



Fluidized Bed Applications in Powder Food Processes

Semra Bozkurt^{1,a}, Özgül Altay^{2,b}, Mehmet Koç^{1,c,*}, Figen Kaymak-Ertekin^{2,d}

¹Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, 09010 Aydın, Turkey

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, 35100 Bornova/İzmir, Turkey

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 01/08/2019 Accepted : 27/01/2020</p> <p>Keywords: Fluidized bed Minimum fluidization rate Powdered food Drying Agglomeration</p>	<p>Fluidized bed system has a wide range of use from heavy industry to pharmaceutical, chemical and food industry. In this system, a bed of solid particles is transformed into a fluid-like state through suspension in a fluid. The minimum fluidization rate, defined as the speed at which the fluidization begins at the bed, is the most important design and operation parameter of the fluidized bed systems. Fluidized bed in powdered foods are widely used for drying, agglomeration, granulation and coating processes. Since many events take place simultaneously in fluidized bed technology, there are many variables acting on the system. In this review, information is given about fluid bed, fluidized bed applications in powder food processes and parameters to be considered during the use of fluidized bed system.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(4): 818-825, 2020

Toz Gıda Proseslerinde Akışkan Yatak Uygulamaları

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derleme Makale</i></p> <p>Geliş : 01/08/2019 Kabul : 27/01/2020</p> <p>Anahtar Kelimeler: Akışkan yatak Minimum akışkanlaşma hızı Toz gıda Kurutma Aglomerasyon</p>	<p>Akışkan yatak sistemi, ağır sanayiden, eczacılık, kimya ve gıda sanayisine kadar geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu sistemde küçük katı parçacıklar hava ile temas ettirilir ve hareketleri sağlanarak yatak içerisinde askıda tutulmaları sağlanır. Yatak içerisinde akışkanlaşmanın başladığı andaki hız olarak tanımlanan minimum akışkanlaşma hızı, akışkan yatak sistemlerin en önemli tasarım ve işletme parametresidir. Toz gıdalarda akışkan yatak, kurutma, aglomerasyon, granülasyon ve kaplama proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akışkan yatak teknolojisinde birçok olay eş zamanlı olarak gerçekleştiğinden sistem üzerine etki eden çok sayıda değişken mevcuttur. Bu derlemede, akışkan yatak, toz gıda proseslerinde akışkan yatak uygulamaları ve akışkan yatak sisteminin kullanılması sırasında dikkat edilmesi gereken parametreler hakkında bilgi sunulmaktadır.</p>

^a semrabozkurt35@gmail.com

^b <https://orcid.org/0000-0002-7132-9773>

^c ozgullaltay@gmail.com

^d <https://orcid.org/0000-0003-0067-9319>

^e mehmetkoc@adu.edu.tr

^f <https://orcid.org/0000-0002-7295-7640>

^g figen.ertekin@ege.edu.tr

^h <https://orcid.org/0000-0001-5042-3659>



Giriş

Akışkan yatak, ağır sanayi (kömürün yakılması ve gazlaştırılması, kuru atık gaz temizleme, cevher arıtma, katalitik petrol destilasyonu), eczacılık, kimya ve gıda gibi farklı birçok sektörde kullanılan bir teknolojidir. Teknolojinin temelini akışkanlaşma işlemi oluşturmaktadır. Akışkanlaşma ile küçük katı parçacıklar, hava ile temas ettirilerek akışkanların özelliklerine benzer özellikler kazandırıldığından sistem akışkan yatak olarak tanımlanmaktadır.

Akışkanlaştırma işlemi, fan aracılığıyla basınçlandırılan havanın, akışkanlaştırılmak istenen katı parçacıkları arasından, parçacıklar üzerine etki eden yer çekimi kuvvetini yenecek kadar yüksek hızla geçirilerek, parçacıkların askıda tutulması olarak tanımlanmaktadır (Parikh, 2017). Tabanında delikli bir plaka (distribütör) bulunan ve katı parçacıklar içeren yatağın alt kısmından, düşük bir hızla hava verilmeye başlandığında hava, parçacıklar üzerinde fazla kuvvet uygulayamaz ve parçacıklar arasındaki boşluklardan yukarı doğru hareket eder. Akış hızı arttırıldıkça hava, parçacıklara daha fazla kuvvet uygulayarak, parçacıklar arasındaki yer çekiminden kaynaklanan kuvveti azaltır ve parçacıklar birbirlerinden ayrılmaya, bazıları titreşmeye başlar. Bu tip yatağa genişmiş yatak adı verilir. Hız daha da arttırıldığında, parçacıklar üzerindeki kaldırma kuvveti yer çekimini dengeleyerek, yukarı doğru akan havanın içinde parçacıkların asılı kalmalarını sağlar. Yani parçacık üzerine uygulanan kuvvetlerin vektörel toplamı sıfır olur ve yatağın herhangi bir noktasındaki basınç düşüşü yaklaşık olarak o bölümdeki katı tanecikler ile akışkanın ağırlığına denk olur. Bu esnada yatak minimum akışkanlaşma durumundadır. Bu noktadaki hava hızına minimum akışkanlaşma hızı denir. Hacmi değişmeyen yatak bölgesinde hava akış hızı daha arttırılırsa, yatak içerisinde hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu tip yataklara kabarcıklı akışkan yatak denir. Hava akış hızının daha da arttırılması durumunda kabarcıklar daha da büyüyerek, yatak içerisinde daha büyük boşluklar oluşmaktadır. Bu durum türbülanslı akışkan yatak olarak adlandırılmaktadır. Akış hızına ve akışkan yatağın boyutlarına bağlı olarak istenmeyen durumların da gözlenmesi mümkündür. Yatak yüksekliğinin yatak çapına göre büyük olması yığılma (slugging) neden olur. Dağıtıcı plakada, akışkanın deliklerden geçmesi ile oluşan kabarcıklar yatak yüzeyine erişmeden birleşirler ve üzerlerinde kalan malzemenin alt taraftaki malzemenin ayrılmasına neden olurlar. Bu istenmeyen bir durumdur, verimin düşmesine ve ısı transferinin homojen bir şekilde gerçekleşmemesine neden olur. Akışkan hızı daha da artarsa bazı küçük parçacıklar terminal hızlarına erişirler ve sistemi terk ederler. Yataktan ayrılarak bireysel olarak hareket eden küçük partiküller ısı ve kütle transferinin homojen bir şekilde gerçekleştirilemediğinin de bir göstergesidir (Kurtuluş, 2007; Smith, 2008; Pusapati ve Rao, 2014).

Akışkan Yatak Sistemi Bölümleri

Akışkan yatak sistemi, kabaca hava giriş ve çıkış kanalı, ısıtıcı, fan, giriş ve çıkış sıcaklığı probu, yatak sıcaklığı probu, nem probu, hava dağıtıcı plaka, dehumidifier (özellikle düşük sıcaklıklarda veya ısıya duyarlı maddelerle çalışıldığında havanın kurutulması amacıyla kullanılabilir), proses filtreleri, nozul ve kontrol panelinden oluşmaktadır. Akışkan yatak

sisteminde, aglomerasyon, granülasyon ve kaplama işlemleri için bu bölümlere ek olarak çözeltili dağıtıcı düzeneğini oluşturan ısıtıcı, karıştırıcı, termometre ve peristaltik pompa kullanılmaktadır (Hede ve ark., 2008).

Minimum Akışkanlaşma Hızı

Akışkan yatakta en önemli parametre, minimum akışkanlaşma hızı (U_{mf})'dır. Yatak içerisinde akışkanlaşmanın başladığı andaki hız olarak tanımlanmaktadır. Bu değerinin altında yatak sabit yatak gibi davranırken bu değer üstünde yatak akışkanlaşır ve tanecik büyüklüğüne bağlı olarak da farklı yatak davranışları göstermeye başlar. Minimum akışkanlaşma hızı (U_{mf}) akışkan yataklı sistemlerin en önemli tasarım ve işletme parametresi olup Ergun eşitliği (Geankoplis, 2003) ile ifade edilmektedir. Bahsi geçen eşitlik eşitlik 1'de gösterilmektedir. Eşitlik 1'de görüldüğü üzere, minimum akışkanlaşma hızı, parçacık ve partikül yoğunluğundan kaynaklanan basınç düşümüne, yatak yüksekliğine, poroziteye, havanın viskozitesine ve yoğunluğuna, partikül boyutuna ve şekline bağlı olarak değişim göstermektedir.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu v' (1-\epsilon)^2}{\phi_s D_p^2 P} + \frac{1.75\rho(v')^2 (1-\epsilon)}{\phi_s D_p} \quad (1)$$

- Δp = Basınç düşümü (Pa)
- L = Yatak yüksekliği (m)
- μ = Havanın viskozitesi (Pa.s)
- ρ = Havanın yoğunluğu (kg/m³)
- v' = Minimum akışkanlaşma hızı (m/s)
- D_p = Partikül boyutu (m)
- ϵ = Porozite
- ϕ_s = Şekil faktörü

Akışkan yatak sistemde uygun bir akışkanlaşma sağlamak için, ürün miktarı, parçacık şekli, boyutu ve yoğunluğu ile parçacıkların akış özellikleri, cihazın ve fanın kapasitesi dikkate alınmalıdır. Verilen özellikler dışında katı parçacıkların yatak içerisinde akışkanlaşmasını etkileyen en önemli faktör hava hızıdır. Hava hızı kontrolü, hava dağıtıcı plaka ile gerçekleştirilir. Dağıtıcı plaka seçimi, parçacık türü ile partikül boyutuna, yoğunluğuna ve şekline bağlıdır. Hava dağıtıcı plaka çeşidi ve geometrisi, minimum akışkanlaşma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Parikh, 2017).

Akışkan Yatağın Avantaj ve Dezavantajları

Akışkan yatak, hızlı ısı ve kütle transferi, homojen sıcaklık dağılımı, katı partiküllerin yüksek akıcılığa sahip olması ve ısıya duyarlı maddelerde kullanılabilmesi gibi avantajlar sağlarken, sistemde yüksek basınç düşüşü, yüksek elektrik tüketimi, sisteme etki eden birçok parametrenin olması, proses ve ürün özelliklerinin optimizasyonu için uzun deneysel çalışma gerektirmesi ve ölçek büyütme işleminin zor olması sistemin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Hede, 2006).

Gıdalarda akışkan yatak uygulamaları

Akışkan yatak gıda endüstrisinde, dondurma ve soğutma, kurutma, dondurarak kurutma, püskürtürerek kurutma, sınıflandırma, haşlama ve pişirme, sterilizasyon, patlatma gibi işlemlerde kullanılmaktadır (Smith, 2008).

Toz gıda proseslerinde ise:

- Kurutma,
- Granülasyon,
- Aglomerasyon ve
- Kaplama uygulamalarında akışkan yatak yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır (Teunou ve Poncelet, 2005; Bhandari ve ark., 2013).

Tozların akışkanlaşabilmesi için iyi bir akabilirlik göstermesi gerekir. Bu, tozun çok ince partiküller içermemesi, su içeriğinin düşük olması, taneciklerin dar bir boyut dağılımı ile düzenli bir şekle sahip olması ve yıpranmaya karşı iyi bir mekanik direnç göstermesi gerektiği anlamına gelir. Akışkan yataklarda işlem gören gıda tozlarının çoğu, düşük yoğunluklu küçük parçacıklara karşılık gelmektedir (Turchiuli, 2013).

Akışkan yatak sistemi kaplama, kurutma, aglomerasyon, granülasyon ve kaplama yapabilmeye özelliği ile gıda endüstrisinde besin takviye maddeleri olarak kullanılan C vitamini, B vitaminleri, demir sülfat, demir fumarat, sodyum askorbat, potasyum klorid ve çeşitli vitamin/mineral karışımları gibi besinsel maddelerin enkapsüle edilmesinde kullanılmaktadır. Et endüstrisinde de, aroma ve rengin geliştirilmesi amacıyla çeşitli gıda asitleri akışkan yatak yöntemi ile enkapsüle edilmektedir (DeZarn, 1995). Ayrıca enzimler ve maya gibi proses yardımcı maddeler, instant gıda ürünleri gibi toz gıdaların üretiminde de akışkan yatak kullanılmaktadır (Dewettinck ve Huyghebaert, 1999).

Kurutma

Akışkan yatak kurutma prosesinde, yatak içerisinde bulunan katı materyaller, sisteme verilen sıcak basınçlı hava aracılığıyla yukarı doğru hareket ettirilir ve havada süspansiyon halinde iken nemi uzaklaştırılarak kurutulur. Yatak içerisinde akışkanlaştırılmış katı parçacıkların geniş hareket alanına sahip olması; homojen bir kompozisyonun sağlandığı iyi bir katı karışımı; kurutulan materyal ile hava arasındaki temasın etkin olması, ısı ve kütle transferinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır (Turchiuli, 2013).

Akışkan yataklı kurutucular, genellikle akışkanlaşabilen ıslak partiküller ve granüller materyallerin kurutulması için kullanılmaktadır. Biyolojik ürünlerin kurutulmasında da kullanılan bu yöntem, proses sırasında ürünün aşırı ısınmaması nedeniyle ısıya karşı duyarlı maddelerin kurutulması için de uygundur. Püskürtmeli kurutucularda, proses sonunda elde edilen toz ürünlerin boyutu çok küçük olduğundan ısısal ve rekonstitüsyon özellikleri zayıftır ve toz uçuşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle söz konusu sorunların giderilmesi amacıyla püskürtmeli kurutucuların sonuna akışkan yatak entegre edilmektedir (Smith, 2008).

Diğer kurutucularla karşılaştırıldığında akışkan yataklı kurutucular hızlı ısı ve kütle transferi ile son üründe homojen nem içeriği dağılımı sağlaması ve kısa kurutma süresi gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır (Daud 2008).

Aglomerasyon

Toz gıdaların, rekonstitüsyon (ıslanabilirlik, çözünürlük, batabilirlik, dağılılabilirlik vb.) özelliklerini iyileştirme, taşıma ve depolama için uygun hale getirme ve akış problemini ortadan kaldırmak amacıyla küçük parçacıkların özelliklerini kaybetmeden birbirleri ile

birleşmesi yoluyla daha büyük boyutta gözenekli parçacıkların oluşturulması olarak tanımlanan aglomerasyon işlemi sıklıkla uygulanmaktadır (Bhandari ve ark., 2013).

Aglomerasyon gıda endüstrisinde süt ve süt ürünleri tozu (süt tozu, kakao tozu), içecek tozu ve nişasta bazlı ürünler (çorbalar, puding, soslar, bebek mamaları) gibi suda veya sütte hızlı bir şekilde topaklaşma olmadan dağılan veya çözünen hazır toz ürünlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır (Dhanalakshmi ve ark., 2011). Gıda endüstrisinde kullanılan aglomerasyon tekniklerinden biri de akışkan yataklı aglomerasyondur.

Akışkan yatak aglomerasyonu, katı parçacıkların yukarı doğru hareket eden sıcak hava akımında akışkanlaştırılması ve karıştırılması ile bağlayıcı sıvının nozul yardımıyla akışkanlaşan parçacıklar üzerine püskürtülmesi işlemine dayanmaktadır. Püskürtülen sıvı damlacıklar, partikül ile çarpıştığında partikül yüzeyini ıslatıp partikül yüzeyinin yapışkan hale gelmesini sağlar. Islak parçacık, akışkan yataklı başka bir parçacık ile çarpıştığında iki parçacık arasında sıvı köprüsü oluşur ve adezyon sağlanır. Ardından kurutma ile çözücünün buharlaşması ve sıvı köprünün katıya dönüşmesiyle oluşan yeni yapının sağlamlaştırılması sağlanır. Bu farklı aşamaların tekrarlanmasıyla (ıslatma, çarpışma, kurutma) parçacık büyümesi gerçekleşir ve sonuçta kuru aglomeratlar oluşur (Turchiuli ve ark., 2005; Smith, 2008).

Granülasyon

Granülasyon, ince toz partiküllerin, daha büyük parçacıklar oluşturmak üzere bir araya toplandığı bir boyut büyütme işlemidir. Toz gıdaların akış özellikleri ile işleme, taşıma ve sıkıştırma özelliklerini geliştirme, istenen parçacık boyut dağılımı veya ürün şeklini elde etme, yağın yoğunluğu ve partikül yoğunluğunu değiştirme gibi nedenlerden dolayı boyut büyütme işlemi uygulanmaktadır (Hemati ve ark., 2003).

Akışkan yataklı granülasyon işleminde, bağlayıcı sıvı nozul aracılığıyla akışkanlaştırılmış parçacıklar üzerine püskürtülür. İlk aşamayı, akışkanlaştırılmış parçacıkların püskürtülen sıvı damlacıklar ile ıslanması ve çarpışan parçacıklar arasında sıvı bir bağın elde edilmesi oluşturur. İkinci aşamayı ise kurutma işlemi ile birlikte mevcut sıvı bağların katı bağlara dönüşmesi oluşturur.

Parçacık büyümesi, ya iki veya daha fazla partikülün birleşmesiyle ya da bağlayıcı sıvı damlacıklarının tek bir parçacık yüzeyinde birikmesi ve katmanlaşmasıyla kalın bir tabakanın oluşması sonucu gerçekleşir. İki veya daha fazla partikülün birleşmesi ile boyut büyütme işleminde, ıslanan parçacıklar sıvı köprüler ile bir arada tutulur ve çözücü buharlaşmasına bağlı olarak bu köprülerin kurutulmasıyla katı granüller elde edilir. Katmanlaşma sırasında ise bağlayıcı sıvı damlacıklar katı parçacıkların yüzeyinde birikerek kalın bir tabaka oluşturur (Link ve Schlünder, 1997).

Aglomerasyon ve granülasyon işlemleri aynı görünse de temelde bu iki uygulama birbirinden farklıdır. Her aglomerasyon işlemi bir granülasyon olabilir fakat her granülasyon işlemi bir aglomerasyon değildir. Granülasyon işleminde amaç toz gıdaların partikül büyüklüğünü ayarlamak iken aglomerasyonda ise amaç toz gıdaların sıvı içinde çözünürlüğünü ve dağılılabirliğini arttırmaktır.

Kaplama

Akışkan yatak kaplama, ilk olarak eczacılık sektöründe tablet ve katı parçacıkların kaplanması için kullanılmış olup hızlı bir şekilde gıda endüstrisine yayılmıştır. Gıdaların korunması ve raf ömrünün uzatılmasına yönelik teknolojiler arasında yenilebilir film kaplamalar ön plana çıkmaktadır. Kullanılan film kaplama tekniklerinden biri de akışkan yatak kaplamadır. Akışkan yatak kaplama, ekstrüzyon, çözücü ekstraksiyonu, koaservasyon, kokristalizasyon, püskürtme kurutma gibi gıda bileşenlerinin veya katkı maddelerinin enkapsülasyonunda ve kaplanmasında kullanılan yöntemlerden biri olup katı parçacıkların (tozların) kaplanmasına olanak sağlamaktadır (Teunou ve Poncet, 2005). Akışkan yatak kaplama, gıda endüstrisinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu amaçlar arasında,

- Aktif moleküllerin oksijen ve nem gibi faktörlerden korunması veya kontrollü salınımı
- Tat veya renk maskeleyici
- Parçacık yüzey şekli, dokusu, görünümü ve kompozisyonunun kontrolü
- Homojen yapıda toz ürün oluşumu
- İnce parçacıkların azalması,
- İşleme, taşıma ve depolama özelliklerinin geliştirilmesi
- Lipid, wax gibi maddelerle kaplama yer almaktadır (Werner ve ark., 2007; Frey, 2014).

Akışkan yatakta kaplama işleminin temeli, katı halde bulunan çekirdek materyallerin hava akımında akışkanlaştırılması ve kaplama sıvısının, püskürtme başlığı aracılığı ile yatak içerisinde yer alan partiküllere farklı konumlardan püskürtülmesi ve kurutulması sonucu katman şeklinde kapsüllerin oluşmasına dayanmaktadır (Onwulata, 2005).

Akışkan yatakta, katı (parçacıklar), sıvı (kaplama sıvısı) ve gaz (akışkanlaştırıcı hava) olmak üzere üç faz vardır. Kaplama işlemi sırasında, bu fazlar arasındaki etkileşime bağlı olarak birtakım olaylar eş zamanlı olarak meydana gelmektedir. Bu olaylar:

- Yatak içerisinde yer alan parçacıkların hava ile süspansiyonu (parçacık dinamiği)
- Parçacık-damlacık etkileşim olasılığını arttırmak amacıyla kaplama sıvısının damlacıklar halinde püskürtülmesi böylece damlacıkların parçacık ile çarpıştığında kolayca kuruyabilmesi (ısı transferi)
- Damlacıkların parçacık yüzeyine yayılmasından sonra damlacıkların parçacık üzerinde düzleşmesi ve yapışması (kütle transferi) ile damlacıkların kurumadan önce partikül yüzeyinde bir tabaka oluşturarak birleşmesi
- Parçacık etrafındaki damlacıkların katmanlaşması sonucu homojen bir kaplama (gerçek kaplama) elde edilmektedir.

Akışkan yatak kaplama teknolojisi yüksek üretim maliyetinden dolayı püskürtmeli kurutma yöntemine kıyasla yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmayıp son yıllarda sürekli akışkan yatak sistemlerinin geliştirilmesiyle yüksek performans sağlayan bu teknoloji toz gıda kaplamalarına bir

alternatif olarak sunulmuştur. Üstten, alttan ve açılı püskürtmeli olmak üzere 3 farklı akışkan yatak kaplama yöntemi mevcuttur (Desai ve Park, 2005).

Üstten kaplama

Katı partiküllerin sıcak hava ile akışkanlaştırılması parçacıkların bireyselleşmesini ve püskürtme bölgesine sirkülasyonunu sağlar. Bu bölgede akışkan yatak üzerine yerleştirilmiş bir nozul yardımıyla kaplama çözeltisi damlacıklar halinde partikül üzerine püskürtülür. Sıvı damlacıklar partikül yüzeyinde birikir ve kaplama sıvısının buharlaşması ile kurutulur. Kuru partiküller yeni bir ısıtma ve kurutma döngüsüne başlamadan önce yatağa geri dönerler. Bu yöntem, kaplama materyali aşağı doğru püskürtülürken katı partiküller yukarı doğru hareket ettiğinden karşı akım olarak da adlandırılır. Büyük kapasiteye ve kolayca eşilebilen püskürtücüye sahip olmasına rağmen elde edilen kapsüllerde kaplama filminin zayıf kontrollü salınımına sahip olması, ıslanan partiküller arasındaki aglomerasyondan dolayı küçük partiküller (< 100 µm) için proses kontrolünün zor olması ve sıvı damlacıkların parçacık yüzeyine ulaşmadan önce kurumaması bu tekniğin dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle söz konusu teknik kaplama işlemi için uygun olmayıp aglomerasyon ve granülasyon işlemleri için daha uygundur (Bhandari ve ark., 2013).

Açısal kaplama

Dönme ve hava akımının kombinasyonunu içeren açısal kaplama (rotor/yüzeysel kaplama) yönteminde, yatak içerisinde dönen bir disk yer almaktadır. Kaplama kalitesi açısından Wurster yöntemi ile benzerlik gösteren bu sistemde yüksek oranda karıştırma olduğundan kırılma ya da ufalanabilir kaplama maddelerine uygulanamamaktadır. Açısal kaplama sistemi küçük parçacıklarda önerilmemektedir; pelet ve çubuk kaplamaya çok uygundur (Teunou ve Poncet, 2005).

Wurster kaplama

İlk kez D.E. Wurster tarafından 1950' lerde geliştirilen bu teknikte kaplama sıvısı yatağın altında yer alan bir nozul ile yukarı doğru püskürtülür ve parçacıklar ile birlikte eş yönlü olarak hareket eder. Damlacıklar, parçacıklarla yakın temas halinde olduklarından püskürtme kurutulmaları engellenmekte, toz oluşumu azaltılmakta ve parçacık-damlacık çarpışma olasılığı artırılarak kaplama etkinliği geliştirilmektedir. Bununla birlikte parçacıkların sirkülasyonu kurutma hızını arttırmakta ve böylece aglomerasyon oluşumunu azaltarak kaplama kalitesini iyileştirilmektedir. Küçük parçacık kaplaması için de uygun olan bu yöntem ile düzgün, homojen ve uzun süreli kontrollü salınımına sahip kaplanmış parçacıklar elde edilmektedir (Bhandari ve ark., 2013).

Wurster ekipmanı, genişleme haznesi, anülüs, Wurster tüpü, hava dağıtıcı plaka ve bu plakanın merkezinde bulunan bir nozuldan oluşmaktadır. Wurster prosesi partikül hareketine göre dört bölgeye ayrılmaktadır. Bu bölgeler üst yatak bölgesi, genişleme bölgesi, alt yatak bölgesi ve yatay geçiş bölgesi olarak tanımlanmaktadır.

Wurster tüpünde, hava akışına bağlı olarak parçacıklar hızlanır, damlacıklar halinde püskürtülen kaplama sıvısı parçacık yüzeyine çarpar ve sıvı bir film tabakası oluşturarak yayılır. Wurster tüpünden ayrıldıktan sonra parçacık, genişleme haznesine girer ve bu bölgede hızı azaldığından anülüs bölgesine düşer. Parçacık yüzeyinin, anülüse girmeden önce kurumaması gerekir, aksi takdirde

ıslak parçacıklar kaplama kalitesi açısından istenmeyen bir durum olan aglomerasyona neden olabilir. Anülusta, parçacıklar dibe doğru hareket eder ve dağıtıcı plaka ile Wurster tüpü arasındaki açıklık ile aynı seviyeye ulaştıklarında yatay hareket ederler ve Wurster tüpüne hızlıca çekilirler. Bu sirkülasyon, amaçlanan kaplama sıvısı miktarı partikül üzerine püskürtülene kadar tekrarlanır (Karlsson, 2006).

Üst yatak bölgesi

Üst yatak bölgesinde partiküller akışkanlaştığından hızları artar. Parçacıkları bu bölge boyunca hareket ettirecek basınç düşüşünü sağlamak için hava hızının minimum akışkanlaşma hızının üzerinde olması gerekir. Kaplama işleminin de gerçekleştiği bu bölgenin kontrolü zordur. Bu bölgede yatak içerisinde dikey pnömatik bir taşıma meydana gelir (Geldart ve Rhodes, 1986) ve taşımadaki sorunlardan biri yığılmasıdır. Dikey pnömatik taşıma, minimum yığılma hızı ile karakterize edilir. Minimum yığılma hızı, yığılmanın oluşmadığı minimum hava hızıdır ve parçacıkların üst yatak bölgesine girme hızına bağlıdır (Christensen ve Bertelsen 1997).

Genleşme haznesi: Üst yatak bölgesinden ayrılan parçacıklar genleşme haznesine girer. Burada hava hızı minimum akışkanlaşma hızının altına düştüğünden parçacıklar alt yatak bölgesine doğru serbest düşme yaparlar. Bu bölgede parçacıklar üst yatak bölgesi boyunca hızlandığından yukarı doğru bir çıkış hızına sahiptirler ve bu hız terminal hız olarak adlandırılır. Parçacık terminal hızı, genleşme haznesinin yüksekliğine bağlıdır. Bu bölgede çarpışmayı engellemek amacıyla minimum genleşme haznesi yüksekliğine ihtiyaç duyulur. Bu minimum yükseklik, çıkış hızı, yüzey alanı ve parçacığın yoğunluğuna bağlı olarak belirlenir. Bu bölgedeki yukarı doğru çıkış hızı, kombine edilmiş akışkanlaşma havası ve nozul havasının hacmi ile genleşme bölgesinde ekipmanın çapına bağlı olarak kontrol edilebilir. Bu nedenle akışkan yatak aparatları, hava hızını minimum akışkanlaşma hızının altına düşürmek amacıyla bu bölgede daha büyük çapa sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir (Christensen ve Bertelsen 1997).

Alt yatak bölgesi: Alt yatak bölgesi hafif genişmiş bir yatak görünümündedir. Bu bölgede havanın hızı minimum akışkanlaşma hızının altındadır. Parçacık yüzeyinde oluşan film henüz tamamen kurumadığından yapışkan bir faza geçme eğilimindedir. Bu bölgede, hava akışı laminar olduğundan ve parçacıklar diğer parçacıklarla temas ettiğinden yapışma meydana gelebilmektedir. Üst yatak bölgesine giren parçacıklar alt yatak bölgesinde toplanır. Aynı zamanda parçacıkların tekrar üst yatak bölgesine girmeden önce ek olarak kurutulmasını sağlar. Bu nedenle söz konusu bölgenin boyutu parçacıkların kuruma süresini kontrol eder (Christensen ve Bertelsen 1997).

Yatay geçiş bölgesi: Alt yatak bölgesinin tabanı ile Wurster bölmesi altındaki açıklık parçacıkların yatay taşınması için ayrı bir bölge oluşturur. Bu açıklık, parçacıkların üst yatak bölgesine akışını kontrol etmekte ve böylece üst yatak bölgesinde birim alan başına parçacık kütle akış hızını kontrol etmektedir. Kompleks hava hareketleri nedeniyle bu bölgedeki pnömatik taşıma tüpündeki taşımaya göre daha karmaşıktır (Christensen ve Bertelsen, 1997).

Akışkan Yatak Sistemine Etki Eden Parametreler

Akışkan yatak tekniğinde birçok işlem aynı anda gerçekleştiğinden sistem üzerine etki eden çok sayıda değişken mevcuttur. Bu değişkenler, ekipman ve proses değişkenleri ile ürün özellikleri olmak üzere üç grup altında toplanabilir. Hava dağıtıcı plaka, Wurster tüpünün yüksekliği, filtre torbası ve nozul tipi ekipman değişkenlerini; giriş hava hızı, sıcaklığı, nemi, püskürtme hızı ve atomizasyon basıncı proses değişkenlerini; katı parçacık ile kaplama materyali veya bağlayıcı sıvı ürün özelliklerini oluşturmaktadır.

Ekipman Değişkenleri

Hava dağıtıcı plaka

Hava dağıtıcı plaka, yatak içerisinde uygun parçacık sirkülasyonunu sağlamada oldukça önemlidir. Dağıtıcı plakadan geçen hava katı parçacıkların hızını dolayısıyla akışkanlaşma işlemini etkilemektedir. Plakada yer alan delik sayısı ve çapı akışkanlaşmayı etkilemektedir. Delik sayısının fazla olması daha büyük hava kabarcıklarının oluşumuna neden olduğundan akışkanlaşma işlemi homojen bir şekilde gerçekleşmemektedir. Delik sayısı az olduğunda ise hava kabarcıkları küçük olduğundan akışkanlaşma daha homojen olmaktadır (Bhandari ve ark., 2013). Küçük parçacıkları akışkanlaştırmak için daha az hava hızı gerektiğinden plakadaki açık alan daha az iken büyük parçacıklarda ise bu durum tam tersidir (Sonar ve Rawat, 2015). Hava dağıtıcı plaka tasarımı, özellikle Wurster kaplama işleminde büyük önem kazanmaktadır. Bu yöntemde, kaplama işleminin de gerçekleştiği üst yatak bölgesinde parçacıkları akışkanlaştırabilecek, alt yatak bölgesinde ve yatay geçiş bölgesinde parçacık hızını yavaşlatabilecek şekilde bir hava dağıtıcı plaka tasarımı gerçekleştirilmelidir. Plaka tasarımı gerçekleştirilirken katı parçacıkların özellikleri dikkate alınmalıdır

Wurster tüpünün yüksekliği

Wurster kaplama yönteminde, uygun bölme boşluğunun ayarlanması katı parçacıkların yatay geçiş bölgesinden Wurster tüpü içerisine çekilmesini sağlar ve böylece yatak içerisinde uygun parçacık sirkülasyonunu da sağlanmış olur (Christensen ve Bertelsen, 1997). Tüpün yüksekliği, parçacığın boyut, şekil, akış ve yığın yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Kolon yüksekliğinin çok fazla olması ve partiküllerin kolon içine çekilmesi için yetersiz basınç farkının oluşması, parçacıkların yavaş ve yığılma halinde akışına neden olduğundan aglomerasyon riskini arttırmaktadır. Boşluk çok az olduğunda ise kolona daha az katı parçacık çekilir ve bu durum kaplama materyali kaybına neden olduğu gibi parçacıkların fazla ıslanmasına da sebep olmaktadır (Sonar ve Rawat, 2015).

Filtreler

Özellikle kaplama prosesinde parçacık kaybını önlemek ve hava geçişini sağlamak için filtreler kullanılmaktadır. Gözeneklilik optimum değerden yüksekse, parçacık kaybı fazla olur. Gözeneklilik optimalden düşükse filtre tıkanır ve proses kesintiye uğrar ki bu ürün verimini etkiler. Filtre torbası, materyalin parçacık boyutuna bağlı olarak seçilir ve gözenekliliği

basınç farkı izlenerek incelenebilir (Sonar ve Rawat, 2015).

Nozul tipi, çapı, sayısı ve yüksekliği ve pozisyonu

Akışkan yatak sistemlerinde kullanılacak olan nozulun tipi, çapı, pozisyonu, yüksekliği ve sayısı prosesi etkilemektedir. Kaplama işlemlerinde kullanılan nozul tipi, genellikle çift akışkanlı nozuldur. Bununla birlikte aglomerasyon, granülasyon ve kaplama işlemlerinde, pnömomatik, ultrasonik ve döner disk gibi atomizör tasarımları da tercih edilebilmektedir (Werner ve ark., 2007). Püskürtme hızı arttığında dahi kaplama materyalini veya bağlayıcı sıvıyı atomize edebilecek nozulun kullanılması gereklidir. Düşük performanslı nozul tarafından üretilen büyük sıvı damlacıklar materyal üzerine eşit bir şekilde dağılmaz ve daha küçük damlacıklar gibi hızla kuruyamaz. Bazı damlacıklar parçacık yüzeyleri ile temas edebilir, ancak yayılmadan önce kuruyabilirler, bu da çekirdek materyal üzerinde düzensiz yüzeye neden olur. Püskürme hızı nozulun kapasitesini aştığında tekdüze atomizasyonun sürdürülmesi için küçük damlacıklar ile birlikte büyük damlacıklar da ortaya çıkar, büyük damlacıklar aglomerasyona neden olur. Aglomerasyondan kaçınmak için çoklu ünite nozulları kullanılmalıdır (Harlan, 2004).

Nozul seçiminde, nozulun çapı dikkate alınmalıdır. Nozul çapının küçük olması daha iyi püskürtme sağlar. Bununla birlikte, nozul çapının çok küçük olması, nozulun tıkanmasına neden olabilmektedir. Özellikle kaplama ve aglomerasyon işlemlerinde püskürtme sıvısı daha küçük damlacıklar halinde atomize edildiğinden bu işlemlerde nozul seçimi önemlidir. Granülasyon işleminde damlacık boyutu daha az önem kazanmakta ve nozul sayısının artması granülün yoğunluğunu ve boyut dağılımını arttırmaktadır.

Agglomerasyon ve granülasyon işlemlerinde nozulun yüksekliği de aglomerat ve granül boyut ve yapısını etkilemektedir. Nozul yüksekliği, akışkanlaştırılmış parçacıklara çok yakın olduğunda aşırı ıslanma nedeniyle topaklanma meydana gelmekle birlikte akışkanlaşan parçacıkların nozula çarpması nozulun tıkanmasına yol açmakta ve proses kesintiye uğramaktadır. Aksine, eğer nozul optimum seviyeden daha yüksek bir yere yerleştirilirse, püskürtülen damlacıkların, parçacık yüzeyini ıslatmadan veya parçacık yüzeyine yayılmadan önce kurumalarına neden olmaktadır. Nozul yüksekliği ve pozisyonu yatak içerisinde yer alan parçacıkların yüzeylerinin düzgün ve homojen bir şekilde ıslanmasını ve yayılmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Özellikle kaplama işleminde nozul seçimi kadar nozulun pozisyonu da oldukça önemlidir çünkü doğrudan kaplama kalitesini ve verimini etkilemektedir (Parikh, 2017).

Proses Değişkenleri

Giriş hava hızı

Akışkan yatak sistemine etki eden en önemli proses parametrelerinden biridir. Hava hızı, yatak içerisinde yer alan parçacıkların akışkanlaşmasını, karışımını ve sirkülasyonunu sağlamaktadır. Bununla birlikte giriş hava hızı ısı transfer katsayısını etkilediğinden kurutma prosesini de etkilemektedir. Hava hızının yetersiz olması, istenen parçacık sirkülasyonu ve yeterli bir kurutma sağlayamadığından özellikle kaplama işlemi sırasında parçacık yüzeyinde biriken püskürtülmüş damlacıkların

nemini uzaklaştırılmaması aglomerasyona neden olmaktadır (Sonar ve Rawat, 2015). Aşırı yüksek hava akış hızı defluidizasyon riskini azaltsa da aglomerasyon ve granülasyon işlemleri sırasında parçacıklar arasındaki çarpışma hızını arttırdığından çarpışma sırasında parçacıkların birleşme olasılığı azalmaktadır. Yine yüksek hava hızı parçacıkların yıpranmasına dolayısıyla aglomerat ve granül boyutunda küçülmeye neden olmaktadır (Schaafsma ve ark., 1999). Ayrıca yüksek hava hızı püskürtülen damlacıkların parçacık yüzeyine ulaşmadan veya parçacık yüzeyinde dağılmadan kuruma olasılığını arttırdığından özellikle kaplama prosesinde fonksiyonel kaplamalar için istenen salınım özelliklerini sağlamayan kaplamalarla sonuçlanabilir (Cole, 1995, Qiu Y ve ark., 2009). Bu nedenle uygun hava akış hızı, parçacık yoğunluğu, boyutu ve şekli gibi ürün özellikleri ile yatak içerisinde yer alan ürün miktarı dikkate alınarak ayarlanmalıdır (Christensen and Bertelsen, 1997).

Giriş hava sıcaklığı ve nemi

Giriş hava sıcaklığı, havanın nemi emme ve uzaklaştırma kapasitesini etkilediğinden kurutma hızını ve kurutma döngüsünün süresini belirler. Hava sıcaklığının kontrolü, oluşan kapsüllerin kaplama kalitesini, aglomerat ve granüllerin özelliklerini etkilediğinden önemlidir. Aşırı kuru ortam püskürterek kurutmaya neden olurken aşırı nemli ortam aglomerasyona neden olur.

Havanın sıcaklığı çok yüksek olduğunda, püskürtülen damlacıklar çabuk kurur ve çekirdek materyale çarptığında birleşmezler. Bu durum pürüzlü, gözenekli ve zayıf kontrollü salınım özelliklerine sahip kaplamaların oluşmasına neden olur (Fukumori, 1994). Yüksek sıcaklıklar aynı zamanda, damlacıkların çekirdek materyale ulaşmadan püskürtülerek kurutulmasına neden olduğundan kaplama materyali kaybı ve daha ince kaplamalarla sonuçlanabilir. Diğer taraftan sıcaklık çok düşük olduğunda, kaplanan parçacığı kurutmak için daha uzun bir süre gereklidir ve bu durum çözünebilir bileşenlerin nemlendirilmiş kaplama katmanına geçmesine yol açar. Çözünmüş bileşenler sıvı tabakanın/katmanın yüzey gerilimini azaltır, püskürtülen damlacıklarının birleşme olasılığının düşmesine neden olur. Elde edilen kapsül içine gömülmüş olan materyal, çözünme ortamı ile temas ettiğinde çözünebilir ve bu da gözenekli ve daha geçirgen bir kaplama ile sonuçlanır (Sonar ve Rawat, 2015).

Giriş hava sıcaklığının yüksek olması, püskürtülen damlacıkların akışkan parçacıkların yüzeyine ulaşmadan kurummasını hızlandırdığından ve parçacıkların ıslanmasını azalttığından ortalama granül ve aglomerat boyutunu düşürürken düşük giriş hava sıcaklığı aşırı kaba granüllerin oluşumuna neden olur.

Giriş havasının nemi, kurutma hızını etkilemekte olup nemdeki artış yüksek ürün sıcaklığına neden olmaktadır. Yetersiz kurutma, ıslak söndürme nedeniyle çökme riskiyle birlikte partikül yatağında yüksek bir neme yol açarken, çok yoğun kurutma ise yapışkan parçacıkların elde edilmesine imkan vermez. Giriş havasının nem içeriğindeki artış da büyük granüllerin oluşumuna yol açmakla birlikte defluidizasyon olasılığını artırır (Schaafsma ve ark., 1999; Sonar ve Rawat, 2015; Parikh, 2017).

Püskürtme hızı

Püskürtme hızı, çekirdek materyale ve kaplama

materyalinin/bağlayıcı sıvının özelliklerine bağlıdır. Kaplama işleminde, püskürtme hızı daha yavaş iken aglomerasyon ve granülasyon işlemlerinde daha hızlıdır. Püskürtme hızı kurutma verimine (etkinliğine) ve çözeltinin yapışkanlığına göre ayarlanmalıdır. Kaplama işleminde, yüksek püskürtme hızı, aglomerasyon eğilimini artırır ve daha az homojenliğe sahip kaplamaların oluşmasına neden olur. Düşük püskürtme hızı, özellikle küçük parçacıkların kaplanmasında, daha küçük damlacıkların oluşmasını sağlayarak aglomerasyon riskini azaltır ve homojen kaplama sağlar (Jones ve Percel, 1994). Bununla birlikte, püskürtme hızı çok düşükse, damlacıklar hızlı bir şekilde kuruyacağından, damlacıkların birleşmesi önenebilir ve bu da zayıf biçimde oluşturulmuş kaplamalara yol açabilir (Heng ve ark., 1999). Aglomerasyon ve granülasyon işlemlerinde, bağlayıcı maddenin püskürtülme hızı, parçacıkların büyüme hızını önemli ölçüde etkiler. Püskürtme hızının düşük ve püskürtülen damlacık boyutunun küçük olması parçacıkların büyüme hızını, granülün boyut dağılımını, yoğunluğunu ve sağlamlığını azaltırken püskürtme hızının artırılması ise söz konusu özellikleri arttırmakla birlikte aynı zamanda ıslak söndürmeye bağlı olarak defluidizasyon olasılığını artırır (Burggraeve ve ark., 2013; Aviles ve ark., 2015; Sonar ve Rawat, 2015; Parikh, 2017).

Atomizasyon hava basıncı

Nozullar, kaplama sıvısının/bağlayıcı sıvının püskürtülmesinde kullanılmakta olup sıvıyı atomize edilmiş damlacık haline getirirken hava basıncından yararlanmaktadır. Uygun atomizasyon koşullarının sağlanması, damlacık boyut dağılımı ile partikül büyüklüğü dağılımının uyumlu olması yönünden önemlidir. Yüksek atomizasyon basıncı, daha küçük damlacıkların oluşmasını sağlar (Wan ve ark., 1995) ve bu durum özellikle küçük parçacıkların kaplanması sırasında aglomerasyonu önlemek için gereklidir (Hemati ve ark., 2003). Atomize edici basıncın çok yüksek olması püskürtülen damlacıkların çok hızlı bir şekilde hareket etmesine ve damlacıkların partikül yüzeyine ulaşmadan buharlaşmasına neden olduğundan damlacık-çekirdek etkileşimini desteklemez. Ayrıca yüksek atomize hava basıncı, çekirdek materyalin yıpranmasını artırır ve daha küçük parçacıkların oluşumuna yol açabilir. Diğer taraftan, düşük atomizasyon basıncı, yavaş kuruyan ve çekirdek materyaller arasında aglomerasyon olasılığını arttıran kaba damlacıkların oluşmasına neden olur (Heng ve ark., 1999).

Materyal Özellikleri

Parçacık özellikleri

Katı parçacıkların boyut dağılımı, yoğunluğu ve şekli ile akış özellikleri akışkan yatak sistemlerin temel mekanizması olan akışkanlaşma işlemini etkilediğinden oldukça önemlidir (Parikh, 2017). Parçacık özellikleri, dikkate alınarak hava dağıtıcı plaka tasarımı gerçekleştirilmekte (Sonar ve Rawat, 2015) ve proses parametreleri belirlenmektedir. Ayrıca, katı parçacıkların belirtilen özellikleri ile nem içeriği kurutma, aglomerasyon, granülasyon ve kaplama işlemlerini doğrudan etkilediğinden bu özelliklerin bilinmesi söz konusu proseslerin verimli bir şekilde tamamlanmasının yanı sıra son ürün özellikleri açısından da önem kazanmaktadır.

Kaplama çözeltisi/ Bağlayıcı çözelti özellikleri

Gıda bazlı sistemlerde, yenilebilir filmlerin

oluşturulmasında genellikle protein, karbonhidrat ve yağ bazlı kaplama materyalleri kullanılmaktadır. Aglomerasyon ve granülasyon işlemlerinde ise bağlayıcı sıvı olarak parçacık yüzeyine göre su veya farklı tipte maddeler (doğal veya sentetik polimerler, şekerler) kullanılmaktadır. Kaplama çözeltisi ve bağlayıcı sıvının bileşimi, viskozitesi, yoğunluğu ve yüzey gerilimi püskürtme koşullarını ve damlacık boyutunu etkilemekle birlikte parçacık yüzeyini de değiştirmektedir (Sonar ve Rawat, 2015). Bu parametreler aglomerasyon ve granülasyon işlemlerinde aglomerat ve granül oluşumu ile oluşan bu yapıların boyut dağılımını, yoğunluğunu ve morfolojisini etkilerken (Keningley ve ark., 1997; Mills ve ark., 2000) kaplama işleminde film oluşumunu etkilemekte ve dolayısıyla elde edilecek olan kapsüllerin yapısını ve salınımını da etkilemektedir. Ayrıca kaplama işleminde kaplama materyallerinin termal stabilite özellikleri ve film oluşturma yetenekleri de kaplama kalitesini etkilemektedir.

Sonuç

Akışkan yatak teknolojisi, özellikle kurutma, aglomerasyon, granülasyon ve kaplama gibi toz gıda proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sisteme etki eden parametreler arasında ekipman (hava dağıtıcı plaka, nozul) ve proses (akışkanlaştırıcı havanın hızı, sıcaklığı ve nemi, püskürtme hızı, atomizasyon basıncı) değişkenleri ile materyal (parçacık boyutu, boyut dağılımı, yoğunluğu ve püskürtme sıvısının bileşimi, konsantrasyonu, viskozitesi) özellikleri yer almaktadır. Akışkan yatak kurutmada, ısı ve kütle transferi hızlı bir şekilde gerçekleşmekte ve kurutma sonucu homojen ürün elde edilmektedir. Akışkan yatak aglomerasyonu ile rekonstitüsyon özellikleri geliştirilmiş toz ürünler elde edilmektedir. Granülasyon işlemi ile istenilen parçacık büyüklüğüne ulaşılabilir. Akışkan yatak kaplamada üstten, açısız ve Wurster olmak üzere her üç yöntem de kullanılmakta olup kaplama etkinliği açısından en uygun olan Wurster kaplamadır. Fakat Wurster kaplama işlemi için ek ekipman gerektiğinden bu durum maliyeti arttırmaktadır. Yüksek üretim maliyetinden dolayı akışkan yatak kaplama tek başına kurutma amacıyla kullanılmamaktadır. Aglomerasyon, granülasyon ve kaplama proseslerinde akışkan yatak geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Kaynaklar

- Avilés-Avilés C, Dumoulin E, Turchiuli C. 2015. Fluidised bed agglomeration of particles with different glass transition temperatures. *Powder Technol*, 270: 445-452. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.026.
- Bhandari BR, Bansal N, Zhang M, Schuck P. 2013. *Handbook of food powders: processes and properties*. Oxford. Woodhead Publishing. ISBN: 9780857095138.
- Burggraeve A, Monteyne T, Vervaeck C, Remon JP, De Beer T. 2013. Process analytical tools for monitoring, understanding, and control of pharmaceutical fluidized bed granulation: a review. *Eur J Pharm Biopharm*, 83(1): 2-15. DOI: 10.1016/j.ejpb.2012.09.008.
- Christensen FN, Bertelsen P. 1997. Qualitative description of the Wurster-based fluid-bed coating process. *Drug Dev Ind Pharm*, 23(5): 451-463. DOI: 10.3109/03639049709148494.
- Cole GC. 1995. Coating pans and coating columns. In: Aulton M, Cole G, Hogan J. (Eds.). *Pharmaceutical Coating*

- Technology. London. Taylor and Francis. pp. 205-239. ISBN: 9780429215063.
- Daud WRW. 2008. Fluidized bed dryers—Recent advances. *Adv Powder Technol*, 19(5): 403-418. DOI: 10.1016/S0921-8831(08)60909-7.
- Desai KGH, Jin Park H. 2005. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Dry Technol*, 23(7): 1361-1394. DOI: 10.1081/DRT-200063478.
- Dewettinck K, Huyghebaert A. 1999. Fluidized bed coating in food technology. *Trends Food Sci Technol*, 10(4-5): 163-168. DOI: 10.1016/S0924-2244(99)00041-2.
- Dezarn TG. 1995. Food ingredients encapsulation: An overview. In: Risch SJ, Reineccius GA. (Eds.). *Encapsulation and controlled release of food ingredients*. ACS symposium series. Washington. DC: American Chemical Society. pp. 590: 74-86. ISBN: 0841231648.
- Dhanalakshmi K, Ghosal S, Bhattacharya S. 2011. Agglomeration of food powder and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 51(5): 432-441. DOI: 10.1080/10408391003646270.
- Frey C. 2014. Fluid bed coating-based microencapsulation. In: Gaonkar AG, Vasisht N, Khare AR, Sobel R. (Eds.). *Microencapsulation in the Food Industry*. Elsevier, Academic Press. pp. 65-79. ISBN: 978-0-12-404568-2.
- Fukumori Y. 1994. Coating of multiparticulates using polymeric dispersions. Formulation and process considerations. *Int J Pharm Sci Drug Res*, 65: 79-111. ISSN: 0360-2583.
- Geankoplis C. 2003. *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. Prentice Hall Press. ISBN: 978-0131013674.
- Geldart D, Rhodes MJ. 1986. From minimum fluidization to pneumatic transport—a critical review of the hydrodynamics. In *Circulating Fluidized Bed Technology*, 21-31. DOI: 10.1016/B978-0-08-031869-1.50008-9.
- Hall HS. 2004. Scaling of fluid bed coating. *Pharm Technol*, 1-5.
- Hede PD, Bach P, Jensen AD. 2008. Top-spray fluid bed coating: Scale-up in terms of relative droplet size and drying force. *Powder Technol*, 184(3): 318-332. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.09.009.
- Hede PD. 2006. *Fluid Bed Particle Processing*. Bookboon, Copenhagen. ISBN: 8776811530.
- Hemati MRKV, Cherif R, Saleh K, Pont V. 2003. Fluidized bed coating and granulation: influence of process-related variables and physicochemical properties on the growth kinetics. *Powder Technol*, 130(1-3): 18-34. DOI: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8.
- Heng PWS, Chan LW, Chan WY 1999. Application of spot colour measurement for the optimisation of colour coating. *STP Pharma Sci*, 9(6): 539-544. ISSN: 11571489.
- Jones D, Godek E. 2016. Development, Optimization, and Scale-up of Process Parameters Wurster Coating. In: Qiu Y, Chen Y, Zhang GGZ, Yu L X, Mantri RV. (Eds.). *Developing Solid Oral Dosage Forms: Pharmaceutical Theory And Practice*. Amsterdam: Academic Press. pp. 807-825. ISBN: 9780128024478.
- Jones DM, Percel PJ. 1994. Coating of multiparticulates using molten materials: Formulation and process considerations. In: Isaac GS. (Ed.). *Multiparticulate Oral Drug Delivery*. New York: Marcel Dekker. pp. 113-142. ISBN: 0824791916.
- Karlsson S, Björn IN, Folestad S, Rasmuson A. 2006. Measurement of the particle movement in the fountain region of a Wurster type bed. *Powder Technol*, 165(1): 22-29. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.03.014.
- Kenningley ST, Knight PC, Marson AD. 1997. An investigation into the effects of binder viscosity on agglomeration behaviour. *Powder Technology*, 91(2): 95-103. DOI: 10.1016/S0032-5910(96)03230-5.
- Kurtuluş O. 2007. Akışkan yatakta kurutma prosesinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Link KC, Schlünder EU. 1997. Fluidized bed spray granulation: Investigation of the coating process on a single sphere. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 36(6): 443-457. DOI: 10.1016/S0255-2701(97)00022-6.
- Mills PJT, Seville JPK, Knight PC, Adams MJ. 2000. The effect of binder viscosity on particle agglomeration in a low shear mixer/agglomerator. *Powder Technology*, 113(1-2): 140-147. DOI: 10.1016/S0032-5910(00)00224-2.
- Onwulata C. 2005. *Encapsulated and Powdered Foods*. Boca Raton. Taylor and Francis. ISBN: 9780429120152.
- Parikh D. 2017. *How to Optimize Fluid Bed Processing Technology: Part of the Expertise in Pharmaceutical Process Technology Series*. Cambridge. MA: Elsevier. Academic Press. ISBN: 9780128047279.
- Pusapati RT, Rao TV. 2014. Fluidized bed processing: A review. *Indian J Res Pharm and Biotechnol*, 2(4): 1360. ISSN: 2321-5674.
- Schaafsma SH, Kossen NW, Mos MT, Blauw L, Hoffmann AC. 1999. Effects and control of humidity and particle mixing in fluid-bed granulation. *AIChE J*, 45(6): 1202-1210. DOI: 10.1002/aic.690450606.
- Smith PG. 2008. *Applications of fluidization to food processing*. Oxford. UK Blackwell Science Ltd ISBN: 0470995416.
- Sonar GS, Rawat SS. 2015. Wurster technology: Process variables involved and Scale up science: A review. *IPPT*, 1 (1): 100-109.
- Teunou E, Poncet D. 2005. Fluid-Bed Coating. In: Onwulata C. (Ed.). *Encapsulated and Powdered Foods*. Boca Raton. Taylor and Francis, 197-215. ISBN: 9780429120152.
- Turchiuli C, Eloualia Z, El Mansouri N, Dumoulin E. 2005. Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technol*, 157(1-3): 168-175. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.05.024.
- Turchiuli C. 2013. Fluidization in food powder production. In: Bhandari B, Bansal N, Zhang M, Schuck P. (Eds.). *Handbook of Food Powders*. Elsevier Science. pp. 178-199. ISBN: 9780857095138.
- Wan LS, Heng PW, Liew CV. 1995. The influence of liquid spray rate and atomizing pressure on the size of spray droplets and spheroids. *Int J Pharm*, 118(2): 213-219. DOI: 10.1016/0378-5173(94)00363-A.
- Werner SR, Jones JR, Paterson AH, Archer RH, Pearce DL. 2007. Air-suspension particle coating in the food industry: Part I—State of the art. *Powder Technology*, 171(1): 25-33. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.08.014.
- Werner SR, Jones JR, Paterson AH, Archer RH, Pearce DL. 2007. Air-suspension coating in the food industry: Part II—micro-level process approach. *Powder Technol*, 171(1): 34-45. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.08.015.