



مقاله پژوهشی

طراحی ساخت و ارزیابی سامانه فرآوری مایعات به صورت پیوسته با تکنولوژی مایکروویو

محمد مهدی سیدآبادی^۱، مهدی کاشانی نژاد^{۲*}، سید مهدی جعفری^۳، اسماعیل سیدآبادی^۴، مهدی خجسته پور^۵

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۵. استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳)

چکیده:

در سال‌های اخیر گرایش به مصرف مواد غذایی تازه افزایش یافته است. توجه مصرف‌کنندگان به حفظ ارزش غذایی و ماندگاری بیشتر محصول موجب شده تا روش‌های متفاوتی برای فرآوری آب میوه‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از روش‌های حرارتی جدید که سازوکار متفاوتی نسبت به روش‌های حرارتی مرسوم دارد، استفاده از امواج مایکروویو است. به منظور انجام تحقیق در این راستا، سیستم فرآوری مایعات به صورت مداوم با امواج مایکروویو طراحی و ساخته شد. برنامه PID برای کنترل و مانیتورینگ فرآیند، کد نویسی و تدوین شد. اثر انتخاب دماهای خروجی متفاوت (60°C ، 70°C ، 80°C و 90°C) در توان‌های (۵۰۰ W و ۷۰۰ W و ۹۰۰ W) بر نمودارهای دما - زمان مورد بررسی قرار گرفت. اثر دماهای مختلف بر خصوصیات مهندسی و همچنین تغییرات آنزیم PME ارزیابی شد. نتایج نشان داد که پروفایل دمایی ثبت شده توسط سنسورهای NTC در نقاط مختلف سامانه برای آب و آب‌نارنج مشابه بود. استفاده از حداکثر توان مایکروویو به دلیل روشن بودن دائم مگنترون، باعث توزیع دمای یکنواخت‌تر شد. تفاوت اندکی در مقادیر توان جذب شده بین نمونه آب نارنج و آب شهر مشاهده شد که ناشی از متفاوت بودن خصوصیات ترموفیزیکی بین دو سیال است. پروفایل‌های دما - زمان، به دلیل جذب گرما به وسیله لوله ماریچ و وار و محیط درون محفظه تیمار قبل از دستیابی به حالت پایدار یک فاز تأخیری معمولی نشان داد. مرحله افزایش دمای محصول (CUT) تأثیر بسیاری بر غیرفعال‌سازی آنزیم PME داشت. برنامه PID مورد نظر به خوبی قادر به کنترل سامانه بوده و عملکرد بالایی برای هوشمندسازی فرآوری محصول با تکنولوژی مایکروویو داشت.

کلیدواژه‌ها: فرآوری، آب میوه، طراحی، مایکروویو، توزیع دما

۱. مقدمه

پختن مواد غذایی و غیره، در طول چندین دهه داشته است. با توجه به طولانی بودن فرآیندهای حرارتی مرسوم (پاستوریزاسیون با مبدل حرارتی لوله‌ای و صفحه‌ای)، استفاده از روش‌های حرارتی همچون امواج مایکروویو در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در سیستم پاستوریزاسیون مایکروویو، یک مایع به صورت پیوسته در معرض امواج مایکروویو قرار می‌گیرد و در داخل ماده غذایی حرارت تولید می‌شود. درجه حرارت در سطوح تماس، به دلیل تبادل حرارتی با محیط سردتر اطراف، عموماً کمتر از دمای توده مایع است. معایبی از جمله قرار گرفتن در معرض درجه حرارت بالا و در نتیجه رسوب سطحی روی دیواره در سیستم پاستوریزه معمولی، به طور عمده در سیستم مایکروویو حذف می‌شود. این امواج ضمن سالم‌سازی، به واسطه افزایش سریع دمای محصول (عمق نفوذ بیشتر)، موجب حفظ طعم، رنگ، بافت و ارزش غذایی محصول در مقایسه با روش‌های حرارتی مرسوم می‌شود [۲]. از طرفی پاستوریزاسیون مواد غذایی، با استفاده از امواج مایکروویو روشی مؤثر برای نابودسازی عوامل بیماری‌زا و غیرفعال‌سازی آنزیم‌های طبیعی موجود است. نتایج تحقیقات تاجاکاویت و همکاران (۱۹۹۷) نشان‌دهنده افزایش سرعت غیرفعال‌سازی آنزیم PME طی حرارت دهی با استفاده از MW در مقایسه با حرارت دهی در بن‌ماری است [۳]. دمیردوون و همکاران (۲۰۱۶) با مقایسه روش متداول حرارتی و روش MW در حرارت دهی آب پرتقال، اظهار داشتند که روش MW باعث حفظ بهتر ویتامین ث شده و آنزیم PME را در دمای کمتری غیرفعال می‌کند [۴]. استراتاکوس و همکاران (۲۰۱۶) در مقایسه سیستم گرمایش حجمی مایکروویو و پاستوریزاسیون تجاری معمولی در مقیاس صنعتی برای فرآوری آب گوجه‌فرنگی عنوان نمودند که خصوصیات فیزیکوشیمیایی و رنگی آب گوجه تیمار شده با هر دو سامانه بلافاصله پس از فرآیند و هنگام نگاه‌داری مشابه بوده، اما شاخص ABTS، برای آب گوجه پاستوریزه شده با مایکروویو، در روز اول نسبت به روش رایج، بیشتر بود [۵].

هدف از این پروژه، طراحی و ساخت سیستم حرارت دهی پیوسته با تکنولوژی مایکروویو، در مقیاس آزمایشگاهی برای

در سال‌های اخیر، فرآوری مواد غذایی با پیشرفت‌های تکنولوژیکی فراوانی همگام بوده است که منجر به بازاریابی بهتر محصولات با حداقل فرآوری شده، شامل انواع میوه‌ها و سبزی‌ها، شده است. این تکنیک‌ها، شامل حرارت دهی با مایکروویو، حرارت دهی اهمیت و فرآیندهای غیرحرارتی، مانند فرآوری فشار بالا، تیمار پالس الکتریکی، پالس‌های نوری، اولترافیلتراسیون، اشعه‌دهی یا ترکیبی از این روش‌ها هستند. تولیدکنندگان مواد غذایی نیز به دنبال تکنولوژی‌هایی هستند که حداقل آسیب را به خصوصیات کیفی محصول، نظیر تازگی، خواص تغذیه‌ای و سلامت محصول وارد نمایند.

حرارت دهی از مهم‌ترین روش‌های متداول در فرآیند مواد غذایی است که به دلیل تأثیر مطلوبی که بر روی کیفیت فرآورده غذایی و اثر مطلوب نگه‌دارندگی بر روی غذا، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های حرارتی جدید که با سازوکار متفاوتی نسبت به روش حرارتی مستقیم سبب گرم شدن می‌شود، امواج مایکروویو است. امواج مایکروویو بخشی از طیف الکترومغناطیسی هستند که طیف وسیعی از فرکانس‌ها در محدوده (۳۰ MHz تا ۳۰۰ GHz) را دربر می‌گیرد. این طیف در محدوده بین دی‌الکتریک و مادون‌قرمز واقع شده است. به دلیل احتمال تداخل این امواج با سایر وسایل ارتباطی، استفاده از آن به فرکانس‌های خاصی محدود می‌شود. فرکانس مورد استفاده در مایکروویوهای خانگی، ۲۴۵۰ مگاهرتز و برای کاربردهای صنعتی، ۹۱۵ مگاهرتز است. امواج مایکروویو، برخلاف امواج مادون‌قرمز، حامل انرژی گرمایی نیستند، اما در اثر برخورد با مواد غذایی در میدان الکترومغناطیسی، باعث تولید گرما در داخل ماده غذایی می‌شوند. برای مکانیسم گرمایش در این روش، سازوکارهای مختلفی پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از هدایت یونی و چرخش دو قطبی. کاهش شدید زمان رسیدن به دمای مورد نظر، جاذبه اصلی کاربرد این روش در صنایع غذایی است [۱]. فرآیند حرارتی مایکروویو، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه فرآوری مواد غذایی، شامل خشک‌کردن، پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون، انجماد زدایی،

۴. سادگی، ایمنی و سهولت کار با دستگاه ساخته شده. طراحی سامانه با در نظر گرفتن برخی پارامترهای عملیاتی، مانند دبی سیال، میزان ماندن^۱ سیال در لوله ماریچ تعبیه شده در داخل سامانه، به واسطه تغییر دبی و حداکثر دمای مجاز برای پاستوریزاسیون انجام شد.

۲.۲. طراحی و ساخت سامانه

طرح اولیه دستگاه در محیط نرم افزار 2016 solidworks طراحی شد. ابتدا قطعات طرح هر کدام به صورت جداگانه در محیط part نرم افزار ترسیم و سپس در بخش assembly قطعات مونتاژ و در قسمت drawing نقشه ها، با فرمت pdf استخراج شد. پس از ساخت قسمت های مختلف دستگاه در کارگاه و تهیه وسایل مورد نیاز، برنامه نویسی و طراحی مدارات الکترونیکی انجام شد. نمودار جریان فرآیند (PFD)^۲ مربوط به سیستم طراحی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. نرم افزار EdrawMax V 9.0، برای رسم نمودار جریان فرآیند (PFD) به کار گرفته شد.

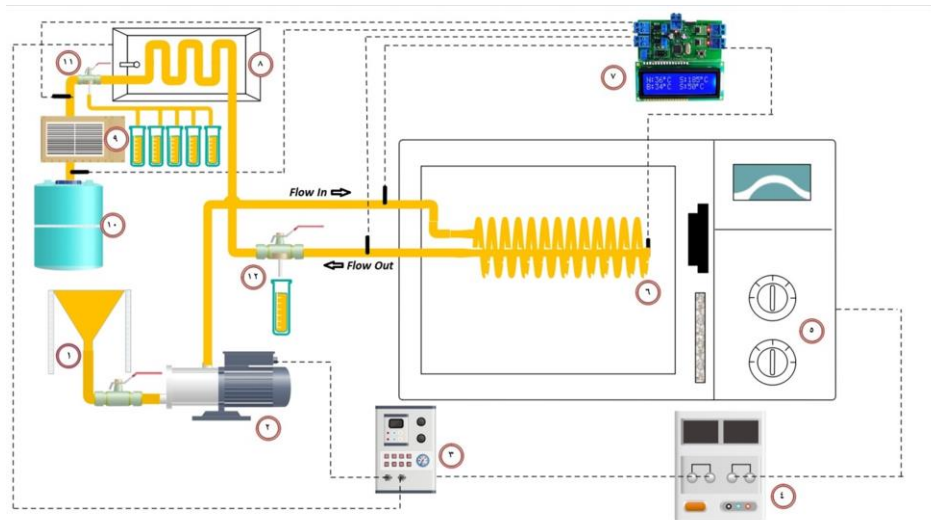
فرآوری مداوم محصولات مایع و مشخص کردن پارامترهای عملیاتی مؤثر بر فرآیند حرارت دهی بود. اثر پارامترهای عملیاتی شامل توان انتخاب شده، سرعت جریان حجمی بر دمای خروجی، نرخ گرمایش و انرژی مصرفی مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی کارایی دستگاه ساخته شده، از دو سیال آب مقطر و آب نارنج استفاده شد.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. شاخصه های طراحی

در طراحی سامانه مذکور نکات قابل توجه عبارتند از:

۱. قابلیت استفاده برای انواع آب میوه ها در محدوده $pH < 4$ که نیاز به پاستوریزاسیون دارند و انواع محلول های مایع با ویسکوزیته کم.
۲. قابلیت تغییر و اندازه گیری پارامترهای عملیاتی، مانند دبی، توان و دقت مطلوب.
۳. قابلیت فرآوری محصول با حداقل ماده اولیه (نیاز به ماده اولیه کم برای کار آزمایشگاهی).



شکل (۱) سامانه مایکروویو برای فرآوری حرارتی آب میوه: ۱. مخزن خوراک، ۲. پمپ، ۳. مدار کنترل پمپ و سامانه هولدینگ، ۴. منبع برق شهری، ۵. کنترلر مایکروویو، ۶. راکتور داخل مایکروویو، ۷. سامانه اندازه گیری دمای آنالین، ۸. سامانه هولدینگ، ۹. چیلر، ۱۰. مخزن محصول نهایی، ۱۱ و ۱۲. شیر نمونه برداری.

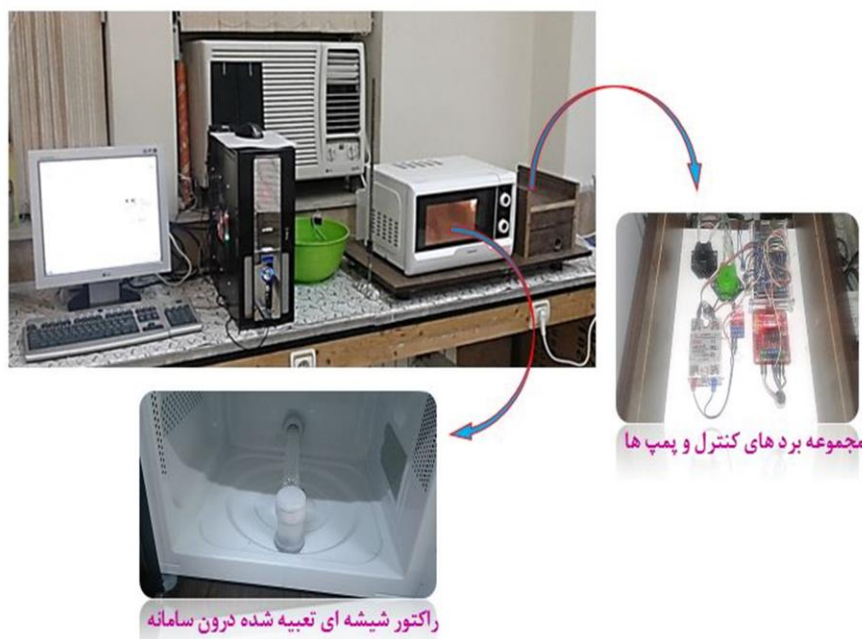
Fig 1. Microwave Heating System for Processing of Juice: 1. Feed Tank, 2. Pump, 3. Pump & Holding Controller, 4. Power Supply, 5. Microwave Controller, 6. Ractor Inside Microwave Cavity, 7. Time & Temperature Display, 8. Holding System, 9. Chiller, 10. Product Tank, 11&12. Sampling Valve.

1. resident time

2. Process Flow Diagram (PFD)

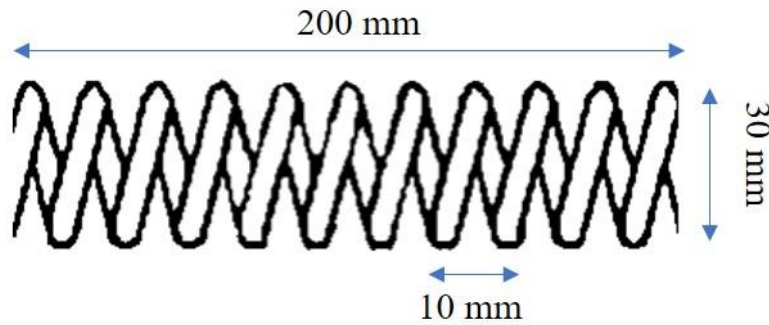
برای عبور سیال از داخل راکتور (لوله مارپیچ‌وار) از پمپ‌های دوزینگ پرستالتیک استفاده شد که با استفاده از برد الکترونیکی سرعت جریان سیال کنترل می‌شد. لازم به ذکر است، پمپ‌های پرستالتیک به دلیل عدم تماس متعلقات پمپ با سیال، بیشترین کاربرد را در صنایع غذایی دارند. در قسمت‌های هولدینگ و چیلر، از شیلنگ‌های سیلیکونی دارای گرید غذایی استفاده شد. لوله‌های مارپیچی شکل، عموماً برای ساخت مبدل‌های حرارتی در صنایع غذایی و سایر علوم مهندسی استفاده می‌شوند. مطالعات نشان داده است که نیروی سانتریفیوژی، باعث ایجاد جریان ثانویه در لوله‌های مارپیچی شده و باعث افزایش نرخ انتقال حرارت نسبت به لوله راست می‌شود [۶]. راکتور طراحی شده (لوله مارپیچ‌وار) از یک شیشه پیرکس به قطر خارجی ۹ mm، ضخامت ۱ mm و طول ۲۰۰ mm ساخته شده است. گام مارپیچ و قطر سطح رویه مارپیچ، به ترتیب ۱۰ mm و ۳۰ mm است (شکل ۳). شکل (۲) نیز نمایی از دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.

سیستم فرآوری مواد غذایی مایع با استفاده از امواج مایکروویو از اجزای مختلفی تشکیل شده که شامل: منبع انرژی، مگنترون (تولیدکننده امواج مایکروویو) با فرکانس ۲۴۵۰ MHz، محفظه تیمار، مخازن خوراک و محصول، سنسورهای دمایی (NTC) با پوشش استیل، پمپ دوزینگ پرستالتیک (Grothen, DC 12V)، مخزن هولدینگ (Memert) و سیستم چیلر (Brookfield TC-502) است. بدنه محفظه تیمار، از جنس گالوانیزه با پوشش رنگ الکترواستاتیک نسوز بوده و به همراه قسمت کنترلر مربوطه بر روی شاسی، از جنس MDF سوار شد. پس از تهیه محفظه تیمار (قالب دستگاه مایکروویو خانگی) محل‌هایی برای ورود و خروج سیال؛ همچنین تعبیه سنسورها در سامانه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، لوله مارپیچ‌وار (جنس پیرکس شفاف)^۱ طراحی و ساخته شد و درون محفظه تعبیه شد. مگنترون و ترانس ولتاژ بالا^۲ و کلیه متعلقات به همراه برد طراحی شده به سامانه اضافه شد.



شکل (۲) سامانه فرآوری مایعات به صورت پیوسته با تکنولوژی مایکروویو
Fig3. Continuously flow processing system with microwave technology

1. Pyrex
2. High Voltage

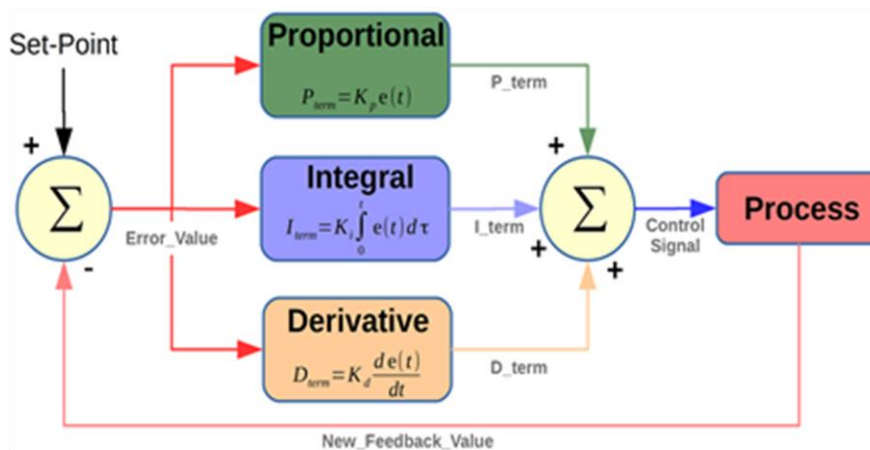


شکل (۳) ابعاد راکتور (لوله مارپیچ‌وار) مورد استفاده در سامانه طراحی شده
 Fig2. Dimensions of the reactor (helical tube) used in the designed apparatus

۳.۲. قسمت الکترونیکی

ارتباطی USB host را که برای ارتباط دستگاه با رایانه انتخاب شده بود، پشتیبانی می‌کند. کنترل‌کننده PID مقدار «خطا» بین خروجی فرآیند و مقدار ورودی مطلوب را محاسبه می‌کند (شکل ۴). هدف کنترل‌کننده، به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرآیند است. به‌طور کلی، قسمت الکترونیکی، کار تنظیم دما، توان و دبی دلخواه را بر اساس الگوریتم PID و با توجه به شرایط آزمایش بر عهده دارد. برای تأمین برق مگنرون، از منبع برق شهری ۲۲۰ ولت استفاده شد. همچنین برای تأمین برق برد کنترل پمپ‌ها و برد کنترل مایکروویو، به ترتیب از آداپتورهای ۱۲ و ۹ ولت استفاده شد.

قسمت الکترونیکی، شامل یک میکروکنترلر Mega ADK دارای پردازنده مرکزی ATmega2560 و پروتکل ارتباطی USB host می‌باشد. برد آردوینو Mega ADK دارای ولتاژ ورودی ۷ تا ۹ ولت بوده و از ۱۶ پین آنالوگ و ۵۴ پین دیجیتال بهره می‌برد که از این تعداد، ۱۴ خروجی PWM است. برنامه لازم برای میکروکنترلر در محیط نرم‌افزار Arduino ورژن 1.8.1 نوشته شد. برنامه نوشته‌شده از تلفیق و استفاده هم‌زمان از تکنیک‌های تناسب، مشتق‌گیری و انتگرال (به‌اختصار PID)^۱ برای کنترل سامانه طراحی شده استفاده می‌کند. میکروکنترلر ATmega 2560 پروتکل



شکل (۴) طریقه عملکرد یک کنترل‌کننده PID

Fig 4. Function of a PID controller

۴.۲. ارزیابی کارکرد دستگاه

به منظور ارزیابی کارکرد دستگاه از آب شهری و آب نارنج (با خصوصیات ذکر شده) در جدول (۱) استفاده شد.

جدول (۱) خواص فیزیکیوشیمیایی آب نارنج تازه

Table 1. Physicochemical properties of raw juice

مقدار Value	پارامتر Parameter
2.97	pH
	دانسیتته (kg/cm ³)
1043	Density (kg/cm ³)
	محتوای رطوبت (%)
88.06	Moisture Content (%)
	بریکس
10.8	Brix
	اسیدیته (%)
5.27	Acidity (%)
	پالپ (%)
2.3	Pulp (%)
	خاکستر (%)
0.36	Ash (%)

اثر انتخاب دمای خروجی (۶۰°C، ۷۰°C، ۸۰°C و ۹۰°C) در توان‌های مختلف مایکروویو (۵۰۰ W، ۷۰۰ W و ۹۰۰ W) بر منحنی‌های دما - زمان و غیرفعال‌سازی آنزیم PME مورد بررسی قرار گرفت.

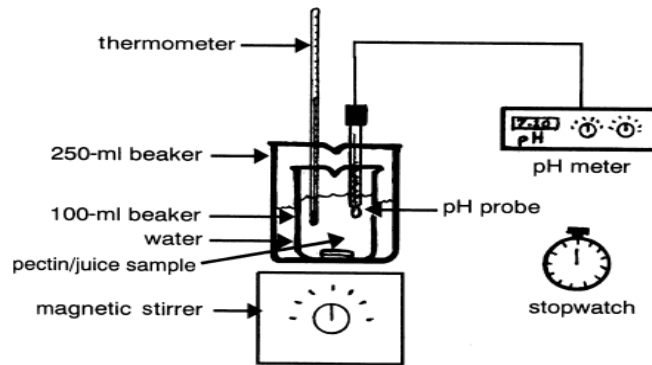
تغییرات دمایی در نقاط مختلف سامانه (به ترتیب $\frac{1}{4}$ و $\frac{5}{6}$ طول مسیر و انتهای مسیر) با دقت ۰/۰۱°C و در زمان صدم ثانیه ثبت شد. سنسورها و تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری دما در سامانه مایکروویو (به صورت batch و مداوم) از جمله: انواع ترموکوپل (بیرون مایکروویو)، سنسورهای فیبر نوری (داخل مایکروویو)، مارکرهای

شیمیایی، عکس‌برداری رزونانس مغناطیسی و یا رادیومتری توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۸]. در هر دو روش batch و مداوم، اطلاع از توزیع پروفایل دمایی، برای بهینه‌سازی فرآیند حرارتی مایکروویو ضروری است. در این پژوهش، انواع ترموکوپل و سنسور مورد آزمون قرار گرفت. در انتها سنسور NTC، به علت مقاوم بودن به شوک حرارتی، قیمت مناسب و دقت بالای اندازه‌گیری، انتخاب شد. نمونه‌برداری در نقاط مختلف (خروجی سامانه مایکروویو و خروجی مرحله هولدینگ) انجام شد. پس از عبور سیال از سامانه کولینگ تا دمای ۱۰°C خنک شد و تا زمان انجام آزمایش‌ها، به فریزر ۲۰°C- منتقل شد [۹]. لازم به ذکر است، قبل و بعد از هر تیمار، یک مرحله CIP (سیرکولاسیون آب داغ با دمای ۶۵°C) برای کل سامانه در نظر گرفته شد.

۵.۲. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم PME

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم PME از روش کیمبال [۱۰] با اندکی اصلاح استفاده شد؛ بدین ترتیب که ابتدا ۱ ml آب نارنج به همراه ۲۰ ml محلول نمکی پکتین (۱ gr) پکتین متوکسیل بالا + ۱/۵ gr نمک در ۱۰۰ cc آب مقطر) به بشر ۵۰ ml منتقل شد. بشر حاوی نمونه داخل یک بشر ۲۵۰ ml، حاوی آب قرار گرفت. سپس بشر ۲۵۰ ml رویت پللیت مغناطیسی قرار داده شد. دمای محلول حاوی نمونه روی ۳۰°C تنظیم و در طول آزمون به صورت ثابت حفظ شد (شکل ۵). سپس با سود (۲ و ۰/۱ نرمال)، pH محلول به محدوده ۷/۶ تا ۷/۸ رسانده شد. پس از رسانیدن pH به میزان مورد نظر، با استفاده از سمپلر، ۵۰ μL سود ۰/۰۵ نرمال به نمونه اضافه گشت. این میزان سود، موجب افزایش سریع pH نمونه شد. زمان برگشت pH به میزان قبل از افزودن ۵۰ μL سود ۰/۰۵ نرمال ثبت و با استفاده از رابطه (۱)، میزان فعالیت PME محاسبه شد [۱۱]:

$$PME \text{ activity } (PEU.ml^{-1}) = \frac{(0.05N [NaOH]) \times (50\mu L [NaOH])}{(5ml [sample]) \times (...minutes)} \quad (1)$$



شکل (۵) نحوه قرارگیری تجهیزات به منظور اندازه گیری فعالیت آنزیم پکتین متیل استراز

Fig 5. Equipment setup to measure pectin methyl esterase activity

۶.۲. محاسبه انرژی مصرفی

در رابطه بالا v ، سرعت جریان حجمی و ρ دانسیته سیال است. دانسیته آب (1000 kg/m^3) بوده است؛ دانسیته آب نارنج که با استفاده از پیکنومتر دماسنج دار اندازه گیری شد، برابر (1043 kg/m^3) محاسبه شد. گرمای ویژه آب ($4182 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) بوده و گرمای ویژه آب نارنج با استفاده از مدل دیکرسون برای آب میوها محاسبه شد [۱۳].

$$C_p (\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1675 + (0.025 \times M) \quad (5)$$

در فرمول بالا، M محتوای رطوبت ($\text{g}/100 \text{ g}$) است. برای آب نارنج، $0.88/0.6$ بوده است؛ لذا C_p برای آب نارنج ($3850 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) محاسبه شد. توان محاسبه شده با توان اسمی دستگاه مورد مقایسه قرار گرفت و به صورت درصد گزارش شد.

۸.۲. اندازه گیری نرخ گرمایش^۱

پس از رسم منحنی دما - زمان برای هر تیمار، نرخ گرمایش از شیب نمودار تغییرات دما در برابر زمان به دست آمد.

$$HR = (T_o - T_i) / \Delta t \quad (6)$$

در رابطه بالا T_o ، T_i و Δt ، به ترتیب نشان دهنده دمای خروجی، دمای ورودی و مدت زمان ماندن سیال در مارپیچ^۲ را نشان می دهد.

پس از پایان هر آزمایش، مدت زمان روشن بودن سامانه فرآوری پیوسته مایکروویو به همراه کلیه متعلقات، یادداشت شده و با مشخص نمودن توان مصرفی به وسیله دستگاه آنالیز توان (Lutron, DW-6090) انرژی مصرفی هر آزمایش طبق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$W = P \times t \quad (2)$$

که در آن، W ، P و t به ترتیب نشان دهنده انرژی مصرفی برحسب $\text{watt} \cdot \text{h}$ ، توان مصرفی برحسب watt و مدت زمان روشن بودن سامانه برحسب h است.

۷.۲. محاسبه توان جذب شده توسط سیال

این پارامتر، با استفاده از دمای سیال ورودی و خروجی از مایکروویو و خصوصیات فیزیکی سیال در دمای اتاق و از معادله کالریمتریک (رابطه ۳) محاسبه شد.

$$p_{abs} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad (3)$$

که در آن \dot{m} ، c_p و ΔT به ترتیب نشان دهنده توان جذب شده (watt/s)، سرعت جریان جرمی (kg/s)، گرمای ویژه ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) و اختلاف دما ($^\circ\text{C}$) است [۱۲].

\dot{m} در رابطه بالا با استفاده از رابطه (۴) به دست می آید.

$$\dot{m} = \rho \times v \quad (4)$$

1. Heating Rate
2. residence time in microwave

۹.۲. روش اجرای آزمایش و آنالیز آماری داده‌ها

طراحی و تحلیل آزمایش‌ها با کمک نرم‌افزار Design Expert V 11.1.2.0 و در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. همچنین تجزیه واریانس (ANOVA) بر روی ضرایب مدل درجه دوم با این نرم‌افزار صورت گرفت. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. توزیع دمایی در سامانه

شناخت نحوه توزیع پروفایل سه بعدی دمایی، به منظور

بهینه‌سازی روند حرارت دهی توسط میکروویو امری بسیار مهم است. در ابتدا با تغییر دبی سیال (آب شهری و آب نارنج به صورت جداگانه) در توان‌های مختلف، دمای خروجی از میکروویو اندازه‌گیری و پس از رسیدن به حالت پایدار، ثبت شد. این مرحله، حدود ۳-۵ دقیقه به طول انجامید و ۳ بار تکرار شد. دماهای تعادلی ثبت شده، پس از خروج سیال در میکروویو در جدول (۲) نشان داده شده است. تفاوت‌های مشاهده شده بین دو سیال را می‌توان به تفاوت در ظرفیت گرمایی ویژه (تفاوت در محتوای رطوبت) نسبت داد.

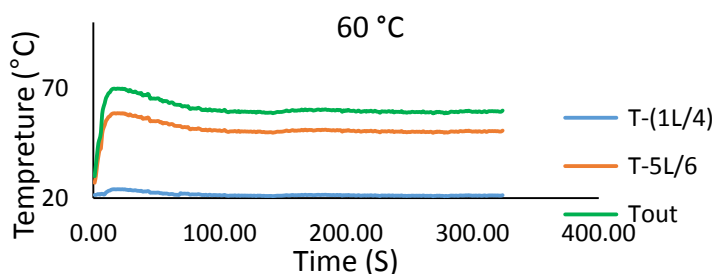
جدول (۲) اثر دبی بر دمای خروجی سیال از سامانه میکروویو پیوسته در توان ۹۰۰ W

Table 2. Effect of flow rate on output temperature of fluid from continuous microwave system at 900 W

دمای تعادلی خروجی از سامانه (°C)		سرعت جریان Flow rate (ml/min)
آب نارنج sour orange juice	آب شهری Tap water	
60	59	129.50
70	68	85.25
80	77	73.15
90	88	38.25

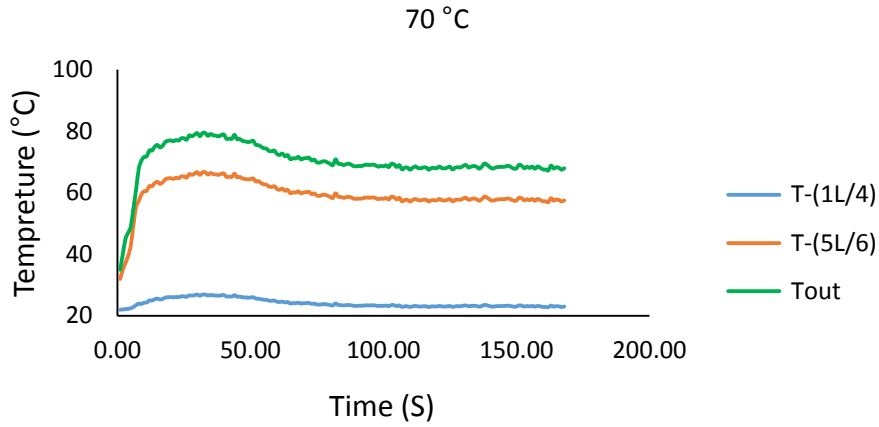
هندسه سیستم قرار می‌گیرد [۱۴]. پروفایل دمایی مشاهده شده برای دمای خروجی در طی حرارت‌دهی آب و آب نارنج مشابه بود؛ لذا فقط نمودارهای مربوط به آب نارنج نشان داده می‌شود. منحنی تغییرات دما در برابر زمان، برای دماهای انتخابی در توان ۹۰۰ W در شکل‌های (۶ تا ۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده، برنامه PID مورد نظر به خوبی قادر به کنترل هوشمند سامانه، برای فرآوری محصول در دمای انتخابی مورد نظر، دارد.

با استفاده از داده‌های ثبت شده، روابط مربوطه درون نرم‌افزار Arduino استخراج شد. برنامه دوباره کد نویسی و شروط مربوطه در نرم‌افزار تدوین شد. در مرحله بعد، با تعیین دمای خروجی در توان مد نظر، سامانه به صورت اتوماتیک، با تغییر دبی، به خروجی دمای مد نظر می‌رسید. توزیع دما تحت تأثیر: (۱) خصوصیات ماده غذایی، (۲) پارامترهای حرارتی و دی‌الکتریکی و (۳) ویژگی‌های سیستم حرارت‌دهی با میکروویو مانند فرکانس اعمال شده و توان و

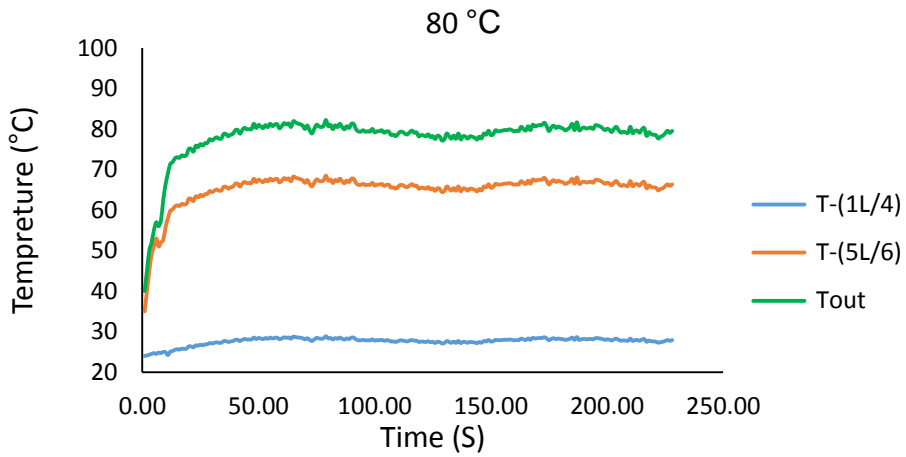


شکل (۶) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دمای خروجی انتخابی ۶۰°C در توان ۹۰۰ W (نمونه آب نارنج)

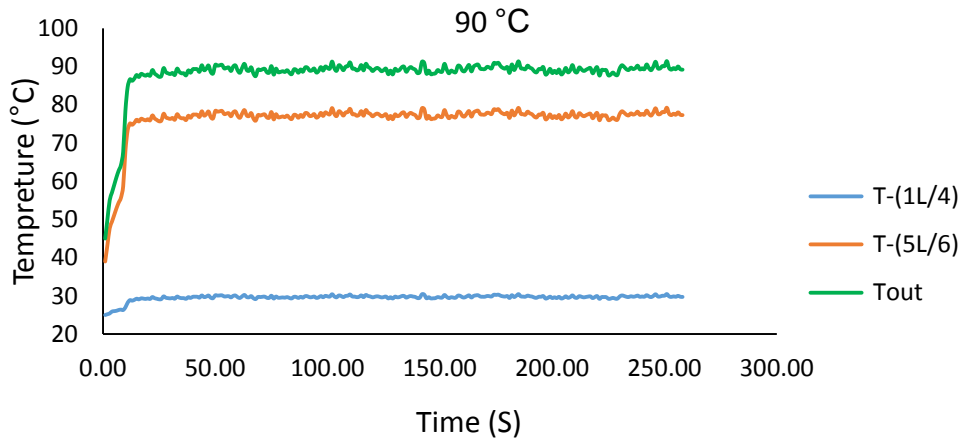
Fig6. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperature (60 °C) at 900 W (sour orange sample)



شکل (۷) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دمای خروجی انتخابی در ۷۰°C در توان ۹۰۰ W (نمونه آب نارنج)
Fig7. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperature (70 °C) at 900 W (sour orange sample)



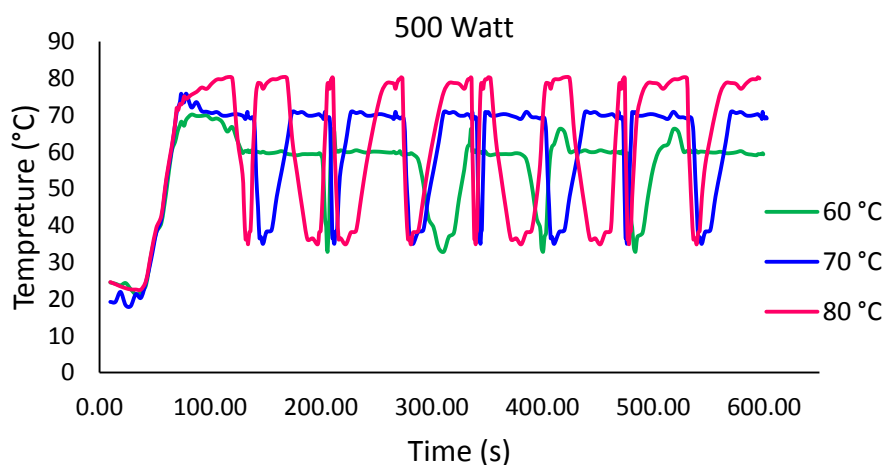
شکل (۸) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دمای خروجی انتخابی در ۸۰°C در توان ۹۰۰ W (نمونه آب نارنج)
Fig8. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperature (80 °C) at 900 W (sour orange sample)



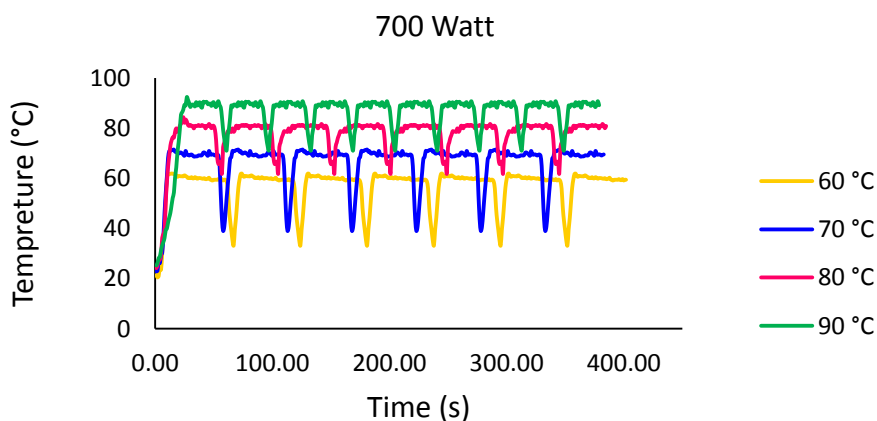
شکل (۹) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دمای خروجی انتخابی در ۹۰°C در توان ۹۰۰ W (نمونه آب نارنج)
Fig9. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperature (90 °C) at 900 W (sour orange sample)

سایر توان‌ها (۷۰۰ W و ۵۰۰ W) به دلیل تثبیت دما به صورت برهه‌ای فقط در یک نمودار (شکل ۱۰-۱۱) نشان داده شده است. به عبارتی، وقتی توان‌های ۷۰۰ W و ۵۰۰ W اعمال می‌شود، برنامه PID بدین صورت عمل می‌کند: با انتخاب توان ۵۰۰ W، مگنترون مایکروویو $\frac{5}{9}$ زمان، روشن و $\frac{4}{9}$ زمان، خاموش بود. همچنین با انتخاب توان ۷۰۰ W، مگنترون مایکروویو $\frac{7}{9}$ زمان، روشن و $\frac{2}{9}$ زمان، خاموش بود؛ به همین دلیل، نمودارهای دما به صورت سینوسی بود. اعمال توان ۷۰۰ W به دلیل روشن بودن بیشتر مگنترون، دمای پایتتری را نسبت به توان ۵۰۰ W نشان داد.

پروفایل‌های دما - زمان استحصالی برای هر دو نمونه آب و آب نارنج پس از عبور از محفظه تیمار با مایکروویو با سرعت جریان‌های مختلف، یک فاز تأخیری معمولی را قبل از دستیابی به حالت پایدار نشان داد. عدم خطی بودن در داده‌های دما - زمان در مرحله اولیه حرارت دهی (شکل‌های ۶ - ۹) را می‌توان به جذب گرما به وسیله ماریپیچ و محیط درون محفظه تیمار به آسانی نسبت داد [۱۵]. نتایج نشان داد که استفاده از حداکثر توان مایکروویو به دلیل روشن بودن دائمی مگنترون، باعث می‌شود که دمای خروجی سریع‌تر به حالت پایدار رسیده و در همان دما به صورت خط ثابت می‌ماند. پروفایل‌های دمایی (دمای خروجی) مربوط به



شکل (۱۰) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دماهای خروجی انتخابی مختلف در توان ۵۰۰ W (نمونه آب نارنج)
Fig10. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperatures at 500 W (sour orange sample)



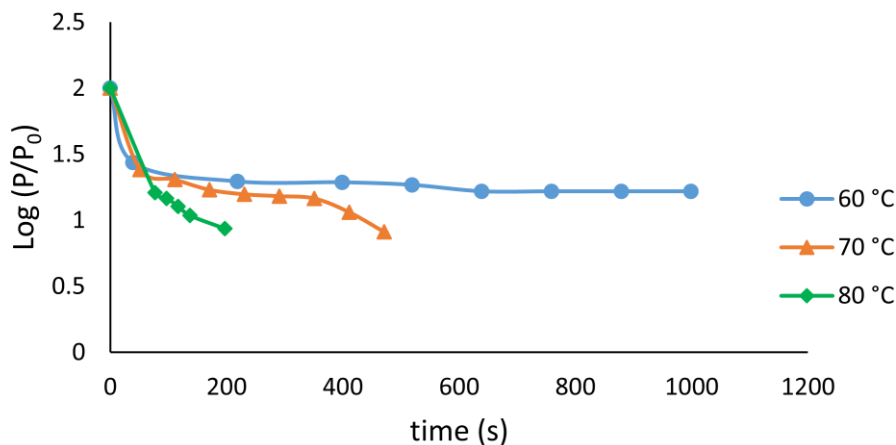
شکل (۱۱) نمودار عملکرد کنترلر PID برای دماهای خروجی انتخابی مختلف در توان ۷۰۰ W (نمونه آب نارنج)
Fig11. Performance diagram of the PID controller for the selected output temperatures at 700 W (sour orange sample)

در دماهای 60°C ، 70°C و 80°C به ترتیب $7/75$ ، $6/72$ و $4/83$ ٪ آنزیم PME در مرحله CUT تخریب شد. این تغییرات را می‌توان به پدیده الکتروپوریشن غشای پروتئین‌ها (PME) توسط امواج مایکروویو نسبت داد. در تحقیقات انجام گرفته در زمینه نابود سازی حرارتی آنزیم پکتین‌متیل‌استراز آب مرکبات، ایزو فرم‌های مختلفی از این آنزیم با مقاومت‌های حرارتی متفاوت شناسایی شده است [۳]، [۱۹]. در این پژوهش در دماهای 60°C و 70°C سه ایزو فرم و در دمای 80°C یک ایزو فرم از این آنزیم، با مقاومت‌های حرارتی متفاوت شناسایی شد. روند کاهش فعالیت آنزیم برای دماهای 70°C و 80°C در مرحله هولدینگ ادامه یافت. در دمای 60°C بعد از ۱۰ دقیقه هولدینگ، مقدار فعالیت PME در عدد $5/16$ ٪ تثبیت شد و بعد از آن کاهش مشاهده نشد.

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۱۱، هر چه انتخاب دما در توان‌های بالاتر اعمال شد، نمودار توزیع دما سریع‌تر به حالت پایا رسید و به همان صورت باقی ماند. این مقوله، هم‌راستا با مطالعات بنتو و همکاران (۲۰۰۶) [۱۶] در مورد ماسکوئیت^۱ و کورونل و همکاران (۲۰۰۳) [۱۷] در مورد شیر با درصد چربی متغیر و سابلوو و همکاران (۲۰۰۸) [۱۸] در مورد نوشیدنی بر پایه بادام‌زمینی بود.

۲.۳. سینتیک تغییرات آنزیم PME

شکل (۱۲) تغییرات فعالیت آنزیم PME در حداکثر توان مایکروویو (۹۰۰ W)، طی عبور از سامانه مایکروویو و همچنین سامانه هولدینگ را نشان می‌دهد. شیب تند اولیه در نمودار، مربوط به مرحله CUT (داخل محفظه مایکروویو) است که بیشترین تأثیر را در کاهش فعالیت آنزیمی دارد.



شکل (۱۲) تغییرات فعالیت آنزیم PME در سامانه طراحی شده

Fig12. Changes in PME enzyme activity in the designed apparatus

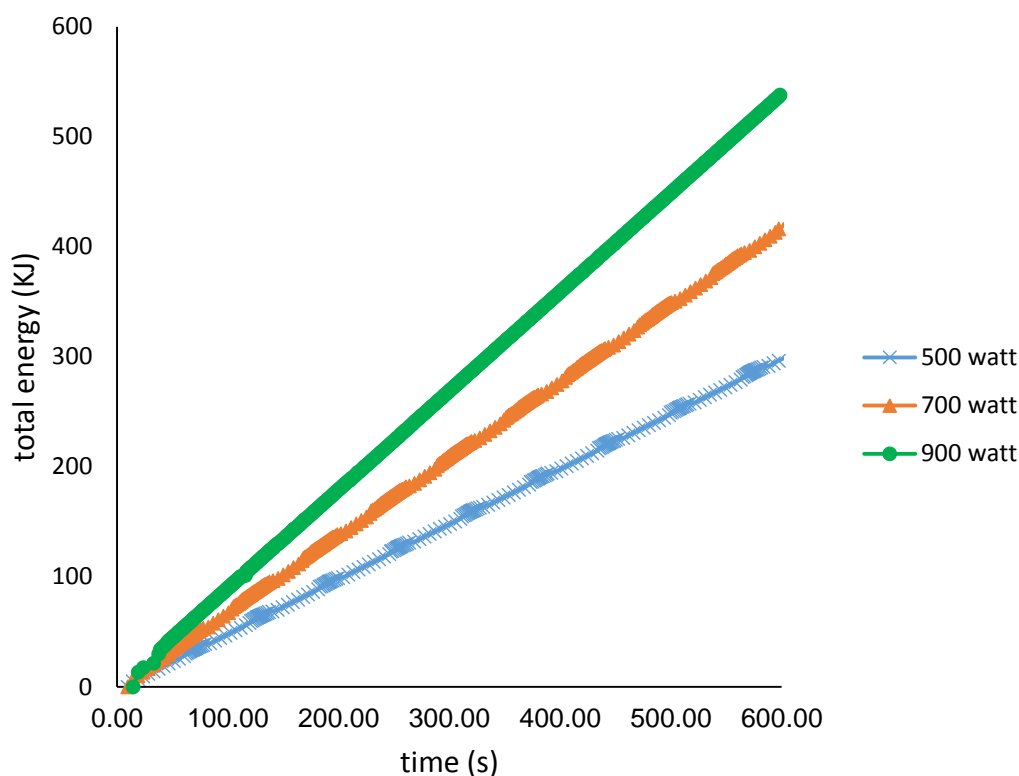
۳.۳. انرژی مصرفی

رسیدن به دمای نهایی (CUT)^۲ در توان‌های بالاتر کاهش می‌یابد؛ به عبارتی با افزایش توان مایکروویو، زمان رسیدن به دمای نهایی محصول کاهش یافته و در نتیجه انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد.

مقدار انرژی مصرفی کل (انرژی تجمعی) برحسب کیلوژول برای توان‌های مختلف انتخابی در مدت زمان ۱۰ دقیقه در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با افزایش توان مایکروویو، انرژی تجمعی به صورت خطی افزایش یافته، اما زمان

2. Come Up Time

1. masseuite

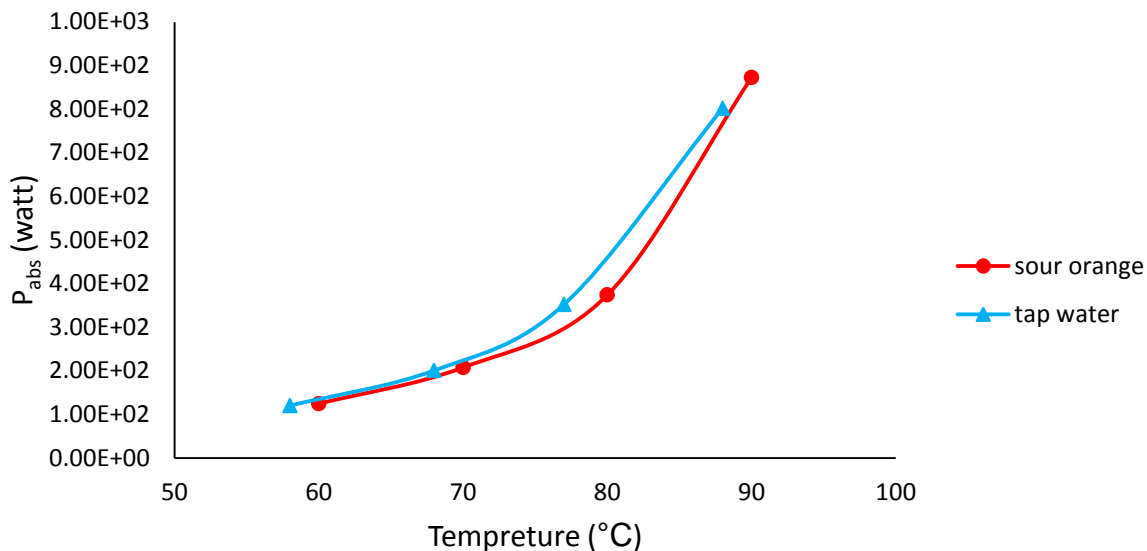


شکل (۱۳) تغییرات انرژی مصرفی در توان‌های مختلف در مدت‌زمان ۱۰ دقیقه
Fig13. Changes in energy consumption at different power level over a period of 10 minutes

ترتیب ۰.۹۸٪، ۰.۶۷٪ و ۰.۶۵٪ از توان اعمال‌شده را جذب کرد. جذب کمتر در CMC به زمان استراحت طولانی‌تر ویسکوزیته نسبت داده شد. بهترین توزیع دمای یکنواخت مربوط به آب نمک با سرعت جریان‌های مختلف بود. نرخ گرمایش با افزایش دمای انتخابی از ۶۰ °C به ۹۰ °C با شیب ملایم کاهش یافت. نرخ گرمایش آب نارنج در همه دماهای انتخابی اندکی بالاتر از آب شهری بود که می‌توان به ترکیبات موجود در آب میوه نسبت داد. این پارامتر در بازه (°C /s) ۰.۷۱ تا ۱/۳۹ (°C /s) برای آب نارنج و در محدوده (°C /s) ۰.۶۲ تا ۱/۳۲ (°C /s) برای آب شهری بود. به طور کلی نرخ گرمایش بالا در میکروویو، نسبت به روش متداول باعث کاهش اثر منفی اور پروسیسینگ^۱ مرتبط در مرحله افزایش دمای محصول (CUT) می‌شود [۲۰].

۴.۳. توان جذب شده و نرخ گرمایش

این پارامترها برای دماهای مختلف انتخابی در توان ۹۰۰ W محاسبه شد. همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، با افزایش دما از ۶۰ °C به ۹۰ °C، در توان ثابت W ۹۰۰، توان جذب شده افزایش یافت. تفاوت اندکی در مقادیر توان جذب‌شده بین نمونه آب نارنج و آب شهر مشاهده شد که ناشی از متفاوت بودن خصوصیات ترموفیزیکی بین دو سیال است. در دمای ۹۰ °C، آب شهری و آب نارنج به ترتیب ۰.۸۹/۱٪ و ۰.۹۶/۹٪ از توان اعمال‌شده را جذب کرد [۸]. در مطالعه نحوه توزیع دما در سیالات مختلف، به این نتیجه رسیدند که توان جذب شده توسط سیالات نیز متفاوت بود. آب نمک (دارای ثابت افت دی‌الکتریک بالا)، آب شیر (افت دی‌الکتریک پایین‌تر) و CMC (افت دی‌الکتریک میانی) به



شکل (۱۴) نمودار تغییرات توان جذب در برابر دما در توان انتخابی ۹۰۰ W

Fig14. Diagram of changes in absorbed power versus temperature at selected power (900 W)

دلیل اینکه مگنترون دائماً روشن است، باعث می‌شود که دمای خروجی سریع‌تر به حالت پایدار برسد و در همان دما، به صورت خط ثابت می‌ماند. تفاوت اندکی در مقادیر توان جذب شده بین نمونه آب نارنج و آب شهر مشاهده شد که ناشی از متفاوت بودن خصوصیات ترموفیزیکی بین دو سیال است. همچنین نرخ گرمایش با افزایش دمای انتخابی از ۶۰°C به ۹۰°C، با شیب ملایم کاهش یافت. پروفایل‌های دما - زمان، یک فاز تأخیری معمولی، به دلیل جذب گرما از طریق ماریپیچ و محیط درون محفظه تیمار قبل از دستیابی به حالت پایدار را نشان داد. بعد از آن، توزیع دما به صورت یکنواخت بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سیستم فرآوری مایعات با استفاده از تکنولوژی مایکروویو، متشکل از پمپ پرستالتیک، مگنترون، محفظه تیمار، راکتور ماریپیچ پیرکس، مجموعه سنسورهای NTC، کنترلر PID طراحی و ساخته شد. تغییرات PME پس از خروج از مایکروویو، مورد بررسی قرار گرفت. اثر انتخاب دمای خروجی در توان‌های متغیر بر منحنی‌های دما - زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تأثیر دمای نهایی آب نارنج خروجی از مایکروویو، بر تغییرات PME قابل توجه بود. پروفایل دمایی ثبت شده سنسورهای دمایی در نقاط مختلف سامانه، در طول حرارت‌دهی آب و آب نارنج مشابه بود. نتایج نشان داد که استفاده از حداکثر توان مایکروویو، به

منابع

- [1] Jafari, S. M., & Kashaninejad, M. (2010). *Physical properties of food (1th ed.)*. Gorgan, I.R. Iran: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources & Makhtumgholi faraghi Publisher. [In Persian]
- [2] Falguera, V., & Ibarz, A. (2014). *Juice processing: quality, safety and value-added opportunities*. CRC Press.
- [3] Tajchakavit, S., & Ramaswamy, H. (1997). Thermal vs. Microwave inactivation kinetics of pectin methylesterase in orange juice under batch mode heating conditions. *LWT-Food Sci Technol*, 30(1), 85-93.
- [4] Demirdoven, A., & Baysal, T. (2016). Inactivation effect of microwave heating on pectin methylesterase in orange juice. *Ukr. Food J.*, 5(2), 248-261.
- [5] Stratakos, A. C., Delgado-Pando, G., Linton, M., Patterson, M. F & Koidis, A. (2016). Industrial scale microwave processing of tomato juice using a

- novel continuous microwave system. *Food Chem.*, 190, 622-628.
- [6] Ramaswamy, H. S., & Lin, M. (2011). Influence of system variables on the heating characteristics of water during continuous flow microwave heating. *Int. J. Microw. Sci. Technol.*
- [7] Knoerzer, K., Regier, M., & Schubert, H. (2017). Measuring temperature distributions during microwave processing. In: M Regier, K Knoerzer, H Schubert (Eds.). *The microwave processing of foods* (pp. 327-349). Woodhead Publishing.
- [8] Salvi, D., Ortego, J., Arauz, C., Sabliov, C., & Boldor, D. (2009). Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating. *J. Food Eng.*, 93(2), 149-157.
- [9] Siguemoto, É. S., Pereira, L. J., & Gut, J. A. W. (2018). Inactivation kinetics of pectin methylesterase, polyphenol oxidase, and peroxidase in cloudy apple juice under microwave and conventional heating to evaluate non-thermal microwave effects. *Food Bioprocess Tech.*, 11(7), 1359-1369.
- [10] Kimball, D. A. (1999). *Citrus processing: a complete guide*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [11] Seyedabadi, M., Aghajanzadeh Suraki, S., Kashaninejad, M., & Ziiaifan, A. M. (2017). Investigation of the effect of microwave on some physicochemical properties of sour orange juice. *Food Sci. Technol.*, 14(1), 17-29. [In Persian]
- [12] Tajchakavit, S., & Ramaswamy, H. (1995). Continuous-flow microwave heating of orange juice: evidence of nonthermal effects. *J Microwave Power EE*, 30(3), 141-148.
- [13] Heldman, D. R. (2012). *Food process engineering*. Springer Science & Business Media.
- [14] Matthew Gerbo, N., Boldor, D., & Mirela Sabliov, C. (2007). Design of a measurement system for temperature distribution in continuous-flow microwave heating of pumpable fluids using infrared imaging and fiber optic technology. *J Microwave Power EE*, 42(1), 55-65.
- [15] Kudra, T., Van, d. V., FR, Raghavan, G., & Ramaswamy ,H. (1991). Heating characteristics of milk constituents in a microwave pasteurization system. *J. Food Sci.*, 56(4), 931-934.
- [16] Bento, L., Rein, P., Sabliov, C., Boldor, D., & Coronel, P. (2006). C Masecuete re-heating using microwaves. *J. Am. Soc. Sugar Cane Technol.*, 26, 1-13.
- [17] Coronel, P., Simunovic, J., & Sandeep, K. (2003). Temperature profiles within milk after heating in a continuous- flow tubular microwave system operating at 915 MHz. *J. Food Sci.*, 68(6), 1976-1981.
- [18] Sabliov, C. M., Boldor, D., Coronel, P., & Sanders, T. H. (2008). Continuous microwave processing of peanut beverages. *J Food Process Pres.*, 32(6), 935-945.
- [19] Tribess, T. B., & Tadini, C. C. (2006). Inactivation kinetics of pectin methylesterase in orange juice as a function of pH and temperature/time process conditions. *J. Sci. Food Agric.*, 86(9), 1328-1335.
- [20] Tang, J. (2015). Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality. *J. Food Sci.*, 80(8), E1776-E1793.

*Research Article***Design, fabrication and evaluation of continuous fluids processing system using microwave technology**

Mahammad Mahdi Seyedabadi¹, Mahdi Kashaninejad^{*2}, Seid Mahdi Jafari³, Esmael Seyedabadi⁴, Mehdi Khojastehpour⁵

1. PhD. Student, Department of Food Materials and Process Design Engineering, Faculty of Food Science & Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,
2. Professor, Department of Food Materials and Process Design Engineering, Faculty of Food Science & Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,
3. Professor, Department of Food Materials and Process Design Engineering, Faculty of Food Science & Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,
4. Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran,
5. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In recent years, a different method has been studied for processing of juices concurrent with increasing consumer orientation towards foods that have the characteristics close to fresh food and longer shelf life. One of the new methods of heating that causes heat with a different mechanism versus conventional heat treatment is the use of microwaves. In order to implementation of this research; the continuously fluid processing system using microwave was designed and constructed. The PID program was developed to control and monitoring of process. The effect of different output temperatures (60 °C, 70 °C, 80 °C and 90 °C) select at different power (500 W, 700 W and 900 W) on temperature-time diagrams was investigated. The effects of different temperatures on the engineering properties as well as the changes in PME were evaluated. The results showed that the temperature profiles recorded by NTC sensors at different points of the system were similar for water and orange juice. The use of full-power microwave due to constant turned on of the magnetron caused a more uniform temperature distribution. There was a slight difference in absorbed power (P_{abs}) values between sour orange juice and tap water, due to the different thermophysical properties between the two fluids. Temperature-time profiles showed a typical delayed phase due to heat absorption by the helical tube and the environment inside the treatment chamber before reaching steady state. The stage of com up time (CUT) had a significant effect on the inactivation of PME. The developed PID program is capable to Intelligent controlling of product processing with microwave technology.

Keywords: Processing, Juice, Design, Microwave, Temperature Distribution

* Corresponding author: kashaninejad@yahoo.com; kashani@gau.ac.ir;