

## بازیافت حرارت اتلافی برای تولید برق با استفاده از سیکل رنکین آلی (ORC)<sup>۱</sup>

سمیرا فاضلی ویسری

سازمان بهره‌وری انرژی ایران  
[fazeli@saba.org.ir](mailto:fazeli@saba.org.ir)

### چکیده

در این مقاله پس از ارائه توضیحات خلاصه‌ای در مورد حرارت اتلافی در صنایع مختلف و لزوم بازیافت این حرارت به منظور استفاده در موارد مختلف مانند تولید انرژی الکتریکی، درخصوص محدودیت‌های تولید برق از منابع حرارتی دمپایین (که در صنعت به میزان قابل توجهی وجود دارد) توضیحاتی ارائه شده است. سپس تکنولوژی ORC (سیکل رنکین آلی) به عنوان یک راهکار عملیاتی برای تولید برق از منابع حرارتی دمپایین معرفی شده و به بررسی و مقایسه نمودارهای ترمودینامیک این سیکل‌ها با سیکل‌های بخار کلاسیک پرداخته شده است. سیکل ORC بر مبنای اصول ترمودینامیکی یک سیکل بخار کلاسیک کار می‌کند و اجزای آن نیز همانند سیکل‌های بخار کلاسیک است، با این تفاوت که سیال ناقل حرارت در آن متفاوت می‌باشد. مشاهده می‌شود به دلیل مشخصات ترمودینامیک سیالات کاری مورد استفاده در این سیکل‌ها، امکان تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع حرارتی دمپایین وجود دارد. در ادامه انواع کاربردهای صنعتی این تکنولوژی شامل تولید برق از بازیافت حرارت اتلافی در صنایع، توربین‌های گاز و موتورهای احتراق داخلی و تولید برق با استفاده از انرژی تجدیدپذیر مانند حرارت زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی و زیست توده معرفی شده‌اند. در نهایت با بررسی مشخصات ترمودینامیکی انواع سیالات کاری مورد استفاده در این تکنولوژی، راندمان بازیافت حرارت با استفاده از انواع سیالات کاری مورد مقایسه قرار گرفته و بهترین سیالات کاری مورد استفاده در این تکنولوژی برای محدوده دمایی مشخص، انتخاب شده است.

### کلید واژه

بازیافت- حرارت اتلافی- منبع حرارت دمپایین- تکنولوژی ORC - سیال کاری- تولید برق

<sup>۱</sup> Organic Rankin Cycle

# دهمین همایش بین المللی انرژی

## مقدمه

در صنایع مختلف انرژی حرارتی فراوانی از طرق مختلف مانند انتقال حرارت از سطوح داغ و تلفات ناشی از بخارات تولیدی و ... اتلاف می‌شود. با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف می‌توان این حرارت را بازیافت نمود و علاوه بر استفاده از آن در پیشگرمکن‌ها، آب گرم مصرفی و ... از آن برای تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. نتایج مطالعاتی در امریکا نشان می‌دهد پتانسیل انرژی الکتریکی تولیدی به وسیله بازیافت حرارت اتلافی در صنایع این کشور بالاتر از کل انرژی الکتریکی تولیدشده از منابع تجدیدپذیر (در حال حاضر) است. [۱] با توجه به افزایش میزان تقاضای انرژی الکتریکی در دنیا، اهمیت توجه به این بحث به عنوان یک منبع تولیدکننده انرژی الکتریکی واضح است. در فرآیند تولید صناعی مانند سیمان، شیشه، فولاد و ... پتانسیل بالایی برای تولید برق از طریق بازیافت حرارت وجود دارد. بنابراین با توجه به توسعه این صنایع در کشورمان، لازم است توجه ویژه‌ای به این بحث در کشورمان شود. با توجه به محدودیت‌های تولید برق از منابع حرارتی دمایی با استفاده از سیکل‌های بخار کلاسیک، یک تکنولوژی موثر برای این فرآیند استفاده از سیکل رنگین ارگانیک می‌باشد. این تکنولوژی از گذشته در طرح‌های زمین گرمایی مورد استفاده قرار می‌گرفته است، اما در بحث بازیافت حرارت استفاده از آن اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. برای انتقال این تکنولوژی به کاربردهای مربوط به بازیافت حرارت، لازم است تحقیقات کاربردی با همکاری صنایع مورد توجه قرار بگیرد. این تحقیقات شامل مواردی مانند مرور تکنولوژی، مرور بازار، توجه به قابل اجرای تکنیکی و اقتصادی، مدل‌های شبیه‌سازی، مقایسه بین انواع سیکل‌ها مانند سیکل بخار و سیکل ORC و انتخاب آن با توجه به معیارهای مختلف و مطالعات موردی در صنایع مختلف (صنایع فولاد، شیشه، کاغذ، اتومبیل‌سازی، صنایع شیمیایی، سیمان و ...) است.

در صنایع مختلف تقاضای زیادی برای انرژی الکتریکی و مکانیکی وجود دارد، قسمت عمده‌ای از انرژی الکتریکی می‌تواند توسط انرژی حرارتی تأمین شود. این انرژی

حرارتی معمولاً توسط احتراق سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید. سیکل‌های ترمودینامیکی مختلفی به این منظور توسعه پیدا کرده‌اند. مواردی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل موتورهای احتراق (دیزل، گاز و بنزین)، توربین‌های گاز، توربین‌های بخار و ... است. این فرآیندها معمولاً از یک منبع حرارتی دما بالا استفاده کرده و معمولاً راندمانی بین ۲۵ تا ۵۵ دارند. مقدار زیادی حرارت اتلافی در این سیکل‌ها حاصل می‌شود که معمولاً این حرارت اتلافی در غالب طرح‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP) قابل بازیابی هستند.

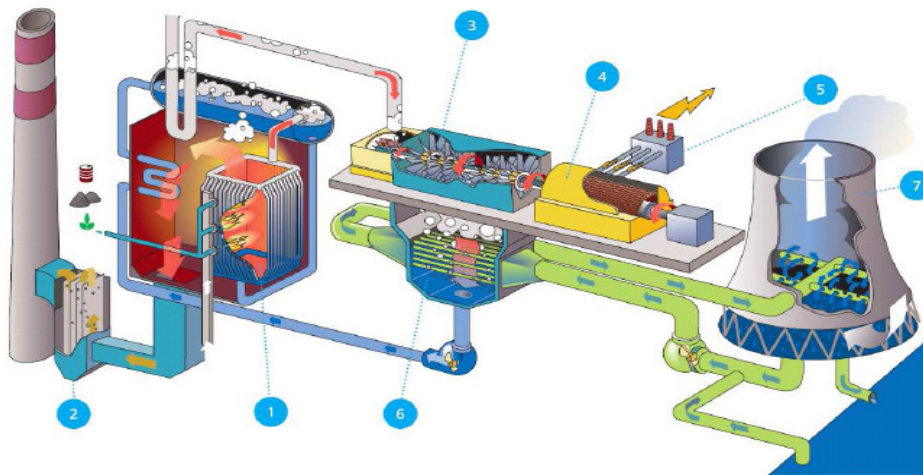
با توجه به اینکه میزان زیادی از حرارت اتلافی در صنایع مختلف در دماهای پایین موجود است، ارائه روشی موثر برای بازیافت این حرارت‌های دما پایین برای تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. در صورتیکه منبع حرارتی دما پایین موجود باشد، یا اینکه حجم حرارتی این منبع پایین باشد، به دلیل شرایط ترمودینامیکی آب استفاده از این ماده در سیکل‌های بخار کلاسیک مناسب نبوده و می‌توان آب یا بخار را با یک ماده آلی مناسب جایگزین کرد. در نتیجه سیکل ترمودینامیکی ORC گزینه‌ای مناسب برای دستیابی به این هدف است. این سیکل مشابه سیکل‌های بخار کلاسیکی که در ایستگاه‌های بخار استفاده می‌شوند، است، با این تفاوت که به جای آب از یک سیال آلی در سیکل رنگین استفاده می‌شود.

این تکنولوژی به صورت تجاری موجود بوده و در دهه‌های گذشته برای تولید برق از حرارت زمین‌گرمایی (دماهای ۷۵ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد) به صورت عملیاتی استفاده شده است. همچنین از این تکنولوژی در واحدهای تولید برق از انرژی زیست توده (در ابعاد کوچک) استفاده شده است.

## ۱- سیکل رنگین آلی (ORC)

شکل ۱ نشان‌دهنده اجزای اصلی سیکل بخار در یک واحد تولید برق حرارتی است. این اجزا عبارتند از: ۱- بویلر، ۳- توربین بخار ۴- ژنراتور ۶- کندانسور ۷- برج خنک‌کن و پمپ‌های تغذیه

# دهمین همایش بین المللی انرژی



شکل ۱: سیکل رنکین کلاسیک در یک واحد تولیدکننده توان

بسیار پایینی مورد نیاز است. به عنوان مثال دمای چگالش ۴۵ درجه سانتیگراد، فشاری زیر ۰.۱ بار می‌خواهد. و در نتیجه منجر به افزایش قطر طبقات بالای توربین و کندانسور می‌شود.

- به دلیل افزایش نسبت فشار خروجی و ورودی توربین بخار، طراحی توربین پیچیده‌تر شده و نیاز به استفاده از توربین‌های چند مرحله‌ای می‌شود.

- برای اجتناب از تولید رطوبت در طبقات انتهایی توربین بخار، لازم است بخار به دماهای بالاتر سوپر هیت شود. این دماهای بالاتر بر روی طراحی و انتخاب جنس ماده توربین و مبدل‌های حرارتی تأثیر گذار است.

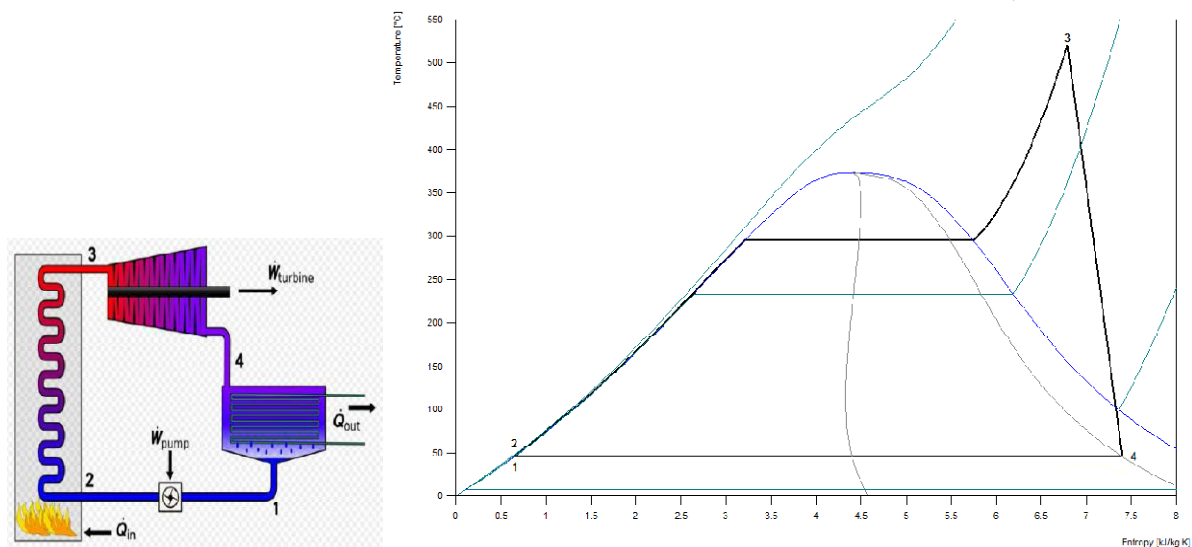
- آب دمای تبخیر بالایی نیز دارد. در نتیجه نیاز به یک منبع حرارتی که بتواند انرژی حرارتی فراوانی در سطوح دما بالا تحویل دهد، دارد.

این سیکل ترمودینامیکی به صورت موفق در واحدهای تولید برق بزرگ (نیروگاه‌های حرارتی) به عنوان یک تکنولوژی شناخته شده به کار می‌رود و مزایای استفاده از آب به عنوان ماده انتقال دهنده حرارت از مشکلات و مضرات آن بسیار بیشتر است.

این سیکل بخار در حال حاضر در واحدهای تولید کننده برق (نیروگاه‌ها) به کرات استفاده می‌شود. در صورتیکه دمای منبع حرارتی پایین باشد مضرات استفاده از آب/بخار آب با در نظر گرفتن نمودار دما - آنترپپی یک سیکل بخار ساده که در نمودار ۲ نشان داده شده است، مشخص می‌شود.

مشکلات اصلی استفاده از آب به عنوان ماده ناقل حرارت به شرح زیر است:

- برای یک دمای چگالش در حدود دمای محیط، فشار



شکل ۲: دیاگرام دما-آنترپپی یک سیکل بخار ساده

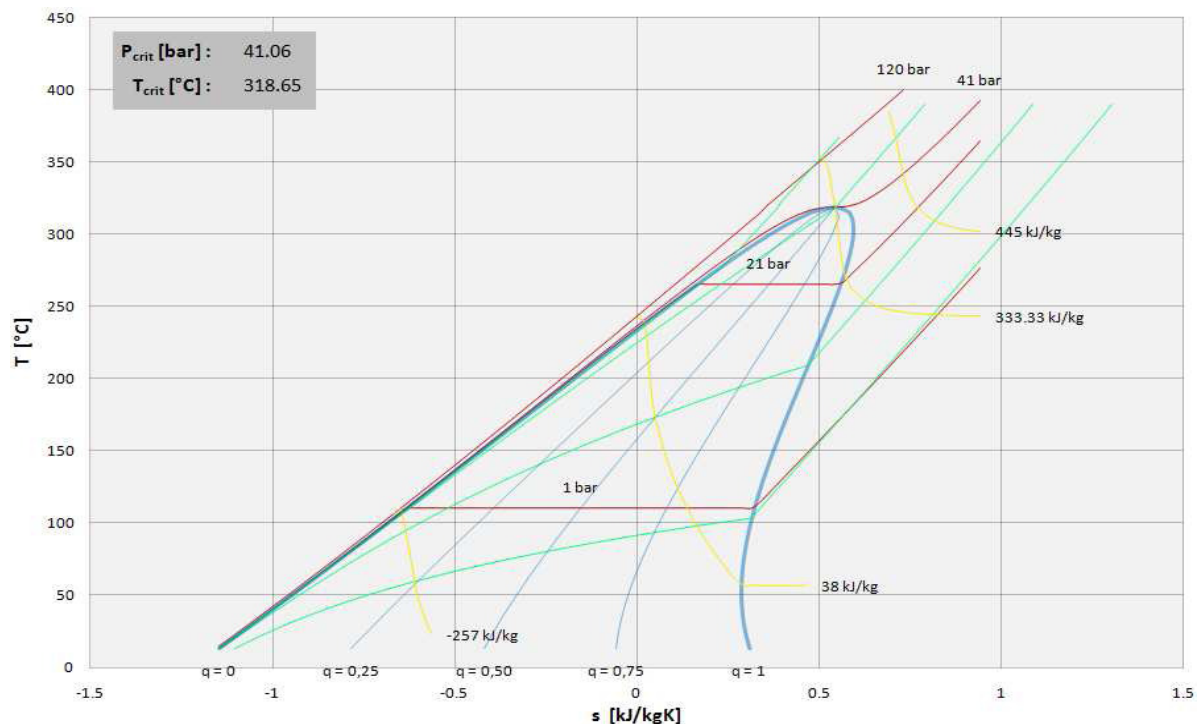
# دهمین همایش بین المللی انرژی

(R2۴۵Fa)، تولوئن (Toluene)، پنتان یا سیلیکون اوایل استفاده می‌شود.

این سیالات به عنوان سیالات خشک شناخته شده و خصوصیات ویژه‌ای در مقایسه با آب / بخار آب دارند. [۲-۵] به عنوان مثال دیاگرام دما - آنترپپی تولوئن در شکل ۳ نشان داده شده است. [۶] در سیالات خشک مانند تولوئن منحنی بخار اشباع در دیاگرام دما - آنترپپی شیب مثبتی دارد. به دلیل این ویژگی این سیالات نیاز به سوپر هیت شدن ندارند. زیرا بعد از انبساط، بخار اشباع در منطقه سوپر هیت باقی می‌ماند.

به دلیل این مشکلات، استفاده از آب یا بخار آب به عنوان سیال ناقل حرارت در مواردی که یک منبع حرارتی اتلافی صنعتی در دماهای پایین در دسترس است، با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود.

گزینه مناسب‌تر در این موارد استفاده از سیکل‌های رنگین آلی (ORC) است. سیکل ORC بر مبنای اصول ترمودینامیکی یک سیکل بخار کلاسیک کار می‌کند و اجزای آن نیز همانند سیکل‌های بخار کلاسیک است (مبدل حرارتی، منبسط‌کننده، کندانسور، پمپ‌های تغذیه و ... ) با این تفاوت که سیال ناقل حرارت در آن متفاوت است. در این تکنولوژی از سیالات آلی نظیر مبرد



شکل ۳: دیاگرام دما-آنترپپی تولوئن

- حرارت تبخیر سیالات آلی تقریباً ده برابر کوچک‌تر از آب است.

این موارد منجر به نیاز به سطوح درجه حرارت پایین‌تر در منابع حرارتی می‌شود. حرارت کمتری در سطوح دمایی بالا برای تبخیر سیال مورد نیاز است و در نتیجه منبع حرارت اتلافی صنعتی با دمای پایین‌تر (به عنوان منبع حرارتی در سیستم ORC) مورد نیاز است. مینیمم دمایی که به عنوان منبع حرارتی در یک سیستم ORC می‌تواند استفاده بشود،

مزایای اصلی استفاده از این سیالات در مقایسه با آب / بخار آب به شرح زیر است:

- سیالات آلی در یک سیستم ORC می‌توانند در دمای تبخیر و فشار پایین‌تری نسبت به آب کار کنند.  
- در صورت استفاده از سیالات آلی نیازی به سوپر هیت شدن نیست (در عمل در واحدهای ORC به میزان کمی سوپر هیت شدن انجام می‌شود).

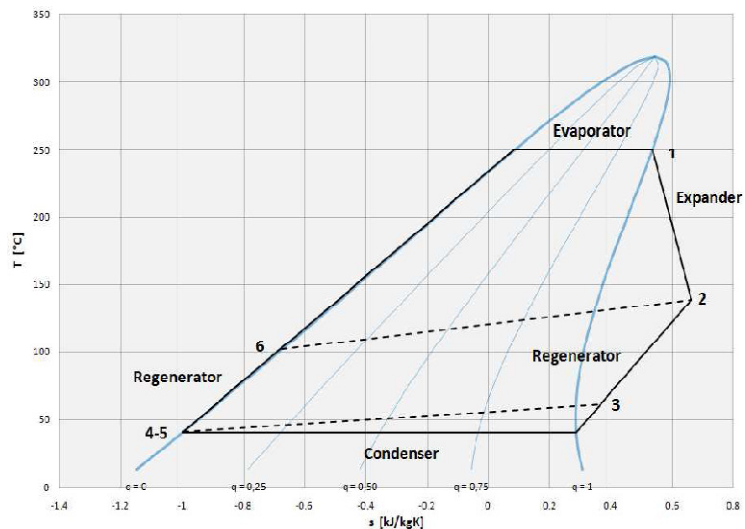
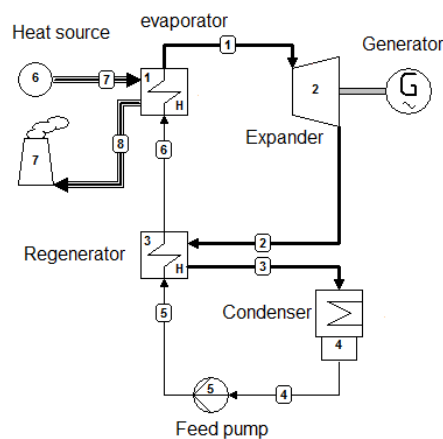
# دهمین همایش بین المللی انرژی

منابع حرارتی دما پایین کارا است. برای حرارت اتلافی با دماهای بالا (گاز خروجی از موتور احتراق) سایر سیالات آلی مانند تلون یا سیلیکون اوایل مورد استفاده قرار می-گیرند.

شکل ۴ نمای شماتیک یک سیستم ORC با ریجنراتور و سیکل مربوطه در دیاگرام دما - انتروپی را نشان می-دهد.

حدود ۵۵ درجه سانتیگراد است. مسلماً راندمان سیکل به شدت وابسته به تفاوت دمای بین تبخیر و چگالش است، به طوری که کاهش این اختلاف دمایی منجر به کاهش راندمان سیکل می-شود.

همچنین انتخاب سیال آلی برای یک کاربرد مشخص نیز پارامتری اثرگذار است. استفاده از مبردها تنها در مورد



شکل ۴: دیاگرام دما-انتروپی ORC با ریجنراتور

سانتیگراد و توان حرارتی ۳۰۰۰ کیلووات را نشان می-دهد. همانطور که در این جدول ملاحظه می-شود، با استفاده از سیستم ORC، حرارت اتلافی بیشتری بازیافت می-شود. ( $p_{th}$  recover نشان‌دهنده حرارت اتلافی بازیافتی است.) علیرغم اینکه در سیستم ORC راندمان سیکل نسبت به سیکل بخار پایین‌تر است، توان الکتریکی بالاتری در ژنراتور به دست می-آید.

جدول ۱: نتایج راندمان عملی واحد بازیافت حرارت اتلافی

		ORC	Steam	
$P_{evaporator}$	[bar]	14	12	18
$\eta_i$ turbine	[%]	75	75	74
$T_{sup}$	[°C]	234	300	329
$P_{th\ recover}$	[kW <sub>th</sub> ]	2509	2371	2121
$P_{gen,nto}$	[kW <sub>e</sub> ]	522	500	473
$\eta_{gen,nto}$	[%]	20.8	21.1	22.3

مراحل سیکل در دیاگرام دما - انتروپی به شرح زیر است:

- ۱-۲ - انبساط به فشار کندانسور
- ۲-۳ - سرد شدن بخار سوپر هیت در ریجنراتور در فشار ثابت
- ۳-۴ - چگالش
- ۴-۵ - افزایش فشار با استفاده از پمپ‌های تغذیه
- ۵-۶ - پیشگرم کردن سیال ORC در ریجنراتور
- ۶-۱ - پیشگرمایش و تبخیر با استفاده از منبع حرارت خارجی

به دلیل ویژگی‌های سیالات خشک، بخار بعد از انبساط سوپر هیت باقی می‌ماند. این ویژگی اثر منفی بر روی راندمان سیکل می‌گذارد، زیرا در این صورت باید بخار سوپر هیت در ابتدا در کندانسور سرد شود. این امر منجر به از بین رفتن محتوای حرارتی بخار سوپر هیت در کندانسور می‌شود. در نتیجه معمولاً از یک ریجنراتور برای افزایش راندمان سیکل استفاده می‌شود. به دلیل این ویژگی‌ها، یک سیستم ORC می‌تواند به طور کارا حرارت اتلافی گازهای خروجی را بازیاب کند. جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی یک جریان حرارت اتلافی با ماکزیمم دمای ۳۵۰ درجه

# دهمین همایش بین المللی انرژی

دمایی می‌کنند، اتفاق می‌افتد. این امر منجر به کاهش تلفات حرارتی ناشی از برگشت ناپذیری می‌شود. جدول ۳ تعدادی از گزینه‌های مناسب مورد استفاده در سیکل ORC را نشان می‌دهد، ویژگی‌های این سیالات هیدروکربنی شامل فشار و دمای بحرانی، فاکتور خروج از مرکز (که به منظور بررسی ساختار مولکولی سیال مدنظر قرار می‌گیرد) و وزن مولی (M) ارائه شده است. جدول ۳: مشخصات سیالات مورد پیشنهاد برای سیکل رنکین آلی

سیال	فرمول	دمای بحرانی (°C)	فشار بحرانی (بار)	M (g/mol)	Ω
Isobutene	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	۱۳۴.۶۶	۳۶.۲۹	۵۸.۱۲	۰.۱۸۴
n-butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	۱۵۱.۹۸	۳۷.۹۶	۵۸.۱۲	۰.۲۰۱
Isopentane	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	۱۸۷.۲	۳۳.۷۸	۷۲.۱۵	۰.۲۲۷
n-pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	۱۹۶.۵۵	۳۳.۷	۷۲.۱۵	۰.۲۵۱

شایان ذکر است برای این سیالات با افزایش دمای بحرانی، فشار بحرانی کاهش و فاکتور خروج از مرکز افزایش می‌یابد. در مورد کلیه این هیدروکربن‌ها، در برخی محدوده‌های دمایی شیب خط اشباع ثابت بوده و انبساط آدیاباتیک بر روی شرایط بخار سوپرهیت در خروجی توربین تاثیر می‌گذارد.

اینورنیزی [۷] ثابت کرده است که میزان سوپرهیت شدن طبق فرمول زیر متناسب با پیچیدگی مولکولی است:

که در آن عملگرها به شرح زیر هستند:

σ: پیچیدگی مولکولی

T<sub>c</sub>: دمای بحرانی سیال بحرانی (بر حسب کلونین)

R: ثابت گازی (kJ/kg K)

S: آنتروپی مخصوص (kJ/kg K)

T: دما

زیرنویس sv بیانگر فشار اشباع و r دمای کاهش یافته است:

$$(T_r = T/T_{CR})$$

پیچیدگی مولکولی با افزایش دمای بحرانی و فاکتور خروج از مرکز، افزایش و با افزایش فشار بحرانی کاهش می‌یابد. برای سیالات هموزن، σ با افزایش تعداد اتم‌ها در مولکول افزایش می‌یابد. در نتیجه در میان کل سیالات مورد بررسی

برای یک سیکل بخار ترکیب فشار تبخیر و دمای سوپر هیت به عنوان یک فاکتور محدود کننده در مواردی که مربوط به بازیافت حرارت اتلافی دما پایین است، می‌باشد. در هر صورت انتخاب سیکل‌های بخار یا ORC به شدت متأثر از پروفیل دمایی منبع اتلاف حرارتی بوده و باید مورد به مورد بررسی شود.

## ۲- انتخاب سیال کاری در یک سیکل ORC

انتخاب مناسب سیال گازی در یک سیکل ORC پارامتری بسیار تأثیرگذار بوده و تأثیر زیادی بر روی کارایی واحد می‌گذارد. به دلیل دمای پایین منبع حرارتی سیستم (دمای حرارت اتلافی واحد صنعتی) ممکن است برگشت ناپذیری در مبدل‌های حرارتی اتفاق بیفتد که این امر می‌تواند بر راندمان کلی مجموعه تأثیر منفی بگذارد. وقوع این پدیده قویاً متأثر از خواص ترمودینامیکی سیال کاری است.

جدول ۲: محدود دمایی گازهای اتلافی از فرآیندهای صنعتی

نوع تجهیز	دمای گاز خروجی
توربین گاز	۳۷۰-۵۴۰
موتورهای رفت و برگشتی	۳۱۵-۶۰۰
موتورهای رفت و برگشت (توربو شارژ)	۲۳۰-۳۷۰
کوره‌های عملیای حرارتی	۴۲۵-۶۵۰
اجاق‌های خشک‌کن	۲۳۰-۶۰۰
سیستم‌های خشک‌کن کوره‌های بازیخت	۴۲۵-۶۵۰

$$\sigma = \frac{T_c}{R} \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_{sv, T_r=0.7}$$

ویژگی مشترک کلیه سیالات آلی که در این سیکل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، نقطه جوش پایین آن‌هاست. همچنین دما و فشار بحرانی این سیالات کمتر از آب است، در نتیجه سیالاتی همچون هیدروکربن‌ها، مبردها (refrigerants) و فلوروکربن‌ها گزینه‌های مناسبی برای استفاده در سیکل‌های ORC هستند. [۶] در عین حال در هنگام انتخاب سیال کاری، پارامترهایی مانند امنیت، سلامتی و اثرات زیست محیطی نیز باید مدنظر قرار گیرند. به دلیل اثرات مخرب زیست محیطی فلوروکربن‌ها، این مواد از لیست مذکور حذف می‌شوند.

به دلیل دمای بحرانی پایین، این سیالات می‌توانند زیر شرایط فوق بحرانی کار کنند. در نتیجه مطابقت بیشتری بین دمای دو سیالی که در مبدل‌های حرارتی با هم تبادل

# دهمین همایش بین المللی انرژی

استفاده قرار می‌گیرد. اما در مواردی که استفاده مشخصی از این حرارت اتلافی وجود ندارد، می‌توان با استفاده از یک سیکل ORC از این حرارت اتلافی برای تولید برق استفاده کرد.

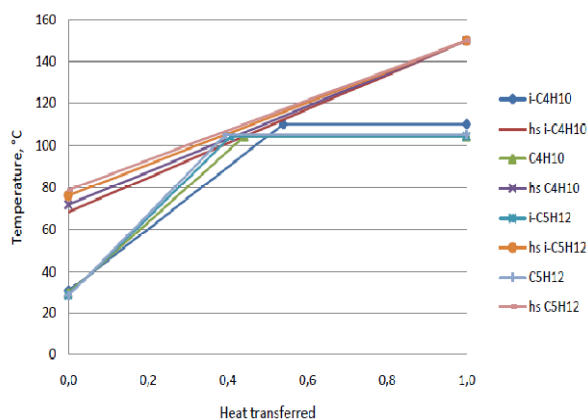
یکی از منابع مهم اتلاف حرارت در صنایع مربوط به صنعت سیمان است. تولید سیمان یکی از پرمصرف‌ترین فرآیندهای تولید صنعتی از نظر مصرف انرژی است. حتی در یک خط بهینه تولید سیمان، مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی حرارتی از طریق خنک‌کن‌های کلینکر تلف می‌شود. بنابراین بازیافت این حرارت اتلافی برای تولید برق می‌تواند بسیار کارا باشد. در ۲۰ سال اخیر تعداد زیادی از کارخانجات سیمان در نقاط مختلف دنیا (به خصوص کشورهای آسیای شرقی) نیروگاه‌های تولید برق از بازیافت حرارت اتلافی در کارخانجات خود احداث کرده‌اند. با این وجود به دلیل تفاوت‌های دمای هوای خروجی از آگراز که بین ۱۶۰ تا ۳۳۰ درجه سانتیگراد می‌تواند متغیر باشد، این طراحی می‌تواند با ناپایداری و راندمان پایین واحد نیروگاه-های مذکور همراه باشد. در این میان نیروگاه‌های با سیکل ORC می‌تواند پایداری بالاتری از خود نشان دهد.

سایر موارد استفاده از سیستم‌های ORC در صنایع عبارتند از حلال‌های حاوی گاز اتلاف شده پس‌سوز (VOC)، شعله-های گاز در صنایع فرآیندی، گازهای با کیفیت پایین، بخارهای کم فشار، آب‌سردکن‌ها، مشعل‌های ذوب و ... است.

۲- توربین‌های گاز و موتورهای احتراق داخلی موتورهای احتراق به طور گسترده در CHPها استفاده می‌شوند. در سیستم‌های CHP در کنار تولید انرژی الکتریکی، از حرارت اتلافی موتور استفاده می‌شود. موتورهای احتراق داخلی و توربین‌های گازی، راندمان حرارتی بین ۲۰ تا ۵۰ درصد دارند. در نتیجه مقدار زیادی انرژی فسیلی اتلاف می‌شود. گازهای خروجی معمولاً دمایی بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد دارند و در نتیجه ورودی مناسبی برای سیستم‌های ORC محسوب می‌شوند. شکل ۶ شماتیک کلی یک سیستم ترکیبی CHP+ORC را نشان می‌دهد. همچنین سیستم‌های ORC ای وجود دارد که به عنوان سیستم CHP عمل می‌کنند. دمای کندانس این سیستم‌ها عموماً بالاتر از سیستم‌هایی که با سیکل بخار کار می‌کنند بوده و از حرارت کندانسور برای تولید آب

میزان سوپرهیت شدن سیال در خروجی توربین در مورد پنتان بیشترین و در مورد ایزوبوتان کمتر از سایرین است. لازم به ذکر است کلیه این سیالات ضدخورنده بوده و در محدوده دمایی موردنظر از نظر شیمیایی پایدار هستند.

دمای تبخیر سیال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی سیکل ORC می‌گذارد. همچنین فشار تبخیر نیز می‌تواند بر میزان انرژی تولید شده اثرگذار باشد.



شکل ۵: نمودار دما-انتقال حرارت برای انواع سیالات کاری

همانطور که در شکل ۵ مشخص است ایزوبوتان که دمای بحرانی پایین‌تری نسبت به سایر سیالات دارد، دمای تبخیر ایتیموم بالاتری دارد، (تقریباً ۵ درجه سانتیگراد بالاتر) منبع حرارتی را با سرعت بیشتر و به طور مؤثرتر سرد می‌کند در نتیجه راندمان بازیافت حرارت بالاتر می‌رود. با این وجود میزان حرارت بازیافت شده حین فاز تبخیر برای ایزوبوتان کمتر از سایر سیالات است. نسبت نرخ حرارت نهان (Latent heat) به کل حرارت منتقل شده با افزایش دمای بحرانی و پیچیدگی مولکولی افزایش می‌یابد و این نسبت برای پنتان بالاتر از سایر سیالات است.

## ۳- کاربردهای سیستم‌های ORC

تکنولوژی ORC در محدوده وسیعی کاربرد دارد. به خصوص در مورد منابع حرارتی دما پایین. تعدادی از کاربردهای این تکنولوژی به شرح زیر است:

### ۱- بازیافت حرارت اتلافی در صنایع

در صنایع، اتلاف حرارت در دماهای پایین به کرات اتفاق می‌افتد، که طی آن حرارت از طریق برج‌های خنک‌کن یا دودکش‌ها به محیط وارد می‌شود. بخشی از این منابع حرارتی برای پیش‌گرمایش یا گرمایش ناحیه‌ای مورد

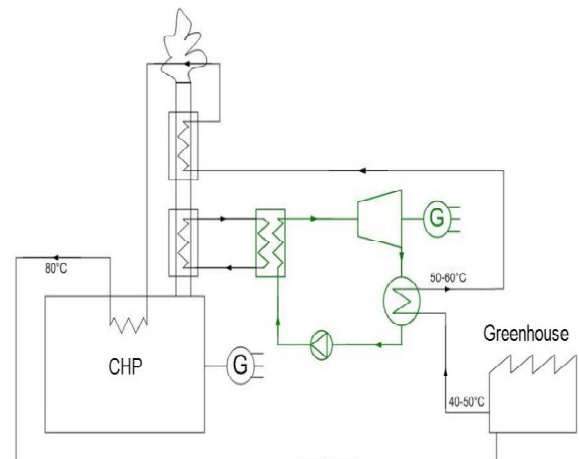
# دهمین همایش بین المللی انرژی

دما پایین معرفی شده است. با بررسی نمودارهای ترمودینامیکی مربوطه، مشکلات و محدودیت‌های آب (به عنوان سیال کاری مورد استفاده در سیکل رنکین کلاسیک) و مزیت‌های استفاده از مواد آلی مانند تلوتن (به عنوان سیال کاری مورد استفاده در سیکل رنکین آلی) در صورت استفاده از منبع حرارتی دما پایین ارائه شده است. در نهایت با بررسی مشخصات ترمودینامیکی انواع سیالات کاری مورد استفاده در تکنولوژی ORC، راندمان بازیافت حرارت با استفاده از انواع سیالات کاری مورد مقایسه قرار گرفته و بهترین سیالات کاری برای استفاده در این تکنولوژی به منظور تولید برق، مشخص شده است.

## مراجع

- [1] U.S department of energy, (2008) "Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry"
- [2] P.J. Mago, L.M. Chamra, K. Srinivasan, C. Somayaji, (2008), "An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids", Applied Thermal Engineering, vol. 28, , p. 998—1007.
- [2] T. Hung, (2001), "Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids", Energy Conversion and Management, vol. 42, p. 539—553.
- [3] B. Liu, K. Chien, en C. Wang, (2004), "Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery", Energy, vol. 29, p. 1207—1217.
- [4] G. Angelino, P. Colonna di Paliano, (1998), "Multi-component Working Fluids For Organic Rankine Cycles (ORCs)", Energy, vol. 23, p. 449—463.
- [5] P. Colonna, T.P. van der Stelt, (2004), FluidProp: a program for the estimation of thermo physical properties of fluids, Energy Technology Section, Delft University of Technology, The Netherlands ([www.FluidProp.com](http://www.FluidProp.com)).
- [6] Kestin, DiPippo, Khalifa, Ryley., (1980), "Sourcebook on the Production of Electricity from Geothermal Energy", United States Department of Energy
- [7] Invernizzi C., Iora P., Silva P., (2006) "Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines", Applied Thermal Engineering, vol 27, pp.100-110
- [8] Price H., Hassani V., (2001), "Modular Trough Power Plants", "Proceedings of Solar Forum 2001 Solar Energy : The power to choose", April 21-25, 2001, Washington DC, USA
- [9] Tchanche B.F., Lambrinos Gr., Frangoudakis A., Papadakis G., (2010), "Exergy analysis of micro-organic Rankine power cycles for a small scale solar driven reverse osmosis desalination system", Applied Energy, vol. 87, p. 1295–1306

داغ استفاده می‌شود. به دلیل داشتن دمای کندانس بالاتر، این سیستم‌ها بازده الکتریکی پایین‌تری دارند. در صنعت خودرو نیز مطالعاتی درخصوص نصب سیستم‌های ORC بر روی گازهای خروجی موتور اتومبیل انجام شده است. همچنین تولید سیستم‌های ORC کوچک (در حدود چند کیلووات) برای تأمین نیروی حرکتی کمپرسورهای نیز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۶: یک سیستم CHP ترکیب شده با سیکل ORC

۳- واحدهای تولید توان انرژی تجدیدپذیر:

تکنولوژی ORC به طور موفقیت‌آمیز در واحدهای تولید توان انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، زمین گرمایی و زیست توده مورد استفاده قرار گرفته است. در واحدهای تولیدکننده برق از طریق انرژی خورشیدی، انرژی متمرکز شده خورشیدی در طشتک‌های سهموی ذخیره شده و به عنوان منبع حرارتی وارد یک سیکل تولید برق می‌شود. در این موارد علاوه بر سیکل‌های بخار می‌توان از یک سیکل رنکین آلی (ORC) برای تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. [۸] نمونه دیگر این کاربرد در نمک‌زایی از آب دریا با استفاده از انرژی خورشید گزارش شده است. [۹] انرژی زمین گرمایی در محدوده دمایی گسترده‌ای در دسترس است. به دلیل مناسب بودن کاربرد ORC در دماهای متوسط، از این تکنولوژی در تولید انرژی الکتریکی از انرژی زمین گرمایی استفاده می‌شود. در بویلرهای زیست توده، به دلیل فشار عملکردی پایین، استفاده از سیستم ORC نسبت به سیکل‌های بخار ارجحیت دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تکنولوژی ORC (سیکل رنکین آلی) به عنوان یک راهکار عملیاتی برای تولید برق از منابع حرارتی