



تحلیل ترمودینامیکی به کارگیری کمپرسور در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات

سعید محمدی قاضی جهانی^۱، لیلی گروسی فرشی^{۲*}، امیرحسین مصفا^۳ و علی نجیب فر^۴

^۱ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۴ دانشجو دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

چکیده

در این مقاله، تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با کمپرسور در سه آرایش مختلف معرفی شده و از لحاظ ترمودینامیکی با آرایش ساده این سیکل‌ها مقایسه شده‌اند. محلول‌های آب-لیتیوم بروماید، آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات به عنوان محلول کاری در این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های آب-لیتیوم بروماید نسبت به سیستم‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات، دارای گرمای تحویلی با دمای پایین‌تر، حداقل دمای ژنراتور و اواپراتور بزرگتر و احتمال وقوع پدیده کریستالیزاسیون بیشتر است؛ همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزودن کمپرسور به تبدیل کننده‌های حرارت جذبی ساده باعث افزایش دمای گرمای تحویلی، کاهش حداقل دمای ژنراتور و اواپراتور و افزایش نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم ترمودینامیک به خصوص در دماهای ابزوربر بالاتر می‌شود. سیستم‌ها با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات نسبت به سیستم‌ها با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات، دارای حداقل دمای ژنراتور و اواپراتور پایین‌تر و دمای ابزوربر بالاتر می‌باشند، ولی به جز در دماهای بالای ابزوربر، نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم پایین‌تری دارند.

کلمات کلیدی: تبدیل کننده حرارت جذبی؛ آب-لیتیوم بروماید؛ آمونیاک-نمک.

Thermodynamic Analysis of using Compressor in Absorption Heat Transformers with Ammonia-Lithium Nitrate and Ammonia Sodium Thiocyanate as Working Fluids

S. Mohammadi Ghazi Jahani¹, L. Garousi Farshi^{2*}, A. Mosaffa³, A. Najibfar⁴

¹ MSc., Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

³ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

⁴ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Abstract

In this article, three configurations of using compressor in absorption heat transformers are introduced and analyzed thermodynamically and compared with simple configuration of them. Water-lithium bromide, ammonia-lithium nitrate and ammonia sodium thiocyanate solutions are used as working fluid in these systems. The results show that systems using water-lithium bromide as working fluid have lower delivered heat temperature, higher minimum generator and evaporator temperatures and higher possibility of crystallization occurrence than systems using ammonia-lithium nitrate and ammonia sodium thiocyanate fluids as working fluid. In addition, the results show that using compressor in absorption heat transformers increase the temperature of delivered heat, decrease the minimum temperatures of absorber and generator and increase PER, ECOP especially at high absorber temperature. Compared to the systems using ammonia-lithium nitrate, the systems using ammonia sodium thiocyanate starts to perform at lower generator and evaporator temperatures and delivers heat at higher temperatures, but they have lower primary energy ratio and second low efficiency except at high absorber temperatures.

Keywords: Absorption Heat Transformer; Water-Lithium Bromide; Ammonia-salt;

۱ - مقدمه

سیستم‌های جذبی به دلیل توانایی در به کارگیری انرژی‌های اتلافی و منابع انرژی تجدیدپذیر با دمای پایین بسیار مورد توجه قرار می‌گیرند [۱-۳].

یکی از جالب‌ترین و پرتعدادترین تکنولوژی‌ها در زمینه بازیابی و ذخیره انرژی، تبدیل کننده‌های حرارت جذبی می‌باشند. اکثر تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با مصرف مقدار ناچیزی انرژی (کار پمپ‌ها)، حرارت دما پایین را به گرمای دما بالا تبدیل می‌کنند. تبدیل کننده‌های حرارت جذبی تلفات انرژی را کاهش می‌دهند، کربن دی اکسید تولید نمی‌کنند و در نتیجه اثرات گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند؛ همچنین این سیستم‌ها از محلول‌های طبیعی استفاده کرده، لذا به لایه اوزون صدمه‌ای نمی‌زنند [۴].

تبدیل کننده‌های حرارت جذبی، گرما را در دمای متوسط که معمولاً از اتلافات صنایع، انرژی خورشیدی یا زمین‌گرمایی تامین می‌شود، از طریق ژنراتور و اواپراتور خود دریافت می‌کنند و بخشی از آن را در دمای بالاتر و در ایزوربر برای مصارف مختلف تحویل می‌دهند و بقیه حرارت را در دمای پایین و در کندانسور به محیط آزاد می‌کنند. استفاده از تبدیل کننده‌های حرارت جذبی از یک سو باعث می‌شود که اتلافات صنایع با دمای بالا به محیط زیست وارد نشوند و از سوی دیگر، امکان استفاده مجدد از بخشی از همان اتلافات را در دمای بالاتر فراهم می‌کنند. از تبدیل کننده‌های حرارت جذبی برای شیرین سازی و تقطیر آب دریاها، بازیابی انرژی از فرایندهای صنعتی، تولید حرارت دما بالا از پنل‌های خورشیدی و... استفاده می‌کنند. ترکیب تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با چرخه‌های مختلف ترمودینامیکی، نقش به سزایی در بازیابی حرارت اتلافی دارد و سبب بهبود عملکرد کل سیستم می‌شود.

متداول‌ترین محلول مورد استفاده در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی، محلول آب-لیتیوم بروماید می‌باشد که در زیر به چند نمونه از این سیستم‌ها در ادبیات فن اشاره می‌شود:

عیسی و همکاران [۵] مدلی از تبدیل کننده حرارت جذبی را با محلول آب-لیتیوم بروماید طراحی و از لحاظ قانون اول ترمودینامیک تحلیل کرده‌اند. آن‌ها جداولی از دماها، غلظت‌ها، نسبت جریان‌ها، ضریب عملکرد کارنو و ضریب عملکرد بر اساس آنتالپی‌ها را گزارش داده‌اند. نتایج

آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین ضریب عملکرد نزدیک به ۰/۵ است. ریورا [۶] تبدیل کننده حرارت جذبی را که برای شیرین سازی آب استفاده می‌شود و سیال عامل آن محلول آب-لیتیوم بروماید است، از نظر قانون اول و دوم ترمودینامیک تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین برگشت ناپذیری مربوط به ایزوربر است که تقریباً ۳۰ درصد کل برگشت ناپذیری سیستم را شامل می‌شود و کمترین برگشت ناپذیری مربوط به پمپ‌ها و مبدل حرارتی است. تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول آب-لیتیوم - بروماید توسط ایشیدا و ژانژی [۷] از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک تحلیل شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین بازده قانون دوم برای چنین سیستم‌هایی تقریباً ۰/۶۸ است و بیشترین برگشت ناپذیری در ایزوربر اتفاق می‌افتد. کورم و هرورز [۸]، تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آب-آمونیاک و آب-لیتیوم بروماید را با هم مقایسه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، سیستم‌هایی که از محلول آب-لیتیوم بروماید استفاده می‌کنند، عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های آب-آمونیاک دارند؛ اما استفاده از محلول آب-لیتیوم بروماید دارای معایبی از جمله خوردگی، ویسکوزیته بالا و محدودیت انحلال پذیری است و همچنین امکان ایجاد پدیده کریستالیزاسیون در این محلول و در دماهای کاری بالا زیاد است؛ همچنین کورم بیان کرده است که به دلیل فراریت هر دو ماده آب و آمونیاک، در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول آب-آمونیاک، وجود یکسو کننده در خروجی ژنراتور برای جلوگیری از خروج آب به همراه آمونیاک ضروری می‌باشد. در صورت عدم وجود یکسو کننده در این سیستم‌ها، آب به همراه آمونیاک وارد اواپراتور می‌شود و چون دمای نقطه جوش آب بالا است، آمونیاک در اواپراتور تبخیر شده و از آن خارج می‌شود، ولی آب در اواپراتور جمع شده و باعث کاهش عملکرد سیستم می‌شود [۹].

با مرور و جمع بندی کارهای انجام شده در رابطه با تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول آب-لیتیوم بروماید، مشخص می‌شود، سیستم‌هایی که از این محلول استفاده می‌کنند، نسبت به سایر محلول‌ها دارای ضریب عملکرد و بازده قانون دوم بالاتری می‌باشند، اما این محلول دارای معایبی از جمله خوردگی، ویسکوزیته بالا، محدودیت انحلال

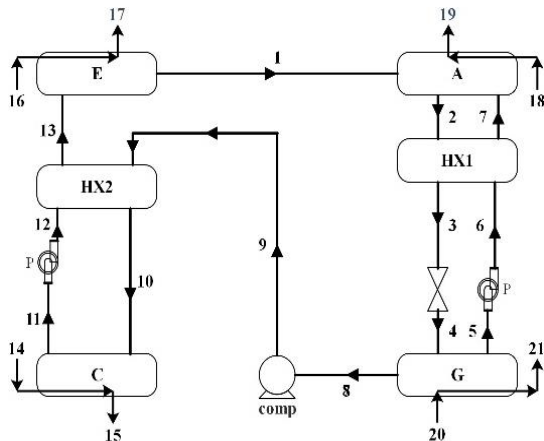
همکاران [۹] برای این محلول‌ها ارائه گردیده و تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک تحلیل شده‌اند. از آنجایی که تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-نمک نسبت به تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول آب-لیتیوم بروماید ضریب عملکرد و بازده قانون دوم کمتری را دارا می‌باشند، لذا برای بهبود این پارامترها تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با کمپرسور برای اولین بار در این مقاله معرفی شده‌اند.

۲- معرفی چرخه‌های تبدیل کننده حرارت جذبی

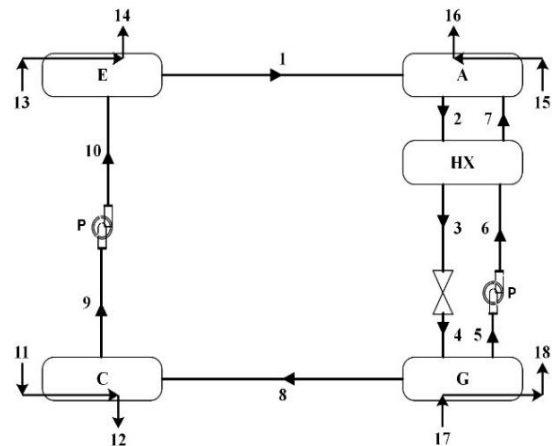
در این مقاله تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با کمپرسور در سه آرایش مختلف معرفی و با تبدیل کننده‌های حرارت جذبی ساده مقایسه شده‌اند. محلول‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها آب-لیتیوم بروماید، آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات می‌باشند. در این قسمت نحوه عملکرد تمامی چرخه‌ها به همراه شکل شماتیک آنها آورده شده است. شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی ساده (AHT) به صورت شکل ۱ است. این سیستم شامل اواپراتور، کندانسور، ژنراتور، ایزوربر، مبدل حرارتی، شیر خفانش و پمپ‌ها است. در این سیستم حرارت در دمای متوسط (که معمولاً از اتلافات صنایع، انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و ... بدست می‌آید) به ژنراتور داده می‌شود تا مقداری مبرد (آمونیاک یا آب) از محلول جدا شود. مبرد در حالت بخار اشباع از ژنراتور خارج شده و وارد کندانسور می‌شود. در کندانسور مبرد مقداری گرما در دمای پایین از دست می‌دهد و چگالیده می‌شود. مبرد در حالت مایع اشباع از کندانسور به سمت اواپراتور پمپ شده و سپس در اواپراتور با دریافت حرارت در دمای متوسط تبخیر شده و وارد ایزوربر می‌شود. مبرد در حالت بخار اشباع جذب محلول پمپ شده از ژنراتور به ایزوربر می‌شود و مقداری حرارت را در دمای بالا تحویل می‌دهد. در نهایت محلول رقیق ابتدا محلول غلیظ (غلیظ از لحاظ مقدار نمک) پمپ شده از ژنراتور را پیش گرم کرده و سپس به ژنراتور برگردانده شده و چرخه تکمیل می‌شود. شکل ۲ تبدیل کننده حرارت جذبی با کمپرسور بین ایزوربر-اواپراتور (AE) را نشان می‌دهد. این سیستم علاوه بر دارا بودن تمامی اجزای تبدیل کننده حرارت جذبی ساده، شامل

پذیری و ... است، لذا مطالعه تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های جایگزین ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور در این مقاله محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات به عنوان محلول جایگزین آب-لیتیوم بروماید مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در زیر مطالعاتی که در این زمینه انجام گرفته، مورد بررسی قرار می‌گیرد:

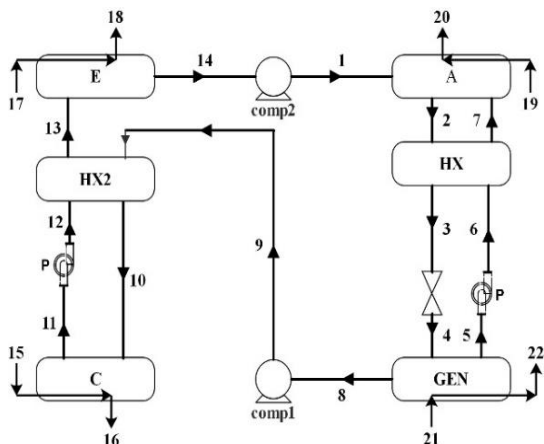
بست و همکاران [۱۰ و ۱۱] مدل طراحی شده توسط عیسی [۵] را به ترتیب با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات تحلیل کرده‌اند و جدول مشابهی را در ترکیب دماهای ممکن از نظر قانون اول ترمودینامیک تنظیم کرده‌اند. بیشترین ضریب عملکرد برای محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۲ به دست آمده است. آن‌ها از خواص ارائه شده توسط فریرا [۱۲] برای محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات استفاده کرده‌اند. هرناندز و همکاران [۱۳]، چرخه‌های تبدیل کننده جذبی تک اثره و دو اثره را که سیال کاری آن‌ها محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات است، از لحاظ قانون اول ترمودینامیک تحلیل و مقایسه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب عملکرد تبدیل کننده‌های حرارت جذبی تک اثره نسبت به سیستم دو اثره بیشتر، ولی دمای ایزوربر تحویلی آن کمتر است. هارد و همکاران [۱۴]، تبدیل کننده حرارت جذبی را با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آب-لیتیوم بروماید از لحاظ قانون اول ترمودینامیک تحلیل و مقایسه کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که اگرچه بازده سیستم با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات مقدار ناچیزی کمتر از بازده سیستم با محلول آب-لیتیوم بروماید است، اما این محلول در قبال محدودیت پدیده کریستالیزاسیون انعطاف پذیرتر است. با بررسی تمامی کارهای انجام گرفته در رابطه با تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات مشخص می‌شود که همه تحقیقات در این زمینه فقط از لحاظ قانون اول ترمودینامیک تحلیل شده‌اند؛ همچنین در تمامی این تحقیقات از خواص ترمودینامیکی و فیزیکی ارائه شده توسط فریرا [۱۲] استفاده شده است، در حالی که این خواص در دماهای بالاتر با خواص تجربی اختلاف بسیار زیادی دارند [۹]. لذا در این مقاله از خواص ترمودینامیکی دقیق‌تر استفاده شده که توسط گروسی و



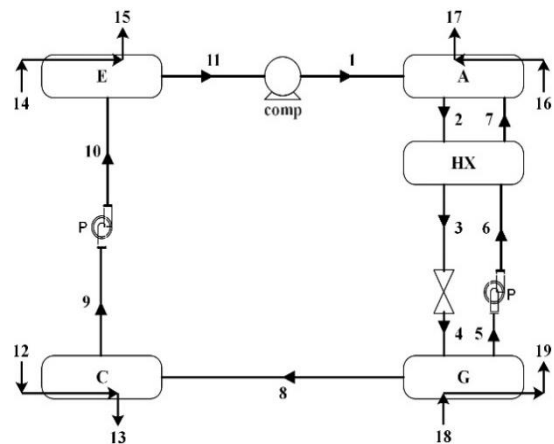
شکل ۳- شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی CG



شکل ۱- شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی AHT



شکل ۴- شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی AE&CG



شکل ۲- شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی AE

مورد نیاز اواپراتور و در نتیجه بهبود عملکرد چرخه، این مبرد قبل از ورود به کندانسور گرمای خود را توسط مبدل حرارتی دوم به مبرد ورودی به اواپراتور تحویل داده و سپس وارد کندانسور می‌شود. نحوه عملکرد سایر قسمت‌های این چرخه، مشابه چرخه تبدیل کننده حرارت جذبی ساده است. این سیستم نیز همانند تبدیل کننده حرارت جذبی با کمپرسور بین ایزوربر-اواپراتور شامل سه سطح فشار است، با این تفاوت که کندانسور دارای فشار متوسط و اواپراتور و ایزوربر دارای فشار بالا می‌باشند. آخرین آرایش مورد مطالعه در این مقاله، تبدیل کننده حرارت جذبی با دو کمپرسور بین ایزوربر-اواپراتور و کندانسور-ژنراتور (AE&CG) است که شکل شماتیک آن به صورت شکل ۴ است. این سیستم ترکیبی از

یک کمپرسور اضافه نیز می‌باشد. نحوه عملکرد این چرخه مشابه سیکل ساده است، با این تفاوت که مبرد تبخیر شده در اواپراتور قبل از ورود به ایزوربر متراکم شده و فشار افزایش می‌یابد. این سیستم بر خلاف سیکل ساده که شامل دو سطح فشار می‌باشد، دارای سه سطح فشار (سطح فشار پایین در ژنراتور و کندانسور، سطح فشار متوسط در اواپراتور و سطح فشار بالا در ایزوربر) است.

شکل شماتیک تبدیل کننده حرارت جذبی با کمپرسور بین کندانسور-ژنراتور (CG) در شکل ۳ آورده شده است. این چرخه نسبت به تبدیل کننده حرارت جذبی ساده، دارای یک کمپرسور و یک مبدل حرارتی اضافی است. در این سیستم مبرد خروجی از ژنراتور توسط کمپرسور متراکم شده و در نتیجه فشار و دما افزایش می‌یابد. به منظور کاهش حرارت

جدول ۱- پارامترهای کارکردی سیستم‌ها [۹]

مقدار	پارامتر
$T_C - 8$	دمای ورودی آب خنک‌کن کندانسور
$T_C - 3$	دمای خروجی آب خنک‌کن کندانسور
$T_G + 10$	دمای ورودی بخار اشباع گرم‌کن ژنراتور
$T_G + 10$	دمای خروجی مایع اشباع گرم‌کن ژنراتور
$T_A - 8$	دمای ورودی آب خنک‌کن ایزوربر
$T_A - 3$	دمای خروجی آب خنک‌کن ایزوربر
$T_E + 10$	دمای ورودی بخار اشباع گرم‌کن اواپراتور
$T_E + 10$	دمای خروجی مایع اشباع گرم‌کن اواپراتور
$30\text{ }^\circ\text{C}$	دمای کندانسور
$120\text{ }^\circ\text{C}$	دمای ایزوربر
$90\text{ }^\circ\text{C}$	دمای ژنراتور
$70\text{ }^\circ\text{C}$	دمای اواپراتور
۰/۹۵	بازده پمپ و بازده الکتریکی
۰/۴	بازده تبدیل گرما به کار
۰/۷	بازده مبدل‌های حرارتی
۱/۶	نسبت تراکم کمپرسورها
5000 kPa	ماکزیمم فشار خروجی کمپرسور

سیستم‌های مورد بررسی تمامی شرایط ذکر شده در جدول ۱ ثابت هستند، در صورتی که شرایط دیگری بیان نشده باشد. از قوانین بقای جرم و بقای انرژی برای مدل‌سازی تبدیل کننده‌های حرارت جذبی استفاده شده است. برای هر یک از اجزای سیستم‌ها و با صرف نظر کردن از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل این قوانین به صورت زیر می‌باشند:

• بقای جرم

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (1)$$

که در آن \dot{m} نرخ جریان جرمی است.

دو آرایش قبلی تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با کمپرسور است و دارای چهار سطح فشار است.

در تمامی چرخه‌های مورد مطالعه در این مقاله، برای تامین حرارت مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور و همچنین برای دفع حرارت ایزوربر و کندانسور از جریان‌های خارجی (مطابق شکل‌های ۱ تا ۴) استفاده شده است.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌ها

فرضیات به کار رفته برای مدل‌سازی و تحلیل تبدیل کننده‌های حرارت جذبی در این مقاله به صورت ذیل است:

- تمامی سیستم‌ها در شرایط حالت پایا می‌باشند.
- از افت فشار ناشی از اصطکاک در مبدل‌ها و لوله‌کشی‌ها و همچنین از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است.
- مبرد در خروجی کندانسور و اواپراتور در حالت اشباع است.
- محلول در خروجی ایزوربر و ژنراتور در تعادل دمایی با آن جز است.
- انتقال حرارت بین محیط و اجزای ایزوربر، ژنراتور، کندانسور، اواپراتور و مبدل‌های حرارتی وجود ندارد.
- فرایند خفانش در شیر انبساط و فرایند تراکم در کمپرسور آدیباتیک است.
- دما و فشار محیط به ترتیب $25\text{ }^\circ\text{C}$ و 100 kPa در نظر گرفته شده است.

در این مقاله فرض شده است که انتقال حرارت بین مبدل‌ها و محیط صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین تأمین حرارت مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور و همچنین دفع حرارت کندانسور و ایزوربر از طریق جریان‌های خارجی با شرایط بیان شده در جدول ۱ صورت می‌گیرد. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که هر چقدر فشار ورودی به ایزوربر بیشتر باشد، کارایی چرخه هم افزایش خواهد یافت. به منظور افزایش فشار ورودی ایزوربر، در این تحقیق از یک کمپرسور با تکنولوژی بسیار بالا استفاده شده است [۱۵]. این کمپرسور قادر است، آمونیاک (سیال مورد استفاده در این تحقیق) را تا 5 MPa متراکم کند؛ همچنین ماکزیمم دمای سیال متراکم شده در این کمپرسور باید کمتر از $180\text{ }^\circ\text{C}$ باشد. در تحلیل

$$\delta_j = \frac{I_j}{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_p + \dot{m}\Delta\varphi_G + \dot{m}\Delta\varphi_E} \quad (۸)$$

که در رابطه (۸)، δ_j برگشت ناپذیری نسبی جز زام است. برای تحلیل تبدیل کننده‌های حرارت جذبی از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک، خواص ترموفیزیکی محلول‌ها و مواد به کار رفته در این سیستم‌ها مورد نیاز است. در این تحقیق از خواص ارائه شده توسط گروسی و همکاران [۹] برای محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات و از خواص موجود در کتابخانه نرم افزار EES [۱۷] برای محلول آب-لیتیوم بروماید، آمونیاک خالص و آب استفاده شده است.

۴- بحث و نتایج

سیستم‌ها از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک در نرم افزار EES مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در این قسمت آورده شده است.

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، نتایج تحلیل قانون اول ترمودینامیک تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات که توسط بست و همکاران [۱۰ و ۱۱] انجام گرفته، جهت اعتبار سنجی کار حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۵ و ۶ مقایسه ضرایب عملکرد بدست آمده توسط بست و کار حاضر را به ترتیب برای سیستم‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود، اختلاف بسیار جزئی بین نتایج کار حاضر و بست وجود دارد که دلیل آن، استفاده از خواص ترموفیزیکی اصلاح شده برای محلول‌ها در کار حاضر است.

هدف اصلی این مقاله، تحلیل تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-نمک است. از آنجایی که محلول آب-لیتیوم بروماید متداول‌ترین محلول در این سیستم‌ها است، لذا در این قسمت نتایج مربوط به استفاده از این سه محلول در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی به عنوان سیال کاری با هم مقایسه شده‌اند. شکل ۷ نسبت انرژی اولیه و شکل ۸ بازده قانون دوم چرخه‌های AHT و AE&CG را با سه محلول (در دمای ژنراتور ۷۰ درجه سلسیوس و بقیه شرایط عملکردی مطابق جدول ۱ نشان می‌دهند. همانطور

• بقای انرژی

$$\sum \dot{m}_i(1 - X_i) = \sum \dot{m}_o(1 - X_o) \quad (۲)$$

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} = \sum \dot{m}_o h_o - \sum \dot{m}_i h_i \quad (۳)$$

که در آن X و h به ترتیب غلظت آمونیاک و انتالپی ویژه است. بازده ایزونتروپیک کمپرسورهای به کار رفته در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با محلول‌های آمونیاک-نمک مطابق [۱۲] به صورت رابطه (۴) تعریف شده است:

$$\eta_{is} = 0.976695 - 0.0366432Pr + 0.0013378Pr^2 \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، Pr نسبت تراکم بین خروجی و ورودی کمپرسور است؛ همچنین بازده ایزونتروپیک کمپرسور در سیستم آب-لیتیوم بروماید به صورت عددی ثابت و برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه سیستم‌ها از لحاظ قانون اول، از پارامتر نسبت انرژی اولیه (PER) به جای پارامتر ضریب عملکرد استفاده شده است. این پارامتر افت‌های مربوط به تولید توان را نیز به حساب می‌آورد. این پارامتر به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$PER = \frac{\dot{Q}_A}{\frac{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_p}{\eta \times \eta_{el}} + \dot{Q}_E + \dot{Q}_G} \quad (۵)$$

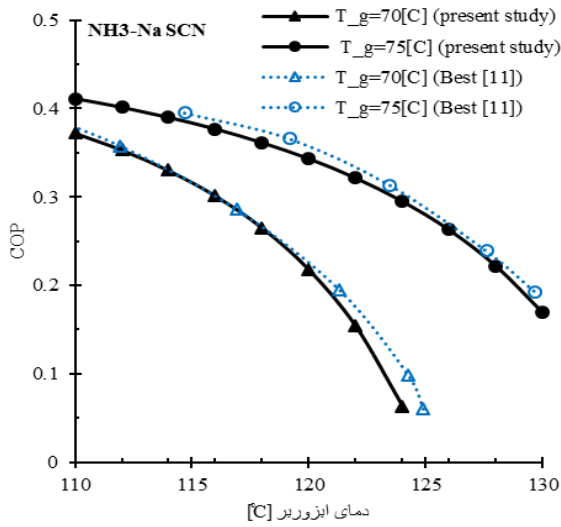
در رابطه (۵)، η و η_{el} به ترتیب بازده مربوط به تبدیل گرما به کار و بازده الکتریکی است. این مقدار مطابق مقدار ذکر شده در [۱۶] برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است؛ همچنین به منظور تحلیل سیستم‌ها از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک از بازده قانون دوم (ECOP) استفاده شده است که به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$ECOP = \frac{\dot{m}\Delta\varphi_A}{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_p + \dot{m}\Delta\varphi_G + \dot{m}\Delta\varphi_E} \quad (۶)$$

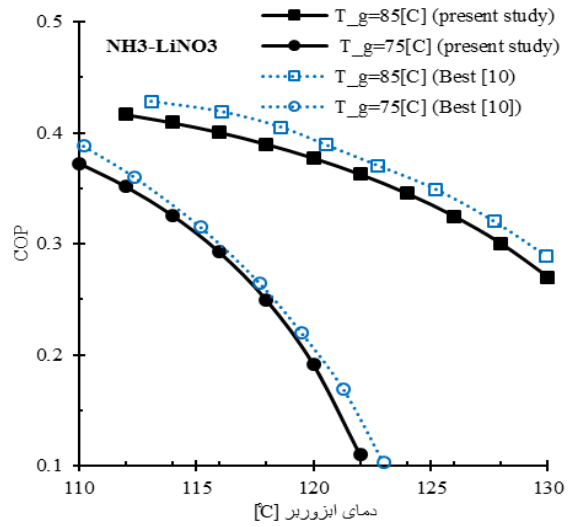
در رابطه (۶)، $\Delta\varphi$ تغییرات نرخ انرژی جریانی سیال-های خارجی را نشان می‌دهند که برای سرمایش و گرمایش اجزا به کار رفته‌اند. به منظور محاسبه برگشت ناپذیری‌های اجزای مختلف تبدیل کننده‌های حرارت جذبی و نیز سهم هر کدام از اجزا در نابودی انرژی از روابط زیر استفاده شده است [۲ و ۳]:

$$\dot{I} = \sum \dot{m}_i \varphi_i - \sum \dot{m}_o \varphi_o - \sum \dot{W} \quad (۷)$$

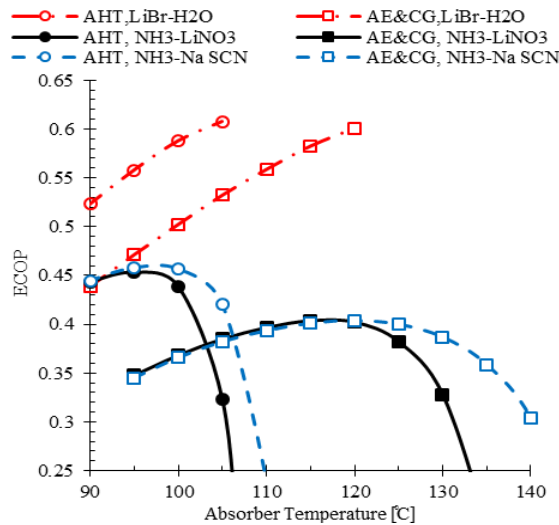
^۱ Primary Energy Ratio



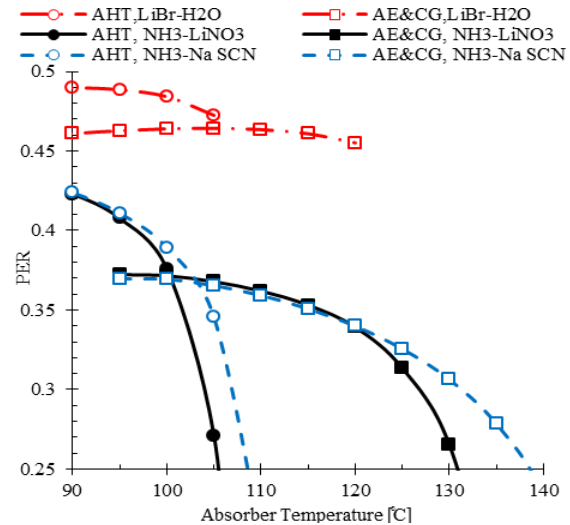
شکل ۶- مقایسه ضرایب عملکرد به دست آمده توسط بست و مطالعه حاضر برای چرخه AHT با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات



شکل ۵- مقایسه ضرایب عملکرد بدست آمده توسط بست و مطالعه حاضر برای چرخه AHT با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات



شکل ۸- مقایسه بازده قانون دوم در چرخه‌های AHT و AE&CG با محلول‌های مختلف

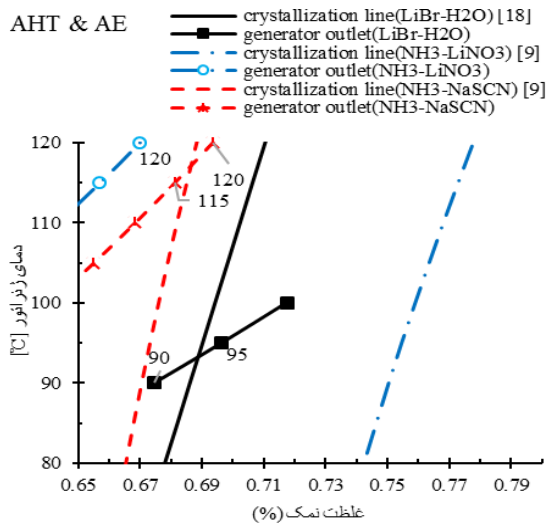


شکل ۷- مقایسه نسبت انرژی اولیه در چرخه‌های AHT و AE&CG با محلول‌های مختلف

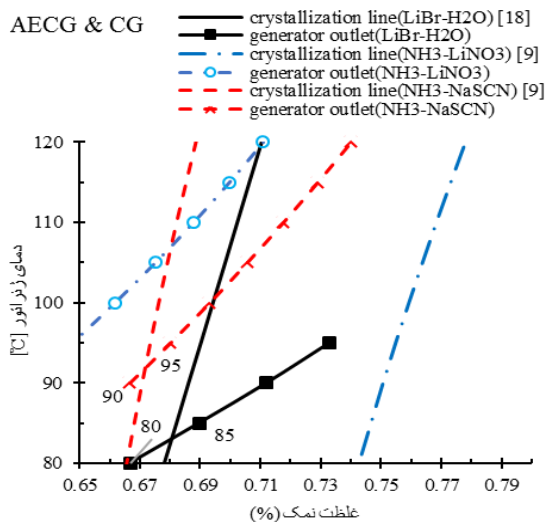
بیشتر است. در سیستم‌های مورد مطالعه در این مقاله، محلول خروجی از ژنراتور (نقطه ۵ در شکل‌های ۱ تا ۴) محتمل‌ترین نقطه برای وقوع پدیده کریستالیزاسیون است و اگر در این نقطه پدیده کریستالیزاسیون اتفاق نیفتد، در سایر نقاط هم اتفاق نخواهد افتاد. شرایط (دما و فشار) محلول خروجی از ژنراتور در چرخه‌های AHT و AE&CG به ترتیب برابر با شرایط (دما و فشار) محلول خروجی از

که از نمودارها مشخص است، نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم سیستم‌هایی که از محلول آب-لیتیوم بروماید استفاده می‌کنند، بیشتر است؛ اما سیستم‌های آب-لیتیوم بروماید دمای ابزوربر تحویلی پایین‌تری را نسبت به دو محلول دیگر دارا است.

اگر غلظت نمک در محلول بیشتر و دمای محلول کم باشد، امکان وقوع پدیده کریستالیزاسیون در چنین محلولی



شکل ۹- شرایط وقوع پدیده کریستالیزاسیون محلول‌های مختلف در خروجی ژنراتور چرخه‌های AHT و AE



شکل ۱۰- شرایط وقوع پدیده کریستالیزاسیون محلول‌های مختلف در خروجی ژنراتور چرخه‌های AECG و CG

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی، حداقل دمای منبع گرمایی است که حرارت مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور را تامین می‌کند. جدول ۲ حداقل دمای مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور را برای راه اندازی چهار چرخه مورد مطالعه در این مقاله با محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیتريت، آمونیاک-سدیم تیوسیانات و آب-لیتیوم بروماید نشان می‌دهد. در این جدول فرض شده است که یک منبع واحد گرمای مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور را تامین

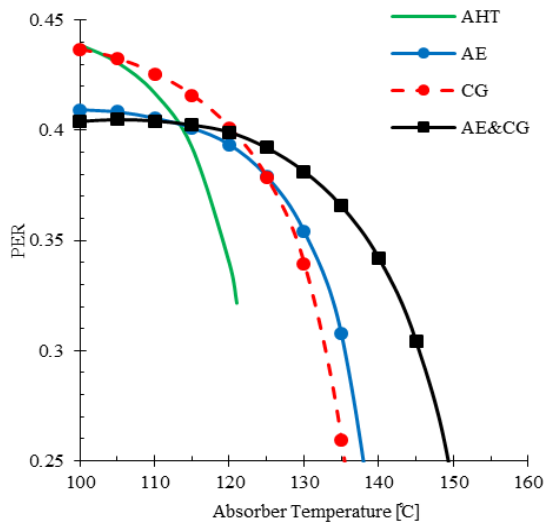
ژنراتور چرخه‌های AE و CG است؛ لذا احتمال وقوع پدیده کریستالیزاسیون در محلول خروجی ژنراتور چرخه‌های AE و AHT در شکل ۹ و چرخه‌های AE&CG و CG در شکل ۱۰ با هر سه محلول مورد بررسی قرار گرفته است. در این شکل‌ها برای رسم خط کریستالیزاسیون محلول آب-لیتیوم بروماید از رابطه ارائه شده توسط گیلانی و همکاران [۱۸] و برای محلول‌های آمونیاک-نمک از داده‌های گروسی و همکاران [۹] استفاده شده است. شایان ذکر است که شرایط عملکردی در جدول ۱ ذکر شده است. وقوع پدیده کریستالیزاسیون از بررسی موقعیت نقطه خروجی ژنراتور نسبت به منحنی کریستالیزاسیون محلول مربوطه در نمودار دما-غلظت مشخص می‌شود. اگر نقطه مد نظر در سمت راست منحنی کریستالیزاسیون قرار گیرد، پدیده کریستالیزاسیون در آن شرایط عملکرد اتفاق می‌افتد، اما در صورت قرارگیری نقطه در سمت چپ منحنی کریستالیزاسیون، در آن شرایط عملکرد کریستالیزاسیون اتفاق نخواهد افتاد.

با توجه به شکل ۹ (چرخه‌های AHT و AE) می‌توان دریافت که چرخه‌های AHT و AE که از محلول آب-لیتیوم بروماید استفاده می‌کنند، پدیده کریستالیزاسیون در دمای ژنراتور تقریبی ۹۲ °C اتفاق خواهد افتاد، در حالی این دما برای همان چرخه‌ها با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات تقریباً ۱۱۸ °C است و در سیستم‌های آمونیاک-لیتیوم نیتريت پدیده کریستالیزاسیون اتفاق نخواهد افتاد.

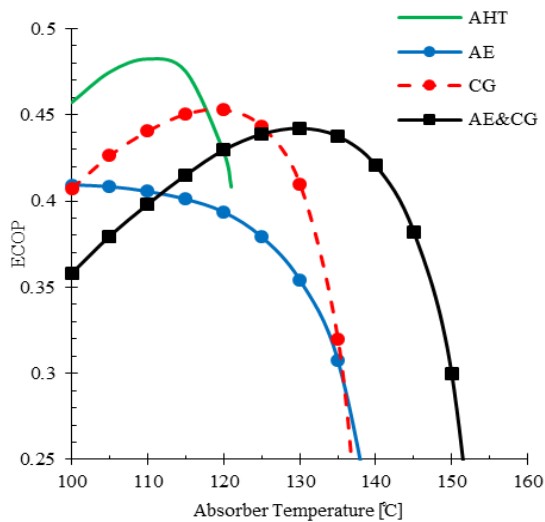
همچنین با توجه به شکل ۱۰ (چرخه‌های AECG و CG) پدیده کریستالیزاسیون در محلول‌های آمونیاک-سدیم تیوسیانات و آب-لیتیوم بروماید به ترتیب در دماهای تقریبی ۹۳ °C و ۸۴ °C اتفاق خواهد افتاد و در محلول آمونیاک-لیتیوم نیتريت مانند چرخه‌های AE و AHT پدیده کریستالیزاسیون وجود ندارد؛ در نتیجه احتمال وقوع پدیده کریستالیزاسیون در سیستم‌هایی بسیار بالا است که از محلول آب-لیتیوم بروماید استفاده می‌کنند. از آنجایی که دمای ژنراتور در این سیستم‌ها چندان بالا نمی‌باشد، در نتیجه می‌توان ادعا کرد که پدیده کریستالیزاسیون در سیستم‌هایی که از محلول آمونیاک-لیتیوم نیتريت استفاده می‌کنند، وجود ندارد.

جدول ۲- حداقل دمای مورد نیاز ژنراتور و اواپراتور برای راه اندازی سیستم‌ها

نوع چرخه	حداقل دمای ژنراتور و اواپراتور (°C)		
	H ₂ O-LiBr	NH ₃ -NaSCN	NH ₃ -LiNO ₃
AHT	۸۰	۷۴	۷۷
AE	۶۸	۶۰	۶۴
CG	۷۶	۶۶	۷۰
AE&CG	۷۱	۴۵	۵۰



شکل ۱۱- تغییرات نسبت انرژی اولیه چرخه‌ها در دماهای ابزوربر مختلف با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات



شکل ۱۲- بازده قانون دوم چرخه‌ها در دماهای ابزوربر مختلف با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات

می‌کند؛ در نتیجه دمای اواپراتور برابر با ژنراتور است و سایر شرایط مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به جدول ۲ مشخص می‌شود که حداقل دمای ژنراتور مورد نیاز برای سیستم‌هایی که از محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات استفاده می‌کنند، نسبت به دو محلول دیگر کمتر است؛ همچنین حداقل دمای ژنراتور مربوط به چرخه AE&CG نسبت به بقیه چرخه‌ها کمتر است. دمای حداقل ژنراتور پایین‌تر نشان دهنده توانایی بیشتر چرخه در به کارگیری منابع حرارتی دما پایین مانند انرژی‌های حرارتی اتلافی، خورشیدی و زمین گرمایی است.

با مقایسه سه محلول از جنبه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه به کارگیری محلول آب-لیتیوم بروماید در تبدیل کننده‌های حرارت جذبی، نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم بالاتری را به دست می‌دهد، اما دمای ابزوربر تحویلی با به کارگیری این محلول پایین‌تر است، امکان وقوع پدیده کریستالیزاسیون بیشتر است، حداقل دمای ژنراتور و اواپراتور مورد نیاز برای راه اندازی سیستم‌هایی که از این محلول استفاده می‌کنند، نسبت به دو محلول دیگر مورد مطالعه در این مقاله بیشتر است و همچنین این محلول ویسکوزیته بالا و محدودیت انحلال پذیری داشته و خورنده است؛ بنابراین به این حد از مطالعه محلول آب-لیتیوم بروماید اکتفا کرده و در ادامه این مقاله محلول‌های آمونیاک-نمک مورد بررسی بیشتر قرار خواهند گرفت.

در این مقاله چهار چرخه تبدیل کننده حرارت جذبی ساده، تبدیل کننده حرارت جذبی با کمپرسور بین ابزوربر-اواپراتور، تبدیل کننده حرارت جذبی با کمپرسور بین کندانسور-ژنراتور و تبدیل کننده حرارت جذبی با دو کمپرسور بین ابزوربر-اواپراتور و کندانسور-ژنراتور مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. شکل ۱۱ نسبت انرژی اولیه و شکل ۱۲ بازده قانون دوم چرخه‌ها را با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات در دماهای مختلف ابزوربر نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها پیداست، چرخه AE&CG بیشترین دمای ابزوربر را می‌تواند تحویل دهد. در دماهای پایین‌تر ابزوربر چرخه‌های CG و چرخه AHT به ترتیب دارای بالاترین نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم می‌باشند. با افزایش دمای ابزوربر نسبت انرژی و بازده قانون دوم چرخه AE&CG نسبت به چرخه‌های دیگر بهبود می‌یابد، به طوری که در دماهای بالاتر

انرژی اولیه و بازده قانون دوم بوده و در دماهای ایزوربر بالاتر، بالاترین بازده قانون دوم مربوط به چرخه AE است.

علت کاهش نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم با افزایش دمای ایزوربر در تمامی چرخه‌های مورد بررسی، کاهش اختلاف غلظت محلول‌های رقیق و غلیظ در چرخه است که سبب افزایش گرماهای مبادله شده در اواپراتور و ژنراتور و توان مصرفی کمپرسورها و پمپ‌ها می‌شود.

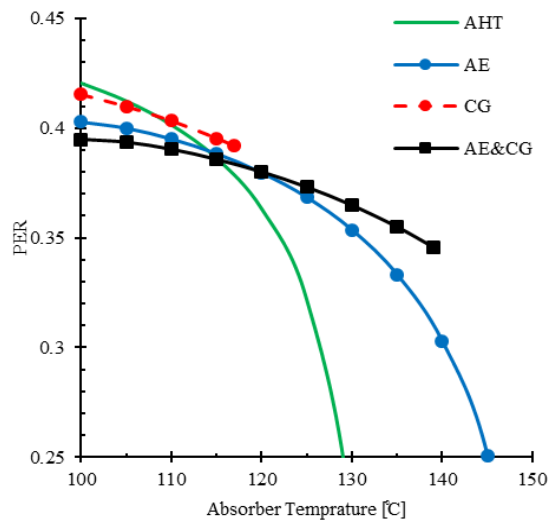
با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ می‌توان پی برد که هر کدام از سیکل‌ها در محدوده دمایی مشخصی از ایزوربر دارای نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم بیشتری نسبت به سایر چرخه‌ها می‌باشند. اطلاعات موجود در این شکل‌ها در شرایط عملکرد مختلف، به انتخاب سیستمی کمک می‌کند که دارای بیشترین نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم است.

تاثیر نسبت تراکم کمپرسور واقع در بین ایزوربر-اواپراتور چرخه AE&CG بر نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم در دماهای مختلف ایزوربر به ترتیب در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ آورده شده است. همانطور که از شکل‌ها پیداست، با افزایش نسبت تراکم کمپرسور واقع در بین ایزوربر-اواپراتور، اولاً دمای ایزوربر بالاتری به دست می‌آید و ثانیاً نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم در دماهای ایزوربر بالاتر افزایش می‌یابد؛ اما طبق مراجع [۱۹-۲۱] حداکثر فشاری که کمپرسورها قادرند تا آن فشار آمونیاک را متراکم کنند، ۵ مگاپاسکال است؛ لذا افزایش بیش از حد نسبت تراکم کمپرسورها مقدر نمی‌باشد.

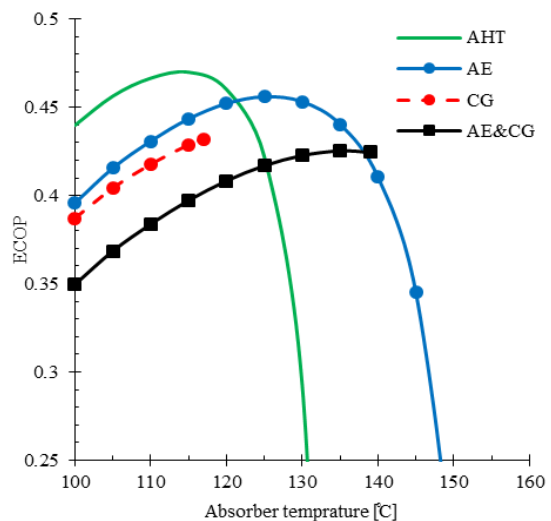
با افزایش نسبت تراکم، میزان حرارت آزاد شده از ایزوربر، انرژی جریانی سیال خنک کننده ایزوربر و کار کمپرسور و پمپ‌ها افزایش می‌یابد. مطابق رابطه‌های (۵) و (۶) افزایش کار کمپرسور و پمپ‌ها موجب کاهش نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم ترمودینامیک می‌شود و همچنین افزایش حرارت آزاد شده باعث افزایش نسبت انرژی اولیه و افزایش انرژی جریانی سیال خنک کننده ایزوربر موجب افزایش بازده قانون دوم می‌شود. در دماهای ایزوربر پایین‌تر افزایش کار کمپرسور و پمپ تاثیر بیشتری نسبت به حرارت آزاد شده از ایزوربر و انرژی جریانی سیال خنک کننده داشته و در نتیجه افزایش نسبت تراکم کمپرسور موجب کاهش نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم می‌شود، ولی با افزایش دمای ایزوربر، تاثیر گرمای آزاد شده و انرژی جریانی سیال خنک کننده ایزوربر بر نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم بیشتر

ایزوربر نسبت به سایر چرخه‌ها دارای بیشترین نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم است.

شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم چرخه‌ها را با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات در دماهای مختلف ایزوربر نشان می‌دهند. در این سیستم‌ها چرخه AE دمای ایزوربر بالاتری را می‌تواند به دست آورد. در دماهای ایزوربر پایین‌تر چرخه AHT دارای بیشترین نسبت



شکل ۱۳- نسبت انرژی اولیه چرخه‌ها در دماهای ایزوربر مختلف با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات



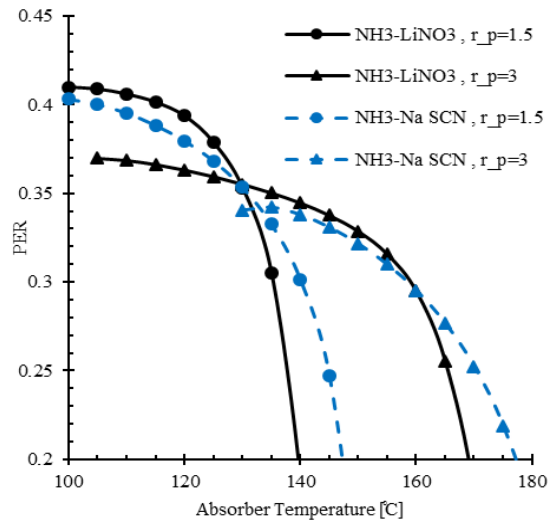
شکل ۱۴- بازده قانون دوم چرخه‌ها در دماهای ایزوربر مختلف با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات

آمونیاک- لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات بر حسب دمای ابزوربر نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها نمایان است، در تمامی چرخه‌ها تلفات انرژی نسبتی مربوط به ابزوربر و ژنراتور نسبت به بقیه اجزا بیشتر است؛ بنابراین این دو جز بیشترین نقش را در کاهش بازده قانون دوم ترمودینامیک سیستم‌ها دارا می‌باشند. برگشت ناپذیری نسبی کندانسور و اواپراتور هم در چرخه تبدیل کننده حرارت جذبی ساده قابل ملاحظه می‌باشند؛ همچنین برگشت‌ناپذیری نسبی کمپرسور، پمپ‌ها و شیرهای خفانش در اکثر چرخه‌ها ناچیز می‌باشند. در دماهای ابزوربر بالاتر چرخه ساده نسبت به چرخه‌های با کمپرسور، دارای تلفات انرژی نسبتی بیشتری است و لذا بازده قانون دوم کمتری هم دارد و در دماهای ابزوربر پایین‌تر برعکس این قضیه اتفاق می‌افتد؛ یعنی چرخه ساده تلفات انرژی کمتری نسبت به سایر چرخه‌ها داشته و در نتیجه بازده قانون دوم بزرگ‌تری دارد. تفکیک برگشت‌ناپذیری نسبی اجزای چرخه‌ها می‌تواند راهنمای مفیدی برای افزایش کارایی سیستم‌ها باشد. به عنوان مثال یکی از دلایل بالا بودن تلفات انرژی نسبتی در ابزوربر، تولید آنتروپی به دلیل فرایند جذب و اختلاط در این جزء است. برای افزایش کارایی سیستم‌های مورد مطالعه با به کارگیری ابزوربر کارا تر می‌توان برگشت-ناپذیری این جزء را کاهش داد تا بازده قانون دوم کل سیستم افزایش یابد.

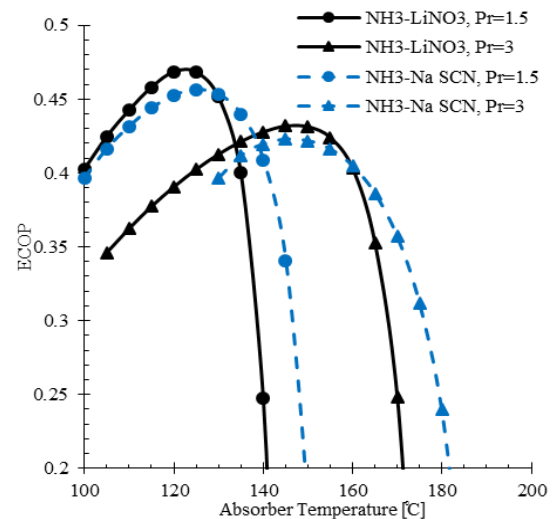
۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، تبدیل کننده‌های حرارت جذبی با کمپرسور معرفی شده و از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک با تبدیل کننده حرارت جذبی ساده مقایسه شده‌اند. محلول‌های آب-لیتیوم بروماید، آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات در این سیستم‌ها به کار رفته و باهم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج مربوط به مقایسه‌ها و تحلیل‌ها به شرح زیر است:

ابزوربر تحویلی پایین، حداقل دمای مرجع مورد نیاز برای تامین حرارت ژنراتور و اواپراتور بالا و احتمال وقوع پدیده کریستالیزاسیون بالا می‌باشند؛ همچنین محلول آب-لیتیوم بروماید دارای معایبی از جمله خوردگی، ویسکوزیته بالا و محدودیت انحلال پذیری است.



شکل ۱۵- تأثیر نسبت تراکم کمپرسور واقع در بین ابزوربر- اواپراتور بر نسبت انرژی اولیه



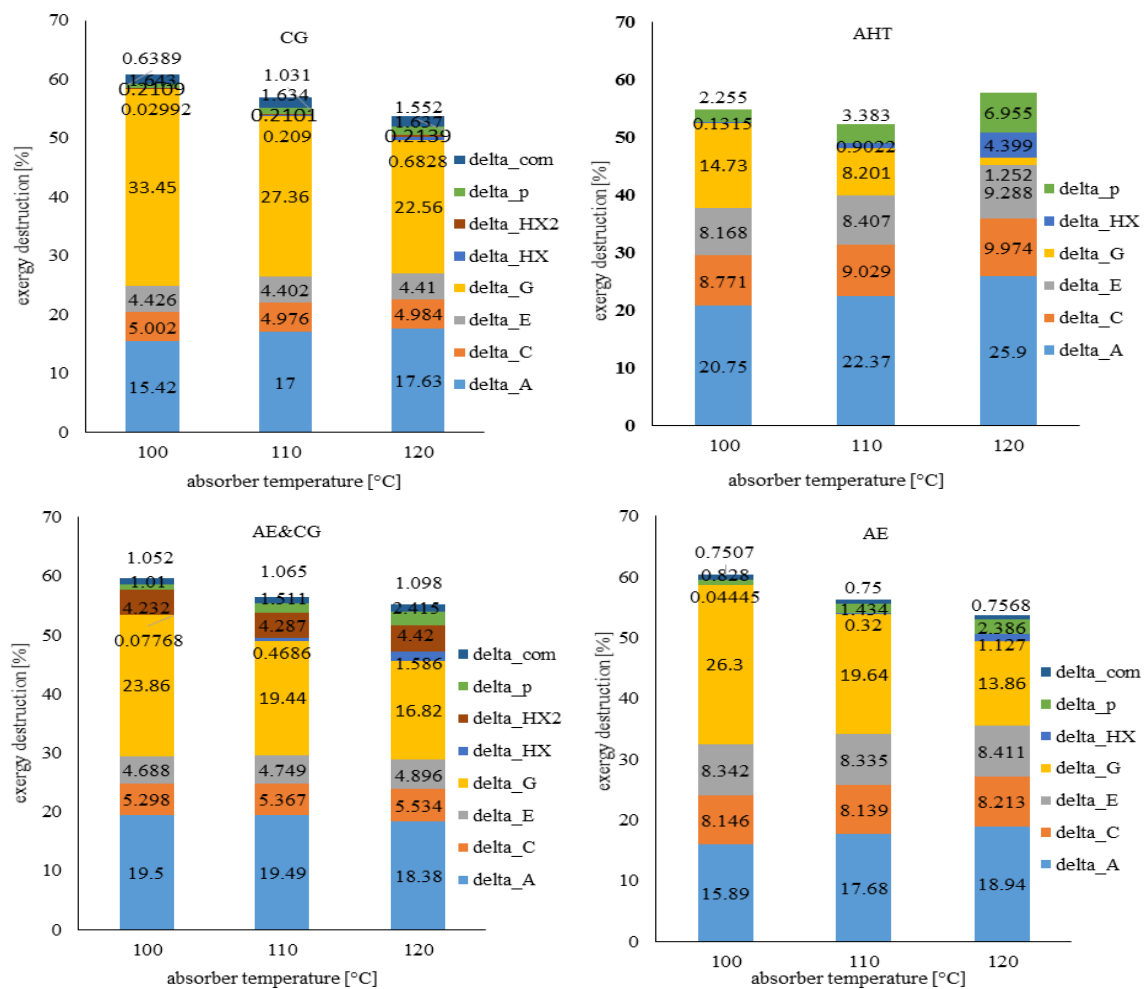
شکل ۱۶- تأثیر نسبت تراکم کمپرسور واقع در بین ابزوربر- اواپراتور بر بازده قانون دوم در دماهای ابزوربر مختلف

شده و در نتیجه در دماهای ابزوربر بالاتر با افزایش نسبت تراکم، نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین با توجه به این نمودارها مشخص می‌شود که حداکثر دمای ابزوربر تحویلی توسط محلول آمونیاک- لیتیوم نیترات نسبت به دمای ابزوربر تحویلی توسط محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات کم‌تر است.

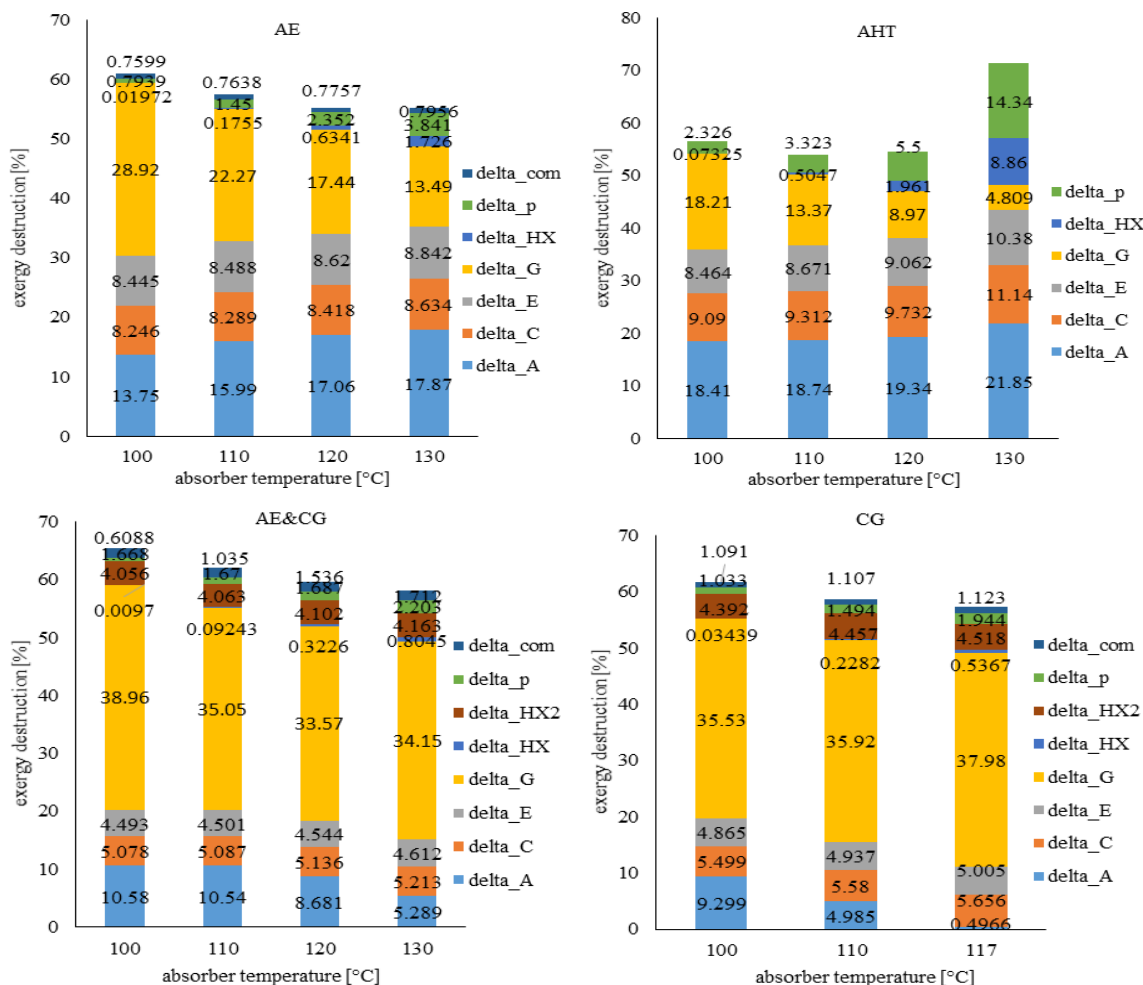
شکل ۱۷ و شکل ۱۸ تغییرات تلفات انرژی نسبتی هر یک از اجزای چرخه‌ها را به ترتیب با محلول‌های

بالای ابزوربر، نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم پایین‌تری را دارا می‌باشند. افزودن کمپرسور به تبدیل کننده حرارت جذبی ساده سبب افزایش دمای ابزوربر تحویلی، کاهش حداقل دمای مورد نیاز ژنراتور و اوپراتور برای راه اندازی سیستم‌ها و همچنین باعث افزایش نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم در دماهای ابزوربر بالاتر شده است. در این مقاله همچنین برگشت‌ناپذیری هر یک از اجزای چرخه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین سهم برگشت‌ناپذیری این سیستم‌ها مربوط به ابزوربر و ژنراتور است و برگشت‌ناپذیری پمپ‌ها و کمپرسورها ناچیز است؛ لذا با انتخاب ابزوربر و ژنراتور با کیفیت‌تر می‌توان برگشت‌ناپذیری این سیستم‌ها را کاهش داد.

سیستم‌هایی که از محلول آب-لیتیوم بروماید استفاده می‌کنند نسبت به سیستم‌های آمونیاک-نمک دارای دمای ابزوربر تحویلی پایین، حداقل دمای ژنراتور و اوپراتور و احتمال وقوع پدیده کریستالیزاسیون بالا می‌باشند. همچنین این محلول دارای معایبی از جمله خوردگی، ویسکوزیته بالا و محدودیت انحلال‌پذیری می‌باشد. بنابراین با وجود نسبت انرژی اولیه و بازده قانون دوم بالای آب-لیتیوم بروماید، در این مقاله بیشتر محلول‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سیستم‌ها با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات نسبت به سیستم‌ها با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات، با حداقل دمای ژنراتور و اوپراتور پایین‌تری شروع به کار می‌کنند و دمای ابزوربر بالاتری را تحویل می‌دهند، ولی به جز در دماهای



شکل ۱۷- برگشت‌ناپذیری نسبی اجزای چرخه‌ها با محلول آمونیاک-لیتیوم نیترات



شکل ۱۸- برگشت ناپذیری نسبی اجزای چرخه‌ها با محلول آمونیاک-سدیم تیوسیانات

[4] Parham K, et al. (2014) Absorption heat transformers –A comprehensive review. *Renew Sust Energy Rev* 34: 430-452.

[5] Eisa M, et al. (1986) Thermodynamic design data for absorption heat transformers—part I. Operating on water-lithium bromide. *J Heat Recov Sys* 6: 421-432.

[6] Rivera W, et al. (2010) Exergy analysis of a heat transformer for water purification increasing heat source temperature. *Appl Therm Eng* 30: 2088-2095.

[7] Ishida M, Ji J (1999) Graphical exergy study on single stage absorption heat transformer. *Appl Therm Eng* 19: 1191-1206.

[8] Kurem E, Horuz I (2001) A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in absorption heat transformers. *Int Commun Heat Mass* 28: 427-438.

۶- مراجع

[۱] سعید قوامی و همکاران (۱۳۹۷) تحلیل انرژی و انرژی و اگزرژی و بهینه سازی یک سیستم تولید چندگانه با تلفیق سیکل‌های توربین گاز- راکتور هلیوم مدولار، تبرید جذبی، ریفرمینگ بخار آب و آب شیرین کن رطوبت‌زن- رطوبت‌زدا. *مهندسی مکانیک مدرس* ۶۴۲-۶۳۱: ۱۹(۳).

[2] Abdolalipouradl M, et al. (2020) A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy* 209: 118235.

[3] Abdolalipouradl M, et al. (2020) Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. *Energy Convers. Manag* 226: 113544.

- [۱۵] خلیلی س، گروسی فرشی ل (۱۳۹۶) تحلیل ترمودینامیکی پمپ حرارتی جدید ترکیبی - اجکتوری و مقایسه با پمپ حرارتی ترکیبی. مهندسی مکانیک مدرس ۴۳۲-۴۳۳ (۸): ۷.
- [16] Dincer I, Kanoglu M (2010) Refrigeration systems and applications. 2nd edn. Wiley Online Library.
- [17] Klein S (2013) Engineering equation solver (EES).
- [18] Gilani S, Ahmed M (2015) Solution crystallization detection for double-effect LiBr-H₂O steam absorption chiller. Energy Procedia 75: 1522-1528.
- [19] Farshi LG, et al. (2018) Thermodynamic analysis of a cascaded compression – Absorption heat pump and comparison with three classes of conventional heat pumps for the waste heat recovery. Appl Therm Eng 128: 282-296.
- [20] Jensen JK, et al. (2015) Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 2 – Ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps. Int J Refrig 55: 183-200.
- [21] Ommen T, et al. (2015) Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 1 – Single stage vapour compression heat pumps. Int J Refrig 55: 168-182.
- [9] Farshi, LG, et al. (2014) First and second law analysis of ammonia/salt absorption refrigeration systems. Int J Refrig 40: 111-121.
- [10] Best R, et al. (1990) Thermodynamic design data for absorption heat transformers—part four. operating on ammonia-lithium nitrate. Heat Recov Syst CHP 10: 539-548.
- [11] Best R, et al. (1992) Thermodynamic design data for absorption heat transformers—Part 5. Operating on ammonia-sodium thiocyanate. Heat Recov Syst CHP 12: 347-356.
- [12] Ferreira CI (1984) Thermodynamic and physical property data equations for ammonia-lithium nitrate and ammonia-sodium thiocyanate solutions. Sol Energy 32: 231-236.
- [13] Hernández-Magallanes JA, et al. (2017) Comparison of single and double stage absorption and resorption heat transformers operating with the ammonia-lithium nitrate mixture. Appl Therm Eng 125: 53-68.
- [14] Heard CL, et al. (2016) Characteristics of an ammonia/lithium nitrate double effect heat pump-transformer. Appl Therm Eng 99: 518-527.