



Novel Technologies for Simultaneous Recovery of Latent Heat and Water from Industrial Flue Gases: A Review Study on Condensing Heat Exchangers

Nader Rahbar¹

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
Semnan, Iran, Na.Rahbar@iau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 24 October 2025
Accepted 1 December 2025
Available Online 09
January 2026

Keywords

Latent Heat Recovery
Condensing water
Industrial Flue Gas
Condensing Heat Exchanger
Energy Efficiency

ABSTRACT

Today, facing the dual global challenges of energy efficiency and water scarcity, waste heat recovery, particularly the latent heat present in industrial flue gases, has become a vital solution. Moist flue gases, containing significant amounts of water vapor, represent a high-potential source for the simultaneous recovery of both water and thermal energy. The objective of this article is to provide a comprehensive and analytical review of Condensing Heat Exchangers (CHEs) as a leading technology for this purpose. This study focuses on the thermodynamic operating principles (cooling below the dew point), design characteristics, key advantages, and fundamental challenges of CHE systems. The review indicates that implementing CHEs, by recovering both sensible and latent heat, leads to a significant increase in process thermal efficiency (10-15%) and also results in the production of substantial amounts of reusable water (with reported recovery rates up to 89%). Furthermore, the condensation process aids in the co-removal of pollutants such as SO_x, particulates, and the elimination of visible white smoke. However, critical technical challenges, primarily acidic corrosion from condensates and flue gas pressure drop, necessitate careful material selection (e.g., stainless steel) and optimal design. From an economic perspective, while the initial capital expenditure (CAPEX) for these systems is high, the resulting fuel and water savings often lead to attractive payback periods (2-5 years). By reviewing recent research advancements (such as system integration with Organic Rankine Cycles and design improvements), this article concludes that CHEs are an effective and economically viable solution for sustainable industrial development, though their successful implementation demands an integrated techno-economic approach.

Please cite this article using:

Nader Rahbar, Novel Technologies for Simultaneous Recovery of Latent Heat and Water from Industrial Flue Gases: A Review Study on Condensing Heat Exchangers, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 16, No. 3, pp. 8-27, 2025 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



فناوری‌های نوین در بازیابی همزمان گرمای نهان و آب از گازهای دودکش صنعتی: یک مطالعه مروری بر مبدل‌های چگالشی

نادر رهبر^۱

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

سمنان، پست الکترونیکی: Na.Rahbar@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲ آبان ۱۴۰۴ پذیرش: ۱۰ آذر ۱۴۰۴ ارائه در سایت: ۱۹ دی ۱۴۰۴	امروزه، در مواجهه با چالش‌های دوگانه جهانی بهره‌وری انرژی و بحران کم‌آبی، بازیابی گرمای اتلافی، به‌ویژه گرمای نهان موجود در گازهای دودکش صنعتی، به یک راهکار حیاتی تبدیل شده است. گازهای دودکش مرطوب که حاوی مقادیر قابل توجهی بخار آب هستند، پتانسیل بالایی برای بازیابی همزمان آب و انرژی محسوب می‌شوند. هدف از این مقاله ارائه یک مرور جامع و تحلیلی بر فناوری مبدل‌های حرارتی چگالشی به عنوان یک فناوری پیشرو در این زمینه است. این مطالعه بر اصول عملکرد ترمودینامیکی (کاهش دما به زیر نقطه شبنم)، ویژگی‌های طراحی، مزایای کلیدی و چالش‌های اساسی این سیستم‌ها تمرکز دارد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پیاده‌سازی مبدل‌های چگالشی، با بازیابی همزمان گرمای محسوس و نهان، منجر به افزایش چشمگیر بازده حرارتی فرآیند (۱۰ تا ۱۵ درصد) و همچنین تولید مقادیر قابل توجهی آب قابل استفاده مجدد (با نرخ بازیابی گزارش شده تا ۸۹ درصد) می‌شود. علاوه بر این، فرآیند میعان به حذف همزمان آلاینده‌هایی مانند SOx، ذرات معلق و حذف دود سفید قابل مشاهده کمک شایانی می‌کند. با این حال، چالش‌های فنی مهمی نظیر خوردگی اسیدی ناشی از میعانات و افت فشار گاز دودکش، نیازمند انتخاب دقیق مواد مقاوم (مانند فولاد ضد زنگ) و بهینه‌سازی طراحی هستند. از منظر اقتصادی، اگرچه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX) این سیستم‌ها بالا است، اما صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف سوخت و بازیابی آب، منجر به دوره‌های بازگشت سرمایه جذاب (۲ تا ۵ سال) می‌گردد. این مقاله ضمن مرور آخرین دستاوردهای پژوهشی (مانند یکپارچه‌سازی با سیکل رانکین آلی و بهبود طراحی)، نشان می‌دهد که مبدل‌های چگالشی راهکاری مؤثر و اقتصادی برای توسعه پایدار صنعتی هستند، اما پیاده‌سازی موفق آن‌ها نیازمند یک رویکرد یکپارچه فنی و اقتصادی است.

کلیدواژگان

بازیابی گرما

آب تقطیر شده

گاز دودکش صنعتی

مبدل حرارتی چگالشی

بهره‌وری انرژی

به ویژه در مناطق کم‌آب، به شمار می‌رود.

۱-مقدمه

بازیابی حرارت از گاز دودکش نیز شامل جذب انرژی حرارتی است که در غیر این صورت به محیط زیست هدر می‌رود. این حرارت بازیابی شده می‌تواند در همان تأسیسات برای گرمایش فضا، پیش‌گرمایش هوای احتراق یا آب ورودی، تولید بخار، یا تولید برق از طریق سیستم‌های بازیابی حرارت اتلافی مورد استفاده قرار گیرد. دمای گاز دودکش تا حد زیادی تعیین‌کننده بازده و روش بازیابی حرارت است، به طوری که جریان‌های با دمای بالاتر پتانسیل بازیابی بیشتری را ارائه می‌دهند.

گاز دودکش یا گاز خروجی حاصل از فرآیندهای احتراق در تأسیسات صنعتی، حاوی منابع ارزشمندی است که در گذشته مستقیماً وارد جو می‌شدند: بخار آب و انرژی حرارتی. فرآیندهای صنعتی مانند تولید برق، ساخت فولاد، تولید مواد شیمیایی و تولید سیمان، مقادیر زیادی گاز دودکش با دمای بین ۱۵۰ تا بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (بسته به نوع فرآیند) تولید می‌کنند. این جریان گازی معمولاً حاوی ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی بخار آب است که پتانسیل قابل توجهی برای تأمین آب،

که در غیر این صورت به اتمسفر هدر می‌رود. انرژی موجود در گاز دودکش به دو شکل اصلی وجود دارد:

- حرارت محسوس^۱: این بخش از انرژی مستقیماً با دمای بالای گاز در ارتباط است. به عبارت دیگر، انرژی است که با خنک کردن گاز (بدون تغییر فاز) می‌توان آن را بازیابی کرد.
 - حرارت نهان^۲: این بخش از انرژی، انرژی نهفته در بخار آب موجود در گاز دودکش است که عمدتاً حاصل فرآیند احتراق سوخت‌های هیدروکربنی (مانند گاز طبیعی) می‌باشد. بخش بزرگی از اتلاف حرارت در دیگ‌های بخار و کوره‌های صنعتی، مربوط به همین گرمای نهان بخار آب است که همراه گازهای خروجی تخلیه می‌شود.
- بازیابی حرارت محسوس به سادگی با هر نوع مبدل حرارتی امکان‌پذیر است، اما چالش اصلی و مزیت رقابتی سیستم‌های چگالشی، توانایی آن‌ها در بازیابی «گرمای نهان» است.

۱-۲- نقطه شبنم

کلید دستیابی به گرمای نهان، رساندن دمای گاز دودکش به نقطه شبنم^۳ یا پایین‌تر از آن است. نقطه شبنم، دمایی است که در آن، بخار آب موجود در مخلوط گاز دودکش شروع به تغییر فاز داده و به مایع (آب تقطیر شده) تبدیل می‌شود [۱]. این دما یک مقدار ثابت نبوده و عمدتاً توسط فشار جزئی بخار آب در گاز دودکش تعیین می‌شود؛ هرچه رطوبت گاز (درصد بخار آب) بالاتر باشد، نقطه شبنم نیز بالاتر خواهد بود. با این حال، در بسیاری از کاربردهای صنعتی معمول، نقطه شبنم بخار آب در گاز دودکش در حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

۲-۲- فرآیند انتقال حرارت محسوس و نهان

هنگامی که گاز دودکش داغ وارد یک مبدل حرارتی چگالشی می‌شود و در تماس با سطح سردی قرار می‌گیرد (مانند لوله‌ها یا صفحات حاوی آب خنک‌کننده)، فرآیند انتقال حرارت در دو مرحله مجزا رخ می‌دهد:

- ناحیه خشک (سرمایش محسوس): در ابتدای مبدل، تا زمانی که دمای سطح گاز دودکش بالاتر از نقطه شبنم باشد، فقط انتقال حرارت محسوس رخ می‌دهد. گاز داغ خنک می‌شود و دمای آن کاهش می‌یابد.

خنک‌سازی تا زیر نقطه شبنم تمرکز دارد، که معمولاً بسته به ترکیب و فشار گاز، حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. آب میعان شده می‌تواند تصفیه شده و به عنوان آب فرآیند، آب جبرانی برج خنک‌کننده، یا برای سایر کاربردهای صنعتی استفاده شود و نیاز به مصرف آب شیرین را کاهش دهد. کندانسورهای مدرن گاز دودکش می‌توانند ۵۰ تا ۸۰ درصد بخار آب موجود در جریان خروجی را بازیابی کنند که منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب در عملیات‌های بزرگ صنعتی می‌شود.

ادغام سیستم‌های ترکیبی بازیابی حرارت و آب رویکردی در حال تکامل است که حداکثر کارایی منابع را با حداقل سرمایه‌گذاری اولیه به ارمغان می‌آورد. این سیستم‌های بازیابی دوگانه به طور همزمان اهداف بهره‌وری انرژی و صرفه‌جویی در مصرف آب را پوشش می‌دهند و برای بسیاری از تأسیسات صنعتی که با افزایش هزینه‌های خدمات رفاهی و مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر روبرو هستند، بازده سرمایه‌گذاری جذابی را ارائه می‌دهند. فناوری‌های مختلفی برای بازیافت آب و حرارت از گازهای دودکش صنعتی توسعه پیدا کرده‌اند که هر کدام مزایا و معایب خاص خودشان را داشته و در کارایی بازیابی، متفاوت عمل می‌کنند. سه دسته اصلی از این فناوری‌ها عبارتند از:

- مبدل‌های حرارتی میعانی
- سیستم‌های مبتنی بر غشا
- روش‌های جذبی

به طور کلی، انتخاب بهترین فناوری به عواملی نظیر ترکیب گاز دودکش، دمای آن، میزان آب و حرارت مورد نیاز برای بازیافت، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه، و همچنین مقررات

زیست‌محیطی بستگی دارد. با پیشرفت فناوری، سیستم‌های ترکیبی و بهینه‌تر نیز در حال توسعه هستند تا حداکثر بهره‌وری را فراهم کنند.

هدف از این مقاله مروری بر پیشینه تحقیق در خصوص روش‌های بازیافت آب و حرارت از دودکش‌های صنعتی و گازهای جاری در آن با استفاده از مبدل‌های حرارتی میعانی می‌باشد.

۲- اصول ترمودینامیکی حاکم بر بازیابی حرارتی چگالشی

هدف اصلی در بازیابی حرارت از گازهای دودکش صنعتی، جذب حداکثری انرژی موجود در این گازهای داغ خروجی است

¹ Sensible Heat

² Latent Heat

³ Dew Point

- ناحیه مرطوب (سرمايش چگالشی): به محض اینکه دمای گاز دودکش به زیر نقطه شبنم می‌رسد، بخار آب شروع به میعان بر روی سطوح سرد مبدل می‌کند. این فرآیند تغییر فاز (چگالش)، مقدار قابل توجهی انرژی، یعنی «گرمای نهان»، را آزاد می‌کند. در این ناحیه، هم گرمای محسوس (به دلیل ادامه سرد شدن گاز) و هم گرمای نهان (به دلیل میعان) به طور همزمان به سیال خنک‌کننده منتقل می‌شوند.
 - بنابراین، مبدل‌های حرارتی چگالشی با فراهم آوردن امکان کاهش دمای گاز دودکش به زیر نقطه شبنم، نه تنها حرارت محسوس را (مانند مبدل‌های سنتی) بازیابی می‌کنند، بلکه بخش قابل توجهی از انرژی نهان بخار آب را نیز جذب کرده و همزمان منجر به تولید آب تقطیر شده می‌شوند. این فرآیند پیچیده، یک پدیده انتقال همزمان حرارت و جرم محسوب می‌شود که تحلیل آن نیازمند در نظر گرفتن نظریه لایه مرزی و مقاومت‌های ناشی از لایه مایع تقطیر شده بر سطح مبدل است.
- ### ۳- مبدل‌های حرارتی چگالشی
- مبدل‌های حرارتی چگالشی^۱ با کاهش دمای گاز دودکش به زیر نقطه شبنم، باعث میعان بخار آب موجود در آن می‌شوند. این فرآیند منجر به آزادسازی گرمای نهان بخار آب می‌شود که می‌توان آن را بازیافت کرد. بازیابی حرارت و آب در مبدل‌های حرارتی چگالشی از گاز دودکش فرآیندی است که بر پایه کاهش دمای گاز دودکش به زیر نقطه شبنم بخار آب موجود در آن انجام می‌شود. گاز دودکش پس از فرآیندهای احتراق، مانند آنچه در دیگ‌ها رخ می‌دهد، حاوی مقدار قابل توجهی بخار آب است. این بخار آب، به همراه گازهای دیگر مانند نیتروژن، دی‌اکسید کربن، و اکسیژن، و همچنین مقادیر کمی ذرات ریز، اسیدها و سایر آلاینده‌ها، توسط دودکش از سیستم خارج می‌شود. فرآیند انتقال حرارت و میعان در مبدل‌های چگالشی به شرح زیر است [۲، ۳]:
- انواع حرارت در گاز دودکش: گاز دودکش داغ حاوی دو نوع اصلی حرارت است: حرارت محسوس (مربوط به دمای گاز) و حرارت نهان (مربوط به انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب). هرچند به علت بالا بودن دمای دودکش، حرارت محسوس موجود در جریان خروجی هوا قابل توجه است، اما، بخش
- بزرگی از اتلاف حرارت از دیگ‌ها مربوط به گرمای نهان بخار آب است.
- کاهش دما تا نقطه شبنم: برای بازیافت گرمای نهان، دمای گاز دودکش باید به حدی کاهش یابد که بخار آب شروع به میعان کند، یعنی به زیر نقطه شبنم بخار آب برسد. نقطه شبنم بخار آب در گاز دودکش معمولاً حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس است.
 - نقش مبدل حرارتی چگالشی: مبدل حرارتی چگالشی وسیله‌ای است که گاز دودکش داغ از یک سمت آن عبور می‌کند و یک سیال خنک‌کننده (معمولاً آب یا محلول گلیکول) از سمت دیگر آن جریان می‌یابد. این مبدل حرارتی امکان انتقال گرما از گاز دودکش به سیال خنک‌کننده را فراهم می‌کند.
 - انتقال حرارت محسوس و نهان: هنگامی که گاز دودکش وارد مبدل چگالشی می‌شود، سیال خنک‌کننده شروع به جذب گرما از آن می‌کند. اگر دمای گاز دودکش بالاتر از نقطه شبنم باشد، در ابتدا فقط گرمای محسوس (مربوط به کاهش دمای گاز) منتقل می‌شود. هنگامی که دمای گاز به زیر نقطه شبنم کاهش می‌یابد، بخار آب موجود در گاز شروع به میعان (چگالش) می‌کند و در این فرآیند، گرمای نهان خود را آزاد می‌کند که این گرما نیز توسط سیال خنک‌کننده جذب می‌شود. بنابراین، در زیر نقطه شبنم، هم گرمای محسوس و هم گرمای نهان به طور همزمان منتقل می‌شوند.
 - تشکیل و جمع‌آوری مایع چگالیده: میعان بخار آب منجر به تشکیل آب مایع (چگالیده) بر روی سطوح مبدل حرارتی می‌شود. این مایع چگالیده سپس می‌تواند جمع‌آوری شود.
- ### ۳-۱- مزایای بازیابی حرارت و آب با مبدل‌های حرارتی چگالشی
- مهمترین مزایای استفاده از مبدل‌های حرارتی چگالشی عبارتند از [۲، ۳]:
- قابلیت بازیافت آب: آب بازیابی شده می‌تواند برای مصارف مختلفی در نیروگاه یا صنعت مورد استفاده قرار گیرد. کیفیت این آب می‌تواند مشابه آب خروجی سیستم‌های اسمز معکوس بوده و می‌تواند به عنوان آب جبرانی برای برج‌های خنک‌کننده یا مصارف دیگر فرآیندی استفاده شود.
 - بازدهی بالا در بازیافت حرارت: گرمای جذب شده توسط سیال خنک‌کننده را می‌توان برای پیش‌گرم کردن آب

¹ Condensing Heat Exchangers (CHE)

- ورودی دیگ‌ها، گرمایش آب سیستم گرمایش منطقه‌ای، یا به عنوان منبع حرارتی برای سیکل‌های تولید برق مانند سیکل رانکین آلی^۱ استفاده نمود. این امر می‌تواند باعث افزایش کارایی کلی سیستم و صرفه‌جویی در مصرف سوخت شود. همچنین، این امر به خصوص در دماهای پایین‌تر گاز دودکش نیز قابل توجه بوده و گرمای نهان زیادی را می‌توان از حرارت خروجی از دودکش بازیافت نمود.
 - حذف آلاینده‌ها: آلاینده‌های موجود در گاز دودکش مانند SO₂ و NO_x می‌توانند در مایع چگالیده حل شده و به این ترتیب از گاز دودکش حذف گردند. این فرآیند می‌تواند به کاهش انتشار آلاینده‌ها و حذف دود سفید قابل مشاهده از دودکش کمک کند.
 - البته استفاده از این روش ملاحظات و چالش‌های زیر را نیز به همراه خود دارد:
 - خطر خوردگی: به دلیل میعان اسیدها در دمای پایین، انتخاب مواد مقاوم در برابر خوردگی برای ساخت این مبدل‌ها بسیار مهم است.
 - نیاز به فضای کافی: ممکن است به فضای نسبتاً زیادی برای نصب نیاز داشته باشند.
 - مبدل‌های سنتی ممکن است حجم بزرگی داشته، کارایی پایینی در انتقال حرارت داشته و به راحتی دچار گرفتگی شوند.
 - مبدل‌های فشرده‌تر می‌توانند سطح انتقال حرارت بیشتری در واحد حجم فراهم کنند، اما ساختار پیچیده‌تری دارند و ممکن است در شرایط گاز دودکش غیرتمیز دچار گرفتگی و خوردگی در دماهای پایین شوند.
 - اضافه کردن مبدل‌های چگالشی می‌تواند باعث افزایش افت فشار گاز دودکش شود که نیازمند توان بیشتر برای فن‌ها است.
 - خوردگی در دماهای پایین به دلیل تشکیل اسید در مایع چگالیده می‌تواند یک نگرانی باشد.
 -
- ۲-۳- انواع مبدل‌های حرارتی چگالشی**
- منابع علمی و مقالات منتشر شده در این خصوص به انواع مختلفی از این مبدل‌ها اشاره دارند که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مبدل‌های لوله‌ای^۲
- مبدل‌های صفحه‌ای^۳
- مبدل‌های شکاف باریک^۴
- کندانسورهای غشایی انتقالی^۵
- سیستم‌های تماس مستقیم (مانند برج‌های پاششی یا بسته‌بندی شده) که سیال خنک کننده مستقیماً با گاز در تماس است،
- سیستم‌های تماس غیرمستقیم (مبدل‌های حرارتی استاندارد) که سیال خنک کننده و گاز توسط یک دیواره از هم جدا هستند.
- سیستم‌های هیبریدی که تماس مستقیم و غیرمستقیم را ترکیب می‌کنند.

۳-۳- بازیابی حرارت گاز دودکش با مبدلهای حرارتی چگالشی: ملاحظات عملکردی و اقتصادی

همانطور که در بخش قبل شرح داده شد، سیستم‌های بازیابی حرارت گازهای دودکش برای جذب انرژی از گازهای خروجی، که در غیر این صورت به اتمسفر هدر می‌روند، طراحی شده‌اند. یکی از روش‌های اصلی بازیابی بخش قابل توجهی از این انرژی، به‌ویژه در سوخت‌هایی مانند گاز طبیعی یا زیست‌توده، که مقدار زیادی بخار آب در فرآیند احتراق تولید می‌کنند، تقطیر است. با سرد کردن گاز دودکش زیر نقطه شبنم، علاوه بر بازیابی گرمای محسوس، گرمای نهان تبخیر بخار آب نیز بازیابی می‌شود.

۳-۴- ملاحظات عملکردی سیستم‌های بازیابی حرارت از گازهای دودکش

بازیابی حرارت از گاز دودکش می‌تواند بازده حرارتی کلی سیستم را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد، به‌طوری که در برخی کاربردها، بهبود بازده از ۱۰ درصد تا ۱۵ درصد امکان‌پذیر است. حرارت بازیابی شده می‌تواند برای پیش‌گرم کردن هوای احتراق، گرم کردن آب تغذیه بویلر، سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای، یا تأمین حرارت چرخه رانکین آلی^۶ برای تولید برق استفاده شود. میزان حرارت بازیابی شده به عواملی مانند دمای اولیه گاز دودکش، دمای آب خنک‌کننده، دبی جریان آب و رطوبت گاز

² Tubular heat exchangers

³ Plate heat exchangers

⁴ Narrow gap heat exchangers

⁵ Transport membrane condensers

⁶ Organic Rankin cycle (ORC)

¹ Organic rankine cycle (ORC)

دودکش بستگی دارد. دمای پایین‌تر آب خنک‌کننده و رطوبت بالاتر گاز، معمولاً منجر به تقطیر بیشتر و بازیابی حرارت مؤثرتر می‌شود. همچنین، دمای گاز دودکش می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی، مثلاً از ۱۸۰ به ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد در کوره‌های پالایشگاه یا از ۱۶۰ به حدود ۵۳ درجه سانتی‌گراد در نیروگاه‌ها، کاهش یابد که این خنک‌سازی عمیق برای آغاز فرآیند تقطیر ضروری است [۴].

۳-۴-۱- فرآیند تقطیر

همانطور که در قبل شرح داده شد، تقطیر زمانی آغاز می‌شود که دمای گاز دودکش زیر نقطه شبنم آن قرار گیرد. نقطه شبنم عمدتاً توسط فشار جزئی بخار آب در گاز دودکش تعیین می‌شود. این فرآیند شامل انتقال گرمای محسوس (خنک‌کردن گاز) و انتقال گرمای نهان (آزادسازی انرژی در طی تغییر فاز بخار آب به مایع) است. برای طراحی و پیش‌بینی عملکرد مبدل‌های حرارتی تقطیرکننده، از مدل‌های انتقال حرارت و جرم مبتنی بر نظریه لایه مرزی و قیاس انتقال حرارت/جرم استفاده می‌شود. این مدل‌ها مقاومت‌هایی مانند لایه مایع تقطیر و لایه گاز غیرقابل تقطیر در سطح مشترک را در نظر می‌گیرند [۵، ۶].

۳-۴-۲- انواع مبدل‌های حرارتی

انواع مبدل‌های حرارتی مورد استفاده شامل مبدل‌های حرارتی مستقیم، غیر مستقیم، ترکیبی و غشایی هستند. در مبدل‌های غیرمستقیم (مانند مبدل‌های پوسته و لوله، صفحه‌ای و شکاف باریک) گاز دودکش و سیال خنک‌کننده مستقیماً با هم مخلوط نمی‌شوند. مزایای آنها شامل قابلیت استفاده در اختلاف فشارهای بالا و جداسازی سیالات است. معایب مبدل‌های سنتی شامل حجم بزرگ و بازده حرارتی پایین‌تر نسبت به طرح‌های فشرده است.

مبدل‌های مستقیم (مانند برج‌های اسپری یا برج‌های پک شده) امکان انتقال حرارت بهتر را به دلیل تماس مستقیم فراهم نموده و برای بازیابی همزمان حرارت و جذب آلاینده‌ها مناسب هستند. سیستم‌های ترکیبی ترکیب دو مبدل فوق بوده و می‌توانند مزایای هر دو را (مانند خنک‌سازی اولیه در مبدل‌های غیرمستقیم و خنک‌سازی عمیق‌تر و حذف آلاینده‌ها در مبدل‌های مستقیم) داشته باشد. مبدل‌های غشایی نیز از غشاهای انتخابی برای جداسازی بخار آب استفاده کرده و می‌توانند آب باکیفیت تولید کنند.

۳-۴-۳- حذف آلاینده‌ها

تقطیر گاز دودکش می‌تواند ذرات ریز، گازهای اسیدی (SO_x)، HCl و ترکیبات محلول مانند NO_x و SO_2 را با حل کردن آنها در آب تقطیرشده حذف کند. سیستم‌های تماس مستقیم یا ترکیبی، به‌ویژه با جاذب‌های شیمیایی مانند NaOH ، می‌توانند بازده حذف SO_2 را تا بیش از ۹۰٪ افزایش دهند [۷، ۸].

۳-۴-۴- بازیابی آب

در روش استفاده از مبدل‌های حرارتی چگالشی، مقدار قابل‌توجهی از بخار آب به صورت مایع، تقطیرشده و بازیابی می‌شود. این مقدار از بیش از ۶۰٪ در مبدل‌های شکاف باریک تا مقداری ۵۸ تا ۹۰ درصد در کوره‌های پالایشگاه گزارش شده است. کیفیت آب بازیابی‌شده می‌تواند برای استفاده مجدد مثلاً به عنوان آب تغذیه برج خنک‌کننده یا بویلر پس از حداقل تصفیه مناسب باشد [۷].

۳-۴-۵- افت فشار

قرار دادن مبدل‌های حرارتی در مسیر گاز دودکش باعث افزایش افت فشار می‌شود که نیاز به مصرف انرژی بیشتر فن‌ها دارد. در مبدل‌های پوسته و لوله، افت فشار سمت پوسته می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سمت لوله باشد. بنابراین بهینه‌سازی افت فشار برای کاهش هزینه‌های عملیاتی مرتبط با مصرف انرژی فن‌ها ضروری است [۹].

۳-۴-۶- خوردگی

گاز دودکش حاوی ترکیبات اسیدی مانند SO_2 ، SO_3 و HCl است که در آب تقطیرشده حل شده و محلول‌های خورنده تشکیل می‌دهند. انتخاب مواد مقاوم به خوردگی (مانند فولاد ضدزنگ ۳۱۶ SS، آلیاژهای آلومینیوم یا پلاستیک‌هایی مانند پلی‌پروپیلن) یا استفاده از پوشش‌های محافظ برای افزایش عمر تجهیزات ضروری است [۷].

۳-۵- ملاحظات اقتصادی سیستم‌های بازیابی حرارت از گازهای دودکش

پیاده‌سازی سیستم‌های بازیابی حرارت از گازهای دودکش مستلزم بررسی دقیق جنبه‌های اقتصادی است که می‌توان آن را در قالب هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه^۱ و هزینه‌های عملیاتی^۲ مورد تحلیل قرار داد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه عمدتاً شامل خرید و نصب مبدل‌های حرارتی، تجهیزات جانبی مانند پمپ‌ها و فن‌ها، سیستم‌های کنترل و همچنین هزینه‌های مهندسی و

^۱ CAPEX (Capital Expenditure)

^۲ OPEX (Operational Expenditure)

طراحی این سیستم‌ها، مهندسان با چالش‌های متعددی روبرو هستند که از جمله می‌توان به حداکثرسازی بازیابی انرژی حرارتی، افزایش میزان بازیابی آب، کاهش انتشار آلاینده‌ها از یک سو، و از سوی دیگر به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی اشاره کرد. این تعادل پیچیده مستلزم توجه همزمان به چندین فاکتور کلیدی است.

یکی از مهم‌ترین تصمیمات در فرآیند بهینه‌سازی، انتخاب نوع مناسب مبدل حرارتی است. این انتخاب باید بر اساس تحلیل دقیق ویژگی‌های گازهای خروجی شامل دما، ترکیب شیمیایی، میزان رطوبت و غلظت آلاینده‌ها انجام شود. به عنوان مثال، در کاربردهایی که گازهای خروجی حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات اسیدی هستند، استفاده از مبدل‌های ساخته شده از فولادهای ضد زنگ گرید ۳۱۶ یا آلیاژهای مقاوم به خوردگی می‌تواند گزینه مناسبی باشد. همچنین، در مواردی که محدودیت فضا وجود دارد، مبدل‌های فشرده صفحه‌ای می‌توانند جایگزین مناسبی برای مبدل‌های پوسته و لوله سنتی باشند.

تنظیم پارامترهای عملیاتی سیستم نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بهینه آن دارد. کنترل دقیق دبی و دمای سیال خنک‌کننده، به ویژه در سیستم‌های تماس مستقیم، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان بازیابی حرارت و راندمان کلی سیستم داشته باشد. نسبت مایع به گاز (L/G) یکی از پارامترهای حیاتی در این سیستم‌هاست که باید با دقت محاسبه و تنظیم شود. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که انحراف در تنظیم این پارامتر می‌تواند تا ۲۰ درصد بر راندمان سیستم تأثیر بگذارد.

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی این سیستم‌ها، یافتن نقطه تعادل بهینه بین انتقال حرارت مؤثر و حداقل کردن افت فشار است. افزایش بیش از حد سرعت گاز در مبدل اگرچه می‌تواند ضریب انتقال حرارت را بهبود بخشد، اما از طرف دیگر باعث افزایش قابل توجه افت فشار و در نتیجه افزایش مصرف انرژی فن‌ها می‌شود. استفاده از روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی CFD می‌تواند به مهندسان در یافتن طراحی بهینه کمک کند.

مسئله خوردگی نیز از جمله مواردی است که نیازمند توجه ویژه است. انتخاب مواد مناسب برای ساخت تجهیزات باید بر اساس تحلیل دقیق ترکیب گازهای خروجی و شرایط عملیاتی صورت گیرد. در برخی موارد، استفاده از پوشش‌های محافظ ویژه یا سیستم‌های تزریق مواد خنثی‌کننده می‌تواند راهکار مناسبی

اجرای می‌شود. انتخاب نوع مبدل حرارتی و جنس مواد مورد استفاده تأثیر مستقیمی بر این هزینه‌ها دارد؛ به طوری که مبدل‌های فشرده با سطوح انتقال حرارت بالا اگرچه ممکن است هزینه اولیه بیشتری داشته باشند، اما معمولاً به دلیل بازده بالاتر، توجیه اقتصادی پیدا می‌کنند [۳، ۱۰].

از سوی دیگر، هزینه‌های عملیاتی این سیستم‌ها عمدتاً شامل مصرف انرژی الکتریکی برای راه‌اندازی پمپ‌ها و فن‌ها، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و همچنین هزینه‌های مربوط به تصفیه آب بازیابی شده می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که افزایش بازده حرارتی سیستم از طریق بازیابی انرژی، منجر به کاهش قابل توجه مصرف سوخت و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی می‌گردد. بر اساس مطالعات انجام شده، در برخی کاربردهای صنعتی، دوره بازگشت سرمایه این سیستم‌ها بین ۲ تا ۵ سال برآورد شده است که نشان‌دهنده توجیه‌پذیری اقتصادی آن‌ها می‌باشد [۷، ۱۰].

علاوه بر صرفه‌جویی مستقیم در هزینه‌های سوخت، مزایای جانبی دیگری همچون بازیابی آب و کاهش انتشار آلاینده‌ها نیز بر معادلات اقتصادی این سیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. در مناطق با محدودیت منابع آبی، ارزش اقتصادی آب بازیابی شده می‌تواند سهم قابل توجهی در توجیه‌پذیری پروژه داشته باشد. همچنین، کاهش انتشار گازهای آلاینده از طریق حذف ذرات و گازهای اسیدی، امکان استفاده از مشوق‌های زیست‌محیطی و اجتناب از پرداخت جریمه‌های مربوط به آلودگی را فراهم می‌آورد [۱۱]. در نهایت، تحلیل اقتصادی این سیستم‌ها باید با در نظر گرفتن شاخص‌هایی مانند ارزش خالص فعلی (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه انجام پذیرد. پارامترهای مؤثر بر اقتصاد پروژه شامل قیمت سوخت، هزینه برق، ارزش آب بازیابی شده و هزینه‌های نگهداری است که می‌بایست بر اساس شرایط خاص هر پروژه مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به روند افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تشدید مقررات زیست‌محیطی، انتظار می‌رود توجیه اقتصادی این سیستم‌ها در آینده نزدیک بهبود یابد.

۶-۳- رویکردی یکپارچه به اهداف فنی و اقتصادی سیستم‌های بازیاب حرارت

فرآیند بهینه‌سازی سیستم‌های بازیابی حرارت از گازهای دودکش نیازمند رویکردی سیستماتیک و همه‌جانبه است که بتواند بین ابعاد مختلف فنی و اقتصادی توازن برقرار کند. در

برای افزایش طول عمر تجهیزات باشد. این تصمیمات باید با در نظر گرفتن تحلیل هزینه-فایده دقیق اتخاذ شود.

در نهایت، بهینه‌سازی این سیستم‌ها باید با توجه به شرایط خاص محل نصب انجام شود. عواملی مانند دمای محیط، دسترسی به منابع آب، هزینه انرژی و آب در منطقه و مقررات زیست‌محیطی محلی می‌توانند تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر انتخاب راهکار بهینه داشته باشند. رویکردهای نوین بهینه‌سازی چندهدفه که با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته انجام می‌شوند، می‌توانند به مهندسان در یافتن بهترین راهکار با در نظر گرفتن تمامی این جوانب کمک کنند.

۴- مروری بر تحقیقات صورت گرفته بر مبدل‌های حرارتی چگالشی

در راستای توسعه مدل‌های تحلیلی برای مبدل‌های حرارتی چگالشی، مطالعه جونگ و همکاران [۱۲] بر ارائه یک مدل تحلیلی برای چگالش آب در حضور گازهای غیرقابل چگالش متمرکز است. این مدل بر پایه معادله انتقال کالبرن و هوگن^۱ بنا شده و هر دو انتقال حرارت محسوس و نهان را که طی آن چگالش آب بر روی سطح لوله به دلیل انتشار بخار در گاز دودکش رخ می‌دهد، در نظر می‌گیرد. حرارت کل منتقل شده به آب خنک‌کننده، مجموع این اجزا است. برای اعتبارسنجی، سیستم به حجم‌های کنترلی کوچک‌تر تقسیم شده و داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های احتراق زغال‌سنگ برای صحت‌گذاری مدل به کار رفته‌اند. یافته‌های این پژوهش حاکی از تطابق خوب مدل تحلیلی با دماهای اندازه‌گیری شده گاز دودکش و آب خنک‌کننده است؛ به طوری که داده‌های پیش‌بینی شده در محدوده انحراف معیار $\pm 10\%$ نسبت به نتایج تجربی قرار گرفتند. همچنین، میانگین اختلاف بین راندمان چگالش تجربی و پیش‌بینی شده تنها $2/5\%$ بود. این مطالعه نشان داد که عمده مقاومت حرارتی در مبدل حرارتی چگالشی از سمت گاز ناشی می‌شود.

چن و همکاران [۱۰] کاربردهای بویلرهای چگالشی در صنایع فرآیندی را مورد بررسی قرار داده و به طور خاص بر بازیابی حرارت از گاز دودکش حاوی بخار آب تمرکز نمودند. این مطالعه یک مقایسه اقتصادی-فنی بین کندانسورهای ساخته شده از فولاد ضد زنگ و فولاد کربن ارائه کرد. در این تحقیق، گاز دودکش در سمت پوسته و آب برگشتی در سمت لوله یک

مبدل حرارتی چگالشی فرض شده و لوله‌های با قطر کمتر برای بهبود انتقال حرارت، در عین بررسی افزایش احتمالی افت فشار، مدنظر قرار گرفتند. تحلیل مالی شامل هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری، عمر مفید مورد انتظار، و ارزش خالص فعلی (NPV) برای هر دو نوع کندانسور بود. نتایج نشان داد که کندانسورهای فولاد ضد زنگ، هزینه‌های سرمایه‌ای به مراتب بالاتری (حدود ۲.۵ برابر) نسبت به کندانسورهای فولاد کربن داشتند، در حالی که هزینه‌های عملیاتی و نگهداری نسبتاً مشابه بودند. با این حال، کندانسورهای فولاد ضد زنگ عمر مفید مورد انتظار بسیار طولانی‌تری (۱۵-۱۰ سال) در مقایسه با فولاد کربن (۵ سال) داشتند. تحلیل ارزش فعلی در طول عمر مفید هر کدام نشان داد که کندانسورهای فولاد کربن دوره بازگشت سریع‌تری داشتند، اما ارزش فعلی فولاد ضد زنگ نسبت به تغییرات نرخ بهره حساس‌تر بود. در مجموع، مشخص شد که مبدل‌های حرارتی چگالشی با بازیابی حرارت محسوس و نهان، می‌توانستند راندمان کلی سیستم را تا ۱۰ تا ۱۵٪ بهبود بخشند.

یوتیلا [۱۳] در رساله کارشناسی ارشد خود به بررسی اثرات چگالش گاز دودکش^۲ بر بازیابی حرارت و پیامدهای زیست‌محیطی آن، با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی و مدل‌سازی پراکندگی، پرداخت. این پژوهش FGC را به عنوان راه حلی برای برآوردن سطوح جدید انتشار آلاینده‌ها برای نیروگاه‌های احتراق بزرگ ارزیابی کرد. روش‌شناسی مطالعه شامل تحلیل انتشار گاز دودکش از یک نیروگاه مرجع تولید همزمان حرارت و برق (CHP) و شبیه‌سازی پراکندگی آن بود. همچنین، پتانسیل‌های بازیابی حرارت با استفاده از FGC به تنهایی و همچنین با تقویت توسط پمپ حرارتی یا رطوبت‌ساز هوای احتراق، با استفاده از داده‌های واقعی نیروگاه، محاسبه شده و موازنه‌های جرم و انرژی و جنبه‌های اقتصادی نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که FGC پتانسیل کاهش بیشتر انتشارات گاز دودکش (شامل SO₂، NO_x، HCl و ذرات معلق) را داشته و به برآورده شدن الزامات جدید کمک می‌کند. این فرآیند جریانی از میعانات تولید می‌کرد که نیاز به تصفیه داشت. بازیابی حرارت با FGC، مصرف سالانه سوخت را در زمانی که بویلر بر اساس تقاضای گرمایش منطقه‌ای کار می‌کرد، کاهش می‌داد، اما تولید برق را نیز تقلیل می‌داد. در مجموع، FGC انتخابی سودآور برای هر دو جنبه کاهش آلاینده‌ها و بازیابی حرارت ارزیابی شد. نقطه شبنم در این زمینه به عنوان دمای

² Flue gas condensing (FGC)

¹ Colburn and Hougén transport equation

اشباع متناظر با فشار جزئی بخار آب در گاز دودکش تعریف گردید.

ترهان و کوماکلی [۱۴] به طراحی نظری یک واحد بازیابی حرارت اتلافی (کندانسور گاز دودکش) برای یک سیستم گرمایش منطقه‌ای ۶۰ مگاواتی با سوخت گاز طبیعی پرداخته تا گرمای نهان را از گاز دودکش بازیافت کند. برای محاسبات طراحی، از یک روش تفاضل محدود یک‌بعدی استفاده شد. فرضیات شامل جریان متقاطع پایا و پادسو، جریان دوفازی در سمت گاز دودکش، جریان تک‌فازی در سمت آب خنک‌کننده، چگالش فیلمی و عدم وجود واکنش‌های شیمیایی بود. تحلیل اقتصادی با استفاده از تحلیل ارزش سالانه معادل^۱ برای پیش‌بینی دوره بازگشت سرمایه انجام شد. نتایج نشان داد که کندانسور گاز دودکش طراحی شده، دمای خروجی گاز دودکش را به حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. حرارت بازیابی شده می‌توانست آب گرم مصرفی ۱۸۴ واحد مسکونی را تامین کند و به ۱۰٪/۶ صرفه‌جویی در مصرف سوخت دست یابد.

زینالی و همکاران [۱۵] به صورت تجربی و عددی، تاثیر نوارهای تاب‌دار پیچیده^۲ را بر چگالش گاز دودکش مرطوب در یک لوله افقی بررسی کردند. آزمایش‌ها با استفاده از گاز دودکش احتراق گاز طبیعی در شرایط مختلف هوای اضافی و با نوارهای تاب‌دار متفاوت انجام شد. پارامترهایی نظیر ضریب انتقال حرارت، فاکتور اصطکاک، نسبت چگالش و سهم گرمای نهان مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت برای شبیه‌سازی جریان آشفته و چگالش توسعه یافت، که به ویژه برای ارزیابی افت فشار، که اندازه‌گیری آن در دماهای بالا به صورت تجربی دشوار است، مفید واقع شد. نتایج نشان داد که نوارهای تاب‌دار به طور کلی انتقال حرارت به خصوص در سطوح پایین‌تر هوای اضافی افزایش دادند. این بهبود برای ضریب انتقال حرارت جابجایی قابل توجه‌تر از ضریب انتقال حرارت چگالش بود. استفاده از نوارهای تاب‌دار باعث افزایش افت فشار و فاکتور اصطکاک نیز شد که این اثر برای نسبت‌های تاب‌دار بالاتر و هوای اضافی کمتر مشهودتر بود. نوارهای تاب‌دار همچنین نسبت چگالش را به ویژه در هوای اضافی کمتر بهبود بخشیدند. مدل عددی آنان برای فاکتور اصطکاک، تطابق خوبی با داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های هوای محیط نشان داد. مطالعه آنان نشان داد استفاده از نوارهای

پیچیده می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد سیستم‌های تراکم گازهای دودکش مورد توجه قرار گیرد. با این حال، انتخاب بهینه پارامترهای طراحی باید با توجه به شرایط عملیاتی خاص هر سیستم انجام پذیرد. نتایج حاصل می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی‌های آتی سیستم‌های بازیابی حرارت از گازهای دودکش باشد.

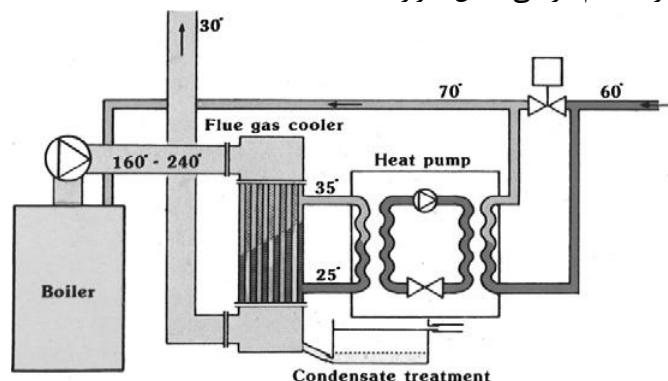
شانگچن و همکاران [۱۶] در یک مقاله مروری به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی گاز دودکش با رطوبت بالا، که از نیروگاه‌های ذغال سوز تخلیه می‌شود، به ویژه نقش آن در تشکیل مه دود^۳، و راهکارهای مقابله احتمالی پرداختند. آنان همچنین، ویژگی‌های جذب آئروسول‌ها، فرآیندهای انتقال جرم ناهمگن، و واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها (SO₃، SO₂، NO_x) را در حضور بخار آب را مورد بحث قرار دادند. راهکارهای مقابله‌ای بررسی شده شامل گرمایش مجدد گاز دودکش، رسوب‌دهی الکترواستاتیکی مرطوب، و فناوری حذف غبار الکترواستاتیکی در دمای بسیار پایین بود. نتایج نشان داد که گاز دودکش با رطوبت بالا به طور قابل توجهی در تشکیل مه دود نقش داشت. ذرات آئروسول رطوبت را جذب کرده، اندازه آنها افزایش می‌یافت و واکنش‌های ناهمگن شامل آلاینده‌هایی مانند SO₂ و NO_x را تسهیل می‌کردند و اسیدهایی (مانند H₂SO₄ و HNO₃) تشکیل می‌دادند. این فرآیند می‌توانست pH میعانات را کاهش دهد. راهکارهای مقابله‌ای مؤثر با هدف کاهش رطوبت، ذرات معلق و اجزای اسیدی در گاز دودکش پیش از تخلیه بود. حذف غبار الکترواستاتیکی در دمای بسیار پایین، گاز دودکش را برای کاهش مقاومت ویژه و حذف SO₃ سرد می‌کرد.

وانگ و همکاران [۱۷] بررسی نظری و ارائه مدل‌های ریاضی برای بویلرهای مجهز به سیستم‌های پمپ بخار^۴ جهت بازیابی کامل حرارت از گاز دودکش را در کانون توجه خود قرار دادند. این مقاله به تحلیل اصول ترمودینامیکی و چرخه رطوبت سیستم BEVP پرداخته و آن را به دو زیرسیستم تقسیم کرد: زیرسیستم رطوبت‌زدایی و زیرسیستم بازیابی کامل حرارت که به عنوان "پمپ بخار" عمل می‌کرد. بهینه‌سازی اصلی بر کاهش نیروی محرکه انتقال رطوبت در زیرسیستم بازیابی کامل حرارت استوار بود. یک مدل ریاضی برای توصیف کمی سیستم ایجاد شده و راه‌حل‌های تحلیلی از آن استخراج گردید. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی از ویژگی شار بخار ثابت احتراق گاز

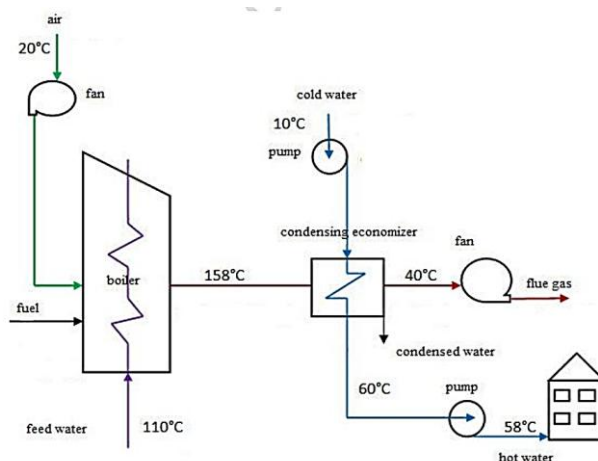
³ Smog⁴ Boilers equipped with vapor-pump (BEVP)¹ Annual equivalent worth analysis² Twisted tape inserts

بود. این سیستم از دمای پایین آب برگشتی سود می‌برد. یک اثر کوپلینگ (جفت‌شدگی) بین دو زیرسیستم وجود داشت؛ به طوری که ترکیبات نامناسب از ویژگی‌های تبادل حرارتی آن‌ها می‌توانست به شکست سیستم منجر شود.

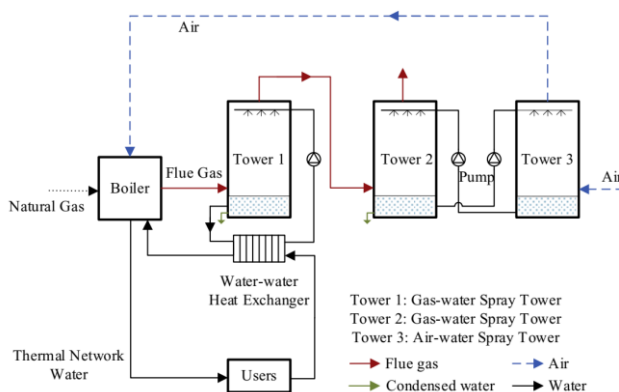
طبیعی بهره می‌برد. این سیستم می‌توانست به راندمان حرارتی بالا (بیش از ۱۰۰٪ بر اساس ارزش حرارتی پایین) دست یافته که به طور بالقوه به ۱۰۶/۶ درصد می‌رسید. افزایش راندمان کلی بازیابی حرارت سیستم شامل افزایش سهم رطوبت بازیابی شده در زیرسیستم زیرسیستم رطوبت‌زدایی و کاهش حداکثری نیروی محرکه انتقال رطوبت در زیرسیستم بازیابی کامل حرارت



شکل ۱- شماتیک طرح مورد استفاده در تحقیق چن و همکاران [۱۰]



شکل ۲- شماتیک طرح مورد استفاده در تحقیق ترهان و کوماکلی [۱۴]



شکل ۳- شماتیک طرح مورد استفاده در تحقیق وانگ و همکاران [۱۷]

واحدهای گاز طبیعی با چرخه ترکیبی نیز پتانسیل خوبی (۲۸/۰ تا ۳۴/۰ متر مکعب بر مگاوات‌ساعت) نشان دادند.

کوی و همکاران [۲۰] به بررسی عملکرد یک برج پرشده^۲ به عنوان مبدل حرارتی تماس مستقیم برای بازیابی انرژی و آب از گاز دودکش مرطوب پس از گوگردزدایی مرطوب پرداخت. در صنعت از برجهای پر شده از یک بستر پر شده با مواد خاص (مانند ساچمه‌های پلاستیکی، حلقه‌های فلزی یا سرامیکی) برای افزایش سطح تماس بین فازهای گاز و مایع استفاده می‌شود. روش‌شناسی شامل ساخت یک سیستم آزمایشگاهی پایلوت در محل بود. این برج از پکینگ‌های ساختار یافته از جنس پلی‌پروپیلن مقاوم در برابر خوردگی استفاده می‌کرد. اندازه‌گیری‌ها شامل مقاومت (افت فشار) و توزیع دمای گاز دودکش و آب پاششی بود. مقاومت تر و خشک پکینگ نیز مقایسه شد. محاسبات نظری مبتنی بر موازنه حرارتی و مدل‌ها با داده‌های تجربی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مبدل‌های حرارتی تماس مستقیم مزایایی مانند اختلاف دمای پایین، مقاومت در برابر خوردگی، و هزینه کم در مقایسه با مبدل‌های حرارتی دیواره‌ای سنتی داشتند. استفاده از برج‌های پرشده می‌توانست به مقاومت کم و راندمان تبادل حرارت بالا دست یابد، که آنها را برای بازیابی انرژی و آب از گاز دودکش با رطوبت بالا مناسب می‌ساخت. افت فشار برج تر بیشتر از افت فشار برج خشک بود، که این امر به دلیل حضور آب پاششی که نسبت فضای خالی را کاهش می‌داد، توجیه می‌شد. عمده تبادل حرارت در قسمت پایینی بستر پکینگ رخ می‌داد. راندمان‌های انتقال حرارت و جرم در ناحیه پکینگ در مقایسه با ناحیه ریزش آب به طور قابل توجهی بالاتر بودند. پارامترهای طراحی بهینه، شامل سرعت گاز، نسبت L/G، دمای آب، نوع پکینگ و ضخامت آن، شناسایی شدند.

آرسنویا و همکاران [۲۱] بر طراحی و پیاده‌سازی صنعتی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای برای استفاده از حرارت اتلافی گازهای خروجی فرآیند خشک‌کردن تنباکو متمرکز شدند، که این گازها حاوی مقادیر قابل توجهی حرارت محسوس و نهان بود. روش‌شناسی شامل توسعه یک مدل نوین برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای تولید شده تجاری بود که تغییرات پارامترها را در مناطق مختلف مبدل حرارتی لحاظ می‌کرد. یک واحد پایلوت با مدل خاصی از مبدل حرارتی صفحه‌ای تولید شرکت Alfa Laval در یک کارخانه تنباکو نصب و آزمایش شد. داده‌های

فدورو و همکاران [۱۸] به بررسی مفاهیم مختلفی برای افزایش دمای نقطه شبنم بخار آب در گاز دودکش پرداختند تا بازیابی گرمای نهان در دماهای بالاتر ممکن شود. چهار مفهوم با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری Aspen Plus/HYSYS مدل‌سازی شدند: رطوبت‌زایی با استفاده از آب، رطوبت‌زایی با استفاده از بخار، فشرده‌سازی گاز دودکش، و استفاده از اجکتور بخار. معادله حالت پنگ-رابینسون^۱ مورد استفاده قرار گرفت. موازنه‌های انرژی انجام شده و هزینه‌های انرژی بر اساس قیمت‌های معمول برق صنعتی و گاز طبیعی در آلمان تخمین زده شد. نتایج نشان داد که رطوبت‌زایی با استفاده از آب منجر به افزایش ناچیز نقطه شبنم (۳ درجه سانتی‌گراد) می‌شود. رطوبت‌زایی با استفاده از بخار یا اجکتور بخار به نقاط شبنم بالاتری (به ترتیب تا ۹۲ و ۹۱ درجه سانتی‌گراد) دست یافتند، اما به دلیل نیاز به تولید بخار، نیاز به انرژی زیاد داشتند. فشرده‌سازی گاز دودکش امکان رسیدن به نقطه شبنم ۹۷ درجه سانتی‌گراد را فراهم کرده، از نظر انرژی کارآمد بوده و کمترین هزینه انرژی را نشان داد. انرژی حرارتی بازیابی شده عموماً با افزایش نقطه شبنم افزایش می‌یافت، اما حداکثر مقدار بازیابی شده به محتوای بخار آب نیز بستگی داشت. اجکتور بخار در مقایسه با رطوبت‌زایی بخار، به دلیل افزایش دمای گاز دودکش در ورودی مبدل حرارتی، به دماهای خروجی آب خنک‌کننده بالاتری دست یافت.

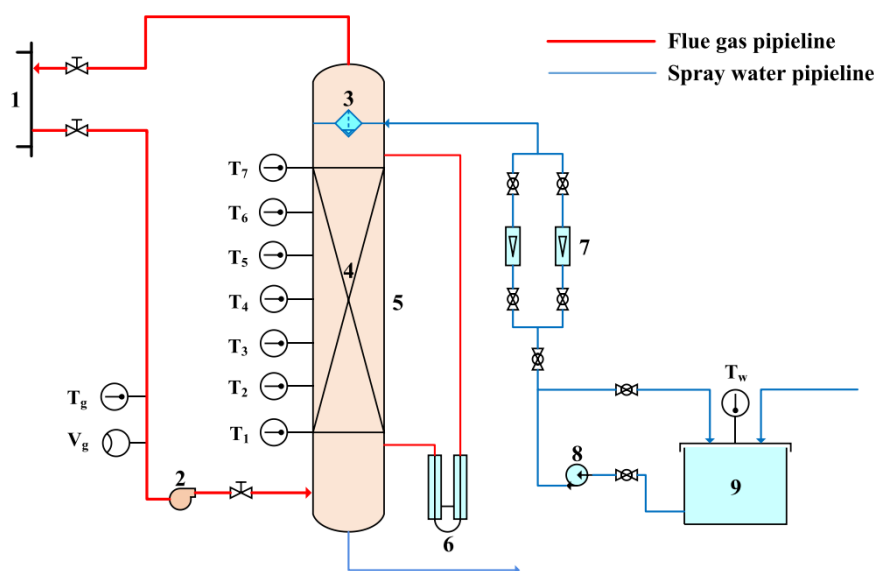
پراتا و موریرا [۱۹] به برآورد مقدار بخار آب موجود در گاز دودکش نیروگاه‌های حرارتی با سوخت گاز طبیعی و زغال‌سنگ در برزیل پرداختند تا پتانسیل بازیابی آب را کمی‌سازی کنند. روش‌شناسی این مطالعه شامل تحلیل پارامترهای عملیاتی از سی‌وشش نیروگاه حرارتی برزیل (با سوخت گاز طبیعی و زغال‌سنگ) بود. محاسبات، مقدار محصولات احتراق را با فرض وجود هوای اضافی و ترکیبات سوخت مشخص، تخمین زدند. همچنین، فاکتور تولید آب (آب تولید شده به ازای واحد توان الکتریکی) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیروگاه‌های حرارتی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، آب تولید می‌کنند و بخار آب را به اتمسفر آزاد می‌ساختند. نیروگاه‌های با سوخت گاز طبیعی عموماً فاکتور تولید آب بالاتری را در مقایسه با نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ نشان دادند. نیروگاه چرخه تکی گاز طبیعی بیشترین فاکتور تولید آب را در میان تمام واحدهای ارزیابی شده داشت، که از ۵۳/۰ متر مکعب بر مگاوات‌ساعت تا ۶۴/۰ متر مکعب بر مگاوات‌ساعت متغیر بود.

¹ Peng-Robinson

² Packed tower

داده‌های عملیاتی صنعتی نشان داد. مبدل حرارتی صفحه‌ای در تحقیق انجام شده امکان صرفه‌جویی تا ۶۴۰ کیلووات انرژی حرارتی را فراهم آورده، که معادل حدود ۲۰۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم گازهای خروجی بوده و می‌توانست جایگزین مصرف گاز طبیعی شود.

تجربی مربوط به دماها، دبی‌ها و افت فشار جمع‌آوری و با پیش‌بینی‌های مدل مقایسه شدند. نتایج نشان داد که چگالش بخار در بازیافت حرارت اتلافی از گازهای خروجی امری متداول بوده که انتخاب مبدل حرارتی را پیچیده می‌ساخت. مدل توسعه یافته با اختلاف در دمای خروجی در محدوده $\pm 1/2$ کلین و افت فشار در محدوده $\pm 7.5\%$ دقت خوبی را در مقایسه با



شکل ۴- شماتیک طرح مورد استفاده در تحقیق کوی و همکاران [۲۰]



شکل ۵- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق آرسنیا و همکاران [۲۱]

گازهای دودکش بویلر با سوخت گاز طبیعی یک واحد نیروگاه حرارتی ۳۲۰ مگاواتی پرداختند. حرارت و آب بازیابی شده برای

قامتی و رودکی [۶] به ارائه یک طراحی نظری برای مبدل حرارتی چگالشی (CHE) به منظور بازیابی حرارت و آب از

کیلووات شده که شامل ۲۲۳۸ کیلووات حرارت محسوس و ۱۹۱۲ کیلووات حرارت نهان و همراه با تولید ۲۵۲۰ کیلوگرم بر ساعت میعانات خواهد بود. مدل ترمودینامیکی نتایجی را پیش‌بینی نمود که حداکثر ۱۱.۴ درصد اختلاف با داده‌های نیروگاه داشت.

وانگ و همکاران [۷] به بررسی تجربی ویژگی‌های چگالش گاز دودکش در نوع جدیدی از مبدل حرارتی با شکاف باریک^۲ پرداختند. هدف آن، غلبه بر معایب کندانسورهای سنتی مانند حجم زیاد، راندمان پایین، و سهولت گرفتگی بود. روش‌شناسی شامل استفاده از یک NGHE با ساختار کانال شکاف باریک بود که توسط سازه‌های باله تقسیم شده و از طریق اکستروژن آلومینیوم تولید می‌شد. کانال آب خنک‌کننده به شکل مارپیچ طراحی شده بود. آزمایش‌ها به بررسی تأثیر عواملی از جمله سرعت و دمای گاز دودکش، و دبی و دمای آب خنک‌کننده بر ضریب انتقال حرارت و نرخ چگالش پرداختند. جنس NGHE آلیاژ آلومینیوم Al 6063-T6 بوده که به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و سایر خواص آن انتخاب شده بود.

یافته‌ها نشان داد که گاز دودکش پس از گوگردزدایی مرطوب حاوی مقادیر قابل توجهی بخار آب و آلاینده‌ها بوده و انتشار مستقیم آن منجر به آلودگی می‌شد. کندانسورهای گاز دودکش می‌توانستند به طور مؤثری گرمای نهان را بازیابی کرده و آلاینده‌ها را حذف کنند. NGHE نتایج امیدبخشی را نشان داد، به طوری که ضریب کلی انتقال حرارت هفت برابر ضریب انتقال حرارت جابجایی بود و نرخ چگالش به بیش از ۶۰٪ می‌رسید. افزایش دمای آب خنک‌کننده، نرخ چگالش و ضریب انتقال حرارت را کاهش می‌داد. افزایش سرعت گاز دودکش، نرخ چگالش را کاهش می‌داد اما ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌بخشید. یک همبستگی بی‌بعد برای عدد ناسلت با خطای کمتر از ۱۰٪ توسعه یافت. مبدل‌های حرارتی فشرده مانند NGHE در مقایسه با مبدل‌های حرارتی لوله‌ای سنتی، سطح انتقال حرارت بیشتری در واحد حجم ارائه می‌کردند که امکان کاهش دمای بیشتر در فضای محدود را فراهم می‌آورد.

قامتی و رودکی [۵] در یک مطالعه دیگر مطالعه به بازیابی حرارت و آب از گاز دودکش یک نیروگاه حرارتی با سوخت گاز طبیعی پرداختند. پیشنهاد آنان سیستمی ترکیبی از مبدل حرارتی چگالشی و چرخه رانکین آلی بود که در آن مبدل به عنوان سوپرهیتر چرخه رانکین عمل می‌کرد. گاز دودکش با

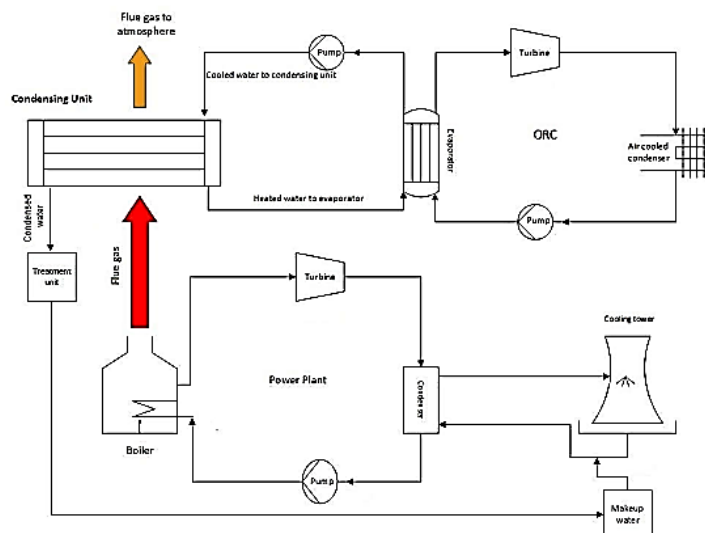
استفاده در فرآیند، به طور خاص آب بازیابی شده برای آب جبرانی برج خنک‌کننده و حرارت بازیابی شده برای تولید برق از طریق یک چرخه رانکین آلی (ORC)، در نظر گرفته شدند. روش‌شناسی بر پایه نظریه فیلم در ترکیب با قیاس انتقال حرارت و جرم به عنوان مبنای نظری طراحی قرار گرفت. تحلیل برای کسرهای حجمی مختلف بخار آب (۱۳٪، ۱۵٪، ۱۷٪) در گازهای دودکش انجام شد. یک کد متلب^۱ برای شبیه‌سازی انتقال همزمان حرارت و جرم توسعه یافته و نتایج کد با کارهای قبلی اعتبارسنجی شد. این مطالعه دماهای ورودی/خروجی مشخصی را برای آب خنک‌کننده در مبدل فرض کرده و عملکرد چرخه ORC را با سیال عامل RC318 در دماهای تبخیر متغیر تحلیل کرد. نتایج نشان داد که طراحی نظری با هدف کاهش دمای گاز دودکش از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۵۳ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. بر اساس کسر بخار آب ۱۷٪، ۵۲.۸ تن در ساعت آب قابل بازیابی بود که با استفاده از آن به عنوان آب جبرانی برج خنک‌کننده، تقریباً ۱۴٪ صرفه‌جویی در مصرف آب حاصل می‌شد. حرارت بازیابی شده می‌توانست تا ۲.۸ مگاوات برق بسته به دمای تبخیر ORC تولید کند. حداکثر توان خالص تولید شده در ORC در دمای تبخیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. افزایش مقدار بخار آب در گاز دودکش منجر به چگالش زودتر در دماهای بالاتر، افزایش انتقال حرارت نهان و کاهش مساحت مورد نیاز مبدل حرارتی می‌شد.

سینها و کوماری [۴] بر تحلیل ترمودینامیکی یک مبدل حرارتی چگالشی برای بازیابی حرارت متمرکز شده و به برآورد میزان بازیابی حرارت محسوس و نهان و نیز جرم میعانات تشکیل شده پرداختند. روش‌شناسی شامل توسعه یک مدل ترمودینامیکی برای ارزیابی دستاوردهای حاصل از بهبود بازیابی حرارت بود. این تحلیل، فرآیند سرد کردن گازهای دودکش را به زیر دمای نقطه شبنم در نظر گرفت. محاسبات، کل حرارت بازیابی شده (محسوس و نهان) و مقدار میعانات را تخمین زدند. نتایج مدل برای اعتبارسنجی با داده‌های نیروگاه مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد که در طول احتراق، تشکیل بخار آب منجر به اتلاف قابل توجه حرارت در گاز دودکش می‌شود. بازیابی این حرارت با سرد کردن گاز دودکش به زیر نقطه شبنم می‌تواند راندمان کلی را تا ۱۰ تا ۱۵ درصد بهبود بخشد. برای یک نمونه خاص، کاهش دمای گاز از ۵۶/۲ درجه سانتی‌گراد به ۵۳/۳۳ درجه سانتی‌گراد، منجر به بازیابی کل حرارت به میزان ۴۱۵۱

¹ MATLAB² Narrow gap heat exchanger (NGHE)

برای دستیابی به بهترین عملکرد چرخه آلی رانکین و بالاترین میزان بازیابی آب به طور همزمان، تحلیل پارامتریک بر حسب دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ، راندمان و توان تولیدی چرخه افزایش می‌یافت، هرچند بازیابی آب کاهش پیدا می‌کرد. همچنین، افزایش دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ باعث افزایش سطح انتقال حرارت مبدل چگالشی می‌شد، به خصوص

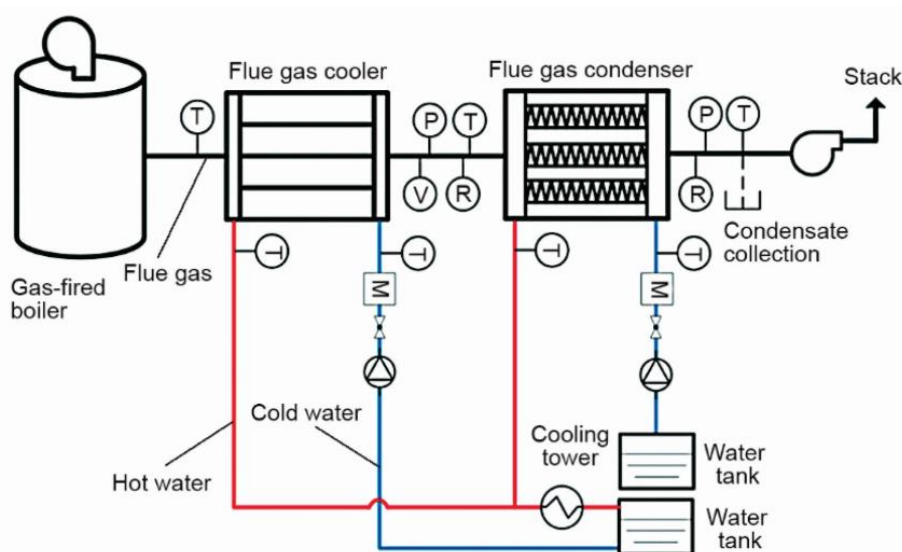
دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد وارد مبدل شده و تا زیر دمای نقطه شبنم بخار آب سرد می‌گردید که منجر به چگالش بخار آب و در نتیجه بازیابی حرارت نهان و محسوس می‌شد. آب چگالش یافته به عنوان آب جبرانی برج خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گرفت. مبرد چرخه رانکین آلی به صورت بخار اشباع وارد مبدل حرارتی چگالشی شده و توسط حرارت بازیابی شده سوپرهیت می‌گردید.



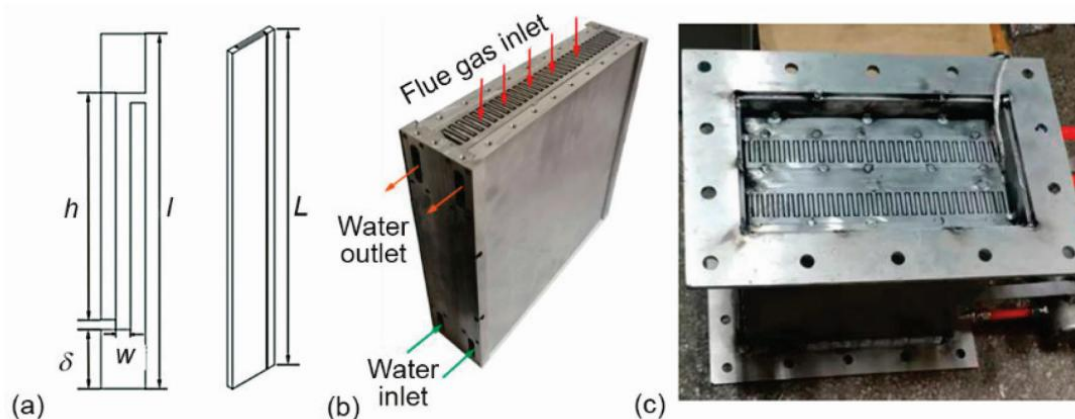
شکل ۶- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق قلمتی و رودکی [۶]

تعیین گردید. با در نظر گرفتن این شرط، گاز دودکش با دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد وارد مبدل چگالشی شده و با دمای ۵۷/۸۵

در ناحیه غیرچگالشی. از این رو، برای یافتن دمای بهینه تبخیر، یک تحلیل اقتصادی مبتنی بر روش ارزش فعلی انجام شده و دمای ۴۳ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بهینه تبخیر



الف) شماتیک نحوه قرارگیری و چیدمان مجموعه آزمایشگاهی



ب) تصویر مبدل حرارتی با شکاف باریک مورد استفاده در آزمایش

شکل ۷- تجهیزات آزمایشگاهی و مبدل مورد استفاده در تحقیق وانگ و همکاران [۷]

خارج می‌شد. مساحت کلی مبدل حرارتی چگالشی تقریباً ۳۹،۴۹۰ مترمربع برآورد شد. میزان آب بازیابی شده ۳۷/۷۸ کیلوگرم بر ثانیه بود که ۳۴/۲ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب جبرانی را به همراه داشت. همچنین، توان تولیدی سیستم معادل ۲۴/۱۲ مگاوات محاسبه شد و توان اضافی تولید شده توسط سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم چرخه رانکین تنها، ۳/۹۷ مگاوات برآورد شد.

مو و همکاران [۹] به بررسی تأثیرات بازیابی حرارت اتلافی گاز دودکش و افت فشار ناشی از استفاده از مبدل حرارتی چگالشی گاز دودکش^۱ (FGCHE) بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش کربن در کوره‌های حرارتی پالایشگاه پرداختند. روش‌شناسی شامل استفاده از روش‌های نظری و آزمایشگاهی در محل بود. این مطالعه به تحلیل ویژگی‌های بازیابی حرارت و افت فشار گاز دودکش پرداخت تا حداکثر صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها را در شرایط عملیاتی عادی به دست آورد. تأثیرات دمای گاز دودکش و افت فشار در شرایط مختلف هوای احتراق نیز استخراج شد. فرآیند چگالش گاز دودکش شامل سرمایش هم‌رطوبت (آزادسازی حرارت محسوس) و سرمایش رطوبت‌زدایی (آزادسازی حرارت نهان و محسوس در زیر نقطه شبنم) بود. راندمان صرفه‌جویی انرژی نظری و کاهش انتشار کربن با نتایج تجربی مقایسه شدند.

یافته‌ها نشان داد که با کاهش دمای گاز دودکش از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، راندمان صرفه‌جویی انرژی به ۱۲/۵ تا ۱۶/۹ درصد رسیده و نسبت بهره‌برداری از حرارت اتلافی گاز دودکش ۷۴/۴ تا ۹۸ درصد بود.

قامتی و رودکی [۵] در یک مطالعه دیگر مطالعه به بازیابی حرارت و آب از گاز دودکش یک نیروگاه حرارتی با سوخت گاز طبیعی پرداختند. پیشنهاد آنان سیستمی ترکیبی از مبدل حرارتی چگالشی و چرخه رانکین آلی بود که در آن مبدل به عنوان سوپرهیتر چرخه رانکین عمل می‌کرد. گاز دودکش با دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد وارد مبدل شده و تا زیر دمای نقطه شبنم بخار آب سرد می‌گردید که منجر به چگالش بخار آب و در نتیجه بازیابی حرارت نهان و محسوس می‌شد. آب چگالش یافته به عنوان آب جبرانی برج خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گرفت. مبرد چرخه رانکین آلی به صورت بخار اشباع وارد مبدل حرارتی چگالشی شده و توسط حرارت بازیابی شده سوپرهیت می‌گردید.

برای دستیابی به بهترین عملکرد چرخه آلی رانکین و بالاترین میزان بازیابی آب به طور همزمان، تحلیل پارامتریک بر حسب دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ، راندمان و توان تولیدی چرخه افزایش می‌یافت، هرچند بازیابی آب کاهش پیدا می‌کرد. همچنین، افزایش دمای اواپراتور و سوپرهیتینگ باعث افزایش سطح انتقال حرارت مبدل چگالشی می‌شد، به خصوص در ناحیه غیرچگالشی. از این رو، برای یافتن دمای بهینه تبخیر، یک تحلیل اقتصادی مبتنی بر روش ارزش فعلی انجام شده و دمای ۴۳ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بهینه تبخیر تعیین گردید. با در نظر گرفتن این شرط، گاز دودکش با دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد وارد مبدل چگالشی شده و با دمای ۵۷/۸۵ درجه سانتیگراد از آن خارج می‌گردید. از طرف دیگر، مبرد به صورت اشباع وارد شده و با دمای ۷۵ درجه سانتیگراد از آن

¹ Flue gas condensing heat exchanger (FGCHE)

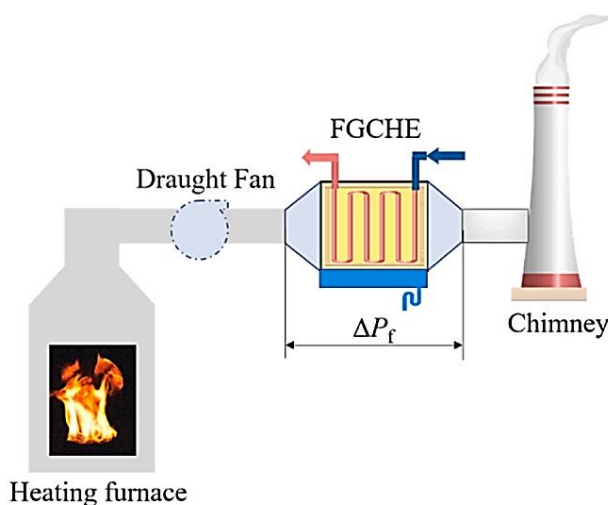
جزئی دمای گاز دودکش می‌شد. رطوبت بالاتر در گاز دودکش می‌توانست راندمان حرارتی سیستم‌های بازیابی حرارت را به طور قابل توجهی افزایش دهد. نتایج برای احتراق زیست‌توده مرطوب امیدوارکننده بوده و به راندمان‌های گزارش شده برای سیستم‌های گاز طبیعی نزدیک بود.

چوی و همکاران [۸] به بررسی راندمان حذف SO_2 و ویژگی‌های بازیابی حرارت در یک کندانسور تماس غیرمستقیم، یک کندانسور تماس مستقیم و یک سیستم ترکیبی برای گاز دودکش پرداختند. روش‌شناسی شامل انجام بررسی‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک با استفاده از گاز دودکش شبیه‌سازی شده حاوی نیتروژن، SO_2 و آب بود. سیستم غیر مستقیم از آب خنک‌کننده در لوله‌ها برای چگالش رطوبت استفاده می‌کرد که یک فیلم آب برای حذف جزئی SO_x تشکیل می‌داد. سیستم مستقیم شامل اختلاط مستقیم گاز دودکش با سیال خنک‌کننده (آب) بود که امکان جذب همزمان SO_x را فراهم می‌آورد. سیستم ترکیبی نیز مراحل مستقیم و غیر مستقیم را با هم ادغام می‌کرد. عواملی مانند خواص گاز دودکش (دبی، دما، رطوبت، مقدار SO_2)، دبی آب خنک‌کننده، نسبت مایع به گاز در مبدل مستقیم و افزودن جاذب $NaOH$ مورد مطالعه قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که کندانسورهای گاز دودکش، هم آلودگی هوا (گرد و غبار، SO_x ، HCl) را کاهش می‌دادند و هم حرارت را بازیابی می‌کردند. در سیستم غیرمستقیم تک‌مرحله‌ای، دمای خروجی گاز مخلوط ۲۸ درجه سانتی‌گراد، با ۸۱ درصد بازیابی آب چگالش شده و ۹۳/۴ درصد راندمان بازیابی حرارت بود. راندمان حذف SO_2 در طول فرآیند

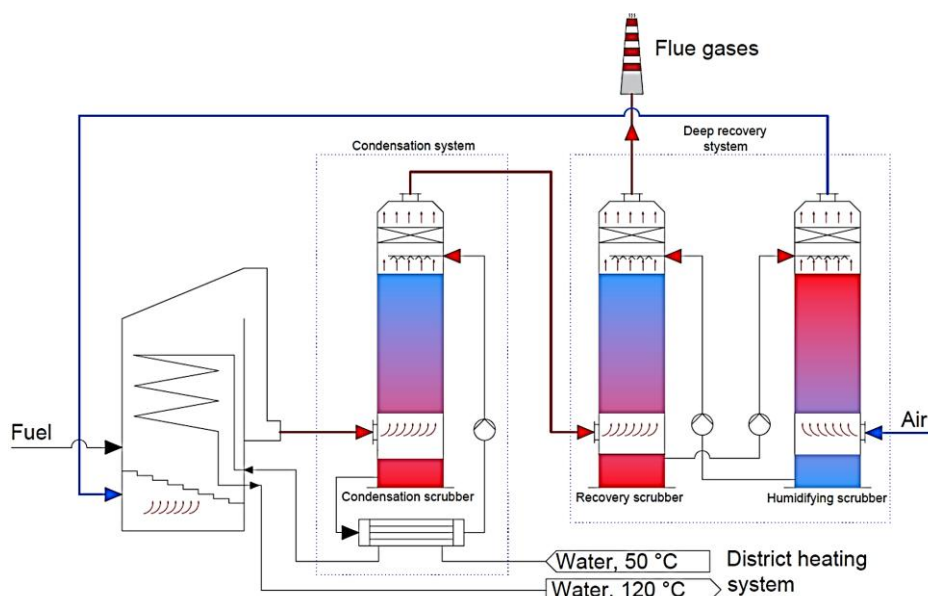
همچنین، راندمان بازیابی میعان‌ات ۵۸ تا ۸۹/۳ درصد و نسبت کاهش انتشار کربن ۱۳/۷ تا ۱۸/۳ درصد به دست آمد. کاهش افت فشار گاز دودکش به طور قابل توجهی باعث بهبود بهره‌برداری از حرارت اتلافی و کاهش کربن شد. راندمان صرفه‌جویی انرژی و نسبت کاهش کربن اندازه‌گیری شده، با و با انحرافات به ترتیب در حدود ۹/۷٪ و ۳/۶٪، تطابق خوبی با محاسبات نظری نشان دادند.

کایسز و کوبیکا [۲۲] در یک پژوهش بر بهینه‌سازی بازیابی گرمای نهان چگالشی از جریان گاز دودکش حاصل از احتراق زیست‌توده جامد با محتوای رطوبت بالا متمرکز شدند. روش‌شناسی شامل انجام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Chemcad برای زیست‌توده با محتوای رطوبت متغیر (۶۰-۰٪)، متان و بیوگاز بود. سیستم مورد بررسی شامل یک اسکرابر چگالشی و یک سیستم بازیابی عمیق (شامل اسکرابرهای بازیابی و رطوبت‌زایی) بود. یک تحلیل حساسیت دو بعدی، اثر دبی آب در دو مدار اسکرابر را بر دمای تخلیه گاز دودکش و راندمان کلی بررسی کرد.

یافته‌ها نشان داد که افزایش محتوای رطوبت زیست‌توده از صفر به ۶۰٪، منجر به کاهش راندمان کلی سیستم از ۱۰۴/۵٪ به ۱۰۱/۹٪ در دمای ثابت بازگشت گرمایش منطقه‌ای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دبی‌های بهینه آب شد. دبی بهینه آب هم برای اسکرابر چگالشی و هم برای اسکرابر بازیابی وجود داشته که دمای خروجی گاز دودکش را به حداقل می‌رساند. کمترین دمای مشاهده شده گاز دودکش تقریباً ۲۸/۹۵ درجه سانتی‌گراد بود. دبی‌های بالاتر آب فراتر از نقطه بهینه، منجر به افزایش



شکل ۸- شماتیک مبدل حرارتی چگالشی مورد استفاده در تحقیق مو و همکاران [۹]



شکل ۹- شماتیک سیستم چگالشی مورد استفاده در تحقیق کابیسز و کوبیکا [۲۲]

به کاهش راندمان سرمایه‌ش می‌شد. بازیابی حرارت اتلافی گاز دودکش باعث کاهش انتشار مستقیم کربن ناشی از احتراق گاز طبیعی می‌شد. دمای نقطه شبنم محاسبه شده برای گاز دودکش در نیروگاه حرارتی باثونگ ۵۶ درجه سانتی‌گراد بود. هزینه کلی سیستم تقریباً ۵ میلیون یوان چین و هزینه‌های عملیاتی ۲,۱۱۴,۵۰۰ یوان چین برآورد شد.

۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

۵-۱- نتیجه‌گیری

این مقاله مروری، به بررسی تحلیلی و فنی فناوری مبدل‌های حرارتی چگالشی به عنوان یک راه‌حل کلیدی برای مواجهه با چالش‌های دوگانه بهره‌وری انرژی و کمبود آب در صنایع با گاز دودکش مرطوب پرداخت. بررسی اصول ترمودینامیکی و مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این فناوری یک راهکار بسیار مؤثر و چندمنظوره است. نتایج کلیدی به دست آمده از این مرور عبارتند از:

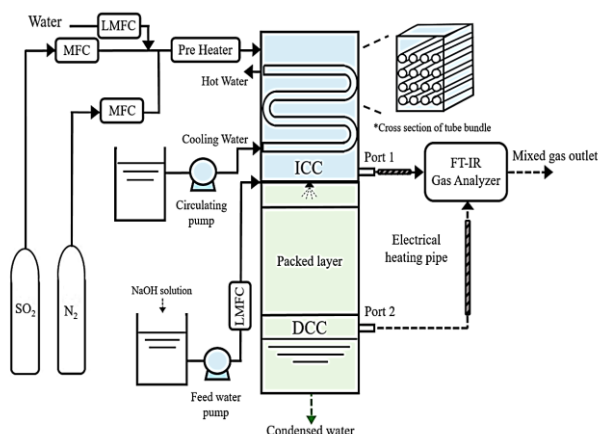
- **بهبود چشمگیر بازده حرارتی:** قلب فناوری مبدل‌های حرارتی چگالشی، توانایی آن در سرد کردن گاز دودکش به زیر نقطه شبنم (معمولاً ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) است. این فرآیند نه تنها حرارت محسوس، بلکه بخش قابل توجهی از گرمای نهان بخار آب را نیز بازیابی می‌کند. مطالعات نشان دادند که پیاده‌سازی این سیستم‌ها می‌تواند راندمان کلی سیستم را ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش دهد.

بازیابی گرمای نهان در مبدل غیرمستقیم با جذب SO_2 توسط فیلم آب افزایش می‌یافت. سیستم ترکیبی به راندمان حذف SO_2 بالاتری در نسبت‌های مایع به گاز پایین‌تر در مقایسه با یک مبدل مستقیم تنها دست یافت. افزودن جاذب NaOH در سیستم ترکیبی به طور قابل توجهی راندمان حذف SO_2 را افزایش داد.

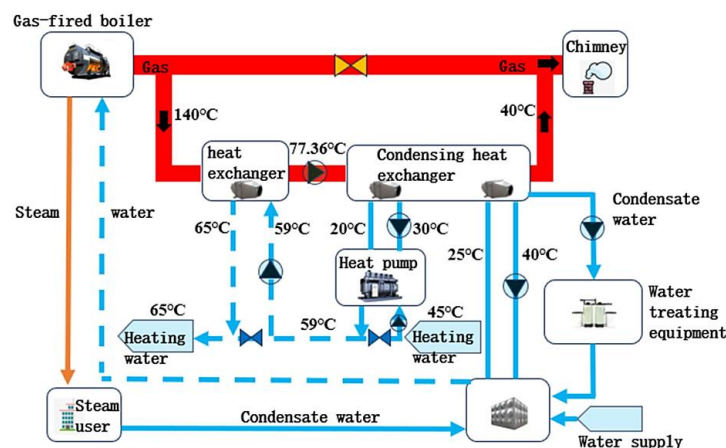
ژانگ و همکاران [۲۳] در یک پژوهش به ارائه طراحی و مطالعه تجربی یک سیستم بازیابی حرارت اتلافی چگالشی عمیق برای گاز دودکش بویلر گاز طبیعی در یک نیروگاه حرارتی پرداختند. این سیستم از "فناوری بازیافت پلکانی" و پمپ‌های حرارتی جذبی برای ارتقاء انرژی با درجه حرارت پایین استفاده کرد. محاسبات طراحی، حداکثر بار گرمایشی دوره سرد پکن را در نظر گرفتند. آزمایش‌ها عملکرد سیستم را تأیید کردند. دمای نقطه شبنم بر اساس فشار جزئی بخار آب محاسبه شد. مزایای زیست‌محیطی ناشی از کاهش انتشار مستقیم کربن بر پایه حرارت اتلافی بازیابی شده تخمین زده شد.

یافته‌ها نشان داد که اکثر بویلرهای گازسوز گرمایش خانگی دارای دمای گاز دودکش بالای ۷۵ درجه سانتی‌گراد بودند. سیستم توسعه یافته توانست دمای گاز دودکش را از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به حداقل ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. در هنگام عملکرد پایدار، حرارت گاز دودکش جذب شده توسط آب با دمای متوسط و بینابینی نمی‌توانست به سرعت دفع شود، به خصوص زمانی که بار حرارتی گرمایش کم بود، که این امر منجر

- **بازیابی همزمان آب:** این سیستم‌ها مقادیر قابل توجهی آب با کیفیت بالا (مشابه اسمز معکوس) تولید می‌کنند که می‌تواند مستقیماً در فرآیندهای صنعتی مانند آب جبرانی برج‌های خنک‌کننده استفاده شود. نرخ بازیابی آب در مطالعات مختلف از ۶۰ درصد تا بیش از ۸۹ درصد گزارش شده است.
 - **مزایای زیست‌محیطی:** فرآیند چگالش به عنوان یک فیلتر مرطوب عمل کرده و به حذف همزمان آلاینده‌هایی نظیر SO_x ، NO_x ، HCl و ذرات معلق از گاز دودکش کمک شایانی می‌کند.
 - **چالش‌های فنی کلیدی:** دو چالش اساسی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها، **خوردگی و افت فشار** است. به دلیل اسیدی شدن مایع چگالیده، استفاده از مواد گران‌قیمت مقاوم به خوردگی (مانند فولاد ضد زنگ ۳۱۶ یا آلیاژهای خاص) ضروری است. همچنین، افزودن مبدل به مسیر گاز، افت فشار و در نتیجه توان مصرفی فن‌ها را افزایش می‌دهد که باید در طراحی بهینه شود.
 - **ملاحظات اقتصادی:** موفقیت این سیستم‌ها در گرو یک تعادل بهینه فنی-اقتصادی است. اگرچه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX) به دلیل نیاز به مواد خاص بالا است، اما صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف سوخت و بازیابی آب، منجر به دوره‌های بازگشت سرمایه جذاب (معمولاً ۲ تا ۵ ساله) می‌شود.
-
- اهمیت طراحی و یکپارچه‌سازی:** تحقیقات نشان دادند که بهبود طراحی (مانند مبدل‌های شکاف باریک یا استفاده از نوارهای تابدار) و یکپارچه‌سازی هوشمندانه سیستم (مانند ترکیب با سیکل رانکین آلی (ORC) یا پمپ‌های حرارتی، پتانسیل بازیابی انرژی را به حداکثر می‌رساند.
- ۲- چشم‌انداز آینده و پیشنهادات
- اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در توسعه مبدل‌های چگالشی حاصل شده است، اما برای تجاری‌سازی گسترده‌تر و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها، شکاف‌های تحقیقاتی و زمینه‌های پژوهشی زیر پیشنهاد می‌گردد:
- توسعه مواد نوین و پوشش‌های مقاوم: با توجه به اینکه هزینه مواد مقاوم به خوردگی، پاشنه آشیل اقتصادی این فناوری است، تحقیقات آتی باید بر توسعه و آزمایش مواد جایگزین ارزان‌قیمت‌تر (مانند کامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته) یا پوشش‌های نانو ساختاری مقاوم به خوردگی و اسید تمرکز کنند.
- **مدل‌سازی و مدیریت رسوب‌گرفتگی:** اکثر مطالعات به رسوب‌گرفتگی (ناشی از ذرات یا رسوبات شیمیایی) که می‌تواند مبدل‌های فشرده را مسدود کند، اشاره کرده‌اند اما آن را عمیقاً بررسی نکرده‌اند. انجام مطالعات تجربی طولانی‌مدت و توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی و مدیریت رسوب‌گرفتگی در شرایط واقعی صنعتی بسیار ضروری است.



شکل ۱۰- شماتیک سیستم چگالشی مورد استفاده در تحقیق چوی و همکاران [۸]



شکل ۱۱- شماتیک سیستم چگالشی مورد استفاده در تحقیق ژانگ و همکاران [۲۳]

۴. تحلیل کیفیت آب و تصفیه آن: اگرچه بازیابی آب یک

مزیت بزرگ است، اما آب تقطیر شده ممکن است حاوی آلاینده‌های حل‌شده باشد. تحقیقات آتی باید به تحلیل دقیق کیفیت این آب در صنایع مختلف و ارائه راه‌کارهای اقتصادی برای تصفیه آن جهت استفاده مجدد بپردازند.

۵. بهینه‌سازی چندهدفه پیشرفته: تعادل بین حداکثر

انتقال حرارت، حداقل افت فشار، و کمترین هزینه ساخت، یک چالش پیچیده است. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه پیشرفته (مانند الگوریتم‌های تکاملی) به همراه شبیه‌سازی‌های CFD، می‌تواند به یافتن طرح‌های بهینه مهندسی کمک کند.

۶-مراجع

- [1] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, 2002.
- [2] R. Triebe, "Condensing heat recovery for industrial process applications," *Process Heating*, vol. 22, pp. 26-30, 2015.
- [3] J. H. Copen, T. B. Sullivan, B. C. Folkedahl, G. F. Weber, and B. Carney, "PRINCIPLES OF FLUE GAS WATER RECOVERY SYSTEM," presented at the Power-Gen International Conference, 2005.
- [4] R. Sinha and K. K. Thakur, "Heat recovery from condensing heat exchanger," *Materials Today Proceedings*, vol. 72, pp. 1965-1969, 2023.
- [5] E. Ghamati and J. M. Roudaki, "Parametric and economic analysis of condensing heat exchanger combined with organic rankine cycle for heat and water recovery from boiler flue gas," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 237, no. 6, pp. 1295-1307, 2023.
- [6] E. Ghamati and J. M. Roudaki, "A Novel Integrated Design for Heat and Water Recovery from Exhaust Flue Gas of Bandar Abbas Power Plant," *Integrated Carbon Policy Design for Achieving Net-Zero*

۲-۵-چشم‌انداز آینده و پیشنهادات

اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در توسعه مبدل‌های چگالشی حاصل شده است، اما برای تجاری‌سازی گسترده‌تر و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها، شکاف‌های تحقیقاتی و زمینه‌های پژوهشی زیر پیشنهاد می‌گردد:

۱. توسعه مواد نوین و پوشش‌های مقاوم: با توجه به اینکه

هزینه مواد مقاوم به خوردگی، پاشنه آشیل اقتصادی این فناوری است، تحقیقات آتی باید بر توسعه و آزمایش مواد جایگزین ارزان‌قیمت‌تر (مانند کامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته) یا پوشش‌های نانو ساختاری مقاوم به خوردگی و اسید تمرکز کنند.

۲. مدل‌سازی و مدیریت رسوب‌گرفتگی: اکثر مطالعات به

رسوب‌گرفتگی (ناشی از ذرات یا رسوبات شیمیایی) که می‌تواند مبدل‌های فشرده را مسدود کند، اشاره کرده‌اند اما آن را عمیقاً بررسی نکرده‌اند. انجام مطالعات تجربی طولانی‌مدت و توسعه مدل‌هایی برای پیش‌بینی و مدیریت رسوب‌گرفتگی در شرایط واقعی صنعتی بسیار ضروری است.

۳. مدل‌سازی دینامیکی و سیستم‌های کنترل: بیشتر

تحلیل‌ها در شرایط پایدار انجام شده‌اند. در حالی که فرآیندهای صنعتی اغلب با بارهای متغیر کار می‌کنند. توسعه مدل‌های دینامیکی و سیستم‌های کنترل پیشرفته برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل در شرایط بار متغیر، گام مهم بعدی خواهد بود.

- [21] O. Arsenyeva, J. J. Klemeš, P. Kapustenko, O. Fedorenko, S. Kusakov, and D. Kobylnik, "Plate heat exchanger design for the utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process," *Energy*, vol. 233, p. 121186, 2021/10/15/ 2021.
- [22] J. Kabiesz and R. Kubica, "Optimizing the Recovery of Latent Heat of Condensation from the Flue Gas Stream through the Combustion of Solid Biomass with a High Moisture Content," *Energies*, vol. 17, no. 7, p. 1670, 2024.
- [23] S. Zhang, M. Shen, Y. Kang, and Z. Tang, "The Design and Experimental Study of a Deep-Condensing Waste Heat Recovery System for Boiler Flue Gas Based on Baoneng Heating Plant," *Processes*, vol. 13, no. 2, p. 306, 2025.
- [7] Y. Wang, J. Jiao, Y. Dai, Z. Ke, Q. Zhao, and F. Li, "Study on heat transfer characteristics of flue gas condensation in narrow gap heat exchangers," *Thermal Science*, vol. 27, no. 6 Part A, pp. 4681-4693, 2023.
- [8] H. Choi, W. Yang, Y. Lee, and C. Ryu, "Characteristics of SO₂ Removal and Heat Recovery of Flue Gas Based on a Hybrid Flue Gas Condenser," *Energies (19961073)*, vol. 17, no. 19, 2024.
- [9] L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, and Y. Lan, "Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace," *Energy*, vol. 279, p. 128081, 2023.
- [10] Q. Chen *et al.*, "Condensing boiler applications in the process industry," *Applied Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 30-36, 2012.
- [11] S. S. M. Shamsi, A. A. Negash, G. B. Cho, and Y. M. Kim, "Waste heat and water recovery system optimization for flue gas in thermal power plants," *Sustainability*, vol. 11, no. 7, p. 1881, 2019.
- [12] K. Jeong, M. J. Kessen, H. Bilirgen, and E. K. Levy, "Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 11-12, pp. 2361-2368, 2010.
- [13] J. Uotila, "Heat recovery and environmental impacts of flue gas condensing," 2015.
- [14] M. Terhan and K. Comakli, "Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas," *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 1007-1015, 2016.
- [15] I. Z. Famileh and J. A. Esfahani, "Experimental investigation of wet flue gas condensation using twisted tape insert," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1466-1480, 2017.
- [16] M. Shuangchen, C. Jin, J. Kunling, M. Lan, Z. Sijie, and W. Kai, "Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 225-235, 2017.
- [17] J. Wang, J. Hua, L. Fu, Z. Wang, and S. Zhang, "A theoretical fundamental investigation on boilers equipped with vapor-pump system for Flue-Gas Heat and Moisture Recovery," *Energy*, vol. 171, pp. 956-970, 2019/03/15/ 2019.
- [18] N. Fedorova, P. Aziziyanesfahani, V. Jovicic, A. Zbogor-Rasic, M. J. Khan, and A. Delgado, "Investigation of the concepts to increase the dew point temperature for thermal energy recovery from flue gas, using Aspen®," *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1585, 2019.
- [19] J. E. Prata and J. R. Simões-Moreira, "Water recovery potential from flue gases from natural gas and coal-fired thermal power plants: A Brazilian case study," *Energy*, vol. 186, p. 115780, 2019.
- [20] Z. Cui, Q. Du, J. Gao, R. Bie, and D. Li, "Development of a direct contact heat exchanger for energy and water recovery from humid flue gas," *Applied Thermal Engineering*, vol. 173, p. 115214, 2020.
- Targets 1 Abhijeet Acharya Dynamic Economic Analysis between Renewable Energy, Carbon Dioxide Emissions, Trade and GDP based on VECM Granger test and Wavelet Analysis*, p. 26, 2022.