

اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی رب گوجه فرنگی تحت گرمایش اهمیک

Effect of voltage gradient on electrical conductivity of tomato paste under ohmic heating

مهدي ترکیان بلداجی^۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

چکیده:

گرمایش اهمی روشی نوین در فرآوری محصولات کشاورزی می باشد که با عبور جریان متناوب از میان ماده غذایی تولید گرما در داخل محصول نموده و باعث گرم شدن آن می شود. هدایت الکتریکی محصول غذایی یکی از عوامل تاثیر گذار در راندمان این سیستم می باشد. در این مقاله به بررسی اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی رب گوجه فرنگی در فرآوری به روش گرمایش اهمیک پرداخته می شود. به این منظور چهار گرادیان ولتاژ ۵، ۷، ۹ و 11V/cm در نظر گرفته شد. الکتروود به کار رفته در این تحقیق از نوع استیل زنگ نزن و غلظت نمک طعام ۲٪ وزنی می باشد. نتایج نشان داد اثر گرادیان ولتاژ بر شیب هدایت الکتریکی در سطح احتمال ۱٪ معنی دار می باشد و با افزایش دما و گذشت زمان هدایت الکتریکی افزایش می یابد هرچند با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی کاهش یافت.

کلمات کلیدی: رب گوجه فرنگی، گرادیان ولتاژ، گرمایش اهمی، هدایت الکتریکی

مقدمه:

تغلیظ یا کنسانتره کردن مواد غذایی و خشک کردن برای مقاصد مختلفی می تواند انجام گیرد که یکی از آنها نگهداری و حفاظت ماده غذایی است. کاهش وزن و کاستن از هزینه ظروف، مکان و حمل و نقل از جمله دلایل دیگر استفاده از این فرآیند می باشد که ممکن است حتی مهمتر از هدف نگهداری باشد (غرقی، ۱۳۹۲).

یکی از محصولات کشاورزی که امروزه نقش بسزایی در تغذیه دارد و هم به صورت تازه و هم به صورت محصول فرآوری شده مورد مصرف قرار می گیرد گوجه فرنگی می باشد. بر اساس آمارهای سازمان FAO ایران رتبه هفتم جهانی تولید این محصول را به خود اختصاص داده است (FAO, 2021).

لذا فرآوری این محصول در ایران از اهمیت بالایی برخوردار است و به لحاظ اقتصادی میتواند به عنوان یک محصول استراتژیک مورد بررسی قرار گیرد. روشهای مختلفی به منظور تغلیظ و خشک کردن مورد استفاده قرار میگیرند اما با توجه به دو بحران

^۱ استادیار گروه مکانیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا و قرچک، ورامین، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبه کننده: mhdtorkian@yahoo.com

انرژی و حیثیت زیست بررسی روشهای نوین فرآوری که از نظر مصرف انرژی بهینه‌تر باشند و از طرفی دوستدار محیط زیست بود و کیفیت مواد غذایی را بیشتر حفظ کند از اهمیت بالاتری برخوردار است. یکی از این روشها گرمایش اهمیک است. استفاده از تکنولوژی گرمایش اهمی از لحاظ تاریخی به قرن نوزدهم برمی‌گردد ولی کاربردهای تجارتي بسیار موفق آن در فرآیند حرارتي مواد غذایی از دهه ۱۹۰۰ به بعد شکل گرفت (Kurnia et al., 2021).

گرمایش اهمی نام خود را از قانون اهم گرفته است که رابطه‌ای بین جریان، ولتاژ و مقاومت الکتریکی یک ماده بیان می‌شود. محصولات غذایی هنگامی که بین دو الکترود قرار می‌گیرند به عنوان یک مقاومت عمل نموده و جریان از بین آنها عبور می‌کند. به عبارت دیگر غذا قسمتی از مدار الکتریکی است (Cullen et al., 2012).

این فرآیند حرارتي با نام‌های گرمایش ژولی^۱، گرمایش هدایت الکتریکی^۲، گرمایش مقاومتی^۳، گرمایش مقاومت الکتریکی مستقیم^۴ و گرمایش الکتریکی^۵ نیز شناخته می‌شود (Wang et al., 2007).

رسانایی الکتریکی^۶ (σ) مهم‌ترین پارامتر در گرمایش اهمی می‌باشد، علاوه بر آن خواص الکتریکی مانند: گرادیان میدان و ولتاژ در مواد غذایی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. نوع مواد غذایی، ویژگی‌های حرارتي و نوع الکترودها نیز بر راندمان این سیستم تاثیرگذار می‌باشند.

اثر نوع الکترود در طی فرآیند گرمایش اهمی در تحقیقی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که نوع الکترود اثر زیادی بر راندمان حرارتي، انرژی مصرفی و مدت زمان فرآیند گرمایش اهمی دارد (Zell et al., 2010).

همچنین در تحقیقی دیگر بیان شد که هدایت الکتریکی به غلظت و دمای ماده غذایی بستگی دارد. در گرمایش اهمی استفاده از گرادیان ولتاژ پایین باعث کاهش انرژی مصرفی و افزایش راندمان سیستم گرمایش اهمی می‌گردد (Cristina et al., 1999).

سانجای سارانگ و همکاران به بررسی رسانایی الکتریکی میوه‌ها و گوشت‌ها در روش گرمایش اهمی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که طراحی موثر سیستم گرمایش اهمی به ضریب هدایت الکتریکی ماده غذایی وابسته است. آنها ضریب هدایت الکتریکی را برای شش میوه تازه شامل: گلابی، سیب طلایی، هلو، سیب قرمز، توت‌فرنگی و آناناس و برای سه قطعه گوشت شامل: گوشت مرغ، گوشت گراز و گوشت گاو در دمای اتاق بدست آوردند. آنها اعلام کردند که در همه نمونه‌ها ضریب هدایت الکتریکی با افزایش دما افزایش می‌یابد و ضریب هدایت الکتریکی میوه‌ها نسبت به نمونه‌های گوشت بیشتر است. همچنین بیشترین رسانایی الکتریکی را در هلو و توت‌فرنگی نسبت به سیب و گلابی گزارش کردند (Sanjay sarang et al., 2008).

1. Joule heating

2. Electroconductive heating

3. Electrical resistance heating

4. Direct electrical resistance heating,

5. Electroheating

6. Electrical Conductivity

در تحقیق دیگرشویه سازی هدایت الکتریکی و حرارتی هویج، سیب زمینی، اسفناج، گوشت گاو طی فرآیند گرمایش اهمی در محدوده دمایی ۲۵ تا ۱۲۵°C مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش دما و گرادیان ولتاژ، ضریب هدایت الکتریکی بطور خطی افزایش می‌یابد (Zhu et al., 2010).

فرکانس و شکل موج ولتاژ به کار رفته، مقادیر هدایت الکتریکی و فرآیند گرمایش نمونه‌های غذایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هدایت الکتریکی مشاهده شده با استفاده از موج‌های سینوسی و دنده اره‌ای در فرکانس‌های پایین (۴Hz)، نسبت به مقادیر مشاهده شده در استفاده از موج‌های مربعی، بیشتر است (Cullen et al., 2012).

روش کار

۱- آماده‌سازی پوره گوجه فرنگی: به منظور تولید رب از گوجه فرنگی ابتدا عمل پوست کنی گوجه فرنگی به روش تیمار گرمایش و سرمایش انجام شد سپس به منظور تهیه مخلوط همگن از یک همزن مکانیکی (IKA Eurostar made in Germany power control-visc 6000) استفاده شد و با دور ۵۰۰ rpm پالپ گوجه فرنگی بهم زده شد تا یک محلول یکنواخت به نام پوره بدست آید. به منظور جدا سازی دانه، پوره از صافی با مش ۱mm عبور داده شد. در مرحله بعد به پوره تولید شده نمک خوارکی (سدیم کلرید) به میزان ۱ درصد وزنی اضافه شد.

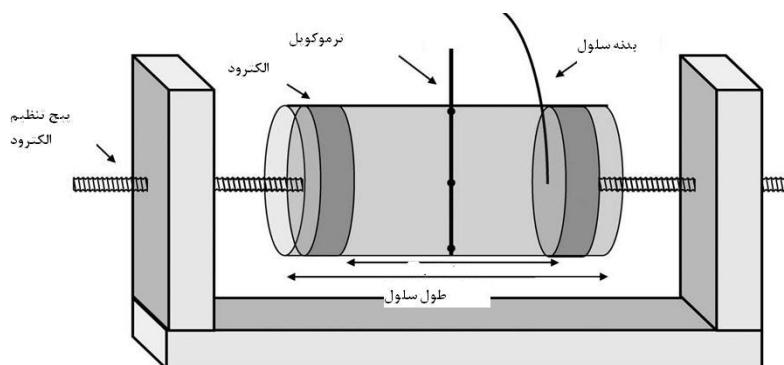
۲- سیستم گرمایش اهمی:

بدنه سلول گرمایش اهمی از جنس تفلون و به شکل یک استوانه توخالی ساخته شد. قطر داخلی استوانه ۵۰mm و طول آن ۱۰۰mm در نظر گرفته شد. الکتروده به کار رفته در این سیستم از جنس استیل زنگ نزن به شکل استوانه با قطر ۵۰ mm و به ضخامت ۳ mm در نظر گرفته شد. نمونه ای از الکتروده استیل زنگ نزن در شکل (۱) مشاهده می شود.



شکل ۱: نمونه الکترودهای استفاده شده در این تحقیق

. برای اندازه گیری دما در داخل سلول گرمایش اهمی از ترموکوپل و ترمومتر مدل Dual inpur RTD 804U (ساخت کشور تایلند) استفاده شد. همچنین به منظور تبدیل ولتاژ ۲۲۰ ولت (ولتاژ رایج در شبکه برقی کشور ایران) به ولتاژهای مورد نیاز از دستگاه رگولاتور ولتاژ (واریاک) (ساخت شرکت امرسان ایران) استفاده گردید. از یک ترازوی دیجیتالی مدل GF-6000 با دقت ۰/۰۱ گرم برای ثبت تغییرات وزن در حین انجام پروسه گرمایشی استفاده شد. شماتیک سیستم گرمایش اهمی به کار برده شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: شماتیک سیستم گرمایش اهمی

۳- هدایت الکتریکی:

دقت گرمایش اهمیک به شدت تحت تاثیر هدایت الکتریکی ماده غذایی است که این ویژگی خواص انتقال جرم و حرارت را به مقدار زیادی، تحت تاثیر قرار می‌دهد. هدایت الکتریکی ماده غذایی نیز به دما، ولتاژ، نوع ماده غذایی، غلظت الکترولیت، میزان فرکانس مصرفی، نوع و شدت میدان الکتریکی بستگی دارد (Lima et al., 1999).

مقادیر لحظه‌ای ثبت شده‌ی ولتاژ و جریان، در طول گرمایش اهمیک، منجر به تعیین هدایت الکتریکی در دماهای مختلف و با سلول اهمی با ابعاد مشخص، می‌شود که می‌توان مقدار آن را به کمک فرمول (۱) محاسبه نمود (de Alwis and Fryer, 1990).

$$\sigma = \frac{L}{A \times R} \quad \text{فرمول ۱}$$

آیسیر و آیسالی (۲۰۰۴) اعلام کردند که هدایت الکتریکی در مواد غذایی به غلظت و میزان نمک ماده وابسته است. ضریب هدایت الکتریکی را بر طبق رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$\sigma = \frac{LI}{VA} \quad \text{فرمول ۲}$$

(σ) : هدایت الکتریکی (S/m)

(V) : ولتاژ بر حسب ولت (v)

(I) : شدت جریان بر حسب آمپر (A)

(L) : فاصله بین الکتروود بر حسب متر (m)

(A) : مساحت مقطع موثر الکتروود بر حسب مترمربع (m^2)

هدایت الکتریکی، با دما به صورت خطی افزایش می‌یابد. در حالی که غلظت مواد جامد محلول و نامحلول، بر غیرخطی بودن آن اثر می‌گذارند که نمونه‌هایی از این روابط در فرمولهای ۳ و ۴ نشان داده شده است (Icier and Ilicali, 2004, 2005; Castro et al., 2003).

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad \text{فرمول ۳}$$

$$\sigma = E_2 (Con\%)^{N_2} + B_2 T + C_2 \quad \text{فرمول ۴}$$

در این معادلات B_1 و C_1 و E_2 و N_2 و B_2 و C_2 ضرایب ثابت می باشند و $Con\%$ غلظت مواد محلول (w/w) را نشان می دهد. وابستگی دمایی به هدایت الکتریکی محصولات مایع، بسته به نوع محصول مورد آزمایش، روابط خطی و یا درجه‌ی دو را دنبال می کنند. وارد کردن گرادیان ولتاژ به معادله‌ی هدایت الکتریکی، بهبود ناچیزی در مدل های پیش‌بینی، ایجاد میکند (Castro et al., 2003).

۴- عوامل موثر در رساناها:

اندازه گیری هدایت الکتریکی در یک الکترولیت کمی متفاوت با رسانای فلزی می باشد. زیرا در یک الکترولیت با توجه به اینکه الکترون های آزاد عامل انتقال الکتریسته باشند یا یون های آزاد میزان مقاومت و همچنین هدایت الکتریکی قدری متفاوت خواهد بود. مقاومت در یک رسانا در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس آن بستگی دارد. طبق آزمایش های انجام شده در مدارات الکتریکی اگر سطح مقطع در تمام طول رسانا یکسان باشد، رابطه‌ی مقاومت رسانا با سایر ویژگی های آن به صورت فرمول (۵) است.

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{VA}{LI}R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{فرمول (۵)}$$

در این رابطه ρ مربوط به جنس رسانا است و مقاومت ویژه رسانا نام دارد. مقادیر L طول رسانا بر حسب متر و A سطح مقطع رسانا بر حسب متر مربع است.

هدایت الکتریکی مواد غذایی از روابط بین ولتاژ و جریان بدست می آید که معکوس مقاومت ویژه رسانا است. این رابطه توسط آیسیر و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شد. رابطه بین هدایت الکتریکی و ولتاژ و شدت جریان در رابطه (۶) ذکر گردید.

$$\frac{dT}{dt} = \nabla V^2 \frac{\sigma}{\rho c_p} \quad \text{فرمول (۶)}$$

dT/dt نرخ گرمایش، V : گرادیان ولتاژ، σ : هدایت الکتریکی، ρ : چگالی و c_p : گرمای ویژه

همچنین آنها بیان داشتند که با توجه به خطی بودن رابطه هدایت الکتریکی و دما می توان رابطه (۷) را برای مدل سازی ریاضی هدایت الکتریکی در نظر گرفت.

$$\sigma = \sigma_0 + mT \quad \text{فرمول (۷)}$$

σ_0 : هدایت الکتریکی اولیه، m عدد ثابت و T دما می باشد.

علاوه بر این معادلات رگرسیونی دیگری به منظور تخمین هدایت الکتریکی بیان گردید است. به عنوان مثال آیسیر و همکاران (۲۰۰۵) معادله (۸) را ارائه دادند که وابستگی هدایت الکتریکی به دما و گرادیان ولتاژ را بیان می نمود.

$$\sigma = D(\nabla V)^n + BT + C \quad \text{فرمول (۸)}$$

که در آن D, n, B, C اعداد ثابت می باشند. در این تحقیق برای محاسبه ضریب هدایت الکتریکی از روابط (۲-۱۹) و (۳-۴۱) استفاده شد. فاصله بین دو الکترود در سلول ۱۰ cm، ولتاژهای ورودی و آمپر محاسبه شده در گرادیان‌های مختلف بر حسب زمان در رابطه قرار داده و سطح موثر نیز بر اساس تغییرات جرم نسبت به زمان و چگالی پوره محاسبه شد. با قرار دادن این مقادیر در رابطه بالا هدایت الکتریکی پوره گوجه‌فرنگی نسبت به زمان محاسبه می گردد. در این معادلات به منظور محاسبه غلظت نمک طعام از معادله (۹) استفاده شد.

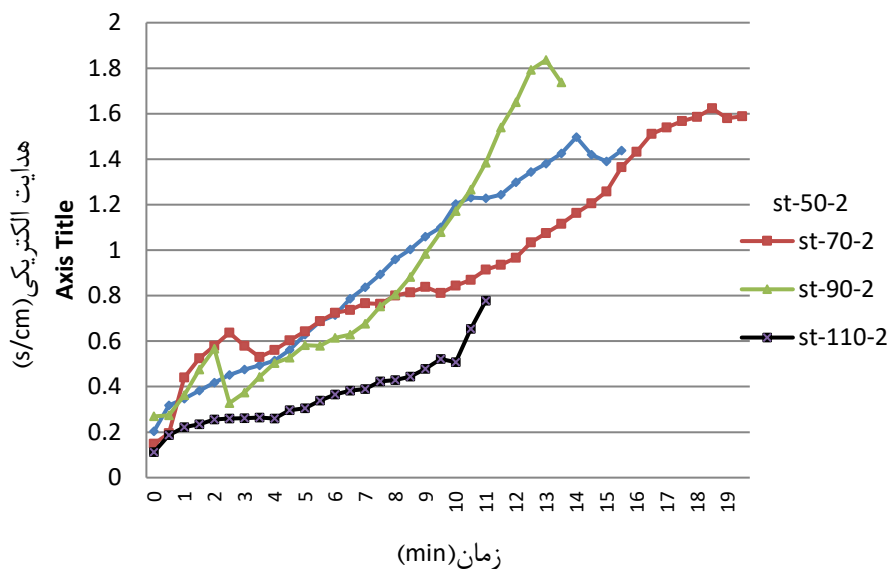
$$\% NaCl = \frac{W_{NaCl}}{W_L} \times 100 \quad \text{فرمول (۹)}$$

W_{NaCl} : وزن نمک طعام در محلول و W_L وزن محلول می باشد.

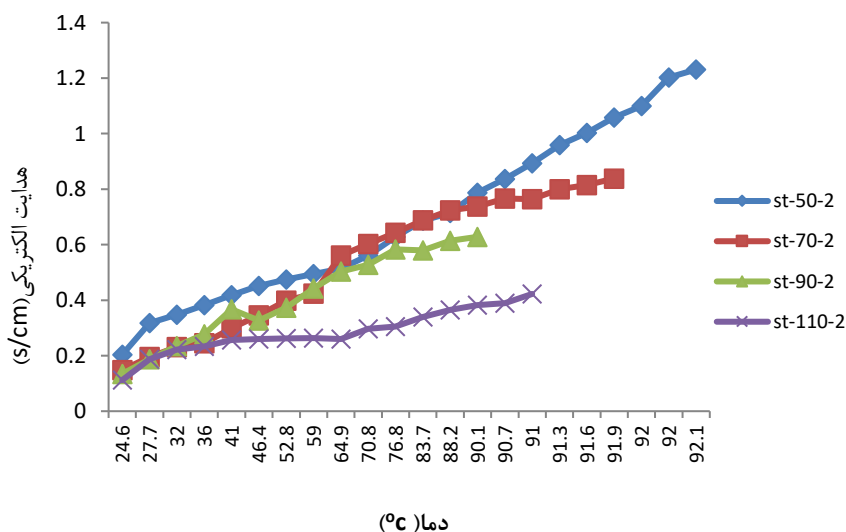
بحث و نتیجه‌گیری

هدایت الکتریکی

تغییرات هدایت الکتریکی در شکل‌های ۳ و ۴ بر حسب گذشت زمان فرایند و همچنین تغییرات دما نشان داده شده است. هر دو نمودار نشان دهنده اثر گرادیان ولتاژ بر روی هدایت الکتریکی در پوره گوجه‌فرنگی می باشد. هدایت الکتریکی در مراحل اولیه فرآیند به‌فرم خطی با افزایش دما افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج بدست آمده با دیگر محققین هم‌خوانی دارد (Diangsagita, *et al.*, 2022; Icier and Ilicali, 2009,2005; Yixuanchen *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2004). با ادامه فرآیند ضریب هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. این کاهش هم می‌تواند به دلیل کاهش مقدار جزئی دما باشد و هم می‌تواند به دلیل افزایش غلظت ماده که اجازه حرکت آزاد را به یون‌های حامل بار الکتریکی نمی‌دهد. در هر دو نمودار، هدایت الکتریکی با افزایش گرادیان ولتاژ از ۵ به ۱۱ V/cm کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه با افزایش گرادیان ولتاژ تبخیر آب با شدت بیشتری افزایش می‌یابد لذا حرکت یون‌های آزاد محدودتر شده و هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد.



شکل ۳: اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی در درصد نمک طعام ۲٪



شکل ۴: اثر گرادیان ولتاژ بر هدایت الکتریکی بر حسب دما در الکترولیت ۲٪ (st: الکتروود فولاد، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ ولتاژهای مختلف و ۲: درصد نمک طعام)

با گذشت زمان و با افزایش دما هدایت الکتریکی جسم افزایش می‌یابد. اثر گرادیان ولتاژ بر روی هدایت الکتریکی معکوس ارزیابی گردید.

با تبخیر آب در داخل ماده غذایی درصد نمک طعام در داخل آن زیاد می‌شود افزایش درصد نمک طعام درصد وجود یون به جرم را افزایش داده لذا هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد.

سانجای سارانگ و همکاران (۲۰۰۸) هدایت الکتریکی شش میوه را به کمک سیستم گرمایش اهمی اندازه‌گیری کردند و بیان داشتند که با افزایش دما برای هر شش میوه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد (Sanjay sarang *et al.*, 2008). درویشی و همکاران رابطه بین هدایت الکتریکی و گرادیان ولتاژ را مستقیم ارزیابی کردند و بیان داشتند که با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین آنها بیان کردند که با افزایش دمای ماده غذایی هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد (Darvishi *et al.*, 2012).

ایسیر و همکاران نیز بیان کردند که با افزایش دما هدایت الکتریکی برای همه گرادیان‌های ولتاژی افزایش می‌یابد ولی با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد هرچند این کاهش معنی‌دار نیست (Icier *et al.*, 2005). اگر تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به دما را بصورت خطی در نظر بگیریم معادله (۱۰) می‌تواند هدایت الکتریکی در دماهای مختلف را تخمین بزند.

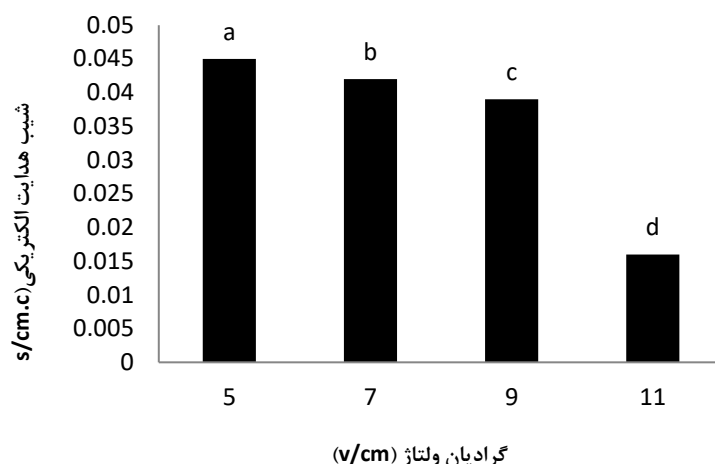
$$\sigma = 0.04T + 0.120 \quad R^2 = 0.92 \quad \text{فرمول (۱۰)}$$

مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر روی شیب هدایت الکتریکی که در جدول ۱ نشان داده شده است در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. البته لازم به یادآوری است که اثر گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات دما معنی‌دار است و تاثیر دما بر روی هدایت الکتریکی نیز معنی‌دار است به همین دلیل گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات هدایت الکتریکی اثر معنی‌داری دارد.

جدول ۱: جدول مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر شیب هدایت الکتریکی

منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	sig
بین گروهی	۳	۰/۰۰۱	۵۲۵	۰/۰۰
درون گروهی	۸	۰		

مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر روی تغییرات هدایت الکتریکی در شکل (۵) نشان دهند معنی‌دار بودن اثر گرادیان ولتاژ بر روی آن است. کمترین شیب متعلق به گرادیان ولتاژ ۱۱ و بیشترین شیب برای گرادیان ولتاژ ۵ می‌باشد.



شکل ۵: مقایسه میانگین اثر گرادیان ولتاژ بر شیب هدایت الکتریکی

برای هدایت الکتریکی در الکتروود فولاد ضدزنگ در برابر تغییرات دما و با گذشت زمان می‌توان یک رابطه درجه اول و یک رابطه درجه دوم بدست آورد که با تقریب خوبی میزان هدایت الکتریکی را می‌توان تخمین زد. ضرایب معادلات (۱۱) و (۱۲) و R^2 آنها در جدول (۲) برای محدوده‌های مختلف دمایی ارائه شده‌اند.

$$\sigma = \sigma_0 + m T \quad \text{فرمول ۱۱}$$

$$\sigma = \sigma_0 + mT + nT^2 \quad \text{فرمول ۱۲}$$

که در آن، σ_0 هدایت الکتریکی اولیه (S/m)، m فاکتور دما (S/m.°C)، n ثابت دما (S/m.°C²) و T دما نمونه می‌باشد.

جدول ۴-۱۷: نتایج از تجزیه آماری برای مدل هدایت الکتریکی - دما در گرادیان ولتاژهای مختلف

Voltage (V/cm)	Linear ($\sigma_0 + mT$)			Non linear ($nT^2 + mT + \sigma_0$)			
	m	σ_0	R^2	n	M	σ_0	R^2
۵	۰/۰۴۶	۰/۲۸۲۶	۰/۹۹۹	2×10^{-7}	-2×10^{-5}	۰/۸۶۹۷	۰/۹۱۱۵
۷	۰/۰۴۱۲	۰/۳۴۴۵	۰/۹۹۹۳	5×10^{-7}	-9×10^{-5}	۰/۷۹۸۹	۰/۹۵۸۶
۹	۰/۰۳۹	۰/۳۵۰۸	۰/۹۹۵۸	7×10^{-7}	۰/۰۰۰۳	۰/۷۲۴۴	۰/۹۵۱۹
۱۱	۰/۰۱۶	۰/۳۵۳۷	۰/۹۹۸	4×10^{-6}	$-0/۰۰۰۳$	۰/۷۰۵۷	۰/۹۵۳۳

نتیجه گیری و پیشنهادات

هدایت الکتریکی

مشاهده گردید که هدایت الکتریکی پوره گوجه فرنگی با گرادیان ولتاژ رابطه معکوس دارد بطوریکه با افزایش گرادیان ولتاژ هدایت الکتریکی کاهش می یابد. محدوده هدایت حرارتی پوره گوجه فرنگی در سیستم گرمایش اهمی بین بازه ۰/۳۴ تا ۱/۱۲۵/m بدست آمد. همچنین هدایت الکتریکی پوره گوجه فرنگی با افزایش دما افزایش می یابد.

پیشنهادات

به منظور بررسی دقیقتر هدایت الکتریکی پیشنهاد می شود عوامل تاثیر گذار دیگر مانند غلظتهای نمک مختلف و همچنین فرکانسهای مختلف بر روی هدایت الکتریکی مورد مطالعه قرار گیر همچنین طیف گسترده تری از گرادیان ولتاژ بر روی محصول مورد بررسی قرار گرفته تا نتایج دقیق تری بدست آید.

منابع

- Assiry, A. M., Sastry, S. K. & Samaranayake, C. 2006.** Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during heating using stainless steel electrodes. *Bioelectrochemist* 68: 7-13.
- Castro, I., Teixeira, J. A., Salengke, S., Sastry, S. K. & Vicente, A. A. 2003.** The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering* 26(1).
- Cristina, S. C., Moura, D. R. & Vitali, A. D. A. 1999.** A study of water activity and electrical conductivity in fruit juices: influence of temperature and concentration. *Brazil Journal Food Technology* 2: 31-38.
- Cullen, P. J., Brijesh K., Tiwari, Vasilis P. & Valdramidis, Z. 2012.** *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods.* Academic Press is an imprint of Elsevier. 978-0-12-381470-8
- Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., Khoshtaghza, M. H. and Torang, H., 2012,** Ohmic processing: temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Science*, 5(1): 210-216.
- De Alwis, A. A. P., & Fryer, P. J. 1990.** A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chemical Engineering Science*. 45(6): 1547-1559.
- Sagita, D., Setiaboma, W., Kristanti, D., Kurniawan, R., Dadang, D., Hidayat, D., Darmajana, A., Sudaryanto, A. & Nugroho, P. 2022.** Experimental investigation of heating pattern, energy requirement and electrical conductivity in a batch ohmic heating system for coffee fermentation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* (76)102946.
- Icier, F. & Ilicali, C. 2005a.** Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research* (10) 1135-1142.
- Icier, F. & Ilicali, C. 2005b.** Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International* 38: 1135-1142.
- Icier, F. 2009.** Influence of ohmic heating on rheological and electrical properties of reconstituted whey solutions. *Food Bioprod* 87: 308-316.

- Aurina, K. & Sari, A. 2021.** Ohmic Heating: A Review and Application in Food Industry. *Biological Sciences Research* (19): 107-113
- Lima, M., Heskett, Brian, F. & Sastry, S. K. 2001.** Diffusion of beet dye during electrical and conventional heating at steady-state temperature. *Journal of food process engineering* 24: 331-340.
- Sarang, S. & Sudhir K. 2008.** Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Food Research International* 40: 1660-1668.
- Wang, L. J., Li, D., Tatsumi, E., Liu, Z. S., Chen, X. D. & Li, L. T. 2007.** Application of two stage ohmic heating to tofu processing. *Chemistry Engineering Process* 46: 486-490.
- Chen, Y., Llave, Y., Jiao, Y., Okazaki, E., Sakai, N. & Fukuok, M. 2022.** Ohmic tempering using a high frequency ohmic heating and model food of minced tuna based on Alaska pollock surimi-Evaluation of electrical conductivities. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 76: 102940.
- Zell, M., Lyng, J. G., Morgon, D. J. & Cornin, D. A. 2010.** Minimizing heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing* 38: 1135-1142.
- Zhu, S. M., Zareifard, M. R., Hen, C. R., Marcotte, M. & Grabowski, S. 2010.** Electrical conductivity of particle-fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. *Food Research International* 43: 1666-1672.

Effect of voltage gradient on electrical conductivity of tomato paste under ohmic heating

Mehdi Turkian Beldaji¹

Received: 2022/02/08

Accepted: 2022/09/24

ABSTRACT

Ohmic heating is a new method in the processing of agricultural products, which produces heat inside the product by passing an alternating current through the food and causes it to heat up. The electrical conductivity of the food product is one of the influencing factors in the efficiency of this system. In this article, the effect of voltage gradient on the electrical conductivity of tomato paste in processing by ohmic heating method is investigated. For this purpose, four voltage gradients of 5, 7, 9 and V/cm¹¹ were considered. The electrode used in this research is stainless steel and the concentration of sodium salt is 2% by weight. The results showed that the effect of voltage gradient on the slope of electrical conductivity is significant at the 1% probability level and the electrical conductivity increases with the increase of temperature and the passage of time, although the electrical conductivity decreased with the increase of the voltage gradient.

Keywords: tomato paste, voltage gradient, ohmic heating, electrical conductivity

¹ Assistant Professor, Department of Mechanics, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Varamin-Pishva and Qarchak branch, Varamin, Iran

*Corresponding author: mhdorkian@yahoo.com