The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Application of renewable energies in the food industry for cooling and heating

Hossein Ahmadi[1] | Seyyed Reza Mirjalali[2] | Amin Yazdani[3] | Marziyeh Razeghi[4*]

1. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinahmadi.12@ut.ac.ir
2. Head of Sangar Power Distribution, Gilan Power Distribution Company, Rasht
3. Operation expert of Gilan Electricity Distribution Company, Rasht. Email: Aminyazdani33@yahoo.com
4. Corresponding Author, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: razeghi.marziyeh@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 28 January 2024
Revised 28 February 2024
Accepted 25 April 2024
Published Online 26 August 2024

Keywords:
Combination of Cooling, Heating and power (CCHP),
Heat pump,
Food industry,
Absorption chiller.

ABSTRACT

Energy consumption in the Iran's food industry is mainly through fossil fuels (natural gas, electricity). In the food industry, the most use of natural gas is related to boilers and the most use of electricity is related to the refrigeration system. Due to of this issue to save energy in this particular field, many studies have been done. One of the cases that can be used is the use of renewable energy. The purpose of this study is to review the use of this type of energy to provide all or part of the heating and cooling system and the rules relations governing the user of this kind of energy, which can be good supplements for optimal energy consumption in boilers and thermodynamic cycles. Also, to make useful usage of heat and energy wasted, the CCHP can be used and heat pumps with a renewable source to produce heat with high temperature from natural source. The results showed that if the combine of cooling, heating and power system along with solar energy can be used to operate the heat pump, despite the high initial cost, it can have a significant improvement in energy consumption and cost.

Cite this article: Ahmadi, H.; Mirjalali, S. R.; Yazdani, A. & Razeghi, M. (2024). Application of renewable energies in the food industry for cooling and heating. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (3), 303-322. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.383265.1101

© Hossein Ahmadi, Seyyed Reza Mirjalali, Amin Yazdani, Marziyeh Razeghi
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.383265.1101

1. Introduction

Given the rapid population growth in recent years, coupled with the increasing demand for food and energy consumption, extensive research is needed in the area of energy optimization throughout various processes, particularly in the food industry, as well as in energy storage. Water, food, and energy are three inseparable elements of the world, and any change in the consumption of one disrupts the balance and security of the other two. It is projected that by 2050, energy demand will rise by nearly 80 %, water consumption by 55 %, and food consumption by 60 %. Additionally, given the upward trend of pollutants produced from fossil fuel consumption, which is continually contaminating our environment, it is crucial to adopt a new approach to fuel consumption and energy efficiency improvement. One such solution is the utilization of renewable energy sources, which offer the following advantages:

1. Better access to modern energy services, particularly in rural areas
2. Reduced dependency on fossil fuels
3. Mitigation of energy security concerns
4. Diversification of food processing and increased factory revenue
5. Reduction of greenhouse gas emissions
6. Support for sustainable development goals

The main challenge in adopting these technologies lies in the high initial costs, which often deter investors from entering this field.

2. Cooling Systems

In the industry, cooling systems generally operate through three mechanisms: evaporative cooling, compression (mechanical vapor compression), and absorption cooling systems. Due to its low cost and simple operation, the evaporative system is popular in dry regions, where it is recognized for its relatively high efficiency, such as in evaporative coolers (swamp coolers).

The components of compression systems include the compressor, condenser, expansion valve, and evaporator. The working principle of compression systems is as follows: energy is input to the system via the compressor, which compresses the refrigerant through an adiabatic compression process. The refrigerant, now in the form of a hot gas due to the pressure increase, releases its heat to the environment in the condenser. After passing through the adiabatic expansion valve, the refrigerant enters the evaporator, where it absorbs heat from its surroundings at a constant temperature, cooling the air around the evaporator.

Compression refrigeration systems are divided into three categories: single-effect, flash, and cascade systems.

3. Heating Systems

Heat exchangers are among the most widely used equipment in thermal processes and can be found in most industrial units. They are classified into two categories: contact and non-contact heat exchangers. Non-contact heat exchangers typically separate the fluids into two distinct sections using a thin metallic wall. Common types of non-contact heat exchangers include plate heat exchangers, tubular heat exchangers, shell and tube heat exchangers, and scraped surface heat exchangers.

Contact heat exchangers, on the other hand, allow physical contact between the product and the heating or cooling streams. Examples of such heat exchangers are steam injection and steam infusion systems.

4. Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) Systems

The Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) system refers to all power generation systems that utilize recoverable waste heat for space heating, cooling, and domestic hot water purposes. The primary difference between these systems and conventional power generation methods is the use of waste heat, which is transferred from the main process to meet the thermal demands of a facility (such as cooling, heating, or hot water needs). One of the fundamental goals of CCHP systems is to harness waste heat and thermal losses from traditional fuel sources, typically supplementing thermal energy supplies. Other objectives include reducing primary energy consumption, costs, emissions, or a combination of these factors.

5. Heat Pumps (HP)

Heat pumps capture low-temperature renewable thermal energy from the natural environment and convert it into higher-temperature heat. The heat pump cycle can also be used for cooling purposes. Heat pumps utilize thermal energy, hot water, and geothermal energy, and they can be combined with heat generated from other renewable sources in hybrid systems【41】. These sources may be of natural origin or derive from waste energy from industrial processes. Heat pumps can be highly efficient, although their overall primary energy efficiency depends on the efficiency of the electricity generation (or other thermal energy source) used.

6. Conclusion and Recommendations

This paper focuses on various aspects of energy consumption in the heating and cooling processes of the food industry. Initially, the equipment and operational units that play a significant role in energy consumption were assessed. The refrigeration unit, including different types of chillers and fan coil units, the heat exchanger unit, including various boilers, pasteurizers, and evaporators, as well as the drying unit, which consists of solar, cabinet, and tunnel dryers, were all examined. The principles and relationships governing their performance were utilized to optimize energy consumption. Additionally, recommendations were made regarding the integration of renewable energy sources with these systems, along with the relevant formulas.

Given the substantial heat loss in food industry factories, it seems feasible to harness this wasted heat for cooling, heating, and power generation. For this purpose, a combined cooling, heating, and power (CCHP) unit was considered as a supplementary system to enhance energy efficiency, and its optimization principles were explained. A review of various sources indicates a significant potential for integrating renewable energy with combined power, heating, and cooling systems, which has not yet been fully explored. Furthermore, it appears that heat pumps could be employed to recover waste heat from food industry factories and utilize geothermal energy for cooling and heating purposes. It is suggested that combining the CCHP system and heat pumps with renewable energy sources in industrial units could lead to substantial energy savings and cost reductions for factories.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در صنایع غذایی به منظور سرمایش و گرمایش

حسین احمدی[۱] | سید رضا میرجلالی[۲] | امین یزدانی[۳] | مرضیه رازقی[۴*]

۱. کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hosseinahmadi.12@ut.ac.ir

۲. رئیس امور توزیع نیروی برق سنگر، شرکت توزیع برق گیلان، رشت.

۳. کارشناس بهره‌برداری شرکت توزیع برق گیلان، رشت. رایانامه: Aminyazdani33@yahoo.com

۴. نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Razeghi.marziyeh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

کلیدواژه:
پمپ حرارتی،
چیلر جذبی،
ترکیب سرمایش و گرمایش و توان،
صنایع غذایی.

چکیده

مصرف انرژی در صنایع غذایی کشور عمدتاً از طریق سوخت‌های فسیلی به صورت مستقیم (گاز طبیعی) و غیرمستقیم (الکتریسیته) است. در صنایع غذایی بیشترین کاربرد گاز طبیعی مربوط به دیگ‌های بخار و بیشترین کاربرد الکتریسیته مربوط به سامانهٔ برودت است. با توجه به اهمیت این موضوع در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در این حوزهٔ خاص، مطالعات زیادی انجام شده است. یکی از مواردی که هم می‌توان از آن‌ها به صورت مستقیم و هم غیرمستقیم بهره برد، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. هدف از این مطالعه، مروری بر استفاده از این نوع انرژی‌ها به منظور تأمین کل یا بخشی از سیستم گرمایشی و سرمایشی یک مجموعه صنایع غذایی و قوانین و روابط کلی حاکم بر کاربرد این دسته از انرژی‌ها در صنایع غذایی است، که می‌تواند مکمل‌های خوبی برای مصرف بهینهٔ انرژی در بویلرها و چرخه‌های ترمودینامیکی باشد. همچنین، به منظور استفادهٔ مفید از گرما و انرژی تلف‌شده در فرایندهای غذایی می‌توان از سیستم تولید هم‌زمان توان، گرما و سرما به صورت مکمل دیگ بخار و پمپ‌های حرارتی با منبع تجدیدپذیر به صورت تولید گرما با دمای بالا از منابع طبیعی استفاده کرد. نتایج نشان داد اگر بتوان از سیستم تولید هم‌زمان توان، گرما و سرما به همراه باانرژی خورشیدی به منظور به کار انداختن پمپ حرارتی بهره گرفت، با وجود هزینهٔ اولیه بالا می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در مصرف انرژی و هزینه داشته باشد.

استناد: احمدی، حسین؛ میرجلالی، سید رضا؛ یزدانی، امین و رازقی، مرضیه (۱۴۰۳). کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در صنایع غذایی به منظور سرمایش و گرمایش. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۳ (۳) ۳۰۳-۳۲۲ . DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.383265.1101

© حسین احمدی، سید رضا میرجلالی، امین یزدانی، مرضیه رازقی
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.383265.1101

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

با توجه به نرخ افزایش جمعیت در سال‌های اخیر و همچنین، افزایش تقاضای مواد غذایی و مصرف انرژی، لازم است تحقیقات زیادی در زمینهٔ بهبود مصرف انرژی طی فرایندها به‌خصوص صنعت مواد غذایی و همچنین، ذخیره‌سازی انرژی انجام شود. آب، غذا و انرژی سه عنصر جدانشدنی در جهان هستند و تغییر در مصرف هر یک، موجب به هم خوردن تعادل و امنیت این سه بخش می‌شود. پیش‌بینی‌شده است که تقاضای انرژی تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۸۰ درصد افزایش یابد، در حالی که مصرف آب ۵۵ درصد و مصرف مواد غذایی ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه مواد آلاینده حاصل از مصرف انرژی‌های فسیلی روند صعودی به خود گرفته است و هرلحظه محیط زیست ما را آلوده‌تر می‌کند، باید رویکرد جدیدی در مصرف سوخت و بهبود بازده انرژی صورت پذیرد. یکی از این راهکارها، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است که مزایای زیر را به همراه دارد:

۱. دسترسی بهتر به خدمات انرژی مدرن، به‌ویژه در مناطق روستایی
۲. کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی
۳. کاهش نگرانی‌های مربوط به امنیت انرژی
۴. تنوع فرآوری مواد غذایی و درآمد کارخانه
۵. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
۶. پشتیبانی از اهداف توسعهٔ پایدار

مشکل اصلی استفاده از این فناوری‌ها، هزینهٔ اولیه بالاست که باعث می‌شود افراد سرمایه‌گذار تمایل کمتری برای کار در این حوزه داشته باشند. خوشبختانه در سال‌های اخیر با توجه با بالا رفتن قیمت نفت خام و افزایش آلودگی محیط زیست در جهان، سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد، در برنامهٔ غذایی هوشمند انرژی خود، یک رویکرد سه‌جانبه را پیشنهاد می‌کند که شامل بهبود دسترسی به خدمات انرژی مدرن، افزایش بهره‌وری انرژی و افزایش تدریجی در استفاده از انرژی تجدیدپذیراست. راه‌حل‌های غیرمتمرکز انرژی‌های تجدیدپذیر نه‌تنها می‌تواند انرژی لازم برای معیشت و کشاورزی در مقیاس کوچک را تأمین کند، بلکه راه‌حل‌های جذب انرژی را برای کشاورزی در مقیاس بزرگ، بنگاه‌های کوچک و متوسط و صنایع فرآوری مواد غذایی مانند کارخانهٔ برنج و فرآوری میوه، فراهم می‌کند. در حال حاضر، زنجیرهٔ تأمین مواد غذایی حدود ۳۰ درصد از تقاضای انرژی جهانی و ۷۰ درصد از مصرف منابع آب را شامل می‌شود [۱ و ۲].

در فرایند تولید مواد غذایی بیشترین مصرف انرژی در قسمت بویلرها (که بیشتر به صورت گاز طبیعی است) و سیستم سرمایش (به صورت الکتریسیته) است [۳]. همچنین، مصرف الکتریسیته در سایر قسمت‌ها مانند: به کار انداختن ماشین‌آلات و تجهیزات، روشنایی، گرمایش و... مشاهده می‌شود. برای به حداقل رساندن مصرف انرژی در این بخش‌ها، شرکت‌های صنعتی باید سه مرحله را انجام دهند. مرحلهٔ اول به حداقل رساندن تقاضای انرژی با اقدامات بهره‌وری انرژی، مرحلهٔ دوم جایگزینی سوخت‌های فسیلی با تغییر فرایندها یا به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و مرحلهٔ آخر جبران گازهای گلخانه‌ای اجتناب‌ناپذیر است. برای سایت‌های صنعتی، جذاب‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر زیست‌توده، تابش خورشید (حرارتی یا فتوولتائیک)، گرمای زمین و باد هستند. سیستم تولید و توزیع بخار به طور گسترده یکی از مصرف‌کنندگان اصلی انرژی گرمایی است که به دلایل اقتصادی در حال حاضر هنوز غالباً با دیگ‌های بخار فسیلی تولید می‌شود، ولی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید بخار به روش الکتریکی می‌توان از طریق پمپ‌های حرارتی، دیگ‌های بخار برقی و یا جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر این مشکل را برطرف کرد [۴].

سیستم سرمایش مرکزی نیز یک سیستم متمرکز تأمین انرژی گرمایی به شکل آب سرد برای استفاده در خنک‌سازی و رطوبت‌زدایی است. علاوه بر این، تلفیق این سیستم با انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با سیستم‌های خنک‌کنندهٔ معمولی از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است. مناسب‌ترین فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر که می‌توانند با سیستم سرمایش مرکزی تلفیق شوند عبارت‌اند از: انرژی زیست‌توده، انرژی حرارتی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی آب‌های سطحی، انرژی فتوولتائیک خورشیدی و انرژی گرمایی اتلافی [۵].

در راستای یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم سرمایش در صنایع غذایی مطالعات زیادی در سال‌های اخیر انجام گرفته است. در سال ۲۰۲۰ یک مطالعه به منظور استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در یک رویکرد چندمعیاره که شامل بحث‌های انرژی، اگزرژی و اقتصادی برای سه دمای نگهداری مواد غذایی ۲ و ۸ و ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد انجام شد و تمام پیکربندی‌ها از لحاظ انرژی، اگزرژی و اقتصادی به صورت خارج از طراحی و به منظور طراحی شبیه‌سازی شد و مشخص شد که یک نوع سیستم فشرده‌سازی خورشیدی با عملکرد ۲/۳ تا ۵/۷ بیشترین بازده را دارد، ولی از لحاظ اقتصادی فقط برای مواد غذایی با دمای نگهداری بالا کاربرد دارد. در دمای نگهداری پایین استفاده از سیکل جذب تک اثر به همراه سوخت باگاس کمترین هزینه را در پی داشت [۶].

در سال ۲۰۱۹ عملکرد محفظه‌های خنک‌کننده با استفادهٔ دو تکنولوژی شامل استفاده از انرژی خورشیدی به همراه انرژی حرارتی در مواد تغییر فاز دهنده و با استفاده از ذخیرهٔ گرمایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه نشان داد تنها سیستم‌های خنک‌کننده و قدرت محفظهٔ غذا مبتنی بر مواد تغییر فاز دهندهٔ خورشیدی، پتانسیل انعطاف‌پذیری برای رسیدگی به تولید و تقاضا را با توجه به شرایط آب‌وهوایی محلی، الزامات شبکه و بار نهایی برودت ارائه می‌دهد [۷]. از آنجا که اروپا قصد دارد تا سال ۲۰۲۰، ۲۰ درصد از انرژی مورد نیاز خود را از منابع انرژی تجدیدپذیر ایجاد کند، باید ادغام کافی منابع انرژی و ذخیرهٔ انرژی تجدیدپذیر در کل زنجیرهٔ سرد مواد غذایی به‌درستی انجام شود. به همین دلیل در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای انجام گرفت که انرژی خورشید را به صورت برق و حرارت، انرژی بادی و ترکیب انرژی خورشیدی، سوخت‌های زیستی و زمین‌گرمایی برای سیستم‌های برودت، مورد بحث قرار داد. همچنین، این مطالعه نشان داد فناوری استفاده از ذخیرهٔ گرمایی کرایژونیک، یک مصرف‌کنندهٔ برق ساده را به یک مرکز انرژی هوشمند تبدیل می‌کند. بنابراین، یکپارچه‌سازی منابع انرژی، هم‌زمان با توسعهٔ ذخیره‌سازی انرژی کرایژونیک و کنترل هوشمند، قادر به تقویت بخش برودتی و تعادل شبکهٔ برق و پایداری سیستم انرژی است [۸] در سال ۲۰۱۵ یک مطالعهٔ تحلیلی و اقتصادی در مورد ارزیابی کارایی ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر برای سیستم خنک‌کنندهٔ شیر در مناطق مرتفع هند انجام شد. نتایج نشان داد در مناطق مرتفع، استفاده از بایومس و گاز کلر با کارایی حرارتی بین ۰/۱۷– ۰/۲۳ و با عملکرد ۰/۲۱۴ و کمترین دورهٔ بازپرداخت ۴/۵ سال بهترین ترکیب است و می‌تواند مؤثر باشد [۹]. در سال ۲۰۱۳ یک مطالعه دربارهٔ یکپارچه کردن انرژی خورشیدی با انبارهای خنک‌کننده نشان داد چنین مدل ساده‌ای می‌تواند برخی از معاملات جالب بین قیمت پایین‌تر برای سرمایش، تلفات حرارتی بالاتر و سود حاصل از تأمین برق فتوولتائیک به شبکه را نشان دهد. علاوه بر این، نشان داد چگونه ارزش بالقوهٔ مدیریت انرژی در آینده به‌شدت به ساختار تعرفه بستگی دارد [۱۰]. همچنین در سال ۲۰۱۴یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی پایدار سیستم‌های ذخیره‌سازی و بازیابی خودکار یخچال و فریزر ارائه شد، که ویژگی‌های خاص زنجیرهٔ تأمین مواد غذایی، مانند کنترل دما را در نظر می‌گیرد. سطوح و حجم سلول سرد بهینه‌سازی شد تا هزینهٔ کل سالانهٔ تسهیلات ذخیره‌سازی خودکار به حداقل برسد [۱۱].

همچنین در سال‌های اخیر کارهای زیادی به منظور یکپارچه کردن انرژی‌های تجدیدپذیر با مبدل‌های حرارتی انجام شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۹ مطالعه‌ای بر کاربرد انرژی تجدیدپذیر در صنایع غذایی ترکیه انجام شد و با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک شش مدل بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت گرمایی ضایعات، بازده پمپ حرارتی و پمپ حرارتی ذخیرهٔ یخ و پمپ حرارتی ذخیرهٔ انرژی گرمایی، خشک کردن با گرمای بازیافتی و رطوبت‌زدایی تنظیم شد. علاوه بر این، سیستم هیبرید در ترکیب با مواد تغییر فاز دهنده مورد بحث قرار گرفت [۱۳]. همچنین، پروژه‌های ممیزی انرژی و اقداماتی برای بهبود انرژی هم در بخش فرایند (بهینه‌سازی میزان گرمایش و سرمایش فرایند) و هم در بخش سیستم (بازیابی گرما از فرایند و چیلر) انجام شد. نتایج ۲۰۴ حسابرسی و ۴۶ ممیزی دقیق، پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و بازده انرژی بالا را مشخص کرد که بر اساس ان کاهش ۱۲۰ هزار مگاوات ساعت و در مورد انتشار کربن دی‌اکسید، کاهش ۳۰۵۰۰ تن را نشان داد. همچنین، کاربرد ۱۰۰ درصد انرژی خورشیدی را در صنعت آبجوسازی مورد بررسی قرار گرفت که به دلیل اینکه این صنعت دمای مورد نیازش بین ۲۵ تا ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد است، این شیوه از کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مطلوب به نظر می‌رسد [۱۴].

در تحلیل و بررسی که در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای روی سیستم غذایی ایالات متحده به منظور کاهش مصرف انرژی انجام شد که به بخش‌های زیادی از سیستم غذایی متمرکز شده و استراتژی‌های بالقوه را برای حفظ تأمین مواد غذایی مناسب بررسی کرد که ضمن کاهش ۵۰ درصدی از انرژی ورودی به سیستم غذایی، نشان داد چگونه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، مانند زیست‌توده و سلول‌های فتوولتائیک همراه با شیوه‌های کارایی کشاورزی می‌توانند در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در سیستم غذایی ایالات متحده قرار گیرند [۱۵ و ۱۶]. در سال ۲۰۱۴ به بررسی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف صنایع غذایی و تحلیل ذخیرهٔ انرژی در منابع بخار، منابع هوای فشرده، منابع الکتریسیته، مبدل‌های حرارتی، بازیابی گرمایی زائدات و همچنین کاهش شدت انرژی و ذخیرهٔ انرژی در فرایند مواد غذایی پرداخته شد که معلوم شد، استفاده از انرژی فشرده با فناوری‌های جدید مانند چرخهٔ ترمودینامیکی جدید و فرایندهای گرمایش غیرحرارتی موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود پایداری تولید مواد غذایی است [۱۷].

همچنین، فرایند خشک کردن در صنایع غذایی به عنوان یک فرایند انرژی بر مطرح می‌شود که یا از طریق انرژی تجدیدپذیر و یا از طریق سوخت‌های فسیلی به خشک کردن و نگهداری مواد غذایی می‌پردازد [۱۸]. شواهدی در زمینهٔ بهبود کیفیت غذایی و دارویی از طریق خشک کردن محصولات ازجمله گیاهان به صورت مادون قرمز وجود دارد [۱۹]. پاک کونن و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند خشک کردن مادون قرمز باعث افزایش کیفیت گیاهان خشک‌شده می‌شود. زبیسینسکی و همکاران (۱۹۹۲) با بررسی خشک کردن هوای همرفتی و خشک کردن مادون قرمز، پیشنهاد کرد که استفاده از یک حالت خشک کردن تابشی متناوب همراه با خشک کردن هوا همرفتی، برای مواد حساس به گرما مناسب است [۲۰]. همچنین در سال ۲۰۱۳ مطالعه‌ای به منظور توسعهٔ فرایند خشک کردن با فناوری جذب با زئولیت برای بهبود بازده انرژی و کیفیت محصول انجام شد که به صورت جذب رطوبت هوا به وسیلهٔ زئولیت عمل می‌کرد. این مطالعه در سه مرحله انجام شد: طراحی خشک‌کن، انجام تجهیزات آزمایشگاهی در مقیاس (سینی، اسپری و خشک‌کن‌های مایع با زئولیت) و ارزیابی عملکرد خشک‌کن بر اساس بهره‌وری انرژی و کیفیت محصول [۲۱].

در سال ۲۰۱۰ تلاش شد تا تحقیقات گذشته و فعلی در زمینهٔ فناوری ذخیرهٔ انرژی گرمایی در مواد به عنوان گرمای معقول و نهان در خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن محصولات غذایی کشاورزی استفاده شود. با واحد ذخیره‌سازی انرژی، مواد غذایی کشاورزی ممکن است در اواخر عصر خشک شود، در حالی که خشک کردن با این سرعت در یک خشک‌کن خورشیدی معمولی امکان‌پذیر نبود. به این‌ترتیب، خشک‌کن خورشیدی با واحد ذخیره‌سازی انرژی برای انسان و همچنین، برای حفظ انرژی بسیار مفید است [۲۲ و ۲۳]. در سال ۲۰۱۹ تحقیقات تجربی در مورد خشک کردن برگ استوا در خشک‌کن خورشیدی ترکیبی که از نوع همرفت اجباری است و خشک کردن مستقیم با خورشید انجام شد و نتیجه‌گیری زیر حاصل شد:

۱. متوسط بازده حرارتی پنل شمارهٔ ۱ و پنل شمارهٔ ۲ به‌ترتیب ۵۶/۳ درصد و ۲۳/۵ درصد و متوسط بازده حرارتی کلی بخاری هوا به صورت سری ۳۸/۲ درصد برآورد شد.

۲. راندمان کلی خشک‌کن در حالت مخلوط ۳۳/۵ درصد و رطوبت خشک‌کن ۸۱/۸ درصد ارزیابی شد. همچنین، مشخص شد که میزان آنتی‌اکسیدان و فلاونوئید برگ‌هایی که در خشک‌کن خورشیدی هستند نسبت به نمونهٔ رو باز بیشتر است [۲۴].

همچنین، عملکرد سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش به منظور استفاده از گرمای اتلافی، گرمای گاز خروجی از دودکش، آب‌های گرم تلف‌شده و بخار داغ درون تله‌های بخاری در جهت افزایش بازده مصرف انرژی و کمک به تولید گرمایش، سرمایش و قدرت، مورد ارزیابی قرار گرفت. عملکرد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم ترکیب خنک‌کننده، گرمایشی و قدرت، کاملاً به طراحی و استراتژی عملکرد آن بستگی دارد. در سال ۲۰۰۹جریان انرژی سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش تجزیه‌وتحلیل شد و به دنبال تقاضای حرارتی ساختمان، میزان مصرف انرژی اولیه کاهش یافت. سه معیار، صرفه‌جویی در انرژی اولیه، صرفه‌جویی در هزینهٔ کل سالانه و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن برای ارزیابی عملکرد این سیستم انتخاب شد. بر اساس جریان انرژی سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش، ظرفیت و کارایی این سیستم توسط الگوریتم ژنتیکی بهینه شد تا مزایای فنی، اقتصادی و محیطی حاصل از این سیستم به حداکثر برسد [۲۵].

در سال ۲۰۰۹ یک ارزیابی در عملکرد سیستم‌های ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش بر اساس هزینهٔ عملیاتی، مصرف انرژی اولیه و انتشار دی‌اکسید کربن را برای بعضی از شهرهای آمریکا با استفاده از یک برنامهٔ عملیاتی بهینه انجام شد. نتایج نشان داد برای برخی از شهرها مثل (کلمبوس، میامی و مینیاپولیس) بیشترین افزایش برای بهینه‌سازی انتشار کربن دی‌اکسید به دست آمد در حالی که برای سان فرانسیسکو بیشترین افزایش برای بهینه‌سازی هزینه به دست آمد. بوستون تنها شهری است که بیشترین افزایش را در مصرف انرژی سایت نشان داد [۲۶].

همچنین در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در راستای تلفیق انرژی خورشیدی با پمپ‌های حرارتی انجام شده است. در بازهٔ سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ با ظهور تحقیقات بیشتر از طیف وسیع‌تری از کشورها مواجه شد که نشان‌دهندهٔ افزایش علاقه به سیستم‌های SAHP در سراسر جهان است. در این دوره، تحقیقات بیشتری در مورد پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی انجام شد که بیشتر روی بهبود عملکرد از طریق آزمایش‌ها و کارهای مدل‌سازی متمرکز شده‌اند. تحقیق اول در مورد پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی و مبدل حرارتی زمینی برای استفادهٔ داخلی در جنوب ترکیه را انجام داد. این مطالعه مقادیر ضریب عملکرد این سیستم رابین ۰/۲–۰/۲۵ را ثبت کرد. اوزگنر و هپباسلی بعداً طرح خود را بهبود بخشیدند و سیستم پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی را برای گرم کردن گلخانه‌ها مورد بررسی قرار دادند. طراحی بهبودیافته قادر به رسیدن ضریب عملکرد به مقدار ۳/۱ بود. اوزگنر همچنین یک واحد توربین بادی را در سیستم پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی موجود ادغام کرده و عملکرد آن را برای اهداف کشاورزی بررسی کرده و از طریق آزمایش‌ها و کارهای مدل‌سازی، مقادیر ضریب عملکرد رابین ۲ تا ۲/۸ به دست آورده است. سایر مطالعات در چین همچنین عملکرد سیستم‌های مختلف پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی را با طیف گسترده‌ای از پارامترهای طراحی، شرایط عملیاتی و تنظیمات مبدل حرارتی بررسی کرده است [۲۷].

بنابراین با توجه به منابع در دسترس در این مطالعه، ابتدا به‌مرور سیستم‌های سرمایش و گرمایش موجود و روابط کمی حاکم بر آن‌ها خواهیم پرداخت و سپس، به بررسی و شناسایی فرصت‌ها و ارائهٔ راهکارهایی برای یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر در فرایند تولید سرمایش و گرمایش، خشک کردن و همین‌طور ترکیبی از این دو می‌پردازیم و همچنین، روابط ترمودینامیکی حاکم بر این فرایندها را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم و در پایان به بررسی سیستم‌های تولید توان، سرمایش و گرمایش به طور هم‌زمان و همچنین، سیستم پمپ حرارتی با منابع تجدیدپذیر به عنوان یک سیستم مکمل و زیرمجموعهٔ گرمایش و سرمایش خواهیم پرداخت و روابط کمی حاکم بر این سیستم‌ها را به منظور به حداقل رساندن اتلاف گرما و انرژی، بررسی می‌کنیم تا علاوه بر رشد تولید، شدت مصرف انرژی در این حوزهٔ خاص کاهش یابد.

۲. سیستم سرمایش

سیستم سرمایش در صنعت به طور کلی از طریق سه مکانیسم انجام می‌شود: سیستم تبخیری، سیستم فشرده‌سازی (تراکمی) و سیستم جذبی. سیستم تبخیری به دلیل کم‌خرج بودن و عملکرد ساده‌ای که دارد، در مناطق خشک به عنوان سیستمی محبوب با راندمان نسبتاً خوبی شناخته می‌شود، مانند کولر آبی [۲۸].

اجزای سیستم‌های تراکمی عبارت است از: کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و اواپراتور. اصول کار سیستم‌های تراکمی به این‌صورت است که مقداری کار در کمپرسور به سیستم داده می‌شود، کمپرسور سیال مبرد را در یک فرایند تراکم آدیاباتیک، متراکم کرده و سیال که بر اثر افزایش فشار به صورت گاز داغ است در کندانسور حرارت خود را به محیط پس می‌دهد و پس از عبور از شیر انبساط آدیاباتیک وارد اواپراتور شده و حرارت محیط اطراف را در دمای ثابت جذب می‌کند و درنتیجه، هوای اطراف اواپراتور سرد می‌شود. سیستم‌های تبرید تراکمی دارای سه دسته هستند که عبارت‌اند از: فلش کولر تک اثرِ و آبشاری.

اجزای اصلی سیستم تبرید جذبی عبارت‌اند از: ابزوربر یا جذب‌کننده، ژنراتور یا تولیدکننده، کندانسور یا تقطیرکننده، اواپراتور یا تبخیرکننده و یک شیر انبساط. در این سیستم دو سیال به کار می‌رود که یکی سیال جاذب و دیگری سیال مبرد است. با حرارت دادن محلول در ژنراتور بخار مبرد از مادهٔ جاذب جدا می‌شود و به کندانسور می‌رود بخار مبرد در کندانسور تقطیر می‌شود و پس از عبور از شیر انبساط وارد اواپراتور می‌شود، با تبخیر در اواپراتور گرما از محیط اطراف توسط مبرد دریافت شده و تولید سرما می‌شود. پس از آن، مبرد وارد جذب‌کننده می‌شود و در آنجا توسط محلول جاذب که از ژنراتور توسط کاهش فشار به جذب‌کننده

آمده است جذب می‌شود. حال محلول مبرد و جاذب ایجادشده در جذب‌کننده که دارای سیال مبرد زیادی است توسط پمپ به ژنراتور فرستاده می‌شود و به این‌ترتیب سیکل جذبی تکمیل می‌شود. در سیکل جذبی وقتی بخار مبرد به جذب‌کننده وارد شده و جذب می‌شود، باعث بالا رفتن دمای مادهٔ جاذب می‌شود که این حرارت توسط یک کویل سرد از جذب‌کننده خارج می‌شود سیستم‌های تبرید جذبی دارای سه دسته هستند که عبارت‌اند از: یک افکت[1]، نیم افکت[2] و دو افکت[3]. مدل‌های طراحی کلیهٔ سیستم‌ها حالت پایدار و صفر بعدی دارند که شامل تعادل جرم و انرژی هستند.

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (۱)$$

$$\sum \dot{m}_{in} * h_{in} - \sum \dot{m}_{out} * h_{out} = 0 \quad (۲)$$

پارامترهای مستقل که در طرحی یک سیستم تبرید باید به آن توجه کنیم شامل موارد زیر است:

۱) دمای محیطی (Tamb,DP)؛

۲) مشخصات طراحی (Q cooling ،T food, out)؛

۳) عملکرد اجزای سیستم در نقطهٔ طراحی؛

۴) متغیرهای سیستم که در سه دسته (شرایط محیط، مشخصات طراحی و عملکرد) به عنوان پارامتر در روش طراحی با توجه به محل کارخانه، کاربرد خاص و مشخصات اجزا تعیین می‌شوند... متغیرهای دستهٔ چهارم (متغیرهای سیستم) بسته به نوع و پیکربندی سیستم تبرید ثابت یا آزاد هستند (متغیرهای تصمیم‌گیری).

مدل‌های خارج از طراحی سیستم‌های تبرید شامل معادلات یکسان مدل‌های طراحی هستند، اما مجموعه‌های مختلفی از متغیرهای وابسته و مستقل را شامل می‌شوند. اجزای متغیرهای مستقل به عنوان پارامترهای موجود در مدل طراحی ثابت نیستند، اما آن‌ها به عنوان تابعی از بار سیستم (جرم یا میزان جریان حجمی سیال) با استفاده از معادلات مشخصهٔ اجزا محاسبه می‌شوند.

مبدل حرارتی:

$$U_{HE}(t) = U_{HE,DP} * \left(\frac{\dot{m}_{HE}(t)}{\dot{m}_{HE,DP}}\right)^{0.8} * \left(\frac{\dot{m}_{HE}(t)}{\dot{m}_{HE,DP}}\right)^{0.8} \quad (۳)$$

پمپ‌های محلول:

$$r_{p,pump}(t) = -0.5 * r_{p,pump,DP} * \left(\frac{\dot{V}_{pump}(t)}{\dot{V}_{pump,DP}}\right)^{2} + 1.5 * r_{p,pump,DP} \quad (۴)$$

$$\eta \text{ is,pump}(t) = \eta \text{ is,pump,DP} * [-\left(\frac{\dot{V}_{pump}(t)}{\dot{V}_{pump,DP}}\right)^{2} + 2 * \left(\frac{\dot{V}_{pump}(t)}{\dot{V}_{pump,DP}}\right)] \quad (۵)$$

کمپرسور:

$$P_{comp}(t) = \dot{m}_{comp,DP} * \quad (۶)$$

همچنین، میزان گرما و الکتریسیته مورد نیاز برای شروع به کار سیستم از روابط ۷ و ۸ به دست می‌آید:

$$Q_{in}(t) = a_{th} * T^{2}_{amb}(t) + b_{th} * T_{amb}(t) + c_{th} \quad (۷)$$

$$P_{in}(t) = a_{el} * T^{2}_{amb}(t) + b_{el} * T_{amb}(t) + c_{el} \quad (۸)$$

برای به دست آوردن ضریب عملکرد که نشان‌دهندهٔ بازده سیستم است از رابطهٔ ۹ استفاده می‌کنیم:

$$COP = \frac{Q_{cooling}}{P_{in} + Q_{in}} \quad (۹)$$

1. Single effect
2. half effect
3. double effect

در سال‌های اخیر مطالعه در یکپارچه شدن انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم تبرید توسعه پیدا کرده است، به طوری که می‌توان از موارد زیر به عنوان منبع انرژی برای تولید سرما استفاده کرد: کلکتور خورشیدی همراه با سیستم ذخیره‌سازی حرارتی با یک دیگ بخار کمکی از زیست‌توده، پانل‌های فتوولتائیک، دیگ‌های بخار زیست‌توده، موتورهای احتراق داخلی سوخت زیستی، توربین‌های بادی برای تولید برق مورد نیاز سیستم تراکم، استفاده از یکپارچه کردن مواد تغییر فاز دهنده با انرژی خورشیدی و استفاده از ذخیرهٔ انرژی کرایژونیک در سیستم تبرید نمونه‌هایی از این موارد هستند. این فناوری‌ها می‌توانند با تولید برق، حرارت و یا تولید هم‌زمان برق و حرارت به‌ترتیب انرژی لازم برای شروع کار سیستم تبرید تراکمی، جذبی و یا ترکیب این دو را تولید کند. اندازهٔ سیستم تبرید بر اساس پیک تقاضای حرارتی (برای سیستم‌های جذب) یا تقاضای الکتریکی (برای سیستم‌های فشرده‌سازی) تنظیم می‌شود. همچنین، مساحت کل پنل‌های خورشیدی به عنوان منطقهٔ مورد نیاز برای تأمین انرژی حرارتی کل محاسبه می‌شود. توان خروجی از سیستم خورشیدی از رابطهٔ ۱۰ به دست می‌آید:

$$P_{PV}(t) = N_{PV} * A_{PV} * \eta_{PV}(t) * G_{\beta}(t) \quad (۱۰)$$

N_{PV} برابر است با تعداد ماژول‌های فعال PV، A_{PV} برابر مساحت هر ماژوبرحسب مترمربع، $G_{\beta}(t)$ برابر است با میزان تشعشع جهانی روی ماژول‌ها و $\eta_{PV}(t)$ برابر است با بازده الکتریکی پنل‌ها که از رابطهٔ ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$\eta_{PV}(t) = p * \left[q * \frac{G_{\beta}(t)}{1000} + \left(\frac{G_{\beta}(t)}{1000} \right)^{m} \right] * \left[1 + r * \frac{T_{cell}(t)}{25} + s * \frac{AM(t)}{1.5} + \left(\frac{AM(t)}{1.5} \right)^{u} \right] \quad (۱۱)$$

$T_{cell}(t)$ برابر است با دمای سلول خورشیدی، $AM(t)$ برابر است با جرم هوا و p,q,m,r,u از داده‌های تجربی برای سیستم‌های خورشیدی مختلف در رفرنس به دست می‌آید.

اگر از انرژی خورشیدی برای سیستم جذبی استفاده می‌کنیم گرمای خروجی از نیروگاه خورشیدی از رابطهٔ ۱۲ به دست می‌آید:

$$Q_{SC}(t) = N_{SC} * A_{SC} * \eta_{SC}(t) * D_{\beta}(t) \quad (۱۲)$$

$$\eta_{SC}(t) = \eta_0 * IAM - a * T^*_{SC}(t) * D_{\beta}(t) * (T^*_{SC}(t))^2 \quad (۱۳)$$

در معادلهٔ ۱۳ a،fj0 و b توسط کارخانهٔ سازنده داده می‌شود. IAM اصلاح‌کنندهٔ زاویه است. T^*_{SC} برابر است با:

$$T^*_{SC}(t) = \frac{T_{mf} - Y_{amb}(t)}{D_{\beta}(t)} \quad (۱۴)$$

که T_{mf} میانگین دما مایع بین ورودی و کلکتورهای خورشیدی است، سایر پارامترها را می‌توان از روابط تعادل انرژی و جرم به دست آورد.

اگر از زیست‌توده برای تولید حرارت استفاده می‌کنیم باید توجه کنیم که نرخ جریان جرم برای تأمین حرارت از رابطهٔ ۱۵ به دست می‌آید:

$$Q_B(t) = 0.91857 * F_B(t) + 0.95303 \quad (۱۵)$$

$$\dot{m}_{bagasse}(t) = \frac{F_B(t)}{LHV_{bagasse}} \quad (۱۶)$$

$LHV_{bagasse}$ برابر است با کمترین مقدار حرارت زیست‌توده که مساوی است با $7500 \frac{kj}{kg}$.

برای موتورهای احتراقی با سوخت زیست‌توده میزان جریان حجمی بیوگاز مورد نیاز برای تأمین تقاضای الکتریکی (P biogas) یا حرارتی (Q biogas) با مقیاس‌بندی روابط تجربی به دست می‌آید.

$$P_{ICE}(t) = 0.2795 * F_{ICE}(t) - 1.4968 \quad (۱۷)$$

$$Q_{ICE}(t) \le 1.0719 * P_{ICE}(t) + 3.1923 \quad (۱۸)$$

$$\dot{V}_{biogas}(t) = \frac{F_{ICE}(t)}{LHV_{biogas}} \quad (۱۹)$$

که LHV_{biogas} برابر است با $23000\frac{kj}{Nm^3}$

برای به دست آوردن عملکرد سیستم تبرید یکپارچه‌شده با سیستم تجدیدپذیر به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$COP=\frac{E_{cooling}}{\sum\frac{E_{th,in}}{\eta_{th}}+\sum\frac{E_{el,in}}{el}}=\frac{E_{cooling}}{E_{solar}+E_{bagasse}+E_{biogas}+E_{el,grid}} \quad (۲۰)$$

۳. سیستم گرمایش

مبدل‌های حرارتی جزء پرکاربردترین تجهیزات در فرایندهای گرمایی هستند و می‌توان آن‌ها را در بیشتر واحدهای صنعتی مشاهده کرد که به دو دستهٔ تماسی و غیر تماسی طبقه‌بندی می‌شوند [۲۹]. مبدل‌های حرارتی نوع غیر تماسی معمولاً با یک دیواره باریک فلزی به دو بخش مجزا تقسیم می‌شوند. انواع معمول این دسته از مبدل‌ها عبارت‌اند از: مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، لوله‌ای، لوله و پوسته و صفحه‌تراش[1]. مبدل‌های حرارتی تماسی امکان تماس فیزیکی بین محصول و جریان‌های سردکننده یا گرم‌کننده فراهم می‌کند. مبدل‌های حرارتی تزریق بخار[2] و نفوذ بخار[3] مثال‌هایی از این نوع مبدل‌ها هستند [۳۰]. آن‌ها تجهیزاتی هستند که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم می‌کنند. این عملیات می‌تواند بین مایع -مایع، گاز -گاز و یا گاز -مایع انجام شود. مبدل‌های حرارتی به منظور خنک کردن سیال گرم و یا گرم کردن سیال سرد و یا هر دو مورد استفاده قرار می‌گیرند. متداول‌ترین و پرکاربردترین نوع مبدل‌های حرارتی که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد مبدل‌های حرارتی پوسته - لوله است که برای کاربردهای مختلف و در اندازه‌های گوناگون طراحی و ساخته می‌شود [۳۱]. این مبدل‌ها به مبدل دولوله، مبدل سه لوله، مبدل پوسته و لوله و مبدل صفحه‌تراش تقسیم می‌شوند. از این نوع مبدل‌ها به منظور تبخیر مایع یا کندانس کردن بخار و یا انتقال حرارت بین دو مایع استفاده می‌شود. بیش از ۳۷ درصد مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در صنایع از نوع مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله هستند که دلیل عمدهٔ این انتخاب مقاومت این نوع مبدل‌ها در مقابل دما و فشار بالا است. اجزای اصلی تشکیل‌دهندهٔ مبدل حرارتی پوسته - لوله، سر جلو و عقب، پوسته، لوله‌ها، دیوار ها و صفحه لوله‌ها هستند. در این مبدل یکی از سیالات درون لوله و سیال دیگر درون پوسته جریان دارد، سطح انتقال حرارت در این نوع مبدل جدارهٔ فلزی لوله‌ها است. پس هر چه تعداد لوله‌ها بیشتر باشد، سطح انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد شد، ولی از طرفی به قطر مبدل نیز افزوده می‌شود و هزینهٔ ساخت را افزایش می‌دهد [۳۲].

مبدل‌های صفحه‌ای بعد از لوله‌ای، بیشترین کاربرد را در صنایع غذایی دارد که از یک سری صفحات استیل ضد زنگ موازی و کنار هم که در یک قالب قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شوند [۳۳]. واشرهایی که از لاستیک مصنوعی ساخته شده‌اند، برای درزگیری کناره‌های صفحات به کار می‌روند. این واشرها از درهم آمیختن مایعات جلوگیری کرده و جریان‌های سرد و گرم و محصولات را هدایت می‌کنند. جهت جریان‌ها می‌تواند هم‌جهت یا غیر هم‌جهت باشد. همچنین عملکرد مناسبی برای سیال‌هایی با ویسکوزیته پایین دارند. مبدل حرارتی تزریق بخار امکان تماس مستقیم بین بخار و محصول را فراهم می‌کند به این صورت که محصول مایع به بالای مبدل حرارتی فرستاده می‌شود و سپس در محفظهٔ حرارت به روی صفحات باریکی جریان می‌یابد. در صورتی که بخار در تماس با قطرات کوچک و ریز غذا قرار گیرد، نرخ انتقال حرارت بالایی به دست می‌آید. محصول گرم‌شده به همراه بخار میعان یافته از پایین محفظهٔ حرارتی خارج می‌شود. کاربردهای این نوع مبدل‌ها عبارت‌اند از: پختن و استریلیزاسیون آبگوشت‌های تغلیظ‌شده، شکلات، پنیر فرآوری‌شده، مخلوط‌های بستنی، فرنی، محتویات کلوچه مغزدار و شیر [۳۴].

حال که با انواع مبدل‌ها آشنا شدیم، به‌مرور به قواعد و روابطی که در آن‌ها وجود دارد می‌پردازیم [۳۵]:

موازنهٔ انرژی برای محصول: $Q= FCP(T2-T1)$ (۲۱)

موازنهٔ انرژی برای محیط حرارتی : $Q= Fs\Delta Hs$ (۲۲)

1. Scraped Surface
2. Steam Injection
3. Steam Infusion

(۲۳) اختلاف دمای میانگین (نیروی محرکه): $\Delta T_m = \frac{(T_s - T_1) - (T_s - T_2)}{ln[(T_s - T_1) - (T_s - T_2)]}$

(۲۴) انتقال حرارت بین دو جریان : $Q = AU\Delta Tm$

(۲۵) ضریب انتقال حرارت کل : $\frac{1}{U} = \frac{1}{hi} + \frac{1}{ho}$

(۲۶) کل تعداد لوله‌ها N: $u = \frac{4.F.n}{\rho.N.\pi.d^2}$

(۲۷) سطح کل انتقال حرارت (A) با در نظر گرفتن تعداد و اندازهٔ لوله : $A = N\pi dL$

(۲۸) قطر پوستهٔ مورد نیاز : $N = 0.319(\frac{D}{d})^{2.142}$

(۲۹) افت فشار ناشی از اصطکاک در داخل لوله: $\Delta P = n\left[4f\left(\frac{L}{d}\right) + 2.5\right]\frac{\rho u^2}{2}$

(۳۰) برای جریان آرام: ضریب اصطکاک $f = 16\left(\frac{\rho du}{\eta}\right)^{-1}$

(۳۱) ضریب اصطکاک برای جریان متلاطم : $f = 0.08\left(\frac{\rho du}{\eta}\right)^{-1/4}$

(۳۲) برآورد کار الکتریکی موردنیاز پمپ: $E = F\Delta P$

همچنین، می‌توان از منابع انرژی تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی برای عمل گرمایش به منظور پیش‌گرم کردن آب‌وهوای ورودی به بویلر و سایر نیازهای گرمایی استفاده کرد. یکی از این سیستم‌ها، سیستم آب گرم خورشیدی است. گرمای مفید به‌دست‌آمده از کلکتور خورشیدی از روابط ۳۳ و ۳۴ به دست می‌آید.

$$Q_u = A_c[H_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_P - T_a)] \quad (۳۳)$$

$$(\tau\alpha)_e = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (۳۴)$$

در اینجا مفهومی ارائه می‌شود به نام ضریب حذف گرما که برابر است با نسبت انرژی گرمایی واقعی جمع‌شده به انرژی مفید به‌دست‌آمده، در صورتی که کل سطح جاذب در دمای مایع ورودی به کلکتور باشد، این ضریب برابر است با:

$$F_R = \frac{mC_p}{U_L A_c}\left[1 - exp\left(-\frac{U_L A_c F_p}{mC_p}\right)\right] \quad (۳۵)$$

با توجه به روابط ۳۳ و ۳۵ نرخ خالص گرمای جمع‌شده از کلکتور برابر است با:

$$Q_u = F_R A_c[H_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)] \quad (۳۶)$$

همچنین بازده کلکتور خورشیدی برابر است با:

$$\eta c = \frac{Q_u}{H_T A_c} = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L\frac{(T_i - T_a)}{H_T} \quad (۳۷)$$

همچنین، در مواقعی که نیاز به هوای داغ داریم مثل هوای ورودی به بویلر، جهت استریل کردن ظروف و خشک کردن با هوای داغ، می‌توان از یک سیستم بهینه‌سازی چند هدفِ ترکیبی فتوولتائیک / حرارتی[1] و مبدل حرارتی زمین و هوا[2] در دو حالت استفاده کرد. در حالت اول هوای محیط طی دو مرحله از کلکتورهای خورشیدی و یا مبدل‌های زمین و هوا عبور می‌کند و پیش‌گرم می‌شود، ولی در حالت دوم هوا ابتدا توسط پنل‌های خورشیدی پیش‌گرم می‌شود و سپس، از میان مبدل حرارتی زمین و هوا عبور می‌کند. در سیستم مبدل حرارتی زمین و هوا، انتقال گرما بین هوا و خاک از طریق همرفت و هدایت اتفاق می‌افتد. تعداد اثربخشی واحد انتقال برای تعیین عملکرد انتقال حرارت سیستم استفاده شده است که از رابطهٔ ۳۸ به دست می‌آید:

1. BIPVT
2. EAHE

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{EAHE}}{\dot{Q}_{EAHE,max}} = \frac{T_{out,EAHE} - T_{in,EAHE}}{T_{soil} - T_{in,EAHE}} \quad (۳۸)$$

همچنین اثربخشی را می‌توان از رابطهٔ ۳۹ نیز دست آورد:

$$\varepsilon = 1 - exp(-\mathrm{NTU}) \quad (۳۹)$$

$$\mathrm{NTU} = \frac{hA}{\dot{m}_f \dot{c}_p} \quad (۴۰)$$

$$A = \pi D_{i,EAHE} L_{EAHE} \quad (۴۱)$$

با به دست آوردن اثربخشی از روابط ۳۹-۴۱ می‌توان دمای خروجی مبدل را به دست آورد:

$$T_{out,EAHE} = T_{in,EAHE} + \varepsilon\left(T_{soil} - T_{in,EAHE}\right) \quad (۴۲)$$

همچنین، بالانس انرژی برای سیستم ترکیبی فتوولتائیک / حرارتی برابر است با:

$$\alpha_{pv}\left(1-\eta_{el}\right) I_r W dx = \left(h_{r,pv-s} + h_w\right)\left(T_{pv} - T_a\right) W dx + h_c\left(T_{pv} - T_f\right) W dx + h_{r,pv-b}\left(h_{pv} + h_b\right) W dx \quad (۴۳)$$

خشک کردن به عنوان یکی از روش‌های گرمایی نگهداری مواد غذایی است که با استفاده از دستگاه‌هایی به نام دستگاه خشک‌کن صورت می‌پذیرد. البته، روش‌های نوینی وجود دارد که اساس آن غیرحرارتی است که اشاره می‌کنیم. کاهش و حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و افزایش طول عمر مواد غذایی، از عمده دلایل خشک کردن محصولات غذایی است، چراکه محیط‌های آبی و مرطوب زمینهٔ مناسب را برای رشد و گسترش انواع آلودگی‌ها فراهم می‌کنند. خشک کردن در صنایع غذایی به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱. طبیعی که این نوع از روش خشک کردن مواد غذایی با استفاده از عوامل طبیعی موجود در طبیعت، استفاده می‌شود. مانند انرژی خورشیدی که از روش‌های رایج برای خشک کردن محصولات کشاورزی و دارویی است که هم در مقیاس‌های کوچک و خانگی و هم در مقیاس‌های بزرگ و صنعتی مورد استفاده است.

۲. مصنوعی که در این روش، از ماشین‌آلات خشک‌کن برای جذب و حذف آب اضافی موجود در مواد غذایی استفاده‌شده و درنتیجه مدت‌زمان نگهداری مواد غذایی را افزایش می‌یابد. در این بخش به انواع خشک‌کن‌های صنعتی طبیعی و مصنوعی اشاره می‌کنیم:

۱. خشک‌کن‌های صنعتی به روش انجماد (تصعیدی) که به دو نوع سینی‌دار و تونلی تقسیم می‌شود.

۲. خشک‌کن‌های خورشیدی که به خشک‌کن‌های خورشیدی پسیو و اکتیو تقسیم می‌شود.

خشک‌کننده‌های خورشیدی پسیو، سیستم‌های گردش طبیعی یا همرفت طبیعی نیز نامیده می‌شوند. در این سیستم‌ها هوای گرم شده توسط خورشید در بین محصولات از طریق نیروهای رانشی یا فشار هوا جریان پیدا می‌کند. خشک‌کننده‌های خورشیدی اکتیو نیز مانند پسیو با استفاده از نور خورشید عمل کرده و محصولات را خشک می‌کنند با این تفاوت که هوایی که به‌وسیله خورشید داغ شده است به وسیلهٔ دمنده وارد محفظه خشک‌کن می‌شود [۳۶].

همچنین، تقسیم‌بندی دیگری توسط R. Eswara انجام شد که شامل هوای آزاد، خشک‌کن خورشیدی مستقیم[1]، خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم[2]، خشک‌کن‌های مختلط[3]، خشک‌کن‌های ترکیبی[4]، خشک‌کن سوختی[5] است.

۳. خشک‌کن‌های صنعتی به روش هوای داغ

۴. خشک‌کن‌های کابینتی یا کابینی

۵. خشک‌کن‌های تونلی (کانتینیوس)

۶. اسپریردرایر

1. Direct solar dryer
2. Indirect solar dryer
3. Mixed dryers
4. Hybrid dryer
5. Fuel dryer

۷. درام درایر

۸. خشک‌کن تحت خلأ

در بیشتر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک‌کردن بر اساس شاخص نسبت رطوبت[1] گزارش شده است که علت آن، کاهش پراکندگی و خوش‌فرم کردن داده‌ها است. که از فرمول ۳۳ محاسبه می‌شود [۳۷]:

$$\mathrm{MR}=\frac{M_t-M_e}{M_o-M_e} \quad (۴۴)$$

با توجه به اینکه معمولاً Me در مقایسه با مقدار Mt و Mo عدد کوچکی است، خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن نیز بسیار جزئی است و درنتیجه، می‌توان رابطه را به شکل ساده‌تری درآورد (رابطهٔ ۴۵).

$$\mathrm{MR}=\frac{M_t}{M_o} \quad (۴۵)$$

در خشک‌کن‌های خورشیدی انرژی مصرفی برابر با مجموع انرژی جذب‌شده توسط صفحه‌های جاذب و سینی‌های مخزن و همچنین انرژی مصرفی فن است.

$$E=\left(A_c I_t+Q_f\right) \quad (۴۶)$$

که در آن It برابر میزان تشعشع خورشید است. همچنین، راندمان این خشک‌کن از رابطهٔ ۳۶ محاسبه می‌شود:

$$\eta_d=\frac{M^o c_p\left(T_o-T_i\right)}{A_c I_T+Q_f} \quad (۴۷)$$

۴. سیستم ترکیب خنک‌کننده، گرمایش و قدرت

سیستم (ترکیب خنک‌کننده، گرمایش و قدرت) را به کلیهٔ سیستم‌های تولید برق که از گرمای زباله قابل بازیافت برای گرمایش فضا، سرمایش و اهداف آب گرم خانگی استفاده می‌کند، اطلاق می‌کنیم [۳۸]. تفاوت اصلی بین این سیستم‌ها و روش‌های معمولی تولید برق، استفاده از گرمای ضایعات است که از بخش اصلی منتقل می‌شود تا بتواند تقاضای حرارتی یک تأسیسات (نیاز به خنک‌کننده، گرمایش یا نیاز به آب گرم) را برآورده کند. از اساسی‌ترین اهداف سیستم‌های ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش استفاده از گرمای زباله و اتلاف حرارتی ناشی از سوخت‌های سنتی است و معمولاً به صورت مکمل منابع حرارتی استفاده می‌شود. از دیگر اهداف این سیستم‌ها، اطمینان از کاهش انرژی اولیه، هزینه، انتشار و یا ترکیبی از همهٔ این‌ها است. برای دستیابی به این اهداف، سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش معمولاً با استفاده از دو استراتژی اساسی انجام می‌شود: پیروی از بار الکتریکی[2] و پیروی از بار حرارتی[3]. در مورد استراتژی بهره‌برداری با توجه به بار الکتریکی، موتور اصلی به منظور برآوردن تقاضای الکتریکی از طریق ژنراتور که بخشی از مجموعه تولید برق است بارگیری می‌شود. گرمای اتلافی حاصل از این بارگیری به منظور برآوردن بار حرارتی تأسیسات بازیابی می‌شود. برای این استراتژی، اگر انرژی حرارتی بازیابی‌شده برای تحمل بار حرارتی (خنک‌کننده یا گرم کردن) تأسیسات کافی نباشد، باید بخاری اضافی توسط دیگ بخار کمکی این سیستم تأمین شود. برای استراتژی توجه به بار حرارتی، جابه‌جایی اصلی به گونه‌ای بارگذاری شده است که گرمای زباله بازیافت‌شده برای تأمین انرژی حرارتی لازم برای تأمین نیازهای گرمایش و سرمایش کافی باشد. انتخاب بین بار الکتریکی و بار حرارتی معمولاً، با بارگیری موتور، سوئیچ اصلی و همچنین، چند شرایط ازجمله امکان فروش برگشت برق به شبکه یا ذخیرهٔ آن در سایت برای استفاده بعدی از طریق برخی از سیستم‌های ذخیره باتری انجام می‌شود. علاوه بر این، قیمت سوخت در مقابل قیمت برق خریداری‌شده از یک منبع سنتی می‌تواند تأثیر بگذارد [۳۹].

سیستم‌های ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش از یک واحد تولید برق[4]، یک سیستم بازیابی زباله، یک دیگ بخار پشتیبان،

1. MR
2. FEL
3. FTL
4. PGU

سیستم خنک‌کننده و سیستم گرمایش تشکیل شده است. سیستم خنک‌کننده می‌تواند ترکیبی از چیلر برقی و جذبی باشد [۴۰]. این سیستم به دنبال تقاضای حرارتی عمل می‌کند، که یک استراتژی عملی مشترک و ساده است. گاز خروجی با دمای بالا برای جبران بار حرارتی برای سرمایش در تابستان و گرم کردن در زمستان بازیابی می‌شود. اگر گرمایش کاملاً نیازها را برآورده نکند، می‌توان از دیگ مکمل استفاده کرد. به طور مشابه، هنگامی که مقدار برق تولیدشده در واحد تولید برق کافی نباشد، برق اضافی از شبکهٔ محلی تهیه می‌شود. در مقابل، هنگامی که گرمای اضافی یا برق تولیدشده توسط سیستم‌های ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش وجود دارد، انرژی اضافی از سیستم تلف می‌شوند. درنتیجه، عملکرد واحد برق هنگام تأمین یک تقاضای انرژی در ساختمان، باید اتلاف انرژی را کاهش دهد.

بالانس انرژی در این سیستم به صورت رابطهٔ ۴۸ است:

$$E_{grid} + E_{pgu} = E + E_p + E_{ec} \quad (۴۸)$$

جایی که E_{grid} برق شبکه در سیستم است. وقتی واحد برق، برق اضافی تولید می‌کند، E_{grid} منفی است و مقدار آن برابر است با برق اضافی. E_{pgu} برق تولیدشده توسط واحد برق است، E مصرف انرژی الکتریکی (چراغ‌ها و تجهیزات) ساختمان است، E_p مصرف انرژی الکتریکی پرازیتی سیستم است و E_{ec} مصرف انرژی الکتریکی برای چیلر برقی است.

مصرف انرژی الکتریکی در چیلر برقی برابر است با:

$$\mathrm{E}_{ec} = \frac{Q_{ec}}{COP_e} \quad (۴۹)$$

جایی که Qec سرمای تولیدشده توسط چیلر برقی است و COPe ضریب عملکرد چیلر برقی است. میزان مصرف انرژی سوخت واحد برق، را می‌توان تخمین زد:

$$F_{ec} = \frac{E_{pgu}}{\eta_e} \quad (۵۰)$$

که η_e بازده واحد تولید برق است.

گرمای زبالهٔ بازیافت‌شده به عنوان انرژی اولیه را می‌توان محاسبه کرد:

$$Q_r = F_{pgu}\eta_{rec}\left(1-\eta_e\right) \quad (۵۱)$$

که η_{rec} بازده سیستم بازیافت حرارتی است.

گرمای فرستاده‌شده به سیستم خنک‌کننده و کویل گرمایش برابر است با:

$$\mathrm{Qr} + \mathrm{Qb} = \mathrm{Qrc} + \mathrm{Qrh} \quad (۵۲)$$

که Qb از گرمای مکمل دیگ بخار است، Qrc و Qrh به‌ترتیب گرمای جذب‌شده به چیلر جذب و کویل گرمایش هستند.

گرمای لازم توسط چیلر جذبی و کویل گرمایشی برای به کار بردن بخشی از بار خنک‌کننده و کل بار گرمایشی به‌ترتیب برابر است با:

$$\mathrm{Qrc} = \frac{Q_{ac}}{COP_{ac}} \quad (۵۳)$$

$$\mathrm{Qrh} = \frac{Q_h}{\eta_h} \quad (۵۴)$$

که در آن COPac، ضریب عملکرد چیلر جاذبی است، Qac سرمای تولیدشده توسط چیلر جذبی است، Qh تقاضای گرما برای گرمایش فضا و آب گرم خانگی است و η_h راندمان کویل گرمایش است. میزان مصرف انرژی سوخت اضافی در دیگ بخار، Fb را می‌توان تخمین زد:

$$\mathrm{F}_b = \frac{Q_{rc} + Q_{rh} - Q_r}{\eta_b} \quad (۵۵)$$

تعادل بار خنک‌کننده ساختمان به صورت رابطهٔ ۵۶ بیان شده است:

$$\mathrm{Qc} = \mathrm{Qec} + \mathrm{Qac} \quad (۵۶)$$

که **Qc** سرمای مورد نیاز برای خنک کردن فضا است.

۵. پمپ حرارتی (HP)

پمپ‌های حرارتی انرژی تجدیدپذیر حرارتی موجود در دماهای پایین را از محیط طبیعی گرفته و به گرما در دماهای بالاتر تبدیل می‌کنند. از چرخهٔ پمپ گرمایی می‌توان برای خنک‌سازی نیز استفاده کرد. پمپ‌های حرارتی از انرژی گرمایی، آب گرم و زمین‌گرمایی استفاده می‌کنند و می‌توانند با گرمای حاصل از سایر تجدیدپذیرها در سیستم‌های ترکیبی، ترکیب شوند [۴۱]. این منابع ممکن است منشأ طبیعی داشته باشند یا انرژی حاصل از پسماند فرایندهای صنعتی باشند. پمپ‌های حرارتی می‌توانند بسیار کارآمد باشند، اگرچه بازده کلی انرژی اولیهٔ آن‌ها به بازده تولید برق (یا منبع دیگر انرژی حرارتی) مورد استفاده بستگی دارد. روش اصلی برای نمایش پمپ‌های حرارتی الکتریکی توسط رابطهٔ ۵۶ نشان داده می‌شود. فرض شده است که یک رابطهٔ ثابت بین توان ورودی و گرمای خروجی برقرار است.

$$P_t = \frac{\dot{Q}_t^{HP}}{COP^{average}} \forall t \quad (۵۷)$$

$$COP^{average} = \frac{T^{sink}}{T^{sink} - T^{source}} \quad (۵۸)$$

ضریب عملکرد به‌شدت به سطح دمای منبع انرژی بستگی دارد. دمای منبع پایین و همچنین دمای منبع بالا می‌تواند به کاهش ضریب عملکرد منجر شود که باعث افزایش آشکار میزان ورودی برق مورد نیاز یا مشکلات عملیاتی پمپ‌های حرارتی می‌شود. خروجی گرما از طریق فشار بیشتر در حداکثر مصرف برق پمپ حرارتی و دیگ الکتریکی محدود می‌شود.

$$P_t = \frac{\dot{Q}_t^{HP,SH}}{COP^{SH}} + \frac{\dot{Q}_t^{EB,SH}}{\eta^{EB}} + \frac{\dot{Q}_t^{HP,DHW}}{COP^{DHW}} + \frac{\dot{Q}_t^{EB,DHW}}{\eta^{EB}} \quad (۵۹)$$

همچنین، ظرفیت گرمایش پمپ‌های حرارتی به طور کلی با برخی از ظرفیت دیگ‌های الکتریکی برای بارهای اوج، تکمیل می‌شود که هزینه‌های سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد. در مدل سرمایه‌گذاری، نسبت ثابتی از ظرفیت پمپ حرارتی (QHP)، به ظرفیت دیگ الکتریکی کمکی (QEB) را که توسط محدودیت اعمال شده است، تعیین می‌شود.

$$\bar{Q}^{HP} = \frac{cs^{HP}}{1 - cs^{HP}} * \bar{Q}^{EB} \quad (۶۰)$$

پارامتر cs^{HP} معمولاً بین ۰/۷۲ و ۰/۸۲ است. به عنوان مثال، اگر cs^{HP} 0.8 =باشد، برای هر ۱۰۰ کیلووات پمپ گرمایی، ۲۵ کیلووات دیگ بخار کمکی باید نصب شود [۴۲]. همچنین، با تلفیق انرژی خورشیدی با پمپ‌های حرارتی می‌توان در هزینه‌ها و مصرف انرژی صرفه‌جویی شود [۴۳]. به طور کلی در پمپ‌های حرارتی خورشیدی معمولی، کلکتورهای خورشیدی و پمپ حرارتی به عنوان دو واحد جداگانه کار می‌کنند و سپس، در یک حلقه مبدل حرارتی انتقالی مخلوط می‌شوند تا گرمای خورشید را به محیط انتقال حرارت مورد استفادهٔ پمپ حرارتی منتقل کنند. با این‌حال، در نوع پمپ‌های حرارتی خورشیدی با انبساط مستقیم، جمع‌کننده‌های خورشیدی و پمپ حرارتی در یک واحد ادغام می‌شوند و مبرد از طریق کلکتورهای خورشیدی عبور می‌کند و به دلیل ورودی گرمای خورشیدی از مایع به گاز تغییر فاز می‌دهند [۴۳].

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مقاله روی قسمت‌های مختلف مصرف انرژی در فرایند تولید سرمایش و گرمایش صنایع غذایی متمرکزشده است. ابتدا تجهیزات و واحدهای عملیاتی که نقش مهمی در مصرف انرژی داشتند را ارزیابی شد. واحد برودت که شامل انواع چیلرها و فن کویل‌ها، واحد مبدل گرمایی که شامل انواع دیگ‌های بخار، پاستوریزاتورها و تبخیرکننده‌ها و واحد خشک‌کن که شامل انواع خشک‌کن‌های خورشیدی، کابینتی و تونلی بودند را مورد بررسی قرار گرفت و قواعد و روابط مربوط به عملکرد آن‌ها را به منظور بهینه کردن مصرف انرژی استفاده شده است. همچنین، پیشنهادهایی برای ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر با این سیستم‌ها را به همراه روابط مربوطه شرح داده شد.

با توجه اتلاف گرمای زیادی که در کارخانه‌های صنایع غذایی وجود دارد به نظر می‌رسد می‌توان از این گرمای دفع شده به منظور تولید سرما، گرمایش و قدرت استفاده کرد. به همین‌منظور، واحد تولید توان، حرارت و سرما را به عنوان یک بخش کمکی به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی در نظر گرفته و روابط بهینه‌سازی آن شرح داده شد. با توجه به‌مرور منابع مختلف به نظر می‌رسد در راستای تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش پتانسیل‌های زیادی وجود دارد که کمتر به آن توجه شده است. همچنین، در راستای استفاده از گرمای ازدست‌رفته در کارخانه‌های صنایع غذایی و همچنین، انرژی زمین‌گرمایی از پمپ حرارتی نیز به منظور تولید سرمایش و گرمایش می‌توان استفاده کرد. به نظر می‌رسد در واحدهایی که با ترکیب سیستم ترکیبی قدرت، گرمایش و سرمایش و پمپ حرارتی با استفاده از منابع تجدیدپذیر همراه باشد تأثیر بسزایی در صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه‌های کارخانه به همراه دارد.

۷. فهرست علائم

H_T : تشعشع خورشیدی بر واحد سطح برحسب $\frac{W}{m^2}$

A_c : مساحت کلکتور برحسب m^2

Q_u : گرما مفید کلکتور برحسبw

$(\tau\alpha)_e$: انتقال مؤثر، مقاومت در برابر جذب و نفوذ

τ : قسمتی از تابش خورشیدی ورودی که به سطح جذب می‌شود.

U_L : ضریب تلفات کلی گرما برحسب$\frac{W}{m^2}$

T_a : دمای محیط

T_P: دمای متوسط بالا صفحه جذب‌کننده

K: دمای خروجی از مبدل زمین و هوا برحسب $T_{out,EAHE}$

F : شدت‌جریان خوراک ورودی $\frac{Kg}{s}$

ρ : دانسیتهٔ سیال $\frac{Kg}{m}$

T_1°C : دمای خوراک ورودی

T_2°C : دمای هدف مورد نظر

ΔHS : گرمای نهان بخار در حال کندانس kJ/kg

T_s°C : دمای بخار

d_m :قطر لوله

u : سرعت سیال در لوله‌ها $\frac{m}{s}$

n : تعداد مراحل عبور از لوله‌ها

MR : نسبت رطوبت (بدون بعد)

Mt : محتوای رطوبت در هر لحظه از فرایند خشک کردن (کیلوگرم آب/کیلوگرم مادهٔ جامد)

Me : محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم مادهٔ جامد)

Mo : محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم مادهٔ جامد)

I_rبرحسب: شدت تابش خورشید$\frac{W}{m^2}$

W عرض کانال(PV:متر)

$h_{r,pv-s}$ ضریب انتقال حرارت تابشی بین ماژول‌های PV و آسمان $\frac{W}{Km^2}$

$h_{r,pv-b}$ ضریب انتقال حرارت تابشی بین ماژول‌های PV و دیواره $\frac{W}{Km^2}$

h_w :ضریب تبادل حرارتی همرفت باد$\frac{W}{Km^2}$

T_{pv} دمای ماژول PV :

h_c : ضریب تبادل حرارتی همرفت کلکتور

: دمای هوا T_f

میزان اثربخشی مبدل زمین و هوا ε :

: ضریب تبادل حرارتی همرفتh

PV ضریب جذب ماژول α_{pv} :

PVبازده تبدیل الکتریکی ماژولη_{el} :

K: دمای ورودی از مبدل زمین و هوا برحسب $T_{in,EAHE}$

K: دمای زمین به عمق مورد نظر برحسب T_{soil}

$\frac{Kg}{s}$: نرخ جریان جرمی برحسب m

ضریب کارایی جمع‌کننده صفحه تختF_p :

منابع

[1].Fouladi J, AlNouss A, Al-Ansari T. Sustainable energy-water-food nexus integration and optimisation in eco-industrial parks. Computers & Chemical Engineering. 2021;146:107229.

[2].Rahman MM, Khan I, Field DL, Techato K, Alameh K. Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. Renewable Energy. 2022;188:731-49.

[3].Grossmann L, Hinrichs J, Weiss J. Technologies for sustainable heat generation in food processing. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022;21(6):4971-5003.

[4].Hechelmann R-H, Seevers J-P, Otte A, Sponer J, Stark M. Renewable energy integration for steam supply of industrial processes—a food processing case study. Energies. 2020;13(10):2532.

[5].Inayat A, Raza M. District cooling system via renewable energy sources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;107:360-73.

[6].Rech S, Finco E, Lazzaretto A. A multicriteria approach to choose the best renewable refrigeration system for food preservation. Renewable Energy. 2020;154:368-84.

[7].Rosiek S, Romero-Cano MS, Puertas AM, Batlles FJ. Industrial food chamber cooling and power system integrated with renewable energy as an example of power grid sustainability improvement. Renewable Energy. 2019;138:697-708.

[8].Fikiin K, Stankov B, Evans J, Maidment G, Foster A, Brown T, et al. Refrigerated warehouses as intelligent hubs to integrate renewable energy in industrial food refrigeration and to enhance power grid sustainability. Trends in Food Science & Technology. 2017;60:96-103.

[9].Edwin M, Sekhar SJ. Thermo-economic assessment of hybrid renewable energy based cooling system for food preservation in hilly terrain. Renewable Energy. 2016;87:493-500.

[10]. Verzijlbergh RA, Lukszo Z, editors. Conceptual model of a cold storage warehouse with PV generation in a smart grid setting. 2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC); 2013: IEEE.

[11]. Meneghetti A, Monti L. Greening the food supply chain: an optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses. International Journal of Production Research. 2015;53(21):6567-87.

[12]. Patel A. Enhancing Heat Transfer Efficiency in Solar Thermal Systems Using Advanced Heat Exchangers. Multidisciplinary International Journal of Research and Development (MIJRD). 2023;2(06):31-51.

[13]. Tuncer AD, Mavuş R, Gökçe C, Koşan M, Aktaş M. Efficient Energy Systems Models for Sustainable Food Processing. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. 2019;7(8):1138-45.

[14]. Fluch J, Brunner C, Grubbauer A. Potential for energy efficiency measures and integration of renewable energy in the European food and beverage industry based on the results of implemented projects. Energy Procedia. 2017;123:148-55.

[15]. Pimentel D, Williamson S, Alexander CE, Gonzalez-Pagan O, Kontak C, Mulkey SE. Reducing energy inputs in the US food system. Human ecology. 2008;36:459-71.

[16]. Pestisha A, Gabnai Z, Chalgynbayeva A, Lengyel P, Bai A. On-farm renewable energy systems: A systematic review. Energies. 2023;16(2):862.

[17]. Wang L. Energy efficiency technologies for sustainable food processing. Energy efficiency. 2014;7(5):791-810.

[18]. Rehman HU, Naseer F, Ali HM. An experimental case study of solar food dryer with thermal storage using phase change material. Case Studies in Thermal Engineering. 2023;51:103611.

[19]. Chen C, Pan Z. Cannabidiol and terpenes from hemp–ingredients for future foods and processing technologies. Journal of Future Foods. 2021;1(2):113-27.

[20]. Eswara AR, Ramakrishnarao M. Solar energy in food processing—a critical appraisal. Journal of food science and technology. 2013;50(2):209-27.

[21]. Djaeni M, Sasongko SB, van Boxtel AJB. Enhancement of Energy Efficiency and Food Product Quality Using Adsorption Dryer with Zeolite. International Journal of Renewable Energy Development; Vol 2, No 2 (2013): July 2013DO - 1014710/ijred2281-86. 2013.

[22]. Bal LM, Satya S, Naik S. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010;14(8):2298-314.

[23]. Qu H, Masud M, Islam M, Khan MIH, Ananno AA, Karim A. Sustainable food drying technologies based on renewable energy sources. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022;62(25):6872-86.

[24]. Lakshmi D, Muthukumar P, Layek A, Nayak PK. Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. Solar Energy. 2019;188:507-18.

[25]. Wang J-J, Jing Y-Y, Zhang C-F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm. Applied Energy. 2010;87(4):1325-35.

[26]. Cho H, Mago PJ, Luck R, Chamra LM. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. Applied Energy. 2009;86(12):2540-9.
[27]. Badiei A, Akhlaghi YG, Zhao X, Shittu S, Xiao X, Li J, et al. A chronological review of advances in solar assisted heat pump technology in 21st century. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020;132:110132.
[28]. Abdullah S, Zubir MNBM, Muhamad MRB, Newaz KMS, Öztop HF, Alam MS, et al. Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review. Energy and Buildings. 2023:112805.
[29]. Ghalandari M, Irandoost Shahrestani M, Maleki A, Safdari Shadloo M, El Haj Assad M. Applications of intelligent methods in various types of heat exchangers: a review. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021:1-12.
[30]. Durisch W, Bitnar B, Mayor J-C, Kiess H, Lam K-h, Close J. Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation. Solar energy materials and solar cells. 2007;91(1):79-84.
[31]. Nandakumar P, Loganathan D, Natarajan DP, Manikandan P. 6 - Shell and tube heat exchangers in the food industry. In: Jafari SM, editor. Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water: Woodhead Publishing; 2023. p. 153-79.
[32]. Rashidi M, Mahariq I, Alhuyi Nazari M, Accouche O, Bhatti MM. Comprehensive review on exergy analysis of shell and tube heat exchangers. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022;147(22):12301-11.
[33]. El-Said EMS, Elshamy SM, Hegazi AA. Experimental investigation on thermo-hydraulic performance of a helical plate heat exchanger. Experimental Heat Transfer. 2023;36(4):453-72.
[34]. Karsli GT, Cekmecelioglu D. Design and simulation of heat exchangers for the food industry. Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water: Elsevier; 2023. p. 67-108.
[35]. Mazidi Mohammad FG, Amin Taheri Ground, Seyed Mehdi Jafari. Optimization of shell and tube heat exchanger for use in tomato paste production operations. Sixth National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering; Tehran: University of Tehran; 2011.
[36]. Natarajan SK, Elangovan E, Elavarasan RM, Balaraman A, Sundaram S. Review on solar dryers for drying fish, fruits, and vegetables. Environmental Science and Pollution Research. 2022;29(27):40478-506.
[37]. Delfiya DA, Prashob K, Murali S, Alfiya P, Samuel MP, Pandiselvam R. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Journal of Food Process Engineering. 2022;45(6):e13810.
[38]. Das BK, Al-Abdeli YM, Kothapalli G. Integrating renewables into stand-alone hybrid systems meeting electric, heating, and cooling loads: A case study. Renewable Energy. 2021;180:1222-36.
[39]. Khouya A. Effect of regeneration heat and energy storage on thermal drying performance in a hardwood solar kiln. Renewable Energy. 2020;155:783-99.
[40]. Khalil G. The integration of trigeneration systemproducing power, heat and cool into a compressor station: UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA; 2023.
[41]. Erixno O, Abd Rahim N, Ramadhani F, Adzman NN. Energy management of renewable energy-based combined heat and power systems: A review. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022;51:101944.
[42]. Bloess A, Schill W-P, Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. Applied Energy. 2018;212:1611-26.
[43]. Fan Y, Zhao X, Han Z, Li J, Badiei A, Akhlaghi YG, et al. Scientific and technological progress and future perspectives of the solar assisted heat pump (SAHP) system. Energy. 2021;229:120719.