مقاله علمی پژوهشی/ نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۳۱ شماره ۳/ سال ۱۴۰۰/ صفحات ۵۱ تا ۶۲

DOI: 10.22034/FR.2021.39743.1738

مدل سازی سینتیک تخریب رنگ و غیرفعال سازی میکروبی رب گوجه فرنگی درحین پاستوریزاسیون در قوطی

محسن دلوی اصفهان[1]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۲

[1] استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

*مسئول مکاتبه: Email: dalvi@jahromu.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: با بکارگیری مدل‌های ریاضی می‌توان به درک بهتر و بهینه سازی فرآیند حرارتی بعنوان تابعی از متغیرهای گوناگون با صرف هزینه و زمان کمتر دست یافت **هدف**: توسعه مدل انتقال حرارت در حین پاستوریزاسیون رب که قادر به تخمین تعداد باکتری باقیمانده و شدت تخریب رنگ محصول، در هر لحظه از فرایند و به عنوان تابعی از عوامل مختلف را فراهم آورد. **روش کار**: آزمایشات بر روی قوطی ٤٠٠ گرمی رب گوجه با بریکس ۲۸ به ابعاد (٤٠٠× ۲۱۱) انجام شد و از آب گرم به عنوان عامل گرمایش استفاده شد. در مرحله اول آنالیز شیمیایی و شاخص های اصلی رنگ محصول مشتمل بر L، a و b صورت گرفت. تغییرات دما در نقاط مختلف قوطی با استفاده از ترموکوپل تعیین شد. برای توصیف انتقال حرارت در قوطی رب گوجه فرنگی از ماژول انتقال حرارت در نرم افزار کامسول استفاده شد و سینتیک مرگ میکروبی و تخریب رنگ رب در حین فرایند با مدل انتقال حرارت کوپل شدند. **نتایج**: در گام اول، گرمترین و سردترین نقطه داخل قوطی با استفاده از مدل تعیین و با نتایج تجربی اعتبارسنجی شد. در گام دوم، تغییرات افت رنگ مدل‌سازی شد، نتایج نشان داد که بیشترین افت رنگ در شاخص a مشاهده شد. در گام سوم، شدت نابودی باکتری *باسیلوس کواگولانس* مدل‌سازی شد، نتایج نشان داد که در شدیدترین رژیم حرارتی اعمال شده، تنها سه سیکل لگاریتمی از تعداد باکتری های *باسیلوس کواگولانس* در نقطه سرد قوطی کاسته می شود. **نتیجه گیری نهایی**: نتایج نشان دادند که مدل توسعه داده شده قادر به پیش بینی دما، بارمیکروبی محصول و تغییرات رنگ محصول در حین فرایند می‌باشد، در ضمن فرایند حرارتی که در تونل پاستور رخ می‌دهد، قادربه کاهش بار میکروبی درحد تعیین شده دراستاندارد ملی ایران نیست و امکان بقاء و رشد میکروارگانیزم های مقاوم به حرارت در این شرایط برقرار می‌باشد.

واژگان کلیدی: افت رنگ، *باسیلوس کواگولانس*، رب گوجه فرنگی، مدل‌سازی

مقدمه

درسال‌های اخیر تقاضای جهانی برای مصرف گوجه فرنگی به دلیل وجود عوامل آنتی اکسیدانی و تغذیه ای بسیار مهم رو به افزایش بوده است و از کل مقدار تولید شده در جهان، حدود ٦٠ درصد درصنایع تبدیلی مصرف می‌شود در بین فراورده‌های متنوع گوجه فرنگی،

بیشترین سهم تولید در اختیار رب گوجه فرنگی هست (پاکدل و همکاران، ۱۳۹۰). این محصول به طور وسیعی به عنوان چاشنی غذا جهت بهبود طعم و رنگ مواد غذایی بکار برده می‌شود و رنگ نهایی محصول، یکی از فاکتورهای مهم کیفی شمرده می‌شود که تاثیر زیادی بر روی پذیرش محصول توسط مصرف کننده دارد. واکنش‌های زیادی در طی فراوری این محصول رخ می‌دهد که برروی رنگ نهایی محصول موثر است که از آنجمله می‌توان به تخریب رنگدانه قرمز لیکوپن و ایزومراسیون آن از حالت ترانس به سیس اشاره کرد. در ضمن حضور کلروفیل نیز که ممکن است در اثر خرد شدن گوجه های نارس وارد خط تولید شده باشد با تولید فئوفیتین در اثر حرارت باعث ایجاد رنگ سبز زیتونی نامطلوب در محصول می‌شود (بریرو و همکاران، ۱۹۹۷).

بر اساس تعریف سازمان استاندارد ایران، رب گوجه فرنگی، از تغلیظ آب گوجه فرنگی تحت خلاء در ظروف استیل و تا رسیدن به غلظت کمینه ۲۵ درجه بریکس بدون احتساب نمک به دست می‌آید (استاندارد ملی ایران، شماره ۷۶۱). عوامل متنوع آنزیمی و میکروبی می‌توانند کیفیت و سلامت این محصول را دستخوش تغییر نمایند. در این بین باکتری های اسپورزای مقاوم به اسید مانند گونه های مختلف باسیلوس، به علت مقاومت حرارتی بالایی که دارند از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. عمده ترین گونه های باسیلوس که در رب گوجه قادر به فعالیت هستند عبارتند از *باسیلوس کواگولانس* و *باسیلوس سوبتیلیس* (الهامی راد، شهیدی، ۱۳۸۳).

پژوهش‌ها نشان داده است که *باسیلوس کواگولانس* می‌تواند در رب گوجه رشد کرده وpH محصول را از ۴/۵ به ۵ افزایش دهد. این باکتری منشا خاک دارد و قادر به رشد در دماهای گرم و محیط اسیدی است، با تخمیر قند تولید اسید کرده ولی گاز هیدروژن تولید نمی‌کند، در نتیجه ظاهر قوطی تغییر نمی‌کند و بنابراین فساد ترشی مسطح[1]ایجاد می‌شود (چاتین تراسری و نومهورم ، ۲۰۰۷ و مهدی‌زاده، م، ۱۳۷۳).

به منظور کاهش و یا حذف عوامل فساد و افزایش زمان ماندگاری محصول نهایی در صنعت از فرایند حرارتی، پاستوریزاسیون استفاده می‌شود. در تولید رب گوجه اغلب دو مرحله پاستوریزاسیون در نظر گرفته می‌شود، مرحله اول بعد از تغلیظ است که محصول وارد دستگاه پاستوریزاتور لوله ای می‌شود و مرحله دوم بعد از پر کردن و در بندی قوطی هاست که محصول وارد تونل پاستوریزه می‌شود. کل زمانی که قوطی در تونل سپری می‌کند حدوداً ٤٠ دقیقه می‌باشد که ۲۰-۱۵ دقیقه اول آن مربوط به آب گرم (۹۵-۸۰ درجه سانتی‌گراد) و مابقی مربوط به آب سرد و خنک کردن محصول است. در خصوص این فرایند بکارگیری شرایط بهینه و کنترل فرایند، به عنوان یکی از چالش های مهم شناخته می‌شود. در صورتی که ترکیب دما-زمان در این فرایند کمتر از میزان بهینه انتخاب شود[2] می‌توان انتظار انواع آلودگی‌های میکروبی و بالتبع فساد و یا حتی به خطر افتادن ایمنی مصرف کننده را انتظار داشت. متقابلا در صورتی که ترکیب دما- زمان بکار گرفته شده از حد بهینه عبور نماید[3] کاهش شدید کیفیت و خواص ارگانولپتیکی محصول دور از انتظار نیست (هولدورث و سیمپسون، ۲۰۱٦). برای مثال، بریرو و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که واکنش‌های متنوعی در طی فرایند حرارتی رخ می‌دهد که تاثیر نامطلوبی بر روی رنگ نهایی محصول دارد. مهمترین این واکنش‌ها عبارتند از: تخریب رنگدانه‌ها بویژه کارتنوئیدها، کلروفیل و واکنش‌های قهوه ای شدن از جمله مایلارد و یا اکسیداسیون اسید اسکوربیک.

هر چه میزان شدت فرایند حرارتی بکار گرفته شده بر روی محصول شدید تر باشد، تاثیرات نامطلوب بیشتری

[1] Flat-sour
[2] Under processing
[3] Over processing

در رنگ و خواص ارگانولپتیک محصول نهایی محصول قابل پیش بینی است. موقعیت قرار گیری غذا در قوطی نیز بر شدت آسیب حرارتی تاثیر گذار است، بدیهی است بخش‌هایی از غذا که در مرکز قوطی قرار دارند به دلیل نفوذ پایین حرارت، دچار آسیب حرارتی کمتری در مقایسه با بخش هایی از غذا که در سطح قوطی قرار دارند، روبرو خواهند شد. بنابراین بکارگیری مدل‌های ریاضی که بوسیله آن بتوان حداکثر کاهش بار میکروبی در مرکز قوطی و حداقل آسیب حرارتی به بخش های مجاور سطح قوطی را پیش بینی و ارایه دهند، جهت بهینه سازی فرایند ضروری به نظر می‌رسد. با بکارگیری این روش‌ها می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر، به محصولی ایمن و با کیفیت بالاتر تغذیه ای و ویژگی‌های ارگانولپتیکی بهتر دست یافت (پلازل و همکاران، ۲۰۰۶).

در مطالعه پیشین که توسط محقق صورت گرفته است، مدل‌سازی فرآیند پاستوریزاسیون رب گوجه فرنگی با دو روش عددی مختلف (تفاضل محدود و اجزاء محدود) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سردترین منطقه در رب گوجه فرنگی به دلیل وجود یک لایه هوا در فضای خالی بالای قوطی کنسرو که نقش عایق حرارتی را بازی می‌کند، در ارتفاع حدود ۶۰٪ از انتهای قوطی قرار گرفته است. در تحقیق جاری و در ادامه تحقیق پیشین، به توسعه مدل انتقال حرارتی که دو معادله دیفرانسیل تغییرات رنگ و غیرفعال سازی باکتری به صورت کوپل با آن درآمده است خواهیم پرداخت. با بکارگیری این اطلاعات می‌توان تغییرات رنگ و ومیزان بار میکروبی در هر نقطه از قوطی و در هر زمانی را تعیین نمود، بکارگیری این اطلاعات جهت بهینه سازی فرایند پاستوریزاسیون ضروری است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از کنسرو رب گوجه فرنگی ۴۰۰ گرمی در قوطی‌های قلع اندود با ابعاد (۴۰۰ × ۲۱۱) و با ضخامت ۰/۱۶ میلیمتر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی رب گوجه فرنگی با استفاده از استاندارد شماره ۷۶۱ ایران و در سه تکرار انجام شد (جدول ۱) (استاندارد ملی ایران، ۷۶۱).

جدول ۱- درصد ترکیبات شیمیایی نمونه رب مورد استفاده (بر حسب درصد وزنی)

Table 1- Chemical compositions of tomato paste used in this study (% by weight)

Chemical component	Percentage
Brix	27.5±0.5
Protein	6.5±0.75
Fat	0.95 ±0.11
Salt	1.71±0.2
pH	4.2
Acidity (mg/100)	1.79±0.21
Vitamin C (mg/100)	20.26±1.35
Color (a/b)	2.1
L	22.8

برای بررسی نفوذ حرارتی و تغییرات دما در نقاط مختلف در قوطی از ترموکوپل‌های نوع K و ثبات[1]شرکت تستو مدل ۱۷۶۳ (آلمان)[2] استفاده شد. تعیین دما در فواصل زمانی ۵ دقیقه یکبار تا پایان فرایند ادامه پیدا کرد. رب گوجه فرنگی را تا دمای ۷۰ درجه سانتی گراد گرم و سپس قوطی تا میزان ۸۸ درصد ارتفاعش با رب گوجه فرنگی پر شد. سپس به مدت ۲ دقیقه از تونل اگزاست با دمای ۹۰ سانتی گراد عبور داده شده و بلافاصله در بندی انجام گردید. فرایند حرارتی در حمام آب گرم با دمای ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد، بعد از پایان مرحله گرمایش، قوطی‌ها در یک حمام آب دیگر با دمای متوسط ۲۰ درجه سانتی‌گراد سرد شدند. بعد از هر فرایند محل دقیق ترموکوپل در درون قوطی کنترل شد.

بررسی سینتیک تخریب رنگ

رنگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه رنگ سنج (نیپون- ZE-6000، ژاپن) با منبع نوری D65 در ابتدای فرایند و به صورت شاخص های CIELab تعیین گردید. رنگ

[1] Data logger

[2] Testo, 1763, Germany

سنج قبل از آزمایش با استفاده از کاشی‌های سفید و سیاه استاندارد شد. علاوه بر شاخص‌های روشنایی (L)، قرمزی- سبزی (a)، و زردی-آبی (b)، اختلاف رنگ کل (ΔE)[1] نیز با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (یعقوبی سوره و همکاران، ۱۳۹۲).

$$\Delta E=\sqrt{(L_o-L)^2+(a_o-a)^2+(b_o-b)^2} \quad (۱)$$

مطالعات محققین مختلف نشان داده است که تخریب شاخص‌های رنگ (Lab) در رب گوجه فرنگی در فاز گرمایشی از معادله سینتیک درجه اول تبعیت می‌کند، در ضمن شاخص اختلاف رنگ کل از واکنش درجه صفر پیروی می‌نماید (گنجه و همکاران، ۱۳۹٤). جهت تعیین تأثیر درجه حرارت روی مقادیر ثابت سرعت از معادله آرنیوس (معادله ۳) استفاده شد.

$$C=C_o\exp(kt) \quad (۲)$$

$$Lnk=Lnk_o-\frac{E_a}{R_gT} \quad (۳)$$

در معادله های فوق C و Co به ترتیب مقدار شاخص رنگ در زمان t و مقدار شاخص مورد نظر در زمان صفر می‌باشد (شرط اولیه). k ثابت سرعت واکنش درجه اول بر حسب یک بر دقیقه، E_a انرژی فعال سازی واکنش بر حسب کیلوکالری بر مول، R_g ثابت گازها و k_o مقدار فاکتور پیشنمایی و T دما بر حسب کلوین می‌باشد.

تعیین تعداد میکروب های باقیمانده در حین فرایند

به منظور تعیین تعداد میکروب ها در حین فرایند حرارتی فرض می‌شود که نابودی *باسیلوس کواگولانس* از معادله سینتیک درجه یک تبعیت می‌کند. در این مطالعه فرض شد که مقدار اولیه جمعیت *باسیلوس کواگولانس* (CFU/g) ۱۰^٤ می‌باشد (ساندوال و همکاران، ۱۹۹۲).

$$\frac{dN}{dt}=-\frac{2.303}{D}N \quad (۴)$$

برای مطالعه اثر درجه حرارت بر روند نابودی میکروب ها از مفهوم مقاومت حرارتی میکروب‌ها (Z_{value}) استفاده شد.

$$D_T=D_{90}10^{\left(\frac{90-T}{Z_{value}}\right)} \quad (۵)$$

در معادله فوق، $D_{90}=3\min$ ، زمان کاهش اعشاری برای *باسیلوس کواگولانس* در دمای نود درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و مقدار مقاومت حرارتی میکروب مذکور ۹/۵ درجه سانتی‌گراد فرض شد (ساندوال و همکاران، ۱۹۹۲).

توسعه مدل انتقال حرارت

مدل انتقال حرارت بر اساس مدل ارایه شده در مقاله پیشین توسعه یافت. به طور خلاصه، ویژگی‌های ترموفیزیکی رب گوجه با استفاده از ترکیب شیمیایی محصول و با استفاده از مدل موازی تعیین شد. مدل انتقال حرارت با فرض تقارن محوری تنها برای ۱/٤ از کل قوطی در نظر گرفته شد. معادلات حاکم و شرایط مرزی و اولیه به صورت زیر در نظر گرفته شد (دلوی، همدمی۱۳۸۹ ، دلوی ۱٤۰۰).

الف) معادله حاکم

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2T}{\partial Z^2}\right) \quad (۶)$$

ب) شرایط مرزی

$$T(R,Z,t)=h_m\Delta(T) \quad (۷)$$

$$T(r,l,t)=h_m\Delta(T) \quad (۸)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0,Z,t)=0 \quad (۹)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(r,0,t)=0 \quad (۱۰)$$

حد فاصل بین فضای خالی بالای سر قوطی[2] و محصول

$$k_a\frac{\partial T}{\partial x}=k_p\frac{\partial T}{\partial x} \quad (۱۱)$$

[1] Total color difference

[2] Head Space

ج) شرط اولیه

$$T = T_0 \qquad (۱۲)$$

کلیه معادلات انتقال حرارت و معادلات سینتیک رنگ و نابودی میکروب باسیلوس کواگولانس در نرم افزارCOMSOL 5.5 مدل سازی شد. وابستگی دمایی معادلات سینتیک رنگ و غیرفعال شدن میکروب با در نظر گرفتن کوپلینگ بین معادله انتقال حرارت و معادلات مذکور در نظر گرفته شد. کلیه پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای بکار گرفته شده در مدل

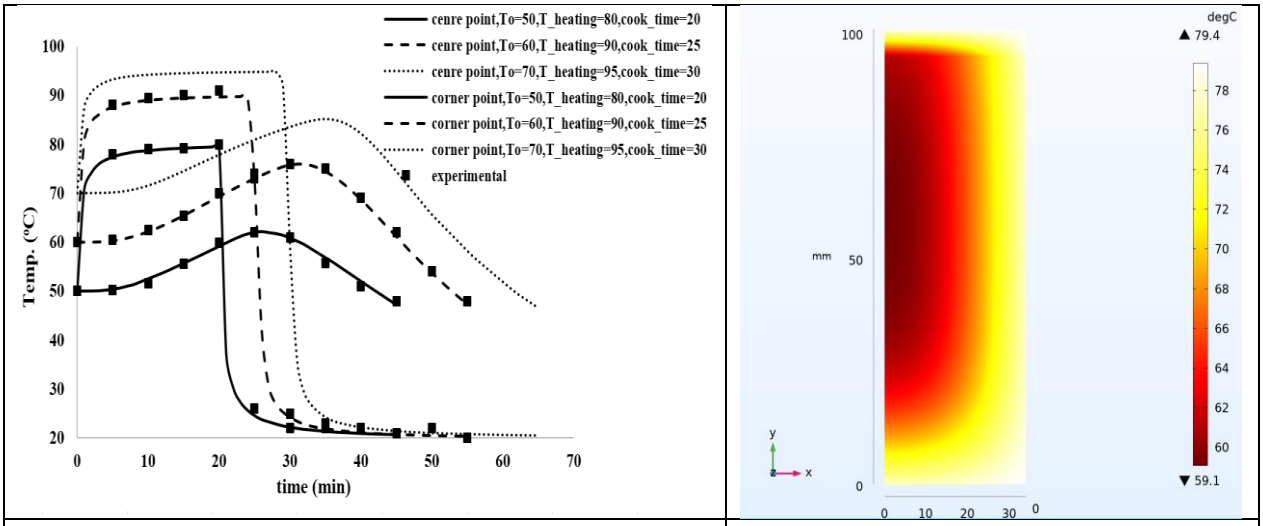
Table 2- Parameters used in the model

Parameters	Value (unit)
Initial Temp. (To)	50, 60 and 70 (ºC)
Heating Temp. (T_heating)	80, 90 and 95 (ºC)
Cooling Temp.	20 (ºC)
Reference Temp.	90 (ºC)
Ambient Temp.	25 (ºC)
Heting time (cook_time)	20, 25 and 30 (min)
D_{90}	3.5 (min)
Z_value	9.5 (ºC)
Initial microbial population (N_o)	10000 (CFU/g)
Pre-exponential factor ($L_{1)}$	80821 (min^{-1})
Pre-exponential factor ($L_{2)}$	3.5966 (min^{-1})
Activation energy ($L_{1)}$	11.5 (kcal/mol)
Activation energy ($L_{2)}$	5.73 (kcal/mol)
Pre-exponential factor (*a)*	8955.29 (min^{-1})
Activation energy (*a)*	9.79 (kcal/mol)
Pre-exponential factor (b)	43786 (min^{-1})
Activation energy (*b)*	20.5 (kcal/mol)
Gas constant (R_g)	1.987 (Cal/(mol.K))
Convective heat transfer coefficient	200 (W/(m2.K))
Thermal conductivity of tomato paste (W/mK) (k_p)	0.575 ((W/mK))
Thermal conductivity of Air (k_a)	0.026 (W/mK)
Specific heat of tomato paste	3350 (J/kgK)
Density of tomato paste	1070 (kg/m^3)

نتایج و بحث

پروفیل دما

شکل زیر پروفیل درجه حرارت محصول در دو نقطه سرد (ارتفاع ۶۰ درصدی از مرکز قوطی R=0 mm, H=60.5 mm) و نقطه گرم در سطح قوطی(R=34.2 mm, H=0 mm) را تحت سه رژیم حرارتی مختلف در تونل پاستور را نشان می‌دهد (شکل ۱-الف). انتخاب این نقاط با توجه به کمینه و بیشینه دما در پایان مرحله فاز صورت گرفت (شکل ۱-ب). دلیل اینکه نقطه سرد دقیقا در مرکز هندسی قوطی قرار ندارد به دلیل وجود یک لایه هوا-بخار در بخش فوقانی سر قوطی است.



a -الف | b- ب

شکل ۱- الف، پروفیل دمای پیش بینی شده و آزمایش شده در نقاط مرکز و سطح قوطی در رژیم های حرارتی مختلف

شکل ۱- ب، پروفیل دمای پیش بینی شده در قوطی در پایان فاز گرمایشی

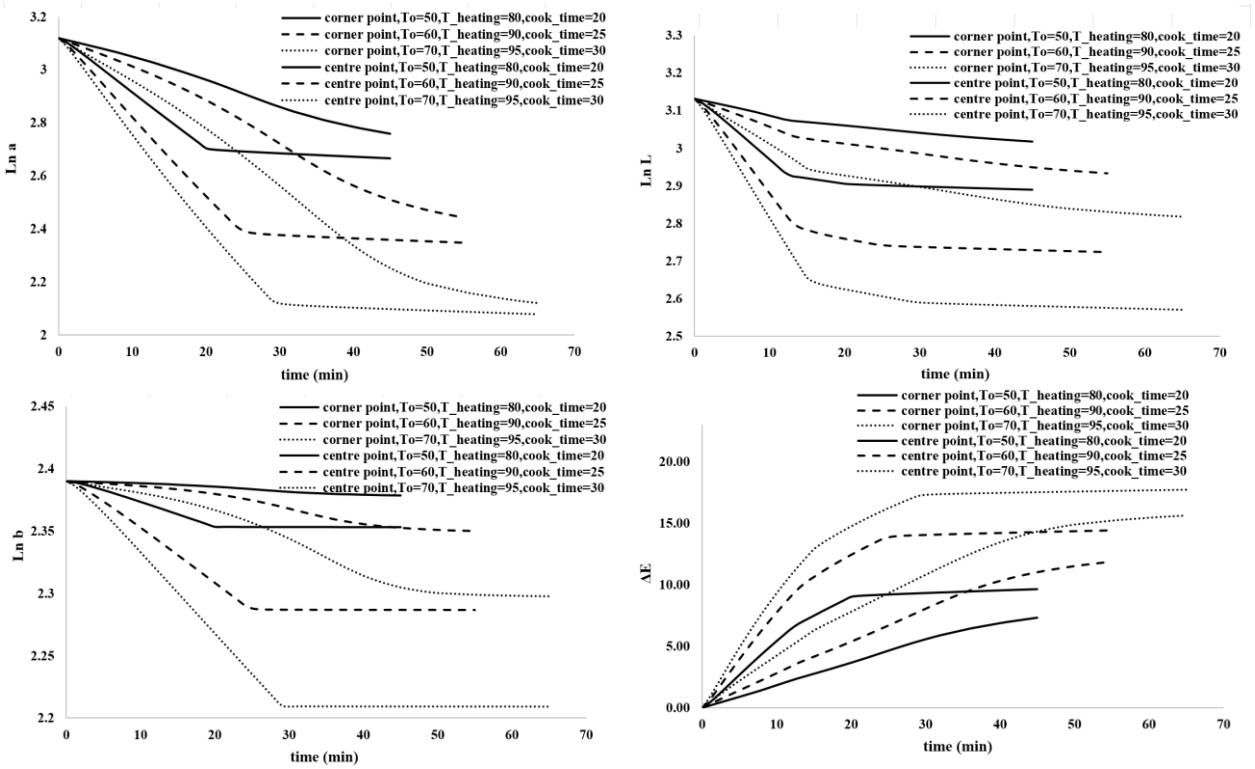
Figure 1-a. Predicted temperature profile in center and corner points of the can at different heating regimes.
Figure 1-b. temperature profile in the can at the end of heating

اثر فرایند بر رنگ

رنگ رب گوجه فرنگی به مرور زمان در طی فرایند حرارتی و همچنین با افزایش دما به سمت تیرگی تمایل پیدا می‌کند که این امر با کاهش شاخص (L) در نمودار قابل توجیه است. علاوه براین شاخص (a) که نشان دهنده قرمزی – سبزی محصول است و تاثیر مهمی در انتخاب محصول توسط مصرف کننده دارد کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد این موضوع می‌تواند به ایزومریزاسیون لیکوپن و یا تجزیه کلروفیل به فئوفیتین نسبت داده شود. نتایج آزمایشگاهی هم موید همین موضوع است (گنجه وهمکاران، ۱۳۹٤، شوارتز و همکاران، ۱۹۹۱). روند کاملاً مشابهی در مورد شاخص زردی (b) قابل مشاهده است که دلیل این مساله نیز به ایزومریزاسیون کاروتنوئیدها در طی فرایند حرارتی نسبت می‌دهند (چوتین تراسری و نومهورم، ۲۰۰۷).

با توجه به وابستگی شدید تخریب رنگدانه‌های رب به دما، تغییرات شاخص‌های رنگ در دو نقطه با کمترین و بیشترین تاریخچه دمایی با استفاده از معادله سینتیک درجه اول و معادله آرنیوس مدل‌سازی شد و نتایج آن در شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۲). همانطور که انتظار می‌رود افت و تخریب رنگ در نقطه مرکزی قوطی کمتر از نقطه واقع شده در سطح قوطی است. که دلیل آن همانطور که پیشتر اشاره شد، به دلیل اختلاف قابل توجه دما در حین فاز گرمایشی بین این دو نقطه است. با ورود آب سرد در انتهای فاز گرمایشی و بدنبال کاهش دمای در نقاط مذکور افت تخریب رنگ روند کاهشی و ثابت به خود می‌گیرد. نکته دیگری که از شکل مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش در بین شاخص‌های رنگ با حدود ٦٣ درصد افت مربوط به شاخص a (قرمزی-سبزی) محصول می‌باشد و کمترین تغییرات در شاخص b (زردی-آبی) مشاهده می‌شود. علاوه براین همانطور که از شکل مشاهده می‌شود روند تغییرات برای شاخص اختلاف رنگ کلی یا (ΔE) برخلاف پارامترهای دیگر از سینتیک درجه صفر پیروی می‌کند و به همین دلیل با افزایش دما شاهد افزایش میزان این شاخص هستیم. نتایج این مطالعه با نتایج به دست آمده توسط نیشا و همکاران (۲۰۱۱) و گنجه و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت نشان می‌دهد، این محققین نیز نشان دادند که کینتیک

نابودی رنگ محصول، فارغ از روش فراوری (پخت در محیط سرباز[1] و یا پخت تحت فشار[2]) به جز شاخص اختلاف رنگ کلی (ΔE)، از معادله درجه یک تبعیت می‌کند و وابستگی دمایی تخریب رنگ محصول را می‌توان با دقت بالایی با استفاده از معادله آرنیوس پیش بینی کرد.



شکل ۲- سینتیک تخریب رنگ شاخص های رنگ رب گوجه فرنگی تحت رژیم های گرمایشی مختلف

Figure 2. Kinetics of the thermal degradation of the color parameter 'L, a, b and ΔE' in tomato paste under different heating regimes

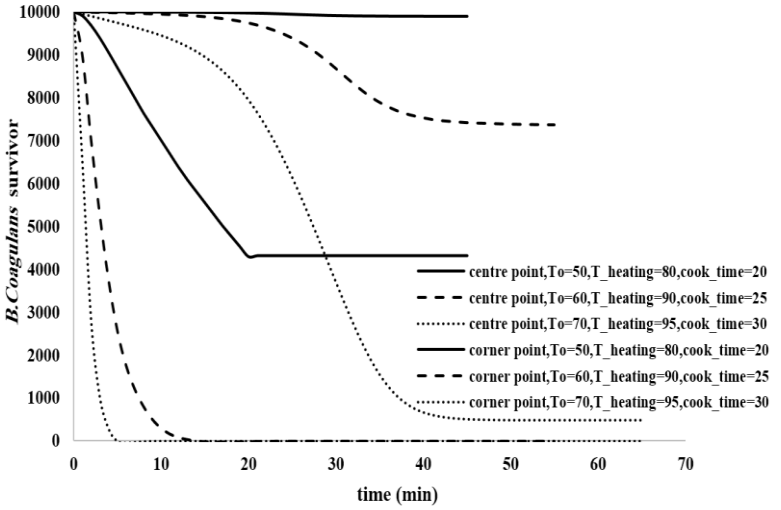
روند نابودی باسیلوس کواگولانس

شکل ۳ روند تغییرات نابودی باسیلوس کواگولانس به عنوان تابعی از زمان فرایند حرارتی در رژیم های مختلف حرارتی را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، روند کاهش تعداد میکروارگانیسم در مرکز قوطی به شدت کندتر و بطئی تر از نقطه واقع شده در سطح قوطی است که این موضوع به دلیل نفوذ کند حرارت به مرکز قوطی و مقاومت بالای حرارتی میکروارگانیسم (D_{90}=3.5 min) می‌تواند مربوط باشد. نکته دیگری که از شکل استنباط می‌شود وابستگی شدید کاهش تعداد میکروب‌ها به دما است، به طوریکه با ورود آب سرد (فاز سرمایشی) و کاهش دما روند نابودی میکروب تقریبا ثابت می‌شود. نکته قابل تامل دیگری که از نمودار مشاهده می‌شود، زمانی که رژیم حرارتی (درجه حرارت اولیه قوطی ۵۰ درجه سانتی‌گراد، دمای محیط حرارت دهی ۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان فاز گرمایشی ۲۰ دقیقه) در تونل پاستور تنظیم شود، تعداد باکتری‌ها در مرکز حرارتی قوطی حتی یک سیکل لگاریتمی نیز کاهش پیدا نمی‌کند (خط مشکی توپر در مرکز قوطی). اهمیت این موضوع زمانی روشن می‌شود که این رژیم حرارتی بر اساس اطلاعات به دست آمده از چند کارخانه تولید رب گوجه فرنگی برای این مدل‌سازی در نظر گرفته شده

[1] Open pan cooking

[2] Pressure cooking

است. ذکر این نکته در اینجا قابل توجه است که بر اساس قوانین استاندارد ایران به شماره سند ۲۲۳٦، حد قابل قبول باکتری‌های مقاوم به اسید مزوفیل، باکتری‌های مقاوم به اسید ترموفیل و کپک و مخمر در هر گرم از فراورده مطابق با ویژگی‌های میکروبیولوژی مواد غذایی اسیدی یا اسیدی شده باید منفی باشد. اگر شدیدترین رژیم حرارتی برای تونل پاستور در نظر گرفته شود (درجه حرارت اولیه ۷۰ درجه سانتی‌گراد، دمای محیط حرارت دهی ۹۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان پختن (فاز گرمایشی) سی دقیقه)، حدود سه سیکل لگاریتمی از باکتری باسیلوس کواگولانس در نقطه سرد قوطی کاسته می‌شود. بنابراین و بر اساس نتایج این شبیه سازی به نظر می‌رسد به دلیل مقاومت حرارتی بالای باکتری‌های ترموفیلی همچون باسیلوس کواگولانس، بعید به نظر می‌رسد تونل پاستور بتواند حدود 5D از تعداد باکتری بکاهد و در شدید ترین رژیم حرارتی که در کمتر کارخانه ای در ایران در نظر گرفته می‌شود حداکثر 3D از جمعیت اولیه باکتری‌ها کاسته می‌شود. ذکر این نکته در این جا ضروری است که بر اساس استاندارد، حداقل فرایند برای مواد غذایی با pH کمتر از ٤/٦ باید بتواند حداقل 5D از میکروارگانیسم‌های بیماریزا و 8D از باکتری‌های مولد فساد را بکاهد (تولیدو، ۲۰۱۸).



شکل ۳- نمودار بقا باکتری باسیلوس کواگولانس تحت رژیم های گرمایشی مختلف

Figure 3. Survivor curves for *B. coagulans* in tomato paste under different heating regimes

در نتیجه به نظر می‌رسد نخستین مرحله فرایند حرارتی محصول که بعد از تغلیظ صورت می‌گیرد (پاستوریزاسیون لوله ای)، نقش مهمتری در کاهش بار میکروبی در مقایسه با تونل پاستور بر عهده دارد و چنانچه دمای محصول در پاستوریزاسیون لوله ای به حد مطلوب (۸۸ درجه سلسیوس) نرسد مرحله فرآیند حرارتی قوطی پرشده (تونل پاستور) قادربه کاهش بار میکروبی درحد تعیین شده دراستاندارد ملی ایران ۲۲۳٦ نخواهد بود و صرفا افزایش دما و یا زمان فرایند در تونل پاستور به کاهش و تخریب بیشتر رنگ نهایی محصول منجر خواهد شد. ذکر این نکته در این‌جا ضروری به نظر می‌رسد که در صورت تعیین دقیق تعداد اولیه باکتری‌ها در مدل، دقت نهایی مدل افزایش قابل توجهی را نشان خواهد داد، هر چند تعیین این پارامتر دشوار بوده و به شدت بستگی به کیفیت ماده خام اولیه و شرایط نگهداری و فراوری دارد. برای مثال، الهامی راد و همکاران (۱۳۸۳)، نشان دادند که مرحله تغلیظ در اواپراتور، باعث فعال شدن فرم‌های اسپوری باکتری‌های مقاوم به حرارت می‌شود. مالیدیس و همکاران (۱۹۹۰)، تعداد این باکتری را در قوطی قبل از پاستوریزاسیون ۲۰۰ اسپور

در هر گرم تعیین کرده اند ولی ساندوال و همکاران (۱۹۹۲)، تعداد این باکتری را تا ۱۰۰۰ اسپور در هر گرم تعیین کرده اند.

نتیجه گیری نهایی

در این مطالعه، مدل انتقال حرارت دو بعدی برای پاستوریزاسیون در قوطی محصول رب گوجه فرنگی ارایه شد، با توجه به کوپل شدن معادلات سینتیک غیرفعال سازی میکروبی و تغییرات رنگ در مدل مذکور، می‌توان از این مدل برای بهینه سازی فرایند و بهبود فرایند تولید در سطح صنعتی استفاده نمود.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که به دلیل عدم کفایت کافی مرحله تونل پاستور، این مرحله از فرایند قادر به کاهش در تعداد باکتری‌های اسپورزای مقاوم به اسید مانند گونه‌های مختلف جنس باسیلوس و یا کلستریدیوم نخواهد بود. لذا، پیشنهاد می‌گردد مرحله پاستوریزاسیون اولیه محصول که بلافاصله بعد از تغلیظ صورت می‌گیرد به عنوان نقطه کنترل بحرانی (CCP) در نظر گرفته شود و درجه حرارت محصول در هنگام پرشدن درقوطی بدرستی کنترل گردد. در ضمن افزایش درجه حرارت و یا مدت زمان فرایند پاستوریزاسیون قوطی، صرفا باعث افت بیشتر و تخریب وسیع تر رنگ نهایی محصول خواهد شد.

منابع مورد استفاده

استاندارد ملی ایران ۷۶۱، کنسرو رب گوجه فرنگی- ویژگی ها و روش های آزمون، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

استاندارد ملی ایران ۲۳۲۶، میکروبیولوژی مواد غذایی کنسرو شده - سترونی تجاری - ویژگی ها و روش های آزمون، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

الهامی‌راد ، ا و شهیدی ف، ۱۳۸۳. ارزیابی تغییرهای فیریکوشیمیایی و میکروبی رب گوجه‌فرنگی فله در طی نگه‌داری در سردخانه. مجله علوم آب و خاک. ۸ (۱) :۱۷۱-۱۸۱

پاکدل س و رفیعی ح، ۱۳۹۰. بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رب گوجه فرنگی تحت تأثیر فرایند حرارتی و تحت تأثیر انبارداری در شرایط و دماهای مختلف، همایش ملی صنایع غذایی، قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان.

دلوی م و همدمی ن ، ۱۳۸۹. مدل سازی عددی انتقال حرارت در پنیر سفید فراپالایش شده. نشریه پژوهش های صنایع غذایی، ۳(۲)، ۴۵-۶۰.

دلوی م ، ۱۴۰۰. مقایسه کارآیی بین دو روش مختلف مدل سازی عددی برای پیش بینی دمای رب گوجه فرنگی در طی فرآیند پاستوریزاسیون. نشریه پژوهش های صنایع غذایی، ۳۱ (۱) ، ۸۳-۹۴.

گنجه م، جعفری س و قادری س، ۱۳۹۴. بررسی سینتیک تخریب رنگ رب گوجه فرنگی در طی فرایند حرارتی و مدل سازی این تغییرات با روش سطح پاسخ. تولید فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۵(۱۷) . ۴۳-۵۶.

یعقوبی سوره ا، علیزاده خالدآباد م و رضازاد باری م، ۱۳۹۲. کاربرد پردازش تصویر برای تعیین شاخصهای رنگی L*a*b* در سنجش رنگ غذاها، نشریه پژوهشهای صنایع غذایی، جلد ۲۳ شماره ۳، ۴۱۱-۴۲۲.

مهدیزاده م، ۱۳۷۳، شناسائی باکتری باسیلوس ترمواسیدورانس (باسیلوس کواگولانس) در کنسروهای رب گوجه‌فرنگی/ مجموعه مقالات هفتمین کنگره ملی صنایع غذایی ایران (عوامل آلوده کننده مواد غذایی . دولتی - وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری - دانشگاه تهران.

Barreiro J.A, Milano M and Sandoval A.J, 1997. Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. Journal of Food Engineering 33(3), 359-371.

Chutintrasri, b and Noomhorm A, 2007. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT- Food Science and Technology* 40: 300–306.

Ganje M, Jafari S.M and Farzaneh V, 2018. Kinetics modelling of color deterioration during thermal processing of tomato paste with the use of response surface methodology. *Heat Mass Transfer* 54, 3663–3671.

Holdsworth S.D and Simpson, R, 2016. Thermal processing of packaged foods. Springer International Publishing, New York.

Mallidis C.G, Frantzeskakis P, Balatsouras G and Katsaboxakis C, 1990. Thermal treatment of aseptically processed tomato paste. *International Journal of Food Science & Technology, 25*(4), 442-448.

Nisha P, Singhal R.S and Pandit A.B, 2011. Kinetic Modelling of Colour Degradation in Tomato Puree (*Lycopersicon esculentum L.*). *Food Bioprocess Technology* 4, 781–787.

Plazl I, Lakner M and Koloini T, 2006. Modeling of temperature distributions in canned tomato based dip during industrial pasteurization. Journal of Food Engineering 75(3), 400-406.

Sandoval A.J, Barreiro J.A and Mendoza S, 1992. Thermal Resistance of Bacillus coagulans in Double Concentrated Tomato Paste. Journal of Food Science 57(6), 1369-1370.

Schwartz S.J. and Lorenzo T.V, 1991. Chlorophyll stability during continuous aseptic processing and storage. *Journal of Food Science* 56: 10-59.

Singh R.P and Heldman D.R, 2014. Chapter 8 - Evaporation, in: Singh, R.P., Heldman, D.R. (Eds.), Introduction to Food Engineering (Fifth Edition). Academic Press, San Diego, pp. 565-592.

Toledo R. T. 2018. *Fundamentals of Food Process Engineering*. New York: Springer International Publishing.

Zimmermann M, Schaffner D.W, and Aragão, G, 2013. Modeling the inactivation kinetics of Bacillus coagulans spores in tomato pulp from the combined effect of high pressure and moderate temperature. *LWT - Food Science and Technology, 53*(1), 107-112.

Journal of Food Researches/vol.31 No.3 2021/pp 51-62
https://foodresearch.tabrizu.ac.ir
DOI: 10.22034/FR.2021.39743.1738

Modelling colour degradation and microbial inactivation kinetics of tomato paste during in-container pasteurization process

M Dalvi-Isfahan[1*]

Received: May 10, 2020 Accepted: October 13, 2020
[1]Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Fars, Iran
[*]Corresponding author: Email: dalvi@jahromu.ac.ir

Introduction: In Iran, tomato paste is the most important tomato product because of its widespread use for the preparation of various food menus. Tomato paste is the concentrated product obtained by evaporating tomatoes from which the seeds and skins have been removed (Singh and Headman, 2014). Lactic acid bacteria and spore-forming bacteria are the primary groups of microorganisms involved in the spoilage of tomato products. Among these microorganisms, B. *coagulans* is considered to be the most important spoilage bacteria, not only because it is more frequently encountered but it has a higher heat resistance than the other spore formers involved in the spoilage of tomato products (Zimmermann, Schaffner, & Aragão, 2013). It is responsible for causing “flat sour” spoilage of canned foods due to the production of lactic acid without gas formation (Mallidis, et. al., 1990). Tomato paste is pasteurized with a mild heating process to eliminate or reduce the number of spoilage microorganisms to an acceptable level and provide conditions that limit the growth of other spoilage microorganisms. However, when food is heated to destroy microorganisms, several types of chemical and physicochemical reactions also occur, some desirable such as enzyme destruction, cooking, texture softening, others less desirable but often inevitable to some degree (e.g., nutrient destruction and loss of organoleptic quality, color, texture, and flavor). These reactions are essentially chemical and temperature-dependent.

The art of canning depends on being able to choose processes that are microbiologically safe but result in the least loss of quality (Holdsworth and Simpson, 2016). Color as a very important quality factor in tomato concentrates which can influence consumer acceptability may be damaged during heat processing. Discoloration and browning of tomato paste are the results of various reactions. Among them, the most common are pigment degradation, especially carotenoids (lycopene, xanthophyll, etc.) and chlorophyll, and browning reactions such as the Maillard reaction and oxidation of ascorbic acid (Barreiro, Milano, & Sandoval, 1997).

Kinetics of pigment and color degradation of vegetables during thermal processing has been studied. The major finding of these studies is that both pigment and color degradation during thermal processing follows the first-order reaction kinetics and the effect of temperature on the rate of reaction can be modeled by the Arrhenius equation (Chutintrasri and Noomhorm, 2007).

Our previous study also indicated that the cold point location is at the radial center between the middle and top of the can at a height of 60% of the can height from the bottom. To follow-up on our previous research, the following objectives will be pursued in the current study. To develop a mathematical kinetic model describing the color loss in tomato paste as a function of temperature and in the second step, by using results obtained from heat transfer modeling, we develop a model that can measure and quantify temperature at any point, the amount of microbial load in the product, and changes in color indices at different points in the can. Modeling kinetics of microbial inactivation and color loss during

pasteurization is a good means of further optimizing pasteurization conditions of tomato paste on an industrial level.

Material and methods: Experiments were run with batches of 400 g of tomato paste (pH = 4.1 and 28°Brix) in cylindrical cans (211×400) and hot water was used as the heating medium. The chemical analysis of the tomato paste sample was performed in the first step and the thermal properties of the tomato paste product were determined based on the sample chemical composition. Temperature changes at various positions in the container were checked with a data logger (Testo, Germany) coupled with computer and thermocouples type-K (at 5 min intervals). The data were used to validate the developed model. A 2D heat transfer model was developed in a cylindrical can by using the numerical solution of the Fourier second law. The computer simulation was done using COMSOL Multiphysics, Ver. 4.0. The microbial inactivation model and the color loss of tomato paste model were considered as a first order reactions and coupled with heat transfer module.

Results and discussion: Firstly, the cold and hot points in the can were determined and validated against experimental data. Results showed that the cold point is located at a height of 60% of the can height from the bottom and the hot point is located at the surface of the can. Since microbial inactivation and chemical reactions which deteriorate the quality of food materials are essentially chemical and temperature-dependent, the changes in microbial load and color loss were monitored in two mentioned points.

The effect of pasteurization temperature on the color degradation and microbial inactivation of B. *coagulans* in a can were followed first-order reactions and temperature dependence of color loss and microbial inactivation were expressed by the Arrhenius equation and thermal resistance constant (Z_value) respectively. As we expected, results indicated that the very high temperature will cause severe color degradation of the food near the surface long before the food at the center of the container has risen in temperature. The surface color change of tomato paste was more rapid at higher temperatures. The color parameters L, a, and b values changed at different rates with different heating regimes. At the following heating regime as a most severe heat regime (heating temperature = 95 ^{o}C, heating time=30 min and initial temperature =70 ^{o}C) the L, a and b color parameters at the near surface of the can change from 22.9 to 13.0, from 22.6 to 7.9 and from 10.9 to 9.1 respectively. Another point that can be drawn is that the thermal degradation in parameter (a) was higher than other color parameters, so that about 60% decrease in this index is observed in the above thermal regime.

Although it has been established that the minimum safe heat process given to food with low pH should be at least 5D for pathogenic microorganisms and 8D for spoilage microorganisms (Toledo, 2018), our results showed that the pasteurization tunnel in the most severe heating regime can only provide a 3D reduction of B. *coagulans* in the thermal center of the cans. This was due to slow heat penetration to the center of the can and high heat resistance of a B.*coagulans*.

Based on these facts we can conclude that the thermal processing used in the tomato paste industry is inadequate and the first stage of the product's thermal process (tubular pasteurization) plays a more important role in reducing microbial load than in the pasteurized tunnel.

Conclusion: A two-dimensional finite element model was developed to calculate temperature histories at two selected points within container, coupled with microbial inactivation of B.*coagulans* and color degradation kinetics. Results showed that by applying more intense time- temperature in the pasteurizer, the color of the product was more damaged but the heat processing was not sufficient to reduce the number of microorganisms to a certain degree (5D) in the thermal center. However, it is necessary to point out that, to establish a more accurate thermal process, it is necessary to find the load of B. *coagulans* in the under-processed product.

Keywords: Color loss, *Bacillus Coagulans*, Tomato paste, Modeling