یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

اصول و معادلات حاکم بر گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

مطهره واعظی زاده[1]، محسن شمسی[2]، کامبیز افروز[3]، محمد علی رستمی[4]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، m.vaezizadeh@gmail.com
۲. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، mbkshamsi@gmail.com
۳. دانشیار گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، afrooz@uk.ac.ir
۴. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران. marostami1351@gmail.com

چکیده

فرکانس های رادیویی و ماکروویو از امواج الکترومغناطیس هستند. زمانیکه محصول در داخل میدان الکتریکی متناوب با فرکانس بالا قرار می گیرد، در اثر اصطکاک بین مولکولی دمای محصول افزایش می یابد که به آن گرمایش دی الکتریک یا گرمایش کاهش دی الکتریک می گویند. به علت خصوصیات منحصر به فرد مانند انتقال حرارت سریع و حجمی در روش گرمایش دی الکتریک در مقایسه با روشهای گرمایش سنتی مانند رسانایی، همرفتی و تابشی، انرژی امواج الکترومغناطیس در زمینه های زیادی بکار برده شده است. در کاربردهای صنایع غذایی، گرمایش دی الکتریک برای خشک کردن، پختن و یخ زدایی گوشت فریز شده مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از ارائه این مقاله، معرفی اصول گرمایش دی الکتریک و معادلات حاکم برای گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو بیان می شود. سیستم های حرارتی فرکانس رادیویی و ماکروویو و مزایا و معایب آنها ذکر شده است. و همچنین شباهت ها و اختلافات بین آنها نیز بحث می شود.

کلمات کلیدی: گرمایش دی الکتریک، گرمایش فرکانس رادیویی، گرمایش ماکروویو، مدل های ریاضی

Principles and Governing Equations for Frequency and Microwave Heating

Motahareh Vaezi Zadeh [1], Mohsen Shamsi[2], Kambiz Afrooz[3], Mohammad Ali Rostami[4]

1. Biosystem Engineering Department, Ph.D. student, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, m.vaezizadeh@gmail.com
2. Biosystem Engineering Department, Associate Professor, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, mbkshamsi@gmail.com
3. Electrical Engineering Department, Associate Professor, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman Iran, afrooz@uk.ac.ir,
4. Agricultural Engineering Research Department, Assistant Professor, Kerman Agricultural and Resource Research and Education Center, Areeo,Kerman, Iran. marostami1351@gmail.com

Abstract

Radio frequency (RF) and microwave (MW) are electromagnetic waves. In RF and MW heating, which are also called dielectric heating or dielectric loss heating, heat is generated within the products by molecular friction in high frequency alternating electric fields. Because of the unique heating characteristics of dielectric heating, such as rapid and volumetric heating, compared with conventional heating methods, such as conduction, convection and radiation, electromagnetic energy has been applied to many fields. In food processing applications, dielectric heating has already been successfully applied for drying, baking and thawing of frozen meat. The purpose of this article is introduced the main principle heating and the governing equations for RF and MW heating. RF and MW heating systems and the advantage and disadvantage of RF and MW heating treatments. And the similarities and differences between them will also be discussed.

Keywords: dielectric heating, radio frequency heating, microwave heating, mathematical model

---

[1] مطهره واعظی زاده ، کرمان، خ شیخ احمد کافی جنوبی ۱۴ سمت راست درب ۱۷، ۰۹۱۳۸۴۷۶۷۱۴

۱- مقدمه

گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو از روشهای تولید گرما در مواد دی الکتریک در صنایع غذایی می باشند. به موادی که هدایت الکتریکی آنها ضعیف است، مواد دی الکتریک می گویند. (Barber, 1983) بطورکلی، هدایت الکتریکی ضعیف منجر به هدایت حرارتی ضعیف این مواد به روش های سنتی، رسانایی، همرفتی و تابشی می شود. به عبارت دیگر، برای گرم شدن یک ماده دی الکتریک به وسیله یک منبع خارجی زمان زیادی طول می کشد تا گرما از سطح جسم به داخل آن نفوذ کند و باعث افزایش دمای ماده دی الکتریک شود. بر خلاف انتقال حرارت به روش رسانایی، انتقال حرارت به روش گرمایش دی الکتریک سریع و حجمی می باشد بنابراین می توان از این روش برای گرم کردن موثر و سریع مواد دی الکتریک بهره برد. از آنجاکه بیشتر محصولات غذایی و کشاورزی از مواد دی الکتریک می باشند بنابراین می توان کاربردهای زیادی برای استفاده از این سیستم گرمایشی در صنایع غذایی و کشاورزی مطرح نمود. (Richardson, 2001)

امواج فرکانس های رادیویی و ماکروویو گستره فرکانسی مختلفی با طول موج های متفاوت و گسترده ای را پوشش می دهند. گستره فرکانسی امواج رادیویی از ۳ کیلو هرتز تا ۳۰۰ مگاهرتز می باشد و امواج ماکروویو در گستره فرکانسی ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگا هرتز را در طیف امواج الکترومغناطیس را به خود اختصاص داده اند. فرکانس هایی رادیویی با فرکانس کمتر دارای طول موج بیشتری نسبت به امواج ماکروویو با فرکانس بیشتر می باشند. از آنجاکه فرکانس های رادیویی و ماکروویو در حوزه فرکانسی امواج رادار و تجهیزات ارتباطی قرار دارند لذا برای استفاده از این امواج در صنایع غذایی، پزشکی و علمی بایستی از فرکانس های محدودی استفاده کرد که این فرکانس ها در حوزه رادیویی شامل ۱۳/۵۶، ۲۷/۱۲ و ۴۰/۶۸ مگاهرتز و در حوزه ماکروویو ۹۱۵ و ۲۴۵۰ مگاهرتز می باشد. (Tang et al., 2000)

در طی فرآیند گرمایش دی الکتریک، مواد دی الکتریک در معرض یک میدان الکتریکی متناوب قرار می گیرند. مولکولهای دوقطبی (Polar molecules) آب که در داخل مواد غذایی وجود دارند زمانیکه در معرض میدان متناوب الکتریکی قرار می گیرند یک گشتاور دوقطبی الکتریکی (Electrical dipole moment) پیدا می کنند. از آنجاکه مراکز قطب مثبت و منفی مولکولهای دو قطبی بر روی یکدیگر منطبق نیستند لذا زمانیکه این مولکولها در مواجهه با میدان الکتریکی قرار می گیرند، قطبها خودشان را با میدان تطبیق می دهند. اگر میدان متناوب باشد با تغییر قطب های مثبت و منفی میدان ، مولکولهای دو قطبی نیز بطور پیوسته تغییر جهت می دهند که به این پدیده چرخش دو قطبی (Dipole rotation) می گویند. (Marra et al., 2009) اصطکاک بین مولکولها در طی این فرآیند، انرژی الکترومغناطیس تبدیل به انرژی گرمایشی و در نتیجه افزایش دمای مواد دی الکتریک می شود. یون های تجزیه شده در مواد غذایی از عوامل دیگر افزایش درجه حرارت در داخل مواد دی الکتریک می باشند. یونها زمانیکه در معرض میدان الکتریکی قرار می گیرند به سمت قطب های غیر همنام حرکت می کنند و با تغییر محل قطب ها، جهت حرکت یون ها نیز تغییر می کند در نتیجه حرکت یون ها در داخل مواد دی الکتریک و جنبش مولکولی باعث افزایش دمای درونی ماده می شود که این پدیده را هدایت یونی (Ionic conduction) می نامند. گرمایش دی الکتریک تحت تاثیر هر دو مکانیزم چرخش دوقطبی و هدایت یونی می باشد و این هر دو پدیده نیز وابسته به درجه حرارت و فرکانس می باشند. (Buffler, 1993)

۲- معادلات حاکم بر گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

۲-۱-گرمایش فرکانس رادیویی

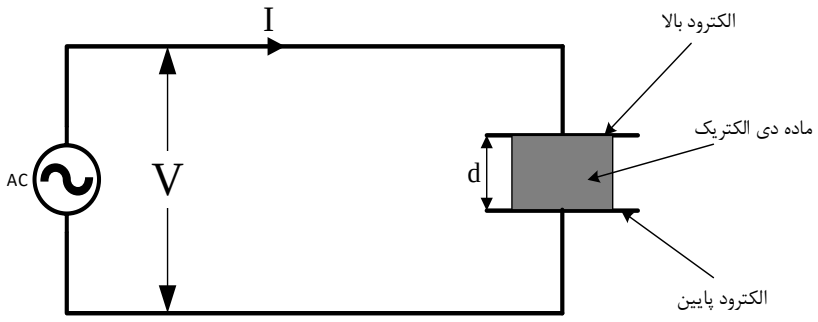
شکل ۱ شماتیک ساده ای از سیستم گرمایش فرکانس رادیویی را نشان می دهد. به‌طورمعمول در سیستم فرکانس رادیویی از دو صفحه موازی همانند یک خازن استفاده می‌شود. که ظرفیت خازن را می‌توان از معادله ۱ محاسبه می شود.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r' A}{d} \qquad (۱)$$

که در آن C ظرفیت خازنی بر حسب فاراد، A مساحت صفحات خازن بر حسب m^2، d فاصله بین دو صفحه موازی یا الکترود از یکدیگر بر حسب m، ε_0 ثابت دی الکتریک خلاء که برابر با $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ و ε_r' ثابت دی الکتریک نسبی ماده می باشد.

در یک خازن ایده آل، بین دو صفحه خارن هیچ جذب انرژی وجود ندارد و یک زاویه فاز $\pi/2$ بین جریان و ولتاژ وجود دارد. زمانیکه یک ماده دی الکتریک در بین صفحات خازن قرار می گیرد، ماده مانند یک مقاومت عمل می کند و جریان عبوری از مدار سبب ایجاد اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان می گردد. شکل ۲ جهت جریان در یک مدار گرمایش دی الکتریک را نشان می دهد. ما اگر یک ماده دی‌الکتریک بین دو الکترود قرار گیرد، ماده به‌عنوان یک مقاومت در مدار عمل می‌کند و جریان عبوری از مدار سبب ایجاد یک اختلاف‌فاز بین ولتاژ و جریان می‌گردد. شکل ۲ نمودار مدار یک سیستم حرارتی دی‌الکتریک و جهت جریان را نشان می‌دهد، که در آن δ زاویه کاهش دی الکتریک و I_c جریان عبوری از خازن را نشان می دهد. که مقدار آن با استفاده از معادله ۲ محاسبه می گردد.

شکل ۱: شماتیک ساده‌ای برای سیستم گرمایش فرکانس رادیویی



$$\mathrm{I_c} = \omega VC = 2\pi fVC \qquad (۲)$$

که در آن V ولتاژ داده شده به مدار برحسب ولت می باشد. جریان عبوری از مقاومت(I_R) از معادله ۳ می توان بدست آورد.

$$\mathrm{I_R} = I\sin\delta = I_C\tan\delta \qquad (۳)$$

کل توان تلف‌شده(Q) را می‌توان از معادله ۴ به دست آورد.

$$Q = VI_R = VI_C\tan\delta = 2\pi fV^2C\tan\delta \qquad (۴)$$

و رابطه بین ولتاژ و شدت میدان الکتریکی نیز از معادله ۵ حاصل می‌شود.

$$E = {}^{V}/_{d} \qquad (۵)$$

که در آن E شدت میدان الکتریکی بر حسب ${}^{V}/_{m}$ و d فاصله بین دو الکترود بر حسب m است. با قرار دادن معادله ۵ در ۴ ، معادله ۶ بدست می آید.

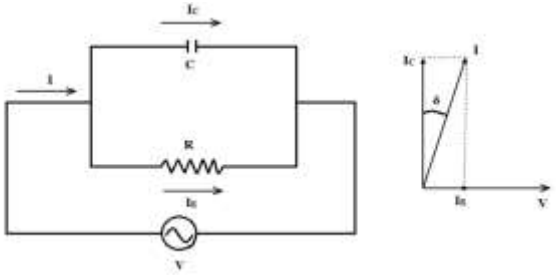
$$Q = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r' fE^2 dA\tan\delta = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r'' fE^2 dA \qquad (۶)$$

که در آن dA حجم محصول برحسب مترمکعب می باشد. بنابراین توان تلف‌شده در واحد حجم محصول را می‌توان از رابطه ۷ به دست آورد.

$$P = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon_r'' E^2 = 5.56\times10^{-11} f\varepsilon_r'' E^2 \qquad (۷)$$

که در آن P میزان توان تلف شده در واحد حجم محصول بر حسب W/m^3 که در معرض میدان الکترومغناطیس قرار دارد، می باشد. معادله ۷ نشان می‌دهد که توان تلف‌شده با فرکانس، فاکتور کاهش دی‌الکتریک نسبی ماده و مربع شدت میدان الکتریکی رابطه مستقیم دارد و با افزایش هر یک از این پارامترها توان یا انرژی تلف‌شده در طی فرآیند نیز افزایش می‌یابد؛ که این اتلاف انرژی سبب افزایش دمای درون ماده می‌گردد.

شکل ۲: دیاگرام مدار سیستم حرارتی دی‌الکتریک



۲-۲-گرمایش ماکروویو

بخاطر کوتاه بودن طول موج امواج ماکروویو، معادلات امواج ماکسول بر الگوی گرمایش ماکروویو مورد بررسی قرار می گیرند. شکل دیفرانسیلی معادلات ماکسول به صورت زیر می باشند.

$$\nabla.\vec{D} = \rho \quad (۸)$$

$$\nabla.\vec{B} = 0 \quad (۹)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (۱۰)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (۱۱)$$

که در معادلات بالا، $\vec{E}$ بردار شدت میدان الکتریکی(V/m) ، $\vec{D}$ بردار چگالی شار الکتریکی (C/m^2)، $\vec{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسی (A/m)، $\vec{B}$ چگالی شار مغناطیسی $\left(Wb/m^2\right)$ و $\vec{J}$ بردار چگالی حجمی جریان $\left(A/m^2\right)$ می باشند. رابطه بین معادلات ماکسول و خصوصیات دی الکتریک ماده به صورت معادله ۱۲ می باشد.

$$\vec{B} = \mu\vec{H}\ ;\ \vec{D} = \varepsilon\vec{E}\ ;\ \vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (۱۲)$$

که در آن σ, μ, ε به تر تیب ضریب گذر دهی، ضریب نفوذ پذیری و هدایت الکتریکی می باشد که پارامتر های سازنده ماده نامیده می شوند. وقتی ماده مورد نظر دارای خصوصیات یکنواختی باشد بنابراین معادلات موج برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی از معادلات ۸ تا ۱۱ مشتق می شوند. یک ماده یکنواخت، ماده ای است که دارای خصوصیات خطی (پارامتر های سازنده مستقل از میدان است)، همگن (پارامترهای سازنده مستقل از موقعیت هستند) و ایزوتروپیک (پارامترهای سازنده مستقل از جهت امواج الکترومغناطیس بکار رفته می باشد.) (Guru & Hiziroglu,. 2004). در شرایط غیر یکنواخت، با بکار بردن یک عملگر کرل در دو طرف معادلات و ساده سازی آنها، معادلات موج میدانهای الکتریکی و مغناطیسی به معادلات ۱۳ و ۱۴ تبدیل می شوند.

$$\nabla^2\vec{E} = \mu\sigma\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \quad (۱۳)$$

$$\nabla^2\vec{H} = \mu\sigma\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} \quad (۱۴)$$

برای ساده سازی معادلات دیفرانسیل جزئی، فرض می کنیم که شدت میدان الکتریکی فقط مولفه در جهت x و در جهت $+z$ منتشر شود و شدت میدان مغناطیسی فقط در جهت y مولفه داشته باشد و در جهت $+z$ نیز منتشر شود. بنابراین معادلات به صورت زیر خلاصه می شوند.

$$E_z(z) = E_{x0}exp(-\gamma z) \quad (۱۵)$$

$$H_y(z) = H_{y0}exp(-\gamma z) \quad (۱۶)$$

$$\gamma^2 = j\mu\left(\sigma\omega + \varepsilon_d^{"}\omega^2\right) - \mu\varepsilon'\omega^2 \quad (۱۷)$$

که در آن γ ثابت انتشار امواج الکترومغناطیس است و اگر فرض کنیم که به صورت $\gamma = \alpha + j\beta$ تعریف شود.که در آن قسمت حقیقی α ، ثابت میرایی (Np/m) می باشد و میزان کاهش اندازه موج (مقادیر تلف شده که به وسیله ماده جذب و گرما تولید می کند) را نشان می دهد و قسمت موهومی ثابت انتشار β که به ثابت زاویه یا فاز موج (rad/m) بر می گردد و میزان انتشار موج را توصیف می کند . مقادیر آنها از طریق معادلات زیر محاسبه می گردند. و هر دوی این مقادیر تابع پارامترهای سازنده ماده می باشند.

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma+\varepsilon_d^{"}\omega}{\omega\varepsilon'}\right)^2} - 1\right]} \quad (۱۸)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma+\varepsilon_d^{"}\omega}{\omega\varepsilon'}\right)^2} + 1\right]} \quad (۱۹)$$

مقدار انرژی ماکروویو ذخیره شده در ماده به وسیله معادله زیر توصیف می شود.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (۲۰)$$

از آنجاکه بردار E یک موج با دوره تناوب و اندازه می باشد بنابراین می توان یک مقدار ثابت معادل میدان الکتریکی، به جای مقدار E جایگزین کرد. در نتیجه میدان معادل E یک مقدار یکسان گرما با بردار E در یک دوره تناوب تولید می کند. با فرض اینکه E_0 اندازه بردار E باشد لذا رابطه بین E و بردار E به صورت معادله ۲۱ تعریف می شود.

$$|E|^2 = \frac{1}{2}|E_0|^2 \quad (۲۱)$$

در نهایت مقدار توان ماکروویو از طریق معادله ۲۲ محاسبه می گردد.

$$P_d = 2\pi f\omega\varepsilon_0\varepsilon_r^{"}E^2 = 5.56\times10^{-11}f\varepsilon_r^{"}E^2 \quad (۲۲)$$

معادلات ۸ و ۲۲ که به ترتیب مقدار انرژی یا توان تولید شده در ماده در گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو هستند، با یکدیگر یکسان می باشند.

۳- مشخصات سیستم های گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

۳-۱- سیستم گرمایش فرکانس رادیویی

یک سیستم گرمایش فرکانس رادیویی شامل دو جزء اصلی تولید کننده (Generator) و عملگر (Applicator) می باشد. تولید کننده تولید انرژی فرکانس رادیویی را برعهده دارد و عملگر قسمتی از سیستم است که ماده دی الکتریک در آن گذاشته شده و تحت تاثیر انرژی فرکانس رادیویی برای گرم شدن قرار می گیرد. در کاربردهای تجاری دو نوع اصلی سیستم گرمایش فرکانس رادیویی شامل سیستم فرکانس رادیویی سنتی بر پایه نوسانگر (Oscillator) و سیستم فرکانس رادیویی بر پایه آمپلی فایر (Amplifire) که به آن سیستم فرکانس رادیویی ۵۰Ω نیز می گویند، مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم نوسانگر در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده می گیرد، اما سیستم ۵۰Ω یک تکنولوژی جدید است که می تواند یک فرکانس ثابت در مقایسه با مدار خود نوسانگر (Self-oscillatory circuit) فراهم کند و قوانین سازگاری امواج الکترومغناطیس را به خوبی و با دقت رعایت می کند و در ضمن توان و فیدبک (Feedback) را به طرز شگفت انگیزی کنترل می کند. بنابراین نرخ تولید گرما می تواند کنترل شود و به راحتی به درجه حرارت نهایی برسد. به دلیل اینکه توان از طریق کابلهای استاندارد ۵۰Ω به سیستم انتقال داده می شود بنابریان ژنراتور می تواند در مکانی دورتر از عملگر قرار گیرد و به سرعت متصل شود. مشخصات منحصر به فرد سیستم ۵۰Ω کاربردهای صنعتی قابل قبول بیشتری می توان برای آن یافت (Brbosa-Canocas et al., 2005).

نکته مهمی که در طراحی سیستم های فراکنس رادیویی بایستی در نظر گرفته شود مسئله نشت انرژی امواج الکترومغناطیس می باشد. از آنجاکه سیستم فرکانس رادیویی در محدوده گسترده فرکانسی که بدن انسان آنرا جذب می کند، قرار دارد *(60-100 MHz)* و جذب این امواج سرگردان برای انسان بسیار خطرناک است، لذا بایستی مطمئن شد که سیستم دارای نشتی نباشد (Erickson, 1995). این مشکل به راحتی با طراحی سیستم مناسب و پوشش مناسب برای میدان های فرکانس های رادیویی قابل حل می باشد.

از آنجاکه کوچکترین تغییر در ولتاژ منجر به تغییرات زیاد توان می شود، بنابراین برای کاهش تغییرات توان لازم است که تغییرات ولتاژ را در حداقل مقدار خود نگه داشت. بطور کلی تغییر ۱۰٪ ولتاژ به معنی ۲۰٪ تغییر در توان سیستم می باشد (Pound, 1973). وقتیکه یک ولتاژ متناوب به الکترودها داده می شود، ولتاژ در طول فاصله از نقطه تغذیه افزایش می یابد از آنجاکه ولتاژ یک موج سینوسی را دنبال می کند و بطور نسبی طول موج فرکانس های رادیویی زیادتر است، لذا افزایش ولتاژ در طول الکترودها را می توان نادیده گرفت. اما زمانیکه یک ماده دی الکتریک در بین دو الکترود قرار می گیرد طول موج در ماده با ریشه دوم ضریب گذردهی ماده کاهش می یابد. بنابراین راحترین راه برای کاهش تغییرات ولتاژ قرار دادن نقطه تغذیه در وسط الکترود به جای انتهای آن و یا استفاده از چندین نقطه برای تغذیه الکترود می باشد.

۳-۲. سیستم گرمایش ماکروویو

در قسمت کلیدی برای سیستم های گرمایش ماکروویو، مگنترون (Magnetron) (منبع) و یک محفظه ماکروویو (Microwave cavity) می باشد. بهرحال در یک سیستم ماکروویو صنعتی، یک موجبر نقش اساسی در انتقال انرژی ماکرووی از ژنراتور به عملگر را ایفا می کند. گسترده ترین مگنترون یا منبع تولید انرژی امواج ماکروویو یک لوله مگنترون (Magnetron tube) می باشد. یک مگنترون یک لوله خلاء با یک کاتد داغ (Hot cathode) و یک آند دایره ای و یک گپ بین آنها می باشد. گپ های بین آندها محفظه استوانه ای را ایجاد می کند. کاتد داغ یک پتانسیل منفی بالایی به وسیله منبع توان مستقیماً ایجاد می کند. یک آهنربای دایمی یک میدان مغناطیسی موازی را برای تولید رشته های گرمایی عرضه می کند. الکترون از کاتد داغ منتشر شده و به وسیله اختلاف پتانسیل بالا تسریع می شوند. همزمان الکترون ها توسط نیروهای میدان مغناطیسی به جای حرکت مستقیم به صورت مارپیچ به آند می رسند این روش حرکت الکترون ها باعث افزایش جریانهای الکتریکی متناوب در محفظه های بین آندها می شود. محفظه ها به صورت مدار تنظیم شده موثر عمل کرده و انرژی ماکروویو رزونانس را تحریک می کنند. انرژی به موجبر فرستاده می شود و موجبر هم انرژی را مستقماً به عملگر می فرستد.

دو نوع عملگر ماکروویو مختلف شامل یک کویتی رزونانس، که نمونه مشهور آن ماکروویو های خانگی می باشد، و دیگری موجبر می باشد که دارای مود های مختلف می باشد. اگر فقط یک مود موج در عملگر وجود داشته باشد سیستم را تک مود (Single mode) و در غیر این صورت آنرا چند مود (Multimode) می نامند. نوع مود یک سیستم ماکروویو بوسیله اندازه و طول موج منبع آن تعیین می گردد. برای ماکروویو های با فرکانس

۲۴۵۰ مگاهرتز به علت اینکه طول موج کوتاه یک سیستم تک مودی یک محفظه کوچک را برای آن به وجود می آورد ولی در فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز یک سیستم تک مودی به خوبی پاسخگو می باشد.

۴- مقایسه سیستم گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

۴-۱- شباهت بین سیستم گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

فرکانس های رادیویی و امواج ماکروویو از دسته امواج الکترومغناطیس هستند. هر دو گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو در صنایع غذایی پیشرفت چشم گیری داشته اند و هر در هر دو سیستم گرما به صورت سریع و حجمی افزایش می یابد. انتقال گرما در هر دو روش گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو به وسیله تابش (Radiation) در داخل محصول انتقال می یابد. و مقدار گرمای جذب شده توسط ماده به خصوصیات دی الکتریک ماده، تغییرات درجه حرارت درون ماده و خصوصیات حرارتی ماده بستگی دارد. اثر پلاریزاسیون تابش میدان الکترومغناطیس و معادلات حاکم بر گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو در فرآیند گرمایش دی الکتریک یکسان می باشند.

خصوصیات دی الکتریک ماده در فرآیند گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو نقش خیلی مهمی را ایفا می کنند و با میزان توانایی ماده برای جذب و یا اتلاف انرژی الکترومغناطیس رابطه دارد. سیستم های گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو قادر هستند که بطور پیوسته با و بدون منابع گرمایی کار کنند. و بازده آنها به مرتب خیلی بالاتر از بازده روشهای سنتی استفاده از هوای یا آب داغ می باشد بازده این مکانیزم ها ۵۰-۷۰٪ در مقایسه با ۱۰٪ بازده کوره های هوای گرم سنتی می باشد (Memelstein, 1997). هر دوی این روش ها به دلیل گستره فرکانسی خاصی که دارند انرژی کافی برای یونیزه کردن مولکولهای یونی مانند آب نمی باشند جهت یونیزه کردن این مولکولها به فرکانس های بالاتر در گستره فرکانسی اشعه x و گاما می باشد که بتواند ساختار مولکولی ماده را تغییر دهد. بر این اساس مواد غذایی سالم و ایمن باقی می مانند. از طرف دیگر سیستم های گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو دارای برچسب استاندارد زیست محیطی هستند که استفاده از آنها را برای مشتریان قابل قبولتر می سازد (Mitcham et al., 2004).

گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو در صنعت کاربرد محدودیت هایی دارد. نگرانی اصلی گرمایش غیر یکنواخت می باشد و به دلیل عدم یکنواختی توزیع میدان الکتریکی، نقاط گرم و سرد در داخل محصول در طی فرآیند گرمایش دی الکتریک به وجود می آید. بطور کلی فاکتور کاهش دی الکتریک در گستره فرکانس رادیویی به خاطر هدایت یونی سبب افزایش درجه حرارت ماده می شود که منجر به ایجاد نواحی گرم در اثر دریافت انرژی بیشتر نسبت به نواحی سرد می شود (Guan et al., 2004; Sosa-Morales et al., 2010). این پدیده را فرار حرارتی نامیده می شود که سبب گرمای غیر یکنواخت قابل توجهی می شود. علاوه بر الگوی حرارتی، هزینه نصب و نگهداری اولیه سیستم های گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو نسبتاً بالاست.

۴-۲- تفاوت بین سیستم گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو

منبع و طراحی سیستم برای گرمایش فرکانس رادیویی و ماکروویو متفاوت است. در گرمایش فرکانس رادیویی، میدان الکتریکی به طور معمول در یک جهت بین یک جفت صفحات الکترود تولید می شود ولی در گرمایش ماکروویو بسته به طراحی مود های مختلف، میدان الکتریکی در همه جهات به ماده نزدیک می شود. امواج ماکروویو به وسیله یک موجبر منتقل می شوند ولی در سیستم فرکانس رادیویی به این صورت نمی باشد و پیکر بندی و ساختار این دو نوع سیستم متفاوت است بطوریکه سیستم فرکانس رادیویی ساده تر از ماکروویو می باشد.

گستره فرکانسی امواج رادیویی در مقایسه با امواج ماکروویو خیلی پایین تر است و این منجر به عمق نفوذ بیشتر در آنها نسبت به ماکروویو می گردد. از آنجاکه عمق نفوذ بر روی اندازه و شکل محصول تحت گرمایش اثر می گذارد بنابراین عمق نفوذ در طراحی و ساخت سیستم های گرمایشی بسیار موثر می باشد. بنابراین گرمایش فرکانس رادیویی می تواند برای مواد فله و با ابعاد نسبتاً بزرگتری نسبت به امواج ماکروویو مورد استفاده قرار گیرد. در سیستم های گرمایش ماکروویو، محدودیتی برای شکل محصولات ندارند در حالیکه در گرمایش فرکانس رادیویی به اشکال منظم و ساده نیاز دارد. سیستمهای گرمایش فرکانس رادیویی بطور نسبی توزیع میدان الکتریکی یکنواخت تری نسبت به الگوی پیچیده امواج ماکروویو دارند. در نتیجه بازده گرمایش فرکانس رادیویی یک مقدار بیشتر از سیستم ماکروویو می باشد.

۵-منابع

Barber, H. (1983). Electroheat, New York: Granada Publishing, Chapter 8, 226-258.

Barbosa-Canovas, G.V., Tapia, M.S., Cano, M.P. (2005). Novel food processing technologies. CRC Press, Chapter 24, 572-600.

Buffler, C.R. (1993). Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist. Van Nostrand Reinhold, New York.

Erickson, C.J. (1995). Handbook of Electrical Heating for Industry. IEEE Press, Chapter 6.

Guan, D., Cheng, M., Wang, Y., Tang, J. (2004). Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes. Journal of Food Engineering, 69(1), FEP30-FEP37.

Guru, B.S., Hiziroglu, H.R. (2004). Electromagnetic field theory fundamentals, Cambridge University Press, United Kingdom.

Marra, F., Zhang, L., Lyng, J.G. (2009). Review: radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. Journal of Food Engineering, 91, 497-508.

Mermelstein, N.H. (1997). Interest in radio frequency heating heats up. Food technology, 51(10), 94-795.

Nitcham, E.J., Veltman, R.H., Feng, X., De Castro, E., Johnson, J. A., Simpson, T.L., Biasi, W.V., Wang, S., Tang, J. (2004). Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts. Postharvest Biology and Technology, 33, 93-100.

Pound, J. (1973). Radio frequency heating in the timber industry. Second edition, Halsted Press.

Richardson, P. (2001). Thermal technologies in food processing. CRC Press, Chapter 9.

Sosa- Morales, M.E., Velerio-Junco, L., Lopez-malo, A., Garia, H.S. (2010). Review: Dielectric properties of foods: Reported data in 21st century and their potential application. LWT- Food Science and Technology, 43, 1169-1179.

Tang, J., Ikediala, J.N., Wang, S., Hansen, J.D., Cavalieri, R.P. (2000). High temperature short time thermal quarantine methods. Postharvest Biology and Technology, 21, 129-145.