

بررسی نتایج نظری و تجربی گرمادهی اهمی در سیستم‌های دوفازی زیست (جامد-مایع)

مصطفی کشاورز مروجی^{۱*}، عماد قادری^۱، محمد مروتی پسند^۱، منوچهر وثوقی^۲

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

۲- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، گروه مهندسی شیمی و نفت

پایان‌نگار: m-moraveji@araku.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، گرمادهی اهمی^۱ به عنوان روشی نوین در سیستم‌های حرارت‌دهی در صنایع زیست‌شناختی، غذایی و دارویی، معرفی و جنبه‌های تجارتي مختلف آن برای کاربردهای صنعتی و مسیره‌های تحقیقات آتی بیان شده و مورد بحث قرار گرفته است. بعد از معرفی این سیستم گرمادهی، مدل‌های حاضر، بررسی و نتایج تحقیقات انجام گرفته در قالب مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها معرفی می‌شوند. همچنین ابزارها و سیستم‌های استفاده شده در کاربردهای آزمایشگاهی و تجاری این تکنیک به‌طور کامل بیان می‌شود و حرارت‌دهی اهمی به‌عنوان راهکار و جایگزینی مناسب برای روش‌های گرمادهی سنتی^۲ معرفی می‌گردد. در پایان، چالش‌های مربوط به توسعه این روش بیان شده‌اند.

کلمات کلیدی: گرمادهی اهمی، رسانایی الکتریکی، صنایع غذایی، دارویی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی

۱- مقدمه

با فرایندهای سنتی، باعث افزایش کیفیت محصول می‌شود. [۶-۸ و ۲-۴] در روش‌های سنتی، همانند استفاده از تبادلگرهای گرمایی سطح تراش، لوله‌ای و نیز روش‌هایی که در آنها مستقیماً از بخار آب برای ضدعفونی کردن مواد غذایی استفاده می‌شود، لازم است برای انتقال گرما به بخش جامد مواد غذایی از یک محیط حد واسط که همانا بخش مایع محصولات غذایی می‌باشد استفاده شود که در عمل این امر مسائل و مشکلات محدودکننده‌ای ایجاد می‌کند که باعث افت کیفیت کلی محصول ضدعفونی‌شده می‌گردد. [۹-۱۲] در ضدعفونی کردن مواد غذایی حاوی دانه‌های بزرگ در روش‌های سنتی و مرسوم، لازم است که برای اطمینان از ضدعفونی شدن قسمت مرکزی دانه‌های جامد، به قسمت مایع مواد

فرایند گرمادهی اهمی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف بخصوص صنایع زیست‌شناختی، غذایی و دارویی دارد. گرمادهی اهمی در فرایندهای ضدعفونی‌کننده^۳ در سیستم‌های دوفازی (جامد-مایع)، جایگزینی مناسب برای فرایندهای گرمادهی سنتی است. [۱-۶] این فرایند، گرمادهی همزمان به دو فاز جامد و مایع بوسیله تولید گرمای درونی به علت عبور جریان الکتریسیته می‌باشد که این تولید گرمای همزمان، از گرمادهی بیش از اندازه به فاز مایع جلوگیری و آن را به حداقل می‌رساند و لذا در مقایسه

1. Ohmic Heating
2. Conventional Thermal
3. Antiseptic

- ۴) در این فرایند، صدمات مکانیکی به حداقل می‌رسند.
- ۵) حداکثر کارایی انرژی، تبدیل حدود ۹۰٪ انرژی الکتریکی به گرما، در این فرایند، وجود دارد.
- ۶) کنترل فرایند ساده است و شروع و خاتمه فرایند سریعاً انجام می‌شود.
- ۷) امکان گرمایش جریان پیوسته‌ای از مواد غذایی بدون نیاز به سطوح انتقال گرما وجود دارد.
- ۸) محصولات حساس به برش^۱ با این روش، به راحتی در معرض 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 مزایای گفته شده، این فرایند در مقایسه با فرایندهای دیگر ضدعفونی‌کننده، دارای توان سرمایه‌گذاری، کیفیت و ایمنی بالاتری برای تولید محصول است.

۳- شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های انجام گرفته

مدلسازی و شبیه‌سازی ریاضی، چشم‌انداز جدیدی را در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های گرمادهی اهمی بوجود آورده است [۲۳-۱۹]. توزیع دماهای لحظه‌ای و مکانی از یک مدل معتبر زمانی به دست می‌آید که فاکتورهای بحرانی را برای فراهم کردن اطلاعات جهت محاسبه مرگ ریزسامانه‌ها و کیفیت محصول بهم مرتبط سازد. [۲۵ و ۲۴ و ۲۰] شماری از پدیده‌های فیزیکی مختلف که در طی گرمادهی اتفاق می‌افتند، مدل‌سازی یک فرایند تحت گرمادهی اهمی را دشوار می‌سازند [۳۰-۲۶]. مدل‌های منتشر شده برای پیش‌بینی دمای درون ذرات برای شرایط خیلی خاص به کار برده می‌شوند. فرایند اهمی توسط تعداد زیادی از دانشمندان غذایی و دارویی به‌عنوان یک فناوری آینده برای فرایندهای ضدعفونی که شامل ذرات بزرگ هستند، از قدیم مورد توجه بوده است. با وجود این، یک اطمینان کلی بایستی از مطالعات مدل‌سازی برای افزایش دوام این سیستم پردازشی به دست آید. از اینرو محققین، طرحی برای سنجش ایمنی و اطمینان بالا ارائه دادند که این طرح به داده‌های دما، مدت گرمادهی و داده‌هایی

غذایی گرمایی بیش از آنچه که برای ضدعفونی‌شدن قسمت مایع لازم است اعمال گردد که این موضوع باعث افت کیفیت محصول از جنبه‌های عطر و نیز از هم‌پاشیدگی دانه‌ها شده و به تبع آنها کیفیت کلی محصول پایین می‌آید. [۱۵-۱۳ و ۸ و ۶] این مشکلات انتقال گرما با توسعه و پیشرفت فرایند نوین گرمادهی اهمی که با عبور جریان الکتریکی از میان یک جریان پیوسته ماده غذایی اعمال می‌شود مرتفع شده است. استفاده از این فرایند برای ضدعفونی کردن دانه‌های بزرگ در اواخر ۱۹۸۰ شروع، و توسعه این روش توسط محققان مختلفی انجام شد. [۱۸ و ۱۷ و ۱۶ و ۱۴ و ۱۰ و ۹] در این مقاله تلاش شده است فرایند نوین گرمادهی اهمی و مزایا و کاربردهای آن معرفی شوند. بخش عمده این مقاله به معرفی و بررسی دو جنبه تحقیقات نظری، شامل مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده و تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی در ارتباط با فرایند گرمادهی اهمی می‌پردازد.

۲- مزیت‌های فناوری گرمادهی اهمی

گرمادهی اهمی، یک فرایند غیر حرارتی است که تولید گرما بر اساس مقاومت ذاتی ماده در معرض فرایند در اثر عبور جریان الکتریسیته می‌باشد. یکی از مزایای این روش، بهبود کیفیت محصول تولیدی در مقایسه با روشهای معمولی دیگر است. محصول تولیدی توسط این روش از لحاظ کیفیت میکروبی، حفظ مواد مغذی و ویتامین‌ها کیفیت مطلوب‌تری در مقایسه با روشهای ضدعفونی کردن دیگر، مانند روش‌های استفاده از تبادلگرهای گرمایی لوله‌ای و سطح تراش دارد. روش گرمادهی اهمی بگونه‌ای است که سرعت نفوذ گرما در بخش‌های مختلف ماده (مایع و جامد) تقریباً یکنواخت است که این امر امنیت ضد میکروبی محصول را افزایش می‌دهد. مزیت‌های فرایند گرمادهی اهمی در بسیاری از تحقیقات ذکر شده‌اند. [۳-۱] این مزیت‌ها عبارتند از:

- ۱) گرمای تولیدی در گرمادهی اهمی محدودیت‌های انتقال گرما توسط روشهای سنتی و غیر یکنواختی ناشی از گرمادهی ریزموج، به علت محدودیت نفوذ دی‌الکتریک، را ندارد.
- ۲) ذرات جامد به دمای برابر یا بالاتر از دمای مایع می‌رسد که برای گرمادهی سنتی ناممکن است.
- ۳) خطرات ته‌نشینی بر سطوح انتقال گرما و سوختن ماده غذایی کاهش می‌یابد.

طراحی‌های ساده مانند کروی و استوانه‌ای زمانی که خواص فیزیکی هر دو فاز در تمام دوره حرارت‌دهی ثابت باشند، به کار برده شود [۳۴ و ۳۳ و ۱۷].

دی‌آلویس و همکاران [۱۲] از حل معادله لاپلاس استفاده کردند تا همراه با معادلات موازنه انرژی گذرا برای مدلسازی یک ذره منفرد در یک رسانای مایع بدون جابجایی، سرعت تولید گرمای همراه را با استفاده از راهکار عناصر محدود محاسبه کنند و به این نتیجه رسیدند که وضعیت غیر جابجایی منجر به طراحی بدترین حالت ممکن خواهد شد. این مدل با فرمولبندی سه بعدی توسط فرایر و همکاران [۱۷] توسعه پیدا کرد تا بخش‌های قابل اجرای (سلول واحد) یک گرمادهنده اهمی ایستا، برای مقادیر متفاوت رسانش الکتریکی سیال به ذره و کسرهای جامد، را مدلسازی کند. اخیراً اورنگی و همکاران [۱۹] نتایج حاصل از یک مدلسازی عددی گرمادهی اهمی برای مخلوط (جامد-مایع) را در یک گرمادهنده اهمی با جریان پیوسته منتشر کرده اند. در این مدل، از روشی شبیه به روش دی‌آلویس و همکاران [۱۲] استفاده شده است که باید معادله لاپلاس را برای توزیع میدان الکتریکی حل کند. با وجود این، این مدل از یک فرمولبندی تفاضلی محدود دو بعدی (شعاعی و محوری) برای میدان الکتریکی و توزیع دمای سیال برای لوله گرمادهنده استفاده می‌کند و از یک عنصر محدود سه بعدی برای حل توزیع دما در درون ذره جامد معلق استفاده می‌شود. نتایج گزارش شده توسط اورنگی و همکاران [۱۹] نشان دادند که تحت شرایطی که رسانش الکتریکی سیال بیشتر از ذره جامد است در مقادیر کمتر ضرایب انتقال جابجایی، ذره سریعتر گرما دریافت می‌کند. این آزمایش، به نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط خلاف [۱۵] شبیه است.

در مطالعات مدلسازی انجام شده توسط ساستری و همکاران [۲۱، ۳۹] برای یک گرمادهنده با جریان پیوسته، ساستری و همکاران [۲۰، ۲۵] برای یک گرمادهنده اهمی ایستا از روش تشابه مداری برای تقریب مقاومت الکتریکی در یک مخلوط (جامد-مایع) و گرادیان ولتاژ متوسط در طول گرمادهنده استفاده کرده‌اند. در مدل تشابه مداری، یک فرمولبندی عناصر محدود سه بعدی برای ناحیه جامد فرض می‌شود که در فاز مایع کاملاً مخلوط شده است. صحت این مدل در پیش بینی مقادیر گرمایی (جامد-مایع) برای

برای اطمینان زیست‌شناختی (غیر فعالسازی) محدود نمی‌شود [۱۸، ۲۷، ۳۱، ۳۲].

داینان و همکاران [۲۳] مدلی ارائه دادند که در آن داده‌های (دما- زمان) و زیست‌شناختی مبنای انجام محاسبات فرایند بوده است. در حال حاضر، اطمینان زیست‌شناختی نسبت به سنجش دما بعلت پیچیدگی زیاد در ثبت دمای ذره زمانی که درون سیستم ضدعفونی‌کننده جریان می‌یابد، بیشتر مورد پذیرش است. اخیراً طرحی معتبر برای سیستم ضدعفونی‌کننده توسط برنارد و همکاران [۱۰] ارائه شده که در این طرح مطالعات کمی در رابطه با اعتبار زیست‌شناختی فرایند ضدعفونی غذاهای دارای ذره بزرگ گزارش شده است. سگنر و همکاران [۳۳] یک مطالعه معتبر زیست‌شناختی را برای سیستم ضدعفونی‌کننده سنتی انجام دادند تا اعتبار شبیه‌سازی رایانه‌ای را مورد ارزیابی قرار دهند. فنون آزمایشگاهی که در این سیستم ضدعفونی‌کننده مورد استفاده قرار گرفت شامل اعتبار زیست‌شناختی [۳۵ و ۳۴ و ۳۳ و ۲۶ و ۲۱]، حرکت ترموکوپل [۳۲، ۳۶، ۳۷، ۳۸] و سرعت نسبی [۳۹ و ۲۸ و ۲۷ و ۲۶ و ۲۲] است.

مؤلفه بسیار مهم در شناخت فرایند گرمادهی اهمی، توسعه مدل‌های ریاضی است که می‌توانند به خوبی برای شبیه‌سازی تأثیرات مختلف فاکتورهای بحرانی برای سناریوی بدترین حالت ممکن^۱ مانند تشخیص سردترین و گرمترین نقاط درون سیستم، استفاده شوند [۲۱، ۳۹]. نتایج مدلسازی توسط پالانیان و همکاران [۲۰، ۲۵] بیشتر، تحت این طرح حرارت دهی ارائه شده‌اند که نقاط سرد درون ذرات جامد در گوشه‌ها قرار می‌گیرند. دی‌آلویس [۱۱] مدلی ساده ارائه کرد که پایه و اساس آن حل معادله لاپلاس است. در این مدل، تأثیر نسبت‌های رسانشی بر نسبت‌های گرمادهی تفاضلی بین یک ذره جامد عایق و یک سیال رسانا ارائه شده است. روش مدلسازی همسان دیگر، که از طرح قبلی پیروی می‌کند توسط فرایر و همکاران [۱۷، ۴۰] برای شبیه‌سازی تأثیر ضریب انتقال گرمای جابجایی سیال به ذره (h_{fp}) بر دماهای سیال در جلو و پهلو یک ذره عایق ارائه شده است. این محققان به این نتیجه رسیدند که می‌توان تطابق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی به دست آورد. با وجود این، این روش می‌تواند تنها برای

1. Worst-Case

$$\nabla \cdot (\sigma_i \cdot \nabla V) = 0 \quad (1)$$

که در آن، V ولتاژ، ∇ گرادیان و σ_i رسانش الکتریک فاز i هستند که می‌توانند مقادیر مختلف برای فاز مایع و جامد را در برگیرند. با شرایط مرزی:

$$V|_{z=0} = V_o \quad V|_{z=L} = V_L \quad (2)$$

با نادیده گرفتن اثر جابجایی، انتقال گرما با یک رسانش خالص با تولید انرژی درونی همراه است. موازنه گرمایی برای رسانای ایستا و ذره عایق در معادلات زیر، به ترتیب، بیان شده‌اند:

$$\nabla \cdot (k_f \cdot \nabla T) + \dot{u}_f = \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T) + \dot{u}_s = \rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (4)$$

K رسانش الکتریکی، \dot{u} نرخ تولید انرژی درونی، ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T دما و t زمان می‌باشند. شرایط مرزی خارجی به واسطه جابجایی عبارت است از:

$$-k_{is} \cdot \nabla T_{is} \cdot \bar{n} = U (T_{is} - T_{\infty}) \quad (5)$$

که در آن، K_{is} رسانش دمایی فاز i در سطح، \bar{n} بردار نرمال واحد و U ضریب انتقال گرمای کلی و T_{is} دمای سطح فاز i و T_{∞} دمای اطراف (محیط) می‌باشند. جملات تولید انرژی در فاز مایع و جامد از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\dot{u}_f = |\nabla V|^2 \sigma_{0f} (1 + m_f T_f) \quad (6)$$

$$\dot{u}_s = |\nabla V|^2 \sigma_{0s} (1 + m_s T_s) \quad (7)$$

که ∇V گرادیان ولتاژ و m ضریب اتلاف گرما ($1/^\circ\text{C}$) می‌باشند.

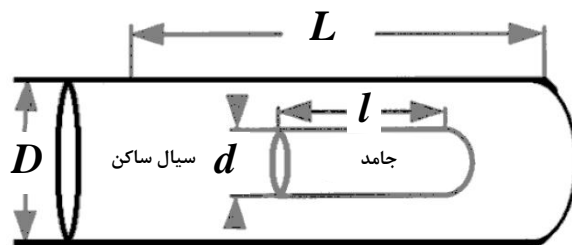
نمونه‌هایی با کسرهای جامد پایین، مورد سوال بوده است [۴۱،۴۰،۳۰].

نتایج مدل‌سازی توسط اورنگی و همکاران [۱۹]، یه و همکاران [۱۳] و ژانگ و همکاران [۴۰] نشان داده است که در صورت وجود ضریب انتقال گرمای پایین (h_{fp}) برای گرمادهی ذره، سناریوی بدترین حالت ممکن رخ خواهد داد. خلاف و همکاران [۱۵] مخلوط (جامد-مایع) را با استفاده از مدل‌های ریاضی موجود در شرایط سناریوی بدترین حالت ممکن، مقایسه کردند. اخیراً (الیوت-گودرکس) و همکاران [۳۶] مدت توزیع ذرات را در یک سیستم گرمادهی اهمی نشان داده‌اند.

۴- معرفی مدل‌های ریاضی موجود

۴-۱ مدل دی‌آلوپس و همکاران (مدل لاپلاس)

مدل دی‌آلوپس و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۰ بر مبنای حل معادله لاپلاس ارائه گردید تا نرخ تولید انرژی حل معادلات موازنه انرژی گذرا را برای مدل‌سازی یک ذره منفرد که در یک مایع رسانای الکتریکی بدون جابجایی قرار دارد محاسبه کند. در این مدل، یک ذره استوانه‌ای در وسط یک لوله که از یک سیال ساکن پر شده، قرار گرفته است و میدان الکتریکی در طول لوله اعمال می‌شود. این مدل توسط ژانگ [۴۰] که در آن کره‌های چندگانه که به طور یکنواخت در یک شبکه منظم درون یک مایع ساکن توزیع شده بودند، توسعه داده شد. حالت معمول آن در شکل (۱) آمده است:



شکل ۱- مدل شبیه سازی شده توسط دی‌آلوپس و همکاران [۱۲]

توزیع میدان الکتریکی یا توزیع ولتاژ را می‌توان از معادله لاپلاس یا به وسیله ترکیب قانون اهم و معادله پیوستگی برای جریان الکتریکی محاسبه کرد:

$$I = \frac{V}{R_{eff}} \quad (10)$$

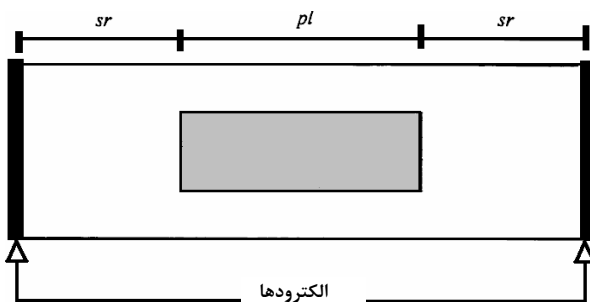
مقاومت مؤثر (R_{eff}) برای تمامی سیستم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{eff} = \sum_{j=1}^{j=n} R_j \quad (11)$$

فرمول زیر توسط ساستری [۲۷] برای مقاومت مؤثر در قسمت j^{n+1} به صورت زیر ارائه شده است:

$$R_J = R_{fsi} + \frac{R_{fpj} * R_{spj}}{R_{fpj} + R_{spj}} \quad (12)$$

برای یک گرمادهنده ایستا با یک ذره منفرد که در مرکز گرمادهنده قرار داده شده، این مسیر می‌تواند در درون ناحیه‌های سری و موازی همراه با مسیر طولی‌اش تفکیک شود. (شکل (۳))



شکل ۳- طرح مدل‌سازی شده در مدل مدار [۲۷]

گرادیان ولتاژ یکسان برای هریک از این بخش‌ها را در یک زمان، می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

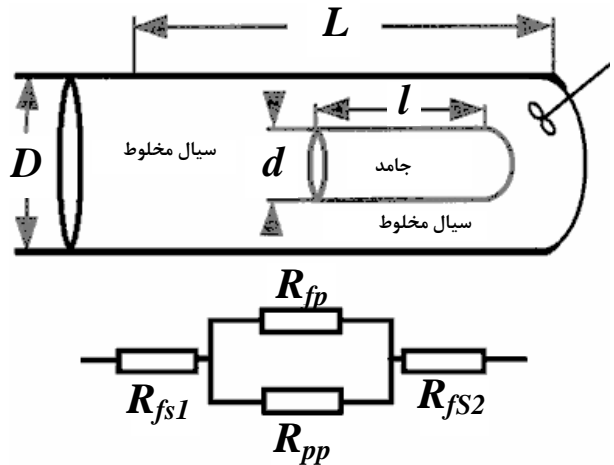
$$\nabla V_{sr} = \frac{IR_{sr}}{L_h - L_s} \quad (13)$$

$$\nabla V_{sr} = \frac{IR_{sr}}{L_h - L_s} \quad (14)$$

که:

۲-۴ مدل ساستری و همکاران (تشابه مداری)

ساستری و همکاران [۲۸،۳۹] در سال ۱۹۹۲ با استفاده از یک تشابه مداری، رسانش الکتریکی و تولید گرمای درونی را برای یک گرمادهنده ایستا با یک ذره مایع دارای حرکت^۱ را با فرض اینکه انتقال گرمای جابجایی، بی نهایت است، بدست آوردند. حالت معمول آن را در شکل (۲) می‌بینید.



شکل ۲- نمونه شبیه سازی شده در مدل ساستری و همچنین تشابه مداری آن [۳۹،۲۸]

مقاومت الکتریکی مؤثر را می‌توان با استفاده از تشابه مداری تعیین کرد. مقاومت مؤثر برای این سلول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{eff} = R_{fs1} + R_{fs2} + \frac{R_{fp} R_{pp}}{R_{fp} + R_{pp}} \quad (8)$$

که R را می‌توان از رسانش الکتریکی و ابعاد مواد غذایی محاسبه کرد. برای تشابه مداری، خطوط هم‌پتانسیل در طول گرمادهنده، موازی فرض می‌شوند. در نتیجه، این مقاومت الکتریکی مؤثر (R_j) در طول گرمادهنده و گرادیان، ولتاژ متناظر (∇V) را می‌توان به تقریب تعیین کرد. رابطه میان مقاومت مؤثر و گرادیان ولتاژ در معادله (۹) و مقدار جریان (I) در معادله (۱۰) داده شده است.

$$\nabla V_j = I * R_j \quad (9)$$

1. Well-Mixed

$$u_f = \frac{\pi}{4} (D^2 L_n - n_p d^2 L_s) \quad (23)$$

$$A_p = \pi d (L_s + \frac{d}{2}) \quad (24)$$

$$A_w = \pi d L_h \quad (25)$$

نرخ گرمادهی الکتریکی درونی موضعی در گرمادهنده‌های مهمی با استفاده از قانون اهم برای ولتاژ ثابت محاسبه می‌شود:

$$Q = E^2 \sigma \text{ or } (\nabla V)^2 \sigma \quad (26)$$

که $\nabla V = E$ ، گرادیان ولتاژ (V/m) برابر با شدت میدان الکتریکی و σ رسانش الکتریکی موضعی است. برای حالت جریان ثابت، رابطه به صورت زیر است:

$$Q = \frac{|J|^2}{\sigma} \quad (27)$$

J غلظت جریان (A/m^2) است. بیشتر گرمادهنده‌های مهمی تجاری تحت شرایط ولتاژ ثابت راه‌اندازی می‌شوند. در نبود مکانیسم‌های انتقال گرماهای دیگر مانند جابجایی و رسانش، تابش گرما به اطراف کاهش می‌یابد و با تثبیت ولتاژ، می‌توان نرخ گرمادهی را محاسبه کرد.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\sigma |\nabla V|^2}{\rho C_p} \quad (28)$$

افزایش دما در هر بخش از گرمادهنده‌های مهمی پیوسته APV را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\Delta T = \frac{V^2 \sigma A}{L m C_p} \quad (29)$$

$$I = \frac{V_{tot}}{R_{sr} + R_{PL}} \quad (15)$$

$$R_{sr} = \frac{4(L_h - L_s)}{\pi D^2 \sigma_{of} (1 + m_f T_f)} \quad (16)$$

$$R_{pl} = \frac{R_{fpl} * R_s}{R_{fpl} + R_s} \quad (17)$$

$$R_{fpl} = \frac{4L_s}{\pi(D^2 - d^2) \sigma_{of} (1 + m_f T_f)} \quad (18)$$

$$R_s = \frac{4L_s}{\pi d^2 \sigma_{os} (1 + m_s T_s)} \quad (19)$$

R_{sr} مقاومت کلی الکتریکی در ناحیه سری است. برای نمونه‌هایی شامل یک ذره منفرد درون یک رسانای دارای حرکت، دمای رسانا از معادله زیر به دست می‌آید:

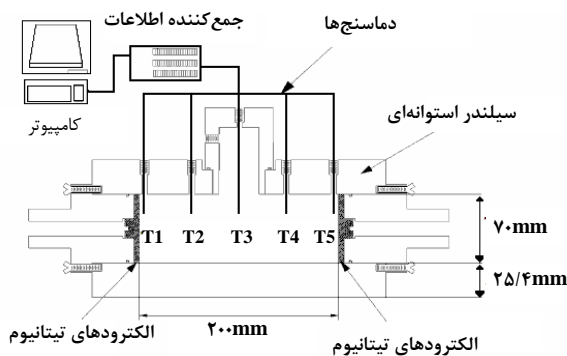
$$m_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \dot{u}_f v_f + n_p h_{fp} A_p (T_{psm} - T_f) - U_{Aw} (T_f - T_\infty) \quad (20)$$

اندیس f فاز مایع، p فاز جامد، m_f جرم مایع، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، \dot{u}_f نرخ تولید گرمای درونی ویژه مایع، v_f حجم مایع، n_p تعداد ذرات، h_{fp} ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ثابت (جامد-مایع)، T_{psm} دمای سطح ذره، A_p مساحت سطحی ذره و A_w مساحت دیواره گرمادهنده می‌باشند و داریم:

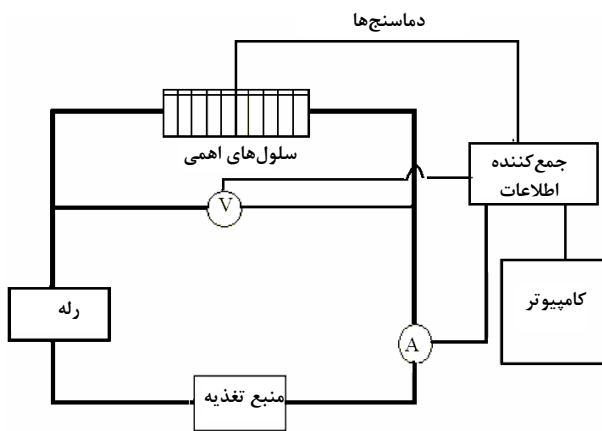
$$T_{psm} = \frac{T_s^{n+1} + T_s^n}{2} \quad (21)$$

$$T_{fm} = \frac{T_f^{n+1} + T_f^n}{2} \quad (22)$$

همکاران [۴۰] انجام شده، از یک گرمادهنده ایستا متشکل از یک شیشه پیرکس^۱ که در هر دو طرف استوانه توسط یک جفت فاصله دهنده محافظت می‌شود و یک حسگر دماسنج^۲ با پوشش تفلونی که از میان درپوش لاستیکی^۳ می‌گذرد تا دمای مرکز ذره و دمای رسانا در جلو و عقب را اندازه‌گیری کند، استفاده شده و جریان متناوب با نیروی میدان حدود ۰/۸ تا ۱/۲۸ (kv/m) به کار برده شده است. دماها توسط حسگرهای سنسجش دما اندازه‌گیری و با استفاده از ثبت‌کننده داده‌ها^۴ ضبط می‌شود. (شکل‌های (۵) و (۶))



شکل ۵- واحد نیمه‌صنعتی آزمایشگاهی فرایند گرمادهی اهمی [۱۸]



شکل ۶- نمای کلی سیستم آزمایشگاهی گرمادهی اهمی [۱۸]

اولین مشابه تجاری پیوسته فرایند گرمادهی اهمی، بوسیله انجمن تحقیقاتی الکتریسته در مرکز تحقیقاتی کاپنهورست در ایالت

1. T-Tube
2. PT-100
3. Rubber Stopper
4. Datalogger

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

$$P = m C_p (T_{OUT} - T_{in}) \quad (30)$$

جریان مورد نیاز برای تحویل این نیرو با استفاده از روابط الکتریکی استاندارد محاسبه می‌شود:

$$P = VI \quad (31)$$

$$P = RI^2 \quad (32)$$

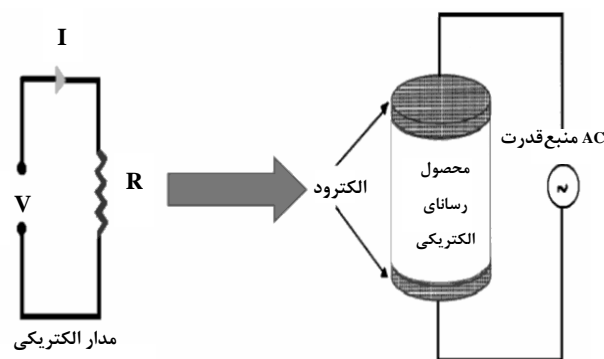
$$P = V^2/R \quad (33)$$

$$V = RI \quad (34)$$

۵- طراحی سیستم‌های گرمادهی اهمی

۵-۱ طراحی مکانیکی واحدهای نیمه‌صنعتی آزمایشگاهی و تجاری

فرایند گرمادهی اهمی با عبور جریان الکتریکی متناوب از میان یک محیط رسانا مانند یک سیستم غذایی دوفازی (جامد-مایع) و تولید گرما به علت وجود مقاومت الکتریکی انجام می‌گیرد. [۳۹، ۲۸، ۲۶، ۲۰، ۱۹، ۱۷، ۹، ۸ و ۴] طرح کلی فرایند گرمادهی اهمی در شکل (۴) آمده است:



شکل ۴- طرح کلی فرایند گرمادهی اهمی [۱۳]

در بررسی‌های آزمایشگاهی که توسط مارا و همکاران [۲]، سالنگ و همکاران [۴، ۳]، Ye و همکاران [۱۳]، اورنگی [۱۹] و ژانگ و

کردن محصول را محاسبه می‌کند [۱۷ و ۱۲ و ۱۱].

۳-۵ فرایند تولید محصول

در فرایند توضیح داده شده در شکل (۷)، محصول تا دمای مورد نظر گرم می‌شود و وارد لوله نگه‌دارنده^۱ و پس از آن وارد سیستم خنک‌کننده می‌شود. بعد از سرد شدن، محصول وارد مخزن نگهداری اصلی شده و پس از آن وارد سیستم پُرکن سپتیک می‌گردد. برای جلوگیری از جوش آمدن محصولات در حال فرایند در ستون گرمادهی اهمی لازم است فشار برگشتی نسبتاً بالایی بر سیستم اعمال شود. برای محصولات اسیدی که دمای فرایند ۹۵-۹۰ سلسیوس است، فشاری حدود ۲ بار و برای محصولات کم اسید که درجه حرارت فرآیند ۱۴۰-۱۲۰ سلسیوس است فشاری در حدود ۴ بار اعمال می‌شود [۳۹ و ۲۸ و ۲۷ و ۲۳ و ۱۱].

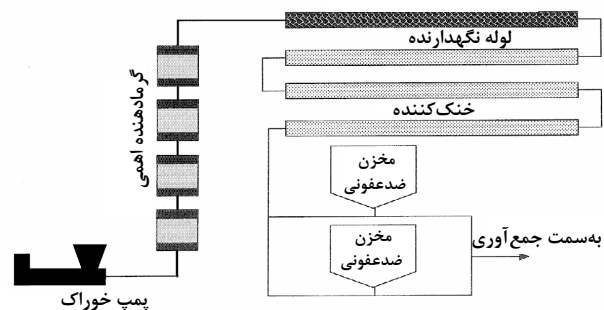
۴-۵ کیفیت محصول و ظرفیت فرایند

ظرفیت ستون اهمی تا ۳ تن بر ساعت متغیر است [۴۰ و ۳۵ و ۲۴ و ۲۲ و ۱۵]. محصول تولیدی با این روش از لحاظ میکروبی، حفظ مواد مغذی و ویتامین‌ها کیفیت مناسبی دارد زیرا گرمای تولیدی بدون محدودیت گرمادهی سنتی و غیر یکنواختی مربوط به گرمادهی ریزموج به‌علت محدودیت، نفوذ دی‌الکتریک را ندارد [۴۲ و ۱۸ و ۱۵ و ۴ و ۱]. گرمادهی به صورت حجمی انجام می‌شود و محصول، زمانی که گرم می‌شود، گرادیان دمایی زیاد را درون خودش تحمل نمی‌کند. این روش از لحاظ میکروبی دارای امنیت بالایی است، به این علت که دمای ذرات جامد می‌تواند برابر یا بیشتر از دمای مایع باشد که عملاً در روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. این روش، به این علت که خطرات ته‌نشینی و سوختن ماده غذایی را به حداقل می‌رساند در صنایع دارویی دارای کاربردهای زیاد و مهمی است [۴۳ و ۲۹ و ۱۵ و ۱۴].

۶- نتیجه‌گیری

تکنیک گرمادهی اهمی در مقایسه با فرایندهای گرمادهی سنتی، قدرت سرمایه‌گذاری، کیفیت و ایمنی بالاتری را برای محصول نهایی به همراه خواهد داشت که این امر، نتیجه ظرفیت بالای این فرایند

کینگدام توسعه یافت که نمای کلی شکل تجاری فرایند گرمادهی اهمی در شکل (۷) آمده است. این طرح دارای یک ستون شامل چهار یا بیشتر، محفظه‌الکتروود^۱ است که هر کدام شامل یک الکتروود معلق می‌باشد. محفظه‌های الکتروود بوسیله لوله‌های رابط از جنس فولاد ضد زنگ که قسمت داخلی آنها به وسیله یک لایه عایق پوشیده شده‌اند بهم متصل می‌شوند. مواد پوشاننده معمولاً پلی‌وینیلیدن، پلی‌اترکتون^۲ یا شیشه می‌باشند. ستون به‌صورت عمودی است و محصول از پایین به سمت بالا جریان می‌یابد. برای اطمینان از پر بودن دائم ستون، یک شیر تخلیه هوا در قسمت بالای گرم‌کننده نصب می‌شود. ستون بگونه‌ای نصب می‌شود که بخش‌های گرمادهنده دارای امیدانس الکتریکی یکسان باشند و بنابراین طول لوله‌های رابط از ورودی به سمت خروجی محصول، افزایش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش رسانایی الکتریکی محصولات غذایی است که معمولاً با افزایش دما افزایش می‌یابد [۳۹ و ۲۸ و ۲۱ و ۱۷ و ۱۳].



شکل ۷- شمای کلی شکل تجاری فرایند گرمادهی اهمی [۱۳]

۲-۵ سیستم‌های کنترلی دما

سیستم‌های گرمادهی اهمی تجاری دارای یک سیستم کنترل دمایی کاملاً خودکار می‌باشند. تغییرات ورودی محصول که بر دمای نهایی محصول خروجی تاثیر می‌گذارند عبارتند از:

۱- تغییرات دمای ورودی محصول

۲- سرعت جریان ورودی

۳- ظرفیت گرمایی ویژه محصول

در سیستم کنترلی، یک میکروپروسسور (ریزپردازنده) این تغییرات را ارزیابی می‌نماید و به طور مداوم توان الکتریکی لازم برای گرم

1. Electrode Housing
2. PEEK

3. Holding Tube

- [8] Assiry, A.M., Sastry, S.K., Samaranyake, 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), pp. 7-13, (2006).
- [9] Samaranyake, C. P., Sastry, S. K., "Electrode and pH effects on electrochemical reactions during Ohmic heating", *Journal of Electro analytical Chemistry*. 577(1), pp. 125-135, (2005).
- [10] Bernard, D. T., Gavin, A., Scott, V. N., Shafer, B. D., Stevenson, K.E., Unverferth, J. A., "Validation of aseptic processing and packaging", *Food Technology*. 44(12), pp. 119-120, (1990).
- [11] De Alwis, A. A. P., Halden, K., Fryer, P. J., "Shape and conductivity effects in the Ohmic heating of foods, *Chemical Engineering Research*. 67, pp.1547-1559, (1989).
- [12] De Alwis, A. A. P., Fryer, P. J., "A finite element analysis of heat generation and transfer during Ohmic heating of food, *Chemical Engineering Science*. 45 (6), pp. 1547-1559, (1990).
- [13] Ye, X., Ruan, R., Chen, P., Doona, C., "Simulation and verification of Ohmic heating in static heater using MRI temperature mapping", *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 37(1), pp. 49-58, (2004).
- [14] Dussap, G., Gros J. B., "Diffusion sorption model for salt in pork and beef muscle", In Linko P., Malkki Y., Olkku J., Laringkari J. (Eds), *Food Process Engineering* (pp. 407-411), Applied Science Publishers, London.
- [15] Khalaf, W. G., Sastry, S. K., "Effect of fluid viscosity on the Ohmic heating rate of solid-liquid mixtures", *Journal of Food Engineering*. 27, pp. 125-158, (1996).
- [16] DiGeronimo, M., Garthright, W., Larkin, J., "Statistical design and analysis", *Food Technology*. 51(10), pp. 52-54, (1996).
- [17] Fryer, P. J., DeAlwis, A. A. P., Koury, E., Stapley, A. G. F., Zhang, L., "Ohmic processing of solid-liquid mixtures: heat generation and convection effects", *Journal of Food Engineering*. 18, pp. 101-125, (1993).
- [18] Larkin, J. W., Spinak, S. H., "Safety considerations of comically heated, aseptically processed, multiphase low-acid food products", *Food Technology*. pp. 242-245, (1996).
- [19] Orangi, S., Sastry, S.K., Li, Q., "A numerical investigation of electro conductive heating in solid-liquid mixtures", *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41(14), pp. 2211-2220, (1997).
- [20] Palaniappan, S., Sastry, S., "Ohmic heating". In *Control of Food borne Microorganisms*, Eds. V. K. Juneja & J. N. Sofos. New York: Marcel Dekker, pp. 451-460, (2002).
- [21] Sastry, S.K., Palaniappan, S., "Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater", *Journal of Food Process Engineering*. 15, pp. 241-261, (1992c).
- است. ولی با وجود پتانسیل بالقوه، روش گرمادهی اهمی برای تولید محصول نهایی بدون کاهش کیفیت، متأسفانه کاربرد صنعتی فراوانی در دنیا ندارد. عدم اطلاعات ناکافی در مورد این روش و همچنین نبود اطلاعات آزمایشگاهی مخصوصاً در حالت جریان پیوسته به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدلسازی به‌خاطر مشکلات عمده در مانیتور کردن دمای ذرات، از موانع عدم توسعه جهت کاربردهای صنعتی می‌باشند. باید مدلی معتبر که تاثیرات جابجایی و گرانیوی را بهم ربط دهد و ضریب جابجایی در سطح مشترک (جامد- مایع) را محاسبه کند، معرفی شود. برای اطمینان از ایمنی محصولات، گرمادهی سیستم غذایی باید پردازش شده و شناخته شده باشد پس بدون اعتبارسنجی، اعتبار و ایمنی فرایند، توسعه و یا صنعتی کردن این روش، ناممکن است.

مراجع

- [1] Tsai, R., Huang, K.H., Huang, J.S., "The effects of variable viscosity and thermal conductivity on heat transfer for hydromagnetic flow over a continuous moving porous plate with ohmic heating", *Appl. Therm. Eng.*, pp. S1359-431, (2008).
- [2] Marra, F., Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A., "Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food", *Journal of Food Engineering*. 91(1), pp. 56-63, (2009).
- [3] Salengke, S., Sastry, S.K., "Experimental investigation of Ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios", *Agricultural and Biological Engineering. Dec.*, pp.324-336, (2007).
- [4] Salengke, S., Sastry, S.K., "Models for ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios", *Agricultural and Biological Engineering. Dec.*, pp. 337-355, (2007).
- [5] Legrand, A., Leuliet, J.-C., Duquesne, S., Kesteloot, R., Winterton, P., Fillaudeau, L., "Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous Ohmic heating process", *Journal of Food Engineering*. 81(2), pp. 447-458, (2007).
- [6] Praporscic, I., Lebovka, N.I., Ghnimi, S., Vorobiev, E., "Ohmically Heated, Enhanced Expression of Juice from Apple and Potato Tissues", *Bio-systems Engineering*. 93(2), pp. 199-204, (2006).
- [7] Wang, L., Li D., Tatsumi, E., Liu, Z., Chen, X., Li L., "Application of two-stage Ohmic heating to tofu processing", *Chemical Engineering and Processing*. 46(5), pp. 486-490, (2007).

- [22] Wood, F. W., "The diffusion of salt in pork muscle and fat tissue". *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 17, pp.138-140, (1966).
- [23] Dignan, D.M., Berry, M.R., Pflug, I.J., Gardine, T.D., "Safety considerations in establishing aseptic processes for low-acid foods containing particulates", *Food Technology*. 43(3), pp. 118-121, (1989).
- [24] Valle, D., Nickerson, F. R., "Studies on salting and drying fish; Equilibrium considerations in salting", *Journal of Food Science*. 32, pp. 173-179, (1967a).
- [25] Palaniappan, S., Sastry, S., "Electrical conductivities of selected solid foods during Ohmic heating", *Journal of Food Process Engineering*. 14, pp. 221-136, (1991).
- [26] Sastry, S.K., "A model for heating of liquid-particle mixtures in a continuous flow ohmic heater". *Journal of Food Process Engineering*. 15, pp. 263-278, (1992).
- [27] Sastry, S. K., "Measuring residence time and modeling the system", *Food Technology*. 51(10), pp. 44-48, (1997).
- [28] Sastry, S. K., Palaniappan, S., "Ohmic heating of liquid-particle mixtures", *Food Technology*. 46(12), pp. 64-67, (1992a).
- [29] Wang, W., Sastry, S., "Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for Ohmic heating: electrical conductivity profiles and vacuum infusion studies", *Journal of Food Engineering*. 20, pp. 299-309, (1993a).
- [30] Wang, W., Sastry, S., "Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for Ohmic heating: determination of parameters and mathematical model verification", *Journal of Food Engineering*. 20, pp. 311-323, (1993a).
- [31] De Ruyter, P.W., Brunet, R., "Estimation of process conditions for the continuous sterilization of foods containing particulates", *Food Technology*. 27(7), pp. 44-51, (1973).
- [32] Sastry, S.K., Salengke, S., "Ohmic heating of solid-liquid mixtures: A comparison of mathematical models under worst-case heating conditions", *Journal of Food Process Engineering*. 21, pp. 441-458, (1998).
- [33] Segner, W.P., Ragusa, T.J., Marcus, C.L., Soutter, E., "A. Biological evaluation of a heat transfer simulation for sterilizing low-acid large particulate foods for aseptic packaging", *Journal of Food Processing and Preservation*. 13, pp. 257-274, (1989).
- [34] Sastry, S.K., Cornelius, B.D., *Aseptic processing of foods containing solid particulates*, Jon Wiley and Sons, Inc. New York, (2002).
- [35] Wistreich, H.E., Morse, R.E., Kenyon, L.J., "Curing of ham: a study of sodium chloride accumulation. II: Combined effects of time, solution concentration and solution volume", *Food Technology*. 14, pp. 549-551, (1960).
- [36] Eliot-Godéreaux, S.C., Fairhurst, P.G., Goullieux, A., Pain, J.P., "Passage time distributions of cubes and spherical particles in an Ohmic heating pilot plant", *Journal of Food Engineering*. 47, pp. 11-22, (2001).
- [37] Ramaswamy, H.S., Abdelrahim, K.A., Simpson, B.K., Smith, J.P., "Residence time distribution (RTD) in aseptic processing of particulate foods: a review", *Food Res. Int.* 28(3), pp. 291-310, (1995).
- [38] Ruhlman, K.T., Jin, Z.T., Zhang, Q.H., "Physical properties of liquid foods for pulsed electric field treatment", In *Pulsed Electric Fields in Food Processing*. Eds., Barbosa-Canovas, G. V. & Zhang, Q.H. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA.45-56, (2001).
- [39] Sastry, S.K., Palaniappan, S., "Influence of particle orientation on the effective electrical resistance and Ohmic heating rate of a liquid-particle mixture", *Journal of Food Process Engineering*. 15, pp. 213-227, (1992b).
- [40] Zhang, L., Fryer, P.J., "Models for the electrical heating of solid-liquid mixtures", *Chemical Engineering Science*. 48, pp. 633-643, (1993).
- [41] Tulsian, P., Sarang, S., Sastry, S.K., "Electrical conductivity of multi-component systems during Ohmic heating", *International Journal of Food Properties*. 11 (1), pp. 233-241, (2007).
- [42] Drusas, A., Vagenas, G.K., Diffusion of sodium chloride in green olives, *Journal of Food Engineering*, Vol. 7, pp. 211-222, (1988).
- [43] Chandarana, D.I., Unverferth, J.A., "Residence time distribution of particulate foods at aseptic processing temperatures", *Journal of Food Engineering*. 28, pp. 349-360, (1996).