

تحلیل یک رکوپراتور ظرفیت پایین از نوع صفحه‌ای جریان متقاطع

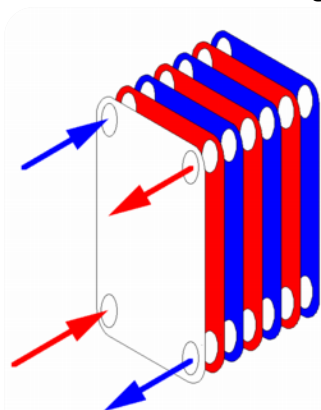
زاهر محمد عبد السلیعی- دانشگاه کاشان
 Zahert2010@yahoo.com

سید میثم موسوی نژاد- دانشگاه کاشان
 mr.sadat.system@gmail.com

سید عبدالمهدی هاشمی- دانشگاه کاشان
 hashemi@kashanu.ac.ir

شکل (۱): مبدل با جریان متقاطع [1]

همچنین مبدلهای حرارتی از نظر ساختار به چهار دسته تقسیم می شوند که عبارتند از: مبدل پوسته لوله‌ای، مبدل صفحه ای، مبدل حلزونی و مبدل حرارتی هوایی.



شکل (۲): نمونه ای از مبدل حرارتی صفحه ای [2]

یکی از انواع مبدلهای صفحه ای، رکوپراتورها هستند که به عنوان بازیاب حرارتی در خروجی کوره ها استفاده می شوند. رکوپراتور، مبدلی با جریان متقابل است که از آن برای بازیابی و بهینه‌سازی انرژی در واحدهای صنعتی استفاده می‌شود. به این صورت که برای افزایش بهره‌وری کلی در فرایندهای با چرخه بسته (مانند فرآیندهای احتراقی)، از رکوپراتورها استفاده می شود. برای نمونه، در موتور توربین‌های گازی، نخست هوا فشرده می‌شود و سپس با سوخت مخلوط شده و عمل احتراق برای چرخاندن پره‌های توربین رخ می‌دهد. در این فرایند رکوپراتور بخشی از حرارت زاید تولید شده در قسمت خروجی سیستم را به هوای مصرفی برمی‌گرداند. هوای برگردانده شده نسبت به هوای تازه گرم‌تر است و باعث پیش گرم شدن کل هوای ورودی به محفظه احتراق می‌شود که این علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های آماده‌سازی هوای ورودی، باعث احتراق مطلوب‌تر و کاهش سوخت مورد نیاز برای رسیدن به دمای مد نظر ورودی توربین نیز می‌شود [3].



شکل (۳): نمونه ای از یک رکوپراتور [4]

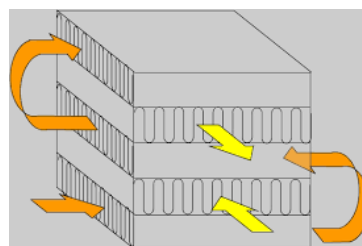
چکیده

یکی از روشهای بازیافت انرژی در تجهیزات احتراقی، استفاده از رکوپراتور در آگزوز خروجی گازهای داغ حاصل از احتراق می باشد. با توجه به کمبود عرضه انواع رکوپراتور در کشور یک نمونه رکوپراتور ظرفیت پایین طراحی و ساخته شد. در این مقاله با شبیه سازی یک رکوپراتور خاص در نرم افزار اسپن^۱ جریانهای هوایی موجود در رکوپراتور مورد مطالعه قرار گرفته است و در گام بعدی، خروجی های حاصل از شبیه سازی با داده های تجربی حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی می باشد. در انتها با انجام تحلیل پارامتری عواملی نظیر دبی جرمی هوا و سوخت، نتایج بصورت نموداری نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای استخراج شده از شبیه سازی، با افزایش دبی جرمی هوا، دمای جریان گرم خروجی از رکوپراتور کاهش و دمای جریان سرد خروجی از رکوپراتور افزایش یافته است. همچنین با افزایش دمای محصولات احتراق، دمای جریان هوای سرد خروجی افزایش پیدا می کند. کلمات کلیدی: بازیاب حرارتی، رکوپراتور، شبیه سازی، نرم افزار اسپن، محصولات احتراق

مقدمه

مقادیر بسیاری گاز گرم حاصل از احتراق سوخت، توسط بویلرها و انواع متنوع کوره ها در صنایع مختلف تولید می شود. یکی از روشهای استفاده بهینه از سوخت و انرژی در کوره ها، استفاده از سیستم های بازیافت (یکی از انواع مبدلهای حرارتی) می باشد. متأسفانه استفاده از این سیستم ها در کشور ایران بسیار محدود است.

بازیابهای حرارتی انواع متنوعی دارند که از جمله آنها می توان به رکوپراتورها اشاره کرد که کاربرد وسیعی در صنایع دارند. یکی از مهمترین کاربردهای رکوپراتورها، استفاده از آنها در صنایع گاز می باشد که با نصب این وسیله در خروجی دودکش ها، از گرمای حاصل از آن برای پیش گرمایش هوای ورودی به کوره و... استفاده می کنند. بازیابهای حرارتی نوعی از مبدلهای حرارتی هستند با این هدف که از انرژی زائد حاصل احتراق به منظور گرمایش استفاده می شود. مبدلهای حرارتی از نظر آرایش جریان به سه دسته تقسیم می شوند که شامل: جریان هم‌سو، جریان غیر هم‌سو و جریان متقاطع می باشد.



¹ Aspen

لحاظ عددی می توان رقمی معادل با ۵۸/۰۸ درصد از گرمای اتلافی از این واحد پالایشگاهی را بازیافت نمود [12].

نژادمحمدنماقی و همکاران (۱۳۹۶) با تحلیل جریان موجود در خروجی دودکش کوره GTC-F واحد صادرات گاز پالایشگاه پنجم پارس جنوبی امکان نصب رکوپراتور در خروجی این کوره را مورد بررسی قرار دادند. و در انتها، مشخصات هندسی رکوپراتور را با توجه به بار حرارتی کل جریان خروجی از دودکش کوره پیشنهاد کردند و در گام آخر هزینه ساخت این رکوپراتور را برآورد کردند [13].

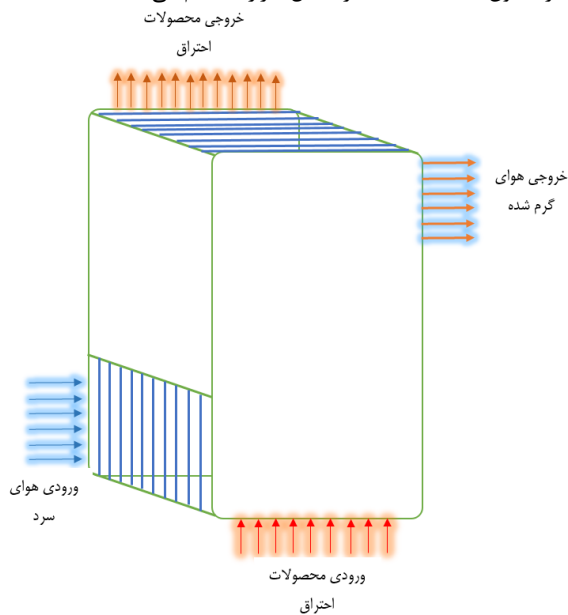
با توجه به اهمیت انرژی و منابع رو به پایان انرژی در کشور و لزوم استفاده بهینه از انرژی، اهمیت استفاده از رکوپراتور در صنایع مشخص می شود. در این تحقیق، یک نمونه رکوپراتور با ظرفیت ۱۵۰ کیلووات در نرم افزار اسپن شبیه سازی شده است تا با داده های عملی (آزمایشگاهی) مقایسه شود.

این رکوپراتورها (با ظرفیتهای کمتر از ۲۰۰ کیلووات) در صنایع کوچک مانند واحدهای نانوایی کاربرد دارند.

معرفی رکوپراتور ساخته شده

تعریف مساله:

همانطور که در تعریف رکوپراتور آمده است، در رکوپراتور دو جریان گرم و سرد بدون اختلاط با یکدیگر انتقال حرارت انجام می دهند.



شکل (۴): شکل شماتیک از رکوپراتور

در رکوپراتور مورد استفاده در این تحلیل (شکل (۴))، جریان هوای داغ حاصل از محصولات احتراق از قسمت پایین رکوپراتور وارد آن شده و هوای سرد (هوای محیط اطراف) از نازل ورودی، وارد رکوپراتور می شود.

اتسی (۲۰۰۳) با انجام تحلیل مبدل حرارتی بازیافت گرمایی به روش هاوسن و پیش بینی خصوصیات جریان سیال درون مبدل بوسیله این روش و مقایسه نتایج این تحلیل با نتایج روش المان محدود، نشان داد که روش هاوسن در پیش بینی خصوصیات جریان سیال در این نوع مبدل بسیار دقیق می باشد [5].

چانگ و رو (۲۰۱۰) پژوهشی پیرامون بازیابهای فوق سرد انجام دادند. آنها با استفاده از روش تحلیلی نتایجی را بدست آوردند و برای صحت سنجی نتایج خود از نتایج عملی استفاده کردند که نتیجه آن دقت کافی روش تحلیلی بود. در نهایت با استفاده از روش تحلیلی بهینه سازی ای را انجام دادند که منجر به بدست آوردن اندازه هندسی بهینه بازیاب حرارتی فوق سرد گردید [6].

لاسکوسکی و سیمک (۲۰۱۶) با استفاده از معادلات بقا، ممنتوم و انرژی و با روش تحلیلی و شبیه سازی مبدل بازیافت حرارتی به روش "جعبه سیاه" مقایسه ای را بین نتایج تحلیلی و شبیه سازی مبدل حرارتی انجام دادند و نتیجه این مقایسه، نشان دهنده شبیه سازی دقیق این مبدل به روش جعبه سیاه بود [7].

یوما و همکاران (۲۰۱۷) با تحقیق بر روی یک نوع مبدل حرارتی از جنس سرامیک کار خود را آغاز کردند و شبیه سازی این مبدل را به روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و روش المان محدود انجام دادند که نتیجه کار آنها، بدست آوردن اندازه هندسی مناسب مبدل حرارتی برای استفاده بهینه از این مبدل شد [8].

کویت (۱۳۹۰) در تحقیقات خود به بررسی و آنالیز حرارتی رکوپراتور به عنوان سیستم بازیافت حرارت در دودکش کوره های پیشگرم نورد گرم شرکت فولاد مبارکه پرداخت. او با محاسبه تلفات حرارت خروجی از دودکش ها، راندمان رکوپراتورهای موجود و عملکرد سیستم بازیاب انرژی در بازه کاری کوره ها را به کمک تحلیل های عددی و اندازه گیری های عملی محاسبه کرد. همچنین برای عملکرد بهینه سیستم بازیاب حرارتی پیشنهاد استفاده از رکوپراتور تشعشی - جا به جایی را مطرح نمود [9].

عرب ساوجی و بیدی (۱۳۹۵) تحلیل خود را به روش انرژی و انرژی در دو حالت خارج کردن تمام هوای بازگشتی در سیستم تهویه مطبوع حرم مطهر رضوی به محیط و بازیابی انرژی هوای بازگشتی از فضا، با استفاده از رکوپراتور مورد بررسی قرار دادند. بعد از انجام تحلیل کلی، مشخص شد که استفاده از رکوپراتور می تواند مصرف گاز در سیستم تهویه مطبوع حرم مطهر رضوی را به اندازه ۱۸ درصد کاهش دهد [10].

فتحی و کامکار هفشجانی (۱۳۹۵) در این پژوهش با استفاده از حل تئوری میزان صرفه جویی مصرف سوخت در صورت استفاده از رکوپراتور در یک واحد صنعتی را مورد بررسی قرار دادند. هدف از انجام تحقیقات آنها بهینه سازی مصرف سوخت و به حداقل رساندن افت فشار در کانالهای رکوپراتور بود که منجر به طراحی بهینه رکوپراتور گردید [11].

گنخکی (۱۳۹۵) با انجام شبیه سازی واحد تولید گاز سنتز پالایشگاه اصفهان و اضافه کردن رکوپراتور به این واحد تولیدی، به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از رکوپراتور، علاوه بر افزایش دمای شعله به مقدار قابل توجهی در مصرف سوخت ریفرمر صرفه جویی حاصل می گردد که از

^۱ CFD

^۲ finite element structural

شبیه سازی بوسیله نرم افزار :

با توجه به گستردگی و پیچیدگی محاسبات انتقال حرارت و سیالات و همچنین نیاز به سرعت عمل، بهترین روش تحلیل مسایل انتقال حرارت، استفاده از نرم افزار های کامپیوتری می باشد.

به منظور شبیه سازی رکوپراتور نرم افزارهای متعددی وجود دارد که از جمله نرم افزار هایی که کار تحلیل و شبیه سازی را انجام می دهد، نرم افزار اسپن می باشد. نرم افزار اسپن پلاس^۱ از جمله نرم افزار های موجود در بسته نرم افزاری اسپن است که برای تحلیل مبدلهای حرارتی، رکوپراتور ، محفظه های احتراق و... کاربرد دارد. همچنین نرم افزار اسپن ای.دی.آر^۲ برای شبیه سازی مبدلهای حرارتی بصورت تعریف جزئی هر پارامتر هندسی و... کارایی دارد.

با توجه به گستردگی و پیچیدگی محاسبات انتقال حرارت و سیالات و همچنین نیاز به سرعت عمل، بهترین روش تحلیل مسایل انتقال حرارت، استفاده از نرم افزار های کامپیوتری می باشد.

با توجه به گستردگی و پیچیدگی محاسبات انتقال حرارت و سیالات و همچنین نیاز به سرعت عمل، بهترین روش تحلیل مسایل انتقال حرارت، استفاده از نرم افزار های کامپیوتری می باشد.

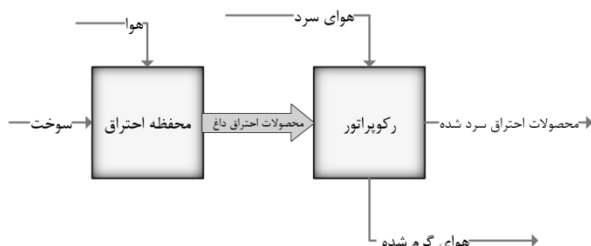
به منظور شبیه سازی رکوپراتور نرم افزارهای متعددی وجود دارد که از جمله نرم افزار هایی که کار تحلیل و شبیه سازی را انجام می دهد، نرم افزار اسپن می باشد. نرم افزار اسپن پلاس^۳ از جمله نرم افزار های موجود در بسته نرم افزاری اسپن است که برای تحلیل مبدلهای حرارتی، رکوپراتور ، محفظه های احتراق و... کاربرد دارد. همچنین نرم افزار اسپن ای.دی.آر^۴ برای شبیه سازی مبدلهای حرارتی بصورت تعریف جزئی هر پارامتر هندسی و... کارایی دارد.

همانطور که پیشتر اشاره شد، رکوپراتور نوعی مبدل حرارتی است و در نتیجه در این شبیه سازی، از نرم افزار شبیه سازی مبدلهای حرارتی (اسپن) استفاده شده است.

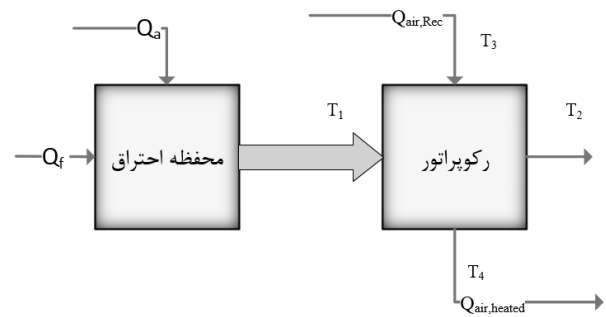
همچنین برای شبیه سازی محفظه احتراق از راکتور آراستوک^۵ استفاده شد است که جریان خروجی از آن، همان جریان محصولات احتراق است که وارد رکوپراتور خواهد شد.

ذکر این نکته ضروری است که در این شبیه سازی تنها اطلاعات جریان هوای گرم شده بدست آمده و تزریق این جریان به محفظه احتراق صورت نگرفته است.

همچنین گاز سوزانده شده در محفظه احتراق در روند شبیه سازی، گاز متان در نظر گرفته شده است.



شکل (۶): دیاگرام مربوط به محفظه احتراق و رکوپراتور



شکل (۵): جریانهای ورودی و خروجی به محفظه احتراق و رکوپراتور

در رکوپراتورهای مرسوم مورد استفاده در صنایع گاز، از جریان هوای گرم شده در رکوپراتور به عنوان هوای تغذیه مورد استفاده در محفظه احتراق استفاده می شود و راندمان آن بصورت نسبت حرارت منتقل شده به هوا به حداکثر حرارت قابل انتقال به هوا تعریف می شود که از رابطه (۱) برای محاسبه مقدار آن استفاده می شود.

$$\eta = \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_3} \quad (1)$$

رکوپراتور مورد استفاده در این شبیه سازی نیز با فرض استفاده از هوای پیش گرم شده توسط رکوپراتور و استفاده از آن در تغذیه هوای محفظه احتراق در نظر گرفته شده است و می بایست برای محاسبه راندمان در این رکوپراتور از رابطه (۱) استفاده شود.

شرایطی طراحی عبارتند از :

جدول (۱): شرایط طراحی

پارامتر	مقدار
گاز سوزانده شده	گاز طبیعی
حداکثر توان مشعل	۱۵۰ کیلو وات
جهت جریان	جهت مقاطع
تعداد گذر ها (Pass)	۳
جنس رکوپراتور	فولاد
تعداد کل گذرهای سیال سرد	۳۳
تعداد کل گذرهای سیال داغ	۱۱

روشهای تحلیل عملکرد رکوپراتور:

الف- شبیه سازی بوسیله نرم افزار

ب- تست عملی در آزمایشگاه

¹ Aspen Plus

² Aspen EDR

³ Aspen Plus

⁴ Aspen EDR

⁵ Rstoic

آزمون عملی رکوپراتور:

به منظور انجام آزمون عملی، رکوپراتور ساخته شده را در شرایط مختلف دمایی و دبی جرمی قرار داده شده تا مقایسه ای را از نتایج تست عملی و شبیه سازی انجام شود.

جدول (۲): نتایج حاصل از آزمایش

تست	Q_f [l/min]	Q_a [m ³ /h]	$Q_{air,rec}$ [m ³ /h]	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)
۱	۵	۵	/۸۴ ۹۶	/۶ ۲۵۱	/۸ ۵۵	/۷ ۳۲	/۲ ۵۶
۲	۵	۵	/۸۴ ۷۵	/۲ ۲۶۲	/۹ ۵۸	/۴ ۳۳	/۹ ۶۱
۳	۵	۵	/۳۴ ۵۸	۲۶۵	/۱ ۵۶	/۱ ۳۳	۶۹
۴	۵	۵	/۶۷ ۳۹	/۵ ۲۰۳	/۱ ۴۵	/۱ ۳۳	/۲ ۹۹
۵	۱۰	۱۰	/۵۱ ۱۰۱	/۸ ۳۶۰	/۷ ۷۷	/۲ ۳۶	/۵ ۸۴
۶	۱۰	۱۰	/۳۴ ۷۲	/۳ ۴۰۵	/۷ ۸۴	/۲ ۳۶	/۱ ۱۰۶
۷	۱۰	۱۰	/۸۴ ۴۷	/۱ ۴۲۵	/۸ ۷۴	/۴ ۳۷	/۸ ۱۷۴
۸	۱۰	۱۴	/۵۱ ۱۰۱	/۷ ۳۶۹	/۲ ۸۸	/۸ ۳۸	/۲ ۱۰۶
۹	۱۰	۱۴	/۵۱ ۶۶	/۷ ۳۸۳	/۳ ۸۲	/۳ ۳۸	/۱ ۱۱۷
۱۰	۱۰	۱۴	/۵۰ ۴۵	/۲ ۳۸۵	/۷ ۶۹	/۵ ۳۸	/۲ ۱۸۷
۱۱	۱۹	۱۲	/۳۴ ۱۰۰	/۹ ۵۰۰	/۱ ۱۰۹	۴۱ ۳	۱۳۲
۱۲	۱۹	۱۲	/۸۴ ۸۲	/۶ ۵۱۳	/۴ ۱۰۳	/۷ ۴۱	۱۴۷
۱۳	۱۹	۱۲	/۵۰ ۴۵	/۱ ۵۷۴	/۷ ۸۶	/۱ ۴۲	/۹ ۲۵۵
۱۴	۱۹	۱۵	/۳۴ ۱۰۰	۴۷۷	/۷ ۱۱۲	/۱ ۴۲	/۱ ۱۴۳
۱۵	۱۹	۱۵	/۶۷ ۷۴	/۳ ۵۰۸	/۱ ۱۰۴	/۳ ۴۲	/۳ ۱۶۱
۱۶	۱۹	۱۵	/۱۷ ۵۰	۵۵۴	/۷ ۱۰۴	/۷ ۴۲	/۳ ۲۳۲



شکل (۷): کانالهای رکوپراتور



شکل (۸): رکوپراتور بصورت مونتاژ نشده

Q_f : دبی سوخت (متان) وارد شونده به محفظه احتراق بر حسب لیتر بر دقیقه

Q_a : دبی هوای وارد شونده به محفظه احتراق بر حسب متر مکعب بر ساعت

$Q_{air,heated}$: دبی هوای خنک وارد شده به مبدل بر حسب مترمکعب بر ساعت

T_1 : دمای جریان محصولات احتراق

T_2 : دمای جریان خروجی گرم از مبدل

T_3 : دمای جریان ورودی هوا به مبدل

T_4 : دمای جریان خروجی هوای سرد از مبدل



شکل (۹): رکوپراتور بصورت مونتاژ شده اولیه



شکل (۱۰): شکل نهایی رکوپراتور

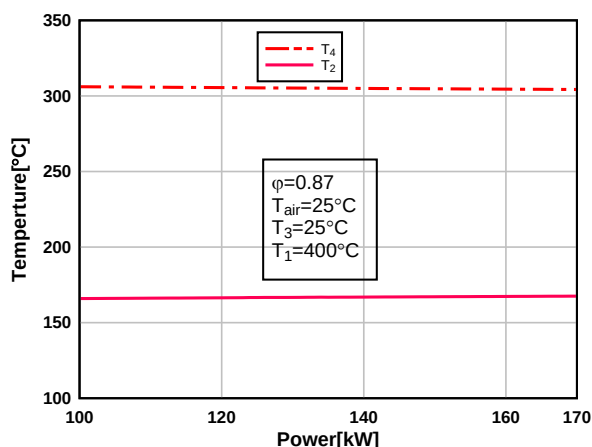
هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

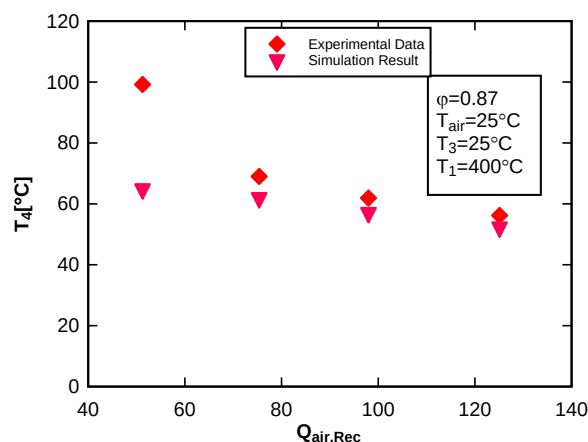
نتیجه گیری:

مهمترین پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه کارایی رکوپراتور می باشد، اثر افزایش توان سیستم بر دمای جریانهای خروجی در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

۱- صحت سنجی شبیه سازی نرم افزاری:



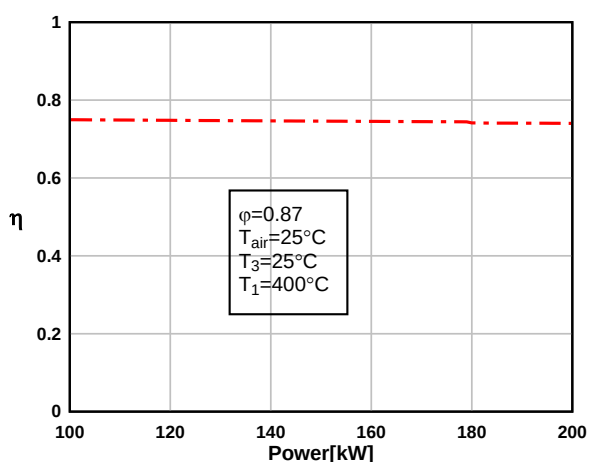
شکل (۱۳): تغییرات دمای جریانهای خروجی از رکوپراتور بر حسب تغییرات توان رکوپراتور



شکل (۱۱): مقایسه دمای خروجی از رکوپراتور به روشهای تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه سازی

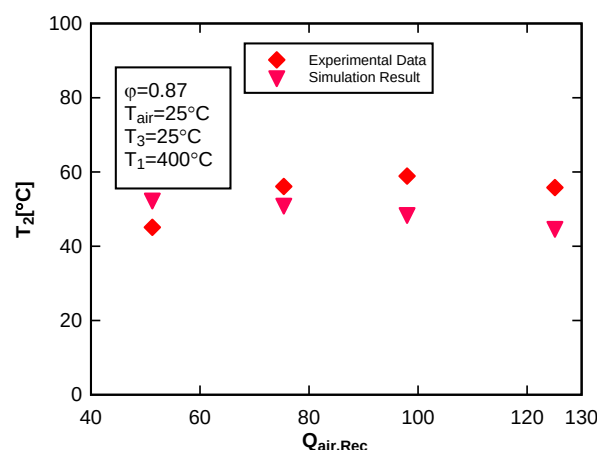
با توجه به شکل (۱۳)، با افزایش دبی جرمی هوای (m_a) وارد شده به محفظه احتراق و با توجه به اینکه مقدار نسبت هم ارزی در تمام شبیه سازی ثابت بوده است (نسبت هم ارزی برابر ۰/۸۵)، میزان دبی جرمی سوخت (m_f) نیز افزایش می یابد و توان مبدل نیز افزایش پیدا می کند. با توجه به اینکه دبی جریانات وارد شده به رکوپراتور با نسبت ثابتی افزایش یافته و دمای جریانهای ورودی به رکوپراتور ثابت فرض شده است، دمای جریان گرم خروجی از رکوپراتور (T_2) و دمای جریان سرد خروجی از رکوپراتور (T_4) تقریباً ثابت باقی می ماند که این مساله در شکل (۱۳) به وضوح نشان داده شده است.

پارامتر مهم دیگری که در طراحی مبدل نقش مهمی دارد، میزان راندمان رکوپراتور می باشد که مقدار آن با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است و در شکل (۱۴) اثر افزایش توان رکوپراتور بر راندمان رکوپراتور نشان داده شده است.



شکل (۱۴): تغییرات راندمان رکوپراتور بر حسب تغییرات توان رکوپراتور

با توجه به شکل (۱۱) که دمای هوای گرم شده در خروجی رکوپراتور را نشان می دهد، نتیجه این شبیه سازی حداکثر خطا ۳۵٪ است.



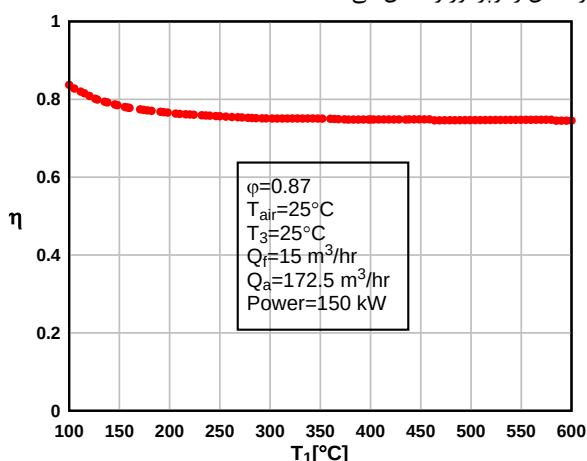
شکل (۱۲): مقایسه دمای خروجی از رکوپراتور به روشهای تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه سازی

همچنین، با توجه به شکل (۱۲) که دمای محصولات احتراق در خروجی رکوپراتور را نشان می دهد، نتیجه این شبیه سازی حداکثر خطای ۱٪ است که نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی می باشد.

۲- نتایج بررسی عوامل مختلف:

باتوجه به اینکه دبی هوا و سوخت ورودی به محفظه احتراق مهمترین پارامتر قابل تغییر در فرآیند ورود محصولات احتراق به رکوپراتور می باشد، لذا با تغییر دبی جرمی هوا و نیز با توجه به اینکه میزان نسبت هم ارزی در فرآیند احتراق ثابت فرض شده است، میزان دبی جرمی سوخت (متان) قابل محاسبه می باشد. باتوجه به اینکه توان خروجی از رکوپراتور، یکی از

همچنین شکل (۱۷) اثر افزایش دمای جریان خروجی از محفظه احتراق بر راندمان رکوپراتور را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تغییرات راندمان رکوپراتور بر حسب تغییر دمای جریان خروجی از محفظه احتراق

در توان ثابت ۱۵۰ کیلو وات، با افزایش دمای جریان خروجی از محفظه احتراق و با فرض مقدار دبی جرمی سوخت و هوا ثابت در ورودی محفظه احتراق، راندمان رکوپراتور کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

P	فشار
Q	دبی حجمی، m^3/h
T	دما، $^{\circ}C$

فهرست علائم یونانی

η	راندمان
φ	نسبت هم ارزی

بالانویس

*	پارامتر بی بعد
---	----------------

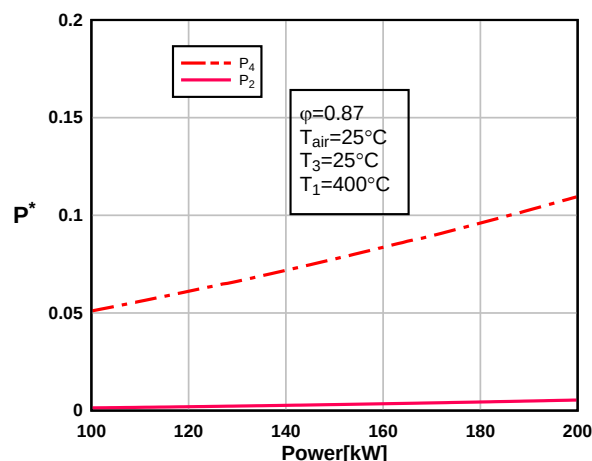
زیرنویس‌ها

a	هوا
air	هوای اطراف
air,rec	هوای سرد وارد شده به رکوپراتور
f	سوخت
1	محصولات احتراق وارد شده به رکوپراتور
2	محصولات احتراق خارج شده از رکوپراتور
3	هوای سرد وارد شده به رکوپراتور
4	هوای سرد خارج شده از رکوپراتور

همانطور که از شکل (۱۴) مشخص است، با توجه به اینکه دمای جریانهای وارد شونده به رکوپراتور و خارج شده از آن تقریباً ثابت است، پس انتظار می‌رود که راندمان نیز مقدار تقریباً ثابتی داشته باشد.

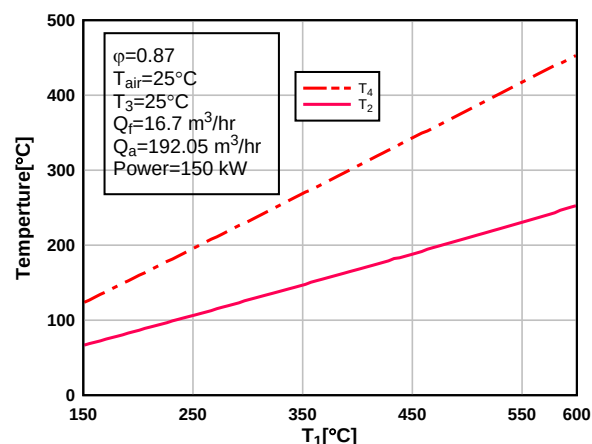
اثر افزایش توان بر پارامتر فشار خروجی و میزان افت فشار در شکل (۱۵) نشان داده شده است، با این توضیح که پارامتر P^* نسبت افت فشار به فشار در جریان ورودی در نظر گرفته شده است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه خواهد شد:

$$P^* = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$



شکل (۱۵): تغییرات پارامتر بی بعد افت فشار جریانها بر حسب توان رکوپراتور

پارامتر دیگری که مقدار آن در انجام تست، قابل تغییر می باشد، دمای جریان خروجی از محفظه احتراق است که اثر آن بر دمای جریانهای خروجی در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۱۶): تغییرات دمای جریانهای خروجی از رکوپراتور بر حسب تغییر دمای جریان خروجی از محفظه احتراق

با توجه به دیاگرام نشان داده شده در شکل (۶)، هرچقدر دمای جریان خروجی از محفظه احتراق بیشتر شود، طبیعتاً می‌بایست دمای جریانهای خروجی بیشتر شود که شکل (۱۶) نیز بیانگر آن است.

منابع:

- 1- http://faculty.kfupm.edu.sa/ME/antar/experiments/Updated.Experiments/Cross_Flow/classes/index.htm
- 2- Castelnovo, R., 2005, Schematic of Plate and Frame Heat Exchanger
- 3- Çengel, Y.A., Boles, M., 1994, "Thermodynamics: An Engineering Approach", McGraw-Hill Education.
- 4- http://www.recuperator.eu/eng/prodotti_piastre.html
- 5- Atthey, D.R., 2003, "An approximate thermal analysis for a regenerative heat exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer.
- 6- Chang, H.M., Ryu, S.H., 2011, "Heat exchanger for subcooling liquid nitrogen with a regenerative cryocooler", Cryogenics.
- 7- Laskowski, R., Smyk, A., 2016, "An Approximate Relation of a Regenerative Heat Exchanger Effectiveness in Off-Design Conditions", Heat Transfer Engineering.
- 8- Rao, P.U.M, Naidu, D.R.J, Prasad, P.D., 2017, "Thermal analysis of ceramic heat exchanger using simulation techniques", International journal of recent trends in engineering & research, vol 3.
- ۹- علی کویتی، ۱۳۹۰، "بررسی تأثیر رکوپراتور بر افزایش راندمان و بازیافت تلفات حرارتی کوره های پیشگرم نورد گرم فولاد مبارکه"، نخستین همایش مشعل و کوره های صنعتی، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا.
- ۱۰- مسعود عرب ساوجی، مختار بیدی، ۱۳۹۵، "تحلیل انرژی و انرژی سیستم تهویه مطبوع حرم مطهر رضوی در دو حالت با و بدون استفاده از رکوپراتور"، پنجمین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.
- ۱۱- احسان فتحی، محسن کامکار هفشجانی، ۱۳۹۵، "طراحی رکوپراتور صفحه و تحلیل پارامترهای موثر در طراحی"، دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مکانیک، صنایع و هوافضا، تهران، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان.
- ۱۲- محسن گنخکی، ۱۳۹۵، "شبیه سازی و بازیافت گرما در واحد گاز سنتز پالایشگاه اصفهان"، اولین همایش ملی سیستمهای انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد.
- ۱۳- علی نژاد محمدنامقی، میثم نامور، ابوالقاسم مقدمی، ۱۳۹۶، "شبیه سازی رکوپراتور حرارتی جهت کوره GTC-F واحد صادرات گاز پالایشگاه پنجم پارس جنوبی (۹ و ۱۰)"، چهارمین کنفرانس علوم و مهندسی جداسازی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.