



نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه علم و صنعت ایران
۳-۵ آذر ماه ۱۳۸۳

بررسی و تعیین خواص فیزیکی آب پنیر جهت استفاده در طراحی واحدهای فرآیندی صنایع لبنی

شعله فرشادفر^{*}، پروین رنجبری^۱، شهرام جوادیان^۱

۱. مرکز تحقیقات مهندسی فارس، صندوق پستی ۴۱۴-۷۱۵۵۵

farshadfar@farsberc.ir

چکیده

مهمترین خواص فیزیکی آب پنیر عبارتند از گرانروی، دانسیته، ظرفیت حرارتی، هدایت حرارتی و کشش سطحی که تعیین آنها به منظور طراحی واحدهای مختلف فرآیند این ترکیب ضروری و غیر قابل اجتناب است. همچنین مقدار این خواص در حین فرآیندهای مختلف از قبیل تغلیظ، کریتالیزاسیون و خشک شدن تغییر می کند از آنجا که این تغییرات عمدتاً مربوط به افزایش درصد مواد جامد و تغییرات دما می باشد لذا پیشنهاد روابط مناسبی که بتواند این مقادیر را در شرایط مختلف تخمین بزند از اهمیت ویژه ای برخوردار است برای این منظور می توان آب پنیر را محلولی شبیه به آب و یا یک محلول لاکتوز خالص فرض نمود زیرا آب پنیر یک محلول رقیق (حدود ۶ درصد مواد جامد) بوده و لاکتوز اصلی ترین جزء آن است، اگر چه بدلیل حضور املاح و پروتئینها و نقش ناشناخته این ترکیبات در خواص فیزیکی آب پنیر بررسیهای بیشتری لازم است. آزمایشات نشان داده می دهد که محلول آب پنیر از نظر رفتار رئولوژیکی در غلظتهای کمتر از ۲۰ درصد نیوتنی و در غلظتهای بالاتر غیر نیوتنی است. در این مقاله معادلات مناسبی جهت تخمین گرانروی و سایر خواص مهندسی آب پنیر پیشنهاد می شود خوشبختانه این روابط در طراحی واحدهای مختلف از قبیل مبدلهای حرارتی، تبخیرکننده های فیلم ریزشی، کریستالیزاتورها و خشک کن پاششی بکار رفته و نتایج رضایتبخشی بدست داده است.

کلمات کلیدی: آب پنیر، گرانروی، دانسیته، ظرفیت حرارتی، هدایت حرارتی، کشش سطحی

مقدمه

از آنجا که سیاستهای امروز دنیا اهمیت ویژه‌ای برای حفاظت از محیط زیست و همچنین بازیافت مواد با ارزش از پس‌مانده‌های فرآیندهای تولید محصولات مختلف در هر یک از صنایع قائل است، توجه به آب پنیر بعنوان پساب کارخانه‌های پنیر سازی بسیار مهم و ضروری است. همانطور که می‌دانیم این ماده حدود ۶-۷ درصد از مواد مغذی شبر را داراست و در حجم بسار بالایی تولید شده (۸ تن به ازاء هر تن پنیر تولیدی) و از طرفی جهت تجزیه در محیط زیست نیاز به اکسیژن زیادی دارد و BOD آن حدود ۵۰۰۰۰ می‌باشد لذا بایستی با اتخاذ روشهای مناسب در جهت بازیافت این ماده اقدام نموده و تدابیر لازم در این خصوص بکار بست که از آن جمله می‌توان به واحدهای تولید پودر آب پنیر، تولید لاکتوز، تولید کنسانتره پروتئینی آب پنیر و..... اشاره کرد.

جهت طراحی فرآیندی اجزاء مختلف خطوط تولید محصولات فوق معمولاً روابط ریاضی ویا تجربی مناسبی پیشنهاد شده‌اند که دقت در جزئیات این روابط نشان می‌دهد که مهمترین پارامترها در این معادلات خواص فیزیکی خوراک و محصول می‌باشد. از آنجا که در حین انجام فرآیند تولید محصولات مختلف، خوراک تحت تاثیر عملیات حرارتی ویا افزایش غلظت قرار می‌گیرد لذا تعیین خواص فیزیکی در دماها و غلظت‌های مختلف لازمه طراحی این واحدها می‌باشد.

مواد و روشها

روابط ارائه شده در این مقاله نتیجه بررسی تعداد بسیار زیادی از مقالات موجود در زمینه بررسی مسائل مربوط به آب پنیر و طراحی واحدهای فرآیندی این ماده می‌باشد که بطرق مختلف مورد بررسی و انتخاب قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به ترتیب به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- انجام آزمایشهای تعیین این خواص و مقایسه نتایج با نتایج حاصل از روابط که در این بخش نتایج آزمایشات نیز بشکل روابط ریاضی و یا منحنی‌هایی موجود می‌باشند.
- ۲- استفاده از مقادیر خواص محاسبه شده از روابط مختلف در محاسبات طراحی مجدد واحدهای فرآیندی موجود که توسط شرکتهای معتبر نظیر Niro, APV طراحی شده‌اند و در نهایت مقایسه نتایج به منظور همسوکردن و اعمال ضرایب مناسب
- ۳- استفاده از این مقادیر در طراحی واحدهای ساخته شده مرکز تحقیقات مهندسی فارس که نتایج آنها پس از ساخت، نصب و راه اندازی واحد مورد بررسی قرار گرفته و نتایج کاملاً رضایت بخش بوده است.
- ۴- در خصوص تعیین برخی از خواص نظیر ضریب هدایت حرارتی و کشش سطحی نسبت به سایر خواص روابط متنوع کمتری موجود می‌باشد لذا به نظر می‌رسد در این خصوص کار و تحقیق بیشتری مورد نیاز می‌باشد.

معرفی و تعیین خواص فیزیکی آب پنیر

به منظور طراحی واحدهای فرآیندی آب پنیر نظیر انواع مبدلهای حرارتی، پاستوریزاتور، تغلیظ‌کننده‌ها، جداکننده‌های بخار-مایع، فلش کولرو خشک‌کن پاششی لازم است که پس از انجام موازنه‌های جرم و انرژی و تعیین میزان خطوط جریانی هر واحد با استفاده از روابط انتقال حرارتی مناسب ویژه طراحی هر واحد، ضرایب انتقال حرارت و پس از آن سایر پارامترها نظیر میزان سطح انتقال حرارت مورد نیاز و یا سایز دستگاه مورد نظر تعیین شود. توجه به روابط پیشنهادی جهت محاسبه میزان انتقال حرارت نشان می‌دهد که تعیین خواص فیزیکی نظیر دانسیته، گرانی، کشش سطحی، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رابطه زیر نمونه‌ای از روابطی است که جهت طراحی تبخیر کننده‌ها پیشنهاد شده است.

$$h = A \frac{k}{D} \left(\frac{\rho V D}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^\beta \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_w} \right)^\gamma \quad (1)$$

که در آن پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

A, α, β, γ مقادیر ثابت، ρ دانسیته، v سرعت، D قطر، μ گرانی، C_p ظرفیت گرمایی، k ضریب هدایت حرارتی، σ کشش سطحی.

همانطور که مشاهده می‌شود کلیه خواص فیزیکی خوراک جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت مورد نیاز می‌باشد که ذیلاً به بررسی روابط مختلف موجود پرداخته می‌شود.

بحث و نتایج

دانسیته

دانسیته آب پنیر را می‌توان بصورت تابعی از دانسیته آب و یک تابع درجه ۲ از درصد مواد جامد آب پنیر بشکل زیر در نظر داشت: ^(۱)

$$\rho_{\text{whey}} = \rho_{\text{water}} + f(w_s) \quad (2)$$

$$f(w_s) = A w_s + B w_s^2$$

در رابطه فوق w_s درصد مواد جامد آب پنیر، ρ_{water} دانسیته آب بر حسب kg/m^3 و ضرایب A, B به ترتیب برابرند با $4/123$ و $0/0853$ خطای محاسبه شده با استفاده از رابطه مذکور بین $1/1$ تا $2/7$ خواهد بود.

دانسیته آب پنیر را با استفاده از یک تابع ریاضی که تلفیقی از دانسیته اجزاء خوراک و میزان هر کدام از آنها در محلول می‌باشد نیز بدست آورد. ^(۲)

$$\rho_{\text{whey}} = \rho_{\text{water}} \left(\frac{100}{\frac{\% \text{ fat}}{0.93} + \frac{\% \text{ solid content}}{1.616} + \frac{\% \text{ water}}{1} + \frac{\% \text{ lactose}}{1.589}} \right) \quad (3)$$

تغییرات دانسیته آب پنیر با افزایش دما مانند سایر مایعات در حد بسیار جزئی می‌باشد اگر چه روابط تجربی برای محاسبه این تغییرات جزئی در دست می‌باشند.

همراه با افزایش غلظت، دانسیته نیز افزایش می‌یابد معادله زیر دانسیته در غلظت‌های بالاتر را بر حسب دانسیته در غلظت اولیه و دانسیته آب، درصد مواد جامد اولیه و درصد مواد جامد در آب پنیر غلیظ شده قابل محاسبه می‌سازد.^(۳)

$$\rho_{\text{concentrate}} = \frac{\rho_{\text{initial}} \times \rho_{\text{water}} \times w_{\text{sinitial}}}{(w_{\text{sconcentrate}} \times (\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{initial}}) + \rho_{\text{initial}} \times w_{\text{sinitial}})} \quad (۴)$$

گرانروی

با توجه به تغییر خواص رئولوژی آب پنیر در غلظت‌های بالای ۲۰ درصد از حالت نیوتنی به حالت غیر نیوتنی برای گرانروی آب پنیر در غلظت‌های زیر ۲۰ درصد روابطی متفاوت از غلظت‌های بالای ۲۰ درصد پیشنهاد شده است.

رابطه زیر برای محاسبه گرانروی در محدوده غلظت ۲۰-۰ درصد و دمای ۶۰-۱۰ درجه سانتیگراد پیشنهاد شده است.^(۴)

$$\mu = \mu_w (A + Bw_s + Cw_s^2) \quad (۵)$$

در رابطه فوق μ_w گرانروی آب بر حسب Pa.s و w_s درصد مواد جامد خوراک است و ثابت‌های C, B, A به ترتیب برابرند با ۰/۰۰۱۴۷ و ۰/۰۳۱۱ و ۱/۰۰۴

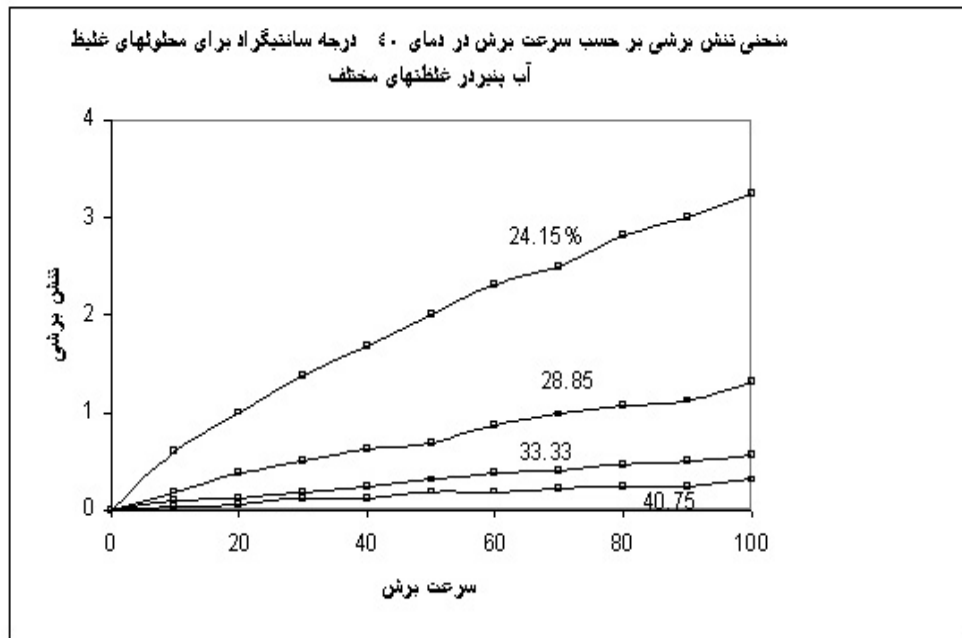
گرانروی محاسبه شده از رابطه فوق در غلظت‌های پائین حدود ۲/۶ درصد و در غلظت‌های بالا حدود ۱۰ درصد با داده‌های آزمایشی متفاوت است.

در محدوده غلظت ۴۰-۲۵ درصد و در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد جهت محاسبه گرانروی از روابط و منحنی‌هایی که مقادیر تنش برشی (shear stress) و سرعت برش (shear rate) را بهم مربوط می‌سازد استفاده می‌شود.^(۵۶)

$$\tau = b\gamma^s \quad (۶)$$

در رابطه مذکور τ تنش برشی و بر حسب N/m^2 ، γ سرعت برش و بر حسب s^{-1} ، b ضریب سازگاری بر حسب $N \cdot m^{-2} \cdot s^s$ ، s ایندکس رفتار جریان که برابر است با: $w_s \geq 20\%$ $(1.27 - 1.36 \times 10^{-2} w_s)$

شکل (۱) تنش برشی بر حسب سرعت برش در غلظت‌های متفاوت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. این نمودار رفتار غیر نیوتنی آب پنیر در غلظت‌های بالا را بخوبی آشکار می‌کند.



شکل ۱-

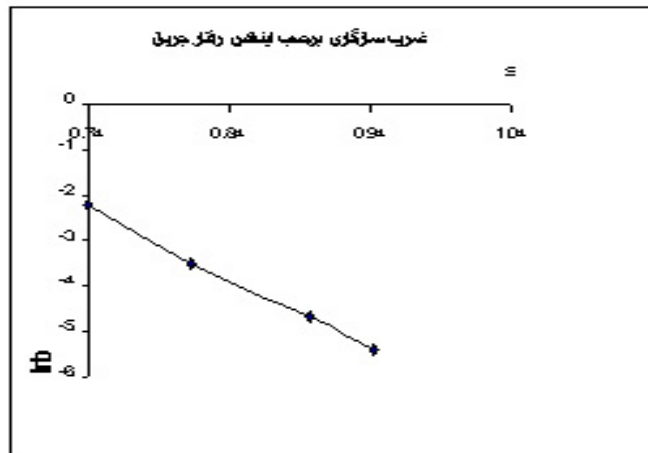
با افزایش غلظت میزان غیر نیوتنی بودن محلول افزایش می‌یابد که این امر بوسیله پارامتر ایندکس رفتار جریان نشان داده می‌شود. جدول زیر مقادیر b, s را در غلظتهای متفاوت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد ارائه داده است.

جدول ۱-

W_s (%)	$b(N \cdot m^{-2} \cdot s)$	s
24.15	$10^{-3} \times 4.46$	0.942
28.85	$10^{-3} \times 9.34$	0.897
33.33	$10^{-2} \times 3.06$	0.813
40.75	$10^{-1} \times 1.1$	0.740

به منظور رسم نمودار معادله ۶ بفرم یک تابع درجه اول معادله بفرم زیر تغییر داده و سپس ایندکس رفتار جریان را بر حسب $\ln b$ رسم می‌کنیم.

$$\ln b = \ln \tau - s \ln \gamma \quad (7)$$



شکل ۲-

شیب خط حاصل مقداری ثابت و برابر با $-\ln \gamma_0$ و عرض از مبدا آن برابر $\ln b$ می‌باشد.

$$\gamma_0 = 7.584 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \text{ بنابراین}$$

با توجه به ثابت بودن ضریب زاویه خط حاصل می‌توان رابطه را بفرم زیر تغییر داد:

$$\ln b = \ln \tau - s \ln \gamma_0 \quad (۸)$$

بنابر این در مقادیر مختلف w_s مقدار b و s را از جدول ۱ انتخاب و مقدار τ را از رابطه ۸ محاسبه می‌کنیم، پس از محاسبه τ با استفاده از شکل ۱ مقدار γ را محاسبه می‌کنیم. با داشتن مقادیر γ و γ_0 گرانی در غلظت‌های بالاتر از ۲۰ درصد از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$\mu = \mu(\text{eq.5}) \times \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{s-1} \quad (۹)$$

ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی را نیز می‌توان بشکل تابعی از ضریب هدایت حرارتی آب در دماهای مختلف و ضریب هدایت حرارتی مواد جامد موجود در آن داشت، این خاصیت با تغییر در دما و میزان مواد جامد موجود دستخوش تغییرات می‌شود برای مثال هدایت حرارتی این ماده در دمای ۲۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد بترتیب برابر با ۰/۵۴۲ و ۰/۶۴۳ است. ضریب هدایت حرارتی آب در دماهای مختلف در مراجع ارائه شده است این رقم برای آب پنیر کمتر بوده و با افزایش غلظت نیز کوچکتر می‌شود. رابطه ۱۰ ضریب هدایت حرارتی را برحسب میزان مواد جامد و قابلیت هدایت حرارتی آب قابل محاسبه می‌سازد.^(۷)

$$k_{\text{whey}} = (1 - 0.5x_s) k_{\text{water}} \quad (۱۰)$$

x_s کسر مولی مواد جامد موجود در آب پنیر برای محدوده غلظت ۷۰-۴۰ درصد ضریب هدایت حرارتی بشکل یک رابطه بر حسب دما و غلظت نیز داده شده است.^(۸)

$$k = 0.5656 - 0.2692 \times 10^{-2} x_s + 0.9122 \times 10^{-3} \theta - 0.2083 \times 10^{-4} x_s^2 + 0.79 \times 10^{-5} x_s \theta - 0.1417 \times 10^{-5} \theta^2 \quad (۱۱)$$

θ دما بر حسب درجه سانتیگراد است.

ظرفیت گرمایی

ظرفیت گرمایی یکی از پارامترهای مهم در موازنه‌های جرم و انرژی و همچنین محاسبات انتقال حرارتی واحدهای فرآیندی می‌باشد. همچنین جهت طراحی خشک‌کن علاوه بر ظرفیت گرمایی کنسانتره نیاز به داشتن ظرفیت گرمایی پودر نیز می‌باشد.

رابطه زیر ظرفیت گرمایی آب پنیر را بر حسب ظرفیت گرمایی اجزاء موجود قابل محاسبه می‌سازد.^(۹)

$$c_p (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.242x_{\text{lactose}} + 1.549x_{\text{protein}} + 1.675x_{\text{fat}} + 4.187x_{\text{water}} + 0.837x_{\text{ash}} \quad (12)$$

جهت محاسبه این پارامتر در غلظت‌های بالاتر می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$c_p = 1 - \left(1 - c_{p_{\text{initial}}}\right) \frac{X_{\text{initial}}}{X_{\text{concentrate}}} \quad (13)$$

جهت محاسبه c_p در غلظت‌های بین ۷۰-۴۰٪ رابطه زیر پیشنهاد شده است.^(۸)

$$c_p (\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 3833.1941 - 28.0083x_s - 1.7586\theta - 0.1098x^2 + 0.2341x\theta + 0.0504\theta^2 \quad (14)$$

ظرفیت گرمایی پودر که از ملزومات انجام موازنه‌های جرم و انرژی و طراحی واحدهای خشک‌کن می‌باشد را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$c_p (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.332 + 1.05 \times 10^{-2} \theta + 1.402 \times \theta^2 \quad (7\% \text{ moist.}) \quad (15)$$

کشش سطحی

کشش سطحی که معیاری از نیروی بین ملکولی (ملکولهای هم جنس و یا غیر هم جنس) است. یک پارامتر اساسی در طراحی تجهیزات فرآیندی می‌باشد، برای مثال در تبخیرکننده‌های فیلمی این پارامتر مهمترین عامل در محاسبه خوراک لازم جهت خیس شوندگی سطوح انتقال حرارت می‌باشد.

روشهای اندازه‌گیری کشش سطحی عبارتند از روش قطره‌چکان (falling drop) روش حلقه پلاتینی (platinum ring) و روش لوله موئین (capillary tube).

با استفاده از روش لوله موئین آزمایشات تعیین کشش سطحی انجام گرفته است و رابطه زیر با استفاده از این نتایج حاصل شده است که میزان کشش سطحی را بر حسب درصد مواد جامد قابل محاسبه می‌سازد.

$$\sigma = 49.195 - 0.28w_s + 0.00242w_s^2 \quad (16)$$

آنچه که سبب تفاوت میزان کشش سطحی آب پنیر از آب می‌شود (کشش سطحی آب ۷۵-۷۲ dyn/cm)، وجود اجزاء مختلف است. افزایش میزان چربی و پروتئین و اسیدهای چرب آزاد بدلیل داشتن سطح فعال سبب کاهش سطحی می‌شود.

منابع و مراجع

1. M.Le Maguer and J. Bourgois, Food engineering and process application, vol 1, 1984.
2. Sukumar, Outlines of dairy technology, 9th edition, 1991.
3. Welb Johnson and Aford, Fundamental of dairy chemistry, second edition, CBS Publisher Guth, E. AND Simha, R. On the viscosity of suspensions of spherial particles, Kolloid Z. 74:147, 1936.
4. Nedochele, y. and Schutz, R.A. Cahiers du groupe Francais de rheologie. Compt. R END. 265, 1967.
5. Tuczyncki and Scott Blair, G.M. Dimensionless from of the double logarithmic equation relating shear stress to shear rate as applied to slowly coagulating milk. Nature 216: 367, 1967.
6. R.Paul singh and Dennis R. Heldman, Introduction to food engineering, 1999. J. of Food engineering, vol. 21, 1994, pp. 31-40.
7. Henry V. Atherton, chemistry and testing of dairy products, 4th edition, 1987.