



مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال حرارت طی پاستوریزاسیون شیر خرمای در بسته‌بندی پت

نفیسه جهانبخشیان^{۱*}، صدیقه سلیمانی فرد^۲ و ماهرخ محمدپور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

^۱ استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

^۲ استادیار گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

^۳ دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

*مسئول مکاتبه: Email: jahanbakhshian.n@gmail.com

چکیده

زمینه تحقیقاتی: حل معادلات دو بعدی انرژی، پیوستگی و ممنوم با استفاده از نرم‌افزار کامسول مالتی فیزیکس. **هدف:** مدل‌سازی عددی انتقال حرارت طی پاستوریزاسیون شیر خرمای در بسته‌بندی پت. **روش کار:** پس از ترسیم هندسه ظرف و تعیین فیزیک مسئله، مش‌بندی با تعداد مش ۶۵۳۲ در کل و ۴۰۵ المان در مرزها صورت گرفت و حرارت‌دهی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که خصوصیات ترموفیزیکی مورد استفاده در مدل نظیر گرمای ویژه، هدایت حرارتی، دانسیته و ضریب انتقال حرارت در سطح، اندازه گیری یا تخمین زده شد. **نتایج:** نتایج مستخرج از مدل نشان داد که در نمونه شیر خرمای بسته‌بندی شده در پت، نقطه سرد بالاتر از مرکز هندسی قوطی قرار می‌گیرد که این امر به دلیل ویسکوزیته بالای شیر خرمای است که نقش هدایت را در انتقال حرارت پررنگ‌تر می‌کند و همچنین به دلیل ابعاد نسبتاً بزرگ ظرف مورد بررسی است. هم‌چنین سرعت حرکت سیال در ابتدا و انتهای فرایند، کم‌ترین و در شعاع‌های نزدیک‌تر به جداره و ارتفاع‌های پایین‌تر بیشینه بود. **نتیجه‌گیری نهایی:** شبیه‌سازی فرایند نشان داد که پس از ۳۵ دقیقه فرایند حرارتی، نقطه سرد قوطی به دمای محیط اطراف خواهد رسید. ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۱ میان داده‌های حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی، نشانگر مناسب بودن مدل شبیه‌سازی شده، برای پیش بینی فرایند پاستوریزاسیون شیر خرمای است.

واژگان کلیدی: خواص ترموفیزیکی، شیر خرمای، کامسول مالتی فیزیکس، مدل‌سازی

مقدمه

و بال در سال ۱۹۲۰ پیموده است و به‌عنوان روشی برای توسعه دادن بافت، طعم و رنگ شناخته شده است. هم-چنین پاستوریزاسیون کماکان به‌عنوان مؤثرترین روش نگهداری مواد غذایی به‌رغم وجود فرایندهای نوین،

استفاده از حرارت به‌عنوان یک روش مهم در حفظ و نگهداری، افزایش طول عمر و ماندگاری مواد غذایی مسیر نسبتاً طولانی را از زمان توسعه آن توسط بیگلو

در مورد مواد غذایی مایع با ویسکوزیته پایین می‌توان از کارهای صورت گرفته توسط غنی و همکاران (۲۰۰۶)، گو و همکاران (۲۰۲۰) و داتا و تکسرا (۱۹۸۸) نام برد. با توجه به اهمیت شیره خرما از نظر مواد مغذی موجود در آن و جلوگیری از فرایند بیش از حد و کاهش مواد مغذی و یا فرایند ناقص و مشکلات ایمنی محصول و هم-چنین عدم وجود مطالعه‌ای در زمینه مدل‌سازی پاستوریزاسیون این محصول و این شکل خاص از بسته‌بندی، در این پژوهش به مدل‌سازی انتقال حرارت طی پاستوریزاسیون شیره خرما در بسته‌بندی پت پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

تجزیه شیمیایی

تجزیه شیمیایی شیره خرما با استفاده از روش‌های مصوب AOAC برای رطوبت (۹۳۴/۰۱)، پروتئین (۹۶۰/۵۲)، چربی (۹۴۸/۲۲)، فیبر (۹۴۲/۰۵) و خاکستر (۹۴۲/۰۵) انجام گرفت (استاندارد شیمیایی ۱۹۸۴).

اندازه‌گیری پروفیل‌های دما در نقاط متفاوت پت

پس از آماده‌سازی ظروف پت حاوی شیره خرما، دو ترموکوپل نوع کا به ترتیب در عمق ۵ و ۹ سانتی‌متری نمونه قرار داده شد و نمونه در حمام آب گرم قرار گرفت. ترموکوپل دیگری نیز در محیط حمام آب قرار داده شد و دمای نمونه در بازه ۲۵ تا ۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از دیتالاگر^۳ در فواصل ۱ دقیقه‌ای تا رسیدن به زمان ۵۰ دقیقه، ثبت شد.

تعیین خواص ترموفیزیکی

الف) جرم حجمی

بدین منظور از روش پیکنومتری^۴ استفاده شد.

ب) ضریب انتقال حرارت

در این روش، یک قطعه آلومینیوم استوانه‌ای به وزن ۱۱۱۸ گرم و ابعاد ۷/۵×۹/۵ سانتی‌متر مورد استفاده قرار

شناخته شده است. هدف اصلی این فرایند غیر فعال‌سازی و از بین بردن پاتوژن‌ها به‌ویژه در غذاهای با اسیدیته بالا می‌باشد. فاکتورهای بسیاری بر این فرایند مؤثر هستند که از جمله مهم‌ترین آنها؛ شکل، اندازه و نحوه قرار گرفتن ظرف و همچنین ویژگی‌های نمونه و محیط حرارت‌دهی می‌باشد (غنی و همکاران ۱۹۹۹).

تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی انتقال حرارت در مواد غذایی مختلف صورت گرفته و هدف از این تحقیقات شبیه‌سازی فرایند به‌منظور به‌دست آوردن نقطه سرد نمونه و در نهایت ترکیب دما-زمانی مناسب جهت تکمیل فرایند پاستوریزاسیون همراه با حفظ مواد مغذی می‌باشد. جهانبخشیان و همکاران (۲۰۲۱) به مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم طی پاستوریزاسیون کنسرو زیتون در قوطی فلزی استوانه‌ای با استفاده از نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس^۱ پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که نقطه سرد قوطی به ۱۰ تا ۱۵ درصد انتهایی قوطی انتقال می‌یابد و مدت زمان لازم جهت از بین رفتن مقاوم‌ترین میکروارگانیسم در این نقطه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، ۶۰۰ ثانیه بود. آلباکی و همکاران (۲۰۱۹) یک هندسه استوانه‌ای-بیضوی را جهت پیش‌بینی پروفیل‌های دمایی و یافتن بهترین زمان جهت از بین بردن میکروارگانیسم‌های نمونه‌های گوشت انتخاب نمودند.

عباس نژاد و همکاران (۲۰۱۶) به مدل‌سازی انتقال حرارت در تخم مرغ کامل با استفاده از نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس پرداختند و دریافتند که مختصات کیسه هوایی نقش به‌سزایی در توزیع دمایی و نقطه سرد دارد. دیمو و همکاران (۲۰۱۳) به نقش موقعیت قرار گرفتن سه گونه متفاوت زیتون در قوطی پرداختند. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزار فلونت^۲ انجام شد. نتایج نشان داد که نحوه قرار گرفتن زیتون‌ها داخل بسته تأثیر به‌سزایی در میزان انتقال حرارت و مکان نقطه سرد قوطی دارد.

³ Data Logger

⁴ Picnometer

¹ Comsol Multiphysics

² Fluent

$$k_{se}(\theta) = \frac{1}{\sum \frac{\varepsilon_s(\theta)}{k_s(\theta)}} \quad [4]$$

$$k_{pa}(\theta) = \sum \varepsilon_s(\theta) k_s(\theta) \quad [5]$$

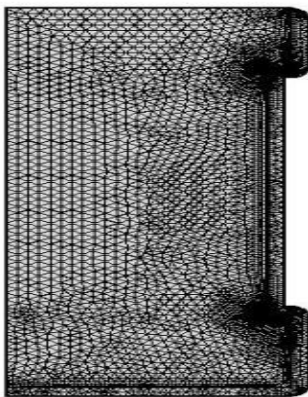
در روابط بالا K_s و ε_s به ترتیب هدایت حرارتی اجزای تشکیل دهنده شیر خرمای و ε_s کسر حجمی آن اجزاء می‌باشد.

مدل‌سازی

با استفاده از نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس نسخه ۵/۲، مدل انتقال حرارت در داخل پت طی فرایند پاستوریزاسیون که تابعی از عوامل درونی (دمای اولیه و ترکیب داخل پت) و عوامل بیرونی (دمای حمام آب) بود، جهت پیش بینی پروفیل دما، شدت فرایند حرارتی و تعیین نقطه سرد پت توسعه داده شد.

الف) رسم هندسه

هندسه پت در حالت دو بعدی با یک مستطیل به ارتفاع ۹/۵cm و عرض ۳/۷۵cm رسم گردید (شکل ۱).



شکل ۱- هندسه مش زده شده به منظور مدل‌سازی (نیمه راست پت)

Figure 1- Geometry (right half of the PET)

ب) تعیین فیزیک مسئله

از آنجاکه انتقال حرارت در پت حاوی شیر خرمای هم به صورت جابجایی و هم به صورت هدایت است، سیستم معادلات قانی و همکاران (۱۹۹۹)، مورد استفاده قرار گرفت.

فرضیات در نظر گرفته شده در این مدل عبارتند از:

(۱) در نظر گرفتن مقاومت حرارتی بدنه پت

گرفت. دو عدد ترموکوپل از نوع کا در سطح و در عمق ۱ سانتی‌متری آلومینیوم کار گذاشته شد. سپس تغییرات دما در نقاط مذکور در طی گرم کردن با استفاده از آب داخل حمام در دمای $25-70^{\circ}\text{C}$ به وسیله دیتالاگر ثبت گردید. ضریب انتقال حرارت در سطح با استفاده از شیب بخش خطی نمودار $\ln(T_{\infty} \pm T_{al})$ نسبت به زمان، به وسیله معادله زیر برآورد گردید:

$$h_m = \frac{M_{al} C_{p_{al}}}{S m} \quad [1]$$

که در رابطه بالا M_{al} جرم قطعه آلومینیومی، $C_{p_{al}}$ گرمای ویژه آلومینیوم و S و m به ترتیب سطح آلومینیوم و شیب نمودار $\ln(T_{\infty} - T_{al})$ نسبت به زمان می‌باشند. اثر تابش با صیقلی کردن سطح آلومینیوم حذف شد (روش کرید و جیمز ۲۰۰۶).

ج) گرمای ویژه

گرمای ویژه نمونه در محدوده دمایی $25-70^{\circ}\text{C}$ با استفاده از روابط گرمای ویژه هر یک از اجزای مواد غذایی با دما، به صورت زیر به دست آمد.

$$C_p = \sum (X_i \times C_{p_i}) \quad [2]$$

که در رابطه بالا، X کسر وزنی هر یک از اجزاء، C_p بیانگر رابطه گرمای ویژه با دما و i بیانگر ترکیب مدنظر می‌باشد (محسنین ۱۹۸۰).

د) هدایت حرارتی

به منظور یافتن مقادیر هدایت حرارتی از رابطه کریشر (معادله ۳) استفاده شد چرا که در این رابطه مدل‌های سری (K_{se}) و موازی (K_{pa}) که به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین تخمین از هدایت حرارتی را ایجاد می‌کنند، وجود دارد و نسبت این دو مدل در رابطه کریشر با استفاده از ضریب توزیع (f_k) بیان می‌گردد که در تحقیق حاضر این ضریب ۰/۵ در نظر گرفته شده است (همدمی و همکاران ۲۰۰۴):

$$k_{eff}(\theta) = \frac{1}{\frac{1-f_k}{k_{pa}(\theta)} + \frac{f_k}{k_{se}(\theta)}} \quad [3]$$

روابط مدل‌های موازی و سری در ادامه آمده است:

د) مش‌بندی و حل مسئله

مطابق شکل ۱ مش‌بندی به صورت غیر یکنواخت با ۶۵۳۲ المان در کل هندسه و ۴۰۵ المان در مرزها برای پت در نظر گرفته شد. در پایان مدت زمان حرارت‌دهی ۳۰۰۰ ثانیه تنظیم شد و مسئله حل گردید.

ه) تأیید مدل (معتبرسازی)

تایید مدل عددی توسعه داده شده به‌وسیله مقایسه پروفیل‌های دمای پیش بینی شده توسط مدل با داده‌های آزمایشگاهی در طی فرایند حرارتی انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه

جدول ۱ مقادیر میانگین ترکیبات نمونه شیره خرما مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهند.

جدول ۱- درصد جرمی ترکیبات نمونه شیره خرما

Table 1- Composition of date juice components	
components	%
Moisture content	23.89±0.007
Protein	0.78±0.004
Fat	0±0.0000
Fiber	0±0.0000
Ash	0.73±0.0007
Carbohydrate	84.6±0.05

همچنین میزان دانسیته اندازه‌گیری شده برای نمونه شیره خرما 1376 kg/m^3 محاسبه شد.

با توجه به در نظر گرفتن مقاومت حرارتی برای بدنه، مقادیر ویژگی‌های ترموفیزیکی پت به‌ترتیب برای دانسیته، هدایت حرارتی و گرمای ویژه 898 kg/m^3 ، 0.115 W/mK و 1982 J/kgK در نظر گرفته شد که این مقادیر از مقاله والکارسل و همکاران (۱۹۹۹) استخراج گردید.

خواص ترموفیزیکی شیره خرما**الف) گرمای ویژه**

گرمای ویژه شیره خرما با افزایش دما رو به افزایش می‌گذارد (شکل ۲). اگرچه گرمای ویژه با دما تغییر می‌کند، اما برای دامنه دمایی نزدیک به دمای محیط، این تغییرات بسیار جزئی می‌باشد. طبق همین اصل ملاحظه

۲) در نظر گرفتن شرایط بدون لغزش برای دیواره‌های کناری و زیرین پت

۳) وضعیت تقارن محوری و حل مسئله به صورت دو بعدی

۴) صرف‌نظر کردن از گرمای ایجاد شده در نتیجه پراکندگی انرژی ویسکوز

۵) قرار دادن حالت حرکت سیال در اثر تغییر دما

۶) در نظر گرفتن گرمای ویژه و ضریب انبساط حجم متغیر با دما و هدایت حرارتی ثابت

۷) در نظر گرفتن مرز باز^۱ در دیواره بالایی قوطی

ج) سیستم معادلات

۱- معادلات اصلی

معادلات پیوستگی

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \gamma) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u) = 0 \quad [6]$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial T}{\partial r} + \gamma \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \quad [7]$$

$$= \frac{k}{\rho c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

معادله منتوم در حالت عمودی

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S_M \quad [8]$$

با به‌کار بردن تخمین بوسینسک^۲ عبارت نیروی بدنه می‌شود:

$$S_M = -\rho_{ref} g [1 - \beta (T - T_{ref})] \quad [9]$$

۲- شرایط مرزی:

در بدنه ($0 < z < H$ و $r = R$)، در انتها ($0 \leq r \leq R$ و $z = 0$):

$$T = T_w \quad u = 0 \quad \gamma = 0$$

در محور تقارن ($0 < z < H$ و $r = 0$):

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \gamma = 0$$

در بالا ($0 \leq r \leq R$ و $z = H$):

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad u = 0 \quad \gamma = 0$$

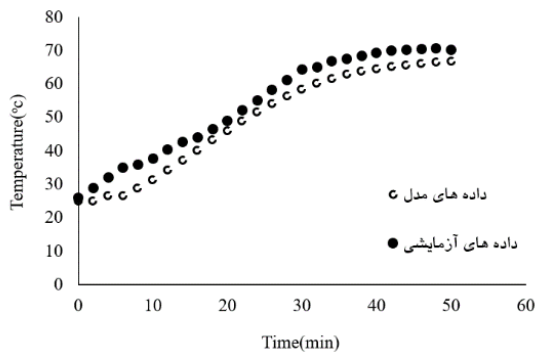
شرایط اولیه در $0 \leq z \leq H$ و $0 \leq r \leq R$ به صورت زیر می‌باشد:

$$T = T_i \quad u = 0 \quad \gamma = 0$$

² Boussinesq

¹ Open Boundry

برمبنای ورودی‌های ذکر شده نتایج حاصل از مدل در برابر نتایج آزمایشی رسم شد که در شکل ۴ برای ارتفاع ۵cm سانتی‌متری قابل مشاهده است. در نتایج مدل نشان داده شده در این شکل، هر دو انتقال حرارت هدایتی و جابجایی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مقایسه داده‌های آزمایشی و مدل‌سازی شده برای ارتفاع ۵ سانتی‌متری از بسته‌بندی پت

Figure 4 - Comparison of experimental and predicted data for a height of 5 cm from the PET packaging

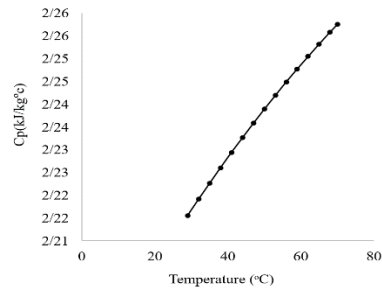
مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل‌سازی شده نشان می‌دهد که ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۱ می‌باشد که بیانگر انطباق بسیار بالای داده‌های آزمایشی و مدل در نهایت تأیید مدل، می‌گردد. چنانچه در مدل فقط از انتقال حرارت هدایتی استفاده شود، باز هم داده‌های آزمایشی و مدل انطباق بالایی خواهد داشت. $(R^2=0.9895)$ این یافته‌ها نشان می‌دهد در مواردی مانند نمونه شیر خرمای، به دلیل ویسکوزیته بالا عمده انتقال حرارت از طریق هدایت بوده و تأثیر جابجایی بر روند انتقال حرارت ناچیز است.

نتایج مستخرج از مدل

تعیین نقطه سرد

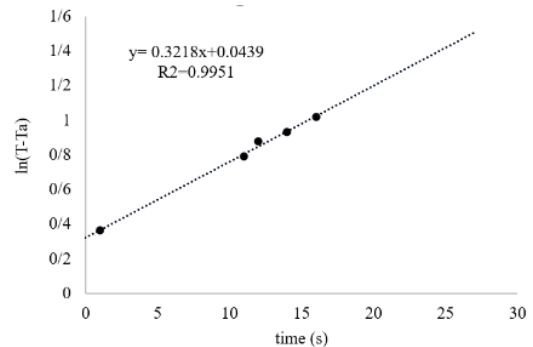
همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، نقطه سرد در پت در قسمت بالا و مرکز قرار می‌گیرد و به‌طور دقیق مختصاتی برابر با $r=0$ و $Z=9/5\text{cm}$ دارد. در واقع می‌توان گفت در ظروف پت برای شیر خرمای نقش انتقال حرارت از طریق هدایت غالب است که در بخش تأیید مدل نیز این موضوع اثبات شد. در مواردی که عمده حرارت‌دهی از

می‌گردد که در شکل ۲ تغییر گرمای ویژه در محدوده دمایی حدود ۵۰ درجه‌ای در حد ۰/۰۴ می‌باشد (قنبرزاده، ۱۳۸۳،



شکل ۲- گرمای ویژه نمونه شیر خرمای طی فرایند حرارتی
Figure ۲ - Specific heat of date juice during the thermal process

ب) ضریب انتقال حرارت در سطح پت



شکل ۳- منحنی $\ln(T_{\infty}-T_{Al})$ نسبت به زمان برای

برآورد ضریب انتقال حرارت در سطح پت طی حرارت‌دهی
Figure 3- $\ln(T_{\infty}-T_{Aluminum})$ vs time to estimate the heat transfer coefficient at PET surface during heating

مقادیر ضریب انتقال حرارت در سطح با توجه به شیب‌های به‌دست آمده (شکل ۳) برای پت برابر با $43\text{W/m}^2\text{°C}$ می‌باشد.

تأیید مدل

تأیید مدل ریاضی توسعه یافته در نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس، از طریق مقایسه پروفیل دمای پیش بینی شده توسط مدل با داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. در مدل، گرمای ویژه متغیر با دما و دانسیته و هدایت حرارتی شیر خرمای به ترتیب ۱۳۷۶ و ۰/۴ در نظر گرفته شد. دمای اولیه شیر خرمای ۲۵ و دمای پاستوریزاسیون 70°C در نظر گرفته شد.

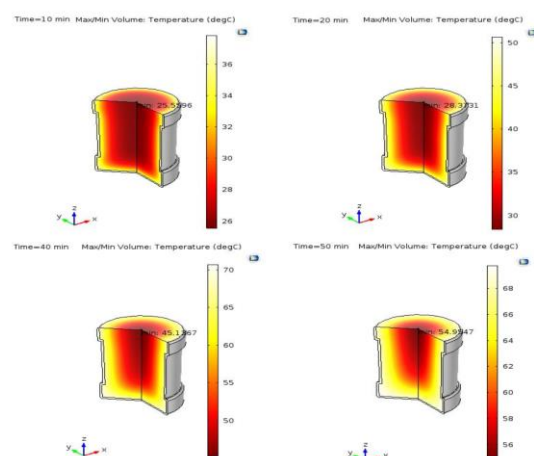
سرعت حرکت سیال

شکل ۶ سرعت حرکت سیال در شیره خرماي بسته‌بندی شده در ظروف پت را پس از ۵۰ دقیقه حرارت‌دهی، نشان می‌دهد. میانگین سرعت حرکت سیال برابر با 1.0×10^{-7} متر بر ثانیه می‌باشد. شکل ۷ سرعت حرکت سیال را در دو شعاع متفاوت ($r=1/5\text{cm}$ و $r=2/2\text{cm}$) به‌عنوان تابعی از ارتفاع ظرف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش ارتفاع از کف ظرف سرعت حرکت سیال افزایش می‌یابد چرا که سیال گرم شده در کف و جداره‌ها سبک شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. بنابراین با افزایش ارتفاع، سرعت حرکت نیز افزایش می‌یابد. همچنین در زمان ۵۰ دقیقه، سرعت در بخش‌های درونی‌تر ظرف بیش‌تر از جدار قوطی است. زیرا در بخش‌های نزدیک به جداره، شیره خرما زودتر به دمای بیرونی رسیده و تفاوت دمایی از بین می‌رود. اما در قسمت‌های درونی، همچنان کم‌تر از بخش‌های کناری است و همین تفاوت دمایی عامل ایجاد سرعت بالاتر سیال خواهد بود.

شکل ۸ سرعت حرکت سیال در ۴ نقطه متفاوت ظرف را، طی مدت زمان حرارت‌دهی نشان می‌دهد. واضح است که حداقل سرعت در ابتدا و انتهای زمان حرارت‌دهی است. زیرا در ابتدای حرارت‌دهی دما در نقاط مختلف بالا نرفته و در نتیجه تفاوت دمایی ناچیز و سرعت حرکت نیز ناچیز است و در انتهای فرایند حرارتی با توجه به یکنواخت شدن دما در نقاط مختلف و رسیدن دمایی نقاط مختلف به دمای محیط اطراف، مجدداً تفاوت دمایی ناچیز شده و سیال تقریباً از حرکت می‌ایستد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که سرعت حرکت در جداره‌ها (شعاع ۴/۵) بسیار بالاتر از مرکز (شعاع ۰/۵) می‌باشد. زیرا سیال ابتدا در جداره‌ها گرم شده و به سمت بالا حرکت می‌کند و با توجه به نوع انتقال حرارت که عمدتاً هدایت است، حرکت در مرکز در زمان‌های انتهایی اتفاق می‌افتد که تقریباً نقاط مختلف هم‌دما شده و تفاوت دمایی ناچیز می‌گردد. در این شکل نیز می‌توان دید که ارتفاع‌های

طریق هدایت باشد، نقطه سرد قوطی بالاتر از مرکز هندسی ظرف قرار خواهد گرفت که این امر به دلیل انتقال مولکول به مولکول حرارت می‌باشد و از آنجاکه در بخش بالایی ظرف خلأ در نظر گرفته شده است و انتقال حرارت در خلأ ناچیز است، از آن صرف‌نظر شده است. بنابراین انتقال گرما فقط از دیواره‌ها و کف ظرف صورت پذیرفته و از بالا عملاً حرارتی به نمونه منتقل نشده و نقطه سرد به سمت بالای قوطی میل کرده است. چنانچه انتقال حرارت از طریق جابجایی نیز در نمونه شیره خرما در نظر گرفته شود، می‌توان گفت زمانی که سیال کناره‌های ظرف گرم می‌شود به سمت بالا حرکت کرده اما جریان چرخش به داخل ظرف اتفاق نمی‌افتد. زیرا در همان لایه‌های بالایی به دلیل سطح زیاد انتقال حرارت، سیال گرمای خود را از دست داده و جریان به درون متوقف می‌شود. بنابراین نقطه سرد در بالای قوطی قرار می‌گیرد.

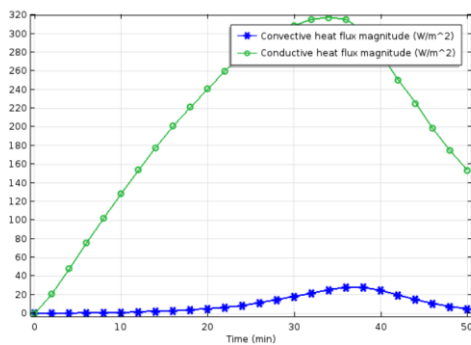
در نتایج حاصل از پاستوریزاسیون پالپ تمشک در قوطی که توسط بادین (۲۰۲۲) صورت گرفته است، نقطه سرد قوطی به دلیل ویسکوزیته بالای نمونه بالاتر از مرکز هندسی می‌باشد که با نتایج تحقیق حاضر در توافق است.



شکل ۵- موقعیت ناحیه سرد پت طی حرارت‌دهی در ۷۰ درجه سلسیوس در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای (نیمه راست پت)

Figure 5- Position of the cold zone of the pet during heating at 70 ° C at 10 minutes intervals (right half of the PET)

این موضوع ثابت شد. بیشینه شار حرارتی در حالت جابجایی 30 W/m^2 و در حالت هدایت بیش از 320 W/m^2 می‌باشد. در واقع به دلیل ویسکوزیته بالای نمونه شیر خرم انتقال حرارت از طریق هدایت بیش از ۱۰ برابر دو نوع هدایتی و جابجایی پس از ۳۵ دقیقه و با ثابت شدن دما در 70°C کاهش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که نمودار سرعت کاملاً تابع شار حرارتی بوده و در زمان‌هایی که بیش‌ترین شار حرارتی وجود دارد، سرعت نیز بیشینه است. نتایج این تحقیق با نتایج جهان بخشیان و همدی (۲۰۲۱) و نتایج ربیعی و همکاران (۲۰۰۶) در توافق است.



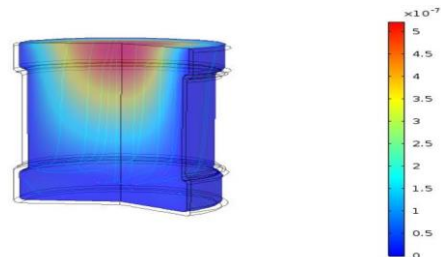
شکل ۹- میانگین شار حرارتی هدایتی و جابجایی در پت طی فرایند حرارت‌دهی

Figure 9 - Average conductive and convective heat fluxes in the PET during the heating process

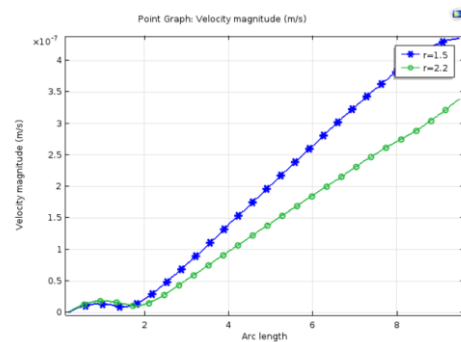
نتیجه گیری کلی

در تحقیق حاضر انتقال حرارت در نمونه شیر خرمای بسته‌بندی شده در ظرف پت طی مدت زمان پاستوریزاسیون در 70°C درجه سلسیوس با استفاده از نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس در حالت دو بعدی مدل‌سازی شد. در روابط مربوط به انتقال حرارت (قانون دوم فوریه)، دانسیته نمونه اندازه گیری شد. گرمای ویژه و هدایت حرارتی نیز با استفاده از مدل‌های موجود وابسته به دما تخمین زده شدند. انتقال حرارت در سطح با استفاده از قانون سرمایش نیوتن و اندازه گیری ضریب انتقال حرارت در سطح به دست آمد. با

پایین‌تر به همان دلیلی که قبلاً ذکر شد، سرعت بالاتری دارند.

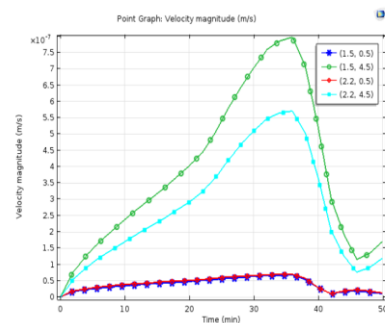


شکل ۶- سرعت حرکت سیال پس از ۵۰ دقیقه حرارت‌دهی
Figure 6- Fluid velocity after heating for 50 minutes



شکل ۷- سرعت حرکت شیر خرم در بسته‌بندی پت در دو شعاع متفاوت پس از ۵۰ دقیقه حرارت‌دهی به‌عنوان تابعی از ارتفاع

Figure 7- The velocity of date juice in PET packaging in two different radii after 50 minutes vs height



شکل ۸- سرعت حرکت شیر خرم در مکان‌های متفاوت طی مدت زمان فرایند حرارتی

Figure 8 - Velocity of date juice in different places during the thermal process

مقایسه انتقال حرارت از طریق جابجایی و هدایت

شکل ۹ نشان می‌دهد که شار حرارتی از طریق هدایت بسیار بیش‌تر از جابجایی است که در بخش‌های قبل نیز

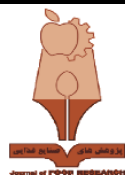
استفاده از مقایسه با نتایج آزمایشی با ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۱ تایید شدند و بنابراین می‌توان از نتایج مدل از جمله مکان دقیق نقطه سرد ($t=0$ و $Z=9/5\text{cm}$)، سرعت حرکت سیال و مقایسه روش‌های مختلف انتقال حرارت بهره برد.

فرضیات در نظر گرفته شده در مدل و در نظر گرفتن مقاومت حرارتی برای بسته همراه با فرض خلأ در مرز بالایی، نقطه سرد قوطی به سمت بالای بسته سوق می‌کند. این امر نشان می‌دهد که هدایت حرارتی عامل اصلی انتقال حرارت در این بسته است. داده‌های مدل با

منابع مورد استفاده

- قنبر زاده ب و قنبرزاده ص، ۱۳۸۳. فیزیک مواد غذایی و سیستم‌های فرآوری غذایی. انتشارات آرون. صفحه ۲۸۳-۴۵۴.
- Abbasnezhad B, Hamdami N, Monteau JY and Vatankhah H, 2016. Numerical modeling of heat transfer and pasteurizing value during thermal processing of intact egg. *Food Science & Nutrition* 4(1): 42-49.
- Albuquerque CDD, Curet S and Boillereaux L, 2019. A 3D-CFD-heattransfer-based model for the microbial inactivation of pasteurized food products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 54: 172-181.
- Awuah GB, Ramaswamy HS and Economides A, 2007. Thermal processing and quality: Principal and overview. *Chemical Engineering and Processing* 46: 587-602.
- Badin EE, Augusto PED, Quevedo-Leon RA, Ibarz A, Ribotta PD and Lespinard AR, 2023. Raspberry pulp pasteurization: Computational fluid dynamics modeling and experimental validation of color and bioactive compound retention. *Journal of Food Process Engineering* 46(1): e14168.
- Chemists AOAC, 1984. Standard official methods of analysis of the association of analytical chemists. (14th ed.).
- Creed PG and James SJ, 2006. Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer. *Journal of Food Science* 50(2): 285-288.
- Datta AK and Texeira AA, 1988. Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during natural convection heating of canned liquid foods. *Journal of Food Science* 53(1): 191-195.
- Dimou A, Panagou E, Stoforos NG and Yanniotis S, 2013. Analysis of thermal processing of table olives using computational fluid dynamics. *Journal of Food Science* 78(11): 1695-1703.
- Ghani AGA and Farid M, 2006. Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid-liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 7(1-2): 55-61.
- Ghani AGA, Farid MM and Chen XD, 2002. Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 51:77-83.
- Ghani, AGA, Farid MM and Chen XD, 2002a. Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of *Bacillus stearothermophilus* in food pouches. *Journal of Food Engineering* 51:221-228.
- Ghani AGA, Farid M, Chen XD and Richards P, 1999. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food duering sterilization using computational fluid dynamics(CFD). *Journal of Food Engineering* 42: 207-214.
- Guo WPS, Gharibzahedi SMT, Guo Y and Wang Y, 2020. Effects of temperature and fluid velocity on beer pasteurization in open and closed loop heating systems: numerical modeling and simulation. *International Journal of Food Engineering* 16(7).
- Hamdami N, Monteau J.-Y and Bail AL, 2004. Thermophysical properties evolution of French partly baked bread during freezing. *Food Research International* 37(7): 703-713.
- Jahanbakhshian N and Hamdami N, 2021. Numerical simulation of heat and mass transfer during heating and cooling parts of canned-green-olive pasteurization. *Journal of Food Process Engineering* 44(12): 1-12.
- Khakbaz Heshmati M, Shahedi M, Hamdami N, Hejazi MA, Motalebi AA and Nasirpour A, 2014. Mathematical Modeling of Heat Transfer and Sterilizing Value Evaluation during Caviar Pasteurization. *Journal of Agricultural Science and Technology* 16(4): 827-839

- Kumar A, Bhattacharya M and Blaylock J, 1990. Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products. *Journal of Food Science* 55(5): 1403–1411.
- Mahesh NV and Kannan A, 2006. CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering* 77: 1024–1036.
- Mohsenin NN, 1980. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. CRC Press,
- Plazl I, Lanker M and Koloini T, 2006. modeling of temperature distributions in canned tomato based dip during industrial pasteurization. *Journal of Food Engineering* 75: 400–406.
- Rabiey L, Flick D and Duquenoy A, 2007. 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilization of large particles in a cylindrical vertical can. *Journal of Foode Engineering* 82(4): 409-417.



Journal of Food Research, 2023,33(3):125-135
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>

OPEN ACCESS



© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)
DOI: 10.22034/FR.2023.55862.1869

CFD modeling of heat and mass transfer during pasteurization of date syrup in PET

N Jahanbakhshian^{1*}, S Soleimanifard² and M Mohammadpour³

Received: June 25, 2022

Accepted: February 19, 2023

¹Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

²Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

³MSc in Food Engineering, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

*Corresponding author: Email: jahanbakhshian.n@gmail.com

Introduction: In this study, the two-dimensional equations of energy, mass, and momentum were solved using Comsol Multiphysics 5.2 software for pasteurizing date syrup in polyethylene terephthalate (PET) packaging. The importance of date syrup has been quite studied before in terms of its valuable nutritional values (especially heat-sensitive vitamins). Research has shown that the appropriate heating process is required to maintain these values. Modeling (especially numerical modeling) is a robust method to predict the product temperature profile at every sample point during the process. It accurately predicts the slowest heating zone (SHZ), which should be reached at the pasteurization temperature and remain quiet enough at that temperature. In this way, not only are resistant microorganisms deactivated and killed but the product's nutritional values are also maintained. Comsol Multiphysics was applied in this research to predict the accurate position of the slowest heating zone, the dominant heat transfer method, and fluid velocity.

Materials and methods: Thermophysical properties are necessary for heat transfer models. We estimated thermal conductivity (k) using the Krischer model. This model estimates a more logical thermal conductivity because both series and parallel models are incorporated into this model. The ratio of parallel and series models was assumed to be the same ($f = 0.5$) in our research. Specific heat was modeled using a suit model based on the mass fraction of components and their specific heat by temperature through a parallel model. Density is measured using a defined volume container. For this purpose, a pycnometer was used, and its volume was measured using distilled water filled in. The weight of syrup divided into its volume gave the density. The surface heat transfer coefficient (h) was determined by unsteady temperature measurements. This method measured the temperature of an aluminum container exactly at the same size as the PET, and h was obtained using the slope of $\ln(T_{\infty} \pm T_{al})$ diagram. The container's geometry should be drawn at the first modeling stage. In our case, the container was a hard part as the container did not have a specific geometric shape and had a thickness with thermal resistance. Second, the physics based on appropriate equations were selected, followed by defining initial and boundary conditions. The density, thermal conductivity, and surface heat transfer values were 1376 kg/m^3 , $0.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, and $43 \text{ W/m}^2\text{C}$, respectively, and specific heat was

temperature-dependent. Next, meshes were defined. In the present study, the number of meshes used in the model was 6532 triangular elements, 405 of which were in boundaries. There should be logical assumptions to be able to model a process. In our study, the assumptions of Ghani were used. Finally, the model was run. In the experimental part of this research, heating was performed at 70°C for 3000 s. Then, the temperatures of different container parts and syrup were collected using a K-type thermocouple and a data logger. Finally, the collected data at different parts of the package were used to verify the model.

Results and discussion: The comparison criteria between the predicted and experimental figures used to evaluate the goodness of fit, namely the correlation coefficient ($r = 0.999$), indicated that the model was valid and we could benefit from the model results. The results showed that the cold point migrated towards the top of the container because of the high product viscosity and the big can geometry. In fact, the dominant way of heat transfer was conduction. The explanation is that when heat transfer is molecule-by-molecule, the position of the cold point migrates toward the top of the container as at the top boundaries. Therefore, vacuum condition at headspace is considered. The accurate position of the slowest heating zone was at $r = 9.5$ cm and $z = 0$. The fluid velocity was maximum near the can wall and at a lower height and minimum at the beginning and the end of the process due to less temperature gradient.

The mean velocity value in this situation was 1.562×10^{-7} m/s. The plots of fluid velocity versus container radius and height showed that by increasing the height, fluid velocity rose because the fluid warmed up and flew toward the top of the can. The velocity in the interior radius after about 50 min of the heating part was more than the wall vicinity because the warmed fluid migrated toward the top of the can would be immobilized, and heat exchange with the cold parts would occur there. As a result, the fluid with a lower temperature would return to the bottom. In this process, after about 50 min when the fluid around the wall reached the environment temperature, there would be a temperature gradient near the core with colder fluid and the wall, which resulted in higher fluid velocity. The results of fluid velocity during the heating time show that this factor would decrease by increasing heating time due to the reduction in a temperature gradient. Obviously, the minimum velocity would be at the beginning and the end of the heating process when the temperature gradient was minimum. Different velocity plots demonstrated that at the beginning times of the heating process, the maximum velocity was near the wall ($r = 4.5$ cm). In addition, at the end of the process, it was at the interior parts near the center ($r = 0.5$ cm) regarding the difference in the magnitude of the temperature gradient at different parts of the fluid. We can also compare heat transfer by conducting or combining conduction-convection in our model. The model showed that the maximum heat flux is 320 W/m^2 for conduction and 30 W/m^2 for the convection part. These figures indicate the importance of conduction in the date syrup sample is more than ten times convection. The magnitude of heat flux in both conditions after around 35 min and by temperature stabilization at 70°C reduced dramatically.

Conclusion: The simulation showed that the required time for pasteurization was 35 min, and the cold point reached the autoclave temperature.

Keywords: Comsol Multiphysics, Date Syrup, Modelling, Thermophysical properties