

Disodyum oktaborat kurutulmuş püskürtmeli kurutucunun modellenmesi

Ercan ÖZDEMİR*, Gülhayat NASÜN SAYGILI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Stokiometrik oranlarda borik asit ve borakstan hazırlanan çözeltiden suyun püskürtmeli kurutucuda uzaklaştırılması ile üretilen hidrate disodyum oktaboratın kuruma davranışının belirlenmesi için gerçekleştirilen matematiksel modelleme çalışmalarında en az varsayımın yapıldığı en üst düzey kabul edilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli uygulanmıştır. Modellemede, sürekli faza ait kütle, momentum ve enerji korunum eşitlikleri ile dispers faza ait temel korunum eşitlikleri ve türbülans büyüklüklerini içeren diferansiyel denklem setlerinin çözümü için sonlu hacimler metodu ile çalışan STAR-CD yazılımı kullanılmıştır. Damlacıkların kurutulması esnasında aynı anda iki süreç gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi damlacıklara dışarıdan transfer edilen enerji ile yüzeydeki suyun hava akımı içerisine buharlaştırılması, ikinci süreç ise suyun yüzeyden buharlaşmaya başlaması ile aynı zamanda damlacığın iç kısımlarındaki nemin sıvı veya buhar halinde yüzeye transferidir. Partikül içerisindeki nem taşınımı kararsız hal difüzyon eşitliği ile ifade edilerek, lokal nem içeriği ve sıcaklığa bağlı difüzyon katsayısı hesaplanmış literatürden elde edilen matematiksel eşitliğe uyarlanmıştır. Ayrıca, iki farklı sıcaklıkta ve bağıl nem 0.1 – 0.9 aralığında su buharı desorpsiyon izotermi oluşturularak denge nem oranları hesaplanmıştır. Difüzyon eşitliğine ait katsayılar, damlacık boyut dağılımı, damlacıkların ilk hızları, türbülans model katsayıları, kurutma havası ve besleme çözeltisi özellikleri yazılımın ön işlemcisinde tanımlanarak, kurutucu içerisinde sürekli faza ait hız, yörünge, sıcaklık ve nem değerleri ile dispers fazda, damlacık kuruma hızları ve kurutucuda kalma süreleri belirlenmiştir. Püskürtmeli kurutucunun üç seviyesinde her seviye için altı noktada nem ve sıcaklık değerleri ölçülerek, elde edilen model sonuçları ile deneysel ölçümler karşılaştırılmış, model sonuçları ile deney sonuçlarının birbirine uyum gösterdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Püskürtmeli kurutma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, disodyum oktaborat.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ercan ÖZDEMİR, ozdemirerc@itu.edu.tr, Tel: (212) 285 35 33.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Püskürtmeli kurutucuda disodyum oktaborat üretimi ve modelleme çalışmaları" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.12.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 08.07.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Modelling of disodium octaborate drying in a spray dryer

Extended abstract

Spray drying is one-step continuous unit processing operation for transformation of feed from a liquid form to a dry powder. The feedstock prepared by aqueous solution of borax and boric acid mixtures was atomized into a drying chamber where the resulting spray mixes with hot gas, which evaporates the liquid component of the droplets. The spray dried powders have the appropriate composition of disodium octaborate tetrahydrate.

A computational fluid dynamic study was carried out to investigate airflow pattern, temperature, and humidity profile at different levels in the drying chamber. The effects of operating and boundary conditions on the gas flow pattern, droplet trajectories, and overall dryer performance also were investigated. Results are presented and discussed in terms of the gas velocity, temperature, and humidity profiles within the chambers.

The analysis were performed on spray dryer fitted with rotary atomizer using STAR-CD code by Euler – Lagrange approaches in which the conservation equations of mass, momentum and energy for the gas flow in the dryer are expressed in the Eulerian form and the droplets in the Lagrangian. In the case of turbulent flow, the conservation equations were solved to obtain time – averaged equations. Additional terms in these equations represent the transport of momentum, heat and mass solved by RNG $k - \epsilon$ turbulence model. The droplets temperature, mass and velocity were determined at every location of their trajectories from the local time-averaged solution for the gas.

In order to describe the internal mass transfer, one-dimensional diffusion equation was solved to model the internal distribution and diffusion of water moisture inside the particle which is assumed as spherical shaped. The diffusion coefficient was determined as function of moisture content and temperature. The partial water pressure at the droplet surface is related to the surface moisture content and droplet temperature by desorption isotherms which mathematically represented with three-parameter Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB) equation that represents a kinetic model based on multilayer and condensation.

Atomization from a rotating disc was modeled by putting 100 injection points along the peripheral of the size of the atomizer. The total feed rate was distributed evenly between the injection points. For each injection, the initial droplet size distribution was back calculated from the size of particles collected from the drying experiments. This back-calculation method assumes uniform shrinkage of the droplet and that there is no inhibition to shrinkage due to the sudden reduction in moisture. In actual condition, depending on the operating parameters, a crust may form from the sudden initial removal of moisture, preventing further shrinkage of the droplet. Since such mechanism is difficult to quantify in an actual dryer, the shrinkage model used as a simplifying assumption. The volume of product changes with the moisture content can be calculated from the actual density of the product and actual particle weight.

For carrying out a simulation, first of all the geometry of the dryer was required to be able to make the mesh for the CFD calculations. A calculation grid of the drying chamber was generated with the help of the grid generator. During the calculations the CFD model interacts with the material property database. The gas flow solver calculates the gas conditions, such as temperature, moisture, velocity and degree of turbulence, in each cell of the grid. The particle tracker reads in these data in order to calculate the trajectories and the drying behavior. When the particles pass a cell of the grid the amounts of energy, mass and momentum transferred to the gas are calculated. In the next iteration program uses these transfer terms for a new calculation. The calculation loop is repeated until sufficient convergence is achieved.

Accuracy of the drying models is largely affected by the prediction of the airflow within patterns in the drying chamber. The coupling effects from the transfer of mass and energy through the droplet-air interface which will further affect the properties of the air. A simple case study was used to illustrate the ability of CFD in performing optimization analysis. The model was validated by experimental tests on a pilot scale dryer on the base of temperature and water vapor concentration field measurements. The results showed that, this model is potentially usable for spray dryer chamber design for optimization, deposit prevention and scale up.

Keywords: *Spray drying, computational fluid dynamics, disodium octaborate.*

Giriş

Püskürtmeli kurutma, tüm kurutma operasyonları içinde modellenmesi en zor olan kurutma operasyonu olarak kabul edilmektedir. Bunun temel nedenleri şu şekilde açıklanmaktadır; (i) Damlacıkların kuruması, damlacık Reynolds sayısına bağlı olduğundan, kurutucu çapı ile doğru orantılı olarak ölçek büyütülememesi. Bu nedenle kurutucu testlerinde pilot ölçek ile tam ölçek arasında dinamik benzerlik kurulamaması, (ii) Kurutma havası akışının üç boyutlu, yüksek giraplı, kompleks olması ve damlacık yörüngelerinin genellikle kurutma havası yörüngesinden farklı olması, (iii) Kurutucu içerisinde oluşan katı partiküllerin ürün morfolojisinin, özelliklerinin ve kuruma kinetiğinin kurutucu içerisinde maruz kaldığı lokal sıcaklıktan etkilenmesi, (iv) Özellikle küçük damlacıklar için kuruma kinetiğini tespit etmenin oldukça güç olması. Bu faktörlerden (i), güvenilir bir biçimde ölçek büyütme olanak tanımazken, faktör (ii) ve (iii) püskürtmeli kurutucunun doğru bir şekilde modellenmesi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümüne ihtiyaç duyulduğunu, faktör (iv) ise HAD veya diğer modellerde gerekli olan kuruma kinetiği parametrelerinin oldukça zor elde edildiğini göstermektedir (Kemp ve Oakley, 2002).

Son yıllarda değişik damlacık kuruma modelleri temel alınarak yapılan HAD modelleme çalışmaları ile, püskürtmeli kurutma şartlarının elde edilen ürünün kimyasal yapısı ve fiziksel özelliklerine etkilerinin belirlenmesine ve endüstriyel ölçekli kurutucu tasarımına olanak sağlanmıştır. HAD yazılımlarına adaptasyonu sağlanan bu kuruma modelleri deneysel ve kuramsal olarak ikiye ayrılmaktadır.

Kuramsal yaklaşımın başında difüzyon modeli gelmektedir. Difüzyon modeli damlacık içerisindeki fiziksel değişimlerin de göz önüne alınarak kurutma havası ile damlacık arasındaki taşınım olaylarının hesaplandığı en gerçekçi modeldir. Difüzyon modelinin HAD yazılımlarına adapte edildiği ve özellikle gıda ürünlerinin kurutulması üzerine pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Straatsma vd., 1999; Adhikari vd., 2003; Verdumen vd., 2004; Lo, 2005). Bu mo-

delde fiziksel özellikler için içine katıldığı için model sonuçlarının daha gerçekçi olması sağlanmaktadır. Ancak, hesaplama yapılan hacimdeki her bir hücre içinde yer alan damlacıklar için nümerik çözüm gerçekleştirildiğinden oldukça uzun hesaplama süresine gereksinim duyulmaktadır.

Diğer bir kuruma modeli ise toplu parametre (lumped) modelleridir. Hesaplama zamanının difüzyon modeline göre oldukça kısa olduğu bu modellerde damlacıkların fiziksel özellikleri yerine, geliştirilen yarı gözlemsel eşitliklerle damlacık yüzeyi ile gaz faz arasındaki ara yüzeyde ısı ve kütle transferi hesaplanır. Yapılan araştırmalar bu modelin hassasiyetinin kabul edilebilir bir düzeyde olduğunu göstermektedir (Harvie vd., 2002; Woo vd., 2008).

Bu çalışmanın temel amacı disodyum oktaborat damlacıklarının kuruma karakteristiğinin belirlenmesi, püskürtmeli kurutucuda deneysel olarak ölçülen sıcaklık, nem ve hız dağılımlarının simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak model geçerliliğinin belirlenmesidir.

Matematiksel model

Kurutucu geometrisinin hesaplamalar için hücrelere ayrılması, proses şartları, başlangıç damlacık özelliklerinin belirlenmesi ve hesaplama sırasında çözücünün yararlanacağı ürün özelliklerine ait veri tabanının yazılımın ön işlemcisine tanıtılması gerekmektedir. Simülasyon için giriş parametreleri; kurutucu geometrisi (kurutucu komponentlerinin boyutları, kurutma havasının giriş ve çıkış alanları), dispers fazın başlangıç şartları (damlacık boyut dağılımı, atomizerin yeri ve damlacıkların ilk hızları), işletme şartları (çözelti besleme debisi, katı içeriği, kompozisyonu ve sıcaklığı ile kurutma hava debisi, nemi ve sıcaklığı) ve proses değişkenlerinin fonksiyonu olarak tanımlanan ürün özellikleridir (kuru ürünün yoğunluğu, difüzyon katsayısı).

STAR - CD ön işlemcisine parametrelerin tanımlanmasından sonra sayısal çözüm aşamasına geçilir. Hesaplamaya ait algoritma, maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir;

1. Üç boyutlu hücreler, incelenmesi planlanan kurutucu geometrisine uyumlu bir şekilde oluşturulur.
2. Kurutucu içindeki gaz akış alanı, kütle ve momentum korunum eşitliklerinin çözümü ile hesaplanır. Bununla beraber üç boyutlu olarak oluşturulan her bir hücre içerisinde enerji ve türbülans büyüklükleri hesaplanır.
3. Hesaplanan akış alanı içindeki damlacık/partikül yörüngeleri, sürüklenme, yer çekimi ve etki eden diğer kuvvetleri içeren hareket eşitliklerinin çözümü ile hesaplanır.
4. 3. basamağa paralel olarak, damlacıktan ısı ve kütle transfer katsayıları denge nem oranı, difüzyon katsayısı ile kuruma modeli kullanılarak kuruma hızı hesaplanır.
5. Damlacık veya partikül ile sürekli fazın etkileşimi, sürekli fazın hız, sıcaklık ve nem değerlerine etki eder. Bu etkileşim kaynak terim olarak eklenmek üzere gaz eşitliklerinde geri gönderilerek 2, 3, 4 ve 5 numaralı basamaklar istenen yakınsama sağlanana kadar tekrar edilir.

Sayısal çözümde Caretto ve diğerleri (1972) tarafından geliştirilen SIMPLE (Semi IMPLICIT Pressure Linked Equation) algoritması kullanılmıştır. Denklem setleri TDMA (Tri-Diagonal-Matrix-Algorithm) yaklaşımı ile çözülmektedir. Yakınsama sağlandıktan sonra, yazılımın son işlemcisinden, kurutucu içinde oluşturulan her bir hesaplama hacminde sürekli fazın hız bileşenleri, sıcaklık ve nem değerleri ile dispers faza ait; damlacık yörüngeleri, hız bileşenleri, damlacık çapı ve sıcaklık değerleri alınmaktadır.

Sürekli faz için temel korunum eşitlikleri

Püskürtmeli kurutucu içerisinde akış, gaz veya akışkan olan sürekli bir faza ve damlacıkların yer aldığı dispers faza sahiptir. Genel olarak yer değiştirme ve fazlar arası momentum, kütle ve ısı aktarımının etkisi ile dispers fazın hareketi sürekli fazdan, sürekli fazın hareketi ise dispers fazdan etkilenir. İki yönlü etkileşimin kuvvetliliği partiküllerin boyutu ve yoğunluğuna bağlıdır. Dispers faz uçuşu olduğundan fazlar arasında kütle transferi gerçekleşir. Fazlar arası sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen ısı transferi ile beraber yürüyen kütle transferi, dispers faz elemanları üzerinde boyut değişimine sebep olur. Sıkıştırılabilir akışkanlar için kütle ve momen-

tum korunum eşitliklerinin kartezyen tensör formundaki ifadeleri Eşitlik 1’de verilmiştir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) &= s_m \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \end{aligned} \quad (1)$$

Türbülans akışkan hareketinde, akışı oluşturan büyüklüklerin zaman ve konuma göre düzensiz değişimler göstermesi nedeniyle, türbülanslı akışkanların çözümlenmesinde istatistiksel ortalama büyüklükler gözönünde bulundurulur. Literatürde püskürtmeli kurutucu içindeki akışın incelenmesinde standart k-ε modelinin, dönen disk tipi atomizere sahip sistemler için ise RNG varyasyonunun en iyi uyum gösteren model olduğu belirtilmektedir (Huang vd., 2005).

RNG k – ε türbülans modeli

Girdaplı akışlar için Yakhot ve Orszag (1986) tarafından önerilmiş ve geliştirilmiştir (Yakhot vd., 1992). İki denklemlilik bir model olup esas itibarıyla Navier-Stokes denklemlerinden “renormalizasyon grup teorisi” kullanılarak elde edilmiştir. Bu modelde türbülans kinetik enerjisi (k) ve viskoz kaybolma terimi (ε) için yazılan taşınım denklemleri sırasıyla Eşitlik 2 ve 3’te verilmiştir;

Türbülans kinetik enerjisi, (k):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \\ \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

Viskoz kaybolma terimi, (ε):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \\ c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \\ c_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B + c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + c_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \\ \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

Bu modelde kullanılan katsayılara ait deneysel değerler Tablo 1’de gösterilmiştir (Yakhot vd., 1992).

Dispers faz için momentum eşitliği

Kütlesi m_d olan bir damlacık (veya partikül) için momentum denklemi partiküle etki eden kuvvetlerin toplamı ile ifade edilir. Bir gaz ya da sıvının içinde hareket eden bir cismin karşılaşıcağı sürtünme kuvveti olarak tanımlanan ‘sürüklenme’ (drag) kuvveti ve yerçekimi kuvveti dik-kate alınarak elde edilen momentum denklemi Eşitlik 4’te verilmiştir.

$$\frac{du_{d,i}}{dt} = \frac{3\mu Re_d}{4\rho_d D_d} C_D (u_i - u_{d,i}) + g_i + f_{xi} \quad (4)$$

Kuruma modeli

Damlacıkların kuruması esnasında, dışarıdan transfer edilen ısı ile yüzeydeki suyun hava akımı içinde buharlaştırılması ve suyun yüzeyden buharlaşmaya başlaması ile aynı zamanda iç kısımlarındaki nemin yüzeye hareketi önemli rol oynamaktadır. Transfer edilen ısı veya kütle (φ) için genel taşınım denklemi Eşitlik 5’te verilmiştir:

$$\varphi = k \times A \times \Delta X \quad (5)$$

Burada k , transfer katsayısını, A , temas alanı, ΔX , sürücü kuvveti göstermektedir. Yüzeyinden gaz akışı gerçekleşen küresel damlacıklar için transfer katsayıları Ranz – Marshall (1952) korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Isı ve kütle aktarımına ait Ranz – Marshall korelasyon eşitlikleri Eşitlik 6 ve 7’de verilmiştir.

$$Nu = \frac{hD_d}{k} = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$Sh = \frac{\gamma D_d}{D_{AB}} = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (7)$$

Burada Nu , Re , Pr , Sh , Sc sırasıyla boyutsuz olan Nusselt, Reynolds, Prandtl, Sherwood sayılarıdır. Isı transferinde sürücü kuvvet damlacık yüzeyi ile hava akımı arasındaki sıcaklık farkı iken kütle transferi için sürücü kuvvet Eşitlik 8’de görüldüğü şekilde ifade edilir.

$$\Delta X = c_a^* - c_a \quad (8)$$

Burada c_a^* damlacık yüzeyi ile dengede olan havadaki nem konsantrasyonunu, c_a ise damlacıktan uzaklaşan nem konsantrasyonunu göstermektedir. Denge nem konsantrasyonu c_a^* , karakteristik kuruma eğrileri, sorpsiyon kinetiği, geçirgenlik metotları veya konsantrasyon uzaklık eğrileri kullanılarak da bulunabilir (Morinos-Kouris ve Maroulis, 2006).

Damlacık içinde kondüksiyon ile ısı transferi kütle transferine göre oldukça çabuk gerçekleşir. Özellikle küçük çaplı damlacıklar içinde sıcaklığın sabit olduğu kabul edilirse, damlacık içinde nem hareketi kuruma hızını belirleyen faktör olur. Nem difüzyonunun tek yönlü olduğu ve nem taşınımının difüzyondan başka yolla olmadığını kabul edilirse, küresel cisimler için nem konsantrasyonu değişimi Eşitlik 9’daki gibi gösterilebilir.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (9)$$

Burada r , radyal koordinat, c , nem konsantrasyonu (kg/m^3) ve D , difüzyon katsayısını (m^2/s) göstermektedir.

Tablo 1. RNG k - ε türbülans modeli katsayıları

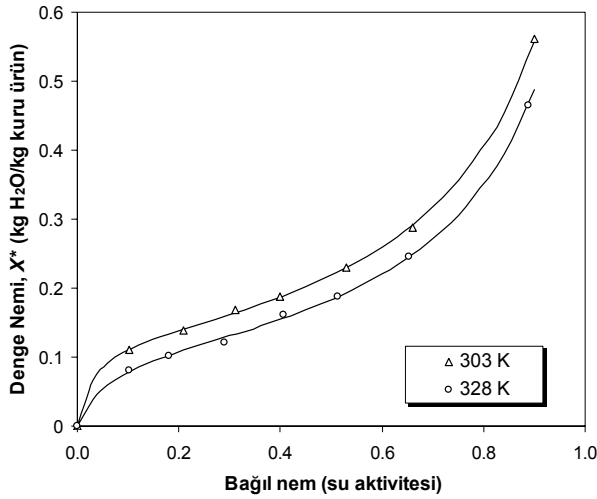
c_μ	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_m	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	$c_{\varepsilon 4}$	κ	E	μ_0	β
0.085	0.719	0.719	0.9	0.9	1.42	1.68	1.44	-0.39	0.4	9.0	4.38	0.012

Denge nem konsantrasyonu

Denge nem oranlarının bulunması için otomatik sorpsiyon cihazında gerçekleştirilen su buharı desorpsiyon deneylerinde, statik gravimetrik metotla bağıl nem 0.1 – 0.9 aralığında, 303 ve 328 K’ de çalışılmıştır.

Yaklaşık 100 mg numune cihaza yüklendikten sonra, numuneyi içeren reaktör, ölçümlerin yapılacağı sıcaklığa ısıtılmıştır. Degassing amacıyla reaktör vakuma alınmış ve numune sabit tartıma gelene kadar beklenmiştir. Sabit tartıma ulaşıncaya, ölçüm alınacak noktaları içeren program hazırlanıp cihaz çalışmaya bırakılmış, denge sağlanana kadar ağırlık kayıpları zamana karşı not edilmiştir. İstenen bağıl nem noktalarında ölçümler tamamlanınca deneylere son verilmiştir. Belirtilen bağıl nem aralığı için elde edilen sonuçlar Şekil 1’de sunulmuştur.

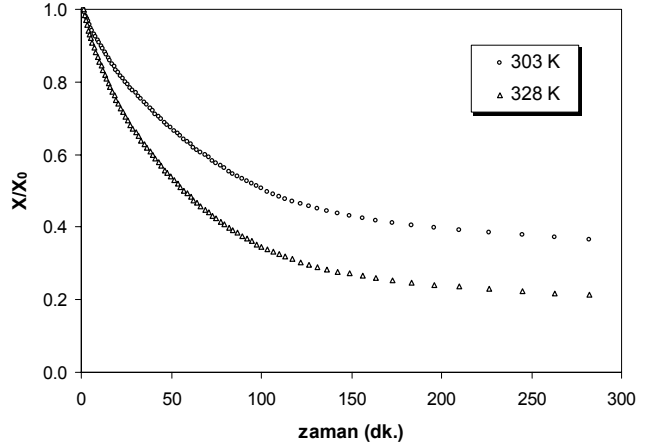
DeneySEL veriler ile farklı izoterm eşitlikleri istatistiksel açıdan değerlendirilerek, en yüksek belirlilik katsayısı ve en düşük hata yüzdesine sahip Gaggenheim – Anderson – de Boer (GAB) eşitliğinin denge nem oranının matematiksel ifadesi için en uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Desorpsiyon izotermeleri

Difüzyon katsayısı

Bir önceki bölümde desorpsiyon çalışmalarında elde edilen zamana karşı ağırlık kaybı verileri (Şekil 2) kullanılarak, difüzyon katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 2. Boyutsuz nem konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi

Difüzyon katsayısının hesaplanmasında;

1. Damlacığı çevreleyen gaz faza ait yüzey direncinin ihmal edilecek düzeyde olduğu
2. Dış yüzey konsantrasyonunun zamanla değişmediği
3. Damlacığın başlangıçta homojen konsantrasyona sahip olduğu
4. Damlacıkta nem transferinin difüzyonla gerçekleştiği ve bunun sabit difüzyon katsayısı ile ifade edilebileceği
5. Damlacığın küresel geometriye sahip olduğu ve çapının zamanla değişmediği ($R_d = sbt$)
6. Damlacığın dış yüzeyindeki nemi denge neminde olacağı, yer çekimi kuvvetinin damlacık üzerine etkisinin olmadığı
7. Doğal konveksiyon ve radyasyonun etkisinin ihmal edilebileceği

kabulleri doğrultusunda gerçekleştirilen analitik çözümün konsantrasyonlar cinsinden sol hali Eşitlik 10’da verilmiştir (Crank, 1975);

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = 1 + \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{R_d} \times \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D t}{R_d^2} \right] \quad (10)$$

Lokal nem içeriğine kuvvetli şekilde bağlı olan difüzyon katsayısı lokal nem (X) ve sıcaklığın (T) fonksiyonu olarak Eşitlik 11’ de gösterilmiştir (Straastma vd., 1999).

$$\ln(D_{T,X}) = \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) \frac{\ln(D_{T_2,X}) - \ln(D_{T_1,X})}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (11)$$

$$+ \ln(D_{T_1,X})$$

Burada a_1 , b_1 , c_1 , a_2 ve b_2 model sabitlerini göstermektedir. Model sabitleri a_1, b_1 ve c_1 iki sıcaklık için bilindiğinde, difüzyon katsayısının nem ve sıcaklığa bağlı olarak ifadesi Eşitlik 11 halini almaktadır. Hesaplanan difüzyon katsayıları ve model sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.

HAD simülasyonu

Geometrinin oluşturulmasını problemin etki hacminin belirlenmesi ve bu hacimde hesaplama ağının oluşturulması takip eder. Bilindiği gibi, hesaplama hacmi içindeki hücre yoğunluğu ne kadar fazla olursa genel olarak akışkan dinamiği çözümünün hassasiyeti artar. Ancak bunun geçerli olmadığı durumlar da olabilir Hücre yoğunluğunun artması hesaplamanın toplam süresini de oldukça artırır ve hatta hesaplamayı, eldeki bilgisayar sisteminin özellikleri dahilinde imkansız hale getirebilir (Huang vd., 2004).

Bu çalışmada kullanılan pilot ölçek püskürtmeli kurutucunun geometrisi Star-Design ön işlemci yazılımı ile oluşturulmuştur. Bu yazılım ile kurutucu içerisinde hesaplama yapılacak bölge için

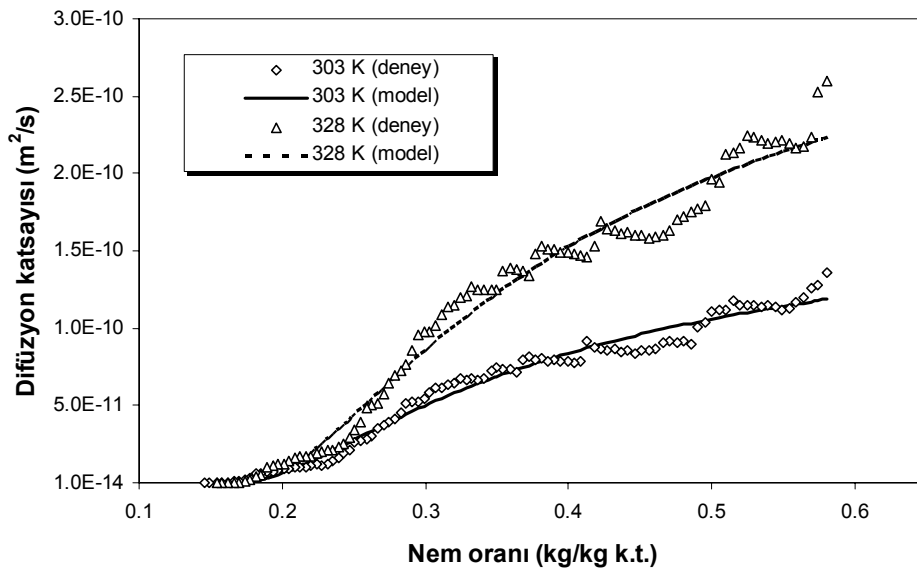
ağ üretici yardımıyla Şekil 4'te gösterilen hücreler oluşturulmuştur.

Ağ üreticinde, kurutma havası girişi, atomizasyon ve çıkış bölgesindeki hücreler daha sık tutulmuş, hesaplama zamanının makul seviyede olması için kurutucu gövdesi göreceli olarak daha büyük hücrelere ayrılmıştır. Hacmi 0.427 m^3 olarak hesaplanan pilot ölçek kurutucuda akış alanı, genişliği en büyük 0.02 m , en küçük 0.0025 m olan toplam 311588 hücreye ayrılmıştır.

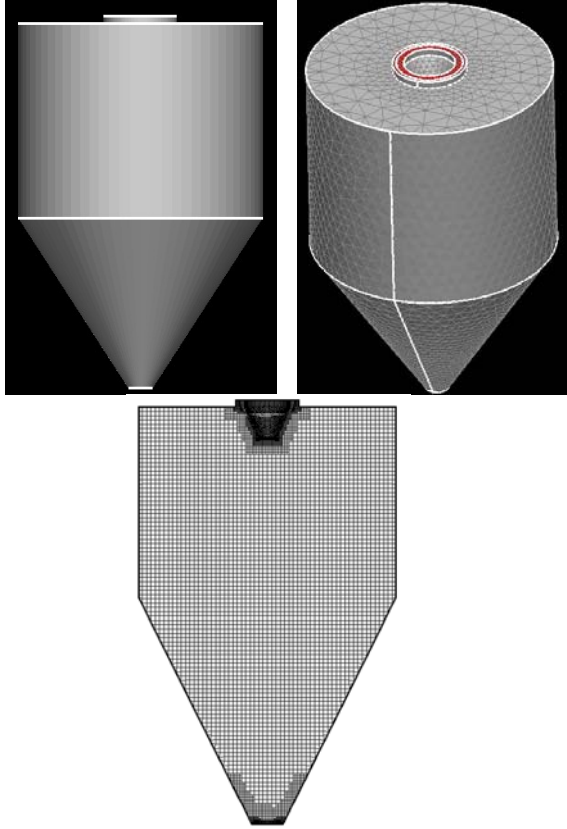
Sıvı atomizasyonu ve boyut dağılımı

Partikül boyutu ve dağılımı damlacıkların boyut ve dağılımıyla direkt ilgili olduğundan bütün damlacıkların dağılımını karakterize eden ortalama damlacık boyutunun belirlenmesi gerekmektedir. Disk tipi atomizerlerde ortalama damlacık boyutu geniş bir aralıkta ve homojen damlacıklar şeklinde üretilir. Boyut dağılımı disk dönme hızının değiştirilmesi ile ayarlanır. Besleme debisindeki değişimlerin damlacık boyutuna etkisi çok daha azdır. Ortalama partikül boyutu deneysel olarak elde edilen ortalama partikül çaplarından geri hesaplama yapılarak hesaplanmaktadır (Woo vd., 2008).

Damlacık boyut dağılımı, dönen disk tipi atomizasyonu en iyi tanımlayan log-normal dağılım fonksiyonu kullanılarak ifade edilmiştir:



Şekil 3. Difüzyon katsayısının nem oranına bağlı değişimi



Şekil 4. Paralel akışlı pilot ölçek püskürtmeli kurutucunun üç boyutlu geometrisi ve hücrelerin oluşturulması

$$m(x) = \frac{1}{xs_g \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \ln(x_m))^2}{2s_g^2}\right) \quad (12)$$

Burada x_m , ortalama değeri s_g ise geometrik standart sapmayı göstermektedir. Dağılım fonksiyonu $M(x)$, Eşitlik 13'te verilmiştir.

$$M(x) = \int_0^x m(x) \cdot dx \quad (13)$$

Nem oranına bağlı damlacık boyutundaki değişim damlacığın gerçek yoğunluğu ve ağırlığı kullanılarak hesaplanabilir. Damlacık yoğunluk değişimi, Eşitlik 14'te gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\rho_d} = \frac{m_p}{\rho_w} + \frac{1 - m_p}{\rho_{ds}} \quad (14)$$

Burada m_p , toplam kütle temel alınarak hesaplanan nem oranını, ρ_d , damlacık yoğunluğunu, ρ_w

su yoğunluğunu ve ρ_{ds} helyum piknometresi ile ölçülen kuru ürünün gerçek yoğunluğunu göstermektedir. Partikülün hacmi bilindiği takdirde partikülün çapını hesaplamak mümkün olmaktadır. Sıcaklığın yoğunluk üzerine küçük bir etkisi olduğu göze alınarak yapılan hesaplamalarda 298 K'de hesaplanan partikül yoğunluğunun (ρ_{ds}) tüm sıcaklıklar için geçerli olduğu varsayılmış ve kullanılmıştır.

Sınır şartları

Sayısal çözüm için ön işlemci yazılımına girilen sınır şartları ve proses parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

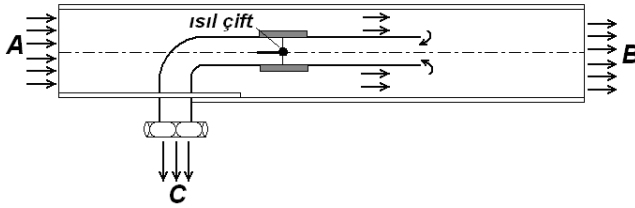
Tablo 2. Sınır şartları ve proses parametreleri

Parametre	Değer
Giriş	
Kurutma hava sıcaklığı, T_g (K)	483
Kütleli akış hızı, F_h (kg.saat ⁻¹)	80
Mutlak nem (g H ₂ O/kg kuru hava)	10
Çıkış:	
Vakum basıncı (Pa)	-100
Türbülans Modeli: RNG k-ε	
Türbülans şiddeti, I (%)	10
Karışım uzunluğu, l (m)	0.01
Atomizasyon ve besleme:	
Atomizer basıncı, P_{AT} (kg.cm ⁻²)	1
Ortalama damlacık boyutu, D_m (µm)	50
Log - normal geometrik std. sapma, s_g	0.6
Çözelti besleme debisi, F_B (kg.saat ⁻¹)	2.8
Besleme sıcaklığı (K)	323
Katı içeriği (%)	30
Damlacık yoğunluğu, ρ_d (kg.m ⁻³)	1120.2
Gerçek yoğunluk, ρ_{ds} (kg.m ⁻³)	1412.4
Sayısal çözüm	
Minimum hücre genişliği (m)	0.0025
Maksimum hücre genişliği (m)	0.02
Toplam hücre sayısı	(5.40) 311.588
Tolerans değeri	0.001
Difüzyon katsayısı	
(D_{303K})	-21.67
a_1	0.672
b_1	0.049
c_1	
(D_{328K})	
a_1	-22.34
b_1	0.240
c_1	0.004
GAB izoterm katsayıları (5.41)	
W_o	0.1120
c_g	18.668
K	0.8595

Deneysel ölçümler

Damlacık kurutulmuş operasyonlarda kuru termometre sıcaklığının doğru bir biçimde ölçülmesinin zorluklar içerdiği bilinmektedir.

Kieviet ve diğerleri (1997), önerdikleri düzenele damlacık içeren gaz akımının keskin bir açı ile yön değiştirilmesi sonucu damlacıklardan arındırılabilceğini belirtmişlerdir. Mikro-seperatör adı verilen bu düzenele yaygın bir kullanım alanı bulmuş ve diğer araştırmacılar tarafından değişik tipleri geliştirilerek püskürtmeli kurutucuda nem ve sıcaklık ölçümlerinde yararlanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan düzenele Şekil 5’te görülmektedir. Damlacık içeren akım (A) çapı 0.025 m olan dış borudan geçirilmiş, çapı 0.005 m olan içteki borudan vakum uygulanarak damlacıklardan arınmış temiz akım (C) üzerinde yaş ve kuru termometre sıcaklıkları K-tipi ısı çiftleri kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5. Kuru ve yaş termometre sıcaklıklarını ölçmek için hazırlanan düzenele

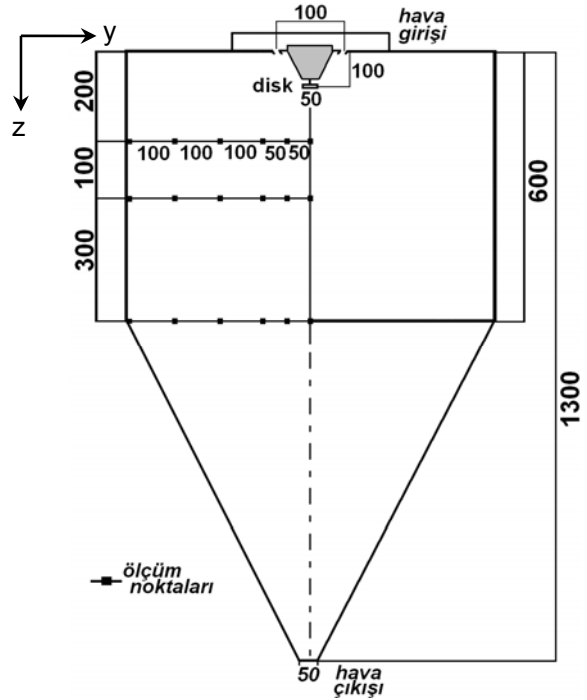
Kurutucu içerisinde sıcaklık ve nem ölçümlerinin yapıldığı noktalar Şekil 6’da gösterilmiştir.

Simülasyon sonuçları

Kurutucu içinde sürekli faz hız dağılımı

Hava akış hızı ve kurutma odasının tasarımı damlacığın püskürtmeli kurutucuda kalış süresini kontrol eder. Bu sayede damlacıktan su uzaklaştırıldıktan sonra ürünün sıcaklığı kurutucudaki hava çıkış sıcaklığına ulaşmadan, ürünün püskürtmeli kurutucudan ayrılması gerçekleştirilir. Atomizerden serpinti şeklinde çıkan damlacıkların her biri farklı kuruma karakteristiği gösterir. Kuruyan damlacıkların özellikleri ve morfolojisi kuruma hızıyla yakından ilgilidir. Boyutları ve proses parametreleri Tablo 2’de özetlenen şartlar doğrultusunda HAD simülasyonu sonucu elde edilen kurutma odası içinde

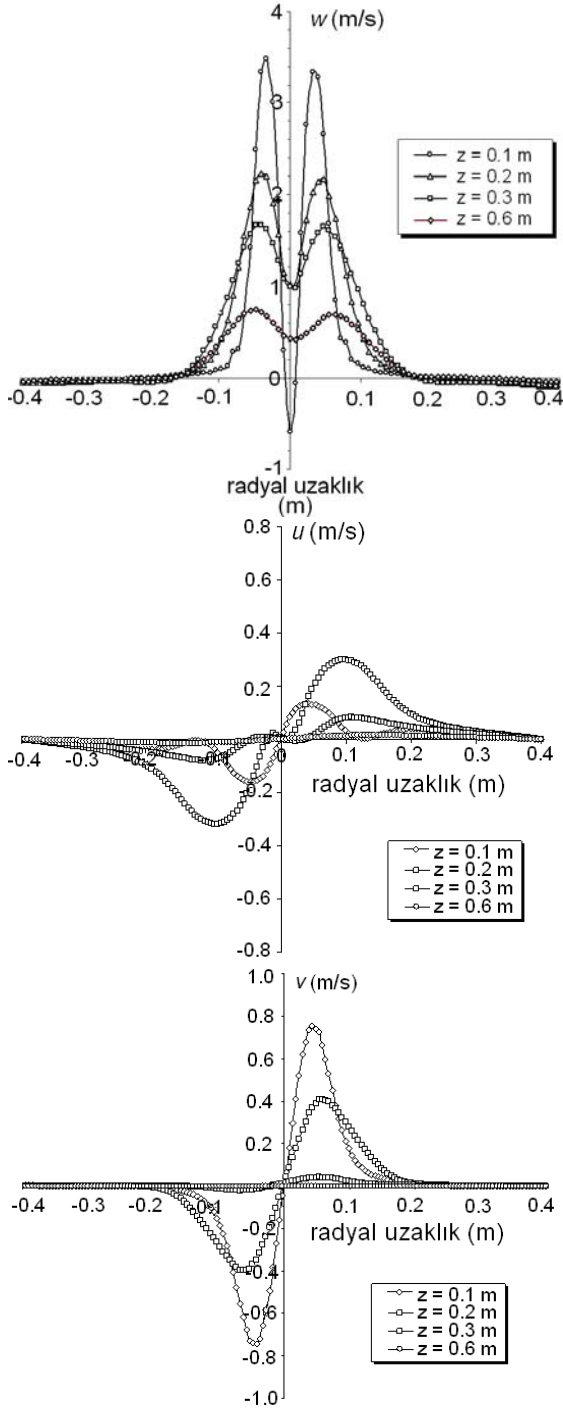
kurutma havasının aksel hız dağılımları Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 6. Kurutucunun boyutları ve ölçüm noktaları (ölçüler mm cinsindedir)

Akışı tanımlayan diferansiyel denklemlerin çözülmesi ile elde edilen sürekli faza ait üç boyutlu hız bileşenleri (u , v , w) profillerinden görüldüğü gibi, atomizere dik yöndeki küçük bir kesitten kurutucuya giren kurutma havasının en yüksek hız değeri kurutucuya girdiği ilk noktadadır ($z = 0$). Kurutucuda aksel yönde ilerledikçe ($z \rightarrow 1.3$ m), aksel hız, kesit alanının artması ile hava çıkış noktasına kadar azalmaya devam etmekte, çıkış noktasında tekrar daralan kesit alanı nedeniyle kurutucuyu yüksek hızlarda terk etmektedir.

Kurutma havasının atomizasyon bölgesinde x ve y yönünde parabolik hız dağılımı (u , v) gösterdiği Şekil 7’den görülmektedir. Aksel yönde aşağı doğru gidildikçe bu parabolik davranış kaybolmakta ve özellikle konik bölgede çok daha homojen bir akış profili vermektedir. Elde edilen hız bileşenleri karşılaştırıldığında, aksel yöndeki hızın (w), diğer yönlerde göre oldukça yüksek olduğu, damlacıkların kurutucu içerisinde kalma sürelerinde aksel yöndeki hızın etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Sürekli faz hız bileşenleri

Şekilde gösterilen aksel hız profilleri incelendiğinde, atomizerin hemen alt noktasına denk gelen ' $z = 0.1$ m' de, kuvvetli bir ters akım gözlenmektedir. Atomizerin hızla dönmesinden kaynaklanan ve daha önce Kieviç (1997), Langrish ve Kochel (2001) ve Huang ve diğerleri (2004) tarafından da gözlemlenen bu ters akım 'pompa etkisi' olarak ifade edilmektedir.

Kurutucu içinde sıcaklık ve nem dağılımı

Paralel akışlı bir püskürtmeli kurutucuda sıcaklık dağılımı hava dağıtıcısına bağlıdır. Hava dağıtıcısı basitçe boru tipi (plug) bir akış sağladığı gibi oldukça girdaplı bir akış da sağlayabilir.

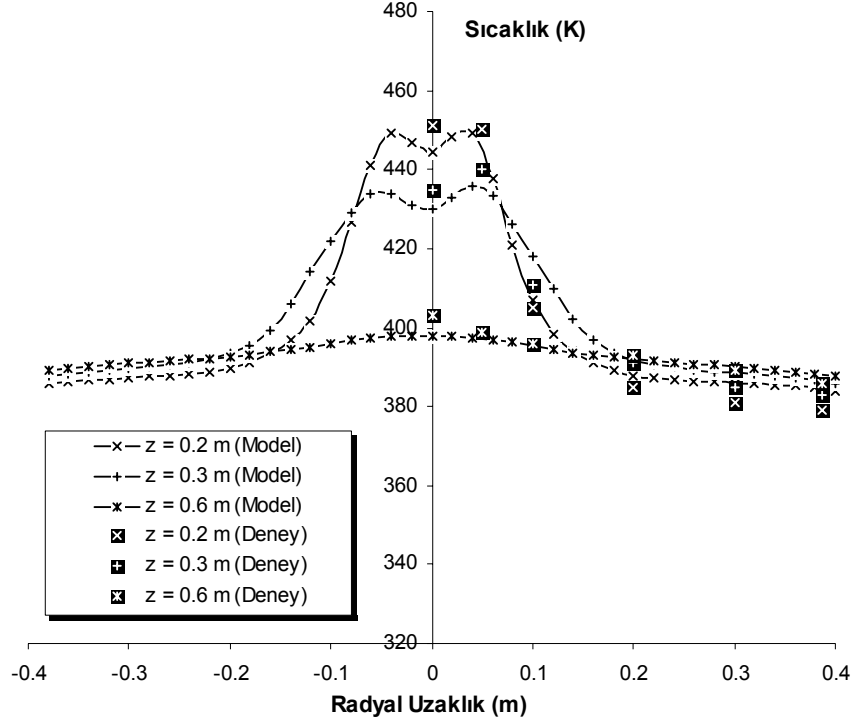
Türbülans derecesinin yüksek olması odacık içerisinde üniform bir sıcaklık dağılımına neden olmaktadır. HAD simülasyonu sonucu elde edilen kurutucu içindeki sıcaklık dağılımı Şekil 8'de verilmiştir.

Modelleme çalışmalarından ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık profillerinin karşılaştırılmasından da görüldüğü gibi, en büyük sıcaklık değişimi dönen diskin hemen yanında, en düşük sıcaklık ise kurutucu duvarlarına yakın bölgelerde gözlemlenmektedir. Bu durum ısı ve kütle transferinin büyük oranda ilk temas noktasında gerçekleştiğini, damlacıkların kurummasının da en fazla bu bölgede gerçekleştiğini göstermektedir.

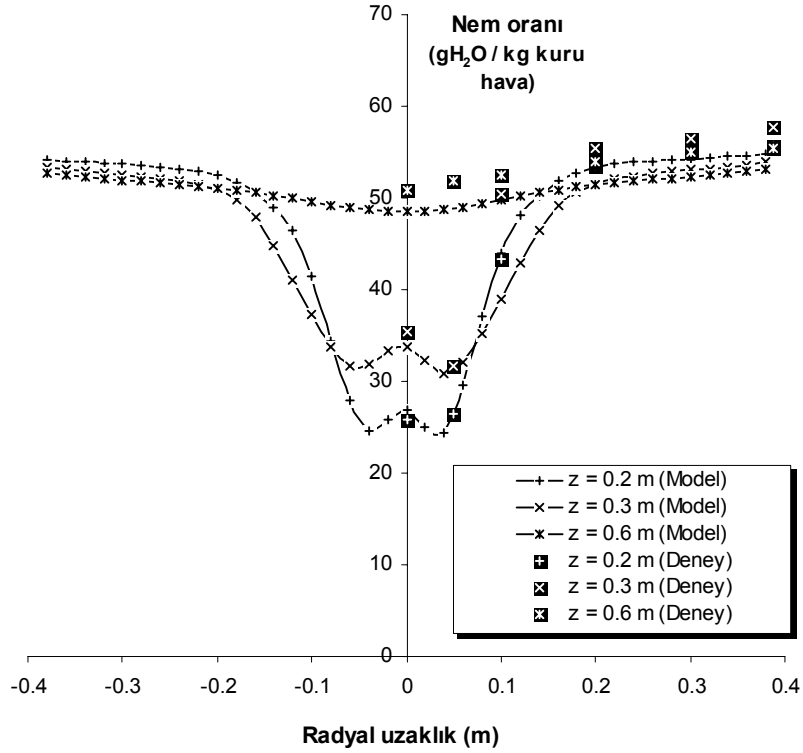
Kurutucu içinde ölçülen ve simülasyon sonucu hesaplanan nem değerlerinden yola çıkarak elde edilen nem profillerinin karşılaştırılması Şekil 9'da gösterilmiştir. Nem değerleri, mikroseparatör düzeneği ile kurutucu içerisinde ölçülen yaş ve kuru termometre sıcaklık değerleri kullanılarak psikometrik diyagramdan okunmuştur. Beklendiği gibi sıcaklık profillerine ters bir sonuç göstermektedir.

Kurutma havasının içerdiği nem değerleri, merkezde düşük değerler gösterirken, radyal yönde ilerledikçe artmakta, merkezden itibaren 10 cm den sonra yaklaşık sabit bir profil göstermektedir.

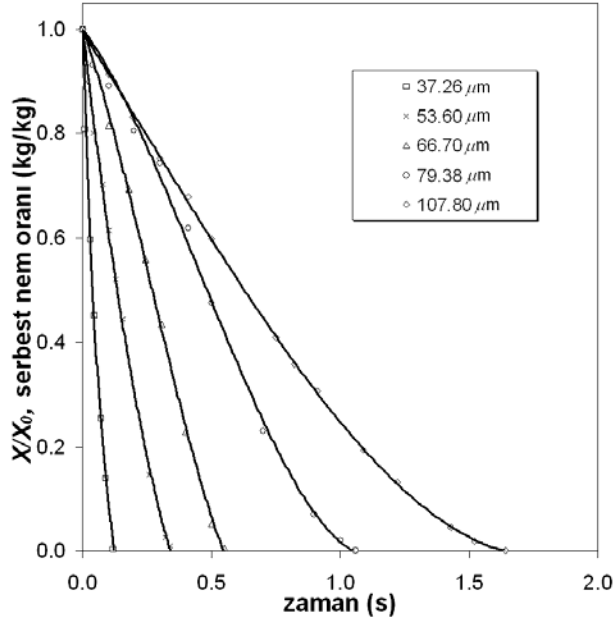
Akış alanında izlenen damlacıkların etkilendikleri lokal sıcaklıkların farklı olması, her damlacık için kuruma hızının farklı olması anlamına gelmektedir. Log-normal dağılım fonksiyonu ile ifade edilen damlacıkların zamana bağlı serbest nem değişimleri Şekil 10'da verilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak kuruma hızı hesaplanabilmektedir. Damlacık kuruma zamanlarının gösterildiği Şekil 10'dan, damlacık çapı ile kuruma zamanının ters orantılı olduğu görülmektedir. Kurutma hava sıcaklığı 483 K, çözelti debisinin



Şekil 8. Ölçülen ve modellenen sıcaklık profillerinin karşılaştırılması ($F_h=80 \text{ kg.saat}^{-1}$, $T_g=483 \text{ K}$, $F_b=2.8 \text{ kg.saat}^{-1}$)



Şekil 9. Ölçülen ve modellenen nem profillerinin karşılaştırılması ($F_h=80 \text{ kg.saat}^{-1}$, $T_g=483 \text{ K}$, $F_b=2.8 \text{ kg.saat}^{-1}$)



Şekil 10. Damlacık kuruma süreleri

2.8 kg/saat olduğu denemede, ortalama çapı 37 μm ile temsil edilen damlacıklardan serbest nemin tamamen uzaklaşması için 0.15 saniye yeterliyken, aynı şartlarda ortalama çapı 107 μm damlacıkların kurumasının 1.64 saniyede gerçekleştiği görülmektedir.

Sonuçlar

Deneyssel olarak ölçülen sıcaklık ve nem dağılımlarının kurutucu içinde belirlenen 3 seviyede 6 nokta için deneyssel sonuçlar ile karşılaştırılmış, bulunan sonuçlar ile deney sonuçlarının iyi örtüşüyor olması modelin geçerliliğini göstermiştir. Gaz akışı ve damlacık – partikül hareketleri teorik olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile hesaplanan bu model yeni kurutucu tasarımı veya mevcut kurutucuların modifikasyonlarında pilot ölçek deneylere gerek duyulmadan kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Semboller

A	: Yüzey alanı (m^2)
A_d	: Damlacık yüzey alanı (m^2)
a_w	: Su aktivitesi
c_a	: Damlacıktan uzaklaşan nem
c_a^*	: Denge nem konsantrasyonu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
c_g	: GAB sabiti
c_p	: Özgül ısı kapasitesi ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

c_{ei}	: k -e türbülans model sabitleri
D_{AB}	: Moleküler difüzyon katsayısı ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
D_{GM}	: Geometrik ortalama partikül çapı (μm)
D_m	: Buhar difüzyon katsayısı ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
D_m	: Ortalama damlacık boyutu (μm)
$D_{T,X}$: Sıcaklık ve nem oranına bağlı difüzyon
F_B	: Kütleli çözelti besleme debisi
F_h	: Kütleli hava debisi ($\text{kg} \cdot \text{saat}^{-1}$)
g	: Yerçekimi ivmesi ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
h	: Isı transfer katsayısı ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
I	: Türbülans şiddeti (%)
k	: Türbülans kinetik enerjisi ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
K	: GAB sabiti
l	: Karışım uzunluğu (m)
M_a	: Havanın molekül ağırlığı ($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$)
$M_{d,s}$: Kuruyan katı miktarı (kg)
m_p	: Toplam kütle temel alınarak hesaplanan mutlak hız komponenti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
N	: Dağılım genişliği
Nu	: Nusselt sayısı
p	: Piezometrik basınç (Pa)
P_{AT}	: Atomizer hava basıncı ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
Pr	: Prandtl sayısı
R	: Gaz sabiti ($8314.34 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
R_d	: Damlacık çapı (m)
Re	: Reynolds sayısı
r_H	: Bağlı nem
Sc	: Schmidt sayısı
Sh	: Sherwood sayısı
s_i	: Momentum kaynağı bileşenleri, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
s_m	: Kütle kaynağı, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
t	: Zaman (s)
T_g	: Kurutma havası çıkış sıcaklığı (K)
u	: x – yönündeki hız bileşeni, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
v	: y – yönündeki hız bileşeni ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V_d	: Damlacık hacmi (m^3)
w	: z – yönündeki hız bileşeni ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
W_o	: GAB sabiti ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
X	: Nem oranı ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg kuru madde}$)
X^*	: Denge nem oranı ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg kuru madde}$)
X_0	: Başlangıç nem oranı ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
x_i	: Kartezyen koordinatlar ($i=1,2,3$)
μ	: Dinamik viskozite ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
γ	: Kütle transfer katsayısı ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
ε	: Viskoz kaybolma ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)
ρ	: Yoğunluk ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
γ	: Kütle transfer katsayısı ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
ρ_d	: Damlacık yoğunluğu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
τ_d	: Damlacıkların ortalama kalma süresi (s)
ρ_{ds}	: Kuru ürün gerçek yoğunluğu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
τ_g	: Kurutma havasının ortalama kalma süresi (s)
(s)	
τ_{ij}	: Gerilme bileşenleri, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

- σ_k : Türbülent Prandtl sayısı (k için)
 μ_t : Türbülans viskozitesi ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
 ρ_w : Suyun yoğunluğu ($kg.m^{-3}$)
 σ_ε : Türbülent Prandtl sayısı (ε için)

Kaynaklar

- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B.R. ve Truong, V., (2003). Surface stickiness of drops of carbohydrate and organic acid solutions during convective drying: experiments and modelling, *Drying Technology*, **21**, 5, 839-873.
- Caretto, L.S., Curr, R.M. ve Spalding, D.B., (1972). Two numerical methods for three dimensional boundary layers, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **1**, 39-57.
- Crank, J., (1975). *The mathematics of diffusion*, 2nd Edition, Oxford University Press.
- Harvie, D.J.E., Langrish, T.A.G. ve Fletcher, D.F., (2002). A computational fluid dynamics study of a tall-form spray dryer, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, **80**, C, 163-175.
- Huang, L.X., Kumar, K. ve Mujumdar, A.S., (2004). Simulation of a spray dryer fitted with a rotary disk atomizer using a three-dimensional computational fluid dynamics model, *Drying Technology*, **22**, 6, 1489-1515.
- Huang, L.X., Kumar, K. ve Mujumdar, A.S., (2005). A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations, *Chemical Engineering and Processing*, **45**, 461-470.
- Kemp, I.C. ve Oakley, D.E., (2002). Modelling of particulate drying in theory and practice, *Drying Technology*, **20**, 9, 1699-1750.
- Kieviet, F.G., Van Raaij, I. ve Kerkhof, P.J.A.M., (1997). A device for measuring temperature and humidity in a spray dryer chamber, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, **75**, 329-333.
- Kieviet, F.G., (1997). Modelling quality in spray drying, *PhD Thesis*, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- Langrish, T.A.G. ve Kockel, T.K., (2001). The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modeling, *Chemical Engineering Journal*, **84**, 69-74.
- Lo, S., (2005). Application of computational fluid dynamics in spray drying, *Lait*, **85**, 353-359.
- Morinos-Kouris, D. ve Maroulis, Z.B., (2006). *Transport properties in the drying of solids* in Mujumdar, A.S., eds, *Handbook of industrial drying*, Taylor & Francis, Hemisphere.
- Ranz, W.E. ve Marshall, W.R.Jr., (1952). Evaporation from drops: Part I., *Chemical Engineering Progress*, **48**, 3, 141-146.
- Straatsma, J., Houwelingen, G.V., Steenbergen, A.E. ve Jong, P.D., (1999). Spray drying of food products: 1. simulation model, *Journal of Food Engineering*, **42**, 67-72.
- Verdumen, R.E.M., Menn, P., Ritzert, J., Blei, S., Nhumaio, G.C.S., Sorenson, T.S., Gunsing, M., Straatsma, J., Verschueren, M., Sibeijn, M., Schulte, G., Fritsching, U., Bauckhage, K., Tropea, C., Sommerfeld, M., Watkins, A.P., Yule, A.J. ve Schonfeldt, H., (2004). Simulation of agglomeration in spray drying installations: The EDECAD project, *Drying Technology*, **22**, 6, 143-146.
- Yakhot, V. ve Orszag, S.A., (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, **1**, 1-51.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. ve Speziale, C.G., (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A*, **4**, 7, 1510-1520.
- Woo, M.W., Daud, W.R.W., Mujumdar, A.S., Talib, M.Z.M., Wu, Z.H. ve Tasirin, S.M., (2008). Comparative study of droplet drying models for CFD modelling, *Chemical Engineering Research and Design*, **86**, 9, 1038-1048.