

GIDA TOZLARI: ÖZELLİKLERİ VE KARAKTERİZASYONU

Ertan Ermiş*

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi / Received: 29.12.2014

Düzeltilerek Geliş tarihi / Received in revised form: 07.04.2015

Kabul tarihi / Accepted: 14.04.2015

Özet

Gıda tozlarının daha iyi anlaşılması, gıda sanayide kullanılan üretim tekniklerinin iyileştirilmesi, üretim verimlerinin artırılması, üretim hattındaki kayıpların azaltılması, temizlik için üretime ara verilme zamanı ve sıklığının azaltılması ve etkin proses alet/ekipman dizaynı için gıda tozlarının fiziksel, kimyasal ve davranış özelliklerinin karakterize edilmesi gereklidir. Gıda maddelerinden elde edilen toz ürünlerin karmaşık yapıları nedeniyle, istenen kalite ve özelliklerde ürün elde edilebilmesi için toz partiküllerinin şekil, boyut, fizikokimyasal yapı, çözünme gücü ve partiküller arası yapışma kuvveti gibi özelliklerin kontrol edilmesi gereklidir. Proses maliyetlerini azaltmak ve gıda proseslerinin ve bu proseslerde kullanılan alet/ekipmanların dizaynını doğru yapabilmek, toz kütlesi akışı, akışa karşı direnç, kek oluşturma potansiyeli ve yüzeylere yapışma kuvveti gibi özelliklerin iyi anlaşılmasını gerektirir. Bu araştırmada gıda tozlarının genel özellikleri ve günümüze kadar kullanılan bazı karakterizasyon tekniklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, gıda tozları mühendisliği alanında yapılan çalışmaların ve partikül karakterizasyonunun sağlayabileceği potansiyel faydalara değinilmiştir.

Anahtar kelimeler: Gıda tozları, partikül karakterizasyonu, toz gıda üretimi

FOOD POWDERS: PROPERTIES AND CHARACTERIZATION

Abstract

Characterization of physical, chemical and behavioral properties of food powders are necessary and need to be done to better understand food powders, to improve production techniques used, to increase production efficiency, to reduce the losses in the process line, to reduce the down-time for cleaning and frequency, and to design process equipment used in the food industry effectively. Due to the complex structure of powdered products produced from food materials, to obtain the desired properties and quality in the final product, it is necessary to control the properties such as size, shape, physico-chemical structure, dissolution, and particle cohesion. Better understanding of powder mass flow, resistance to flow, cake forming potential and adhesion strength onto the surfaces is required to reduce processing costs and to design processes and equipment correctly. In this review, information about general properties of food powders and some characterization techniques are given. Additionally, potential benefits which can be derived from research in food powders engineering field and particle characterization are discussed.

Keywords: Food powders, particle characterization, powdered food production

*Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author;

✉ ertan.ermis@izu.edu.tr,

☎ (+90) 212 692 9722,

☎ (+90) 212 693 8229

GİRİŞ

Gıda tozları, gıda endüstrisinde önemli bir yere sahiptir ve genellikle kristal veya amorf yapıdadırlar. Sağladığı bazı avantajlardan (taşıma ve depolamada kolaylık, mikrobiyal stabilite gibi) dolayı gıda hammaddeleri çeşitli teknikler kullanılarak toz haline getirilirler (1-3). Son yıllarda pek çok gıda maddesi toz formunda üretilmiş ve ticarileştirilmiştir (4). Bu nedenle üretim ve depolama koşullarındaki davranışlarının iyi bilinmesi gereklidir (5). Sıklıkla kullanılan gıda tozlarına yumurta tozu, süt tozu, gıda katkı tozları, vitamin tozları, toz formundaki baharatlar, aroma vericiler, renklendiriciler, tuz, şeker, un, malt içecekler, toz çorbalar, instant kahve vb. verilebilir (2).

Gıda tozlarının özelliklerinin tanımlanması konusunda yapılan bilimsel araştırmalar yetersizdir (4, 6). Bununla birlikte son yıllarda bazı gıda üreticileri ve araştırmacılar gıda tozlarının performansını daha iyi anlamak, karakterize etmek ve daha iyi kontrol edebilmek için çalışmalar yapmaktadırlar (6). Doksanlı yılların başlarından itibaren firmalar, makine üreticileri ve araştırmacılar tarafından gıda tozları karakterizasyonu ve sorunlara çözüm bulmaya yönelik olarak Gıda Tozları Mühendisliği kavramı oluşturulmuştur (4). Bu yaklaşım gıda tozlarının depolama, formülasyon, üretim, paketlenme, karıştırma, sıkıştırma, taşıma ve yeni ürün geliştirmede davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve kontrol edilebilmesini kapsamaktadır (2, 7). Ayrıca tozların üretimi ve işlenmesinde kullanılan silo, boşaltma hunisi, taşıma sistemleri gibi alet-ekipmanların dizayn çalışmalarının da yine parçacık (partikül) özellikleri ve toz kütlesi davranışları bilgilerine göre yapılması gereklidir (7).

Gıda tozları karakteristikleri ve parçacık yüzey özellikleri, toz üretimi (öğütme, püskürtmeli kurutma, kristalizasyon vb.) ve tozların gıdalara uygulanmalarında (yüzey kaplama, akışkanlık kazandırma, agglomerasyon, dispersiyon, çözünürlük, adhezyon, kohezyon vb.) gösterecekleri davranışlarda kilit role sahiptirler (4, 5). Bu nedenle gıda tozları davranışlarının ve fonksiyonelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için çevresel faktörlerle (bağıl nem, sıcaklık, gaz kompozisyonu vb.) birlikte parçacık yüzey karakteristikleri, yüzey bileşenleri, fiziksel ve kimyasal etkileşimlerinin iyi bilinmesi ve birlikte değerlendirilmesi gereklidir (4, 5).

GIDA TOZLARI GENEL ÖZELLİKLERİ VE DAVRANIŞLARI

Tozların Akışkanlığı ve Akışkanlığa Etki Eden Faktörler

Tozların akışkanlığı, bir kısım toz kütlesinin toz yığınının içerisinde komşu toz kütlesi üzerinde veya içinde bulundukları depolama ünitelerinin duvar yüzeyleri üzerindeki kısmi hareketi veya basitçe akma kabiliyeti olarak tanımlanmıştır (8). Gıda tozlarının akışkanlığı, parçacık fiziksel özelliklerine (boyut, şekil) ve yüzey kimyasal bileşimine büyük oranda bağlıdır (4, 10). Ayrıca, basınç, nem ve sıcaklıktan etkilenir. Tozların akışkanlığı, kolay akan (easy flow), yapışkan (cohesive), çok yapışkan (very cohesive) ve ileri derecede yapışkan (extremely cohesive) şeklinde sınıflandırılabilir (12). Üretim aşamalarında gıda tozlarının fiziksel özellikleri ve akışkanlık özelliklerinin bilinmesi uygulanan işlemlerin verimliliği açısından önemlidir (4, 9-11). Tozların akışkanlık özelliği üretimde kullanılan alet-ekipmanlarda (silo, taşıma bandı, boşaltma hunisi vb) davranışlarına etki eder.

Toz kütlesinin sahip olduğu nem içeriği, partiküllerin birbirine yapışmasında önemli role sahiptir (10, 11, 13). Nem içeriğindeki değişim; kütte yoğunluğu, sıkıştırılabilirlik, partikül fiziksel özellikleri, yapışkanlık, kek oluşumu, partiküller arası adhezyon ve kohezyon özelliklerini etkiler (10, 12, 14-16).

Gıda tozları donma noktasının altındaki sıcaklıklarda akışkanlık özelliklerini büyük ölçüde kaybederler (10). Sıcaklığı donma noktasının biraz üzerinden 30-40°C'ye kadar değiştirmek, erime ya da camsı geçiş sıcaklığına ulaşmadığı sürece akışkanlık özelliğine çok etki etmez (10, 11). Ancak granül yapıdaki toz partiküllerinin sıcaklığa bağlı olarak kristal yapısındaki ve diğer özelliklerindeki değişimler sonucu kek oluşumu gözlemlenebilir (10).

Sıkışma Basıncı

Toz kütlesinde oluşan mekanik etkiler (titreşimler, çarpma, basınç vb) sonucu partiküllerin kırılarak daha küçük parçalara ayrılması, daha fazla noktada birbiriyle etkileşimi ile adhezyon gücünün artması ve kohezif kemer oluşumunun meydana gelmesi söz konusudur (10).

Partikül Şekli, Boyutu ve Dağılımı

Partikül şekilleri genelde asiküler (iğne benzeri sivri uçlu), köşeli, kristalize, dallanmış, lifli, puls, granüler (simetrik boyutlu tanecikler şeklinde), düzensiz, modüler (yuvarlatılmış düzensiz şekil)

ve küre vb. şekil yapılarında olabilir (9). Gıda tozları partikül boyutu ve dağılımı, akışkanlığa olduğu kadar kütle yoğunluğuna (bulk density), duruş açısına (angle of repose), ve sıkıştırılabilirliğe (compressibility) de büyük oranda etki eder (10, 14). Partikül boyutunun küçülmesi, birim kütlede birbiri ile etkileşim içerisinde bulunan partikül yüzey alanını ve kohezyon gücünü artıracığından akışkanlığı olumsuz etkiler (10, 15). Gıda tozlarının partikül boyutundaki artış, kütle yoğunluğunun azalmasına neden olur (10).

Partikül Yüzey Kompozisyonu

Yüzeylerde bulunan yağ çeşidi ve içeriği, nem miktarı, akışkanlığa etki eden önemli faktörlerdendir (17). Akmayı kolaylaştırıcı ve keklenme önleyici maddeler gıda tozlarına gıda katkısı olarak kullanılabilir. Bu katkılar genellikle inert ve suda çözünürlüğü çok düşük olup % 2'ye kadar konsantrasyonlarda kullanılmaları yeterli olmaktadır. Bu kimyasalların partikül büyüklükleri ne kadar küçük olursa o kadar akışkanlığı kolaylaştırılır. Bu tür maddelerin toz kütlesine eklenmesi kütle yoğunluğu değerinde artışa neden olur (10).

Kek Oluşumu

Sebze ve meyve tozları, toz şeker, süt tozu, peynir altı suyu tozu, farklı et tozları, hidrolize protein tozları, toz gluten, toz nişasta ve un gibi gıda maddeleri yüksek oranda amorf yapıdaki toz partikülleri içerirler (18). Kek oluşumu, serbest halde bulunan ve suda çözünme özelliğinde olan amorf partiküllerin iki ya da daha fazlasının temas ederek bir araya gelmeleri ve etkileşimleri sonucu katı yapı oluşumu şeklinde tanımlanmıştır (19, 20). Amorf parçacıkların kısmi çözünmesi ve kristal yapıdaki toz maddesinin tekrar kristalizasyonu sonucu kek oluşumu görülebilmektedir (19). Bu durum üretimde kullanılan alet-ekipmanların yüzeylerinde topraklanmaya neden olmaktadır (19, 21). Depolama koşulları, partiküllerin kimyasal içeriği, molekül dağılımı ve mekanik kenetlenme özellikleri kek oluşumuna etki eder (19, 20, 13). Elektrostatik ve van der Waals kuvvetlerinin kek oluşumuna etkileri yok denecek kadar azdır (19).

Sinterleme (sintering)

İki amorf partikülün etkileşimi sonucu vizkos yapıda bir köprü oluşması ve bunun sonucunda tek bir partikül gibi davranmaları sinterleme olarak tanımlanmıştır (18, 19). Bu yeni partikül yüzey serbest alanını (free surface area) azaltma eğilimindedir ve bunun için her bir partiküldeki moleküller temas noktasına doğru hareket ederler (19).

Yapışkanlık (stickiness)

Gıda tozlarının yapışkanlığı kohezyon (partikül-partikül) ve adhezyon (partikül-yüzey) şeklinde sınıflandırılabilir (22). Gıda tozlarının agglomerasyonu dışında istenmeyen bir özelliktir (9). Özellikle peynir altı suyu, laktoz, protein hidrolizati, yağlı süt ve şekerli gıdalar gibi bazı gıda maddelerinin kurutularak toz haline getirilmesi ve işlenmesinde sorun oluşturmaktadır (9). Vizkozite, nem, sıcaklık, basınç (sıkışma), partikül yüzey kompozisyonu ve gıda katkılarının varlığı gibi faktörler yapışkanlığa etki ederler. (22).

Aglomerasyon (agglomeration)

Aglomerasyon, birincil gıda tozu partiküllerinin biraraya gelerek/getirilerek poroz yapıdaki daha büyük ikincil partiküllerin oluşması ya da kümelenmesi olarak tanımlanmıştır (18). Agglomerasyon ile kütle yoğunluğu, akışkanlık özelliği, kırılmalara karşı direnci gibi özellikler iyileştirilebilir (2, 9). Ayrıca agglomerasyon ile topaklanmadan çözünme ve rehidrasyon özelliği artırılabilir (9, 19). Bunun yanında istenmeyen agglomerasyonlar, amorf toz kütlelerinin yüzeylere yapışmasına ve/veya topaklanmasına (kek oluşumuna) neden olabilmektedir (23). Bu durum, akışkan yatakların tıkanması, tozların kütle halinde sertleşmesi, silo ve boşaltma hunilerinde akmama gibi problemlere neden olabilir (19). Nem ve sıcaklık artışı, partiküller arasındaki adhezyon gücünü artırıcı etkiye sahiptir (23). Bazı işlemlerde partiküller gelişi güzel bir şekilde temas ederek aglomeratlar oluştururlar (18). Partikülleri bir araya getirerek aglomerat oluşturmak için basınç veya sıkıştırma gücü kullanılabilir. Bu uygulama silindir ile sıkıştırma, briketleme veya tabletleme şeklinde yapılabilir (18).

Camsı Geçiş (glass transition) Sıcaklığı

Amorf yapıdaki gıda tozlarında camsı geçiş sıcaklığına (Tg) ısıtılması ile molekül hareketleri sonucu yapışkanlık, kristalizasyon ve kek oluşumu gibi değişiklikler söz konusu olmaktadır (11, 16, 24). Böylece amorf toz yapıdaki gıda maddesi, cam benzeri katı halden lastiğimsi yapıya ve daha sonra da viskoz-plastik yapıya geçer (16, 18, 21, 22). Bu geçiş sırasında viskoz sıvıya benzer özellikler, katıya benzer (elastik) özelliklere karşı baskın hale gelir. Bu değişim, camsı geçiş (glass transition) olarak tanımlanmıştır (21).

Adhezyon ve Kohezyon

Adhezyon, partiküllerin yüzeylere tutunmasını, kohezyon toz partiküllerinin bir arada tutulmasını

sağlayan kuvvet olarak belirtilmiştir (22, 25). Adhezyon, granül yapıdaki gıda tozları partiküllerinin içerisinde bulunduğu depo ünitesinin, ambalajın, taşıma bantlarının ve/veya gıda maddelerinin yüzeylerine yapışmasıdır (10). Partiküller arası oluşan sıvı ve katı köprüleri, van der Waals, elektrostatik ve manyetik çekim kuvvetleri gibi yüzey ve alan kuvvetleri nedeniyle adhezyon kuvveti oluşur (10, 23, 30). Ayrıca fiziksel olarak kenetlenme sonucu da adhezyon görülebilir (31). Kohezyon kuvveti, sıvı köprüleri, van der Waals, elektrostatik ve manyetik çekim kuvvetlerinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (10). Kohezyon; partikül boyutu, şekli, yüzey yapısı, yüzey enerjisi, sertlik, elastikiyet gibi özelliklerden etkilenir (26). Partiküllerin birbirine ya da yüzeylere yapışmasını önlemek için uygulanacak kuvvetin adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinden büyük olması gereklidir (27).

Kek oluşumu esnasında sırasıyla plastik deformasyon, van der Waals kuvvetlerinin artması, visko-elastik deformasyon, düşük viskoziteli sıvı köprülerinin oluşması, yüksek viskoziteli amorf köprülerinin oluşması, kristal katı köprülerin oluşması gibi davranışlar gözlenir (18, 19, 28). Ayrıca mekanik kenetlenmeler ve elektrostatik kuvvetler de bu etkileri artıran diğer faktörlerdir (18, 28).

Tozlar ile yüzeyler arasındaki adhezyon, birçok teknolojik alanda ve gıda proseslerinde (toz kaplama gibi) önemli rol oynar (29). Tozların gıda yüzeylerine yapışmasının iyi anlaşılması ile çevre kirliliğinin azaltılması, işlem verimliliğinin artırılması, toz kayıplarının azaltılması ve endüstriyel hijyen kalitesinin artırılması konularında iyileştirmeler yapılabilir (29, 30). Kohezyon ve adhezyon kuvvetlerinin iyi anlaşılması, üretimde kullanılan alet/ekipmanlarda oluşan aşınma, yıpranma ve çatlama gibi olumsuzlukların azaltılmasına yardımcı olabilir (28, 29).

Adhezyon ve kohezyon kuvvetleri, gıda ekipmanları yüzeylerinde tozların birikmesine ve kümelenmesine neden olmaktadır (32). Özellikle uygulanan sıcaklığın etkisiyle yüzeylerde birikmeler daha etkin hale gelir ve bu yüzeylerin belli periyotlarda temizlenmesi gerekir. Gıda üretiminde yüzeylere yapışma sonucu üretime ara verme zamanında artış (alet ekipman temizliği vb. için) ve ekonomik kayıplar (yüzeylerde birikmeler sonucu üretim kapasitesinin düşmesi, sanitasyon sorunları vb.) söz konusu olacağından yüzeylere yapışmanın en az seviyede olması istenir (30, 31).

Çözünme (dissolution)

Gıda endüstrisinde gıda tozlarının kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Süt tozu, instant kahve gibi gıda tozlarının tüketici tarafından hızlı ve tam çözünmesi istenir (1). Gıda tozlarının çözünmesi karmaşık bir davranıştır ve 4 ana aşamada değerlendirilebilir. Bunlar; ıslanma, batma, dağılma ve çözünmedir (3, 33). Soğuk ve sıcak sıvılarda en az mekanik etki ile (karıştırma, çalkalama vb.) topaklanmadan ve çökelti oluşturmada dağılması ve çözünmesi tam olan gıda tozları instant olarak tanımlanmıştır (3, 33). Gıda tozlarının fiziksel yapıları ve yağ içerikleri sıvılarda çözünmelerini olumsuz etkileyebilir ve topaklanmaya neden olabilir (34).

Duruş Açısı (angle of repose)

Duruş açısı, belirlenmiş bir yükseklikten bırakılan granül yapıdaki toz kütesinin oluşturduğu yığının eğimi ile yatay çizgisinin oluşturduğu açı olarak tanımlanmıştır (10). Duruş açısı, akışkanlık özelliklerinin kalitatif ifade edilmesinde kullanılabilir. Toz maddenin nem içeriği açının değerine etki eder. Açı ne kadar küçükse akışkanlık o kadar iyidir. 50-60° ve büyük açılar tozun akışkanlığının çok düşük olduğu anlamına gelir. 30-40° ler kısmen akışkanlığın iyi olduğunun göstergesidir (5, 10).

Duvar Sürtünme Açısı (angle of wall friction)

Belirlenmiş normal basınç altında oluşturulan normal gerilimin sürtünme gerilimine bağlı değişim grafiği (wall yield locus) üzerindeki bir nokta ile orijin arasında çizilen çizgi ile dikey doğru arasındaki açı olarak tanımlanmıştır. Wall yield locus, toz kütesine uygulanan normal basıncın etkisi altında toz kütesinin akışkanlığa direncini kırmak için gerekli olan yatay basıncın ölçülmesi ile oluşturulur (5).

Sürtünme Kuvvetleri

İç sürtünme açısı (angle of internal friction), partiküllerin birbiri üzerinde hareket etmesi veya kayması için gerekli olan kuvvetin bir ifade şeklidir (10). İç sürtünme, partikül yüzey sürtünmesi, partikül şekli, elastikiyeti, partikül boyutu ve dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterir (10). Gıda tozlarının üretimi işlenmesi aşamalarında kullanılan depo ve üretim elemanlarının dizaynında iç sürtünme açısı değeri, duvar sürtünmesi değeri ile birlikte kullanılır (10, 11). İç sürtünme açısı ölçümü, kaydırma (shear) testi ile yapılabilir (5).

Duvar sürtünmesi (wall friction), toz kütlelerini oluşturan partiküller ile depo ünitesi duvar iç yüzeyi arasında akmaya karşı oluşan direnç olarak tanımlanmıştır (11). Duvar yüzey yapısı ve özellikleri (yüzeyin pürüzlülüğü, aşınma, korozyon vb), toz maddenin özellikleri, ve ortam şartları gibi etkenlerde bağlı olarak değişir (10).

Sıkıştırılabilirlik (compressibility)

Belirlenen ebatlardaki kaplarda toz kütlesi sıkıştırılır ve sıkışan kütle yapısını bozmak için gerekli kuvvet deneysel olarak belirlenerek basınç-yoğunluk oranına dönüştürülür (10).

Sıkıştırılmış toz kütlesi yoğunluğunun serbest haldeki toz kütlesi yoğunluğuna oranı Hausner Oranı (Hausner ratio) olarak belirtilmiştir (35). Toz kütlelerinin sıkıştırılabilirliğinin yüksek olması, akışkanlığının zayıf olması anlamına gelmektedir (10, 35).

GIDA TOZLARI KARAKTERİZASYONU

Toz kütlesi akışkanlığı ölçümü test teknikleri

Gıda tozlarının kütle akışkanlığını ölçmede günümüze kadar farklı teknikler geliştirilip kullanılmıştır (36). Gıda tozları akışkanlığı karakterizasyonunda günümüze kadar kullanılan analitik tekniklerinden bazıları; dairesel kesme hücresi (annular shear cell) (37), dönerli hücre (rotational cell) (38, 39), Jenike shear cell (14, 38, 40), Hausner oranı ve Carr indisi (16), duruş açısı (angle of repose) (36), konik huni (36), halka kesme testi (ring shear tester) (21), üç eksenli hücre (triaxial cell) (38), direkt kesme hücresi (direct shear cell) (25, 38), toz akışı ölçer (Powder Flow Tester (PFT)) (15), tek eksenli sıkıştırma testi (uniaxial compression test) (7), akış hızına bağlı toz akış testi (12) olarak sıralanabilir.

Kek Dayanımı Ölçüm Metotları

Kek oluşumu ölçümünde kullanılabilecek bir yöntem, bir kabın toz kütlesi ile doldurulması ve belirli sürede belirli sıcaklık ve bağıl nemde tutularak görsel ve kalitatif olarak değerlendirilmesi olarak belirtilmiştir (19).

Daha gelişmiş test metotları toz kütlelerinin zamanla sertleşmesi (time consolidation) denemelerini içerir. Toz kütlesi örneği tanımlanan depo şartlarında belirlenmiş süre ile tutulur ve oluşan kekin mekanik dayanımı ölçülür (19).

Bunların dışında kek yapısı karakterizasyonu için kesme testi (shear test) (21), tek eksenli kuvvet kaydırma testi (uniaxial force displacement tester) (41, 42), daldırma (penetrometer), üfürme testi (blow tester) (43) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) (13) gibi teknikler uygulanmıştır.

Partikül Yüzey Karakterizasyonu Test Teknikleri

Gıda tozları yüzey analizleri kesinliği yüksek ve ayrıntılı metotlar ile yapılabilmektedir. Günümüze kadar bazı teknikler uygulanmış olmasına karşın yapılan çalışmalar henüz sınırlıdır. Bu nedenle gıda endüstrisine yönelik gıda tozları yüzey karakterizasyonu tekniklerinin geliştirilmesi, üzerinde çalışılması gereken bir alan olarak ortaya çıkmaktadır (47).

Yüzey karakterizasyonu amaçlı günümüze kadar kullanılan analitik tekniklerin bazıları; X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ve Energy Dispersive X-ray (EDX) (44, 45, 46), SEM (47; 48), Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy (AFM)) (47, 49, 51), Transmission Electron Microscopy (TEM) (52), Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) (53), Laser Diffraction and Dynamic Image Analysis (54), Dynamic Vapor Sorption (DVS) (47), Surface Chemical Extraction (17, 47), Inverse Gas Chromatography (IGC) (55) ve kimyasal analizler için Elektron Spektroskopisi (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis; ESCA) (17) olarak sıralanabilir.

Adhezyon ve Kohezyon Ölçüm Metotları

Adhezyon ve kohezyon ölçümleri için tasarlanmış test metotlarından bazıları; (i) tek partiküller için: Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) (56); iğne teması (contact needle) (57), (ii) bir arada olan çoklu partiküller için: Ultrason (58), Darbe Adhezyon Testi (Impact Adhesion Tester) (30), düşme testi (drop test method) (59), santrifüj metodu (28), yüzeylere dik ya da paralel gaz akışı metodu (60) ve mikromanipülasyon (32) olarak verilebilir.

Çözünme (dissolution) Ölçümleri

Çözünme kalorimetresi (dissolution calorimetry) tozların çözünmesi esnasında oluşan termodinamik etkileri ölçme ve ayrıca çözünme kinetikleri ve mekanizmaları hakkında bilgi edinme imkânı sağlar. Kalorimetrik deneyde çıktılar ısılanma tepkileri, sıvı nüfuzu, çözünme ve oluşması muhtemel diğer işlemlerin bileşimidir (33). Çözünme işleminin kantitatif olarak ifade edilmesinde yararlanılan metotlardan bazıları, partikül büyüklük analizi, iletkenlik, spektrofotometrik analizler, reolojik analizler, refraktometrik analizler, ultrasonik yansıma, optik lif sensörleri, gravimetrik metotlar, NMR (33), akış hücresi (34) olarak sıralanabilir.

Yapışkanlık (stickiness) ve Yığılma

(agglomeration) Ölçümleri

Toz partiküllerinin yapışkanlık davranışlarını karakterize edebilmek için farklı test teknikleri ve enstrümanları geliştirilmiştir (22). Enstrümental ölçüm yaklaşımları genellikle gıda maddesinin özelliklerine göre dizayn edilmiştir. Bu özellikler kesmeye (shear) karşı direnç, vizkozite, optik

özellikler ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak belirtilmiştir (21). Pervane döndürme, kesme hücresi, optik prob, üfürme, sıvılaştırma, termal sıkışma vb. gibi teknikler yapışkanlık ölçümlerinde kullanılabilir.

Diğer Toz Karakteristikleri Ölçüm Metotları

Gıda tozları kütle davranışları ve özellikleri, gıda maddesinin fiziksel, kimyasal özellikleri, partiküllerin geometrisi, boyutu ve yüzey karakteristikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterir (9). Kütle yoğunluğu, birim hacimdeki kabı dolduran toz maddesinin ağırlığı şeklinde tanımlanır. Gıda tozlarının depolanması (silo, tank vb.) ve bir yerden başka bir yere çeşitli araçlar ile taşınması işlemlerinde gerekli hacim hesabı için önemli bir parametredir. Partikül boyutu, nem içeriği, kimyasal bileşim, uygulanan üretim işlem türü ve miktarı gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterir (10). Sıkıştırılmış kütle yoğunluğu (tapped bulk density), miktarı bilinen toz kütlesinin bir kapta belli sayıda vuruş darbeleriyle sıkıştırılarak hacmindeki değişime göre hesaplanır (5).

Su emilimi izotermi (water sorption isotherm) belirli sıcaklıkta farklı relatif neme sahip ortamlara bırakılan gıda tozlarının su tutma ve bırakma kapasitesini gösterir. Tozların nem içeriği akışkanlık davranışlarını ve kek oluşturma özelliklerini etkiler (41). Differential Scanning Calorimeter (DSC) termogramları toz partiküllerinin yapısı hakkında fikir verir. Termogramdaki camcı geçiş ve kristalizasyon pikleri, tozun partiküllerinin amorf yapıda olduğunu belirtir (21). Partikül yoğunluğu, genellikle gaz değişimi (genellikle helyum veya azot) prensibine göre çalışan piknometreler ile ölçülebilmektedir (5). Gıda tozları partikül boyutu partikül boyut analiz cihazı (powder sizer), partikül şekli ise Tarayıcı Elektronik Mikroskopu (SEM) kullanılarak analiz edilebilmektedir (8).

SONUÇ

Gıda endüstrisinde proses verimliliğini artırmak, son ürün kalitesini istenen düzeyde tutmak, ekonomik kazanım sağlamak ve yeni ürün geliştirmek için gıda tozları yapı ve davranışlarının uygun yöntemlerle karakterize edilerek anlaşılması ve kontrol edilmesi gereklidir. Katma değeri yüksek gıda tozlarının düşük maliyetlerde ve istenen özelliklerde (yüksek çözünme kabiliyeti gibi) üretilebilmesi bakımından partikül mühendisliği alanında yapılacak çalışmalar önemli bir role sahiptir. Ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalar henüz yeterli seviyede değildir. Özellikle nanoteknolojide kaydedilen gelişmeler, gıda tozlarının fonksiyonelliğinin artırılması ve yeni ürün geliştirilmesi konularına ışık tutacaktır. Bu

alanda mevcut araştırmalar yetersizdir. Çoğu gıda üreticisi hammadde, ara ürün ya da son ürün olarak gıda maddelerini toz formunda işlemektedirler. Üretimde kullanılan çoğu işlemlerin (özellikle kurutma ve öğütme gibi) enerji gereksinimi yüksektir. Gıda tozları yapılarının ve davranışlarının daha iyi anlaşılması, üretim esnasında ve on-line olarak izlenebilirliğinin artırılarak modellenmesi ile enerji verimliliğinde iyileştirmeler sağlanabilir. Ayrıca üretim aşamalarında toz halindeki gıda maddelerinin depolanması ve taşınmasında ortaya çıkan ve çoğu zaman çözümlenmesi yüksek maliyetlere neden olan sorunların (akmama, kek oluşumu vb) önceden yapılacak karakterizasyon, mühendislik ve dizayn çalışmaları ile ortadan kaldırılması mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Marabi A, Mayora G, Burbidge A, Wallach R, Saguy IS. 2008. Assessing dissolution kinetics of powders by a single particle approach. *Chem. Eng. J.*, 139, 118-127.
2. Ghosal S, Indira TN, Bhattacharya S. 2010. Agglomeration of a model food powder: Effect of maltodextrin and gum Arabic dispersions on flow behavior and compacted mass. *J. Food Eng.*, 96, 222-228.
3. Forný L, Marabi A, Palzer S. 2011. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. *Powder Technol.*, 206, 72-78.
4. Murrieta-Pazos I, Gaiani C, Galet L, Calvet R, Cuq B, Scher J. 2012. Food powders: Surface and form characterization revisited. *J. Food Eng.*, 112, 1-21.
5. Fitzpatrick JJ, Iqbal T, Delaney C, Twomey T, Keogh MK. 2004. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. *J. Food Eng.*, 64(4), 435-444.
6. Cuq B, Rondet E, Abecassis J. 2011. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities. *Powder Technol.*, 208, 244-251.
7. Fadeyibi A, Osunde ZD, Agidi G, Evans EC. 2014. Flow and strength properties of cassava and yam starch-glycerol composites essential in the design of handling equipment for granular solids. *J. Food Eng.*, 129:38-46.
8. Salleh FSM, Yusof YA, Anuar MS, Chin NL. 2014. Flow Properties Of Ficus Deltoidea Extract Powder And The Binders, Accisol And Avicel. *J. Food Process Eng.*, 37:63-74.
9. Dhanalakshmi K, Ghosal S, Bhattacharya S. 2011. Agglomeration of Food Powder and Applications. *Crc Cr Rev Food Sci*, 51:432-441.

10. Ganesana V, Rosentraterb KA, Muthukumarappana K. 2008. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders – a review with implications for DDGS. *Biosyst Eng.*, 101, 425-435.
11. Fitzpatrick JJ, Barrya K, Cerqueiraa PSM, Iqbal T, O'Neill J, Roos YH. 2007. Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders. *Int Dairy J.*, 17, 383-392.
12. Benkovic M, Srecec S, Spoljaric I, Mrcic G, Bauman I. 2013. Flow properties of commonly used food powders and their mixtures. *Food Bioprocess Tech.*, 6(9):2525-253.
13. Stoklosa A, Rebecca M, Lipasek A, Taylor LS, Mauer LJ. 2012. Effects of storage conditions, formulation, and particle size on moisture sorption and flowability of powders: A study of deliquescent ingredient blends. *Food Res Int.*, 49:783-791.
14. Opalinski I, Chutkowski M, Stasiak M. 2012. Characterizing moist food-powder flowability using a Jenike shear-tester. *J. Food Eng.*, 108:51-58.
15. Crowley SV, Gazi I, Kelly AL, Huppertz T, O'Mahony JA. 2014. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. *J. Food Eng.*, 135:31-38.
16. Koç M, Koç B, Güngör Ö, Ertekin FK. 2012. The Effects of Moisture on Physical Properties of Spray-Dried Egg Powder. *Drying Technol.*, 30: 567-573.
17. Kim EHJ, Chen XD, Pearce D. 2009. Surface composition of industrial spraydried milk powders. 1. Development of surface composition during manufacture. *J. Food Eng.*, 94 (2), 163-168.
18. Palzer S. 2005. The effect of glass transition on the desired and undesired agglomeration of amorphous food powders. *Chem. Eng. Sci.*, 60: 3959-3968.
19. Hartmann M ve Palzer S. 2011. Caking of amorphous powders — Material aspects, modelling and applications. *Powder Technol.*, 206, 112-121.
20. Feeney J, Fitzpatrick JJ. 2011. Visualization of the Caking Behavior Between Two Powder Particles. *Part. Sci. Technol.*, 29: 397-406.
21. Descamps N, Palzer S, Roos YH, Fitzpatrick JJ. 2013. Glass transition and flowability/caking behaviour of maltodextrin DE 21. *J. Food Eng.*, 119, 809-813.
22. Foster KD, Bronlund JE, Paterson AHJ. 2006. Glass transition related cohesion of amorphous sugar powders. *J. Food Eng.*, 77:997-1006.
23. Dopfer D, Palzer S, Heinrich S, Fries L, Antonyuk S, Haider C, Salman AD. 2013. Adhesion mechanisms between water soluble particles. *Powder Technol.*, 238,35-49.
24. Domian E, Sulek A, Cenckier J, Kerschke A. 2014. Influence of agglomeration on physical characteristics and oxidative stability of spray-dried oil powder with milk protein and trehalose wall material. *J. Food Eng.*, 125:34-43.
25. Juliano P, Muhunthan B, Barbosa-Canovas GV. 2006. Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders. *J. Food Eng.*, 72 157-166.
26. Jallo LJ, Chen Y, Bowen J, Etlzer F, Dave R. 2011. Prediction of Inter-particle Adhesion Force from Surface Energy and Surface Roughness. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 25:367-384.
27. Haider CI, Althaus T, Niederreiter G, Hounslow MJ, Palzer S, Salman AD. 2012. A micromanipulation particle tester for agglomeration contact mechanism studies in a controlled environment. *Meas. Sci. Technol.*, 23:105904.
28. Salazar-Banda GR, Felicetti MA, Gonçalves JAS, Coury JR, Aguiar ML. 2007. Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique. *Powder Technol.*, 173 : 107-117.
29. Halim F, Barringer SA. 2007. Electrostatic adhesion in food. *J Electrostat*, 65 168-173.
30. Ermis E, Farnish RJ, Berry RJ, Bradley MSA. 2011. Centrifugal tester versus a novel design to measure particle adhesion strength and investigation of effect of physical characteristics (size, shape, density) of food particles on food surfaces. *J. Food Eng.*, 104, 518-524
31. Ermis E, Farnish RJ, Berry RJ, Bradley MSA. 2009. Direct Measurement of Powder Flavor Adhesion onto Crisp Surface Using a Novel Adhesion Tester. *Part. Sci. Technol.*, 27: 362-372.
32. Liu W, Christian GK, Zhang Z, Fryer PJ. 2006. Direct measurement of the force required to disrupt and remove fouling deposits of whey protein concentrate. *Int Dairy J.*, 16, 64-172.
33. Marabi A, Raemy A, Bauwens I, Burbidge A, Wallach R, Saguy IS. 2008. Effect of fat content on the dissolution enthalpy and kinetics of a model food powder. *J. Food Eng.*, 85, 518-527
34. Börjesson E, Innings F, Tragardh C, Bergenstahl B, Paulsson M. 2013. The dissolution behavior of individual powder particles. *Dairy Sci Technol*, 93(4-5) 357-371.
35. Szulc K, Lenart A. 2010. Effect of Agglomeration on Flowability of Baby Food Powders. *J. Food Sci.*, 75(5), E276-E284.
36. Juliano P, Barbosa-Cánovas GV. 2010. Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications. *Annu Rev Food Sci Technol.*, 1: 211-239.

37. Saw HY, Davies CE, Jones JR, Paterson AHJ. 2012. Shear testing of lactose powders: The influence of consolidation stress and particle size on bulk density and estimated cohesion. *Adv Powder Technol*, 25: 1164-1170.
38. Kamath S, Puri VM, Manbeck HB, Hogg R. 1993. Flow properties of powders using four testers - measurement, comparison and assessment. *Powder Technol.*, 76 (3): 277-289.
39. Freeman RE, Cooke JR, Schneider LCR. 2008. Measuring shear properties and normal stresses generated within a rotational shear cell for consolidated and nonconsolidated powders. In: *Powder Technology* p. 5.
40. Çağlı AS, Deveci BN, Okutan CH, Sirkeci DAA, Teoman EY. 2007. Flow property measurement using the Jenike shear cell for 7 different bulk solids. *Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*, Copenhagen.
41. Fitzpatrick JJ, O'Callaghan E, O'Flynn J. 2008. Application of a novel cake strength tester for investigating caking of skim milk powder. *Food Bioprod Process*, 86: 198-203.
42. Hanley K, Descamps N, O'Meara K, Jones C, Walsh D, Fitzpatrick JJ. 2010. Influence of humidity cycling on the caking behavior of three food powders. *Sixth World Congress on Particle Technology*, Nuremberg, Germany.
43. Paterson AHJ, Brooks GF, Bronlund JE, Foster KD. 2005. Development of stickiness in amorphous lactose at constant T-Tg levels. *Int Dairy J.*, 15(5), 513-519.
44. Jayasundera M, Adhikari BP, Adhikari R, Aldred P. 2010. The effect of food-grade low-molecular-weight surfactants and sodium caseinate on spray drying of sugar-rich foods. *Food Biophys.*, 5 (2), 128-137.
45. Saad M, Gaiani C, Mullet M, Scher J, Cuq B. 2011. X-ray photoelectron spectroscopy for wheat powders: measurement of surface chemical composition. *J. Agric. Food Chem.*, 59 (5), 1527-1540.
46. Stevens JS, Schroeder SLM. 2009. Quantitative analysis of saccharides by X-ray photoelectron spectroscopy. *Surf. Interface Anal.*, 41 (6), 453-462.
47. Murrieta-Pazos I, Gaiani C, Galet L, Cuq B, Desobry S, Scher J. 2011. Comparative study of particle structure evolution during water sorption: skim and whole milk powders. *Colloids Surf.*, B, 87 (1), 1-10.
48. Fyfe KN, Kravchuk O, Le T, Deeth HC, Nguyen AV, Bhandari B. 2011. Storage induced changes to high protein powders: influence on surface properties and solubility. *J. Sci. Food Agric.*, 91 (14), 2566-2575.
49. Funami T. 2010. Atomic force microscopy imaging of food polysaccharides. *Food Sci Technol Res.*, 16 (1), 1-12.
50. Olivares ML, Passeggi MCG, Ferron J, Zorrilla SE, Rubiolo AC. 2010. Study of milk/kappa-carrageenan mixtures by atomic force microscopy. *Food Hydrocolloids*, 24 (8), 776-782.
51. Gunning AP, Kirby AR, Parker ML, Cross KL, Morris J. 2010. Utilizing atomic force microscopy in food research. *Food Technol.*, 64 (12), 32-37.
52. Vignolles ML, Lopez C, Ehrhardt JJ, Lambert J, Mejean S, Jeantet R, Schuck P. 2009. Methods' combination to investigate the suprastructure, composition and properties of fat in fat-filled dairy powders. *J. Food Eng*, 94 (2), 154-162.
53. Paramita V, Iida K, Yoshii H, Furuta T. 2010. Effect of feed liquid temperature on the structural morphologies of d-limonene microencapsulated powder and its preservation. *J. Food Sci.*, 75 (1), E39-E45.
54. Gaiani C, Boyanova P, Hussain R, Murrieta Pazos I, Karam MC, Burgain J, Scher J. 2011. Morphological descriptors and colour as a tool to better understand rehydration properties of dairy powders. *Int Dairy J.*, 21 (7), 462-469.
55. Jones MD, Young P, Train D. 2012. The use of inverse gas chromatography for the study of lactose and pharmaceutical materials used in dry powder inhalers. *Adv Drug Deliver Rev*, 64(3): 285-293.
56. Goode KR, Bowen J, Akhtar N, Robbins PT, Fryer PJ. 2013. The effect of temperature on adhesion forces between surfaces and model foods containing whey protein and sugar. *J. Food Eng*, 118(4): 371-379.
57. Shimada Y, Yonezawa Y, Sunada H. 2003. Measurement and evaluation of the adhesive force between particles by the direct separation method. *J Pharm Sci*, 92 (3): 560-568.
58. Awad BS. 2011. High-Power Ultrasound in Surface Cleaning and Decontamination. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing Food Engineering Series*, 545-558.
59. Zafar U, Hare C, Hassanpour A, Ghadiri M. 2014. Drop test: A new method to measure the particle adhesion force. *Powder Technol*, 264: 236-241.
60. Enggalhardjo M, Narsimhan G. 2005. Adhesion of Dry Seasoning Particles onto Tortilla Chip. *J Food Sci*, (70 (3) E215-E222.