کاربرد سینتیک خشک‌شدن در طراحی بهینه خشک‌کن پاششی (۱۳۰)

امید رضا روستاپور[۱]

چکیده

منحنی سینتیک خشک شدن مواد مایع به‌صورت قطرات ریز در خشک‌کن پاششی در بهینه‌سازی طراحی خشک‌کن‌ها و محاسبه حجم خشک شدن و شرایط دمایی و رطوبت ه ا و مواد ورودی ضروری است. با استفاده از معادلات تعادل جرم و حرارت و همچنین سینتیک د ا و رطوبت می‌توان پارامترهای دما و رطوبت هوا و مواد تغذیه را که مجهول هستند پیدا نمود. دبی انتقال جرم با توجه به منحنی سینتیک و مقدار رطوبت تعادلی که به‌صورت تجربی به‌دست می‌آید، تعیین می‌شود. حجم خشک‌کن با استفاده از متوسط زمانی تبخیر (ماندگاری ذرات) در خشک‌کن پاششی که با مدل‌سازی عددی قابل تخمین است، محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از رابطه نیروی محرکه خشک شدن و به‌عبارتی انتقال حرارت جابجایی در خشک‌کن و محاسبه ضریب انتقال حرارت حجمی با استفاده از روابط تجربی، حجم خشک‌کن قابل محاسبه است.

کلیدواژه: منحنی سینتیک خشک شدن، طراحی خشک‌کن، خشک‌کن پاششی، معادلات انتقال جرم و حرارت

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس، شیراز
پست الکترونیک: Roostapoor@gmail.com

فهرست نمادها

نماد	شرح	واحد
A	سطح مقطع ظروف مسطح	m^2
b	بار محفظه خشک‌کن	-
c_s	گرمای ویژه ذرات جامد خوراک	J/kg.K
c_{Al}	گرمای ویژه آب	J/kg.K
c_{Av}	گرمای ویژه بخار	J/kg.K
c_B	گرمای ویژه هوا	J/kg.K
C	غلظت بخار در سطح قطره	$kmol/m^3$
$\bar{d}_p$	متوسط قطر قطرات	m
D	ضریب انتشار بخار آب در توده هوا	m^2/s
h	ضریب انتقال حرارتی جابجایی هوا	$W/m^2.K$
I_m	آنتالپی خوراک تر (قطرات) ورودی به خشک‌کن	J/kg
I_g	آنتالپی هوای مرطوب ورودی به خشک‌کن	J/kg
k_y	ضریب انتقال جرم	$Kg/m^2.s$
m_s	جرم ماده خشک	kg
q	شار حرارتی	$J/m^2.s$
q_l	تلفات حرارتی به ازاء واحد جرم	J/kg
Q_g	دبی جرمی هوای ورودی به خشک‌کن	m^3/s
r	شعاع قطرات	m
T	دمای هوا	K
t	زمان	s
T_s	دمای سطحی قطرات	K
V_{ch}	حجم محفظه خشک‌کن	m^3
W_D	شدت خشک شدن	kg/m^2s
W_B	دبی هوای ورودی به خشک‌کن بر مبنای خشک	kg/s
Ws	دبی خوراک ورودی به خشک‌کن بر مبنای خشک	kg/s
X	رطوبت قطرات بر پایه خشک	kg/kg
Y	رطوبت هوا بر پایه خشک	kg/kg
Y_{eq}	رطوبت تعادلی هوا در دمای سطحی قطرات	kg/kg
ΔH_o	گرمای نهان تبخیر قطره مایع در صفر درجه سانتیگراد	J/kg
ΔH_s	حرارت جذب رطوبت توسط ماده خشک	J/kg
Δt	فاصله زمانی بین دو مرحله نمونه‌گیری	s
ΔX	تغییرات رطوبت در یک فاصله زمانی	kg/kg
$\Delta \bar{T}$	اختلاف دمای هوا و دمای سطحی قطرات	K
λ_s	ضریب هدایت حرارتی هوا	W/m.K
ρ_g	جرم حجمی هوا	kg/m^3
ρ_{ml}	جرم حجمی قطره	kg/m^3

مقدمه

خشک کردن مایعات و تبدیل آنها به پودر توسط خشک کن پاششی به منظور افـزایش عمـر نگهـداری از مـسائل ضروری می‌باشد. عملیات خشک کردن به این روش شامل سه مرحلـه اسـت. مرحلـه اول شـامل پاشـش قطـرات در داخـل خشک‌کن، مرحله دوم تبخیر و مرحله سوم جداسازی ذرات پودر از جریان هوا است. جهت طراحی بهینه خشک کن پاششی و فرآهم آوردن شرایطی که ذرات حداقل برخورد را با دیواره خشک‌کن داشته باشند، دانستن روند خشک شـدن ذرات محـصول در خشک‌کن پاششی بسیار مهم است. در راستای خشک کردن در خشک‌کن‌های پاشـشی آزمایـشگاهی و بررسـی سـینتیک خشک شدن تحقیقات محدودی صورت گرفته است. قبل از ط حی و ساخت خشک‌کن پاششی جهت خشک کردن مطلـوب، کلیه فرآیندها در طی خشک شدن مورد بررسی قرارگیرد. یکی از روش‌های بهینه جهت تجزیه وتحلیل فرآیند خشک شـدن، کاربرد مدل‌های CFD[1] است. بدین وسیله می‌توان الگوی جریان هوا در خشک‌کن را شبیه‌سازی نمـوده و توزیـع جریـان و حرکت ذرات را به عنوان فاز گسسته در طی برخورد آنها با هوای گرم محیط خشک‌کن مورد بررسی قرار داد. در این راستا فاز پیوسته به صورت حجم‌های کنترل تعریف شده و معادلات انتقال حرارت، انتقال اندازه حرکت و انتقال جرم بـین فـاز پیوسـته (هوا) و فاز گسسته (ذرات) از لحظه پاشش تا زمان خشک شدن کامل ذرات که شامل مراحل تبخیر آب آزاد، جوشش و تبخیر آب موجود در منافذ ذرات در اثر نفوذ حل می‌گردد. درتحلیل عددی خشک‌کن پاششی، تعیین توزیع دمای هوای گـرم، توزیـع پاشش ذرات و دمای هوای خروجی در داخل خشک‌کن جهت کنترل روند خشک شدن، برخورد ذرات به دیواره داخلی محفظه خشک‌کن و زمان ماندگاری ذرات در داخل محفظه ضروری می‌باشد. با تغییر پارامترهای ورودی خشک‌کـن ازقبیـل سـرعت هوای ورودی، دمای هوای ورودی، سرعت و دبی پاشش می‌توان فرآیندهای داخل محفظه خـشک‌کـن و خروجـی را کنتـرل نمود.

سینتیک خشک شدن به کمک نمودارهایی از قبیل تغییر رطوبت در زمان (منحنی خشک شدن) و تغییرات شـدت (دبی) خشک شدن در طی تغییر رطوبت ماده (منحنی شدت خشک شدن) قابل مطالعه و بررسی است. با به‌دست آوردن ایـن منحنی‌ها می‌توان مراحل خشک شدن و مدت زمان آنها را بررسی و تعیین نمـود. دانـستن سـینتیک خـشک شـدن تغییـرات متوسط رطوبت یا درجه حرارت در زمان، برای طراحی مخزن خشک‌کن‌های پاششی لازم است.

در تحقیقات انجام شده توسط لانگریش و کوکل، ارزیابی خواص منحنی خشک شدن پودر شیر بمنظور استفاده در مدلسازی دینامیک سیال برای ابعاد مختلف ذرات و موقعیت‌های خشک‌کن پاششی صورت پذیرفته است. برای اقطار مختلـف ذرات شیر در خشک‌کن پاششی با استفاده از منحنی خطی مرحله خشک شدن با دبی نزولی در زمان ۱ ثانیه کـاهش رطوبـت بررسی شده و با زمان‌های ماندگاری ۲۰ تا ۸۰ ثانیه در خشک‌کن‌های با ابعاد واقعی مقایسه گردید [۶].

بیسینسکی و همکاران منحنی سینتیک خشک شدن مالتودکسترین را در یک خشک‌کن پاششی مجهز به سیـستم لیزری مورد مطالعه قرار دادند. در این راستا پارامترهای مربوط به قطرات پاشیده شده توسط یک نـازل از قبیـل توزیـع انـدازه ذرات، سرعت ذرات و غلظت جرمی فاز مایع را اندازه‌گیری گردید [۸].

هوانگ و همکاران با استفاده از مدل CFD نسبت به حل عددی انتقال اندازه حرکت، حرارت و جرم بین قطـرات و هوا در خشک‌کن پاششی با اتمایزر دیسک دوار اقدام کردند. آنها جهت مدلسازی آشفتگی از مدل RNG و برای پیش‌بینی خط سیر حرکت ذرات از روش تصادفی آماری استفاده کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده شامل الگـوی جریـان هـوا، کـانتور دمـا و تاریخچه تغییر قطر و جرم ذرات می‌باشند. مطابق با نتایج به‌دست آمده، درصد بیشتر تبخیر در لحظه برخورد اولیه قطـرات بـا هوا صورت می‌گیرد [۵].

قاسمی کادیجانی منحنی سینتیک شدت خشک شدن- رطوبـت پـروتئین تـک یاختـه را در شـرایط اسـتاتیکی در شرایط بهینه دمای آون اندازه‌گیری نمود. توسط این منحنی رطوبت بحرانی و به عبارتی مرز بـین دو مرحلـه شـدت ثابـت و نزولی تبخیر قابل تشخیص است [۳].

1- Computational fluid dynamics

روستاپور نسبت به تعیین منحنی سینتیک رطوبت- زمان آب لیموترش در خشک کن پاششی با تلفیق نتایج تجربی حاصل از نمونه گیری در خشک ن و حل عددی جریان به روش CFD اقدام نمود. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان مرحله تشکیل لایه سخت بر روی ذرات را تشخیص داد [۲].

اهداف این تحقیق بررسی روش‌های تعیین منحنی سینتیک و بررسی کاربرد سینتیک خشک شدن در طراحی مخزن خشک‌کن پاششی است.

مواد و روش‌ها

- روش‌های تعیین منحنی سینتیک

روش‌های متفاوتی برای مطالعه سینتیک خشک شدن مایعات و روند تبخیر وجود دارد. این روش‌ها شامل روش پایا (استاتیکی)، روش دینامیکی تحت شرایط واقعی تبخیر در خشک‌کن پاششی، روش عددی با استفاده از مدل‌های دینامیک سیال و کاربرد تلفیق نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی عددی در خشک‌کن پاششی می‌باشد.

- روش پایا

برای تعیین تغییرات شدت خشک شدن بر اساس رطوبت ماده در شرایط پایا بایستی تغییرات رطوبت ماده را در طی زمان بررسی نمود. برای این منظور نمونه‌هایی از مایع مورد نظر داخل ظروف مسطح ریخته شده و در آون تحت دما و رطوبت نسبی ثابت مستقر می وند. در فواصل زمانی مشخص تغییر وزن نمونه‌ها تا رسیدن آنها به وزن ثابت اندازه‌گیری خواهند گردید. برای تعیین وزن ماده خشک، دمای آون تا ۱۰۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و بعد از گذشت مدت زمان یک ساعت نمونه توزین می‌شود [۴]. با مشخص بودن ، شدت خشک شدن بر اساس تغییرات رطوبت را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$W_D = -\frac{m_s}{A} * \frac{\Delta X}{\Delta t} \qquad (۱)$$

- روش دینامیکی

برای بررسی روند تغییرات رطوبت در برج خشک‌کن پاششی نیاز به تجهیزاتی از قبیل PDA می‌باشد. برای این منظور در طول ستون برج خشک‌کن و فواصل مختلف در امتداد شعاعی نمونه‌برداری می‌شود. با استقرار نمونه‌ها در آون و تعیین میزان رطوبت در هر مکان می‌توان روند تغییرات رطوبت در طول ستون برج خشک‌کن و در امتداد شعاعی را تعیین نمود. با استفاده از مکانیزم لیزری PDA سرعت سقوط ذرات در مکان‌های مختلف خشک‌کن تعین می‌گردد. با توجه به مشخص بودن وضعیت سرعت ذرات در هر نقطه، مقیاس مکانی تبدیل به مقیاس زمانی شده و در نهایت منحنی تغییرات رطوبت- زمان تعین می‌گردد.

- روش عددی

در این روش محیط جریان که مخزن خشک‌کن می‌باشد، توسط المان‌های حجم محدود شبکه‌بندی شده و پس از تعریف درجات آزادی و خواص گاز (هوا)، جریان گاز توسط مدل‌های آشفتگی از قبیل k-ε حل می‌شود. پس از همگرا شدن جواب، اتمایزر و قطرات که تحت عنوان فاز گسسته هستند، تعریف خواهند شد. توزیع قطرات با استفاده از مدل‌های ردیابی تصادفی بررسی و تخمین زده خواهد شد. با تعیین تغییرات سرعت ذرات با دیدگاه لاگرانژی و با استفاده از مدل تبادل اندازه حرکت بین فاز گسسته و فاز پیوسته (هوا) و همچنین حل معادلات انتقال جرم و حرارت بین دو فاز، می‌توان تغییر جرم و قطر ذرات در حین تبخیر و تغییر اندازه حرکت آنها را تخمین زد. ابتدا حرارت لازم جهت شروع تبخیر توسط قطرات از فاز پیوسته دریافت می‌شود و سپس انتقال جرم و حرارت بین دو فاز تا رسیدن دمای قطرات به نقطه جوش اتفاق می‌افتد. تبخیر بر اساس اختلاف غلظت بخار قطره با محیط گاز صورت می‌گیرد. مدل‌سازی مرحله تبخیر نزولی و به عبارتی انتشار رطوبت در

داخل ذرات، با استفاده از مدل‌های تجربی خطی یا سهموی قابل انجام خواهد بود. روند تغییر غلظت ذرات با استفاده از رابطه (۲) (قانون فیک) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial C}{\partial r}\right) \qquad (۲)$$

- **تلفیق روش‌های تجربی و عددی**

در طی این روش، با نمونه‌گیری از ذرات در طول برج خشک‌کن تغییرات رطوبت در هر طول مخزن تعیین می‌گردد. از طرفی با مدل‌سازی عددی فرآیند در خشک‌کن، توزیع ذرات و زمان ماندگاری آنها در محیط پیوسته تخمین زده می‌شود. با تعیین متوسط زمان ماندگاری ذرات در مکان‌های مختلف مخزن خشک‌کن، مقیاس مکانی در منحنی تغییرات رطوبت در طول خشک‌کن که از روش تجربی حاصل گردیده است به مقیاس زمانی تبدیل و تغییرات رطوبت در زمان تعیین می‌شود [۲].

- **کاربرد منحنی‌های خشک شدن در طراحی خشک‌کن پاششی**

بطور کلی مراحل طراحی خشک‌کن پاششی شامل:

۱- تعیین پارامترهای مجهول از قبیل دما و رطوبت هوای خروجی و میزان رطوبت تبخیر شده بر اساس معادلات تعادل جرم و حرارت

۲- محاسبه حجم خشک‌کن با استفاده از منحنی‌های خشک‌شدن وتخمین زمان فرآیند

۳- طراحی تجهیزات جانبی خشک‌کن مانند گرم‌کن، فن، سیکلون

برای بررسی تغییرات درجه حرارت و رطوبت در خشک‌کن معادلات دیفرانسیلی تعادل برقرار هستند. رابطه (۳) معادله دیفرانسیلی تعادل جرم را نشان می‌دهد. در این رابطه $\frac{W_B}{W_s}$ دبی هوای خشک مصرفی به ازاء یک کیلوگرم ماده خشک می‌باشد [۱].

$$dX + \left(\frac{W_B}{W_s}\right)dY = 0 \qquad (۳)$$

معادله تعادل حرارتی طبق رابطه (۴) می‌باشد.

$$dI_m + \left(\frac{W_B}{W_s}\right)dI_g + dq_l = 0 \qquad (۴)$$

در روابط (۳و۴) چهار مجهول X، Y، T_g (از I_g حاصل می‌شود) و T_m (از I_m حاصل می‌شود) وجود دارد لذا به دو معادله دیگر برای تعیین مجهولات نیاز است. آنتالپی خوراک تر ورودی (قطرات) (I_m) و آنتالپی هوای مرطوب ورودی (I_g) از روابط (۵و ۶) بدست می‌آید.

$$I_m = (c_s + c_{Al}X)T_m + \Delta H_s X \qquad (۵)$$

$$I_g = (c_B + c_{Av}Y)T_g + \Delta H_o Y \qquad (۶)$$

معادله سینتیک انتقال جرم (رابطه ۷) و حرارت (رابطه ۸) برای تکمیل معادلات تعادل جرم و حرارت در ذیل ارائه شده است.

$$W_s dX + W_D dA = 0 \quad (۷)$$

$$qdA = W_s dI_m + W_D dI_{Av} dA \quad (۸)$$

در روابط بالا q شار حرارتی است که از طریق جابجایی از هوای گرم به قطرات انتقال می‌یابد. W_D نرخ خشک شدن بر اساس رطوبت در دو مرحله خشک شدن با دبی ثابت و نزولی است که از منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن قطرات در خشک‌کن پاششی حاصل می‌شود. I_{Av} آنتالپی بخار آب بوده که از رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$I_{Av} = c_{Av} T_m + \Delta H_0 \quad (۹)$$

شار حرارتی با استفاده از رابطه (۱۰) و نرخ خشک شدن با استفاده از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید.

$$q = h(T - T_s) \quad (۱۰)$$

$$W_D = k_y (Y_{eq} - Y) \quad (۱۱)$$

همانطورکه در رابطه (۱۱) مشاهده می‌شود، نرخ خشک شدن با توجه به مقدار رطوبت تعادلی (Y_{eq}) قابل محاسبه است. خشک شدن در دو مرحله دبی ثابت و نزولی انجام می‌گیرد لذا رطوبت تعادلی (بحرانی) در زمان تغییر فاز تبخیر از دبی ثابت به دبی نزولی و رطوبت تعادلی در زمان خشک شدن کامل ذرات در محاسبه نرخ خشک شدن مطرح می‌باشد.

دومین مرحله طراحی محاسبه حجم مخزن خشک‌کن پاششی می‌باشد که به دو روش این‌کار قابل انجام است. در روش اول با اطلاع از منحنی‌های خشک شدن و متوسط زمان تبخیر ذرات، حجم خشک‌کن پاششی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۷].

$$V_{ch} = \frac{\bar{t} * Q_g}{\rho_g} \quad (۱۲)$$

در روش دوم با محاسبه سطح تبخیر توسط مقادیر متوسط نیروی محرکه تبخیر، حجم خشک‌کن محاسبه می‌گردد. رابطه (۱۳) انتقال حرارت جابجایی را نشان می‌دهد. در این رابطه h_v ضریب انتقال حرارت حجمی هـ ا و ΔT اختلاف دمای ه ا و سطح ذرات است. این ضریب در خشک‌کن‌های پاششی با اتمایزر دوار از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$h_v = 216 \frac{b \lambda_g W_{ml}}{\rho_{ml} S_{ch}} \cdot \frac{1}{\bar{d}_p^{\,1.8}} \left(\frac{g(\rho_{ml} - \rho_g)}{Q_g} \right)^{0.2} \quad (۱۳)$$

$$q_t = h_v V_{ch} \overline{\Delta T} \quad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) برای شرایط ذیل ارائه شده است. لازم به ذکر است که $\bar{d}_p$ قطر متوسط قطرات می‌باشد و با تعریف توزیع در طی مدلسازی عددی خشک‌کن و تهیه تصاویر الکترونی از ذرات پودر به‌دست آمده در طی نمونه‌گیری در خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی، تعیین می‌گردد.

W_{ml} = دبی قطرات ورودی به خشک‌کن (1-16 kg/h)

n = دور اتمایزر (18000-24000 r.p.m)
X' = رطوبت قطرات ورودی بر پایه تر (68-95%)
Q_g = جریان حجمی هوای ورودی (70-360 m^3/h)
T_g= دمای هوای ورودی به خشک‌کن (100-300 ^oC)
S_{ch} = سطح مقطع مخزن خشک‌کن (4-29- m^2)

در رابطه (۱۳) با مشخص بودن ضریب انتقال حرارت حجمی، توان حرارتی و اختلاف دمای هوا و سطح ذرات، حجم خشک‌کن محاسبه می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

با تعیین منحنی خشک شدن، روند تبخیر، رطوبت بحرانی در دو فاز خشک شدن با دبی ثابت و دبی نزولی که در طراحی خشک‌کن لازم است به‌دست می‌آید. با شبیه‌سازی خشک‌کن پاششی روند تبخیر، توزیع ذرات و زمان ماندگاری آنها در خشک‌کن معین می‌گردد. اطلاع از توزیع ذرات و زمان ماندگاری آنها در خشک‌کن جهت بهینه‌سازی طراحی و بهینه‌سازی شرایط اولیه از قبیل دبی تغذیه و سرعت اتمایزر دوار مناسب است.

مراجع

۱- استرامیلو، س. و کودرا، ت. خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی. پهلوان زاده، ح. ۱۳۷۷. مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس.

۲- روستاپور، ا.ر. ۱۳۸۴. مطالعه سینتیک خشک شدن آب لیموترش در خشک‌کن پاششی و خواص حرارتی-فیزیکی آن در شرایط مختلف. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس.

۳- قاسمی کادیجانی، ه، ۱۳۷۶. مدلسازی و طراحی خشک‌کن پاششی برای خشک کردن پروتئین تک‌یاخته. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس.

4- AOAC. 1990. Official methods of analysis (15th Edn). Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA.

5- Huang, L., Kumar K., Passos, M.L. and Mujumdar A.S. 2005. A three- dimensional simulation of a spray dryer fitted with a rotary atomizer. Drying Technol. 23(1): 1-15.

6- Langrish, T.A.G. and Kockel, T.K. 2001. The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modeling. Chem. Eng. J. 84: 69-74.

7- Masters, K. 1985. Spray Drying. 4th Edn. John Wiley and Sons. New York. 696 pp.

8- Zbicinski, I., Delag, A., Strumillo, C. and Adamiec, J. 2002. Advanced experimental analysis of drying kinetics in spray drying. Chem. Eng. J. 86: 207-216.

Use of Drying Kinetics for Optimum Design of Spray Dryer

Roustapour, O.R.[1]

Abstract

The drying kinetics of liquid as droplets form in spray dryer for design and determine the chamber volume of spray dryer, temperature conditions, air inlet and feed moisture contents is necessary. Temperature and moisture parameters of air inlet and feed can be determined by using of mass and heat transfer function and temperature and moisture content variations. The rate of mass transfer determine by the drying kinetics curve and equilibrium moisture content. The particle residence time in spray dryer can be estimated numerically and use to determine the chamber volume of spray dryer. Also the chamber volume can be determined by using of driving force of drying and volumetric heat conductivity.

Keywords: Drying kinetics curve, Dryer design, Spray dryer, Mass and heat transfer functions

1 Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department of Fars Province, Zarghan, Shiraz. Email: roostapoor@gmail.com