

بررسی عددی تغییرات منطقه سرد کنسرو غذایی نشاسته‌ای تحت تاثیر غلظت نشاسته و دمای اولیه پر کردن

آزاده رنجبر ندامانی^۱، امان محمد ضیایی فر^{۲*}، مهدی پروینی^۳، مهدی کاشانی نژاد^۴، یحیی مقصدلو^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

چکیده

تعیین دقیق منطقه سرد کنسرو غذایی بواسطه دیرتر رسیدن آن به درجه استریلیزاسیون اهمیت بالایی در تعیین شدت یک فرایند حرارتی دارد. در این مطالعه با کمک روش‌های عددی، اثر غلظت محلول‌های ۳/۵ و ۵٪ نشاسته و دمای پرکردن ۵۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد بر ژلاتینه‌شدن نشاسته و مکان نقطه سرد قوطی مورد مطالعه قرار گرفت. قوطی‌ها بدون سرفضای خالی و بصورت ایستا حرارت‌دهی شدند. نتایج نشان داد که در قوطی‌های بدون سرفضای خالی در حالت ایستا، نقطه سرد در نزدیکی یک-دهم انتهایی قوطی قرار دارد. تغییر غلظت نشاسته از ۳/۵ به ۵ درصد، باعث طولانی‌تر شدن زمان فرآیند می‌شود. این افزایش زمان فرآیند حرارتی، در یک-دهم انتهایی قوطی بیشتر از سه-دهم انتهایی است. زمان ثابت شدن دمای نقطه سرد در هر دو نقطه سه-دهم و یک-دهم انتهایی نیز با تغییر غلظت تغییر می‌کند. اختلاف دما در نمونه ۵ درصد در زمان ثبات دما بسیار چشمگیرتر از اختلاف دما در لحظه افزایش دما در نمودار حرارتی ۳/۵ درصد است. با افزایش غلظت نشاسته در محلول، زمان لازم برای جلوگیری از سیکل حرارتی در نمودار دما- زمان (f) در سه-دهم انتهایی کاهش و در یک-دهم انتهایی افزایش می‌یابد. این اختلاف شیب در غلظت‌های ۳/۵ و ۵ درصد بیشتر از یک-دهم انتهایی است. علت آن ژلاتینه‌شدن سریع نشاسته در یک سوم انتهایی قوطی است.

واژه‌های کلیدی: دمای پرکردن، ماده غذایی با منحنی حرارتی شکسته، نفوذ حرارتی، منطقه سرد

مقدمه

محصول یا کاهش کیفیت آن جلوگیری گردد (Karaduma et al. 2012). به همین دلیل، مطالعات انتقال حرارت در قوطی از اهمیت بالایی برخوردار است.

از جمله مهمترین فاکتورهای مؤثر در قوطی کردن مواد خوراکی مایع که انتقال حرارت در آن‌ها به صورت جابجایی است، ویسکوزیته سیال می‌باشد. هرچه ویسکوزیته سیال بیشتر باشد، مقاومت آن در برابر جابجایی افزایش و در نتیجه نرخ انتقال حرارت کندتر خواهد بود (Tattiyakul et al. 2002). Berry و همکاران (۱۹۷۹) و Bradshaw (۱۹۸۰)، به ترتیب روی نشاسته ذرت و سوپ کرفس، آزمون‌های نفوذ حرارتی انجام دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ویسکوزیته محصولات که قبل از فرآوری اندازه گرفته شده بود، اندیس استریلیزاسیون کاهش یافت.

Ramaswamy و همکاران (۱۹۹۳) گزارش دادند که تغییر در ویسکوزیته نشاسته، به دلیل تغییر در غلظت از ۳٪ به ۴٪، باعث کاهش ۶۰٪ نرخ انتقال حرارت‌دهی شد. آن‌ها در این رابطه گزارش دادند که بعد از حرارت‌دهی دیسپرسیون‌های ۳ و ۴٪ نشاسته ذرت

یکی از روش‌های افزایش مدت ماندگاری بسیاری از مواد خوراکی، استفاده از فرآیندهای حرارتی است. در این فرآیندها، ماده خوراکی در مدت زمان معینی تحت دماهای نسبتاً بالا قرار می‌گیرد. درک پدیده انتقال حرارت در فرآیندهای استریلیزاسیون، از نقطه نظر بهبود طراحی فرآیند برای رسیدن به استریلیته مناسب بدون آسیب رساندن به فاکتورهای کیفی محصول خوراکی، از اهمیت زیادی در صنایع غذایی برخوردار است.

در فرآیندهای استریلیزاسیون در قوطی، به دلیل پیچیدگی انتقال حرارت از محیط به قوطی و سپس به محصول، شناسایی الگوهای دمایی می‌تواند به استریلیزاسیون بهینه منجر شده واز پخته‌شدن

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانش آموخته دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه سمنان

* - نویسنده مسئول: (Email: ziaifar@gmail.com)

DOI: 10.22067/iftstr.v1395i0.43900

به سمت کف قوطی حرکت کرده و در حدود ۲۵-۲۰٪ انتهایی قوطی باقی می‌ماند. همچنین آن‌ها متوجه تشکیل یک جریان ثانویه و اثر آن بر منطقه سرد شدند. به‌طوریکه دریافتند یک جریان رو به بالا در دیواره و یک جریان رو به پایین در مرکز قوطی مشاهده می‌شود. در نهایت نتایج آزمایشات خود را با نتایج حالت عمودی قوطی بررسی کرده و دریافتند در حالت عمودی به دلیل بیشتر بودن طول قوطی، انتقال حرارت سریعتر است.

در مورد ژلاتینه‌شدن نشاسته و مدل‌های بیان شده برای آن طی حرارت‌دهی، Lagarrigue و Alvarez (۲۰۰۱) به مرور مدل‌های مربوطه پرداختند. آن‌ها اشاره کردند که نشاسته ژلاتینه‌شده در نرخ برشی s^{-1} ۱۵۰۰-۱، معمولاً از مدل قانون توان و هرشل-بالکلی پیروی می‌کند. هرچند رفتار دیسپرسیون‌های نشاسته اغلب رقیق-شونده با برش است، اما رفتار آن قبل از تورم، به دلیل محتوای بالای آب، مانند آب نیوتنی (۰/۰۰۱ Pa.s در ۲۰ درجه سانتی‌گراد) است اما در مراحل اولیه ژلاتینه‌شدن یا در دمای بالا (دمای $^{\circ}C$ ۱۲۱ و غلظت پایین ۳/۵۹-۲/۷۲ w/w) رفتار غلیظ‌شونده و در مراحل بعد از ژلاتینه‌شدن تا انتهای فرآیند، رفتار رقیق‌شونده با برش از خود نشان می‌دهد (Lagarrigue and Alvarez, 2001). بطور کلی دیسپرسیون‌های ژلاتینه‌شده نشاسته در نرخ‌های برشی پایین، از خود تنش تسلیم نشان می‌دهند که این تنش تسلیم به غلظت نشاسته، وزن بخش متورم‌شده گرانول‌های نشاسته، متوسط قطر گرانول‌ها و روش ژلاتینه‌شدن بستگی دارد (Lagarrigue and Alvarez, 2001).

افزایش زمان حرارت‌دهی به‌منظور رسیدن منطقه سرد به درجه استریلیزاسیون، می‌تواند بر ویژگی‌های کیفی و تغذیه‌ای محصولات خوراکی تأثیر قابل توجهی داشته باشد. به همین منظور در مطالعات ذکر شده، تلاش شده است تا اثر ویسکوزیته و وابستگی آن با دمای حرارت‌دهی را بر نرخ انتقال حرارت در سیالات خوراکی بررسی کنند. از آنجایی که بیشتر سیالات خوراکی رفتار غیر نیوتنی از خود نشان می‌دهند، بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه، روی سیالات مدل که رفتار غیر نیوتنی دارند، انجام شده‌اند از جمله سوسپانسیون‌های بنتونیت، کربوکسی متیل سلولوز و دیسپرسیون‌های نشاسته.

در این مطالعه اثر غلظت محلول‌های ۳/۵ و ۵٪ نشاسته و دمای اولیه ۵۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد بر ژلاتینه‌شدن نشاسته و مکان نقطه سرد قوطی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحقیق قوطی‌ها بدون سرفضای خالی و به‌صورت عمودی ایستا حرارت‌دهی می‌شوند. نتایج برای صنایع کنسروسازی که از حرارت در فرآیندهای خود استفاده می‌کنند، مفید خواهد بود. بنابراین، هدف این مطالعه، تحلیل عددی الگوهای دمایی ماده غذایی مدل بر پایه نشاسته است تا نقش آن بر تعیین مکان نقطه سرد مورد بررسی قرار گیرد.

مومی با اتصالات عرضی در ریتورت دورانی انتها-به-انتها، ویسکوزیته ظاهری به دلیل ژلاتینه‌شدن نشاسته افزایش می‌یابد. Tattiyakul و همکاران (۲۰۰۲) به مطالعه عددی انتقال حرارت در دیسپرسیون ۳/۵٪ نشاسته در قوطی 303×406 تحت دوران ملایم rpm ۱۲-۵ در دمای $^{\circ}C$ ۱۲۱ ریتورت پرداختند. آن‌ها برای حل معادلات انرژی، جرم و حرکت، از روش عنصر محدود استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که به دلیل دوران قوطی، در لایه مرزی دیواره قوطی نشاسته ژلاتینه شده وجود نداشت و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی همخوانی داشتند. آن‌ها همچنین دریافتند که طبق نظر Rao و Yang (۱۹۸۸)، در صورت طبیعی بودن جابجایی، عدد ناسلت افزایش یافته و انتقال حرارت از بالای قوطی به پایین آن بهبود می‌یابد و اگر از جابجایی اجباری استفاده شود، در صورتیکه سرفضای خالی وجود نداشته باشد یا قوطی دوران داشته باشد، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. Teixeira و Datta (۱۹۸۸) به‌صورت عددی پروفایل‌های سرعت و دمای انتقالی ماده خوراکی مایع‌قوطی‌شده در ریتورت ثابت را پیش‌بینی کرده و دریافتند که منطقه سرد در حدود یک-دهم انتهایی قوطی تشکیل می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند در صورتیکه آب در قوطی به شکل ثابت حرارت ببیند، یک گردش سیال در کف قوطی مشاهده می‌شود. Kumar و همکاران (۱۹۹۰) نیز از روش عنصر محدود برای شبیه‌سازی حرارت‌دهی مواد خوراکی غیرنیوتنی در قوطی عمودی که فقط از دیواره بالایی تا دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دید، استفاده کردند. آن‌ها نتایج این شبیه‌سازی را با حالت هدایت مقایسه کردند. آن‌ها در نهایت به این نتیجه رسیدند که در حالت جابجایی طبیعی، منطقه سرد در نزدیکی کف قوطی باقی می‌ماند. Bhattacharya و Kumar (۱۹۹۱) انتقال حرارت در یک سیال شبه پلاستیک را که از تمام جهات در قوطی حرارت می‌دید، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ضخامت لایه‌ای از سیال که در حال حرکت به سمت بالا می‌باشد، در مایعات غلیظ، حدود ۱۶-۱۵ mm است. Ghani و همکاران (۲۰۰۲) استریلیزاسیون در قوطی افقی حاوی سوپ پرتقال را بررسی کرده و محاسبه کردند که نرخ حرارت‌دهی در قوطی عمودی سریعتر بود. آن‌ها در این مطالعه با کمک دینامیک محاسباتی سیالات توسط نرم‌افزار فونیکس^۲ به روش حجم محدود، به‌صورت عددی پروفایل‌های دما درجه حرارت و سرعت را شبیه‌سازی کرده و دمای انتقالی، الگوی جریان و شکل منطقه سرد طی انتقال حرارت به روش جابجایی طبیعی را پیش‌بینی کردند. آن‌ها طی این مطالعه دریافتند که دمای منطقه سرد حداکثر به ۱۰۷ درجه سانتی‌گراد رسیده و به دلیل جابجایی طبیعی

1 End-over-end
2 Computational Dynamic Fluids
3 Phoenics

مواد و روش‌ها

تهیه دیسپرسیون نشاسته

در این تحقیق از دیسپرسیون‌های ۳/۵ و ۵٪ نشاسته استفاده شد. برای این منظور، در محلول‌های ۳/۵٪ و ۵٪ نشاسته، به ترتیب ۳/۵ و ۵ گرم پودر نشاسته در ۹۷/۵ و ۹۵ گرم آب مقطر با دمای ۲۵°C حل شد. نکته‌ای که در زمینه تهیه دیسپرسیون نشاسته وجود دارد، رسوب آن در ظرف طی حرارت‌دهی در قوطی است. برای این منظور از پیش گرم کردن تمام یا قسمتی از محلول نشاسته در مراحل اولیه ژلاتینه‌شدن (در دمای ۶۵-۵۰°C برای نشاسته ذرت و گندم) استفاده می‌شود. Keetels و همکاران (۱۹۹۶) روشی را برای محدود کردن ته نشست نشاسته پیشنهاد کردند. طبق این روش، ۲۰٪ وزن نشاسته مورد نظر، قبل از آزمون حرارت داده می‌شود تا ویسکوزیته فاز پیوسته افزایش یابد و سپس ۸۰٪ مابقی قبل از ریختن نمونه در ظرف به آن اضافه می‌شود. Rao و Yang (۱۹۸۸) به منظور جلوگیری از رسوب نشاسته در قوطی طی استریلیزاسیون، محلول نشاسته را مدت ۵ دقیقه در ۷۵°C پیش‌گرم کردند. Tattiyakul و همکاران (۲۰۰۲)، دیسپرسیون ۵٪ نشاسته را تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق هیدراته کردند. همین محققان در، از زمان ۲-۳ ساعت برای این کار استفاده کردند. از آنجا که در روش Keetels و همکاران (۱۹۹۶) امکان تبخیر آب به مقدار زیاد وجود دارد و این پدیده بر ویسکوزیته نهایی محصول اثر زیادی می‌گذارد (Lagarigue and Alvarez, 2001)، از این روش استفاده نشد. از طرف دیگر، در روش Tattiyakul و همکاران (۲۰۰۲) نیز عمل هیدراته‌کردن قادر به جلوگیری از رسوب نشاسته نبود و بعد از قراردادن قوطی در اتوکلاو و اتمام فرآیند حرارتی، ژل در کف ظرف تشکیل شد. به همین دلیل در این تحقیق از روش اصلاح‌شده Rao و Yang (۱۹۸۸) استفاده شد. برای این منظور، دیسپرسیون‌های نشاسته تهیه شده از گندم، به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۶۰°C پیش‌گرم شدند. درب ظرف طی این مدت بسته بود تا از تبخیر آب جلوگیری شود.

آماده‌سازی نمونه

طبق روش آماده‌سازی دیسپرسیون نشاسته برای تهیه آن‌ها اقدام شد. سپس در دو دمای ۵۰°C و ۷۵°C عمل پر کردن قوطی‌ها انجام شد. در هر قوطی، ترموکوپل نوع T در مرکز قوطی تا عمق یک سوم انتهایی قرار داده شد. طبق پیش آزمایشات انجام‌شده، کمترین نقطه حرارتی قوطی حاوی دیسپرسیون نشاسته، در یک سوم انتهایی قوطی تعیین شد. آزمون نفوذ حرارتی طبق دستورالعمل حداقل در دو تکرار انجام می‌شود. برای این منظور از دیتالاگر ۸ پورتی و نرم‌افزار مربوط به آن (Pico-Log) استفاده شد. دما با فواصل زمانی ۱۰ ثانیه به مدت ۱۰۸۰۰ ثانیه از آغاز فرآیند تا زمان سردشدن، ثبت و گراف-

های مورد نیاز رسم شدند.

راه حل عددی معادلات مدل

راه حل‌های عددی معادلات توسط نرم افزار کامسول مولتی فیزیک ۱۴/۲ انجام شدند. از روش BDF وابسته به زمان استفاده شد. سیستم IntelVR CoreTM i5CPU M 460 @ 1.70 GHz and 6GB Ram برای حل معادلات استفاده شد.

معادلات حاکم

مدل‌سازی عددی انتقال حرارت در سیستم دوفازی هوا- ماده غذایی در نرم‌افزار کامسول، شامل جفت کردن دو پدیده فیزیکی انتقال حرارت و جریان سیال است. این دو پدیده فیزیکی توسط معادلات مربوطه قابل حل می‌باشند. با توجه به اینکه سیستم مورد مطالعه، قوطی استوانه‌ای شکل حاوی مواد غذایی است که به طریق جابجایی طبیعی حرارت‌دهی می‌شود، برای این منظور از معادلات حاکم در انتقال حرارت غیر هم‌دما در جریان آرام^۲ استفاده شد. سپس معادلات حاکم برای انتقال حرارت غیرهم‌دما برای محیط تعریف شد. معادلات مربوط به ماژول مورد استفاده که در این مسئله توسط نرم‌افزار حل شد، به شرح زیر بودند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1) \text{ معادله پیوستگی}$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p \quad (2) \text{ معادله انرژی}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot \left[-pI + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right] + F \quad (3) \text{ معادله جریان}$$

که در آن‌ها P فشار ثابت، U سرعت، T درجه حرارت، μ ویسکوزیته، ρ دانسیته و F نیروی وزن بیرونی شامل اثرات جاذبه می‌باشند.

شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی^۱:

$v=0$	$u=0$	$T=RT$	$0 \leq z \leq L$	$r=R$	دیواره
$v=0$	$u=0$	$T=RT$	$0 \leq r \leq R$	$z=L$	دیواره بالا
$v=0$	$u=0$	$T=RT$	$0 \leq r \leq R$	$z=0$	دیواره پایین
$v=0$	$\partial u/\partial r=0$	$\partial T/\partial r=0$	$0 \leq z \leq L$	$r=0$	محور تقارن

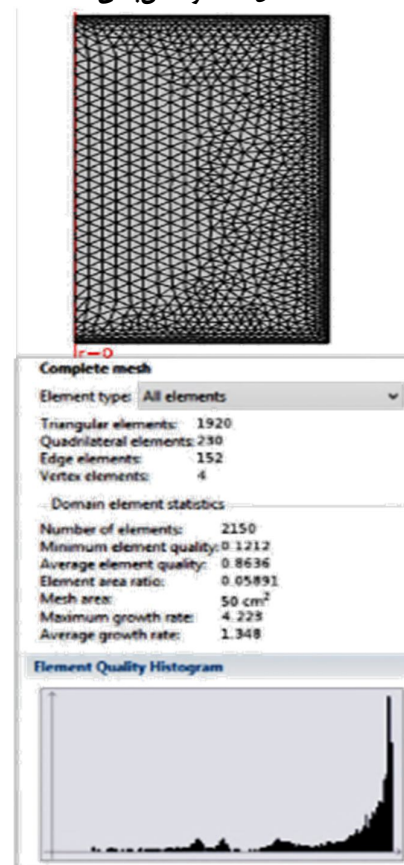
شرایط اولیه^۲ عبارت بودند از:

$v=0$	$u=0$	$T=50-75^\circ C$	$0 \leq z \leq L$	$0 \leq r \leq R$	محور تقارن
-------	-------	-------------------	-------------------	-------------------	------------

مش بندی

در این مطالعه از مش به شرح مشخصات زیر استفاده شد:

شکل ۱- نحوه مش بندی هندسه



فرضیات حل مسئله

الف- از مقاومت حرارتی دیواره قوطی صرف نظر شد (یانگ و راتو، ۱۹۹۸ b).

ب- از آنجا که مقدار η_a طی ژلاتینه شدن می تواند از ۱۰ تا ۲۰۰۰ برابر بیشتر از دیسپرسیون ژلاتینه نشده نشاسته باشد، تغییرات در سایر ویژگی های سیال در برابر حرارت، نادیده و با ویژگی های آب در $70^\circ C$ برابر در نظر گرفته شد (Yang and Rao, 1988a).

ج- طبق فرضیه (Yang and Rao, 1988a)، در این محاسبه فرض بر این بود که دمای لایه های مرزی به جز لایه مرزی کف قوطی، در $60^\circ C$ ثانیه شبیه سازی به دمای محیط بادمای اتوکلاو (RT) برابر $121^\circ C$ و در $45^\circ C$ ثانیه شبیه سازی، به دمای اولیه (IT) در $75^\circ C$ و 50 می رسد. همچنین طبق مطالعه اردوغدو و توتار (۲۰۱۲) درجه حرارت یکنواخت و ثابت دیواره، در حوزه جریان دیواره $T_w = T = RT$ ایجاد شد.

د- داده های مربوط به سرد کردن محصول در نظر گرفته نشدند.
 ه- اثرات گرانشی ($9/81 \text{ ms}^{-2}$) به عنوان نیروی جسمی^۳ بیان شد.
 و- از تخمین بوستویک برای دانسیته مواد خوراکی به عنوان تابعی از دما استفاده شد (Erdogdu and Tutar, 2012). در این مطالعه، از اندیس β که در مطالعات متعدد در منابع به کار رفته بودند، به منظور نشان دادن مواد غذایی ویسکوز استفاده شده است. مطالعات Kumar Ghani et al. 1990. Kumar and Bhattacharya, 1991 Kannan and Varma and Kannan, 2005 and 2006, al. 2002 and Sandaka, 2008 از این جمله اند.
 ز- سیال هموژن در نظر گرفته شد.
 ح- سرعت در دیواره قوطی برابر صفر در نظر گرفته شد.
 ط- فواصل زمانی $0/2$ ثانیه در نظر گرفته شد.

آنالیز داده های نفوذ حرارتی و محاسبه f برای دیسپرسیون نشاسته

از آنجا که در آنالیز داده های نفوذ حرارتی، روش های فرمولی صحت بیشتری نسبت به روش های تجربی دارند (یانگ و راتو، ۱۹۹۸)، در این مطالعه از روش های فرمولی برای محاسبه f استفاده شد. دقت این محاسبات با روش CFD مورد بررسی قرار گرفت. فاکتور عکس شیب منحنی حرارتی است محاسبه می شود:

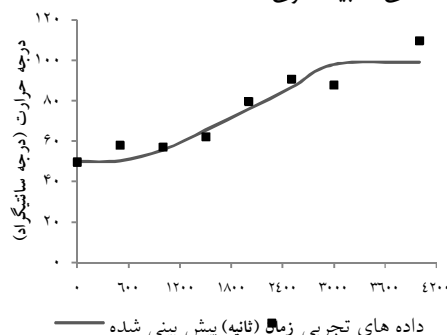
³ Body force

1 Boundary Conditions
2 Initial Conditions

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، داده‌های شبیه‌سازی



شکل ۲- تغییرات درجه حرارت در حین استریلیزاسیون محلول ۳/۵٪ نشاسته (مقادیر شبیه‌سازی شده و داده های تجربی)

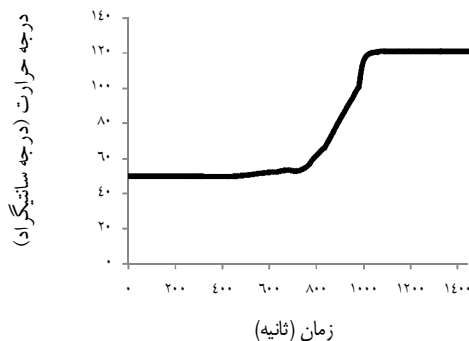
دما در ارتفاع یک-دهم انتهایی قوطی (شکل ۴) از ۸۱۵ ثانیه در غلظت ۳/۵٪ به ۹۹۴ ثانیه در غلظت ۵٪ می‌رسد (۲/۹۸ دقیقه) که نسبت به اختلاف دمای این دو غلظت در سه-دهم انتهایی قابل توجه است.

در این رابطه، Datta و Teixeira (۱۹۸۸) به صورت عددی پروفایل‌های سرعت و دمای انتقالی ماده خوراکی قوطی‌شده در اتوکلاو ثابت را پیش‌بینی کرده و دریافتند که منطقه سرد شبیه حلقه و در حدود یک دهم انتهایی قوطی تشکیل شد. Kumar و همکاران (۱۹۹۰) نیز دریافتند در حالت جابجایی طبیعی، منطقه سرد در کف قوطی باقی می‌ماند. سپس Ghani و همکاران (۲۰۰۲) استریلیزاسیون در قوطی افقی حاوی سوپ پرتقال را بررسی کرده و دریافتند که دمای منطقه سرد حداکثر به 107°C رسیده و به دلیل جابجایی طبیعی به سمت کف قوطی حرکت کرده و در حدود ۲۵-۲۰٪ انتهایی قوطی باقی می‌ماند.

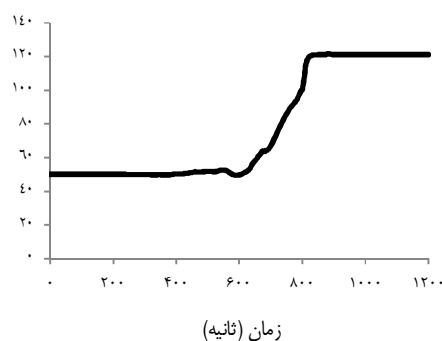
درجه حرارت در سه-دهم انتهایی محور مرکزی قوطی

در قوطی‌های ایستا که حاوی سیالات با جابجایی طبیعی هستند، نقطه سرد بطور سنتی در سه-دهم انتهایی محور مرکزی قوطی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه در این مطالعه، درجه حرارت این نقطه به عنوان نقطه سرد مورد آزمایش قرار گرفت. منحنی‌های پیش‌بینی شده حرارتی در این نقطه، در برابر زمان در دو ارتفاع سه-دهم ($L=3/5$) و یک-دهم ($L=1/5$) رسم شدند. برای این کار در مرکز قوطی به شعاع صفر خطی تعریف شد و سپس نمودارهای دما، نرخ برشی و سرعت در جهت ارتفاع برای آن رسم شدند. این نمودارها هم برای نمونه‌های محلول ۳/۵٪ و هم برای نمونه‌های محلول ۵٪ نشاسته با دو دمای اولیه 50°C و 75°C رسم شدند.

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در دمای اولیه 50°C تغییر غلظت نشاسته از ۳/۵٪ به ۵٪ در محلول نشاسته، باعث می‌شود که نقطه افزایش دمای سه-دهم انتهایی قوطی از ۶۱۰ ثانیه به ۷۲۰ ثانیه افزایش پیدا کند (۱/۸۳ دقیقه اختلاف) در حالیکه این اختلاف

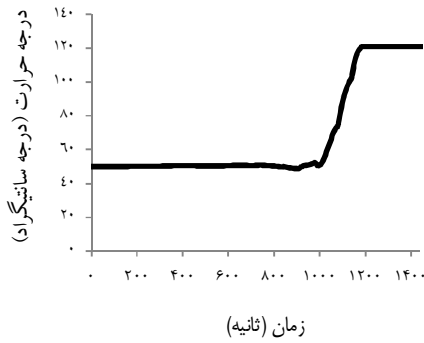


(ب) محلول ۵٪ نشاسته

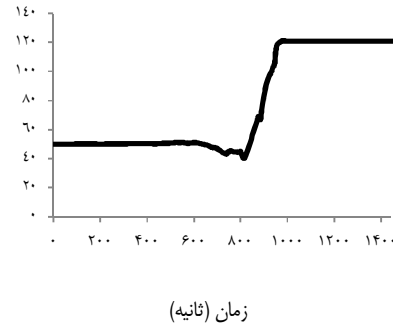


(الف) محلول ۳/۵٪ نشاسته

شکل ۳- تغییرات درجه حرارت در دمای پرمکردن 50°C در $L=3/5$ و $r=0$



(ب) محلول ۵٪ نشاسته



(الف) محلول ۳/۵٪ نشاسته

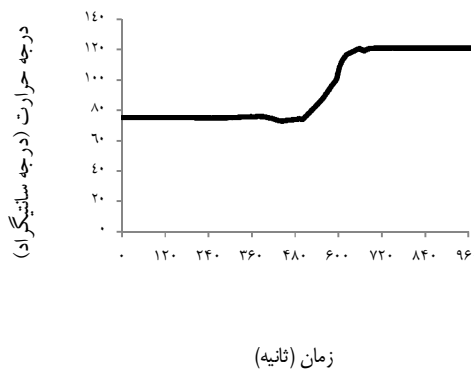
شکل ۴- تغییرات درجه حرارت دردمای پرکردن در 50°C در $r=0$ و $L=1/5$

اختلاف دما در لحظه افزایش دما در نمودار حرارتی ۳/۵٪ است. همانگونه که Ramaswamy و همکاران (۱۹۹۳) گزارش دادند که تغییر در ویسکوزیته نشاسته، به دلیل تغییر در غلظت از ۳٪ به ۴٪، باعث کاهش ۶۰٪ نرخ انتقال حرارت دهی در آن می‌شود، علت این امر شاید به دلیل افزایش ویسکوزیته نمونه و کندتر شدن جابجایی لایه‌های ژلاتینه شده در نمونه ۵٪ باشد که می‌تواند بر نرخ انتقال حرارت تأثیر منفی گذاشته و آن را کاهش دهد.

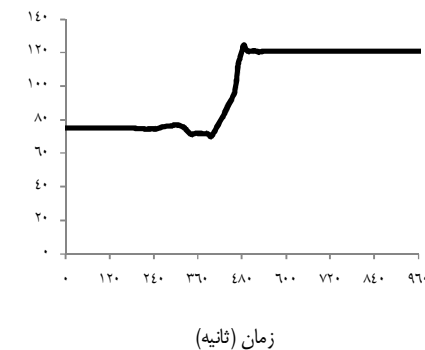
در اشکال ۵ و ۶ نیز مشاهده می‌شود که در دمای اولیه 75°C تغییر غلظت نشاسته باعث تغییر در نقطه افزایش دما و نقطه ثبات دما می‌شود. به طوریکه در سه-دهم انتهایی نقطه آغاز افزایش دما در دو نمونه ۳/۵ و ۵٪، از ۲۵۵ ثانیه به ۵۰۱ ثانیه (۱/۸۲ دقیقه) تغییر می‌کند. این در حالی است که در یک-دهم انتهایی این تغییر به ترتیب از ۴۷۰ ثانیه به ۶۱۰ ثانیه (۲/۳۳ دقیقه) است. این اختلاف زمانی بین دو ارتفاع یاد شده در قوطی، قابل توجه است.

Dimou و Yanniotis (۲۰۰۲) به پیش‌بینی توزیع دما و پروفایل سرعت در قوطی حاوی آب نمک ۴٪ که دارای ذرات جامد ماده خوراکی (تعداد ۰، ۱، ۸ و ۱۹ عدد مارچوبه) بود، پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که منطقه سرد در حدود ۱۳/۵٪ از کف قوطی دیده شد که البته تحت تأثیر تعداد مارچوبه‌ها نبود. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت این اختلاف زمانی بارز در سه-دهم انتهایی و یک-دهم انتهایی، نشان می‌دهد که در قوطی کاملاً پر، بخش یک-دهم انتهایی باید به‌عنوان منطقه سرد در نظر گرفته شود.

با مقایسه این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که نقطه ثبات دما در هر دو نقطه سه-دهم و یک-دهم انتهایی نیز با تغییر غلظت تغییر می‌کند. به‌طوریکه در سه-دهم انتهایی، زمان ثبات دما از ۱۰۸۰ ثانیه در نمونه ۳/۵٪ به ۱۰۱۸ ثانیه در نمونه ۵٪ می‌رسد (۱/۰۳ دقیقه) و در یک-دهم انتهایی از ۹۷۵ ثانیه در نمونه ۳/۵٪ به ۱۱۸۵ ثانیه در نمونه ۵٪ می‌رسد (۳/۵ دقیقه). اما نکته جالب توجه در آن است که اختلاف دما در نمونه ۵٪ در زمان ثبات دما بسیار قابل توجه‌تر از

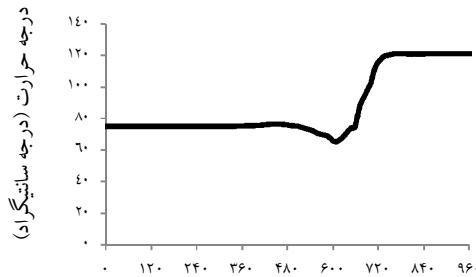


(ب) محلول ۵٪ نشاسته



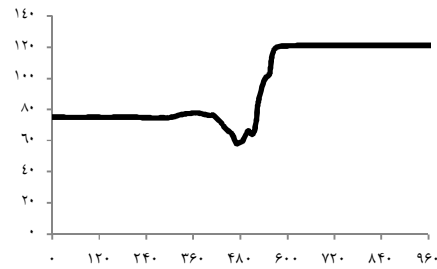
(الف) محلول ۳/۵٪ نشاسته

شکل ۵- تغییرات درجه حرارت در دمای پرکردن در 75°C در $r=0$ و $L=3/5$



زمان (ثانیه)

(ب) محلول ۵٪ نشاسته



زمان (ثانیه)

(الف) محلول ۳/۵٪ نشاسته

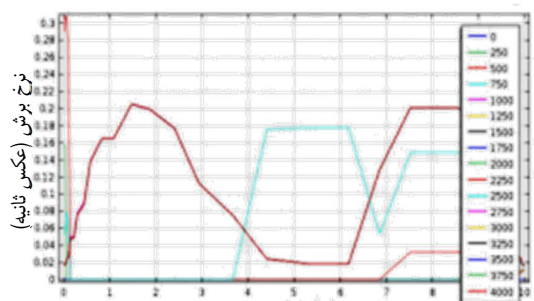
شکل ۶- تغییرات درجه حرارت دردمای پرکردن ۷۵°C در $r=0$ و $L=1/5$

سه-دهم انتهایی کاهش و در یک-دهم انتهایی افزایش می‌یابد. این اتفاق به راحتی توسط اشکال نیروهای برشی در هر چهار تیمار قابل مشاهده است (شکل ۷ و ۸).

این امر دقیقاً به دلیل ژلاتینه شدن نشاسته است که طبق نظریه Yang و Rao (۱۹۸۸) با آغاز حرارت‌دهی ژلاتینه شدن لایه-های محلول نشاسته از دیواره شروع شده و به تدریج به سمت مرکز و کف پیش می‌رود. به همین دلیل محلول نشاسته در ارتفاع سه-دهم انتهایی سریعتر از یک-دهم انتهایی ژلاتینه شده و نرخ انتقال حرارت در آن کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل اینکه در سه-دهم انتهایی حجم بیشتری از محلول نشاسته درگیر ژلاتینه شدن می‌شود، این اختلاف شیب در غلظت‌های ۳/۵٪ و ۵٪ بیشتر از یک-دهم انتهایی است. این پدیده طبق شکل ۹ و ۱۰ با مشاهده نمودار سرعت ارتفاعی در برابر ارتفاع قوطی قابل توضیح است.

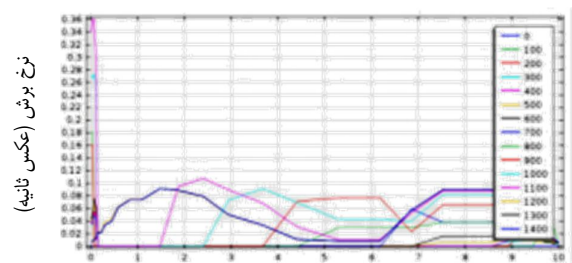
از طرفی طبق اشکال ۵ و ۶، نقطه رسیدن به ثبات دما در دو ارتفاع سه-دهم و یک-دهم انتهایی نیز به همین ترتیب با تغییر ارتفاع و غلظت دستخوش تغییر می‌شود. به طوریکه به ترتیب از ۸۷۵ ثانیه به ۶۵۸ ثانیه (۳/۶۱ دقیقه) و از ۵۸۰ به ۷۳۴ ثانیه (۲/۵۷ دقیقه) می‌رسد.

اما نکته جالب توجه در اشکال ۳-۶، اختلاف شیب نمودارها با توجه به تغییر غلظت و ارتفاع مورد بررسی در قوطی می‌باشد. به طوریکه در هر دو تیمار دمای اولیه ۵۰°C و ۷۵°C، شیب نمودار در سه-دهم انتهایی قوطی با افزایش غلظت از ۳/۵٪ به ۵٪ به ترتیب از ۰/۱۱ به ۰/۲۲ و از ۰/۱ به ۰/۳ افزایش می‌یابد اما در یک-دهم انتهایی قوطی شیب نمودارهای حرارتی با افزایش غلظت از ۳/۵٪ به ۵٪ به ترتیب از ۰/۵ به ۰/۳۷ و از ۰/۵۷ به ۰/۴۴ کاهش می‌یابد. از آنجا که عکس شیب نمودار حرارتی نشان‌دهنده f می‌باشد، طبق اشکال و توضیحات قبلی با افزایش غلظت نشاسته در محلول، f در



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

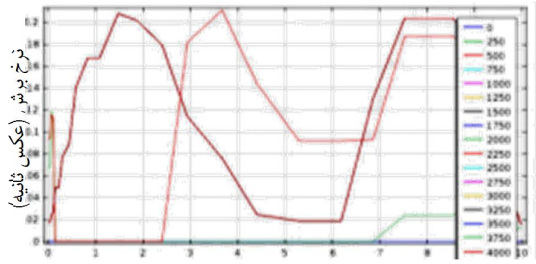
(الف)



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

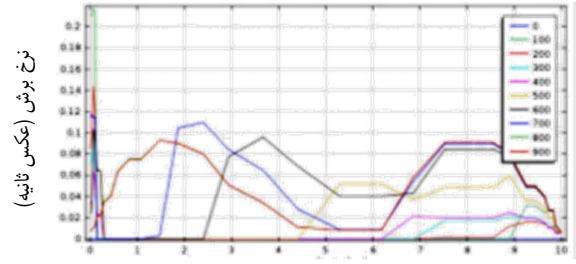
(ب)

شکل ۷- نمودار نرخ برش در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۵۰°C



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(الف)



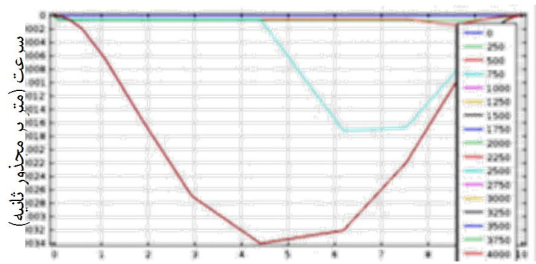
ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(ب)

شکل ۸- نمودار نرخ برش در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۷۵°C

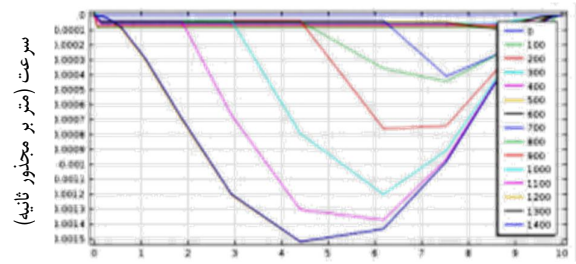
نظریه Yang و Rao (۱۹۸۸)، تا نزدیکی دمای ۹۲/۵°C در فاز ژلاتینه‌شدن باقی می‌ماند. اما در یک-دهم انتهایی ارتفاع جابجایی سیال کمتر است و سیال حجم کمتری را اشغال کرده است که برای افزایش دمای آن زمان کمتری لازم است و در نتیجه سرعت ژلاتینه‌شدن و پس-ژلاتینه‌شدن در این منطقه بیشتر است. به این ترتیب سرعت حرکت لایه‌های گرم شده بالاتر خواهد بود.

همانطور که مشاهده می‌شود، در تمامی تیمارهای غلظت و درجه حرارت اولیه، کمترین مقدار سرعت در زمان‌های حرارت‌دهی، در نزدیکی سه-دهم انتهایی قوطی است و بیشترین مقدار آن در یک-دهم انتهایی قوطی. شاید دلیل این پدیده آن است که در سه-دهم انتهایی، ارتفاع بیشتری برای جابجایی سیال وجود دارد و این در حالی است که نشاسته در این منطقه در حال ژلاتینه شدن است و طبق



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

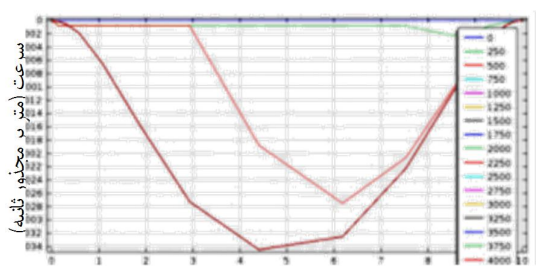
(الف)



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

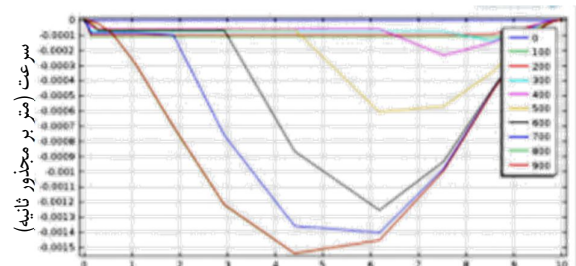
(ب)

شکل ۹- نمودار سرعت در جهت ارتفاع در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۵۰°C



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(الف)

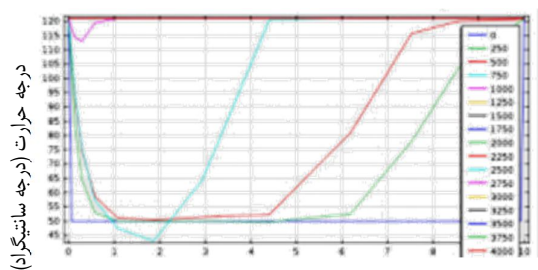


ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(ب)

شکل ۱۰- نمودار سرعت در جهت ارتفاع در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۷۵°C

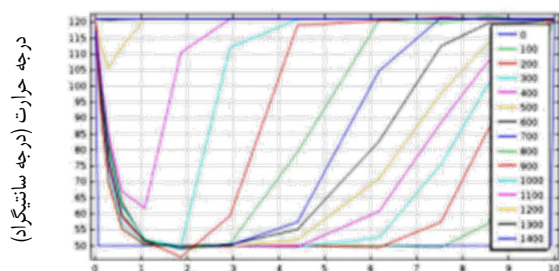
و بهتر است در فرآیندهای حرارتی قوطی‌های بدون سرفضای خالی، دمای ۱۰٪ انتهایی قوطی به‌عنوان منطقه سرد مورد پایش قرار بگیرد.



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(الف)

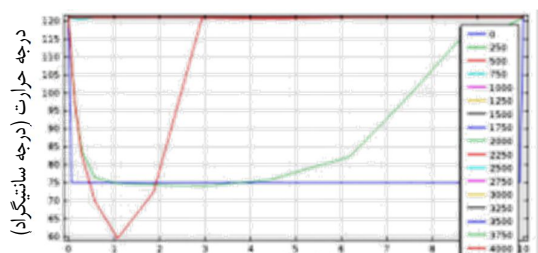
در نهایت با توجه به اشکال ۱۱ و ۱۲ و مطالب ذکرشده قبلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انتخاب نقطه سه-دهم انتهایی به‌عنوان نقطه سرد قوطی‌هایی که به‌صورت کامل پر شده‌اند، امر اشتباهی بوده



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

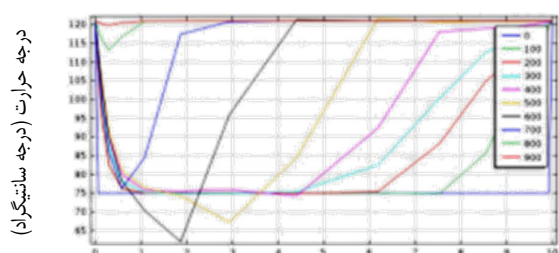
(ب)

شکل ۱۱- نمودار دما در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۵۰°C



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(الف)



ارتفاع قوطی (سانتی متر)

(ب)

شکل ۱۲- نمودار دما در برابر ارتفاع قوطی در شعاع صفر نمونه محلول ۳/۵٪ (الف) و ۵٪ (ب) نشاسته در دمای اولیه ۷۵°C

دهم انتهایی نیز با تغییر غلظت تغییر می‌کند. اختلاف دما در نمونه ۵٪ در زمان ثابت دما بسیار قابل توجه‌تر از اختلاف دما در لحظه افزایش دما در نمودار حرارتی ۳/۵٪ است. با افزایش غلظت نشاسته در محلول، f در سه-دهم انتهایی کاهش و در یک-دهم انتهایی افزایش می‌یابد. این اختلاف شیب در غلظت‌های ۳/۵٪ و ۵٪ بیشتر از یک-دهم انتهایی است. علت آن زودتر ژلاتینه‌شدن محلول نشاسته در یک سوم انتهایی است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در این مطالعه مشخص شد که در حالت حرارت‌دهی ایستا، نقطه سرد در نزدیکی یک-دهم کف قوطی بدون سرفضای خالی است. در هر دو دمای اولیه، تغییر غلظت نشاسته از ۳/۵٪ به ۵٪ در محلول نشاسته، باعث طولانی‌تر شدن زمان فرآیند می‌شود. این افزایش زمان فرآیند حرارتی، در یک-دهم انتای قوطی بیشتر از سه-دهم انتهایی است. نقطه ثابت دما در هر دو نقطه سه-دهم و یک-

منابع

- Berry, M. R., Savage, R. A. and Pflug, I. J. 1979. Heating characteristics of cream-style corn processed in a Steritort: Effects of head space, reel speed and consistency. *Journal of Food Science*. 44(3): 831-835.
- Berry, M. R. and Bradshaw, J. G. 1980. Heating characteristics of condensed cream of celery soup in a Steritort: Heat penetration and spore count reduction. *Journal of Food Science*. 45(4): 869-879.
- Datta, A.K., and Teixeira, A.A. 1988. Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during

natural convection heating of canned liquid foods. 1. *Food Science*. 53:191-195

Dimou, A., and Yanniotis, S., 2011. 3D numerical simulation of asparagus sterilization in a still can using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*. 104: 394-403.

Erdogdu, F., and Tutar, M. 2012. A computational study for axial rotation effects on heat transfer in rotating cans containing liquid water, semi-fluid food system and headspace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55: 3774-3788.

Ghani, A. G. A., Farid, M. M., and Chen, X. D. 2002. Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of Vitamin C in food pouches. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34: 129-143.

Kannan, A., and Sandaka P.Ch. G. 2008. Heat transfer analysis of canned food sterilization in a still retort. *Journal of Food Engineering*. 88: 213-228.

Karaduman, M., Uyar, R., and Erdogdu, F. 2012. Toroid cans – An experimental and computational study for process innovation. *Journal of Food Engineering*. 111: 6-13.

Keetels, C. J. A. M., van Vilet, T., and Walstra, P. 1996. Gelation and retrogradation of concentrated starch systems: 1. Gelation. *Food Hydrocolloids*. 10(3): 343- 353.

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: 1403-1411.

Kumar, A., & Bhattacharya, M. 1991. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian liquid food during sterilization in a still-cook retort. *International Journal of Heat & Mass Transfer*. 34(4-5): 1083-1096.

Lagarrigue, S., Alvarez, G. 2001. The rheology of starch dispersions at high temperatures and high shear rates: a review. *Journal of Food Engineering*. 50: 189- 202.

Ramaswamy, H. S., Abbatemarco, C. and Sablani, S. S. 1993. Heat transfer rates in a canned food model as influenced by processing in an end-over-end rotary steam/air retort. *Journal of Food Processing and Preservation*. 17(4): 269- 286. Tattiyakul, J., Rao, M. A., and Datta, A. K. 2002. Heat transfer to three canned fluids of different thermo-rheological behaviour under intermittent agitation. *Trans IChemE*. 80: 20- 27.

Varma, M. N., and Kannan, A. 2005. Enhanced food sterilization through inclination of the container walls and geometry modifications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 48: 3753-3762.

Varma, M.N., and Kannan, A. 2006. CFD studies on natural convection heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*. 77: 1024-1036.

Yang, W. H., and Rao, M. A, 1998 a. Numerical Study of Parameters Affecting Broken Heating Curve. *Journal of Food Engineering*. 37: 43-61.

Yang, W. H., and Rao, M. A. 1998b. Transient Natural Convection Heat Transfer to Starch Dispersion in a Cylindrical Container: Numerical Solution and Experiment. *Journal of Food Engineering*. 36: 395-4 15.

Numerical Study of Starch Concentration and Filling Initial Temperature on Cold Area changes in Canned Starch-based Food

A. Ranjbar Nedamani¹, A. M. Ziaifar^{*2}, M. Parvini³, M. Kashaninejad⁴, Y. Maghsoudlou⁴

Received: 2015.01.30

Accepted: 2015.07.04

Introduction: Canning is the most effective way to food preservation. Starch-based foods include the major food materials such as porridges. These foods due to sensitivity to high shear rates used in rotary retorts and thus texture decomposition, usually sterilized in static retorts. Broken heating behavior, can headspace and initial temperature have important role on heat transfer rate and the position of cold area in these products. Heat breaking phenomena in the thermal curve, which can be seen in foods containing starch, is essentially related to gelatinization and destroying of starchgelstructure. Starchmaybe naturally exist in foods ormay be added to food formulations as an additive to create the consistency, filler, volumeproviders, emulsionstabilizer and etc. However, during thermal processing of foodscontaining high amounts of starch, complexstructural changes occur which leads to viscosity increases. These changes are due to structural changes of starch during gelatinization; such as irreversible swelling of the starch granules, melting of starchcrystals, leaking of starch granule compound. Depending on thetype of starch and its concentration, the final product can be an aqueous solution or a gel structure. Increasing in starch viscosity after gelatinization leads to decrease in heating rate, but with the advancement of heating time, when most granule swelling occurs, and the granules are being disrupted and the viscosity is reduced. This leads to increase the heating rate. This dual behavior of starch dispersion viscosity, leads to break in heating curve. Such solutions are named broken heating curve foods. The aim of this study was numerical simulation of the effect of starch concentration and initial temperature on heat transfer rate of starch dispersion during static sterilization with COMSOL software.

Materials and methods: To prepare 100ml of 3.5 and 5% starch dispersion, 3.5 and 5 g starch was dissolved in 96.5 and 95 ml distilled water at 24.7°C, respectively. The solution was then heated at 50°C for 10 min to avoid sedimentation during the heat process. Samples were filled at 50 and 75°C initial temperatures. In each can (9.9×10.1cm), T- type thermocouple was placed in one-third length from the bottom. All measurements were performed in triplicates. The 8-port data logger (Pico-TC08, England) and related software (PicoLog) were used to record the temperature data with 10s intervals. The full filled cans (without headspace) were statically heated in vertical position with no rotation. Numerical solutions of the governing equations were performed by COMSOL Multiphasics 4.2b software. A BDF method for time stepping and Backward Euler to time discretization were used. The system used to run the test and solve the equation was Intel VR Core™ i5CPU M 460 @ 1.70 GHz and 6GB RAM. Numerical simulation of COMSOL software include spairing two physical phenomena: heat transfer and fluidflow. Since the system was cylindrical shaped can contain food with natural convection, non-isothermal laminar flow equations were used. For this problem, one geometry and two domains were defined. The governing equations for non-isothermal laminar flow for domains were defined. Since in thermal diffusion analysis, the formula methods are more correct than empirical methods, formula methods were used in this study for calculating j and f . The accuracy of these calculations was evaluated using CFD. Parameter $-f$ is the slope of heating curve. J_h index, as a dimensionless correction factor.

Results and discussion: The results showed that the cold area is near the one-tenth of cans bottom. In both product initial temperatures, varying the concentration of the starch in product from 3.5 to 5% leads to longer heating time. The increase in the thermal process time at one-tenth of can bottom is more than one-third of can bottom. The time which the dispersion reaches to static temperature also changes with starch concentration in

1, 2 and 4. PhD. student, Associate Professor and Professor, Department of food science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources.

3 Associate Professor- Faculty of Chemical Engineering, Gas and Petroleum, Semnan University, Semnan.

(*Corresponding author: ziaifar@gmail.com)

dispersion. The temperature difference in 5% starch dispersion at static temperature at the end of heating process is more considerable than 3.5% starch dispersion. Higher starch concentration induces a decrease in f (The f_h coefficient represents the time required to move heating process one cycle in heating curve and it can be calculated from the slope of the linear part of heat curve) at one-third of can bottom while an increase in f at one-tenth of can bottom. This behavior can be related to the fact that the starch gelatinization takes place earlier in one-third of can bottom than one-tenth due to the faster increase in temperature.

Keywords: Broken Heating Food, Sterilization, Cold Area, Heat Penetration, Initial Fill Temperature