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

بسم الله الرحمن الرحیم

مروری بر فناوری‌های بازیافت انرژی حرارتی از پسماند روغن سویا در فرآیند تولید بیو دیزل با رویکرد کاهش مصرف انرژی و پایداری زیست محیطی

فاطمه سادات میرمحمدمکی[۱]، رامونا مسعود*[۲]

۱-مرکز تحقیقات اخلاق و حقوق پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران Email:fm.makki@gmail.com

۲- اداره کل استاندارد استان تهران، تهران، ایران Email:rm8059@yahoo.com

کدمقاله :EFAB01583140

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

چکیده

بازیافت حرارت در صنعت روغن سویا و ادغام با تولید بیودیزل
چالش: مصرف بالای انرژی و اتلاف حرارت در فرآیندهای روغن‌کشی و تصفیه
فرصت: بازیافت حرارت از پساب‌ها و بخارات داغ
راهکار فنی:
استفاده از مبدل‌های حرارتی برای پیش‌گرم‌کردن خوراک
بهره‌گیری از مواد تغییر فازدهنده (PCM) برای ذخیره حرارت
ادغام با تولید بیودیزل:
ترانس‌استریفیکاسیون کم‌انرژی
استفاده از کاتالیزورهای هتروژنی (CaO و MgO)
نتایج کلیدی:
کاهش مصرف انرژی
افزایش بازده متیل‌استر
کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
پیامد راهبردی: حرکت به‌سوی اقتصاد چرخشی و پایداری زیست‌محیطی

کلید واژه‌ها:
بیودیزل، روغن سویا، بازیافت حرارت، ترانس‌استریفیکاسیون، بهره‌وری انرژی، پایداری زیست‌محیطی

مقدمه

چالش انرژی و ضرورت بازیافت حرارت در صنعت روغن سویا

زمینه مسئله

- رشد جمعیت و افزایش تقاضای جهانی برای غذا و انرژی
- فشار فزاینده بر منابع طبیعی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای
- مصرف بالای انرژی حرارتی و الکتریکی در صنایع غذایی
- وضعیت صنعت روغن‌کشی سویا
- وابستگی شدید به بخار و فرآیندهای حرارتی

اتلاف قابل توجه انرژی در مراحل:
تصفیه
خنثی‌سازی
تقطیر حلال‌ها
دفع حرارت به‌صورت پساب و بخار داغ
ضرورت اقدام
کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی
کاهش هزینه‌های عملیاتی
بهبود شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی
فناوری‌های مطرح بازیافت حرارت
مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای
مواد تغییر فازدهنده و تحلیل پینچ
حلأ مطالعات کاربردی در صنعت روغن کشی
نسبت به صنایع سنگین

مواد و روش

نوع مطالعه: مرور نظام‌مند با رویکرد تحلیلی–تطبیقی

راهبرد جست‌وجو: استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های تخصصی مرتبط با بازیافت حرارت، صنعت روغن‌کشی سویا، تولید بیودیزل، ترانس‌استریفیکاسیون کم انرژی، کاتالیزورهای هتروژنی، PCM و تحلیل پینچ با عملگرهای Boolean

معیارهای انتخاب: مقالات داوری‌شده و دارای داده‌های فنی، انرژی، زیست‌محیطی یا اقتصادی مرتبط

فرآیند غربالگری: حذف موارد تکراری، بررسی عنوان و چکیده، ارزیابی متن کامل و انتخاب نهایی بر اساس انطباق با اهداف پژوهش

استخراج و تحلیل داده‌ها: طبقه‌بندی فناوری‌ها، مقایسه میزان صرفه‌جویی انرژی و بازده واکنش، و تحلیل تطبیقی چالش‌ها و شکاف‌های دانشی

یافته های تحقیق

- بخش قابل توجهی از اتلاف انرژی در صنعت روغن‌کشی سویا مربوط به جریان‌های پساب داغ و بخارات خروجی واحدهای تصفیه، خنثی‌سازی و تقطیر است.
- به‌کارگیری مبدل‌های حرارتی پیشرفته و طراحی شبکه‌های بهینه حرارتی می‌تواند مصرف بخار و انرژی حرارتی را به‌طور معناداری کاهش دهد.
- استفاده از سامانه‌های ذخیره حرارت با مواد تغییر فازدهنده ((PCMموجب تثبیت دمای فرآیند و افزایش بازده حرارتی می‌شود.
- ادغام حرارت بازیافتی با فرآیند تولید بیودیزل، مصرف انرژی واکنش ترانس‌استریفیکاسیون را حدود ۲۰–۳۰٪ کاهش می‌دهد.
- کاتالیزورهای هتروژنی مانند CaOو MgOامکان انجام واکنش در دماهای پایین‌تر، کاهش تولید پساب قلیایی و بهبود پایداری زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند.
- تحلیل‌های اگزرژی و اگزرواکونومیک نشان می‌دهد که بازگشت سرمایه سامانه‌های بازیافت حرارت در بازه ۲ تا ۵ سال قابل دستیابی است.
- ترکیب بازیافت حرارت و تولید بیودیزل، کاهش انتشار CO_2و بهبود شاخص شدت انرژی را در صنعت روغن‌کشی به همراه دارد.

یافته های تحقیق

نوآوری و نواندیشی مطالعه مروری:

- ارائه یک چارچوب یکپارچه برای اتصال بازیافت حرارت در صنعت روغن سویا با تولید بیودیزل در قالب اقتصاد چرخشی.
- تحلیل هم‌زمان ابعاد فنی، ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌جای بررسی جداگانه هر حوزه.
- برجسته‌سازی نقش حرارت بازیافتی به‌عنوان منبع انرژی پایدار برای واکنش‌های شیمیایی کم‌انرژی.
- تأکید بر هم‌افزایی میان کاتالیزورهای هتروژنی کم‌انرژی و شبکه‌های بازیافت حرارت برای کاهش دمای عملیاتی.
- شناسایی شکاف‌های دانشی در طراحی مبدل‌های مقاوم به آلودگی روغنی و توسعه کنترل هوشمند انرژی.
- پیشنهاد مسیر آینده پژوهش شامل ادغام با انرژی‌های تجدیدپذیر، دوقلوی دیجیتال (Digital Twin)و ارزیابی چرخه عمر (LCA).
- معرفی این رویکرد به‌عنوان الگوی انتقال صنعت روغن‌کشی سویا به سمت سیستم‌های کم‌کربن و پایدار.

بحث و نتیجه گیری

- حرکت به‌سوی مدیریت هوشمند انرژی و استفاده از مدل‌های دیجیتال می‌تواند پایداری عملکرد سیستم را در شرایط متغیر تضمین کند.
- تحلیل‌های اگزرژی نشان می‌دهد که بیشترین اتلاف در مراحل تبخیر و تقطیر حلال رخ می‌دهد؛ بنابراین تمرکز بر این بخش‌ها بیشترین بازده اصلاحی را خواهد داشت.
- با وجود مزایای فنی، چالش‌هایی نظیر رسوب‌گذاری در مبدل‌ها، نوسانات کیفیت پسماند روغنی و هزینه اولیه سرمایه‌گذاری همچنان پابرجاست.
- استفاده از کاتالیزورهای هتروژنی (CaO، MgO) علاوه بر کاهش دمای واکنش، چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از کاتالیزورهای همگن را کاهش می‌دهد.
- هم‌افزایی بین بازیافت حرارت و ترانس‌استریفیکاسیون کم‌انرژی موجب کاهش وابستگی به بخار تولیدی از سوخت‌های فسیلی می‌شود.
- کارایی مبدل‌های حرارتی و طراحی شبکه‌های بهینه (Pinch-based integration) نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش شدت انرژی کارخانه دارند.
- نتایج مرور نشان می‌دهد که اتلاف حرارت در صنعت روغن‌کشی سویا نه یک پدیده اجتناب‌ناپذیر، بلکه یک منبع انرژی ثانویه قابل بهره‌برداری است.

بحث و نتیجه گیری

در مجموع، این رویکرد می‌تواند صنعت روغن‌کشی سویا را به سمت صنایع غذایی کم‌کربن، کارآمد و پایدار هدایت کند.

آینده این حوزه در گرو طراحی سیستم‌های ترکیبی (بازیافت + تجدیدپذیر)، استفاده از مواد پیشرفته و مدیریت هوشمند انرژی خواهد بود.

برای توسعه صنعتی گسترده، انجام مطالعات اگزرواکونومیک دقیق، توسعه مواد مقاوم در برابر آلودگی و حمایت‌های سیاستی ضروری است.

ترکیب بازیافت حرارت و بیودیزل‌سازی نمونه‌ای عملی از اقتصاد چرخشی در صنایع غذایی است.

این رویکرد موجب کاهش انتشار CO_2، بهبود شاخص شدت انرژی و افزایش بهره‌وری منابع می‌شود.

ادغام حرارت بازیافتی با تولید بیودیزل، مصرف انرژی فرآیند را به‌طور متوسط ۲۰–۳۰٪ کاهش می‌دهد.

بازیافت انرژی حرارتی در صنعت روغن‌کشی سویا از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی کاملاً امکان‌پذیر و توجیه‌پذیر است.

منابع و ماخذ

1.Corigliano, O., & Algieri, A. (2024). A comprehensive investigation on energy consumptions, impacts, and challenges of the food industry. Energy Conversion and Management: X, 23, 100661. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100661
2.Michel, M., Eldridge, A. L., Hartmann, C., Klassen, P., Ingram, J., & Meijer, G. W. (2024). Benefits and challenges of food processing in the context of food systems, value chains and sustainable development goals. *Trends in Food Science & Technology*, *153*, 104703. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104703
3.Singh, R., Dogra, S., Dixit, S., Vatin, N. I., Bhardwaj, R., Sundramoorthy, A. K., Perera, H., Patole, S. P., Mishra, R. K., & Arya, S. (2024). Advancements in thermoelectric materials for efficient waste heat recovery and renewable energy generation. *Hybrid Advances*, *5*, 100176. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100176
4. Wan Osman, W. N. A., Rosli, M. H., Mazli, W. N. A., & Samsuri, S. (2024). Comparative review of biodiesel production and purification. *Carbon Capture Science & Technology*, *13*, 100264. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100264
5. Adriano Santos do Nascimento, L., Terra de Oliveira, D., Nazaré de Oliveira, A., Helena de Oliveira Pires, L., Emmerson Ferreira da Costa, C., & Narciso da Rocha Filho, G. (2019). Valorization of Wastes for Biodiesel Production: The Brazilian Case. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.81879
6. J. Tse, T., Zhou, L., Chicilo, F., Meda, V., & J.T. Reaney, M. (2024). Biodiesel Refining and Processing Strategies. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.110038
7. J. Tse, T., Zhou, L., Chicilo, F., Meda, V., & J.T. Reaney, M. (2024). Biodiesel Refining and Processing Strategies. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.110038
8. Kumar, A., Bhayana, S., Singh, P.K. *et al.* Valorization of used cooking oil: challenges, current developments, life cycle assessment and future prospects. *Discov Sustain* **6**, 119 (2025). https://doi.org/10.1007/s43621-025-00905-7
9. Khaleel, O. J., Basim Ismail, F., Khalil Ibrahim, T., & Bin Abu Hassan, S. H. (2022). Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations. *Ain Shams Engineering Journal*, *13*(3), 101640. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.009
10. Nanadegani, F. S., & Sunden, B. (2023). Review of exergy and energy analysis of fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(84), 32875-32942. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.052

11. Kharaji, S. (2022). Heat Exchanger Design and Optimization. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.10045
12. Mao, S., Liu, Y., Wu, X., Zhang, L., Chen, J., & Zhou, T. (2025). Thermal energy storage performance, application and challenge of phase change materials: A review. *Energy Storage and Saving*, *4*(3), 300-322. https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.03.001
13. Das, A., Apu, M. M. H., Akter, A., Reza, M. M. A., & Mia, R. (2025). An overview of phase change materials, their production, and applications in textiles. *Results in Engineering*, *25*, 103603. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103603
14. Naseef, H. H., & Tulaimat, R. H. (2025). Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks. *Energy Conversion and Management: X*, *26*, 100931. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100931
15. Edeh, I. (2020). Biodiesel Production as a Renewable Resource for the Potential Displacement of the Petroleum Diesel. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.93013
Abstract. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *98*, 4-217. https://doi.org/10.1002/aocs.12529
16.Baloyi, Rivalani B., Oluwatoyin J. Gbadeyan, Bruce Sithole, and Viren Chunilall. "Recent Advances in Recycling Technologies for Waste Textile Fabrics: A Review." *Textile Research Journal*, (2024). Accessed October 11, 2025. https://doi.org/10.1177/00405175231210239.
17. How, Syahmeer, Vincent D. Brousseau, Deepa Agarwal, William Kaye-Blake, Roman Buckow, and Mike Weeks. "Integrative Modelling of Fractionation, Functionality, and Environmental-economic Trade-offs to Support the Transition to Sustainable Plant Based Ingredients." *Trends in Food Science & Technology 164*, (2025): 105257. Accessed October 11, 2025. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105257.
18.Silitonga, Arridina S., T.M.I. Riayatsyah, Md A. Kalam, Alfan Sarifudin, I.M.R. Fattah, Oki Muraza, Nandy S. D. Putra, Adri R. Sebayang, Abdi H. Sebayang, and Hendra Hermawan. "Status, Developments, and Sustainability of Biowaste Feedstock: A Review of Current Progress." *Renewable and Sustainable Energy Reviews 217*, (2025): 115769. Accessed October 11, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115769.
19. Farhat, Obeida, Jalal Faraj, Farouk Hachem, Cathy Castelain, and Mahmoud Khaled. "A Recent Review on Waste Heat Recovery Methodologies and Applications: Comprehensive Review, Critical Analysis and Potential Recommendations." *Cleaner Engineering and Technology 6*, (2022): 100387. Accessed October 11, 2025. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387.
20. Fierro, José J., Cristian Hernández-Gómez, Carlos A. Marenco-Porto, César Nieto-Londoño, Ana Escudero-Atehortua, Mauricio Giraldo, Hussam Jouhara, and Luiz C. Wrobel. "Exergo-economic Comparison of Waste Heat Recovery Cycles for a Cement Industry Case Study." *Energy Conversion and Management: X 13*, (2021): 100180. Accessed October 11, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100180.

با تشکر از توجه شما