



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



برگزار کننده
موسسه تخصصی توسعه منابع و انرژی

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فناوری های نوین بازیافت حرارت در صنایع غذایی

عاطفه مرادی^۱، احمد صفیری^۲، محمد علی قانع^۳

۱- اداره کل استاندارد استان هرمزگان، هرمزگان، ایران

Email: At.Moradi89@gmail.com

۲- پالایشگاه نفت بندرعباس، هرمزگان، ایران

Email: Ahmad.Safiri_67@yahoo.com

۳- اداره کل استاندارد استان هرمزگان، هرمزگان، ایران

Email: Ali.ghane@gmail.com

کدمقاله: EFAB015831233



چکیده

صنایع غذایی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهانی، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی خود را در قالب حرارت اتلافی از دست می‌دهند. این اتلاف انرژی نه تنها هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی نیز به همراه دارد. با توجه به افزایش نگرانی‌ها پیرامون بهره‌وری انرژی و پایداری محیط زیست، بازیافت حرارت اتلافی در این صنایع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. این مقاله مروری، به تحلیل عمیق و جامع سامانه‌های بازیافت حرارت در صنایع غذایی می‌پردازد. تمرکز اصلی بر مبدل‌های حرارتی نوین، از جمله مبدل‌های صفحه‌ای با هندسه‌های بهینه‌شده، مبدل‌های حرارتی فشرده، رکوپراتورها، رجنراتورها و سامانه‌های چندمرحله‌ای است. در این بررسی، عملکرد این مبدل‌ها نه تنها از منظر انتقال حرارت و افت فشار، بلکه از دیدگاه رفتار دینامیک سیالات، الگوهای جریان، و مهم‌تر از همه، راندمان ترمودینامیکی با استفاده از تحلیل انرژی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نشان داده شده است که اصلاحات در هندسه صفحات، بهبود الگوهای جریان سیال، استفاده از مواد نوین با خواص حرارتی برتر، و یکپارچه‌سازی سیستم‌های کنترلی هوشمند، همگی می‌توانند به طور قابل توجهی بهره‌وری انرژی را در فرآیندهای غذایی افزایش دهند. شواهد موجود حاکی از آن است که اجرای موفقیت‌آمیز این فناوری‌ها می‌تواند منجر به کاهش ۱۵ تا ۴۰ درصدی در مصرف انرژی واحدهای فرآوری مواد غذایی شود. در نهایت، این مقاله به بررسی چالش‌های موجود، شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده تحقیق در حوزه بازیافت حرارت در این صنعت حیاتی می‌پردازد.

کلید واژه‌ها: بازیافت حرارت اتلافی، تحلیل انرژی، بهینه‌سازی انرژی، فناوری نوین



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره‌وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



پژوهشگاه دانش‌بنیان
مهندسی توسعه

مقدمه

در عصر حاضر که بهره‌وری انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی به اولویت‌های جهانی تبدیل شده‌اند، صنایع غذایی به عنوان یکی از بخش‌های اصلی مصرف‌کننده انرژی، تحت فشارهای فزاینده‌ای برای بهینه‌سازی مصرف خود قرار دارند.

در چنین شرایطی، مفهوم «بازیافت حرارت اتلافی» به عنوان یک استراتژی کلیدی و ضروری برای دستیابی به بهره‌وری انرژی و پایداری در صنایع غذایی مطرح شده است.

مبدل‌های حرارتی، که قلب تپنده هر سامانه بازیافت حرارت محسوب می‌شوند، باید به گونه‌ای طراحی شوند که حداکثر انتقال حرارت ممکن را با حداقل افت فشار و حداقل تخریب انرژی (با استفاده از تحلیل انرژی) فراهم کنند. علاوه بر این، انتخاب مواد مناسب با مقاومت بالا در برابر خوردگی و رسوب‌گذاری (که در صنایع غذایی رایج است)، طراحی هندسه‌های پیشرفته برای افزایش سطح انتقال حرارت و آشفته‌گی جریان، و همچنین مدلسازی دقیق رفتار سیالات در این مبدل‌ها، همگی از جمله مسائل مهمی هستند که مهندسان مکانیک با آن‌ها روبرو هستند. این مقاله مروری، با هدف ارائه یک تحلیل جامع و عمیق از آخرین دستاوردها و فناوری‌های نوین در زمینه بازیافت حرارت اتلافی در صنایع غذایی، به بررسی طیف وسیعی از مبدل‌های حرارتی پیشرفته و رویکردهای تحلیلی مدرن، به‌ویژه تحلیل انرژی، می‌پردازد. هدف این است که درک روشنی از پتانسیل این فناوری‌ها، چالش‌های پیش رو و مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه ارائه گردد.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



بزرگوار گنبد
مهرماه
۱۳۸۵

مقایسه مبدل‌های حرارتی مختلف برای استفاده در بازیافت حرارت اتلافی

نوع مبدل حرارتی	مزایای اصلی	محدودیت ها	کاربردهای مناسب در صنایع غذایی	مناسب بودن برای بازیافت حرارت اتلافی	جمع بندی تحلیلی
پوسته و لوله	استحکام بالا، تحمل فشار و دمای زیاد، قابلیت اطمینان مناسب	ابعاد بزرگ، هزینه ساخت و نگهداری نسبتا بالا، راندمان حجمی متوسط	پاستوریزاسیون، گرمایش سیالات فرآیندی، بازیافت حرارت از جریان های آلوده	زیاد	مناسب برای شرایط سخت اما نه لزوما بهترین گزینه از نظر فشردگی
صفحه ای	ضریب انتقال حرارت بالا، فشردگی مناسب، سهولت افزایش سطح انتقال	حساسیت به گرفتگی، محدودیت در فشار / دمای خیلی بالا	شیر، آب میوه، محلول های شستشو، پیش گرمایش جریان های تمیز	بسیار زیاد	بهترین گزینه برای سیالات تمیز و کاربردهای غذایی رایج
فشرده پیشرفته	نسبت سطح به حجم بالا، راندمان حرارتی بهتر، اشغال فضای کم	پیچیدگی طراحی، هزینه اولیه بالاتر، نیاز به ساخت دقیق	خطوط فرآیندی با محدودیت فضا، واحدهای با نیاز به بهره وری بالا	بسیار زیاد	مناسب برای طراحی های مدرن با محدودیت فضا و نیاز به بازده بالا
رکوپراتور	بازیافت مستقیم حرارت از گازهای داغ، ساختار نسبتا ساده	افت عملکرد در صورت آلودگی سطح، محدودیت در برخی سیالات	بازیافت حرارت گازهای خروجی، پیش گرمایش هوا یا سیال ورودی	زیاد	گزینه خوب برای گازهای داغ و بازیافت غیرمستقیم
رجنراتور	توانایی بازیافت حرارت در دماهای بالا، بازده مناسب در برخی کاربردها	عملکرد ناپیوسته، پیچیدگی بیشتر در کنترل	فرآیندهای دما بالا، بازیافت انرژی در واحدهای حرارتی خاص	متوسط تا زیاد	مناسب کاربردهای خاص با دمای بالا
میکروکانالی	انتقال حرارت بسیار موثر، ابعاد کوچک، پاسخ سریع	حساسیت به گرفتگی، دشواری ساخت و تمیزکاری	کاربردهای نوآورانه، سیستم های فشرده و پیشرفته	بسیار زیاد	گزینه آینده دار، اما هنوز چالش دار از نظر ساخت و شستشو



یافته های تحقیق

- ✓ یکی از روندهای برجسته، توسعه مبدل های حرارتی با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی است. این فناوری امکان ساخت مبدل هایی با هندسه های بسیار پیچیده و بهینه را فراهم می کند که با روش های سنتی قابل تولید نیستند. این هندسه های پیچیده می توانند انتقال حرارت را به شدت بهبود بخشند و در عین حال، افت فشار را نیز کنترل کنند.
- ✓ در زمینه مقابله با یکی از بزرگ ترین چالش های صنایع غذایی، یعنی رسوب گذاری، تحقیقات گسترده ای بر روی توسعه پوشش های نانویی ضد رسوب متمرکز شده است. این پوشش ها، که بر روی سطوح داخلی مبدل ها اعمال می شوند، می توانند با کاهش انرژی چسبندگی ذرات به سطح، عمر مفید مبدل ها را افزایش داده و نیاز به تمیزکاری های مکرر را کاهش دهند. این امر به ویژه در فرآوری محصولاتمانند شیر، شربت ها و عصاره های غلیظ اهمیت دارد.
- ✓ همچنین، ادغام مواد تغییر فاز با سامانه های بازیافت حرارت، یک نوآوری امیدوارکننده دیگر است. می توانند حرارت را در دمای ثابت جذب یا آزاد کنند، که این قابلیت امکان تثبیت دمای سیالات یا ذخیره انرژی حرارتی را برای استفاده در زمان های بعدی فراهم می آورد. این رویکرد می تواند در طراحی مبدل های حرارتی هیبریدی یا سیستم های ذخیره انرژی حرارتی برای گلخانه ها و واحدهای فرآوری کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.
- ✓ استفاده گسترده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی امکان مدل سازی دقیق رفتار جریان و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده مبدل ها را فراهم کرده است. این ابزار به مهندسان اجازه می دهد تا طراحی ها را قبل از ساخت، بهینه سازی کنند و عملکرد آن ها را در شرایط عملیاتی مختلف پیش بینی نمایند.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی

۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



بحث و نتیجه گیری

این مقاله مروری، نگاهی جامع به وضعیت فعلی و آینده فناوری‌های نوین بازیافت حرارت اتلافی در صنایع غذایی، با تأکید ویژه بر نقش کلیدی مهندسی مکانیک و تحلیل‌های ترمودینامیکی پیشرفته، ارائه داد. نشان داده شد که منابع حرارت اتلافی در این صنعت فراوان هستند و با استفاده از مبدل‌های حرارتی پیشرفته، مانند مبدل‌های صفحه‌ای با هندسه‌های بهینه‌شده، مبدل‌های فشرده، و رکوپراتورهای مدرن، می‌توان بخش قابل توجهی از این انرژی هدررفته را بازیافت کرد.

تحلیل انرژی به عنوان یک ابزار قدرتمند، امکان ارزیابی دقیق کیفیت انرژی و شناسایی نقاط ضعف در سامانه‌های بازیافت حرارت را فراهم می‌آورد و راه را برای بهبودهای هدفمند هموار می‌سازد. پیشرفت‌های در حال ظهور در حوزه‌هایی نظیر چاپ سه‌بعدی، نانومواد ضد رسوب، مواد تغییر فاز، و هوشمندسازی سامانه‌های کنترلی، نویدبخش آینده‌ای هستند که در آن صنایع غذایی قادر خواهند بود با بهره‌وری انرژی بالاتر، هزینه‌های عملیاتی کمتر و اثرات زیست‌محیطی کاهنده‌تر به فعالیت خود ادامه دهند.

با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی نظیر رسوب‌گذاری، الزامات بهداشتی، پیچیدگی مدل‌سازی دینامیکی و هزینه‌های اولیه، همچنان نیازمند توجه و تحقیقات مداوم هستند. در نهایت، انتظار می‌رود که با سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه، و با اتکا به نوآوری‌های مهندسی مکانیک، شاهد تحول چشمگیری در بهره‌وری انرژی صنایع غذایی باشیم.



منابع و ماخذ

- 1) Klemeš, J., Varbanov, P. (2020). Energy conversion and management in food processing. Energy Conversion and Management, Elsevier.
- 2) IEA. World Energy Outlook, Food Sector Energy Use, 2023.
- 3) Singh, R. P. (2014). Introduction to Food Engineering. Academic Press.
- 4) Mujumdar, A. S. (2017). Handbook of Industrial Drying. CRC Press.
- 5) Wang, L., Sun, D.-W. (2018). Heat transfer in thermal food processing. In Handbook of Food Processing. John Wiley & Sons.
- 6) ASHRAE Handbook: Fundamentals, Chapter on Industrial Air Conditioning. 2021.
- 7) ASHRAE Handbook: Refrigeration Systems. 2022.
- 8) Sharma, S. K., et al. (2020). Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery in food processing industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 131, 110002.
- 9) Focke, W. W., & Newton, P. R. (1986). The influence of chevron angle on the performance of plate heat exchangers. Chemical Engineering Science, 41(10), 2577-2584.
- 10) Kandlikar, S. G. (2015). Heat transfer in microchannels. Annual Review of Heat Transfer, 18, 207-251.



منابع و مآخذ

- 11) Jiang, S., & Sun, D.-W. (2021). Advances in plate heat exchangers for food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 312-325.
- 12) Qureshi, B. H., & Zubair, S. M. (2019). Performance analysis of plate heat exchangers with different chevron angles. *Journal of Heat Transfer*, 141(8), 081801.
- 13) Kays, W. M., & London, A. L. (1998). *Compact Heat Exchangers*. Krieger Publishing Company.
- 14) Shah, R. K., & Sekulic, D. D. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons.
- 15) Birad, H. A., & Al-Dahhan, M. H. (2020). Heat recovery in industrial drying systems: A review. *Drying Technology*, 38(14-15), 1979-1995.
- 16) Zanganeh, G., et al. (2018). Regenerative heat storage systems for industrial applications. *Energy Storage Materials*, 14, 12-25.
- 17) Bejan, A. (2016). *Advanced Exergy Analysis*. John Wiley & Sons.
- 18) Rivero, R. R., et al. (2019). Exergy analysis of plate heat exchangers in food industry applications. *Energy Conversion and Management*, 180, 867-876.
- 19) Dincer, I., & Rosen, M. A. (2017). *Exergy: Properties, Analysis, and Applications*. Elsevier.



اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵



پژوهشگاه دانش‌بنیان
میان باغچه و گلزار
گولستان

تشکر و قدردانی
پایان