

بررسی تجربی فرایند گرمادهی اهمی در سامانه‌های دو فازي بیوجامد - مایع

مصطفی کشاورز مروجی*⁺، عماد قادری

اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: گرمادهی اهمی به عنوان روشی نوین در سامانه‌های گرمادهی در صنایع زیستی، غذایی و دارویی به‌ویژه در صنایع استرلیزه کردن مواد غذایی معرفی شده است. در این پژوهش، گرمادهی اهمی و اثر پارامترهای عملیاتی به صورت تجربی بررسی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. برای بررسی رفتار گرمادهی اهمی، از محلول‌های هیدروکلوئیدی در سلول اهمی طی چندین مرحله استفاده شده است. ابتدا هدایت الکتریکی محلول‌های هیدروکلوئیدی در غلظت‌های ۴، ۵/۵، ۶/۳۳٪ بررسی شده و مشخص شده است که افزایش دما سبب بیشتر شدن هدایت الکتریکی محلول به‌طور خطی با دما می‌شود. با افزایش غلظت ذرات جامد پراکنده در محلول، هدایت الکتریکی با افزایش دما زیاد می‌شود. سپس به محلول، سدیم کلرید (۱-۰/۲۵٪) اضافه شد تا تأثیر افزایش نمک بر هدایت الکتریکی بررسی شود. مشخص شد که افزایش نمک در سامانه، افزایش قابل ملاحظه‌ای بر هدایت الکتریکی می‌شود. برای بررسی اثر افزایش محتوای الکترولیتی بر پروفیل‌های دما - زمان و نرخ‌های گرمادهی به محلول، به غیر از سدیم کلرید، سیتریک اسید نیز افزوده شده است. افزایش نمک به محلول تأثیر بالقوه‌ای بر پروفیل‌های دما - زمان دارد، به طوری که در محلول ۳/۳٪، همراه با ۱٪ نمک، تنها ۲۵۳ ثانیه طول کشید تا به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد برسد و کوتاه‌ترین زمان را برای افزایش دما از ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد و بالاترین هدایت الکتریکی را ثبت کرد. تأثیر محتوای الکترولیتی (اسیدی) بر پروفیل‌های دما - زمان نسبت به نمک بسیار ناچیز دیده شد. با اندازه‌گیری دمای محلول توسط ترموکوپل‌ها در تمامی نقاط درون سلول، یکنواختی گرمادهی برای تمامی محلول‌ها بررسی شد. از نتیجه آزمایش‌های انجام گرفته، مشخص شد که نرخ‌های گرمادهی اهمی به توزیع میدان الکتریکی وابسته بوده و یکنواختی گرمادهی به غلظت جریان و شکل هندسی سامانه بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: گرمادهی اهمی، محلول هیدروکلوئیدی، گرادیان ولتاژ، تراکم جریان الکتریکی، شکل هندسی.

KEY WORDS: Ohmic heating, Hydrocolloid solution, Voltage gradient, Electrical field strength, Geometry.

مقدمه

دو فازي جامد - مایع به‌عنوان جایگزینی مناسب برای فرایندهای گرمادهی سنتی دیده می‌شود [۳ - ۱]. در چند دهه گذشته یکی از پیشرفت‌های بیشتر در فرآوری غذا، فرایندهای استرلیزه کردن

فرایند گرمادهی اهمی^(۱) کاربردهای فراوانی در صنایع گوناگون به‌ویژه صنایع زیستی، غذایی و دارویی دارد. گرمادهی اهمی در فرایندهای ضدعفونی کننده در سامانه‌های

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: m-moraveji@araku.ac.ir

(۱) Ohmic heating

(۱) گرمای تولیدی در گرمادهی اُهمی محدودیت‌های انتقال حرارت توسط روش‌های سنتی و غیر یکنواختی ناشی از گرمادهی میکروویو، به علت محدودیت نفوذ دی‌الکتریک را ندارد.

(۲) دمای ذره‌های جامد برابر یا بالاتر از دمای مایع می‌رسد که برای گرمادهی سنتی غیر ممکن است.

(۳) خطرهای رسوب بر سطوح انتقال گرما و سوختن ماده غذایی کاهش می‌یابد.

(۴) در این فرایند صدمات مکانیکی به کمترین میزان می‌رسند.

(۵) بیشترین کارایی انرژی، تبدیل حدود ۹۰ درصد از انرژی الکتریکی به گرما، در این فرایند وجود دارد.

(۶) کنترل فرایند ساده بوده، شروع و خاتمه فرایند به سرعت انجام می‌شود.

(۷) امکان گرما دادن جریان پیوسته‌ای از مواد غذایی بدون نیاز به سطوح انتقال گرما وجود دارد.

(۸) فرآورده‌های حساس به برش^(۴) با این روش به راحتی تحت فرایند قرار می‌گیرند.

(۹) بدون توجه به رسانایی گرمایی فاز مایع، در بخش جامد مواد غذایی گرما تولید می‌شود.

(۱۰) هزینه نگهداری پایین است.

با توجه به برتری‌های گفته شده، این فرایند در مقایسه با فرایندهای دیگر ضدعفونی کننده دارای توان سرمایه‌گذاری، کیفیت و ایمنی بالاتری برای تولید فرآورده است.

پارامترهایی همانند اثرهای توزیع ذرات در سامانه (غلظت)، اندازه ذرات و تأثیر هدایت الکتریکی ذرات بر ویژگی‌های گرمادهی دو فاز و مقدارهای گرمادهی کلی مخلوط و همچنین تأثیر نفوذ نمک و اسید بر نرخ گرمادهی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر راندمان فرایند گرمادهی اُهمی هستند [۱۱، ۱۰]. گزارشی از پژوهش‌های نظری و تجربی انجام گرفته در مقاله مروجی و همکاران [۱۲] ارایه شده است.

در این پژوهش فرایند گرمادهی اُهمی به صورت تجربی برای محلول هیدروکلوئیدی بررسی شده است. پارامترهای حاکم بر فرایند از جمله اثر غلظت محلول هیدروکلوئیدی، اثر میزان نمک (شوری محلول)، اثر محتوای الکترولیتی (اسیدی) بر تغییرات زمانی توزیع دما و یکنواختی گرمادهی محلول بررسی شده‌اند.

در زمان کوتاه و دمای بالا^(۱) بوده که تا حد زیادی با توجه به افزایش سرعت تولید در این صنعت، مورد توجه قرار گرفته است، در حالی که درخواست مصرف‌کنندگان برای فرآورده‌های غذایی با کیفیت برتر می‌باشد. در نتیجه، فناوری‌های فراوری ضدعفونی‌کنندگی جدید به طور چشمگیری جایگزین روش‌های استریزه سنتی شده‌اند.

روش‌های استریزه و پاستوریزه کردن جزو فرایندهای گرمایی محسوب می‌شوند که این فرایندها باعث کاهش فعالیت مواد زیستی غیرمفید (میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌ها) به وسیله بالا بردن دمای فرآورده‌های برای متوقف کردن پاتوژن‌ها می‌شوند [۴]. به طور کلی فرایند اُهمی شامل گرما دادن همزمان به دو فاز جامد و مایع به وسیله تولید گرمای درونی می‌باشد که این گرمادهی همزمان از گرمایش بیش از اندازه فاز مایع جلوگیری و آن را به کمترین میزان می‌رساند [۵]. تولید گرما به جای اعمال گرما، فرایند ضدعفونی را به راحتی کنترل می‌کند. این فرایند نسبت به فرایندهای سنتی، باعث افزایش کیفیت فرآورده می‌شود زیرا روش‌های سنتی همانند مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای^(۲)، سطح تراش^(۳)، لوله‌ای و همچنین روش‌هایی که در آنها به طور مستقیم از بخار آب برای استریل کردن مواد غذایی استفاده شده است برای انتقال گرما به بخش جامد مواد غذایی از یک محیط حد واسط که همانا بخش مایع فرآورده‌های غذایی است استفاده می‌کنند که در عمل این امر مسایل و مشکلات محدودکننده‌ای را ایجاد می‌کند که باعث افت کیفیت کلی فرآورده استریل می‌شود [۶]. در استریل کردن مواد غذایی حاوی دانه‌های بزرگ با روش‌های سنتی، لازم است که برای اطمینان از استریل شدن قسمت مرکزی دانه‌های جامد، به قسمت مایع مواد غذایی گرمایی بیش از آنچه که برای استریل شدن قسمت مایع لازم است اعمال شود که این موضوع باعث افت کیفیت فرآورده از نقطه نظر معطر بودن و از هم‌پاشیدگی دانه‌ها شده و در نتیجه کیفیت کلی فرآورده پایین می‌آید. مشکلات انتقال گرما با گسترش و پیشرفت فرایندهای ابداعی توسط فرایند اُهمی که با عبور جریان الکتریکی از میان یک جریان پیوسته ماده غذایی اعمال می‌شود، رفع شده‌اند [۷].

برتری‌های فرایند گرمادهی اُهمی در بسیاری از مقاله‌ها ذکر شده‌اند [۹، ۸]. این برتری‌ها عبارتند از:

(۱) HTST

(۲) Plant heat exchanger

(۳) Scraped surface

(۴) Shear-sensitive

مواد و روش ها

تهیه محلول هیدروکلوئیدی

محلول‌های هیدروکلوئیدی را می‌توان از روش کاهش یا افزایش اندازه ذرات پراکنده (جامد) در یک محلول تولید کرد. در این آزمایش برای تهیه محلول هیدروکلوئیدی از نشاسته استفاده شده است. نشاسته نوعی پلی‌ساکارید است که جزء بزرگترین دسته هیدروکلوئیدها می‌باشد (پلی‌ساکاریدها جزء دسته کربوهیدرات‌ها هستند). نشاسته پلیمری از ملکول‌های گلوکز است. این ماده در بافت گیاهی به صورت دانه‌هایی جدا از هم یا گرانول وجود دارد که قطر آنها از ۲ تا ۱۰۰ میکرون متغیر می‌باشد. بزرگترین گرانول‌ها مربوط به نشاسته سیب‌زمینی با قطر بیش از ۳۳ میکرون می‌باشند. نشاسته از دو قسمت یا دو نوع ملکول پلیمری تشکیل شده است. یک قسمت به صورت خطی و فاقد انشعاب به نام آمیلوز است و قسمت دیگر که دارای انشعاب است آمیلوپکتین نامیده می‌شود. نشاسته یک پلی‌ساکارید خنثی است که فرایند گرمادهی کمترین اثر را بر آن دارد و می‌توان از آن برای بررسی تأثیر ویژگی‌های افزایش محتوای الکترولیتی بر نرخ گرمادهی اهمی استفاده مفید کرد. در آزمایش‌های انجام گرفته چندین محلول هیدروکلوئیدی بر حسب هدف مورد نظر تهیه شده‌اند.

تهیه محلول هیدروکلوئیدی بدون محتوای الکترولیتی

نمونه نشاسته تجاری مورد نظر در چندین غلظت متفاوت (۴، ۵/۵، ۶/۳۳ و ۸ درصد) بر حسب درصد جرمی در آب مقطر برای بررسی و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، پروفیل‌های دما - زمان و نرخ گرمادهی در محلول، تهیه شد. نمونه بعد از اندازه‌گیری وزن آن توسط ترازو در آب مقطر ریخته و با استفاده از همزن با سرعت بالا در یک زمان مشخص در دمای بین ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد در حمام آب پراکنده شد. این سوسپانسیون که در ابتدا حالت شیری داشت سپس در ادامه شفاف و به صورت روشن درآمد. با افزایش این شفافیت گرانول‌های نشاسته شروع به متورم شدن کردند. بعد از ژلاتینی شدن نمونه، محلول با یک همزن بزرگتر به مدت ۵ دقیقه یکنواخت شد و سپس در یخچال گذاشته شد تا دمای آن به زیر ۲۰ درجه سانتیگراد برسد.

تهیه محلول هیدروکلوئیدی با محتوای الکترولیتی

این محلول برای بررسی اثرهای افزایش محتوای الکترولیتی بر نرخ گرمادهی اهمی در سامانه گرمادهنده تهیه شد.

برای بررسی این تأثیرها از سدیم کلرید برای تأثیرهای نمک و محلول سیتریک اسید ۰/۵ مولار برای تأثیرهای اسیدی کردن محلول استفاده شده‌اند.

الف - اضافه کردن سدیم کلرید به محلول

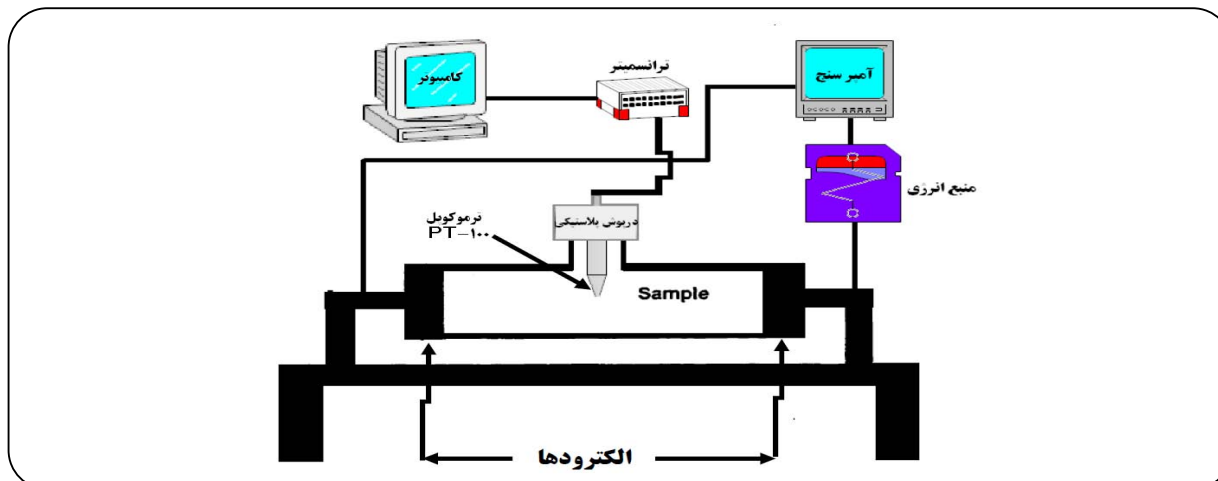
برای تهیه این محلول، نشاسته و نمک (سدیم کلرید) به صورت خشک قبل از وارد کردن به آب مقطر مخلوط شدند. نشاسته ۳/۳، ۴ و ۵/۵ درصد (درصد وزنی) همراه با غلظت‌های نمک (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی) مخلوط شد. بعد از ریختن نمونه خشک در آب مقطر با استفاده از همزن با سرعت بالا در یک زمان مشخص در دمای ۶۵-۷۰ درجه سانتیگراد در حمام آب پراکنده شد. بعد از ژلاتینی شدن نمونه، محلول با یک همزن بزرگتر به مدت ۵ دقیقه یکنواخت شد و سپس در یخچال گذاشته شد تا دمای آن به زیر ۲۰ درجه سانتیگراد برسد.

ب - اضافه کردن سیتریک اسید به محلول

از محلول سیتریک اسید ۰/۵ مولار در این آزمایش استفاده شده است. محلول هیدروکلوئیدی همراه با اسید برای آزمایش با حجم سلول اهمی ۲۰۰۰ میلی‌لیتر انتخاب شده است. در نتیجه برای تهیه محلول ابتدا ۱۹۷۰ میلی‌لیتر محلول نشاسته ۸ درصد مطابق با روش‌های قبلی تهیه و سپس ۳۰ میلی‌لیتر اسید به آن اضافه شد و به همین ترتیب به ۱۹۱۰ میلی‌لیتر محلول، ۹۰ میلی‌لیتر اسید و به ۱۸۲۰ میلی‌لیتر محلول ۱۸۰ میلی‌لیتر اسید اضافه شد. پس از آن، نمونه با یک همزن بزرگ به مدت ۱۰ دقیقه یکنواخت شده و سپس در یخچال گذاشته شد تا دمای آن به زیر ۲۰ درجه سانتیگراد برسد.

دستگاه طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها

دستگاه شامل یک گرما دهنده ایستا است که از یک شیشه استوانه‌ای پیرکس با شعاع ۶/۳۱ سانتی‌متر تشکیل شده است که هر دو طرف با یک جفت فاصله‌دهنده محافظت می‌شوند. جریان برق متناوب توسط یک منبع نیرو که ولتاژی تا ۳۵۰ ولت و جریانی تا ۴۰ آمپر را تأمین می‌کند در سامانه قرار داده شده است. ترموکوپل‌های از نوع PT-100 با پوشش تفلونی (به‌منظور جلوگیری از تأثیر جریان برق) برای اندازه‌گیری دمای نمونه به کار برده شده‌اند. به‌علت پوشش تفلونی، اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل‌ها با افت دمایی روبه‌رو می‌شود که باید این خطا تصحیح شود.



شکل ۱- مدار سلول حرارت دهی اُهمی ایستا آزمایشگاهی برای محاسبه هدایت الکتریکی و آنالیز دمایی محلول شامل یک ترموکوپل و ترانسسمیتر.

و دستگاه قابل حمل انجام شد. هدایت الکتریکی نمونه، از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$\sigma = \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{L}{A_e}\right) \quad (1)$$

$$\sigma = \left(\frac{I}{V}\right) \left(\frac{L}{A_e}\right) \quad (2)$$

که L فاصله میان الکترودها بر حسب سانتیمتر، A_e سطح مقطع الکترودها بر حسب سانتیمتر مربع، R مقاومت نمونه بر حسب اهم، I شدت جریان بر حسب آمپر و V ولتاژ بر حسب ولت می‌باشد.

محاسبه نرخ‌های گرمادهی و پروفیل‌های دمایی طی فرایند گرمادهی اُهمی

رفتار گرمادهی اُهمی در سامانه‌های دو فاز برای محلول هیدروکلونیدی با و بدون محتوای الکترولیتی در شرایط ایستا و به‌طور آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. در این آزمایش‌ها پنج ترموکوپل نوع PT-100 با پوشش تفلونی برای اندازه‌گیری پروفیل‌های دما - زمان و یکنواختی گرمادهی، به‌صورت عمودی در داخل محلول قرار گرفته‌اند. ترموکوپل T1 از میان درپوش لاستیکی که بر روی سلول اُهمی قرار دارد می‌گذرد و ترموکوپل‌های دیگر (T2, T3, T4, T5) همان‌گونه که در شکل ۲ آمده است، در اطراف آن قرار دارند. هر یک از ترموکوپل‌ها به یک ترانسسمیتر متصل

برای کالیبراسیون ترموکوپل‌ها از یک دماسنج جیوه‌ای و یک ابزار قابل حل^(۱) که قابلیت اندازه‌گیری دما و pH را به‌طور دقیق دارد استفاده شده است. مقدار جریان عبوری از محلول توسط یک آمپرسنج^(۲) که به‌طور سری در مدار قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. به‌منظور پردازش داده‌های دما - زمان، ترموکوپل‌ها به یک ترانسسمیتر^(۳) که متصل به یک تبدیل‌کننده^(۴) و کامپیوتر است، وصل شده‌اند. شمای ساده شده آن را می‌توان در شکل ۱ دید.

محاسبه هدایت الکتریکی

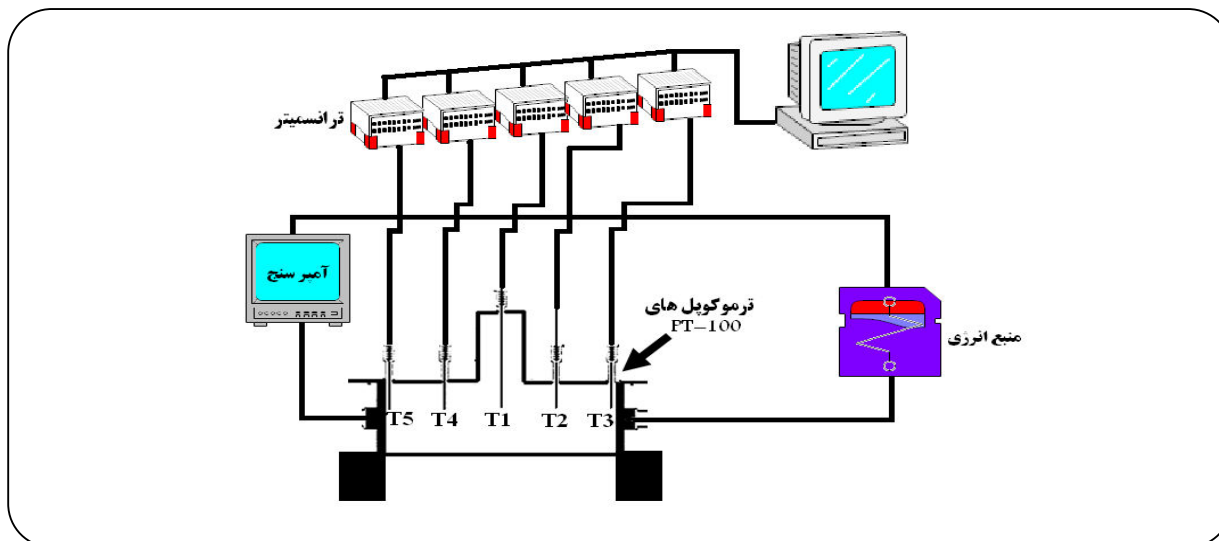
شمای سلول گرمادهی اُهمی و مدار الکتریکی آن برای محاسبه هدایت الکتریکی در شکل ۱ آمده است. در این آزمایش سطح مقطع الکترودها ۲۸،۸۴ سانتیمتر مربع و فاصله بین دو الکترودها ۵۹،۵ سانتیمتر انتخاب شده است (الکترودها از جنس استیل می‌باشند). یک جریان متناوب توسط یک منبع نیرو شامل ترانسفورماتور متغیر، نیروی میدان حدود ۵/۰۴۲ کیلو ولت بر متر بر سامانه اعمال کرده است. مقدار جریان عبوری از محلول توسط آمپرسنج که به‌طور سری در مدار قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش تنها از یک ترموکوپل نوع PT-100 با پوشش تفلونی که از میان درپوش لاستیکی گذشته تا دمای محلول در مرکز مخزن را اندازه‌گیری کند استفاده می‌شود. دماها توسط ترموکوپل اندازه‌گیری و با استفاده از ثبت‌کننده داده‌ها ذخیره می‌شوند. قبل از آغاز آزمایش، کالیبراسیون ترموکوپل‌ها با دقت توسط دماسنج جیوه‌ای

(۱) WTW, PT-Temperature, model 340i, Germany

(۲) Gw INSTEK, GDM-5034

(۳) 4NX, Process temp. controller, hany oung product, china

(۴) NUX-CV30



شکل ۲- مدار سلول حرارت دهی اُهمی ایستا آزمایشگاهی برای بررسی توزیع دمایی در سلول طی فرایند شامل ۵ ترموکوپل و ترانسمیتر.

$$C_p = \frac{\sigma |\nabla V|^2}{\rho \frac{\partial T}{\partial t}} \quad (۶)$$

افزایش دما در هر بخش از گرما دهنده اُهمی پیوسته می‌تواند به‌وسیله معادله زیر محاسبه شود:

$$T = \frac{AV^2}{LmC_p} \quad (۷)$$

نیروی الکتریکی مورد نیاز که اندازه ترانسفورماتور را تعیین می‌کند از نرخ جریان جرمی فرآورده و با تعیین ظرفیت حرارتی ویژه در دماهای خروجی و ورودی تخمین زده می‌شود:

$$P = mC_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۸)$$

جریان مورد نیاز با استفاده از روابط الکتریکی استاندارد محاسبه می‌شود:

$$P = VI \quad (۹)$$

نتیجه‌ها و بحث

تأثیر دما و غلظت ذرات بر هدایت الکتریکی

تأثیر دما و غلظت ذرات روی هدایت الکتریکی در فرایند گرمادهی اُهمی در شکل ۳ نشان داده است و ارتباط مستقیم هدایت الکتریکی با دما و غلظت بررسی شده است. در این فرایند هدایت الکتریکی به‌عنوان یک پارامتر کلیدی است که تغییرهای دمایی

و در ادامه خروجی هر ترانسمیتر به‌صورت موازی به ترانسمیتر بعدی وصل و خروجی آخر به تبدیل‌کننده که به کامپیوتر متصل است وارد می‌شود. نرخ تولید گرمای درونی موضعی در گرمادهی اُهمی با استفاده از قانون اهم برای ولتاژ ثابت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = E^2 \sigma \text{ or } (\nabla V)^2 \sigma \quad (۳)$$

$\nabla V = E$ گرادیان ولتاژ یا شدت میدان الکتریکی و σ هدایت الکتریکی موضعی است. برای حالت جریان با ولتاژ ثابت، معادله به‌صورت زیر است:

$$Q = \frac{J^2}{\sigma} \quad (۴)$$

J غلظت جریان (A/m^2) است. بیشتر گرما دهنده‌های اُهمی تجاری تحت شرایط ولتاژ ثابت راه‌اندازی می‌شود. با استفاده از شرایط ولتاژ ثابت نرخ گرمادهی می‌تواند محاسبه شود [۱۱]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\sigma |\nabla V|^2}{\rho C_p} \quad (۵)$$

با محاسبه شیب‌های منحنی دما - زمان مقدرهای $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ در مقاطع زمانی مختلف به‌دست می‌آید. با به‌دست آمدن نرخ گرمادهی می‌توان ضریب گرمایی ویژه را از طریق معادله (۶) محاسبه کرد:

جدول ۱- بهترین رابطه خطی هدایت الکتریکی تابعی از دما همراه با ضرایب دمایی برای محلول هیدروکلوئیدی بدون نمک.

غلظت (درصد)	تابع (T)	R^2	σ_{25}	m (1/°C)
۴	$\sigma = 0.0014T + 0.0155$	۰.۹۹۹۲	۰.۰۵۰۵	۰.۰۲۸
۵.۵	$\sigma = 0.0015T + 0.021$	۰.۹۹۹۳	۰.۰۵۸۵	۰.۰۲۵۶
۶.۳۳	$\sigma = 0.0017T + 0.029$	۰.۹۹۸۹	۰.۰۷۱۵	۰.۰۲۳۸

برای سامانه‌های غذایی دارای توده زنده تحت فرایند اُهمی، پالانیاپان و ساستری [۲] به این نتیجه رسیدند که هدایت الکتریکی تابع خطی دما است و به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\sigma = \sigma_{ref} [1 + m(T - T_{ref})] \quad (10)$$

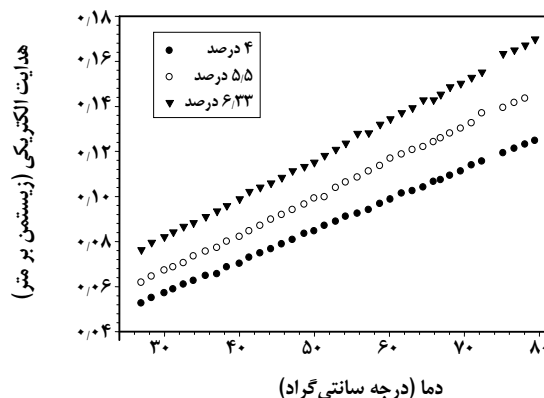
فرایر و همکاران [۶] معادله خطی را برای محلول‌هایی با ویسکوزیته بالا به طور متفاوتی بیان کردند:

$$\sigma = \sigma_0 + m(T) \quad (11)$$

که مقدار σ_0 در دمای صفر درجه سانتیگراد تعیین شده است اما به طور معمول نتیجه‌های هدایت الکتریکی در صفر درجه سانتیگراد گزارش نمی‌شوند. وابستگی زیاد هدایت الکتریکی به دما نتیجه افزایش حرکت یون‌ها در ماده هادی با افزایش دما است. هدایت الکتریکی محلول از لحاظ تجربی به عنوان تابعی از دما و غلظت و با استفاده از معادله (۱۰) در ۲۵ درجه سانتیگراد به عنوان دمای مرجع در جدول ۱ همراه با ضریب‌ها آمده است. هر مقدار میانگین دو تکرار را مطرح می‌کند و شامل انحراف معیار استاندارد به دست آمده از دو تکرار برای شرایط آزمایشگاهی ویژه است. تحلیل رگرسیون خطی (R^2) زیاده‌تر از ۰.۹۹ و متناسب با مدل خطی برای تغییرات هدایت الکتریکی با دما در نمونه آمده است.

پروفیل‌های دما-زمان برای محلول‌های هیدروکلوئیدی

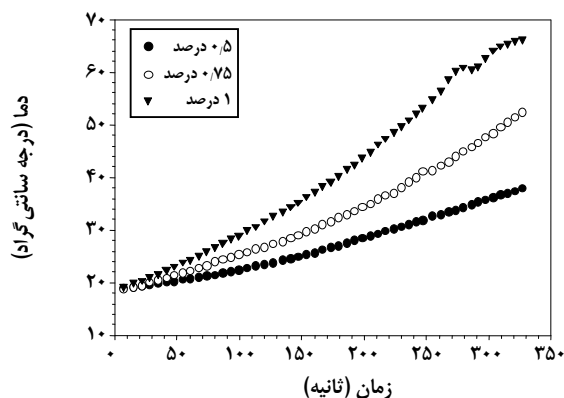
برای بررسی تغییرهای دما بر حسب زمان برای محلول‌های هیدروکلوئیدی، آزمایش‌ها در چندین مرحله انجام شده است. در مرحله اول محلول هیدروکلوئیدی خالص در بازه‌ی زمانی ۱۰۰۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ذره‌ی جامد پروفیل‌های دما - زمان با شیب تندتری رشد می‌کنند و این افزایش شیب، نشان‌دهنده کوتاه شدن زمان گرمادهی می‌باشد. این نتیجه توسط پژوهشگران دیگر، کیم و همکاران [۱۵]، فرایر و همکاران [۱۶]، تأیید شده است. گستره‌ی تغییرهای دمایی در زمان‌های مختلف برای محلول‌های هیدروکلوئیدی نشاسته در غلظت‌های ۴، ۵.۵ و ۸ درصد



شکل ۳- نمودار تأثیر دما و غلظت نشاسته روی هدایت الکتریکی محلول کلوئیدی.

متأثر از آن می‌باشد. برای همه نمونه‌ها هدایت الکتریکی به تقریب به صورت خطی، همانگونه که انتظار می‌رفت و در تطابق با دیگر پژوهش‌های انجام شده [۱۳، ۹ و ۸]، با دما افزایش یافته است. به عنوان نمونه، محلول هیدروکلوئیدی ۶.۳۳ درصد بیشترین هدایت الکتریکی را دارد. هدایت الکتریکی اولیه محلول در غلظت ۴ درصد (۰.۰۵۰۵ زیمنس بر متر)، ۵.۵ درصد (۰.۰۵۸۵ زیمنس بر متر) و در ۶.۳۳ درصد (۰.۰۷۱۵ زیمنس بر متر) دیده شده است. با توجه به این داده‌ها مشخص است که با زیاد شدن غلظت ذره‌ها در سامانه، افزایش بیشتری در دما صورت می‌گیرد که باعث افزایش هدایت الکتریکی شده است.

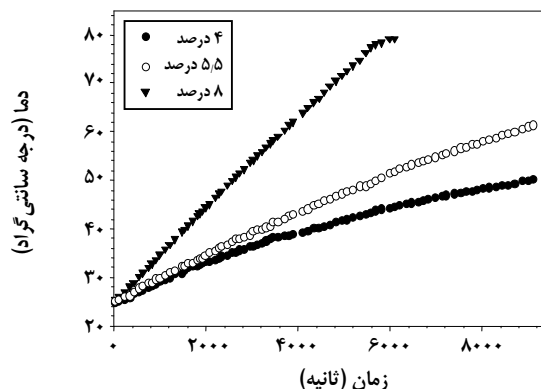
مارکوت [۱۴] برای محلول‌های کلوئیدی پکتین با ویسکوزیته بالا در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ درصد هدایت الکتریکی را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بترتیب ۰.۰۴۷، ۰.۱۰۱۱ و ۰.۱۴ زیمنس بر متر و برای محلول‌هایی با ویسکوزیته پایین پالانیاپان و ساستری [۷] در بازه‌ی دمایی ۲۰-۸۰ درجه سانتیگراد هدایت الکتریکی را اندازه‌گیری کردند. هدایت الکتریکی غذاهای جامد کمتر از ۰.۵ زیمنس بر متر است با وجود این اگر ذره‌های جامد در محلول‌های نمک خیسانده شوند یا در نمک احاطه شوند این مقدار از ۰.۵ زیمنس بر متر بالاتر می‌رود.



شکل ۵- تأثیر غلظت نمک (۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ درصد) بر پروفیل دما برای محلول هیدروکلوئیدی ۳/۳ درصد.

نسبت به حالت بدون نمک می‌شود. می‌توان دید که محلول با ۱ درصد نمک در مدت ۲۵۳ ثانیه به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. اگر با محلول نشاسته ۱ درصد بدون نمک مقایسه شود، دیده می‌شود که ۷۰۰۰ ثانیه طول می‌کشد تا محلول به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد برسد که این می‌تواند در بهینه‌سازی انرژی و زمان بسیار تأثیرگذار باشد.

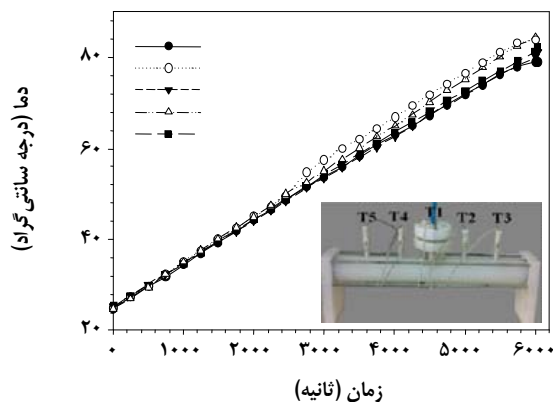
در مرحله سوم، از محلول نشاسته ۸ درصد همراه با ۳۰ و ۹۰ میلی‌لیتر سیتریک اسید ۰٫۰۵ مولار استفاده شده است. هدف اساسی این مرحله بررسی تأثیر واقعی افزایش محتوای الکترولیتی هر چند ناچیز می‌باشد. تأثیر سیتریک اسید روی هدایت الکتریکی محلول‌های هیدروکلوئیدی در مقایسه با نمک بسیار ناچیز می‌باشد که این مطلب توسط مارکوت [۱۴] نیز گزارش شده است. تأثیر اضافه کردن سیتریک اسید هم برای هدایت الکتریکی و هم پروفیل‌های گرمادهی بسیار کم است. در شکل ۶ تأثیر افزایش اسید بر گرمادهی دیده می‌شود. در این شکل، پروفیل دمایی برای نشاسته ۸ درصد بدون اسید و محلول نشاسته ۸ درصد همراه با اسید آمده است. دیده می‌شود که پروفیل‌های دمایی محلول با اسید، دارای شیب بیشتری و زمان گرمادهی کمتری نسبت به حالت بدون اسید است. این مطلب، گواه تأثیر ناچیز اسید بر نرخ گرمادهی نسبت به تأثیر حضور نمک است. با توجه به اندازه‌گیری می‌توان گفت مدت زمان لازم برای رسیدن به دمای ۷۰ درجه سانتیگراد برای محلول نشاسته ۸ درصد با ۹۰ میلی‌لیتر اسید ۱۶۹۹ ثانیه، با ۳۰ میلی‌لیتر اسید ۱۸۸۹ ثانیه و محلول نشاسته ۸ درصد بدون اسید ۴۷۷۶ ثانیه می‌باشد.



شکل ۶- پروفیل‌های تغییرهای دما - زمان برای غلظت‌های مختلف محلول کلئیدی نشاسته.

در دمای ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد آمده است. از شکل ۴ مشخص است که محلول نشاسته ۸ درصد در ۲۰۰۰ ثانیه به دمای ۴۴/۵ درجه سانتیگراد، محلول ۵/۵ درصد به ۳۴/۷ درجه سانتیگراد و ۴ درصد به ۳۳ درجه سانتیگراد رسیده است. برای روشن‌تر شدن موضوع می‌توان گفت که برای محلول نشاسته ۸ درصد، ۶۰۰۰ ثانیه طول می‌کشد تا به دمای ۷۹/۱ درجه سانتیگراد برسد درحالی که محلول ۴ درصد در همین مدت تنها به ۴۴/۳ سانتیگراد رسیده است. در نتیجه می‌توان گفت که فرایند اهمی برخلاف دیگر سامانه‌های گرمادهی با افزایش محتوای ذرات جامد سبب افزایش دمای سامانه در زمان کوتاه‌تری می‌شود. زمانی که محتوای ذره‌های جامد افزایش می‌یابد مسیرهای جریان درون محلول پر پیچ و خم‌تر می‌شود که باعث می‌شود مقدار زیادتری از جریان از درون ذرات عبور کند که منجر به تولید نرخ‌های انرژی بیشتری درون ذرات شده و در نتیجه نرخ‌های گرمادهی نسبی بیشتری به‌وجود می‌آید.

در مرحله دوم، محلول نشاسته ۳/۳ درصد همراه با نمک با غلظت‌های ۰٫۷۵، ۱٫۰ و ۰ درصد مورد بررسی قرار گرفته تا اثر نمک بر نرخ گرمادهی بررسی شود. از بررسی نتیجه‌ها دیده می‌شود، زمانی که غلظت نمک تا ۱ درصد افزایش می‌یابد هدایت الکتریکی و نرخ‌های حرارت‌دهی اهمی به طور عمده به‌وسیله اضافه کردن نمک تحت تأثیر قرار می‌گیرند و ساختار محلول هیدروکلوئیدی تأثیر کمتری نسبت به نمک دارد و غلظت نمک پایین‌تر، زمان بیشتری برای رسیدن به ۸۰ درجه سانتیگراد نیاز دارد [۱۴]. همانطوری که در شکل ۵ دیده می‌شود بیشتر شدن محتوای نمک در محلول سبب افزایش دما در زمان کوتاه‌تری

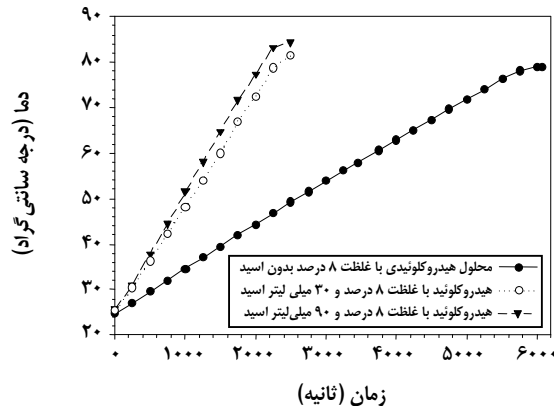


شکل ۷- پروفیل‌های دما - زمان برای پنج مکان گوناگون در سلول اهمی برای محلول هیدروکلوئیدی ۳/۳٪ با ۰/۷۵٪ نمک.

دماهای سطح الکتروود به طور معمول کمتر از کل حجم محلول می‌باشد. این پدیده به این علت است که الکتروود تنها به وسیله مقاومت خیلی پایین آن می‌تواند گرم شود یا اینکه اگر سامانه به خوبی یکنواخت نشده باشد اختلاف دمایی بین الکتروود و کل محلول می‌تواند دیده شود.

نرخ گرمادهی

نرخ‌های گرمادهی $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ آزمایشگاهی برای یک محلول کلوئیدی با ۴ درصد نشاسته همراه با ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد نمک در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. مقدار نرخ گرمادهی در دماهای ۲۰-۸۰ درجه سانتیگراد برای محلول نشاسته ۴ درصد همراه با ۱ درصد نمک از ۰/۱۲۱۱ تا ۰/۲۹۳۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه، برای ۰/۷۵ درصد نمک ۰/۸۰۹ تا ۰/۲۲۲۳ درجه سانتیگراد بر ثانیه و برای محلول با ۰/۵ درصد نمک ۰/۰۷ تا ۰/۱۶۵۳ درجه سانتیگراد بر ثانیه دیده شده‌اند. در غلظت ۱ درصد و در ۸۰ درجه سانتیگراد بالاترین نرخ گرمادهی به دست آمده است. با توجه به داده‌های به دست آمده، می‌توان تأثیر غلظت نمک را در طول گرمادهی اهمی بر نرخ گرمادهی دید. نرخ‌های گرمادهی در شکل ۸ به عنوان تابعی از دما و در شکل ۹ به عنوان تابعی از زمان آمده است. نرخ گرمادهی با زمان به صورت خطی و با دما به صورت نمایی افزایش یافته است. افزایش نرخ‌های گرمادهی به عنوان نتیجه‌ای از افزایش هدایت الکتریکی با زیاد شدن نمک موجود در محلول است. عامل مهم دیگری که بر سرعت نسبی گرمایش فاز جامد - مایع در فرایند گرمادهی اهمی مؤثر است



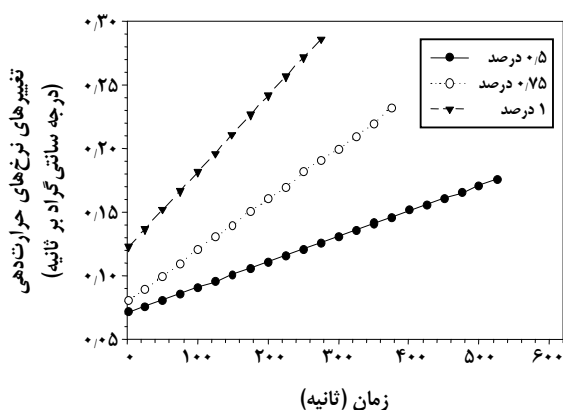
شکل ۸- اثر اسید بر روی پروفیل‌های دما - زمان برای محلول‌های کلوئیدی ۸ درصد خالص بدون اسید و مقایسه با ۳۰ و ۹۰ میلی لیتر سیتریک اسید.

یکنواختی گرمادهی

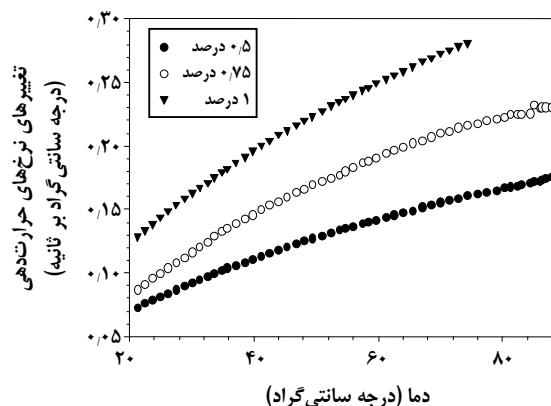
منحنی تغییر دما بر حسب زمان برای پنج مکان داخل سلول گرمادهی برای محلول نشاسته ۳/۳ درصد همراه با ۰/۷۵ درصد سدیم کلرید به منظور بررسی یکنواختی گرمادهی در شکل ۷ نشان داده شده است. با نگاه به یکنواختی پروفیل‌های دما - زمان در مکان‌های مختلف درون سلول اهمی ایستا، می‌توان به برتری این سامانه گرمادهی نسبت به سامانه‌های دیگر گرمادهی پی‌برد. گرمادهی در همه‌ی نمونه‌ها با وجود خطاهای آزمایشگاهی، یکنواخت بوده است. نتیجه قابل توجه این است که پروفیل‌های دما - زمان برای ترموکوپل‌های T1، T2، T3، T4 و T5 نه فقط برای محلول نشاسته ۳/۳ درصد همراه با ۰/۷۵ درصد سدیم کلرید یکنواخت بوده بلکه برای تمامی نمونه‌های تست شده، پروفیل‌های دما - زمان نیز یکنواخت است. در جدول ۲ دمایی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها در زمان‌های گوناگون آمده است. دیده می‌شود که دمایی ترموکوپل‌های نزدیک الکتروودها T3 و T5 از دیگر ترموکوپل‌ها اندکی کمتر است. به طور مثال برای محلول نشاسته ۸ درصد میانگین دمایی برای T1 برابر ۵۳/۶۰۷۶۹، T2 برابر ۵۴/۴۹۹۳، T3 برابر ۵۳/۳۰۷۶۹، T4 برابر ۵۴/۸۴۶۵ و T5 برابر ۵۳/۴۶۹۲۳ درجه سانتیگراد و برای محلول ۳/۳ درصد با ۰/۷۵ درصد نمک میانگین دمایی برای T1 برابر ۴۶/۶۲۵، T2 برابر ۴۴/۹۸۷۵، T3 برابر ۴۳/۱۶۲۵، T4 برابر ۴۵/۹۵ و T5 برابر ۴۳/۷۳۷ درجه سانتیگراد به دست آمده است. با توجه به نتیجه‌ها دیده شده است که در هر دو حالت، ترموکوپل‌های نزدیک الکتروودها دمایی کمتری از دیگر ترموکوپل‌ها دارند. دی‌آلوئیس و همکاران [۱۷] گزارش دادند که در طول گرمادهی اهمی

جدول ۲- داده‌های دما-زمان هر ترموکوپل اهمی برای محلول کلونییدی ۳/۳٪ با ۷۵٪ نمک.

زمان (ثانیه)	T1	T2	T3	T4	T5
۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۵۰	۲۵٫۲	۲۴٫۴	۲۴٫۳	۲۵٫۵	۲۴٫۵
۱۰۰	۳۱٫۵	۳۱٫۵	۲۹٫۸	۳۱٫۹	۲۹٫۸
۱۵۰	۳۷٫۶	۳۸٫۳	۳۶٫۸	۳۸٫۹	۳۶
۲۰۰	۴۵٫۷	۴۶٫۳	۴۴٫۵	۴۷	۴۳٫۷
۲۵۰	۵۴٫۷	۵۵٫۴	۵۳٫۱	۵۶٫۵	۵۲٫۸
۳۰۰	۶۴٫۷	۶۶	۶۲٫۲	۶۷٫۶	۶۱٫۹
۳۵۰	۷۷٫۶	۷۸	۷۴٫۲	۸۰٫۲	۷۳٫۲
میانگین	۴۴٫۶۲۵	۴۴٫۹۸۷۵	۴۳٫۱۶۲۵	۴۵٫۹۵	۴۲٫۷۳۷۵



شکل ۹ - پروفایل‌های تغییرهای نرخ‌های گرمادهی با زمان برای محلول کلونییدی ۴٪ همراه با ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱٪ نمک.



شکل ۸ - پروفایل‌های تغییرهای نرخ‌های گرمادهی با دما برای محلول کلونییدی ۴٪ همراه با ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱٪ سدیم کلرید.

علاوه بر این دی آلویس و فرایر [۱۷] گزارش دادند که در هدایت الکتریکی ۱ تا ۵ زیمنس بر متر بیشترین نرخ گرمادهی از ۰٫۸ تا ۴ درجه سانتیگراد بر ثانیه در واحدهای تجاری اهمی که به‌طور پیوسته و عملیاتی در ولتاژ بالا کار می‌کنند، به‌دست می‌آید. (در سامانه‌های صنعتی ولتاژ کاربردی ۱۲۰۰۰ ولت می‌باشد).

بررسی تأثیر ولتاژ جریان روی سرعت حجمی تولید گرما، توان تولیدی و غلظت جریان ایجاد شده طی فرایند گرمادهی اهمی

ولتاژهای ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰، ۲۶۰، ۲۸۰ و ۳۰۰ ولت برای بررسی تأثیر ولتاژ جریان انتخاب شده‌اند و جریان‌های الکتریکی تولیدی به‌عنوان تأثیر متغیر ولتاژ در نتیجه‌ها آمده‌اند. برای بررسی اثر این پارامترها از محلول هیدروکلونییدی نشاسته ۳/۳ درصد

ظرفیت گرما حجمی هر فاز (ρC_p) است. با توجه به معادله هدایت الکتریکی $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\sigma |\nabla V|^2}{\rho C_p}\right)$ افزایش نرخ گرمادهی نشان‌دهنده کاهش (ρC_p) فاز جامد معلق در فاز مایع است. کاهش (ρC_p) نشان‌دهنده این است که ذرات جامد معلق سریعتر یا برابر با فاز مایع، حتی اگر هدایت الکتریکی جامد معلق از فاز مایع کمتر یا برابر با آن باشد، گرم می‌شوند. این روند گرما توسط چندین پژوهشگر گزارش شده است [۱۵، ۱۴ و ۹].

استرلینگ [۱۸] گرمادهی سریع را در بازه‌ی ۱ تا ۵ درجه سانتیگراد بر ثانیه با هدایت الکتریکی ۰٫۷ تا ۳ زیمنس بر متر و گرمادهی خیلی سریع را در محدود ۷ تا ۵۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه برای هدایت الکتریکی ۰٫۰۵ تا ۰٫۵ زیمنس بر متر گزارش کرده است.

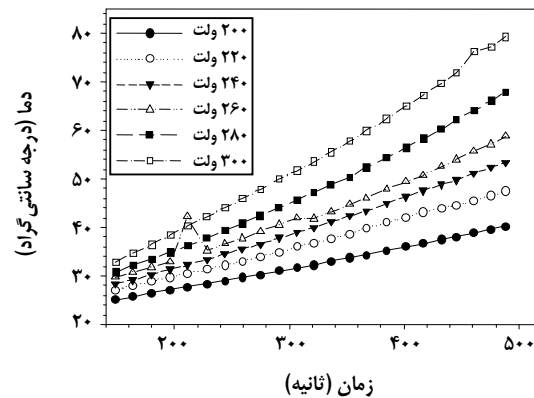
جدول ۳- مقادارهای جریان، غلظت جریان و نرخ تولید انرژی برای محلول کلونیدی ۳/۳ درصد با ۰/۵ درصد نمک در ولتاژ مختلف.

ولت ۲۰۰			ولت ۲۲۰			ولت ۲۴۰			
دما	I(A)	Q(KW/m ^۲)	J (A/cm ^۲)	I(A)	Q(KW/m ^۲)	J (A/cm ^۲)	I(A)	Q(KW/m ^۲)	J (A/cm ^۲)
۲۰	۰,۷۷	۷,۲۷	۲,۴۳	۰,۸۹	۱۱,۴۲	۳,۱۱۶۴	۱	۱۴,۰۱	۳,۵
۳۰	۰,۹	۹,۹۳	۳,۰۶	۱,۰۲	۱۳,۰۹۶	۳,۵۷	۱,۱۶	۱۶,۲۵	۴,۰۶
۴۰	۱,۰۱	۱۲,۵۱	۳,۶۴	۱,۱۳	۱۵,۵۱	۳,۹۶	۱,۳۱	۱۸,۳۵	۴,۵۹
۵۰	۱,۱۲	۱۵,۳۸	۴,۲۵	۱,۲۵	۱۶,۰۵	۳,۶۸	۱,۴۵	۲۰,۳۱	۵,۰۸
۶۰	۱,۲۲	۱۸,۲۵	۴,۸۴	۱,۳۷	۱۷,۵۹	۴,۷۹	۱,۶	۲۲,۴۱	۵,۶
۷۰	۱,۳۲	۲۱,۳۶	۵,۴۴	۱,۴۹	۱۹,۱۳	۵,۱۸	۱,۷۳	۲۴,۲۳	۶,۰۶

در آن با افزایش ولتاژ کاربردی شیب پروفایل‌های دما - زمان بیشتر شده و در زمان کوتاه‌تری دما به ۸۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. با توجه به جدول ۳ بیشترین مقدار غلظت جریان در ۳۰۰ ولت دیده شده که از ۵/۲۲ آمپر بر سانتیمتر مربع در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۸/۷۲ آمپر بر سانتیمتر مربع در ۷۰ درجه سانتیگراد و کمترین مقدار آن در ولتاژ ۲۰۰ ولت که از ۲/۴۳ تا ۵/۴۴ آمپر بر سانتیمتر مربع بین دمای ۲۰ - ۷۰ درجه سانتیگراد متغیر بوده است. مقدار نرخ تولید انرژی در ۳۰۰ ولت از ۲۶/۰۹ تا ۳۳/۶ کیلووات بر متر مکعب، در ۲۸۰ ولت از ۲۰/۱ تا ۳۴/۳۲ کیلووات بر متر مکعب، در ۲۶۰ ولت از ۱۶/۶۶ تا ۲۹/۵۹ کیلووات بر متر مکعب، در ۲۴۰ ولت از ۱۴/۰۱ تا ۲۴/۲۳ کیلووات بر متر مکعب، در ۲۲۰ ولت از ۱۱/۴۲ تا ۱۹/۱۳ کیلووات بر متر مکعب و در ۲۰۰ ولت از ۷/۲۷ تا ۲۱/۳۶ کیلووات بر متر مکعب دیده شده است.

به‌طور کلی نرخ گرمادهی آهمی به توزیع میدان الکتریکی و یکنواختی گرمادهی به غلظت جریان و شکل هندسی گرما دهنده بستگی دارد، در نتیجه افزایش ولتاژ باعث افزایش نرخ غلظت جریان و در نتیجه باعث افزایش تولید گرما در زمان کمتر و یکنواختی بیشتر گرمادهی می‌شود. همچنین با افزایش ولتاژ، جریان بیشتری از محلول عبور کرده و در نتیجه هدایت الکتریکی محلول افزایش می‌یابد که منجر به افزایش دمای محلول می‌شود.

در شکل ۱۰ روند افزایشی تولید گرما درونی را می‌توان با تغییر دانسیته جریان دید. در افزایش محتوای الکترولیتی محلول اگر نسبت هدایت الکتریکی ذرات جامد معلق نسبت به مایع اطراف بیشتر یا برابر شود ذرات، دانسیته جریان بیشتری نسبت به سیال اطراف جذب می‌شوند و در نتیجه سریعتر از سیال اطراف گرم می‌شوند [۱۸، ۱۷]. استرلینگ [۱۸] بیشترین غلظت



شکل ۱۰- پروفایل‌های تغییرهای دما - زمان برای محلول کلونیدی ۳/۳٪ همراه با ۰/۵ درصد نمک در ولتاژهای مختلف.

به همراه ۰/۵ درصد سدیم کلرید استفاده شده است. جدول ۳ نتیجه‌های به دست آمده از تاثیر ولتاژ بر حرارت‌دهی آهمی را نشان می‌دهد. با توجه به خروجی‌های موجود در جدول می‌توان گفت که انحراف از قانون اهم در هیچ دمایی دیده نشده است. افزایش دما نشان دهنده مقاومت کاهش یافته نمونه است. این داده‌ها نه تنها با قانون اهم مطابقت دارند بلکه برای همه‌ی شرایط از آن پیروی می‌کنند. طبق جدول ۳ می‌توان دید که با افزایش ولتاژ مقدار جریان عبوری از محلول بیشتر می‌شود. به‌طور مثال در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد جریان عبوری در ولتاژهای ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰، ۲۶۰، ۲۸۰، ۳۰۰ ولت به‌ترتیب برابر با ۱/۴۹، ۱/۳۳، ۱/۱۲، ۱، ۰/۸ و ۰/۷۷ آمپر مشاهده شده است که نشان‌دهنده پیروی از قانون اهم و تاثیر افزایش ولتاژ می‌باشد. شکل ۱۰ پروفایل‌های دما - زمان را در ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد که

پتانسیل قوی روش گرمادهی اهمی برای تولید فراورده نهایی بدون کاهش کیفیت آن، متاسفانه کاربرد صنعتی آن به علت نبود اطلاعات کافی در مورد این روش و همچنین نبود اطلاعات آزمایشگاهی به ویژه در حالت جریان پیوسته، توسعه پیدا نکرده است.

فهرست علائم

A	مساحت سطح الکترودها، سانتی متر مربع
C	ظرفیت حرارتی ویژه، ژول بر کیلوگرم بر کلون
I	مقدار جریان، آمپر
J	دانسیته جریان، آمپر بر سانتی متر مربع
K	هدایت گرمایی، وات بر متر بر کلون
L	فاصله بین الکترودها، سانتی متر
Q	تولید گرما، وات بر متر مربع
R	مقاومت، اهم
T	دما، کلون
T	زمان، ثانیه
V	ولتاژ، ولت

نمادهای یونانی

σ	هدایت الکتریکی، زیمنس بر متر
ρ	دانسیته، کیلوگرم بر متر مکعب

زیر نویس

F	سیال
S	جامد

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۲۴

جریان برای سامانه اهمی را تا ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع گزارش کرده است. این پژوهشگر در آزمایشی که در آن از الکترودهای تیتانیوم - پلاتین که در سدیم کلرید فرو برده شده بودند تراکمی معادل ۸۰۰۰ آمپر بر متر مربع را گزارش داده و بیان کرده که در این آزمایش، واکنش های الکترولیتی منجر به تولید جریان غیر القایی می شود. در فرایند اهمی بیشترین غلظت جریان بایستی کمتر از ۵۰۰۰ آمپر بر متر مربع باشد تا از به وجود آمدن جریان غیر القایی و خوردگی الکترودها جلوگیری شود [۱۶، ۱۳].

نتیجه گیری

نتیجه های این مطالعه نشان داد که بازده انرژی فرایند اهمی در تمامی محلول ها بالای ۹۱ درصد است. به طور مثال برای محلول هیدروکلوئیدی نشاسته ۳/۳ درصد با ۰/۵ درصد سدیم کلرید، مقدار تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی (بازده) بیش از ۹۱/۱۲ درصد دیده شد که این مقدار تبدیل نشان دهنده کارایی بالای این سامانه در مقایسه با دیگر فرایندهای گرمادهی می باشد. افزایش شوری (نمک) محلول تأثیر بالقوه ای بر مقدار هدایت الکتریکی و نرخ های گرمادهی دارد. به طور کلی هر چه سامانه به سمت نمکی شدن پیش می رود مقدار نرخ گرمادهی افزایش می یابد. ولی افزایش بیش از حد نمک در سامانه منجر به افزایش بیش از حد غلظت جریان الکتریکی^(۱) می شود که سبب خوردگی الکترودها و همچنین باعث به وجود آمدن جریان غیر القایی در این سامانه می شود. اثر محتوای الکترولیتی (اسید سیتریک) بر نرخ گرمادهی بسیار ناچیز دیده شد. نرخ های گرمادهی اهمی به توزیع میدان الکتریکی وابسته بوده و یکنواختی گرمادهی به غلظت جریان و هندسی سامانه بستگی دارد. فناوری گرمادهی اهمی در مقایسه با فرایندهای گرمادهی سنتی قدرت سرمایه گذاری، کیفیت و ایمنی بالاتری را برای فراورده نهایی به همراه دارد که این نتیجه به علت ظرفیت بالای این فرایند می باشد. با وجود

مراجع

- [1] Assiry A.M., Sastry S., Samaranayake C.P., Influence of Temperature, Electrical Conductivity, Power and pH on Ascorbic Acid Degradation Kinetics During Ohmic Heating Using Stainless Steel Electrodes, *Bioelectrochemistry*, **68**(1), p. 7 (2006).
- [2] Palaniappan S., Sastry S., Electrical Conductivities of Selected Solid Foods During Ohmic Heating, *J. Food Proc. Eng.*, **14**, p. 221 (1991).

(۱) Current density

- [3] Marra F., Zell M., Lyng J.G., Morgan D.J., Cronin D.A., Analysis of Heat Transfer During Ohmic Processing of a Solid Food, *J. Food Eng.*, **91**(1), p. 56 (2009).
- [4] Praporscic I., Lebovka N.I., Ghnimi S., Vorobiev E., Ohmically Heated, Enhanced Expression of Juice from Apple and Potato Tissues, *Biosystems Eng.*, **93**(2), p. 199 (2006).
- [5] De Alwis A., Halden K., Fryer P.J., Shape and Conductivity Effects in the Ohmic Heating of Foods, *Chem. Eng. Res.*, **67**, p. 1547 (1989).
- [6] Fryer P.J., DeAlwis A., Koury E., Stapley A.G.F., Zhang L., Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat Generation and Convection Effects, *J. Food Eng.*, **18**, p. 101 (1993).
- [7] Palaniappan S., Sastry S., Electrical Conductivities of Selected Solid Foods During Ohmic Heating, *Journal of Food Process Engineering*, **14**, p. 221 (1991).
- [8] Sastry S.K., "Ohmic Heating In Minimal Processing of Foods and Process Optimization", (R.R. Singh and F.A.R. Oliveira, eds.), pp. 17-33, CRC, London (1994).
- [9] Sastry S.K., Salengke S., Ohmic Heating of Solid-Liquid Mixtures: A Comparison of Mathematical Models under Worst-Case heating Conditions, *J. Food Proc. Eng.*, **21**, p. 441 (1998).
- [10] Moraveji M.K., Ghaderi E., Davarnejad R., Simulation of the Transport Phenomena During Food Drying with Ohmic Heating in a Static System, *Int. J. Food Eng.*, **6**(5), p. 1 (2010).
- [11] Moraveji M.K., Ghaderi E., Davarnejad R., Effective Parameters Consideration in Ohmic Heating Process in Two Phase Static System of Bio-Particle-Liquid, *Int. J. Food Eng.*, **7**(1), p. 1 (2011).
- [۱۲] کشاورز مروچی، م؛ قادری، ع؛ مروتی پسند، م؛ وثوقی، م؛ بررسی نتایج تئوری و تجربی حرارت‌دهی اهمی در سیستم‌های دو فاز بیو جامد - مایع، *مجله مهندسی شیمی ایران*، **۵۳**، صفحه ۱۹ (۱۳۸۹).
- [13] Tulsian P., Sarang S., Sastry S. K., Electrical Conductivity of Multi-Component Systems During Ohmic Heating, *Int. J. Food Prop.*, **11**, p. 1 (2008).
- [14] Marcotte M., Evaluation of rheological Properties of Selected Salt Enriched Food Hydrocolloids, *J. Food Eng.*, **48**, p. 157-167 (2001).
- [15] Kim S.H., Kim G.T., Park J.Y. Cho M.G., Han B.H., A Study on the Ohmic Heating of Viscous Food, *Foods and Biotech.*, **5**(4), p. 274 (1996).
- [16] Fryer P.J., DeAlwis A., Koury E., Stapley A.G.F., Zhang L., Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat Generation and Convection Effects, *J. Food Eng.*, **18**, p. 101 (1993).
- [17] De Alwis A., Fryer P.J., A Finite Element Analysis of Heat Generation and Transfer During Ohmic Heating of Food, *Chem. Eng. Sci.*, **45** (6), p. 1547 (1992).
- [18] Stirling R., Ohmic Heating-A New Process for the Food Industry, *Power Eng. J.*, **1**(6), p. 365 (1987).