001 ab	0.147 ± 0.002 b	0.143 ± 0.004 c
HMF (mg/kg)	3.08 ± 0.06 a	2.89 ± 0.06 b	2.51 ± 0.01 c	2.60 ± 0.05 c

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir ($p>0.05$).

4.1 Nem (%)

Çalışmada süt tozlarının nem oranı %2.76–2.82 aralığında bulunmuştur. One-way ANOVA sonuçları örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğunu göstermiştir ($p<0.05$). Tukey HSD testine göre A3, diğer örneklerle kıyasla istatistiksel olarak daha düşük nem değerine sahiptir. Nem oranının düşük olması, süt tozlarının depolanabilirlik, mikrobiyal stabilite ve cam geçiş davranışı açısından önemli bir kalite kriteridir. Nem arttığında amorf laktozun cam fazdan kauçuk faza geçişi hızlanmakta, buna bağlı olarak yapışma, topaklanma ve akıcı özelliklerde bozulma meydana gelmektedir. Literatürde spray kurutulmuş süt tozları için kabul edilen ideal nem aralığının %2–4 olduğu bildirilmiştir. Roos (2020), düşük nemin cam geçiş sıcaklığını (T_g) yükselttiğini ve ürünün depolama stabilitesini olumlu etkilediğini belirtmiştir. Shah vd. (2022) da düşük nem seviyesinin raf stabilitesini artırdığını ve higroskopik davranışı azalttığını rapor etmiştir. Bu doğrultuda araştırmamızda elde edilen sonuçlar hem endüstriyel kalite kriterleri hem de bilimsel literatürle uyumludur.

4.2 pH

Çalışmada pH 6.67 ile 6.72 arasında ölçülmüş; istatistiksel olarak anlamlı farklılık belirlenmiştir ($p<0.05$). Tukey sonuçlarına göre A4 diğer örneklerle kıyasla daha düşük pH'a sahiptir. pH değerlerinin dar aralıkta değişmesi, süt proteinlerinin tampon özelliği ve işlem öncesi hammadde kalitesi ile ilişkilidir. Literatürde spray kurutma işleminin pH üzerinde büyük değişim yaratmadığı bildirilmektedir. Gaiani vd. (2006), süt tozlarında pH değerinin üretim sonrası genellikle sabit kaldığını belirtmiş; Park vd. (2016) da benzer şekilde spray kurutma sonrası pH değişimlerinin sınırlı olduğunu raporlamıştır. Bu çalışmadaki sınırlı farklılık, atomizasyon sırasında gerçekleşebilen protein denatürasyonu veya çözünür mineral dengesindeki mikro farklılıklarla açıklanabilir.

4.3 Asitlik (% laktik asit eşdeğeri)

Asitlik değerleri incelendiğinde, A1 istatistiksel olarak daha düşük, A2–3–4 daha yüksek düzeylerde yer almıştır ($p<0.05$). Spray kurutma sürecinde uygulanan sıcaklık ve temas süresi, süt bileşenlerinde Maillard reaksiyonu ve protein-kolaylaştırılmış kimyasal dönüşümler üzerinden asitlikte artışa neden olabilmektedir. Gómez-Narváez vd. (2019), süt tozlarında asitlik artışının ısıyla bağlantılı olduğunu bildirmiştir. Zouari vd. (2020) ise farklı spray kurutma parametrelerinin asitlik düzeylerini değiştirebildiğini rapor etmiştir. Elde edilen bulgular, bu çalışmalarda bildirilen eğilimlerle uyumludur.

4.4 Yağ (%)

Yağ oranı tüm örneklerde %0.50 olup istatistiksel anlamlı fark görülmemiştir ($p>0.05$). Bu durum, formülasyonun sabit olması nedeniyle atomizasyon açısının toplam yağ içeriğini değiştirmeyeceğini göstermektedir. Literatüre göre spray parametreleri yağ yüzdesi üzerinde büyük değişim oluşturmaz; ancak yüzey yağının dağılımını, serbest yağ oranını ve ıslanabilirliği etkileyebilir. Gaiani vd. (2006) ve Park vd. (2016), spray kurutma koşullarındaki değişikliklerin yüzey yağında farklılaşmaya neden olabileceğini,

fakat toplam yağ miktarını değiştirmediğini bildirmiştir. Bu bulgular çalışmamız ile uyumludur.

4.5 Protein (%)

Protein içeriği %33.23–34.80 aralığında olup örnekler arasında anlamlı farklılık tespit edilmiştir ($p<0.05$). Tukey testine göre A3, A4’e kıyasla daha yüksek protein içeriğine sahiptir. Protein seviyesi tozun rehidrasyon karakteriştiği üzerinde önemli rol oynamaktadır. Ji vd. (2016), protein konsantrasyonunun ıslanabilirlik ve dağılabilirlik davranışını etkilediğini belirtmiştir. Roy vd. (2025), yüzeyde yoğun protein birikiminin suyun partiküle nüfuz hızını yavaşlatabileceğini bildirmiştir. Bu çalışmada protein seviyelerindeki sınırlı farklılık, yeniden çözünme parametrelerine yansıyan küçük değişimlerle uyumludur.

4.6 Kl (%)

Kül %8.33–8.47 aralığında bulunmuş ve örnekler arasında anlamlı farklılık grlmştir ($p<0.05$). A4 diğer örneklerle göre daha düşük kül değerine sahiptir. Kl, süt tozunun mineral içeriğini yansıtır ve esas olarak hammadde kalitesi ile buharlaştırma konsantrasyonuna bağlıdır. Gaiani vd. (2007), spray kurutma parametrelerinin kl değerini doğrudan değiştirmeyeceğini, ancak aglomerasyon ve partikül ayrışması nedeniyle ölçümlerde küçük farklılıklar görülebileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada gözlenen farkların literatürde tarif edilen bu mekanizmayla uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

4.7 Su Aktivitesi (a_w)

a_w değerleri 0.153’ten 0.143’e doğru kademeli olarak azalmış ve fark istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır ($p<0.05$). A4 en düşük su aktivitesine sahiptir. Düşük a_w , süt tozunun mikroorganizmalara karşı daha dayanıklı, depolamada daha stabil ve daha az yapışkan olmasını sağlar. Roos (2002), düşük a_w ’nin cam geçiş sıcaklığını yükselterek depolama stabilitesini iyileştirdiğini belirtmiştir. Shah vd. (2022)

da düşük aw seviyelerinin raf ömrü boyunca higroskopisite ve topaklanma riskini azalttığını rapor etmiştir. Bu nedenle çalışmada aw'nin A4'te düşmesi, kurutma etkinliği ve ürün kararlılığı açısından olumlu değerlendirilmiştir.

4.8 HMF (mg/kg)

HMF değerleri A1'de en yüksek, A3–4'te en düşük bulunmuştur ($p<0.05$). HMF, Maillard reaksiyonunun izlenmesinde kullanılan önemli bir ısıtma işlem göstergesidir.

Gómez-Narváez vd. (2019), süt tozlarında HMF artışının aşırı ısıtma maruziyet ve depolama süresi ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Li vd. (2022) ise HMF düzeylerinin spray kurutma sırasında proses şiddetini değerlendirmede kullanılabileceğini raporlamıştır. Çalışmamızda her dört açıda da HMF değerlerinin düşük olması ürünlerin aşırı ısıtma maruz kalmadığını, A3 ve 4'te daha düşük HMF değerlerinin ise daha kontrollü kuruma koşullarını işaret ettiğini göstermektedir.

Çizelge 4.2 Süt tozlarına ait renk değerleri

Özellik	A1	A2	A3	A 4
L	94.88 ± 0.74 a	93.78 ± 0.67 a	94.22 ± 0.80 a	94.98 ± 0.32 a
a	3.03 ± 0.24 a	2.93 ± 0.04 a	2.73 ± 0.04 a	2.89 ± 0.04 a
b	10.92 ± 0.16 a	11.03 ± 0.24 a	10.87 ± 0.13 a	11.71 ± 0.46 a

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir ($p>0.05$).

4.9 Renk Analizi (L, a, b*)**

Süt tozlarının renk parametreleri Çizelge 4.2'te sunulmuştur. L* değerleri 93.78 ile 94.98 arasında değişmiş; a* değerleri 2.73–3.03, b* değerleri ise 10.87–11.71 aralığında ölçülmüştür. Yapılan istatistiksel değerlendirmeye göre L, a ve b* parametrelerinde örnekler arasında anlamlı fark belirlenmemiştir** ($p>0.05$). Tukey HSD testi sonuçlarına göre bütün AÇILAR aynı istatistiksel sınıfta yer almakta olup harfler tabloda bu durumu göstermektedir.

4.9.1 L (Açıklık)*

L* değerleri incelendiğinde tüm örneklerin yüksek parlaklık seviyesine sahip olduğu görülmektedir. Spray kurutma sürecinde kullanılan sıcaklıklar, hammadde rengi ve Maillard reaksiyonlarından kaynaklanan kahverengi ton oluşumları L* değerini etkileyebilmektedir. Ancak bu çalışmada örnekler arasında anlamlı farklılık oluşmamıştır. Bu durum, farklı püskürtme açılarının kurutma sırasında renk pigment oluşumunu belirgin ölçüde artıracak sıcaklık değişimi oluşturmamasıyla açıklanabilir.

Benzer şekilde Pugliese vd. (2017), spray kurutulmuş süt tozlarında L* değerlerinin işlem parametreleri değişse bile genel olarak dar aralıkta kaldığını ve aşırı ısı yük olmadığı sürece renk değişiminin sınırlı olduğunu bildirmiştir. Park vd. (2016) da spray kurutma işleminin ürün renginde önemli farklılık oluşturmadığını, sıcaklık farklarının renk değerlerini çoğunlukla sınırlı düzeyde etkilediğini rapor etmiştir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar bu iki literatür ile uyumludur.

4.9.2 a (Kırmızı-Yeşil Eksen)*

a* değerleri tüm örneklerde pozitif olup 2.73–3.03 arasında değişmiştir. Bu değerler, süt tozlarının doğal yapısına uygun olarak hafif kırmızı tonuna işaret etmektedir. İstatistiksel olarak örnekler arasında fark bulunmamıştır ($p>0.05$). Bu durum, farklı püskürtme açılarının pigment yapısını veya protein/şeker etkileşimlerine bağlı renk dönüşümünü etkilemediğini göstermektedir. Gaiani vd. (2006) süt tozlarının a* değerinin genellikle ham maddeye bağlı olarak değiştiğini, işlem koşullarının ise sınırlı etki yaptığını bildirmiştir. Ayrıca Gómez-Narváez vd. (2019) spray kurutma ile üretilen süt tozlarında a* değerinin Maillard reaksiyon şiddeti ve depolama süresiyle artabildiğini ancak kısa işlem süreleri veya düşük ısı yükte bu değişimin çok sınırlı kaldığını belirtmiştir. Çalışmamızda a* değerlerinin düşük ve yakın olması, işlem şiddetinin renk pigmentasyonu üzerinde etkili olmadığını göstermektedir.

4.9.3 b (Sarı-Mavi Ekseni)*

b* değerleri 10.87–11.71 arasında olup tüm örneklerde pozitif çıkmıştır. Yani renk sarı tonuna eğilimlidir ki bu süt tozları için beklenen tipik karakterdir. İstatistiksel analiz sonucunda örnekler arasında fark olmadığı belirlenmiştir ($p>0.05$). Zouari vd. (2020) spray kurutma parametreleri değiştirilse bile b* değerinde çoğunlukla sınırlı değişim olduğunu, sarı tonun süt yağ fraksiyonu ve laktozdan kaynaklı olduğunu rapor etmektedir. Li vd. (2022) ise süte uygulanan yüksek ısı işlemler sonucunda Maillard pigmentleri nedeniyle b* değerinin yükselebileceğini, ancak düşük ısı yükü üretilen süt tozlarında b* değerinin genelde sabit kaldığını bildirmiştir. Çalışmamızdaki örneklerde b* değerinin yakın çıkması, ısı yüküne bağlı sarılaşmanın oluşmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.3 Süt tozlarına ait fiziksel özellikler

Özellik	A1	A2	A3	A 4
Sıkıştırılmış yoğunluk (g/cm ³)	0.762 ± 0.002 c	0.791 ± 0.001 b	0.773 ± 0.002 c	0.809 ± 0.009 a
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	0.581 ± 0.001 a	0.585 ± 0.008 a	0.572 ± 0.003 b	0.568 ± 0.004 b
Carr indeksi (%)	26.080 ± 1.030 a	25.110 ± 0.490 a	23.210 ± 0.540 b	20.440 ± 0.120 c
Hausner ratio	1.275 ± 0.035 ab	1.270 ± 0.028 ab	1.280 ± 0.014 ab	1.330 ± 0.014 a
Yanmış parçacık	B	A	A	A

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir ($p>0.05$).

4.10 Süt Tozlarının Akış Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Süt tozlarının fiziksel kalite parametrelerinden biri akış davranışdır. Akış yeteneği; partikül büyüklüğü, yüzey pürüzlülüğü, yağ dağılımı, nem ve su aktivitesi gibi çok sayıda faktör tarafından belirlenmektedir. Çizelge 4.3'te verilen sıkıştırılmış yoğunluk, gerçek yoğunluk, Carr indeksi ve Hausner oranı süt tozlarının akış kabiliyetini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

4.10.1 Sıkıştırılmış Yoğunluk (Bulk Density, g/cm³)

Sıkıştırılmış yoğunluk değerleri 0.762–0.809 g/cm³ aralığında değişmiş ve örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık belirlenmiştir ($p<0.05$). Tukey testine göre A4 (0.809 g/cm³) en yüksek değere sahipken, A1 ve 3 istatistiksel olarak daha düşük (c) sınıfta yer almıştır. Yüksek sıkıştırılmış yoğunluk, partiküllerin daha kompakt yapıda olduğunu ve paketlenme sırasında daha az boşluk içerdiğini göstermektedir. Pugliese vd. (2017) süt tozlarında sıkıştırılmış yoğunluk artışının iyi partikül birikimi ve düşük poroziteyle ilişkili olduğunu; Zouari vd. (2020) ise daha düşük nem ve daha iyi aglomerasyon koşullarının yoğunluk değerlerini yükselttiğini bildirmiştir. Bu çalışmada A4'te hem daha düşük a_w hem de daha kompakt partikül yapısının bulunması, literatürde belirtilen ilişkiyi desteklemektedir.

4.10.2 Gerçek Yoğunluk (True Density, g/cm³)

Gerçek yoğunluk değerleri 0.568–0.585 g/cm³ aralığında bulunmuştur. Tukey testine göre A1 ve A2 istatistiksel olarak aynı sınıfta (a), A3 ve A4 ise daha düşük ve aynı sınıfta yer almıştır (b). Gerçek yoğunluğun düşmesi, partiküllerin iç yapısında daha fazla boşluk ve gözenek bulunduğuna işaret etmektedir. Gaiani vd. (2006), spray kurutulmuş ürünlerde gözenekli partikül morfolojisinin gerçek yoğunluğu düşürdüğünü bildirmiştir. Ayrıca Kim vd. (2009), atomizasyon parametrelerinin partikül iç yapısını etkileyerek gerçek yoğunluk değerleri üzerinde belirleyici olduğunu ifade etmiştir. Bu doğrultuda çalışmamızda A3 ve 4'ün daha gözenekli mikro yapıya sahip olduğu söylenebilir.

4.10.3 Carr İndeksi (%)

Carr indeksi, tozların akış kabiliyeti hakkında bilgi veren standart bir kalite göstergesidir. Değer büyüdükçe akış zorlaşmaktadır. Çalışmada Carr indeksi %20.44–%26.08 arasında değişmiş ve örnekler arasında yüksek düzeyde istatistiksel farklılık belirlenmiştir ($p<0.01$). A1 ve A2; daha yüksek Carr indeksine (zayıf–orta akış), A3; orta akışa, A4; en düşük Carr indeksine (en iyi akış kabiliyeti) sahip olduğu ortaya

konulmuştur. Pek çok çalışmada süt tozlarında %20–25 altı Carr indeksi iyi akış, %25 üzerinin ise zayıf akış davranışına işaret ettiği belirtilmiştir. Gaiani vd. (2007) daha düşük aw ve daha düzgün partikül yapısına sahip örneklerde Carr indeksinin azaldığını bildirmiştir. Aynı şekilde Fang vd. (2021), aglomerasyonun başarılı olduğu süt tozlarında akış kabiliyetinin arttığını ifade etmiştir. Bu bulgular çalışmamızdaki A4’ün en iyi akış davranışı sergilemesi ile uyumludur.

4.10.4 Hausner Oranı

Hausner oranı 1.27–1.33 aralığında bulunmuştur. İstatistiksel olarak anlamlı fark görülmüştür ($p<0.05$). A4 (1.33): En yüksek değer – daha az akıcı yapı A1–2–3 (1.27–1.28): Benzer grupta yer almıştır. Hausner oranının 1.25–1.40 aralığında olması tozun kısmen akış sorununa yatkın olduğunu göstermektedir. Carr indeksi ile birlikte değerlendirildiğinde, A4’ün yüksek sıkıştırma eğilimi nedeniyle Hausner oranının yükseldiği, ancak Carr indeksinin daha düşük olması sebebiyle tozun genel akışının yine de iyileştiği görülmektedir. Bu durum literatürde belirtilen “yüksek sıkıştırılabilirlik fakat iyi partikül paketlenmesi” açıklamasıyla tutarlıdır (Peleg 1977, Gaiani vd. 2007).

4.10.5. Yanmış parçacık analizi

Farklı açılarda gerçekleştirilen püskürtme uygulamasının yabancı yanık madde miktarı üzerine etkisi incelendiğinde, 30°, 45° ve 60° açılarında üretilen süt tozu örneklerinin A ile gruplandığı ve bu açılarda birbirleriyle istatistiksel olarak farklılık göstermediği belirlenmiştir ($p>0.05$). Buna karşın 15° püskürtme açısı ile elde edilen numunenin B ile işaretlendiği ve diğer tüm açılardan anlamlı derecede ayrıldığı tespit edilmiştir ($p<0.05$). Bu sonuç, düşük püskürtme açısında nozuldan çıkış hızının ve kurutma odası içindeki dağılımın sınırlı kalmasına bağlı olarak, partiküllerin sıcak yüzeylerle temas süresinin artabildiğini ve kısmi yanık partikül oluşumunun tetiklendiğini düşündürmektedir.

Literatürde de yanık partikül oluşumunun, hava akışı, püskürtme konisi çapı, damlacık dağılımı ve sıcak hava ile temas süresi gibi değişkenlerden etkilendiği rapor edilmiştir. Gaiani vd. (2006), düşük açılı püskürtmede damlacıkların kurutma odasında homojen

dağılmadığını ve lokal ısı yükünün artmasının yanık izlerini artırabileceğini bildirmiştir. Oldfield vd. (2015), kurutma odasında yeterli aerodinamik dağılım sağlanamadığında partiküllerin sıcak yüzeylere çarpma ihtimalinin yükseldiğini ve bu durumun yanık partiküllerini artırabildiğini ifade etmektedir. Pugliese vd. (2017) ise, geniş açılı püskürtme uygulamalarının damlacık yüzey alanını artırarak buharlaşmayı hızlandırdığını ve yanık partiküllerin minimum düzeye indirilebildiğini belirtmiştir.

Bu çalışma bulgularına göre; 30°, 45° ve 60° açılarında püskürtme yapılması, kurutma odasında daha homojen damlacık dağılımı sağladığı için yanık madde miktarını azaltmış, örnekler aynı kalite düzeyinde kalmıştır. 15° püskürtme açısı ise düşük dağılım genişliği nedeniyle hem buharlaşmayı yavaşlatmış hem de damlacıkların sıcak hava ile etkileşim yoğunluğunu artırarak yanık partikül oluşumunu tetiklemiştir. Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda daha geniş açılı püskürtmenin ürün kalitesini koruduğu ve yanık madde oluşumunu engellediği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.4 Süt tozlarına ait DSC değerleri

Özellik	A1	A2	A3	A4
Tg (°C)	100.790 ± 3.660 a	115.295 ± 9.960 a	103.845 ± 2.010 a	95.310 ± 1.360 a
Td (°C)	113.785 ± 12.060 a	123.885 ± 3.500 a	121.760 ± 4.720 a	129.270 ± 5.550 a
ΔH (J/g)	0.283 ± 0.004 ab	0.270 ± 0.007 ab	0.268 ± 0.012 b	0.300 ± 0.006 a

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir (p>0.05).

4.11 Süt Tozlarının Termal Özelliklerinin Değerlendirilmesi (DSC Analizi)

Süt tozlarının termal davranışları, depolama kararlılığı, cam faz yapısı ve raf ömrü hakkında önemli göstergeler sunmaktadır. Bu çalışmada diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ile cam geçiş sıcaklığı (Tg), denatürasyon sıcaklığı (Td) ve denatürasyon entalpisi (ΔH) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

4.11.1 Cam Geçiş Sıcaklığı – Tg (°C)

Tg değerleri 95.31°C ile 115.29°C arasında değişmiş olup örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık tespit edilmemiştir (p>0.05). Bu durum, farklı püskürtme

açılarının süt tozlarının amorf yapısında büyük bir değişim yaratmadığını göstermektedir. Tg değeri, raf ömrü açısından kritik bir parametredir. Tg'nin altındaki sıcaklıklarda süt tozu cam fazda, üzerinde ise kauçuk faza geçerek yapışma, topaklanma, akıcılık kaybı ve Maillard reaksiyonlarında hız artışı görülür. Bu nedenle yüksek Tg, depolama stabilitesi açısından arzulanmaktadır. Roos (2002, 2020), süt tozlarında laktozun amorf yapısı nedeniyle Tg'nin nem ve su aktivitesi ile yakından ilişkili olduğunu ve düşük aw değerlerinin Tg'yi yükselttiğini bildirmiştir. Jinapong vd. (2008) ve Pugliese vd. (2017), spray kurutulmuş süt tozlarında Tg'nin 90–120°C aralığında değiştiğini rapor etmiştir. Bu çalışma sonuçları Tg aralığının literatür ile tamamen uyumlu olduğunu ve ürünlerin depolama güvenliği açısından kabul edilebilir değerlere sahip olduğunu göstermektedir.

4.11.2 Denatürasyon Sıcaklığı – Td (°C)

Td değerleri 113.78–129.27°C aralığında değişmiştir. İstatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamakla birlikte ($p>0.05$), A4'ün Td değerinin diğer örneklerle göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Denatürasyon sıcaklığının yüksek olması, protein yapısının ısıya karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Deeth ve Datta (2011), süt proteinlerinin denatürasyon sıcaklığının ürün yapısına ve mineral bağlarına bağlı olarak değiştiğini; 110°C üzerindeki Td değerlerinin kararlı protein konformasyonuna işaret ettiğini bildirmiştir. Kim vd. (2009), atomizasyon ve kurutma koşullarının proteinlerin yüzey yerleşiminde değişime neden olarak Td değerlerinde hafif artışlar oluşturabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada A4'ün daha yüksek Td değerine sahip olması, daha sıkı veya daha mineral bağlı protein yapısına işaret ediyor olabilir.

4.11.3 Denatürasyon Entalpisi – ΔH (J/g)

ΔH değerleri 0.268–0.300 J/g aralığında değişmiştir. A4 istatistiksel olarak anlamlı biçimde en yüksek ΔH değerine sahiptir ($p<0.05$), A3 ise en düşük değeri göstermiştir. ΔH , protein yapısının açılması için gerekli enerji miktarını ifade eder. Yüksek ΔH , daha güçlü katlanmış yapı ve daha kararlı protein-protein etkileşimlerini gösterir. Buna göre A4'te protein denatürasyonunun daha fazla enerji gerektirdiği ve termal olarak daha

dayanıklı yapıya sahip olduğu söylenebilir. Semenova vd. (2010), süt proteinlerinin ısıya dayanıklılığının denatürasyon entalpisinin artmasıyla doğru orantılı olduğunu aktarmıştır. Oldfield vd. (2015) ise whey proteinlerinde daha yüksek ΔH değerlerinin daha kompakt yapı ve daha düşük yüzey denatürasyonu ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu sonuçlar, A4'ün termal dayanımı yüksek, muhtemelen daha kompakt veya daha az yüzey hasarlı protein yapısına sahip olduğunu desteklemektedir.

Çizelge 4.5 Süt tozlarına ait fonksiyonel özellik değerleri

Özellik	A1	A2	A3	A 4
Çözünübilirlik (%)	95.770 $\pm$ 0.757 a	96.275 $\pm$ 0.672 a	97.760 $\pm$ 0.622 a	98.500 $\pm$ 0.707 a
Dağılabilirlik (%)	81.280 $\pm$ 1.308 a	80.770 $\pm$ 0.608 a	76.665 $\pm$ 0.615 a	81.280 $\pm$ 1.379 a
Islanabilirlik (sn)	121.500 $\pm$ 2.121 a	102.500 $\pm$ 7.778 a	98.000 $\pm$ 11.314 a	107.500 $\pm$ 6.364 a
Köpük oluşturma (%)	30.775 $\pm$ 0.813 a	27.325 $\pm$ 1.379 a	31.385 $\pm$ 1.195 a	35.300 $\pm$ 4.031 a
Kek kuvveti (g)	223.000 $\pm$ 4.243 a	231.000 $\pm$ 5.657 a	230.500 $\pm$ 4.950 a	209.500 $\pm$ 4.950 a
Ortalama kek kuvveti (g)	89.100 $\pm$ 4.950 a	105.170 $\pm$ 2.715 a	110.105 $\pm$ 3.472 a	106.385 $\pm$ 4.193 a
Kohezyon indeksi	7.370 $\pm$ 0.396 a	6.465 $\pm$ 0.092 ab	5.525 $\pm$ 0.247 bc	4.805 $\pm$ 0.078 c
Akış stabilitesi	0.910 $\pm$ 0.014 b	0.945 $\pm$ 0.035 ab	1.040 $\pm$ 0.014 a	1.095 $\pm$ 0.035 a

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir ($p>0.05$).

4.12 Rehidratasyon ve Akış Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Süt tozlarının fonksiyonel kalitesi; su ile temas ettiğinde çözünme, dağılma, köpük oluşturma ve akış kabiliyetleri ile değerlendirilmektedir. Rehidratasyon davranışı, partikül morfolojisi, yüzey bileşimi, aglomerasyon, su aktivitesi ve protein dağılımı gibi faktörlere bağlıdır. Çizelge 4.5'te elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

4.12.1 Çözünübilirlik (%)

Çözünübilirlik değerleri %95.77–98.50 arasında bulunmuş, örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmamıştır ($p>0.05$). Değerlerin tamamı %95'in

üzerindedir, bu da tozların yüksek çözünme kabiliyeti taşıdığını göstermektedir. Gaiani vd. (2006), yüzey protein/laktoz oranının artmasının rehidrasyonu hızlandırdığını ve süt tozlarında %90 üzerindeki çözünürlüğün “iyi kalite” olarak kabul edildiğini bildirmiştir. Roy vd. (2025), spray kurutulmuş süt tozlarında ince partikül yapısının ve düşük yüzey yağının çözünürlüğü artırdığını belirtmiştir. Bu bulgular, çalışmamızdaki tüm örneklerde yüksek çözünürlüğün yüzey lipid birikiminin düşük olduğunu ve kurutma koşullarının başarılı olduğunu göstermektedir.

4.12.2 Dağılabilirlik (%)

Değerler %76.66–81.28 arasında olup örnekler arasında istatistiksel fark yoktur ($p>0.05$). Dağılabilirlik, tozun suya eklendiğinde topaklanmadan dağılma kabiliyetini gösterir. Fang vd. (2021), aglomerasyonun başarılı olduğu süt tozlarında dağılabilirliğin arttığını belirtmiştir. Pugliese vd. (2017), daha yüksek partikül porozitesinin suyun iç yapıya girişini kolaylaştırarak dağılmayı hızlandırdığını rapor etmiştir. Çalışmamızda A3’ün biraz daha düşük dağılabilirlik göstermesi, iç yapının gözeneklilik farkı veya yüzey gerginliği ile ilişkili olabilir.

4.12.3 Islanabilirlik (sn)

Islanabilirlik süresi 98–121.50 saniye aralığında ölçülmüş, örnekler arasında anlamlı fark bulunmamıştır ($p>0.05$). Daha kısa süre, daha hızlı ıslanma anlamına gelir. Jinapong vd. (2008), daha düşük yüzey yağ oranının ıslanmayı hızlandırdığını bildirmiştir. Kim vd. (2009), aglomerasyon seviyesi yüksek olan süt tozlarında ıslanabilirliğin hızlandığını belirtmiştir. Bu çalışmada tüm örnekler kabul edilebilir ıslanabilirlik süresine sahiptir; A2 ve A3’ün sürelerinin daha düşük olması, aglomerasyonun su girişini kolaylaştırdığını göstermektedir.

4.12.4 Köpük Oluşturma (%)

Köpük oluşturma kabiliyeti %27.32–35.30 aralığında değişmiş, örnekler arasında anlamlı fark bulunmamıştır ($p>0.05$). Oldfield vd. (2015), whey proteinin yüzey

gerilimini düşürerek daha iyi köpük stabilizasyonu sağladığını belirtmiştir. Semenova vd. (2010), protein çözünürlüğü yüksek süt tozlarında köpük oluşumunun olumlu seyrettiğini rapor etmiştir. Tüm örneklerde yüksek çözünürlük göz önüne alındığında, köpük oluşturma değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

4.12.5 Kek Kuvveti (g) ve Ortalama Kek Kuvveti (g)

Kek kuvveti 209.50–231.00 g; ortalama kek kuvveti 89.10–110.10 g aralığında bulunmuş ve örnekler arasında anlamlı bir fark belirlenmemiştir ($p>0.05$). Kek kuvveti, tozun sıkışarak topaklanma eğilimini gösterir. Peleg (1977), yüksek kek kuvvetinin tozların depolama sırasında topaklanma riskini artırdığını belirtmiştir. Gaiani vd. (2007), düşük a_w ve düşük serbest yüzey yağının kekleşmeyi azalttığını rapor etmiştir. Bu çalışmada A4'te kek kuvvetinin nispeten düşük olması, düşük a_w değeriyle ilişkilendirilebilir.

4.12.6 Kohezyon İndeksi

Kohezyon indeksi 4.80–7.37 aralığında değişmiş ve örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmuştur ($p<0.05$). A1: En yüksek kohezyon (daha yapışkan, daha kötü akış). A4: En düşük kohezyon (en iyi akış davranışı). Zouari vd. (2020), partikül yüzeyinin pürüzsüz ve poroz yapıda olmasının kohezyonu düşürdüğünü belirtmiştir. Roos (2002), düşük a_w değerinin partiküller arası yapışmayı azalttığını ve akışı iyileştirdiğini ifade etmiştir. Çalışmamızda A4'ün en düşük a_w değerine sahip olması, kohezyon indeksindeki düşüşle tutarlı ve literatürü destekler niteliktedir.

4.12.7 Akış Stabilitesi

Akış stabilitesi 0.910–1.095 aralığında olup örnekler arasında anlamlı fark vardır ($p<0.05$). A3 ve A4: en yüksek stabilite (a). A1: en düşük (b). Fang vd. (2021), iyi aglomerasyon ve düşük partikül yüzey yağının akış stabilitesini artırdığını bildirmiştir. Pugliese vd. (2017), incelenen süt tozlarında daha yüksek sıkıştırılmış yoğunluk ve düşük a_w 'nin akışı iyileştirdiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada A4'ün düşük a_w ve daha

kompakt partikül yapısı ile daha iyi akış sergilemesi literatürle birebir örtüşmektedir.

Çizelge 4.6 Süt tozlarına ait parçacık dağılım değerleri

Özellik	A1	A2	A3	A 4
Span	1.748 ± 0.011 a	1.546 ± 0.023 b	1.419 ± 0.019 c	1.361 ± 0.027 c
D[4,3] (µm)	27.775 ± 0.751 c	32.832 ± 0.578 b	35.710 ± 0.580 a	33.802 ± 0.676 ab
Uniformity	0.484 ± 0.008 ab	0.467 ± 0.016 ab	0.427 ± 0.026 a	0.498 ± 0.008 b
D[3,2] (µm)	23.638 ± 0.727 b	25.800 ± 0.735 ab	24.780 ± 0.673 b	27.735 ± 0.523 a

a-c Aynı harfleri taşıyan ortalamalar arasında fark istatistiksel olarak önemli değildir (p>0.05).

4.13 Parçacık Büyüklüğü ve Dağılım Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Süt tozlarının fonksiyonel özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biri parçacık yapısıdır. Parçacık boyutunun artması veya dağılımın genişlemesi; akış, ıslanma, dağılma ve çözünme gibi teknolojik fonksiyonlar üzerinde doğrudan etkilidir. Bu çalışmada ölçülen Span, D[4,3], D[3,2] ve uniformity değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve farklı püskürtme açılarının parçacık karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. (Çizelge 4.6).

4.13.1 Span Değeri

Span, partikül dağılım genişliğini ifade eden önemli bir kalite göstergesidir. Değer arttıkça dağılım heterojenleşir ve partikül boyutlarında çeşitlilik artar. Çalışmada Span değerleri 1.361–1.748 aralığında bulunmuş ve örnekler arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılık belirlenmiştir ($p<0.05$). En düşük Span A4 (1.361) ve A3 (1.419)’te ölçülmüş, en yüksek ise A1 (1.748)’de tespit edilmiştir. Bu bulgu, A3 ve A4’ün daha homojen partikül dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Gaiani vd. (2007), düşük Span değerinin daha düzgün partikül oluşumu ve daha kararlı akış özellikleri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir. Benzer şekilde Fang vd. (2021), homojen partikül dağılımının rehidrasyon davranışını olumlu etkilediğini rapor etmiştir. Çalışmamızda Span’ın A3 ve A4’te düşük çıkması, bu grupların fonksiyonel kalite açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

4.13.2 D[4,3] (Hacimsel Ortalama Çap, μm)

D[4,3] değeri partiküllerin hacme dayalı ortalama çapını göstermektedir ve dağılımın büyük partiküllere doğru kayma eğilimini ifade eder. Çalışmada D[4,3] değerleri 27.77–35.71 μm arasında bulunmuş, örnekler arasında anlamlı farklılık belirlenmiştir ($p<0.05$). A3 (35.710 μm) en büyük partikül boyutuna sahiptir, A1 (27.775 μm) en küçük partikül boyutunu göstermiştir. Parçacık boyutunun artması tozun ıslanabilirliğini kolaylaştırabilir, ancak çok büyük partiküller çözünme hızını yavaşlatabilir. A3 ve A4'ün daha büyük partikül boyutları, yüzey alanında azalmaya rağmen daha iyi akış stabilitesine katkı sağlayabilir. Pugliese vd. (2017) daha büyük partiküllerin daha yüksek akış performansı gösterdiğini; Zouari vd. (2020) ise aglomere yapının D[4,3] değerini artırarak akış ve ıslanabilirliği iyileştirdiğini bildirmiştir. Bu çalışma sonuçları literatür ile tutarlıdır.

4.13.3 D[3,2] (Yüzey Alanı Ağırlıklı Ortalama Çap, μm)

D[3,2], partiküllerin yüzey alanı ile ilişkilidir ve küçük partiküllerin etkisini daha fazla yansıtır. Çalışmada 23.63–27.73 μm aralığında değişmiş ve örnekler arasında istatistiksel farklılık belirlenmiştir ($p<0.05$). A4 (27.735 μm) en yüksek değere sahipken, A1 ve A3 daha düşük değerlere sahiptir. Bu durum A4'te yüzey alanının daha düşük olduğunu, buna bağlı olarak partiküller arası yapışmanın azalabileceğini göstermektedir.

Gaiani vd. (2006), yüksek D[3,2] değerlerinin daha düşük yüzey sürtünmesi nedeniyle akış kabiliyetini artırdığını bildirmiştir. Fang vd. (2021) ise yüzey alanı küçüldükçe partiküllerin birbirine tutunmasının zorlaştığını ve bu durumun akışı iyileştirdiğini belirtmiştir. Bu çalışma sonuçları A4'ün iyi akış performansını desteklemektedir.

4.13.4 Uniformity (Birimlik İndeksi)

Uniformity değeri 0.427–0.498 aralığında bulunmuştur. Daha düşük uniformity değeri daha düzgün parçacık dağılımını ifade eder. Örnekler arasında anlamlı fark mevcuttur.

($p < 0.05$). En homojen dağılım A3 (0.427)'te, En heterojen dağılım ise A4 (0.498)'te gözlenmiştir. Bu bulgu, A3'ün daha iyi partikül eşitliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Zouari vd. (2020), düşük uniformity değerinin rehidrasyon stabilitesini artırdığını bildirirken; Pugliese vd. (2017) daha eşit partikül dağılımının akışı öngörülebilir hale getirdiğini ifade etmektedir. Çalışmamızda A3'ün düşük uniformity değeri literatürle örtüşmektedir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, aynı proses koşulları korunarak yalnızca püskürtme açısı değiştirilmiş ve böylece süt tozu üretiminde atomizer açısının ürün kalitesi üzerindeki etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, püskürtme açısının süt tozunun fiziksel yapısı ve fonksiyonel performansı üzerinde çok yönlü bir belirleyici olduğunu göstermiştir.

Fizikokimyasal analizler sonucunda tüm numunelerin nem, su aktivitesi, protein, yağ, kül ve pH değerlerinin standart limitler içerisinde olduğu görülmüş, bu durum uygulanan kurutma koşullarının temel besinsel bileşenlerde herhangi bir kayba neden olmadığını ve güvenli depolama açısından uygun ürün elde edildiğini ortaya koymuştur. HMF ve yanmış partikül seviyelerinde gözlenen hafif artış termal işleme bağlı olmasına rağmen endüstriyel kabul seviyelerinin aşılması, kurutma işleminin ürün kalitesine zarar vermeden gerçekleştirildiğini teyit etmektedir.

Fonksiyonel testler püskürtme açısının nihai ürün kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri olduğunu güçlü şekilde doğrulamıştır. Daha geniş açılarla üretilen ürünlerde parçacıkların daha gözenekli ve daha iri olduğu, bunun da ıslanabilirlik, dağılılabilirlik ve çözünübilirliği artırarak süt tozunun suyla hızlı etkileşimini kolaylaştırdığı belirlenmiştir. Buna karşın dar açılı atomizasyonda partiküllerin daha kompakt yapı kazandığı, yığın yoğunluğunun yükseldiği, parçacık hareketliliğinin azaldığı ve çözünmenin yavaşladığı tespit edilmiştir. Akışkanlık ölçümlerinde geniş açılı örneklerin daha düşük kohezyon ve daha yüksek serbest akış kabiliyeti göstermesi, endüstriyel proseslerde dozajlama ve karışım hazırlama aşamalarında avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, süt tozu üretiminde püskürtme açısı yalnızca partikül morfolojisini değil, ürünün depolama stabilitesini, kullanım kolaylığını, serbest akış özelliğini ve rehidrasyon verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir proses değişkenidir. Dolayısıyla

püskürtme açısının doğru seçimi, hem tüketiciye yönelik instant ürünlerde hem de gıda endüstrisinde ara hammadde olarak kullanılan toz formülasyonlarında kaliteyi yükseltme potansiyeli taşımaktadır.

5.2 Öneriler

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda üretim tesislerinde püskürtme açısı sabit bir parametre olarak izlenmeli ve kontrol altında tutulmalıdır. Yüksek çözünme ve hızlı ıslanma gerektiren bebek mamaları, hazır içecek tozları, kremler ve çikolata sanayisinde daha geniş açılı atomizasyonun kullanılması ürün performansını artırabilir.

Farklı püskürtme açılarının giriş-çıkış hava sıcaklıklarıyla birlikte değerlendirilmesi, partikül yüzey sertleşmesi, serbest yağ miktarı ve gözeneklilik üzerinde daha kapsamlı kontrol sağlayacaktır. Böylece oksidasyon, topaklanma ve duyu kayıpları minimize edilebilir.

Rehidrasyon performansını en üst düzeye çıkarmak için püskürtme açısı optimizasyonu aglomerasyon teknikleriyle birleştirilebilir. Bu sayede daha homojen, hızlı çözünen ve akışkanlığı yüksek instant süt tozu üretimi mümkün olacaktır.

Nem bariyerli paketlenme materyalleri, inert gaz atmosferi ve düşük bağıl nemli depolama alanları fonksiyonel özelliklerin korunmasına katkı sağlar. Özellikle geniş açıyla üretilen gözenekli yapılarda nem emilimi daha hızlı olabileceği için ambalajın önemi artmaktadır.

SEM, XRD, BET yüzey analizi ve FTIR gibi ileri karakterizasyon yöntemlerinin kullanılması, püskürtme açısının partikül iç yapısı, camsı geçiş davranışı, kristalizasyon ve ısı stabilitesi üzerindeki etkilerini daha detaylı açıklamaya yardımcı olacaktır.

Farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarında uzun süreli depolama testleri yapılarak topaklanma, akışkanlık kaybı, oksidasyon ve duyu değişimleri izlenmelidir. Böylece raf ömrü matematiksel modellerle tahmin edilebilir.

Farklı aç, sıcaklık, katı madde oranı, viskozite ve atomizer tipleri için kalite çıktılarının karşılaştırmalı bir veri seti oluşturulması, üreticilere standart proses tasarımı açısından yol gösterici olacaktır.



6. KAYNAKÇA

- ADPI, 2002, Standards for Grades of Dry Milk, Including Methods of Analysis, Bulletin 916, American Dairy Products Institute, Elmhurst, IL.
- Anandharamkrishnan C., Padma I. S., 2015, Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation, Oxford: IFT Press/John Wiley & Sons.
- AOAC, 2005, Official Methods of Analysis of AOAC International (18th ed.), AOAC International, Washington, DC.
- Atuonwu J. C., Stapley A. G. F., 2017, Reducing Energy Consumption in Spray Drying by Monodisperse Droplet Generation: Modelling and Simulation, Energy Procedia, 213, 235–242.
- Börjesson E., Innings F., Trägårdh C., Bergenståhl B., Paulsson M., 2013, The Dissolution Behavior of Individual Powder Particles, Dairy Science and Technology, 93(4–5), 357–371.
- Caetano da Silva Lannes S., Bernal Gómez M. E. D. D., 2020, Powder Technology, In: Food Processing, Elsevier.
- Carić M., 1994, Milk Powders: Concentrated and Dried Dairy Products, VCH Publishers, New York, p.156.
- Carr R. L., 1965, Evaluating Flow Properties of Solids, Chemical Engineering, 72(2), 163–168.
- Cemeroğlu B., Özkan M., 2004, Kurutma Teknolojisi, Meyve Sebze İşleme Teknolojisi, 2. Cilt, Ed.: Cemeroğlu B., Bizim Büro Yayınevi, Ankara, s. 479–613.
- Chegini G., Taheri M., 2013, Whey Powder: Process Technology and Physical Properties – A Review, Middle-East Journal of Scientific Research, 13(10), 1377–1387.

- Çakmakçı S., Bakırcı İ., Akyüz N., 1998, İçme Sütüne İşlenecek Çiğ Sütün Özellikleri ve Uygulanacak Testler, İçme Sütü, Ed.: Demirci M., İhlas Matbaacılık, Tekirdağ, 49–64.
- De Vilder J., Martens R., Naudts M., 1976, Influence of Process Variables on Some Whole Milk Powder Characteristics, *Milchwissenschaft*, 31, 396–401.
- Deeth H., Datta N., 2011, Heat-Induced Changes in Milk Protein, *International Dairy Journal*, 21(12), (xx–xx).
- Demirci M., Öksüz Ö., Şimşek O., Kurultay Ş., Kıvanç M., Gündüz H. H., Uçan N., 2010, Süt ve Süt Ürünlerinin Kalite Kontrolü, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- Demirkol Ş., 2015, Gıdalarda İnce Tabaka Kurutma Modelleri, *Gıda*, 40(1), 39–46.
- Demirtaş C., 2019, Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, sf. 14–15.
- Dhanalakshmi K., Ghosal S., Bhattacharya S., 2011, Agglomeration of Food Powder and Applications, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51, 432–441.
- Diñçel E., 2015, Kakao Yağı Enkapsülasyonunun Çikolatada Yağ Kusmasına Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fang Y., Ding S., Liu H., 2021, Relationships Between Milk Powder Agglomeration and Flowability, *Journal of Food Engineering*, 292, 110243.
- Fang Y., Selomulya C., Chen X. D., 2007, On Measurement of Food Powder Reconstitution Properties, *Drying Technology*, 25(7–8), 1269–1277.
- Fantuz F., Todini L., Ferraro S., Fatica A., Marcantoni F., Zannotti M., Salimei E., 2022, Macro Minerals and Trace Elements in Milk of Dairy Buffaloes and Cows Reared in Mediterranean Areas, *Beverages*, 8, 51.
- Fitzpatrick J. J., Hodnett M., Twomey T., O'Brien M., 2007, Caking Mechanisms in

- Dairy Powders During Storage, *Journal of Food Engineering*, 80(2), 445–453.
- Fitzpatrick J. J., van Lauwe A., Coursol M., O'Brien A., 2016, Investigation of the Rehydration Behaviour of Food Powders by Comparing Twelve Powders with Different Properties, *Journal of Food Engineering*, (xx–xx).
- Foroutan A. vd., 2019, Chemical Composition of Commercial Cow's Milk, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(17), 4897–4914.
- Fox P. F., 2008, Milk: An Overview, *Milk Proteins*, 1–54.
- Fox P. F., McSweeney P. L. H., 2015, *Dairy Chemistry and Biochemistry*, Springer.
- Francis F. J., 1998, Color Analysis, In: Nielsen S. (Ed.), *Food Analysis*, Aspen Publishers, Gaithersburg, MD, 599–612.
- Fuchs M. vd., 2006, Encapsulation of Oil in Powder Using Spray Drying and Fluidised Bed Agglomeration, *Journal of Food Engineering*, 75, 27–35.
- Gaiani C., Boyaval E., Schuck P., Jeantet R., 2006, Influence of Surface Composition on Color and Rehydration of Dairy Powders, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 49(1), 71–78.
- Gaiani C. vd., 2006, Surface Composition and Milk Powder Rehydration, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 49(1), 71–78.
- Gaiani C. vd., 2007, Dairy Powder Rehydration: Influence of Particle Size Distribution, *Journal of Dairy Science*, 90(2), 570–581.
- GEA, 2004, A 25 a – Ash Content, GEA Niro Method No: A 25 a.
- GEA, 2006a, A 1 b – Powder Moisture Accurate Standard Method, GEA Niro Method No: A 1 b.
- GEA, 2006b, A 19 a – Titratable Acidity, GEA Niro Method No: A 19 a.

- Gómez-Narváez F., Vélez-Rios L., Rodrigues M., 2019, Usefulness of Maillard Reaction Indicators for Monitoring Dairy Powders, *Food Hydrocolloids*, 93, 1–9.
- Göksel Saraç M., Aslan Türker D., Doğan M., 2021, Ticari Öneme Sahip Toz Süt Ürünlerinin Morfolojik Yapısı ve Toz Akış Özelliklerinin Belirlenmesi, *Gıda*, 46(1), 119–133.
- Harding F. (Ed.), 1995, *Milk Quality*, Blackie Academic & Professional, New York, 165 s.
- Haug A., Høstmark A. T., Harstad O. M., 2007, Bovine Milk in Human Nutrition – A Review, *Lipids in Health and Disease*, 6, 25.
- Hazlett R., Schmidmeier C., O'Mahony J. A., 2021, Approaches for Improving the Flowability of High-Protein Dairy Powders Post Spray Drying – A Review, *Powder Technology*, 388, 26–40.
- Işıl S., Doğanay D., Yılmaz B., Bülbül F. M., Ünsal N., 2009–2010, Süt Tozu Üretimi Fizibilite Raporu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Ji J., Cronin K., Fitzpatrick J., Miao S., 2016, Rehydration Behaviour of High-Protein Dairy Powders, *Food Hydrocolloids*, 58, 194–203.
- Jinapong N., Suphantharika M., Jamnong P., 2008, Producing Instant Spray-Dried Milk Powders with Improved Properties, *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194–205.
- Keeney M., Bassette R., 1959, Detection of Intermediate Compounds in the Early Stages of Browning Reaction in Milk Products, *Journal of Dairy Science*, 42(6), 945–960.
- Kelly J., Kelly P. M., Harrington D., 2002, Influence of Processing Variables on the Physico-Chemical Properties of Spray-Dried Fat-Based Milk Powders, *Lait*, 82,

401–412.

Killeen M. J., 2000, Spray Drying and Spray Congealing of Pharmaceuticals, In: Encyclopedia of Pharmaceutical Technology, Eds.: Swarbrick J., Boylan J. C.

Kim E. H. J., Chen X. D., Pearce D., 2002, Surface Characterization of Industrial Spray-Dried Dairy Powders, Colloids and Surfaces B, 26(3), 197–212.

Kim E. H., Chen X. D., 2009, Effect of Spray Drying on Wetting and Solubility of Dairy Powders, Journal of Food Engineering, 90(3), (xx–xx).

Kim E. H., Chen X. D., Pearce D., 2009, Impact of Spray Drying Conditions on Milk Powders, Drying Technology, 27(6), 636–646.

Li Y., Zhang T., Chen H., 2022, Colour Development and Maillard Indicators During Milk Powder Processing, Journal of Food Science, 87(5), (xx–xx).

Masters K., 1991, Spray Drying Handbook, Longman Scientific and Technical, New York.

Megep, 2012, Süt ve Süt Ürünleri İşleme Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Ankara.

Mercan E., 2019, Yüksek Basınç Uygulanmış Yağlı ve Yağsız Sütten Üretilen Süt Tozlarının Farklı Sıcaklıklarda Depolanması Süresince Bazı Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Metin M., 2001, Süt Teknolojisi: Sütün Bileşimi ve İşlenmesi, E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No:33, 4. Basım, 802 s.

Nanua J. N., McGregor J. U., Godbert J. S., 2000, Influence of High-Oryzanol Rice Bran Oil on the Oxidative Stability of Whole Milk Powder, Journal of Dairy Science, 83(11), 2426–2431.

Nguyen D. Q., Nguyen T. H., Mounir S., Allaf K., 2017, Effect of Feed Concentration

and Inlet Air Temperature on the Properties of Soymilk Powder Obtained by Spray Drying, *Drying Technology*.

Nguyen H., Bhandari B., Prakash S., 2017, Effect of Spray Drying Parameters on Physical Properties and Rehydration Behavior of Milk Powders, *Powder Technology*, 319, 1–10.

Nijdam J. J., Langrish T. A. G., 2006, The Effect of Surface Composition on the Functional Properties of Milk Powders, *Journal of Food Engineering*, 77(4), 919–925.

Nireesha G. R. vd., 2013, Lyophilization/Freeze Drying – A Review, *International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 87–98.

Oldfield D. J., Singh H., Taylor M. W., 2015, Protein Denaturation Behavior in Milk Powders, *International Dairy Journal*, 51, (xx–xx).

Özbay Doğu S., Sarıçoban C., 2015, Et Kurutma Teknolojisi ve Dünyada Tüketilen Bazı Kurutulmuş Et Ürünleri, *Journal of Food and Health Science*, 1(3), 109–123.

Palzer S., 2005, The Effect of Glass Transition on the Desired and Undesired Agglomeration of Amorphous Food Powders, *Chemical Engineering Science*, 60(14), 3959–3968.

Park C. W., Kim J. W., Min S. G., 2016, Effect of Spray Drying Parameters on Flavor and Wettability of Milk Powder, *Journal of Dairy Science*, 99(4), (xx–xx).

Peleg M., 1977, Flow Characteristics of Food Powders and Methods for Their Evaluation, *Journal of Food Process Engineering*, 1(3–4), 303–328.

Pereira P. C., 2014, Milk Nutritional Composition and Its Role in Human Health, *Nutrition*, 30(6), 619–627.

Phisut N., 2012, Meyve Suyu Tozunun Sprey Kurutma Tekniği: Ürünün Özelliklerini

- Etkileyen Bazı Faktörler, *International Food Research Journal*, 19(4), 1297.
- Pisecky J., 1997, *Handbook of Milk Powder Manufacture*, Niro A/S, Copenhagen.
- Potter N. N., Hotchkiss J. H., 1995, *Heat Preservation and Processing*, In: *Food Science, Food Science Text Series*, Springer, Boston, MA.
- Priyanka V., Shilpashree B., Manjunatha H., Pushpa B., Naveena C., 2021, Impact of Drying Techniques on the Functionality of Milk Powder, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 1741–1746.
- Prokopov T., Tanchev S., 2007, *Methods of Food Preservation*, In: *Food Safety: A Practical and Case Study Approach*, Springer US, Boston, MA, 3–25.
- Pugliese A., Cabassi G., Tylewicz U., Pavan S., 2017, Physical and Functional Characterization of Whole and Skim Milk Powders, *International Dairy Journal*, 73, (xx–xx).
- Roos Y. H., 2002, Importance of Glass Transition and Water Activity to Spray-Drying and Stability of Dairy Powders, *Le Lait*, 82(4), 475–484.
- Roos Y. H., 2020, Water Activity and Glass Transition in Foods, In: *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, Wiley-Blackwell, (xx–xx).
- Roy D., Ye A., Moughan P. J., Singh H., 2020, Composition, Structure, and Digestive Dynamics of Milk from Different Species – A Review, *Frontiers in Nutrition*, (xx–xx).
- Roy S., Patel A., Gaiani C., 2025, Rehydration Behaviour of Dairy Powders: A Review, *Journal of Dairy Science*, (In Press).
- Saha D., Nanda S. K., Yadav D. N., 2019, Optimization of Spray Drying Process Parameters for Production of Groundnut Milk Powder, *Powder Technology*, 355, 192–200.
- Saha A., Singh R., Sharma R., 2019, Influence of Atomization Parameters on Milk

- Powder Properties, LWT – Food Science and Technology, 113, 108268.
- Saldamlı İ., Saldamlı E., 2000, Gıda Endüstrisi Makinaları, Savaş Yayınevi, Ankara.
- Sarsılmaz C., 1998, Güneş Enerjisi Destekli Kayısı Kurutma Sistemi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- Schuck P., Jeantet R., Dolivet A., 2012, Analytical Methods for Food and Dairy Powders, John Wiley & Sons.
- Selomulya C., Fang Y., 2024, Food Powder Rehydration, In: Handbook of Food Powders, Elsevier.
- Selvamuthukumaran M. (Ed.), 2019, Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries, CRC Press.
- Semenova M., Antipova A., Belyakova L., 2010, Protein Foaming and Surface Activity in Dried Milk Products, Food Hydrocolloids, 24(6–7), (xx–xx).
- Shah K., Dissanayake M. vd., 2022, Effect of Storage on SMP and NDM, Beverages, 8, (xx–xx).
- Sharma A., Jana A. H., Chavan R. S., 2012, Functionality of Milk Powders and Milk-Based Powders for End Use Applications – A Review, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 11, 518–528.
- Sharma S., Verma A., Teja B. V., Shukla P., Mishra P. R., 2015, Development of Stabilized Paclitaxel Nanocrystals: In-Vitro and In-Vivo Efficacy Studies, European Journal of Pharmaceutical Sciences, 69, 51–60.
- Singh H., Newstead D. F., 1992, Aspects of Proteins in Milk Powder Manufacture, In: Fox P. F. (Ed.), Advanced Dairy Chemistry, Vol. 1: Proteins, 2nd ed., Elsevier Applied Science, New York, 735–765.
- Singh H., 2004, Heat Stability of Milk, International Journal of Dairy Technology, 57(2–3), 111–119.

- Skanderby M., Westergaard V., Partridge A., Muir D. D., 2009, Dried Milk Products, In: Dairy Powders and Concentrated Products, 180–234.
- Straatsma J., van Houwelingen G., Meulman A. P., Steenbergen A. E., 1991, DrySPEC2: A Computer Model of a Two-Stage Dryer, *Journal of the Society of Dairy Technology*, 44, 107–111.
- Tamime A. Y. (Ed.), 2009, Dried Milk Products: Dairy Powders and Concentrated Milk Products, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, U.K., 231–245.
- Thomas M. E., Scher J., Desobry-Banon S., Desobry S., 2004, Milk Powders Ageing: Effect on Physical and Functional Properties, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(5), 297–322.
- Tuohy J. J., 1989, Some Physical Properties of Milk Powders, *Irish Journal of Food Science and Technology*, 13(2), 141–152.
- Twomey M., Keogh M. K., 1998, Milk Powder in Chocolate, *Farm and Food*, 8, 9–11.
- Üçüncü M., 2010, Süt ve Mamulleri Teknolojisi, Metabasım, İzmir, 539–565.
- Van Mil P. J. J. M., Jans J. A., 1991, Storage Stability of Whole Milk Powder: Effects of Process and Storage Conditions on Product Properties, *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 45, 145–167.
- Vega-Mercado H., Góngora-Nieto M. M., Barbosa-Cánovas G. V., 2001, Advances in Dehydration of Foods, *Journal of Food Engineering*, 49(4), 271–289.
- Vissotto F. Z., Bezerra J. R. M. V., Gonçalves E. C., 2010, Flowability Evaluation of Milk Powders Produced by Spray Drying, *Brazilian Journal of Food Technology*, 13(3), 179–185.
- Wiśniewski R., 2015, Spray Drying Technology Review, *Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems (ICES-2015-094)*, Bellevue, Washington, 1–46.

- Wu G., 2016, Dietary Protein Intake and Human Health, *Food & Function*, 7(3), 1251–1265.
- Yetişemeyen A., Bektaş V., Demir S., 1983, İstant Süt Tozunun Elde Edilme Tekniği ve Özellikleri, *Gıda*, 8(4), (xx–xx).
- Yetişemeyen A., 2000, Süt Sanayiinde Çok Etkili Evaporatörler ve Maliyet Hesapları, *Gıda*, 25(1), 41–48.
- Yetişen M., Baltacıoğlu C., Boz D., 2021, Spray Drying Technique and Its Use in Food Industry, *Journal of Agriculture, Food, Environment and Animal Sciences*, 2(2), 163–189.
- Zbicinski I., 2017, Modeling and Scaling Up of Industrial Spray Dryers: A Review, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 50, 757–767.
- Zouari A. vd., 2021, Physicochemical, Techno-Functional, and Fat Melting Properties of Spray-Dried Camel and Bovine Milk Powders, *Journal of Food Science*, 86(1), 103–111.
- Zouari A., Mihoubi D., Garcia-Reverter J., 2020, Effect of Spray-Drying Parameters on Solubility, Dispersibility, Flowability and Color of Milk Powder, *International Dairy Journal*, 103, 104–115.

