طراحی خشک کن جت برخوردی برای محصولات کشاورزی

مهدیه کارگرنعمتی[۱]، غلامرضا چگینی[۲] و جواد خزایی[۲]

۱ و ۲ به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

mknemati@ut.ac.ir

چکیده

استفاده از جت برخوردی[۱] در صنایع غذایی مانند پختن، خشک کردن، و منجمد کردن در چندین دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این سیستم در خشک کردن موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی[۲] شده و کاهش زمان خشک شدن را به دنبال دارد. خشک کنهای جت هوا شامل یک یا چند نازل می باشند که هوا را با سرعت بالا به طور عمودی به سطح محصول می پاشند.راندمان کار این دستگاه متاثر از دمای کاری، سرعت پاشش، قطر نازل و فاصله نازل از سطح می باشد. لذا طراحی دستگاه با قابلیت ایجاد تنظیم موارد مذکور حایز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: خشک کن جت برخوردی، نازل، ضریب انتقال حرارت جابجایی

مقدمه

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روشهای نگهداری موادغذایی است. به دلیل امکان برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی ، اجرای صحیح عملیات خشک کردن اهمیت زیادی دارد. زمان طولانی خشک شدن و دمای بالا موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب از جمله تغییرات رنگ، طعم، کاهش مواد مغذی و افزایش چگالی حجمی می‌شود. انتقال حرارت وجرم در پروسه خشک کردن به دمای هوای خشک کننده، رطوبت هوا، سرعت جریان هوا وابسته است. خشک کردن به روش جت هوا یک تکنولوژی قدیمی است که جدیداً برای محصولات غذایی مورد استفاده قرارمی‌گیرد.خشک کن جت هوا شامل یک یا چند نازل هواست که هوا را با سرعت بالا به صورت عمودی به یک سطح می پاشد و سرعت انتقال حرارت و جرم بالایی دارند. زمانی که خشک کردن با سرعت بالا و تجهیزات کوچک مورد نیاز است نوع مورد قبولی ازخشک کردن به روش جابجایی هستند. خشک کنهای جت هوا فقط در صورتیکه محصول رطوبت آزاد داشته باشد کارآرایی دارند. مطالعات زیادی در زمینه کاربرد جت هوا در افزایش فرایند انتقال حرارت و خشک کردن مواد موجود است. در صنایع غذایی این مطالعات به بررسی تاثیر تغییر

[1] Jet impingement
[2] Convective heat transfer coefficient

پارامترهای مختلف چون دما، سرعت هوا، قطر نازل و غیره بر روی خواص فیزیکی محصول (چروکیدگی، تردی، ژلاتینه شدن نشاسته و ساختار میکروسکوپی و غیره) و سینتیک خشک شدن محصول می پردازد. لوجان و همکاران در سال۱۹۹۷ (Lujan-Acosta et al., 1997) از تکنیک خشک کردن جت هوا برای خشک کردن چیپس ذرت استفاده کردند. چیپس ها با افزایش دمای خشک شدن و افزایش ضریب انتقال حرارت سریعتر خشک شدند. لی و واکردر سال ۱۹۹٦ (Li and Walker, 1996) با استفاده از این روش کیکهایی با کیفیت رنگ بالاتر تهیه کردند. در سال ۲۰۰۷سومنو و همکاران (Sumnu et al., 2007) خواص فیزیکی نان در هنگام پخت با استفاده از این روش اندازه گیری کردند. نانهای پخته شده توسط جت مقدار تخلخل و حجم بالایی داشتند. استفاده از جت برخوردی در خشک کن موجب می شود هوا با سرعت بالا به سطح محصول برخورد کرده و لایه های مرزی رطوبت و هوای سرد را انتقال می دهد. لذا سرعت انتقال گرما بیشتر شده و پروسه زمانی کاهش می یابد (Moreira, 2001). ازآنجا که مصرف انرژی متناسب با زمان خشک کردن و دما می باشد، خشک کنهای جت هواسریعتر و با عملکرد انرژی بالاتر عمل خشک کردن را انجام می دهند (Varilek and Walker, 1983–1984). استفاده از این نوع خشک کن برای خشک کردن محصولات گرانولی سبب انجام سریعتر عملیات و خشک شدن یکنواخت محصول می‌شود چون معلق سازی توسط سرعت هوای زیاد از نازلها ایجاد می‌شود(Mujumdar, 1987). هدف از انجام این مطالعه طراحی خشک کن جت برخوردی و بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد دستگاه می باشد.

مواد و روش‌ها

طراحی خشک کن جت برخوردی به دلیل متغیرهای زیاد طراحی پیچیده است.خشک کن جت برخوردی متشکل از قسمتهای مختلف از جمله دمنده، گرمکن الکتریکی، محفظه پلنوم و محفظه خشک کن می باشد. دما در این نوع خشک کن ۱۰۰-۳۵۰°c وسرعت آن برای محصولات غذایی ۱-۵۰ m/s می باشد (Sarkar et al., 2004). از آنجا که این خشک کن در دمایی بالاتر از دمای خشک کنهای معمولی کار می کند در ساخت دستگاه در نظر گرفتن موادی که تحمل دمایی بالاتر دارند ضروری است. هوا پس از گرم شدن در گرمکن وارد محفظه پلنوم شده و از طریق نازلها به طور مستقیم بر روی محصول می پاشد. پارامترهای مختلف چون دما، سرعت هوا، قطر نازل، فاصله نازل از سطح محصول تاثیر بسزایی در عملکرد دستگاه دارند، لذا در طراحی نحوه کنترل انها باید مدنظر گرفته شود. از آنجا که مقدار دبی هوا تاثیر بسزایی در سرعت خروجی دارد تنظیم آن از پارامترهای مهم دستگاه است.

دمنده

به منظور دمیدن هوای داغ از طریق نازلها بر روی سطح محصول و همچنین گردش و بازیابی مجدد[1] آن از محفظه خشک کن از دمنده هوا استفاده می شود. دمنده بر اساس میزان دبی حجمی کل هوای ایجاد شده در هرثانیه از طریق ورودی انتخاب می شود.

$$Q = NAV \qquad (1)$$

[1] Re-circulation

که در آن Q: دبی حجمی دمنده (m^3/s)، N: تعداد نازل، A: مساحت هر نازل (m^2) و V: سرعت هوای خروجی مدنظر از نازل (m^2/s) است.

$$\text{ظرفیت دمنده} = \frac{\text{دبی هوا}}{\text{بازده دمنده}} \quad (۲)$$

$$\text{توان مورد نیاز دمنده} = \Delta p * Q \quad (۳)$$

که Δp افت فشار در سیستم از دمنده تا نازل می باشد.

دبی هوای تولیدی دمنده ،که توسط موتور AC حرکت می کند، می تواند توسط اینورتور کنترل شود. در اینصورت سرعت هوای برخوردی به سطح محصول وابسته به دور فن می باشد.

گرمکن الکتریکی

در تعیین توان مورد نیاز گرمکن الکتریکی مقدار دبی جرمی هوا پارامتر تعیین کننده است.

$$\dot{m} = N\rho A \quad (٤)$$

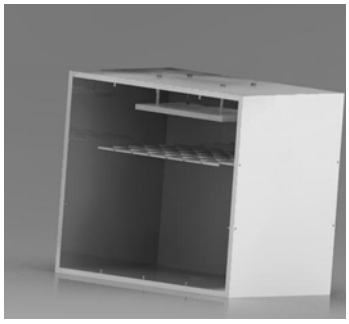
$$\dot{Q} = \dot{m}\, C\, \Delta T \quad (٥)$$

که در آن $\dot{m}$ دبی جرمی هوا(kg/s)، ρ : چگالی هوا(kg/m^3)، C: ظرفیت گرمایی ویژه هوا (j/kg°c)، ΔT:مقدار دمای افزایشی(°c)و $\dot{Q}$ توان گرمایی موررد نیاز بر حسب وات است. توان المنتهای الکتریکی توسط سیستم کنترل دما به روش PID کنترل می شود. که از ترموکوپل مناسب دما برای اندازه گیری دما استفاده می شود.

محفظه پلنوم

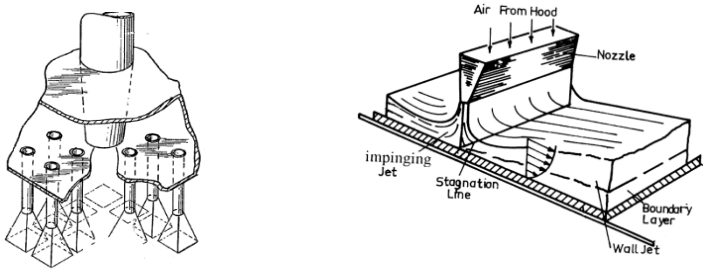
محفظه پلنوم[1] متشکل از صفحه پخش کننده جریان، صفحه مش، نازل ها یا صفحات نازل[2] می باشد (شکل ۱) . صفحه پخش کننده جریان صفحه ای است که درست در زیر ورودی هوا به محفظه پلنوم می باشد و وظیفه آن پخش جریان هوا به طور یکنواخت بر روی صفحه نازل است.صفحه مش وظیفه از بین بردن توربولانس هوا را درست قبل از صفحه نازل را دارد.

[1] Plenum chamber
[2] Nozzle plate



شکل ۱- محفظه پلنوم

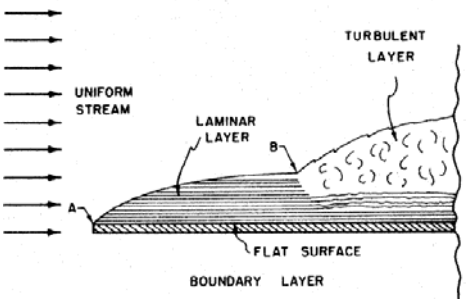
نازلها در این نوع خشک کنها به دو صورت نازلهای دایره ای[1] و نازلهای مستطیلی[2] وجود دارند (شکل ۲). انتخاب نوع شکل نازل و نحوه چیدمان نازلها در آرایشهای چند نازلی از نکات حایز اهمیت در طراحی می‌باشد. یافتن مقدار بهینه فاصله بین دو نازل و شکل چیدمان نازلها در آرایشهای چند نازلی تنها از طریق مشاهده جریان زیرجتها و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی امکان پذیر است و این مقدار برای هر محصول متفاوت است.



شکل ۲- نازلهای دایره ای و مستطیلی

از جمله پارامترهای مهم طراحی فاصله نازل تا محصول است که طبق مطالعات انجام شده توسط سارکار و سینگ در سال ۲۰۰٤ (Sarkar and Singh, 2004) بهترین میزان این فاصله ۸-٦ برابر قطر نازل دایره ای برای محصولات غذایی است.هوا با سرعت بالا به سطح محصول برخورد کرده و لایه های مرزی رطوبت و هوای سرد را انتقال می دهد. لذا سرعت انتقال گرما افزایش یافته و پروسه زمانی کاهش می یابد. جتهای هوا برای خنک کردن، گرم کردن وخشک کردن استفاده می شوند چون ضریب انتقال حرارت و جرم بالا دارند. حرکت عمودی هوا در برخورد با سطح به حرکت افقی تبدیل می شود. در نقطه برخورد ضخامت لایه مرزی[3] صفر بوده و بیشترین میزان انتقال حرارت صورت می گیرد. با افزایش فاصله از نقطه برخورد ضخامت لایه مرزی افزایش یافته و مقدار انتقال حرارت کاهش می یابد ولی جتها با ایجاد آشفتگی و توربولانس منجر به بهبود انتقال حرارت می شوند. (شکل ۳).

[1] Round jets
[2] Slot jets
[3] Boundary layer



شکل ۳- تشکیل لایه مرزی در امتداد یک سطح

ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نازلها بر پایه روابط این کروپرا و دویت در سال۱۹۹۰(Incropera and DEWITT, 1990) و مارتین در سال ۱۹۷۷ (Martin, 1977) از روابط زیر پیدا می شود.

$$\frac{Nu}{Pr^{0.42}} = G\left(\frac{r}{D}, \frac{H}{D}\right) F_1(Re) \qquad (٦)$$

$$F_1 = 2Re^{1/2}\,(1 + 0.005\,Re^{0.55})^{1/2} \qquad (٧)$$

$$G = \frac{D}{r}\left[\frac{1 - 1.1\,{}^{D}/_{r}}{1 + 0.1({}^{H}/_{D} - 6)\,{}^{D}/_{r}}\right] \qquad (٨)$$

$$Nu = \frac{hD}{k_a} \qquad Pr = \frac{v_a}{\alpha_a} \qquad Re = \frac{4\,\dot{m}}{\pi\, D v_a\, \rho_a} \qquad (٩)$$

که در این روابط h: ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین r: شعاع نمونه H: فاصله نازل از محصول، D: قطر نازل، k_a: ضریب هدایت حرارتی هوا، v_a: ویسکوزیته سینماتیکی هوا و α_a ضریب پخش حرارتی هوا ρ_a : چگالی هوا می باشد.همانگونه که مشاهده می شود با تغییر سرعت خروجی نازل می توان مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی را تغییر داد.

نتیجه گیری

تکنولوژی جت برخوردی هوا ضریب انتقال حرارت بالاتر از سایر تکنیکهای جابجایی هوای اجباری تولید می کند. در نتیجه استفاده از این روش در فرآیندهای غذایی از جمله خشک کردن، موجب کاهش زمان و افزایش عملکرد می شود. طراحی درست این سیستم موجب بوجود آمدن ضریب انتقال حرارت یکنواخت روی محصول می‌شود. انتخاب درست دما، سرعت هوا، نوع نازل و فاصله نازل از سطح محصول موجب افزایش راندمان خشک شدن و بدست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی مطلوب می شود.

منابع و مآخذ

Incropera, F. P. and DEWITT, D. P.1990. Fundamentals Of Heat and Mass Transfer. New York , NY, John Wiley and Sons.

Li, A. and Walker, C. E.1996. Cake baking in conventional impingement and hybrid ovens. Journal of Food Science. Vol 61, 188-191.

Lujan-Acosta, J., Moreira, R. G. and Seyed-Yagoobi, J. 1997. Air-impingement drying of tortilla chips. Drying Technology. Vol 15, 881-897.

Martin, H. 1977. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. Advance in Heat Transf er. Vol 13(1), 1-66.

Moreira, R. G.2001. Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering. Vol 49, 291-295.

Mujumdar, A. S. 1987. Impingement Drying. Handbook of Industrial Drying, New York, Taylor &Francis**:** 461-467.

Sarkar, A., Nitin, N., Karwe, M. V. and Singh, R. P. 2004. Fluid flow and heat transfer in air jet impingement in food processing. Journal of food science. Vol 69(4).

Sarkar, A. and Singh, R. P. 2004. Air impingement technology for food processing visualization studies. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. Vol 37, 873-879.

Sumnu, G., Datta, A., Sahin, S., Keskin, S. and Rakesh, V. 2007.Transport and related properties of breads baked using various heating modes. Journal of Food Engineering. Vol 78, 1382-1387.

Varilek, P. and Walker, C. E.1983–1984. Baking and ovens: History of heat technology. Bakers Digest. Vol 58(3).

Abstract

The application of air impingement technology for food processing operation such as freezing, thawing, drying, and baking is increasing rapidly. The advantages of jet impingement heating over more traditional convection heating include rapid drying, higher efficiency, small equipment and better water retention. Air jet impingement is a form of convection heat transfer in which high velocity air is forced against the surface of a product. The factors affecting efficiency of impingement systems include the nozzle design, nozzle exit velocity, spacing, boundary layer characteristics on the surface of the product and the design of the impingement equipment. It is important to select the jet configuration very carefully, because they have important bearing on the initial capital cost and operating costs, as well as the product quality. So, designing a system with variable parameters is important.

Keywords: Air jet impingement, convection heat transfer, nozzle