NRI-ER-692-POPPN29-00-F

پژوهشگاه نیرو

گزارش فرصت مطالعاتی صنعتی

شرکت بهینه‌سازان صنعت تأسیسات

رامین حاجیان

واحد مجری: گروه پژوهشی سیکل و مبدل‌های حرارتی

DOI: 10.30503/nripress.2020.266


بسم الله الرحمن الرحيم

گزارش فرصت مطالعاتی صنعتی
شرکت بهینه‌سازان صنعت تأسیسات

رامین حاجیان

واحد مجری: گروه پژوهشی سیکل و مبدل‌های حرارتی

انتشارات پژوهشگاه نیرو
مهر ماه ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-692-POPPN29-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.266

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سیکل و مبدل‌های حرارتی

گزارش فرصت مطالعاتی صنعتی شرکت بهینه‌سازان صنعت تأسیسات/ مدیر پروژه: رامین حاجیان. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۵۱ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. رحمانی، فرشته، مدیر واحد مجری.

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی سیکل و مبدل‌های حرارتی

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

شماره:
تاریخ:
پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب رامین حاجیان، مدیر پروژه فرصت مطالعاتی صنعتی در شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.
□ گزارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱.
۲.
۳.
۴.

فهرست مطالب

۱- مقدمه..... ۱۰

هدف از فرصت مطالعاتی صنعتی ۱۰

معرفی شرکت ۱۰

حوزه تخصصی مورد مطالعه ۱۱

محتوای گزارش ۱۱

۲- مناقصات مبدل حرارتی..... ..... ۱۲

۳- ریکوپراتور صنعت شیشه..... ..... ۱۳

۴- ریکوپراتور کوره دوار..... ..... ۱۷

کوره دوار ۱۷

نمونه ریکوپراتور ساخته شده ۱۸

محاسبات و طراحی ۱۹

بازدیدها و مذاکرات ۲۱

۵- گزارش بازدید از واحدهای لعاب‌سازی یزد..... ..... ۲۲

مقدمه ۲۲

لعاب‌سازی دُرناز ۲۲

لعاب‌سازی مروارید ۲۵

لعاب‌سازی هاتف ۲۸

محاسبات افت فشار ۳۰

محاسبات صرفه جویی ۳۱

محاسبات اقتصادی ۳۲

جمع بندی مربوط به بازدید از لعاب‌سازی‌ها ۳۲

۶- ریکوپراتور فولاد چادرملو ۳۳

۷- WHR در صنعت سیمان ۳۳

۸- رویداد شناسایی فرصت های خدمات انرژی ۳۶

۹- لوله گرمایی ۳۷

نحوه عملکرد لوله گرمایی ۳۷

ساختار لوله گرمایی ۳۸

مزایای لوله گرمایی ۴۰

پارامترهای موثر در طراحی لوله‌گرمایی ۴۰

- **خواص سیال عامل مورد استفاده و محدوده دمای عملکردی ۴۰**
- **ماده استفاده شده درمحفظه(بدنه) ۴۱**
- **نوع ساختار فتیله ۴۲**
- **ابعاد لوله گرمایی ۴۲**
- **دمای چشمه و چاه ۴۳**
- **میزان گرمای ورودی در بخش اواپراتور ۴۳**
- **جهت گیری لوله‌گرمایی ۴۳**

۱۰- کولر تابلو برق..... ۴۵

مقدمه..... ۴۵

بررسی محصولات موجود..... ۴۶

مهندسی معکوس ۴۷

طراحی..... ۴۸

نمونه سازی ۴۹

۱۱-جمع بندی... ..... ۵۰

تعامل با واحدهای صنعتی ۵۰

نکات پایانی ۵۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۱- اهداف دوره فرصت مطالعاتی صنعتی ۱۰
شکل ۲- نمونه‌هایی از نقشه‌های مربوط به اسناد مناقصات ۱۲
شکل ۳- کوره واحد شیشه‌سازی ۱۳
شکل ۴- نمای جانبی کوره واحد شیشه‌سازی ۱۴
شکل ۵- وضعیت دسترسی دودکش کوره واحد شیشه‌سازی ۱۵
شکل ۶- ریکوپراتور دسته لوله کوره واحد شیشه‌سازی ۱۶
شکل ۷- ریکوپراتور دوپوسته کوره واحد شیشه‌سازی ۱۷
شکل ۸- واحد لعاب‌سازی دارای چند کوره دوار ۱۸
شکل ۹- ریکوپراتور کوره دوار ۱۹
شکل ۱۰- خروجی نتایج مربوط به محاسبات طراحی در Aspen-EDR ۲۰
شکل ۱۱- هندسه مبدل انتخاب شده حاصل از نتایج محاسبات در Aspen-EDR ۲۱
شکل ۱۲- نقشه سه‌بعدی CAD ریکوپراتور کوره دوار ۲۱
شکل ۱۳- لعاب‌سازی درناز ۲۳
شکل ۱۴- اتاق باکس و دودکش ۲۳
شکل ۱۵- خطوط گاز و کنتورهای واحد درناز ۲۴
شکل ۱۶- بالابر جهت دسترسی به دودکش ۲۵
شکل ۱۷- نمای داخل سالن واحد مروارید ۲۶
شکل ۱۸- حد فاصل انتهای کوره و باکس ۲۶
شکل ۱۹- راهروی مجاور دودکش‌ها و پنجره‌های ورود هوا ۲۷
شکل ۲۰- سقف بلند سالن و فضای کافی برای نصب ریکوپراتور ۲۷
شکل ۲۱- ستون‌های سوله و تیرآهن (قابل استفاده به عنوان تکیه‌گاه ریکوپراتور) ۲۸
شکل ۲۲- نمای داخل سالن لعاب‌سازی هاتف ۲۸
شکل ۲۳- اتاق باکس و دودکش ۲۹
شکل ۲۴- گاری متحرک تزریق خوراک ۲۹
شکل ۲۵- دیاگرام مودی ۳۰
شکل ۲۶- نقشه ریکوپراتور خط تولید آهن اسفنجی ۳۳
شکل ۲۷- چرخه ترمودینایکی ORC مجهز به ریژنراتور ۳۴
شکل ۲۸- مقایسه مشخصات ترمودینامیکی بخار و سیالات مورد استفاده در ORC ۳۴
شکل ۲۹- شبیه‌سازی ORC مجهز به ریژنراتور با ظرفیت یک مگاوات ۳۵
شکل ۳۰- پوستر نخستین رویداد ملی شناسایی فرصت‌های ارائه خدمات انرژی در صنایع انرژی‌بر ۳۶
شکل ۳۱- بخش های مختلف Heat Pipe و چگونگی کار آن ۳۹
شکل ۳۲- مزایای استفاده ازلوله‌گرمایی ۴۰
شکل ۳۳- سازگاری مواد مورد استفاده با سیال های عامل برای محدوده دماهای بالا ۴۱
شکل ۳۴- سازگاری مواد مورد استفاده با سیال های عامل برای محدوده دماهای پایین ۴۲
شکل ۳۵- خنک‌کننده CPU مبتنی بر فناوری لوله‌گرمایی ۴۵
شکل ۳۲- کاهش عمر قطعات الکترونیکی با افزایش دما ۴۶
شکل ۳۳- کولر ریتال سری Blue e+ ۴۷

شکل ۳۴- کولر McLean باز شده جهت مهندسی معکوس ۴۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.266

۱- مقدمه

هدف از فرصت مطالعاتی صنعتی

بر اساس دستورالعمل اجرایی دوره فرصت مطالعاتی صنعتی پژوهشگران پژوهشگاه نیرو، هدف از دوره فرصت مطالعاتی صنعتی مطابق بندهای قید شده در شکل ۱ است.

- ✓ کمک به افزایش شناخت اعضای پژوهشی پژوهشگاه از فضای حاکم بر صنعت در حوزه تخصصی مرتبط؛
- ✓ تقویت ارتباط پژوهشگاه با صنعت از طریق همکاری‌های پایدار علمی و پژوهشی بین پژوهشگاه و واحدهای عملیاتی؛
- ✓ استفاده مفید و مؤثر از امکانات آزمایشگاه‌ها و تجهیزات واحدهای عملیاتی؛
- ✓ جهت‌دهی به پژوهش‌های مورد نیاز وزارت نیرو، صنعت برق و گسترش دانش و فناوری کاربردی مورد نیاز صنعت؛
- ✓ انتقال و ترویج یافته‌های جدید دانش و فناوری پژوهشگاه در حوزه صنعت برق با هدف ارتقای توان علمی و فنی واحدهای عملیاتی؛
- ✓ کمک به رفع مشکلات علمی و تخصصی واحدهای عملیاتی؛
- ✓ شناسایی مشکلات واحدهای عملیاتی از لحاظ تنوع و کیفیت محصول یا خدمات، قیمت، زمان تحویل و سایر موارد مرتبط و ارائه و طرح پیشنهادی در جهت رفع مشکلات موجود؛
- ✓ شناسایی فناوری‌های مورد نیاز در حوزه صنعت برق و ارائه طرح پیشنهاد برای تدوین و انتقال فناوری به واحدهای عملیاتی؛
- ✓ مشارکت در سیاست‌گذاری و تعریف طرحی برای اصلاح فرآیندها و محصولات و توسعه پایدار اقتصادی کشور در حوزه صنعت برق

شکل ۱ - اهداف دوره فرصت مطالعاتی صنعتی

معرفی شرکت

حوزه‌های فعالیت شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات اجمالاً عبارتند از:

- ✓ مدیریت آزمایشگاه استاندارد سوخت و احتراق (سازمان پژوهشها) از ۱۳۷۳
- ✓ بازرسی و بهینه سازی انواع دیگ بخار صنعتی و ساختمانی از ۱۳۸۳
- ✓ بازرسی و بهینه سازی انواع مشعل صنعتی از ۱۳۸۳
- ✓ خدمات بازرسی انرژی در صنایع و استقرار استاندارد سیستم مدیریت انرژی از ۱۳۸۳

- ✓ طراحی، ساخت پیش‌گرمکن (پاتیل مذاب، تاندیش و...) از ۱۳۸۴
- ✓ مدیریت آزمایشگاه مرجع تست رادیاتور از ۱۳۸۵
- ✓ مطالعات امکان سنجی ریکوپراتور برای صنعت سیمان از ۱۳۸۸
- ✓ پروژه های پژوهشی هیترهای صنعتی پوسته-لوله (water bath, thermosyphon) از ۱۳۸۸
- ✓ طراحی، نصب و راه‌اندازی مشعل‌های دمنده دار در هیترهای صنعتی از ۱۳۹۴
- ✓ طراحی و ساخت ریکوپراتور هیترهای صنعتی از ۱۳۹۵
- ✓ شبیه سازی، طراحی و ساخت ریکوپراتور صنعتی از ۱۳۹۸
- ✓ طراحی و ساخت اکونومایزر نیروگاهی از ۱۳۹۹

حوزه تخصصی مورد مطالعه

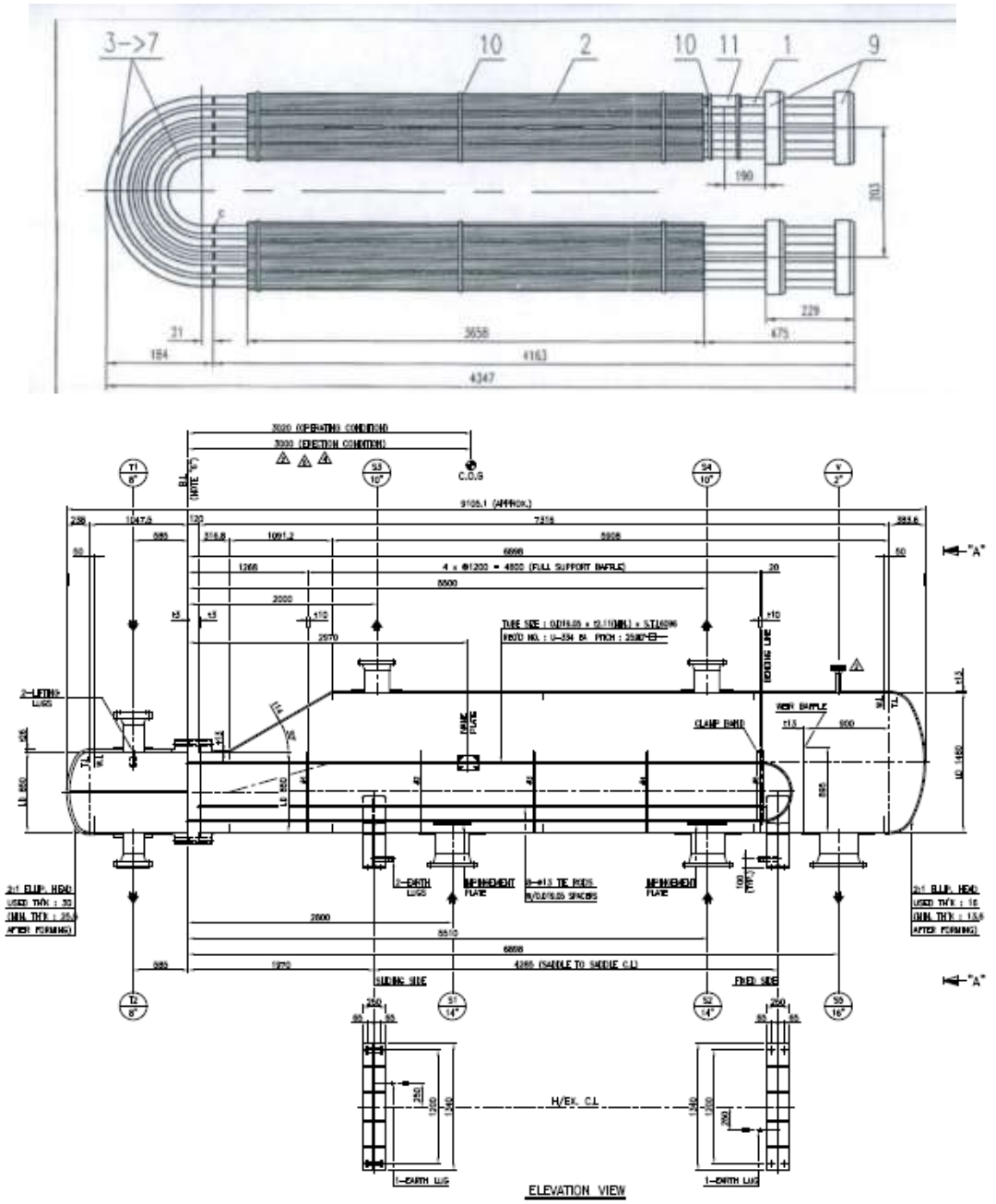
در دوره فرصت مطالعاتی، مطالعات با محوریت مبدل‌های حرارتی و تجهیزات انتقال حرارت بوده است. مبدل‌های حرارتی پوسته لوله مورد استفاده در صنعت نفت و گاز، ریکوپراتورهای صنعتی و تجهیزات بازیافت حرارت، تجهیزات خنک‌کاری و سرمایش و تجهیزات مبتنی بر لوله گرمایی از جمله موضوعاتی هستند که در این دوره یک ساله مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

محتوای گزارش

این گزارش حاوی خلاصه‌ای از فعالیت‌های انجام شده در دوره فرصت مطالعاتی صنعتی در شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات است. در بخش‌های بعدی مطالب مربوط به فعالیت‌های انجام شده به تفکیک موضوع ارائه شده و در انتهای گزارش یک جمع‌بندی از این دوره ارائه خواهد شد.

۲- مناقصات مبدل حرارتی

یکی از فعالیت‌های انجام شده در این دوره اقدامات مربوط به شرکت در مناقصات ساخت مبدل‌های حرارتی بوده است. نمونه‌هایی از نقشه‌های مربوط به اسناد مناقصات در شکل ۲ نشان داده شده است. اقدامات مربوط به این بخش شامل تدوین اسناد مناقصه شامل اسناد فنی و نقشه‌ها بوده است.



شکل ۲ - نمونه‌هایی از نقشه‌های مربوط به اسناد مناقصات

مناقصات مذکور عمدتا از طرف شرکت‌های فعال در حوزه نفت و پتروشیمی برگزار می‌شود. محتوای مناقصات عمدتاً عبارتند از ساخت مبدل حرارتی کامل و یا جایگزینی دسته‌لوله‌ها.

۳- ریکوپراتور صنعت شیشه

پیرو دریافت RFP از واحد شیشه‌سازی مینا، یک پروپوزال طراحی و ساخت ریکوپراتور کوره صنعت شیشه‌سازی تدوین و ارائه شد. در همین راستا بازدید و داده‌برداری از واحد صنعتی شیشه مینا انجام شد (شکل ۳ تا شکل ۵).



شکل ۳- کوره واحد شیشه‌سازی



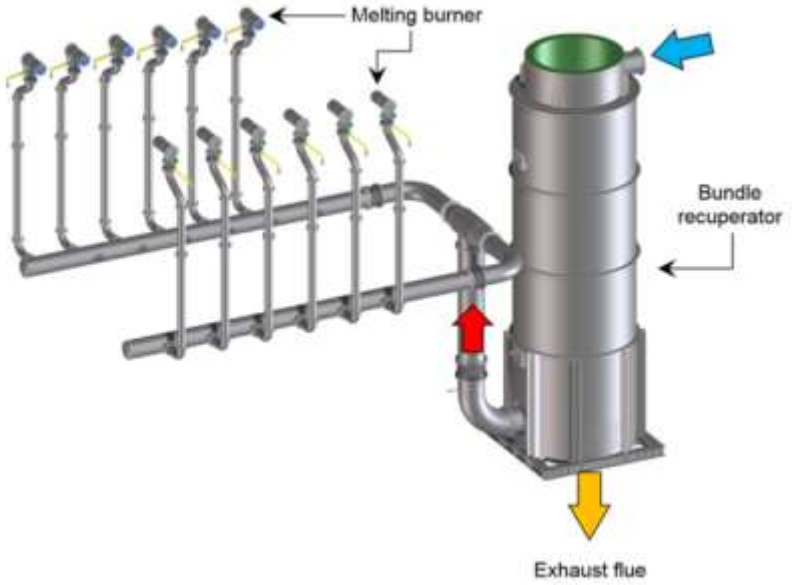
شکل ٤- نمای جانبی کوره واحد شیشه‌سازی



شکل ۵- وضعیت دسترسی دودکش کوره واحد شیشه‌سازی

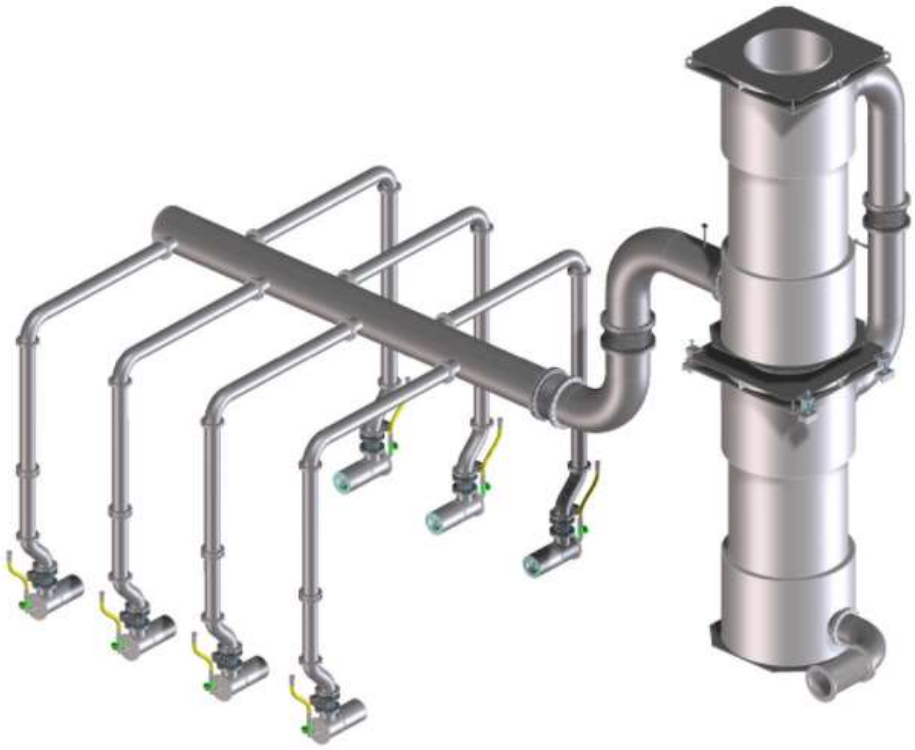
ریکوپراتورهای مورد استفاده در صنعت شیشه‌سازی عمدتاً شامل دو نوع دسته‌لوله[1] (شکل ۶) یا دوپوسته[2] (شکل ۷) هستند. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است هوای پیش‌گرم شده توسط دو کانال به سر مشعل‌ها منتقل میشود. این هندسه مختص کوره‌هایی است که دارای مشعل‌های توزیع شده هستند.

[1] tube-bundle
[2] double-shell





شکل ٦ - ریکوپراتور دسته لوله کوره واحد شیشه‌سازی



شکل ۷- ریکوپراتور دوپوسته کوره واحد شیشه‌سازی

۴- ریکوپراتور کوره دوار

کوره دوار

این نوع کوره در واحدهای صنعتی مختلف مانند واحدهای لعاب‌سازی و واحدهای ذوب مس و روی استفاده می‌شود (شکل ۸). موادی که باید ذوب/ پخت شوند از قسمت بالایی کوره به داخل کوره ریخته می‌شوند. یک انتهای استوانه کوره متصل به مشعل بوده و طول شعله تقریبا برابر طول کوره است. چرخش آرام و مستمر کوره سبب توزیع دمای یکنواخت در مواد می‌شود. انتهای دیگر استوانه کوره در مجاورت دودکش است.



شکل ۸- واحد لعاب‌سازی دارای چند کوره دوار

نمونه ریکوپراتور ساخته شده

شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات سابقه طراحی، ساخت و فروش ریکوپراتور کوره دورا را دارد. یک نمونه از این نوع ریکوپراتور در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۹- ریکوپراتور کوره دوار

محاسبات و طراحی

طراحی این ریکوپراتور به طور کامل در شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات انجام شده است. برای محاسبات طراحی ریکوپراتور و همچنین بازطراحی آن از نرم‌افزار Aspen-EDR استفاده شده است. استفاده از نرم‌افزار Aspen-EDR به این صورت است که نوع مبدل پوسته- لوله انتخاب شده و در قسمت Design & Rating تمام اطلاعات موجود مربوط به جریان سمت گرم و سمت سرد مبدل حرارتی شامل دما و دبی و فشار به عنوان ورودی ثبت می‌شود. همچنین در قسمت geometry می‌توان انواع محدودیت‌ها مثل تعداد بافل‌ها، فاصله آن‌ها و نوع نازل‌ها و شکل و نوع کلگی[۳] مبدل را انتخاب کرد. در پایان محاسبات را run کرده و نتایج طراحی هندسی به عنوان خروجی Aspen-EDR دریافت می‌شود. البته لازم به ذکر است که ممکن است نتیجه محاسبات به همراه خطاهایی مانند خطای مربوط به ارتعاش (vibration problem) یا سایش (ρv^2 problem) باشد که در این صورت باید اعمال تغییراتی در هندسه یا شرایط جریان این خطاها را مرتفع کرد. این موارد در قسمت overall performance نمایش داده می‌شود (شکل ۱۰).

[3] head

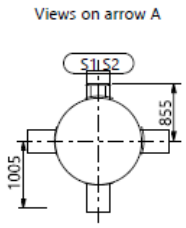
Overall Performance

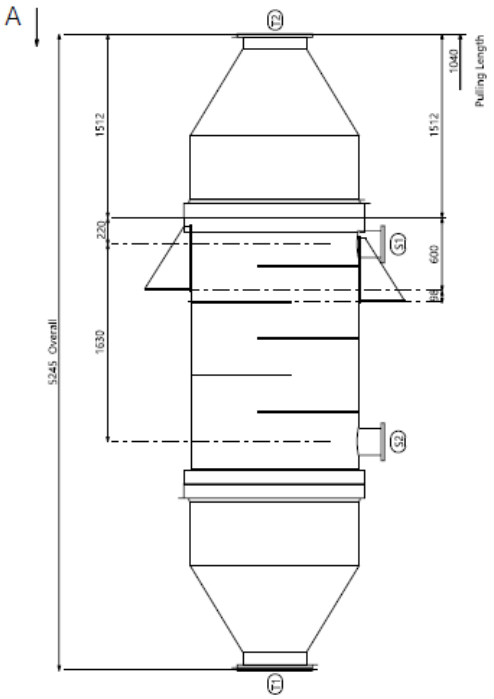
Simulation		Shell Side		Tube Side	
Total mass flow rate	kg/s	0.7546		1.5651	
Vapor mass flow rate (In/Out)	kg/s	0.7546	0.7546	1.5651	1.5651
Liquid mass flow rate	kg/s	0	0	0	0
Vapor mass fraction		1	1	1	1
Temperatures	°C	25	249.35	595	495.91
Bubble / Dew point	°C	/	/	/	/
Operating Pressures	bar	1	0.98664	1	0.99841
Film coefficient	W/(m²-K)	35.8		12.8	
Fouling resistance	m²-K/W	0.0001		0.00011	
Velocity (highest)	m/s	14.12		6.96	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0.03 / 0.01336		0.002 / 0.00159	

Total heat exchanged	kW	173.3	Unit	BEM	1 pass	1 ser	1 par	
Overall clean coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	9.4 /	Shell size	1300	- 2000	mm	Ver	
Overall dirty coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	9.4 /	Tubes	Plain				
Effective area (plain/finned)	m²	45.6 /	Insert	None				
Effective MTD	°C	404.71	No.	81	OD 101.6	Tks 4	mm	
Actual/Required area ratio (dirty/clean)		1 / 1	Pattern	60	Pitch 127	mm		
Vibration problem (HTFS)		No	Baffles	Single segmental	Cut(%d) 40.23			
RhoV2 problem		No	Total cost	63839	Dollar(US)			

شکل ۱۰- خروجی نتایج مربوط به محاسبات طراحی در Aspen-EDR

همچنین نقشه مبدل انتخاب شوده توسط نرم‌افزار را می‌توان به عنوان یکی دیگر از نتایج محاسبات دریافت کرد (شکل ۱۱).





شکل ۱۱- هندسه مبدل انتخاب شده حاصل از نتایج محاسبات در Aspen-EDR

پس از دریافت خروجی از نرم‌افزار Aspen-EDR، نقشه ساخت توسط یک نرم‌افزار CAD مانند Solidworks ترسیم می‌شود. در شکل ۱۲ تصویر سه بعدی CAD این ریکوپراتور مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲- نقشه سه‌بعدی CAD ریکوپراتور کوره دوار

نتایج کامل و دقیق محاسبات طراحی جزو اسناد داخلی شرکت بوده و به همین دلیل در این گزارش قابل انتشار نیست.

با توجه به قیمت ریکوپراتور و میزان صرفه جویی انرژی، دوره بازگشت سرمایه برای استفاده از این نوع ریکوپراتور ۲ سال و ۵ ماه تخمین زده شد. البته با واقعی‌تر شدن قیمت انرژی انتظار می‌رود دوره بازگشت سرمایه به زیر دو سال برسد.

بازدیدها و مذاکرات

در راستای نصب ریکوپراتور بر روی کوره‌های دوار در صنعت لعاب، از چهار واحد تولیدی لعاب در استان یزد بازدید به عمل آمده و مذاکراتی با این مجموعه‌ها انجام شده است که شرح آن در بخش بعد آورده شده است.

همچنین با توجه به کاربرد کوره دوار در صنعت مس و روی، مذاکراتی با صاحبان این صنایع انجام شده است. لازم به ذکر است که طی یک سال گذشته این صنایع با افزایش شدید بهای گاز مواجه شده و به همین دلیل استفاده از ریکوپراتور به منظور کاهش مصرف انرژی، جذابیت بیشتری یافته است.

۵- گزارش بازدید از واحدهای لعاب‌سازی یزد

مقدمه

پس از اجرای موفقیت‌آمیز پروژه طراحی، ساخت و نصب ریکوپراتور بر روی دودکش یکی از کوره‌های کارخانه لعاب‌سازی، طی بازدید به عمل‌آمده از سه واحد لعاب‌سازی دیگر، امکان اجرای پروژه‌های مشابه در این واحدها مورد بررسی قرار گرفته است. این سه واحد عبارت‌اند از لعاب درناز، لعاب مروارید و لعاب هاتف که همگی در شهرک صنعتی اردکان واقع شده‌اند. بازدید مذکور در بهار ۱۴۰۰ انجام شده است. در این گزارش ضمن تشریح نکات کلی مربوط به هر یک از واحدها و امکان‌سنجی فنی نصب ریکوپراتور، واحدی که از نظر فنی شرایط مساعد را دارد مشخص شده و محاسبات فنی و اقتصادی مربوط به آن ارائه خواهد شد.

لعاب‌سازی دُرناز

نخستین واحدی که مورد بازدید قرار گرفت واحد لعاب‌سازی درناز بود. در شکل ۱۳ نمایی از داخل سالن لعاب‌سازی درناز مشاهده می‌شود. این واحد دارای شش کوره دوار بوده و همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است باکس‌ها و دودکش‌های کوره‌ها در اتاق پشت دیوار قراردارند. اولین موضوعی که در خصوص دودکش‌های این کوره‌ها وجود دارد این است که در صورت نصب ریکوپراتور درب باکس‌ها باید بسته شود.



شکل ۱۳- لعاب‌سازی درناز



شکل ۱۴- اتاق باکس و دودکش

تزریق خوراک به کوره ها از طریق گاری متحرک روی کوره‌ها انجام می‌شود.



شکل ۱۵- خطوط گاز و کنتورهای واحد درناز

همان طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است در واحد درناز دو خط گاز موازی با دو کنتور مجزا وجود دارد. دلیل وجود دو خط موازی، این است که در ظرفیت عبور گاز در هر یک از خطوط محدودیت وجود دارد و زمانی که تمام کوره‌ها با هم در حال کار باشند، یکی از خطوط به تنهایی پاسخگوی مقدار مصرف گاز مورد نیاز نخواهد بود.

با توجه به اینکه ریکوپراتور بالای باکس نصب می‌شود، فضای موجود بالای باکس و همچنین امکان اتصال ریکوپراتور به یک تکیه‌گاه، حائز اهمیت است. ارتفاع ریکوپراتور در حدود سه متر است و در صورت نصب بر روی دودکش‌ها باید بخشی از سقف ایرانیت بریده شود. به منظور کاهش افت فشار جریان هوا، فن باید در مجاورت ریکوپراتور نصب شود. چالش جدی موجود در واحد درناز این است که چنانچه فن در مجاورت ریکوپراتور (ارتفاع حدود ۳ متری) نصب شود دسترسی به آن به سهولت امکان‌پذیر نیست. لازم به ذکر است که این دسترسی هم برای اطمینان از روشن بودن فن و هم برای تعمیر و نگهداری ضروری است. برای دسترسی به فضای بالای دودکش‌ها، ریکوپراتور و فن نیاز به استفاده از بالابر است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- بالابر جهت دسترسی به دودکش

لعاب‌سازی مروارید

بازدید دوم از واحد لعاب‌سازی مرواردید انجام شد. این واحد مشتمل بر شش کوره است که البته در زمان بازدید یکی از کوره‌ها به منظور تعمیر خارج از سرویس بود (شکل ۱۷). همانطور که در این تصویر دیده می‌شود برای تزریق خوراک به کوره‌ها یک سکوی دسترسی بالای هر کوره تعبیه شده و لذا نیازی به گاری متحرک (مانند لعاب‌سازی‌های درناز و هاتف) نیست.

به دلیل اینکه کوره دوار متحرک است نمی‌تواند به دودکش متصل باشد. در شکل ۱۸ حد فاصل بین انتهای کوره و باکس خروجی دود مشخص است.

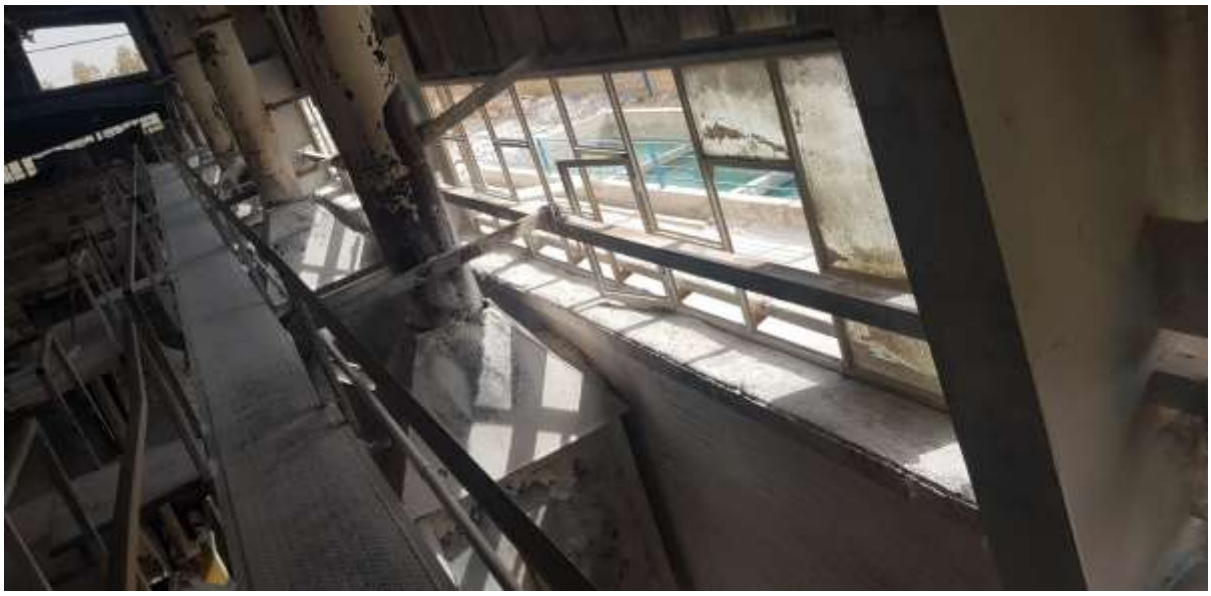


شکل ۱۷- نمای داخل سالن واحد مروارید



شکل ۱۸- حد فاصل انتهای کوره و باکس

در این واحد باکس و دودکش در داخل سالن اصلی قرار دارند. همچنین یک راهرو در قسمت بالای باکس‌ها و مجاورت دودکش‌ها قرار دارد. در مجموع دسترسی به دودکش، ریکوپراتور و فن (که در مجاورت ریکوپراتور نصب می‌شود) در این واحد خیلی مناسب است. همچنین به دلیل وجود پنجره و امکان ورود هوای تازه، شرایط خنک‌کاری فن فراهم است (شکل ۱۹). لازم به ذکر است که با توجه به محل نصب فن در بالای کوره‌ها، نیاز به خنک‌کاری فن وجود دارد.



شکل ۱۹- راهروی مجاور دودکش‌ها و پنجره‌های ورود هوا

نکته مثبت دیگری که در واحد مروارید به چشم می‌خورد این است که به دلیل اینکه دودکش داخل سالن اصلی قرار دارد و با توجه به سقف بلند سوله، ریکوپراتور به طور کامل داخل سالن قرار گرفته و نیاز به برش سقف نیست (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- سقف بلند سالن و فضای کافی برای نصب ریکوپراتور

به دلیل وجود ستون‌های سوله و تیرآهن‌های دیگر، تکیه‌گاه مناسب برای نصب ریکوپراتور نیز وجود دارد (شکل ۲۱).



شکل ۲۱- ستون‌های سوله و تیرآهن (قابل استفاده به عنوان تکیه‌گاه ریکوپراتور)

لعاب‌سازی هاتف

آخرین واحدی که در شهرک صنعتی اردکان مورد بازدید قرار گرفت لعاب‌سازی هاتف بود. شکل ۲۲ نمای داخل سالن این واحد را نشان می‌دهد. این واحد از جهات مختلف شبیه لعاب‌سازی درناز است؛ یعنی باکس‌ها و دودکش‌ها خارج از سالن و درون اتاق مجزایی هستند (شکل ۲۳) و نیز برای تزریق خوراک به کوره‌ها از گاری متحرک استفاده می‌شود (شکل ۲۴).



شکل ۲۲- نمای داخل سالن لعاب‌سازی هاتف



شکل ۲۳ - اتاق باکس و دودکش



شکل ۲٤ - گاری متحرک تزریق خوراک

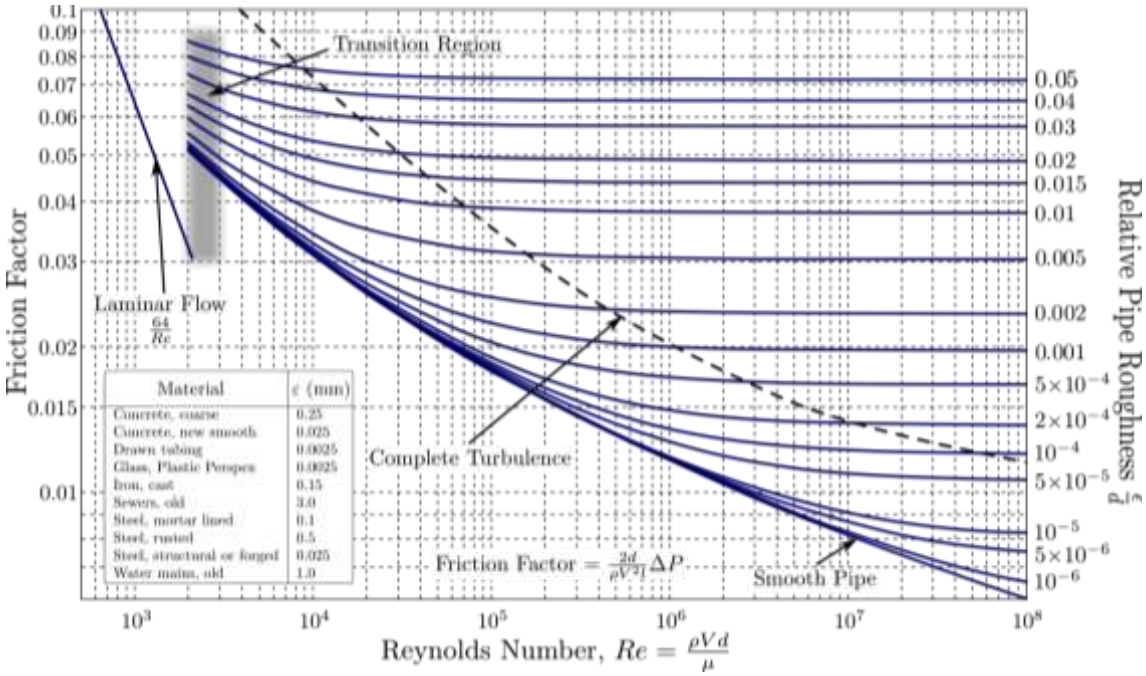
بنا به دلایل مشابه واحد درناز، این واحد نیز شرایط چندان مناسبی برای نصب ریکوپراتور ندارد. بنابراین در بین این سه واحد، لعاب‌سازی مروارید بهترین شرایط را برای نصب ریکوپراتور دارد.

محاسبات افت فشار

فرض بر این است که باید صرفاً با فن موجود و بدون اضافه کردن فن کمکی فرآیند هوادهی با دبی مناسب انجام شود. به این منظور مجموع افت فشار درون لوله‌ها، زانویی‌ها و ریکوپراتور نباید از فشار قابل تامین توسط فن برای دبی مد نظر بیشتر باشد. بر اساس محاسبات انجام شده در نرم‌افزار Aspen-EDR، افت فشار سمت هوا درون ریکوپراتور حدود ۳۰ میلی‌بار است.

برای محاسبه افت هد اصلی که ناشی از اصطکاک جریان درون لوله است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$h_{major} = f\frac{l}{d}\frac{v^2}{2g}$$



شکل ۲۵ - دیاگرام مودی

که در آن f ضریب افت فشار بوده و برای جریان مغشوش از دیاگرام مودی (شکل ۲۵) خوانده می‌شود. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود f تابع زبری سطح و عدد رینولدز است. زبری سطح برای لوله های فولادی بین ۰,۰۴۶ و ۰,۲۶ میلی متر است. بر این اساس و با محاسبه عدد رینولدز، مقدار f حدوداً ۰,۰۲ برآورد می‌شود.

برای محاسبه افت هد ناشی از زانویی‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$h_{minor} = k\frac{v^2}{2g}$$

که در آن k را می‌توان برابر ۰,۳ در نظر گرفت. با توجه به محاسبات انجام شده برای اطمینان از تامین افت فشار توسط فن، باید قطر لوله ۱۰ اینچ باشد. حد فاصل خروجی فن تا ورودی هوا به ریکوپراتور شامل ۳,۵ متر لوله و یک زانویی است. افت فشار محاسبه شده برای این قسمت برابر حدود ۸ میلی‌بار است. حد فاصل خروجی هوا از ریکوپراتور تا سر مشعل شامل ۸ متر لوله ۱۰ اینچ و سه زانویی است که افت فشار آن حدود ۲۴ میلی‌بار برآورد می‌شود. با احتساب ۳۰ میلی‌بار افت فشار داخل ریکوپراتور مجموع افت فشار جریان هوا حدود ۶۱ میلی‌بار تخمین زده می‌شود.

برای محاسبه فشار قابل تامین توسط فن نیاز به منحنی مشخصه فن است. متاسفانه منحنی مشخصه فن‌های مورد استفاده در این واحدها موجود نیست. راه دیگر استفاده از رابطه توان فن است و لاجرم باید برای ضرایب مربوط به بازده فن و بازده موتور از اعداد تخمینی استفاده کرد.

$$\Delta p = \frac{\eta_m \eta_f P_m}{V}$$

در این رابطه Δp افت فشار قابل تامین توسط فن، η_m بازده موتور، η_f بازده فن، P_m توان موتور و V دبی حجمی هوا است. با احتساب η_m برابر ۰,۸۷، η_f برابر ۰,۸۲ و توان ۷۵۰۰ وات موتور و دبی حجمی حدود ۰,۹ مترمکعب بر ثانیه، مقدار افت فشار قابل تامین توسط فن حدود ۶۰ میلی‌بار خواهد بود که به مجموع افت فشار محاسبه شده در لوله‌ها و ریکوپراتور بسیار نزدیک است.

محاسبات صرفه جویی

افزایش دمای هوای احتراق اصلی‌ترین عامل صرفه‌جویی ناشی از نصب ریکوپراتور است. در واقع دمای هوا در حالتی که از ریکوپراتور عبور نمی‌کند باید از دمای محیط (حدود ۳۰ درجه سلسیوس) به دمای متوسط داخل کوره (حدود ۱۲۵۰ درجه سلسیوس) برسد. در حالیکه با نصب ریکوپراتور، با فرض دمای دود ۴۶۰ درجه سلسیوس، طبق محاسبات نرم‌افزار Aspen-EDR ، دمای هوای خروجی از ریکوپراتور برابر ۱۷۵ درجه سلسیوس خواهد بود. بنابراین به کمک

احتراق، دمای هوا از ۱۷۵ به ۱۲۵۰ می‌رسد. انرژی لازم برای رساندن دمای هوا از ۳۰ درجه به ۱۷۵ درجه در واقع همان انرژی صرفه‌جویی شده است.

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \int_{30}^{1250} \dot{m} c_p dT - \int_{175}^{1250} \dot{m} c_p dT = \int_{30}^{175} \dot{m} c_p dT = 113kW$$

بنابراین نصب ریکوپراتور بر روی یک کوره دوار موجب صرفه‌جویی ۱۱۳ کیلووات در مصرف انرژی گرمایی می‌شود.

محاسبات اقتصادی

برای محاسبات اقتصادی ابتدا میزان صرفه‌جویی گاز محاسبه شده و سپس بر اساس قیمت گاز و هزینه تمام‌شده خرید و نصب ریکوپراتور، می‌توان زمان بازگشت سرمایه را تخمین زد.

طبق تجربه قبلی شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات، پس از نصب ریکوپراتور بر روی کوره دوار در حدود ۳۴٪ کاهش مصرف گاز حاصل می‌شود. بر اساس قبوض گاز کارخانه مشخص شده است که سالانه حدود ۵،۳۵۰،۰۰۰ مترمکعب گاز در کارخانه مصرف می‌شود. با فرض اینکه نصف کوره‌ها (۳ کوره) به رکوپراتور مجهز گردند و در همان سه کوره حدود ۳۰ درصد کاهش مصرف سوخت حاصل شود مقدار کاهش مصرف گاز ناشی از نصب هر ریکوپراتور حدود ۲۷۰،۰۰۰ مترمکعب استاندارد در سال تخمین زده می‌شود. با فرض اینکه هر کوره ۳۵۰ روز سال به صورت ۲۴ ساعته در حال کار باشد و توجه به اینکه تعرفه گاز برای صنایع کاشی و سرامیک در سال ۱۴۰۰ برابر ۲،۱۰۸ ریال اعلام شده، مقدار صرفه‌جویی ریالی سالانه به ازای نصب هر ریکوپراتور ۵۶۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال تخمین زده می‌شود.

هزینه تمام‌شده خرید و نصب هر عدد ریکوپراتور (با فرض اینکه مجموعا ۳ عدد خریداری شود) برای شرکت لعاب‌سازی مروارید برابر ۱،۳۵۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال است. بنابراین انتظار می‌رود با فرض ثابت ماندن قیمت گاز، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۲,۵ سال باشد.

لازم به ذکر است که هزینه‌ها و قیمت‌های ذکر شده مربوط به نیمه اول سال ۱۴۰۰ است.

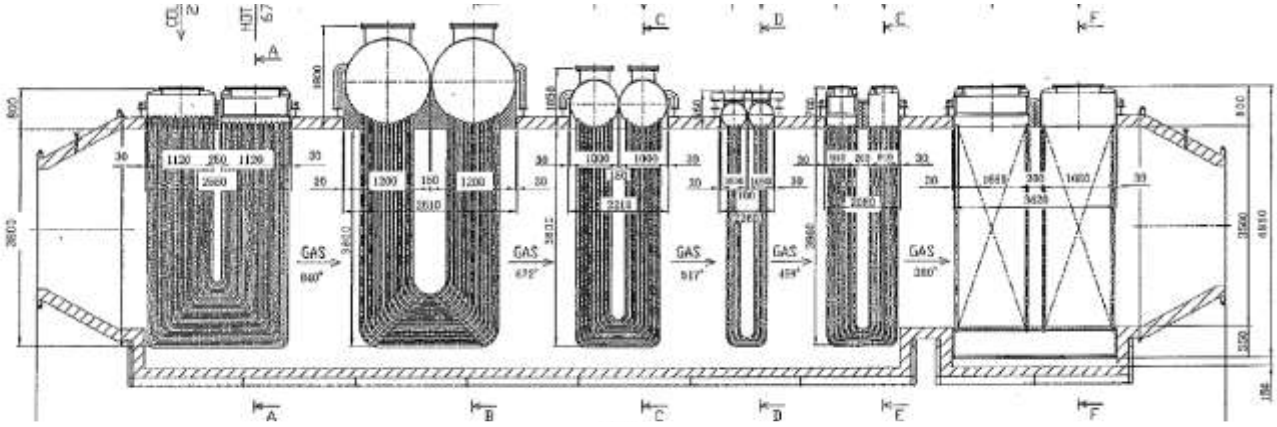
جمع بندی مربوط به بازدید از لعاب‌سازی‌ها

در این گزارش ملاحظات فنی و امکان دسترسی نصب ریکوپراتور بر روی دودکش کوره دوار سه واحد لعاب‌سازی واقع در شهرک صنعتی اردکان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نکات مطرح شده، لعاب‌سازی مروارید شرایط مناسب‌تری برای اجرای این پروژه را دارد. همچنین در این گزارش ضمن ارائه خلاصه‌ای از محاسبات افت فشار و بازیافت حرارت،

میزان صرفه جویی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. در پایان با توجه به قیمت ریکوپراتور، دوره بازگشت سرمایه ۲ سال و ۵ ماه تخمین زده شد.

۶- ریکوپراتور فولاد چادرملو

بخش دیگری از اقدامات مربوط به دوره فرصت مطالعاتی به موضوع طراحی ریکوپراتور صنعت فولاد اختصاص داشت. با توجه به تجربه کار پژوهشی در حوزه ریکوپراتور خط تولید آهن اسفنجی و پیرو مذاکرات انجام شده با یک شرکت فعال در این حوزه، یک پروپوزال طراحی ریکوپراتور برای خط تولید آهن اسفنجی شرکت فولاد چادرملو تدوین و ارائه شد. شکل ۲۶ نقشه ریکوپراتور مذکور متشکل از شش دسته‌لوله و به طول ۲۲ متر را نشان می‌دهد.



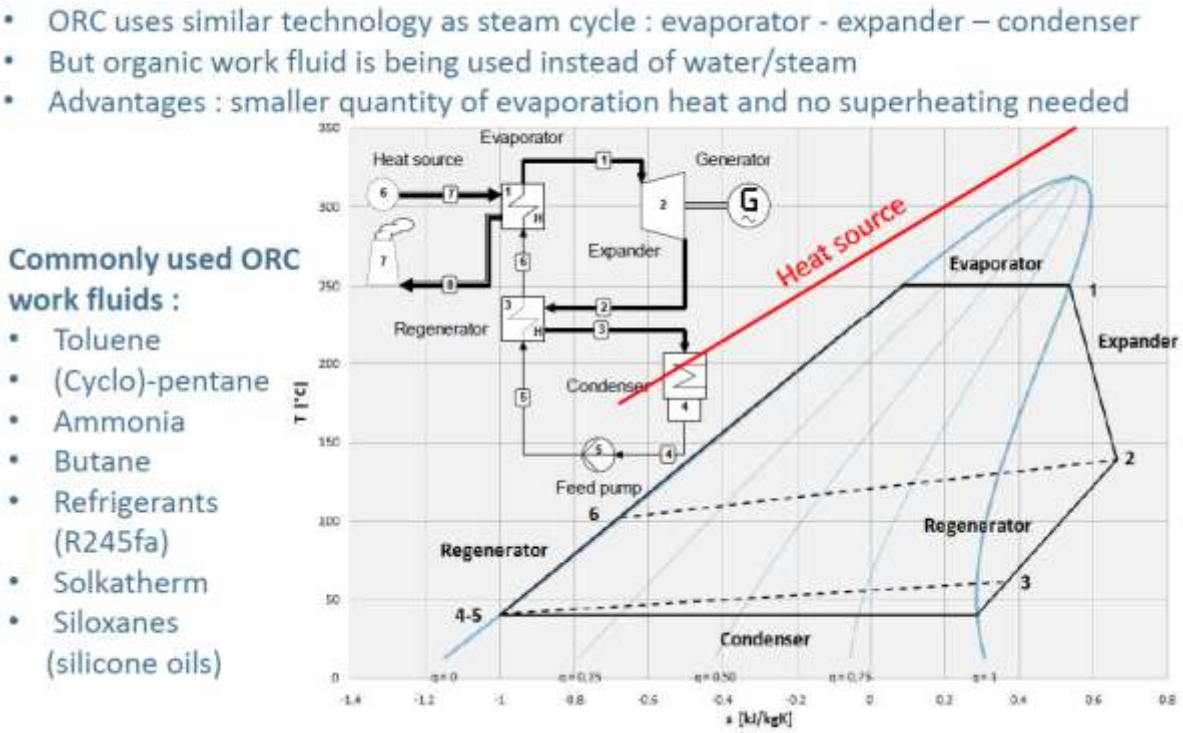
شکل ۲۶- نقشه ریکوپراتور خط تولید آهن اسفنجی

۷- WHR در صنعت سیمان

بازیافت حرارت اتلافی[4] به منظور استحصال حرارت اتلافی برای تولید برق، در صنایع بزرگ مانند صنعت سیمان به عنولن یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی و کاهش آلایندگی مطرح است. به این منظور گزینه‌های مختلفی برای چرخه تولید برق، از جمله ORC، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲۷ به صورت کلی چرخه ORC دارای ریژنراتور را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات ترمودینامیکی بخار و سیالات مورد استفاده در ORC در شکل ۲۸ مقایسه شده

[4] Waste Heat Recovery (WHR)

است. شکل ۲۹ شبیه‌سازی ترمودینامیکی ORC یک واحد یک مگاواتی مجهز به ریژنراتور را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی که در دانشگاه دلفت هلند انجام شده، دما، فشار آنتالپی و دبی جرمی در نقاط مختلف مشخص شده است.

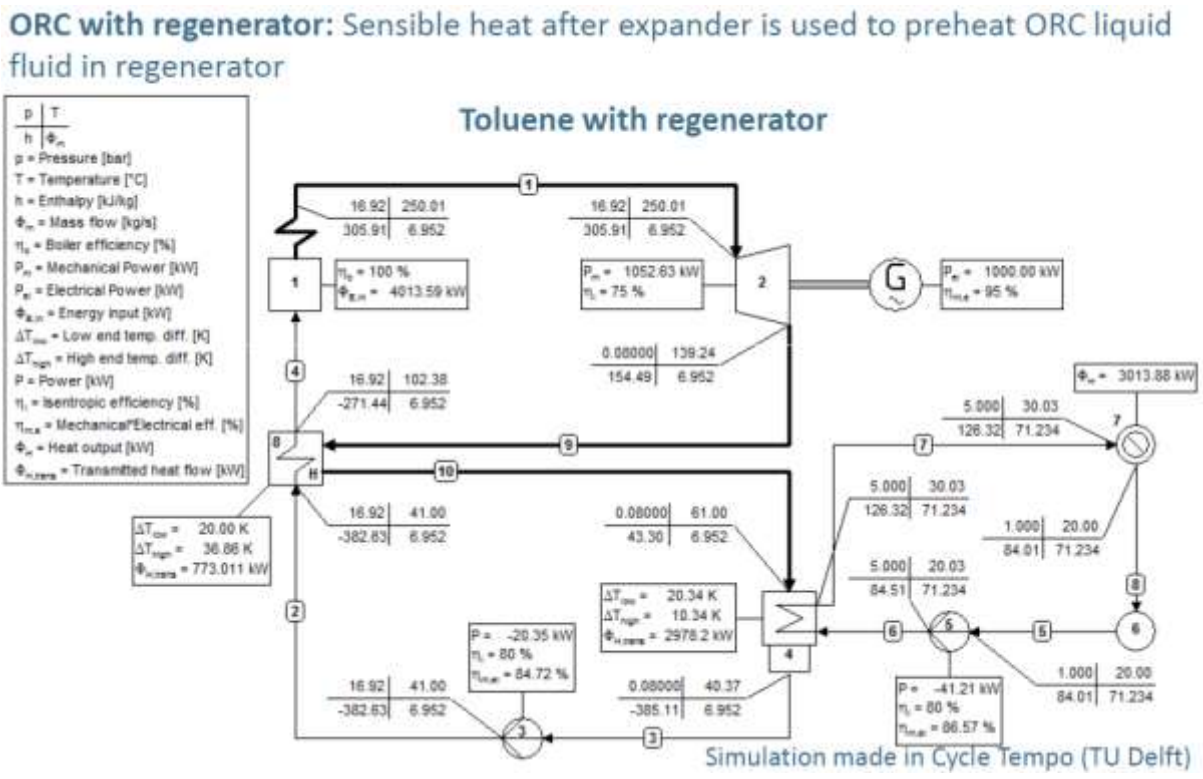


شکل ۲۷ - چرخه ترمودینایکی ORC مجهز به ریژنراتور

Properties ORC media vs. Steam

		T_{crit}	p_{crit}	Boiling Point	E_{evap} (1bar)
Fluid	**Formula / name**	**[°C]**	**[bar]**	**[°C]**	**[kJ/kg]**
Water	H20	373.9	220.6	100.0	2257.5
Toluene	C7H8	318.7	41.1	110.7	365.0
R245fa	C3H3F5	154.1	36.4	14.8	195.6
n-pentane	C5H12	196.6	33.7	36.2	361.8
cyclopentane	C5H10	238.6	45.1	49.4	391.7
Solkatherm	solkatherm	177.6	28.5	35.5	138.1
OMTS	MDM	291.0	14.2	152.7	153.0
HMDS	MM	245.5	19.5	100.4	195.8

شکل ۲۸ - مقایسه مشخصات ترمودینامیکی بخار و سیالات مورد استفاده در ORC

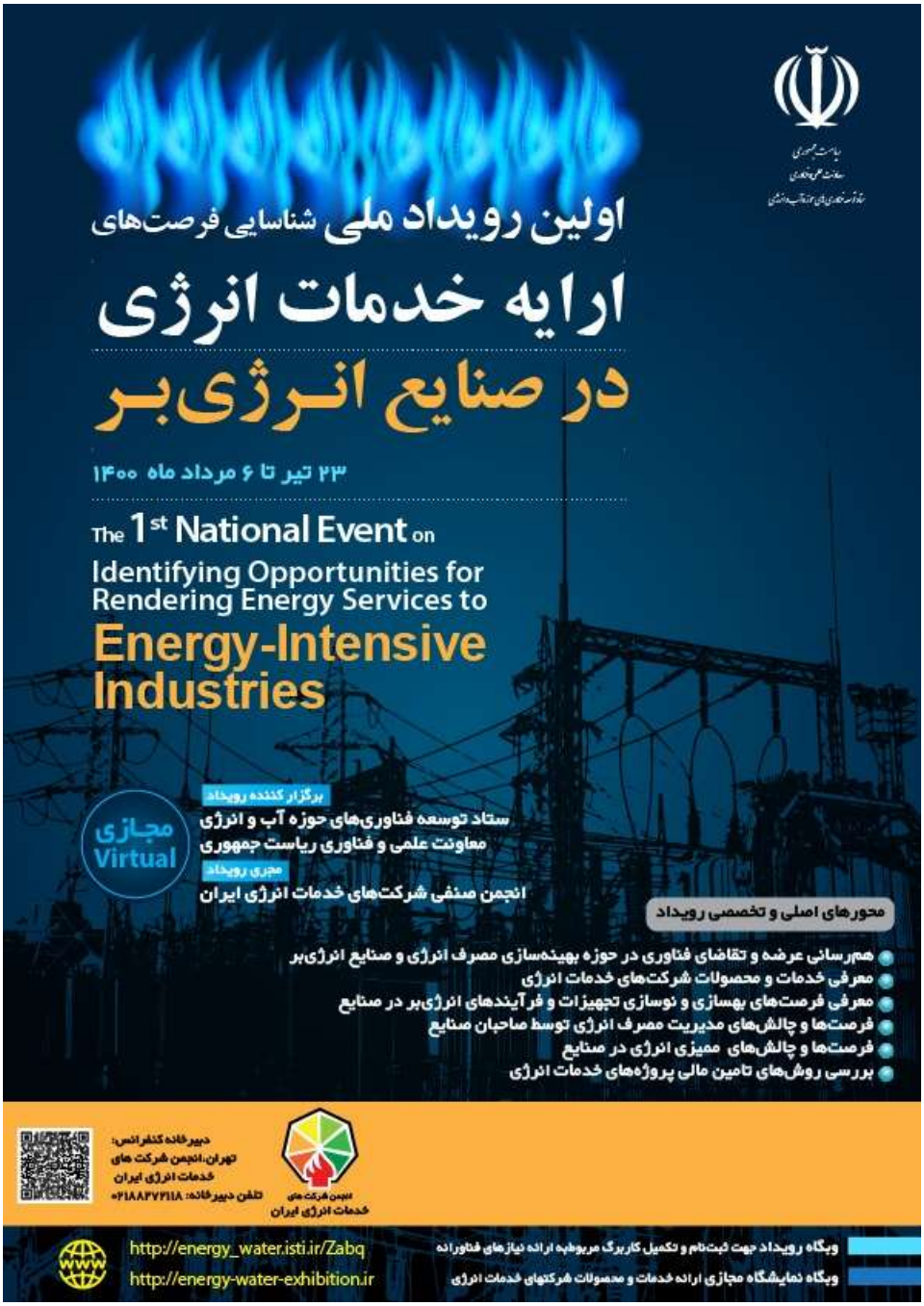


شکل ۲۹- شبیه‌سازی ORC مجهز به ریژنراتور با ظرفیت یک مگاوات

در همین راستا مطالعات امکان‌سنجی اجرای ORC در یکی از واحدهای تولید سیمان انجام شده است. شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات به عنوان مشاور فنی در این حوزه فعالیت داشته است. در دوره فرصت مطالعاتی، بخشی از این اقدامات از جمله بررسی‌های فنی و اقتصادی و همچنین جلسه با انجمن صنفی سیمان انجام شده است. مطالعات انجام شده شامل برآورد کلی هزینه‌ها و مقدار برق تولیدی بوده است. در این راستا معیار ارزیابی هزینه‌ها پیش‌فاکتورهای دریافت شده از شرکت‌های اروپایی و همچنین تخمین هزینه پیشنهادی احتمالی از سوی شرکت‌های چینی بوده است. این مرحله از بررسی امکان‌سنجی شامل یک بررسی کلیه اولیه بوده است. در این راستا به منظور انجام امکان‌سنجی دقیق، یک پیشنهاد پروژه به انجمن صنفی سیمان ارائه شد.

۸- رویداد شناسایی فرصت های خدمات انرژی

در تیرماه سال ۱۴۰۰ نخستین رویداد ملی شناسایی فرصت‌های ارائه خدمات انرژی در صنایع انرژی‌بر (شکل ۳۰) برگزار شد و اینجانب به عنوان یکی از سخنرانان کلیدی، ارائه‌ای در خصوص تجهیزات و روش‌های بازیافت حرارت در صنعت داشتم.



شکل ۳۰- پوستر نخستین رویداد ملی شناسایی فرصت‌های ارائه خدمات انرژی در صنایع انرژی‌بر

سرفصل مطالب ارائه شده در این سخنرانی عبارتند از:

- اهمیت بازیافت حرارت
- رویکردهای کلی بازیافت حرارت
- بازیافت حرارت از دودکش (محصولات احتراق)
- بازیافت انرژی در سامانه های HVAC
- تجهیزات بازیافت حرارت
- recuperative burners
- regenerative burners
- خدمات قابل ارائه در حوزه بازیافت حرارت (طراحی و ساخت ریکوپراتور)
- تجربیات: کوره دوار لعاب سازی
- تجربیات: گرمکن خط گاز ایستگاه تقلیل فشار گاز

۹- لوله گرمایی

یک بخش از فعالیت‌های دوره فرصت مطالعاتی به کاربردهای لوله‌گرمایی[۵] در خنک‌کاری تجهیزات الکترونیک اختصاص یافت. در این مطالعات ملزومات طراحی، نمونه‌سازی و تولید این محصولات مورد مطالعه قرار گرفت. برای طراحی لوله‌گرمایی باید به پارامترها و ملزومات متعدی توجه داشت که در ادامه تشریح خواهد شد.

نحوه عملکرد لوله گرمایی

لوله‌گرمایی یک واسط انتقال حرارت است که قادر به انتقال مقدار زیادی گرما بیش از فاصله های نسبتا طولانی بدون استفاده از قطعات متحرک و با استفاده از فرآیندهای تغییر فاز و انتشار بخار هستند. اختلاف چگالی بین بخار و مایع، باعث حرکت بخار به بخش کندانسور می شود. تفاوت دما در دیواره باعث چگالش بخار و آزاد شدن گرمای نهان سیال به منظور بازگشت به بخش اواپراتور چه با استفاده از نیروی جاذبه(لوله های گرمایی ترموسیفون) یا با استفاده از ساختار فتیله ای مویینگی، می شود.

[5] Heat pipe

چگونگی کار لوله‌گرمایی و بخش های مختلف لوله گرمایی را می توان در شکل ۳۱ مشاهده کرد. اساساً یک لوله حرارتی از سه جزء مهم محفظه یا بدنه لوله حرارتی ، سیال عامل و فتیله (ساختار مویین) تشکیل شده است. عملکرد لوله حرارتی به این صورت است که ، حرارت در منطقه اواپراتور به لوله حرارتی وارد شده و بدین وسیله سیال عامل داخل قسمت فتیله ای ، در اثر دریافت گرمای نهان تبخیر، به بخار اشباع تبدیل می شود . بخار اشباع حاصل ، در اثر اختلاف فشار به انتهای دیگر لوله حرارتی یا ناحیه کندانسور منتقل می شود . این منطقه در ناحیه خنک تری قرار داشته و از این رو بخار اشباع ، گرمای نهان تبخیر خود را از دست داده و تقطیر می شود . مایع اشباع حاصل ، از طریق ساختار فتیله ای توسط نیروی مویینگی به قسمت اواپراتور بازگردانده می شود و سیکل مجددا تکرار می شود تا گرما به طور پیوسته از ناحیه گرم به ناحیه سرد منتقل شود. در لوله حرارتی ، نیروی پیشران عبارتست از اختلاف موضعی فشار بخار بین اواپراتور (انتهای گرم لوله) و کندانسور (انتهای سرد لوله). موقعی که به مایع درون اواپراتور گرما داده می شود فشار بخار اصلی افزایش می یابد و سیال اواپراتور در طول وسیله به طرف ناحیهٔ کندانسور که دارای فشار کم بخار است ، حرکت می کنند.

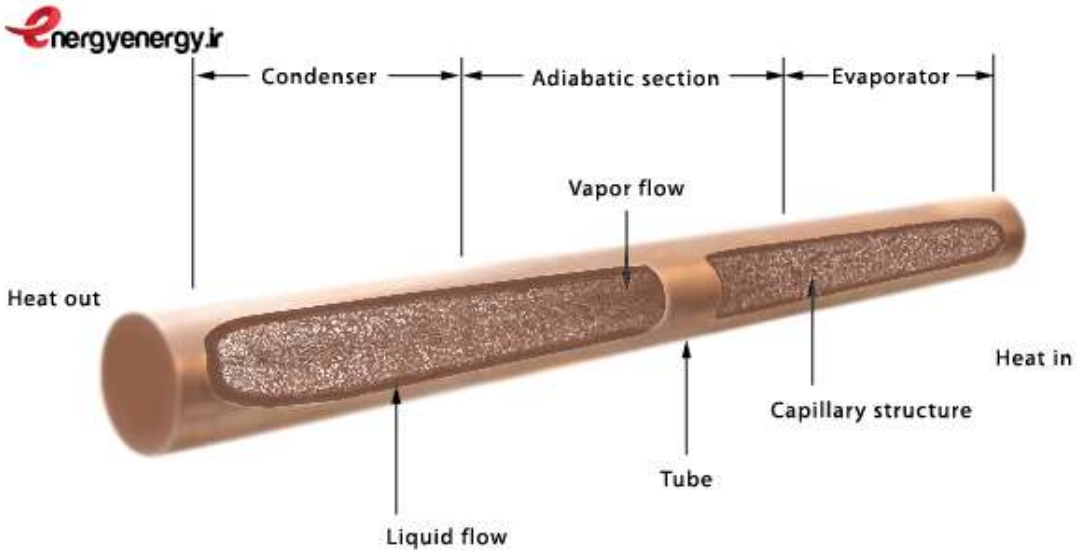
ساختار لوله گرمایی

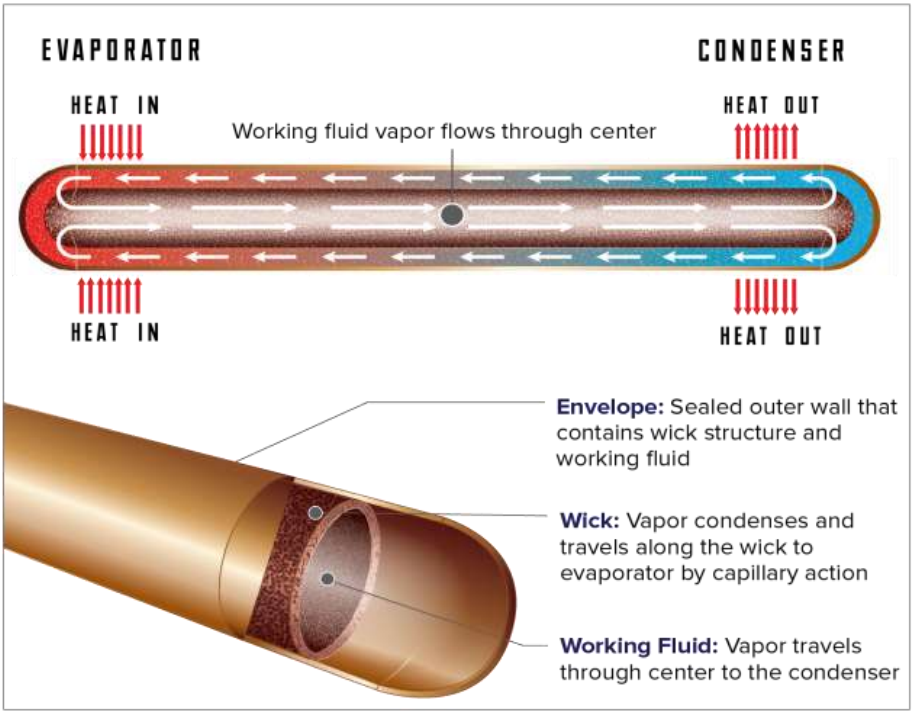
ساختار یک لوله حرارتی از نظر عملی به سه منطقه تقسیم می شود:

الف) تبخیر کننده(اواپراتور) : منطقه تبخیر یا ناحیه اواپراتور که در یک انتهای لوله (چشمه گرمایی) قرار دارد و در این منطقه گرما به محفظه وارد میشود و باعث تبخیر سیال عامل محتوی لوله میشود؛ بنابراین در این بخش گرما دریافت می شود.

ب) قسمت آدیاباتیک(عایق) : ناحیه آدیاباتیک که بین دوناحیه اواپراتور و کندانسور را شامل میشود. در این قسمت از لوله‌گرمایی انتقال حرارتی نداریم.

ج) قسمت چگالنده(کندانسور) : منطقه چگالش یا ناحیه کندانسور که در انتهای دیگر لوله است. این بخش از لوله گرمایی در چاه گرمایی قرار دارد. در این قسمت بخار به مایع تبدیل میشود و گرمای نهان تبخیر آزاد می شود.





شکل ۳۱- بخش های مختلف Heat Pipe و چگونگی کار آن

مزایای لوله‌گرمایی

بطور کلی می توان از خصوصیات و مزایای استفاده از لوله‌گرمایی به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ انتقال حرارت هم دما : افزایش فشار حرارتی تبخیر کننده باعث افزایش نرخ تبخیر سیال عامل داخلی لوله می گردد، بدون اینکه افزایشی در درجه حرارت سیستم ایجاد شود. بنابراین لوله های حرارتی می تواند تقریبا به عنوان یک ابزار هم دما عمل کرده و تنظیم نرخ تبخیر می تواند دامنهٔ گسترده ای از توانهای ورودی را در بر می گیرد در حالیکه درجه حرارت منابع سرد و گرم سیستم ثابت می مانند.
- ✓ آهنگ یا نرخ سریع انتقال حرارت
- ✓ ساختار ساده با هزینه ساخت اندک
- ✓ اتلاف گرمای بسیار پایین
- ✓ سازگار با محیط زیست
- ✓ تعمیرات و نگهداری کم : از آنجا که در این وسیله هیچ قسمت متحرکی وجود ندارد نیاز به نگهداری و تعمیرات زیادی هم نخواهد داشت.
- ✓ قدرت و توان خارجی برای راه اندازی آن لازم نیست ، به جز گرمای لازم در قسمت اواپراتور.

در شکل ۳۲ به طور خلاصه می‌توان عمده ترین مزایای لوله‌های گرمایی را مشاهده کرد.



شکل ۳۲- مزایای استفاده از لوله‌گرمایی

پارامترهای موثر در طراحی لوله‌گرمایی

به طور کلی پارامترهای موثر در عملکرد و طراحی لوله‌گرمایی عبارتند از:

- **خواص سیال عامل مورد استفاده و محدوده دمای عملکردی**

به طور کلی سیال عامل مورد استفاده در عملکرد لوله حرارتی شامل آب، هلیوم، نیتروژن، نقره مایع، آمونیاک، متانول و اتانول برای محدوده دمای عملکردی متوسط و پایین اما برای محدوده دمای عملکردی بالا به طور کلی سدیم، لیتیم، سزیم، پتاسیم و ایندیوم مورد استفاده قرار می گیرد. وجود ناخالصی ها در سیال عامل عملکرد کلی لوله گرمایی را

کاهش می دهد. برای اندازه گیری عملکرد و اثربخشی سیال عامل، از پارامتر عدد مریت (عامل انتقال سیال) به صورت رابطه $M = \frac{\rho_l \sigma_l h_{fg}}{\mu_l}$ استفاده می شود.

- **ماده استفاده شده درمحفظه(بدنه)**

ماده استفاده شده باید هدایت حرارتی بالا و مقاومت حرارتی پایین داشته باشد. مواد باید سازگار با سیال عامل باشند و نباید با آن واکنش نشان می دهد. انتخاب مواد بستگی به انتخاب سیال عامل استفاده می شود و انتخاب سیال عامل نیز به دمای عملیاتی لوله گرمایی بستگی دارد. بیشتر مس به عنوان یک ماده بدنه با هدایت حرارتی بالا (400 w / m ° k)، با آب به عنوان یک سیال عامل استفاده می شود؛ بنابراین مواد بر اساس دمای عملکردی لوله گرمایی انتخاب می شوند. به طور کلی فولاد، مس، آلومینیوم، مواد کامپوزیتی برای دماهای پایین و دمای اتاق مورد استفاده قرار می گیرد، اما برای لوله گرمایی دما بالا مواد مقاوم در برابر حرارت استفاده می شود، و استر برای جلوگیری از خوردگی استفاده می شود. در شکل ۳۳ و شکل ۳۴ به ترتیب سازگاری ماده استفاده شده در بدنه با سیال عامل ها در محدوده دماهای بالا و پایین آورده شده است.

Working fluid	Compatible material	Incompatible material
Mercury	Stainless Steel	Molybdenum, Nickel, Tantalum, Inconel, Titanium
Caesium	Titanium, Niobium, Stainless Steel, Nickel-based super alloys	
Sodium	Stainless Steel, Nickel, Inconel, Niobium	Titanium
Lithium	Tungsten, Tantalum, Molybdenum, Niobium	Stainless Steel, Nickel, Inconel, Titanium
Silver	Tungsten, Tantalum	Rhenium

شکل ۳۳- سازگاری مواد مورد استفاده با سیال های عامل برای محدوده دماهای بالا

	Fluid	Casing Materials Compatibility					
		Metals				Elastomers	Polymers
		Aluminium	Copper	Stainless Steel	Ferritic Steels	Silicon	PTFE, PCTFE, PVDF, PA, PP
Cryogenic Applications	Helium (He)	✓	✓	✓	✓	✓	PCTFE, PVDF, PA
	Hydrogen (H)	✓	✓	✓	✓		✓
	Neon (Ne)	✓	✓	✓	✓		
	Nitrogen (N_2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Argon (Ar)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Oxygen (O_2)	✓	✓	✓	corrosive in presence of moisture	✓	✓
	Methane (CH_4)	✓	✓	✓	✓		PTFE, PVDF
	Krypton (Kr)	✓	✓	✓	✓		
	Carbontetrafluoride (CF_4)	✓	✓	✓	✓		
	Xenon (Xe)	✓	✓	✓	✓		
	Ethane (C_2H_6)	✓	✓	✓	✓		PTFE, PVDF
Low Temperature Applications	Freon R22			✓			PTFE
	Freon R410a			✓			
	Propane (C_3H_8)	✓	✓	✓	✓		✓
	Ammonia (NH_3)	✓	corrosive in presence of moisture	✓	✓	✓	✓
	Freon R134a			✓			
	Freon R21	✓	✓	✓	✓		PTFE, PVDF
	Freon R11	✓		✓	✓		PTFE
	Pentane (C_5H_{12})	acceptable					✓
	Freon R113		✓	✓	✓		PTFE, PVDF
	Acetone (C_3H_6O)	acceptable	✓	✓	✓		PTFE
	Methanol (CH_3OH)		✓	✓	✓	✓	✓
	Ethanol (C_2H_6O)	acceptable	acceptable	✓	acceptable	acceptable	
	Heptane (C_7H_{16})	✓	✓	✓	✓		PTFE, PVDF
	Toluene (C_6H_5-CH_3)	✓	✓	✓	✓		✓

شکل ۳٤- سازگاری مواد مورد استفاده با سیال های عامل برای محدوده دماهای پایین

- **نوع ساختار فتیله**

ساختارهای فتیله مورد استفاده در لوله گرمایی، شیار محوری، اسکرین مش و فتیله پودر متخلخل است در حقیقت فتیله برای بازگرداندن سیال عامل به اواپراتور لوله گرمایی بدون کمک جاذبه، مورد استفاده قرار می گیرد. اختلاف فشار مویینگی مسئولیت اعمال یک نیروی محرک برای بازگشت سیال عامل به بخش اواپراتور است. در لوله گرمایی ترموسیفون فتیله شیار محوری استفاده می شود که دارای مقاومت حرارتی کم می باشد، اما هنگامی که جریان مایع در برابر گرانش است، از فلز متخلخل به طور موثر برای انتقال مایع بدون هیچ گونه مشکلی استفاده می شود.

- **ابعاد لوله گرمایی**

رسانایی گرمایی در طول لوله حرارتی متفاوت است. برای طول بسیار طولانی، هدایت حرارتی گرما به حداکثر می رسد (۱۰۰۰۰۰ w / m ° k) در مقایسه با مواد با رسانش گرمایی بالا مانند مس (۴۰۰ w / m ° k). هدایت حرارتی لوله گرمایی به طور مستقیم مربوط به طول لوله گرمایی است. ضخامت لوله حرارتی موجب مقاومت حرارتی می شود،

پس باید به اندازه کافی به منظور انتقال حرارت موثر، مناسب باشد. به عنوان مثال اگر طول کل لوله حرارت ۱۰۰۰ میلی متر باشد، برای این طول لوله، ضخامت لوله گرمایی از ۲ میلی متر نباید تجاوز کند.

- **دمای چشمه و چاه**

لوله گرمایی استاندارد یک دستگاه هدایت ثابت است که در آن دمای عملکردی توسط دماهای چشمه و چاه می شود. که کاهش دما به صورت خطی رخ می دهد. در کاربرد لوله گرمایی استاندارد در صنایع ماهواره ای و بالون های پژوهشی و یا الکترونیک با کاهش دمای چاه در میزان انتقال حرارت کم، لوله گرمایی در محدوده دماهای خیلی پایین قرار می گیرد، زمانی که دمای چاه یا میزان انتقال حرارت تغییر می یابد، لوله گرمایی گرمایی به حالت رسانش متغیر تبدیل می شود که برای نگه‌داشتن دمای ابزار الکترونیکی که سرد شده اند مورد استفاده قرار می گیرد.

- **میزان گرمای ورودی در بخش اواپراتور**

میزان گرمای ورودی بالا در بخش اواپراتور موجب افزایش محدودیت های صوتی، روند فرآیند و جوش می شود. در این حالت به دلیل میزان انتقال حرارت ثابت و گرادیان دمای بیش از حد، بخار با سرعت صوتی از بخش اواپراتور حرکت می کند. در هنگام راه اندازی در دمای پایین و انتقال حرارت بالا نیز ی مشکل ایجاد می شود. بنابراین دما و میزان انتقال حرارت در اواپراتور به یکدیگر وابسته است.

- **جهت گیری لوله‌گرمایی**

اگر لوله گرمایی در یک صفحه عمودی عمل کند، باید کندانسور بالاتر از تبخیر کننده باشد تا به کمک جاذبه بتواند دوباره سیال عامل را به اواپراتور باز گرداند، در غیر این صورت در برابر لوله گرمایی جریان گرانش، نیروی مویرگی باید برای کار در برابر جاذبه به اندازه کافی باشد. به جز ترموسیفون ها، فتیله برای همه انواع لوله های گرمایی ضروری است. نوع فتیله باید به گونه ای باشد که فشار پمپاژ مویرگی بیشتری نسبت به اختلاف فشار بخار بین اواپراتور و کندانسور ایجاد شود.

شرکت‌های سازنده

همچنین در این مطالعات، شرکتهای مطرح دنیا (جدول ۱) و محصولات آن مورد مطالعه قرار گرفت. لوله گرمایی اغلب به عنوان یک مبدل حرارتی برای خنک‌کاری CPU یا GPU مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳۵). لازم به ذکر است که در ایران هیچ شرکتی این محصولات را تولید نمی‌کند. این محصولات با توجه به پیچیدگی‌های طراحی و ساخت جزو محصولات دانش‌بینان با فناوری بالا محسوب می‌شود.

جدول ۱ - شرکت‌های تولیدکننده محصولات لوله‌گرمایی

corporation name	country	products
Furukawa	Japan	mico heat pipe
Aavid - Boyd	US	heat pipe/ heat pipe assemblies/ vapor chamber / thermosiphon /immesion cooling boiler plate
Fujikura	Japan	heat pipe/ heat pipe assemblies/ vapor chamber
Cooler Master	Taiwan	CPU cooler
AVC (Asia Vital Components)	Taiwan	CPU cooler
Auras	Taiwan	heat pipe / heat sink
CCI	Taiwan	heat pipe / heat pipe assembly / vapor chamber
Forcecon Tech	Taiwan / China	tin & ultra-tin heat pipe/ cpu cooler / heat pipe assembly / vapor chamber
Wakefield Vette	US	heat pipes/ heat pipe bending tools / vapor chamber / CPU cooler
Thermacore	US	heat pipe/ heat pipe assemblies
Innergy Tech	Canada	HVAC: heat recovery / dehumidification
SPC	UK	HVAC: heat recovery / dehumidification
HPT	US	HVAC: heat recovery / dehumidification
Dau	Austria	heat pipe/ heat pipe assemblies
Taisol	Taiwan	heat pipe/ vapor chamber
Colmac Coil	US	HVAC: heat recovery / dehumidification
ACT	US	HVAC, heat pipe assemblies (electronic), vapor chamber, cabinet cooling
Noren	US	cabinet cooler / heat pipe assemblies
guangdong new ideas technology	China	micro heat pipe/ conventional heat pipe / vapor chamber
Novark	Taiwan	heat pipe / vapor chamber
Deepcool	China	heat pipe assemblies
Wtl-heatpipe	China	ANY HEAT PIPE ASSEMBLIES!!
Harbin DawnHappy Heat Pipe	China	Any heat pipe applications!! From electronic cooling to industrial heat recovery
Celsia	US / Taiwan	

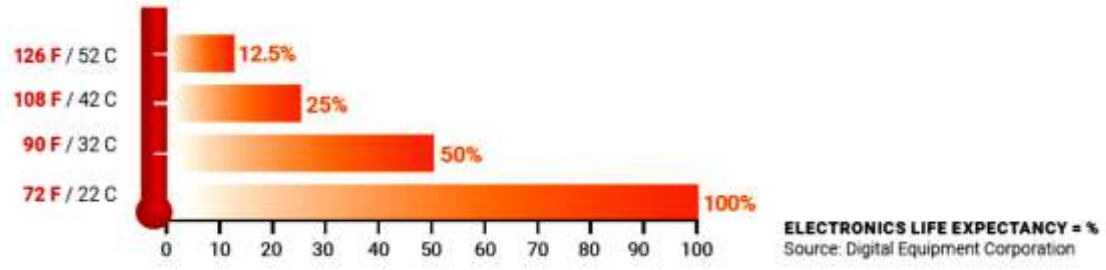


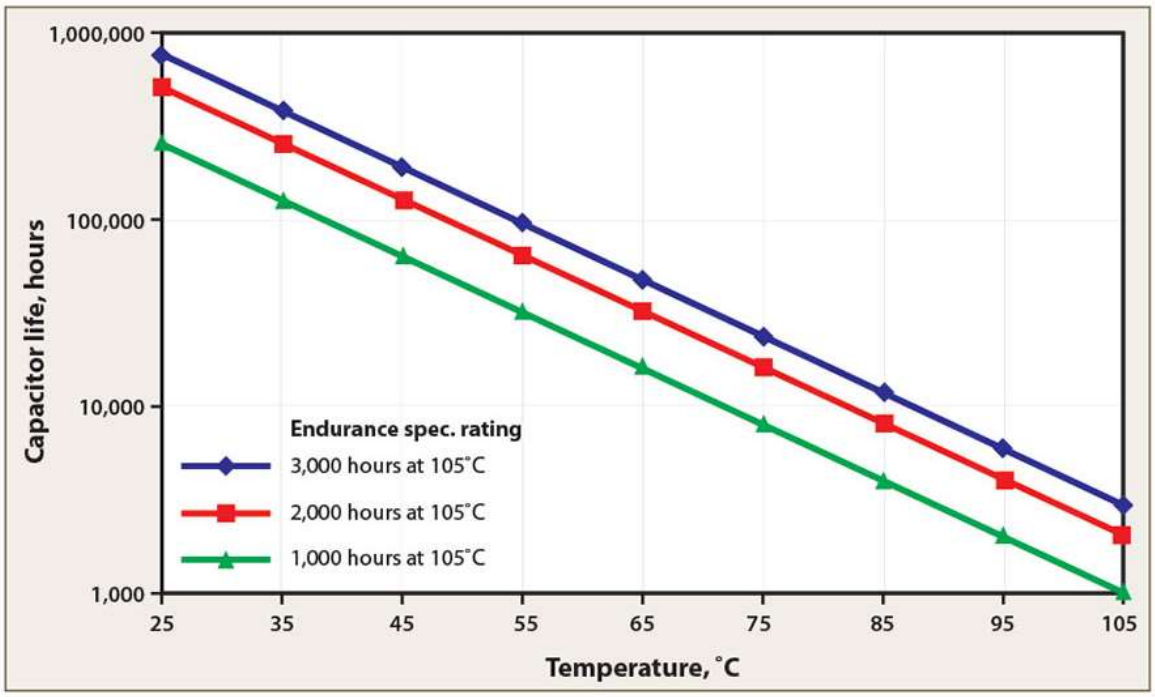
شکل ۳۵- خنک‌کننده CPU مبتنی بر فناوری لوله‌گرمایی

۱۰- کولر تابلو برق

مقدمه

یکی از چالش‌های صنعت به ویژه در حوزه تجهیزات الکتریکی مساله کنترل دما و خنک‌کاری است. چنانچه ادوات الکتریکی در دمایی بالاتر از دمای بهینه کار کنند عمر آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۳۶).





شکل ۳۶- کاهش عمر قطعات الکترونیکی با افزایش دما

بسیاری از تجهیزات و ادوات برقی اعم از تجهیزات قدرت و کنترل درون تابلوهایی موسوم به تابلو برق / تابلو کنترل قرار گرفته‌اند. با توجه به بسته بودن فضای داخل تابلو، دفع حرارت تولید شده درون تابلو ضروری است. این مساله در مناطق گرمسیر بسیار حاد بوده و در صورتی که یک سیستم سرمایشی مناسب وجود نداشته باشد احتمال سوختن ادوات و حتی آتش‌سوزی در تابلو بسیار بالا خواهد بود. به همین دلیل کولرهای تابلو برق در صنعت بسیار پرکاربرد هستند.

بخشی از فعالیت‌های دوره فرصت مطالعاتی متمرکز بر هدایت تیم مطالعات، طراحی و ساخت این نوع کولر گازی بوده است.

بررسی محصولات موجود

قبل از طراحی کولر گازی تابلو برق، محصولات موجود از برندهای معتبر دنیا مورد بررسی قرار گرفت. شاید بتوان گفت معروف‌ترین و با کیفیت‌ترین برند موجود در بازار جهانی محصولات شرکت Rittal است. شرکت آلمانی ریتال یکی از بزرگترین شرکت‌های سازنده ادوات تابلوهای برق است. همچنین این شرکت انواع کولرهای تابلو برق را تولید می‌کند. جدیدترین نوع کولر تابلویی تولید شده در این شرکت سری Blue e+ است (شکل ۳۷) که طبق ادعای این شرکت تا ۷۵٪ کاهش مصرف انرژی را به همراه داشته است.



شکل ۳۷- کولر ریتال سری Blue e+

مهندسی معکوس

به منظور کاهش ریسک طراحی در نمونه اولیه، اقداماتی در جهت مهندسی معکوس یک نمونه کولر تابلو از برند امریکایی / مکزیکی McLean انجام شد (شکل ۳۸). در فرآیند مهندسی معکوس صرفا می‌توان از کلیات مربوط به هندسه و ابعاد و بعضی از ادوات برقی و سنسورها داده‌برداری کرد و امکان داده‌برداری از شرایط عملکردی سیکل، حجم و کیفیت مبرد وجود ندارد.



شکل ۳۸- کولر McLean باز شده جهت مهندسی معکوس

طراحی

محاسبات طراحی سیکل کولر گازی تابلو برق به کمک نرم‌افزارهای USA coil و نرم‌افزارهای آنلاین شرکتهای سازنده کمپرسور انجام شده است. نتایج محاسبات طراحی و همچنین نقشه‌ها جزو اسناد داخلی شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات بوده و در این گزارش قابل انتشار نیست.

برای طراحی کولر گازی پارامترهای مختلفی مانند دمای محیط، توان برودت، سازوکار کنترل، ابعاد و میزان فشردگی، سیال مبرد و... باید مد نظر باشد. بر اساس بار برودتی مورد نیاز، کمپرسور انتخاب شده و به تناسب ظرفیت کمپرسور، محاسبات مربوط به تعیین ابعاد و هندسه[6] کویل اواپراتور و کویل کندانسور انجام می‌شود. همچنین اجزایی مثل فیلتر درایر، لوله مویی (یا شیر انبساط) به تناسب کمپرسور انتخاب می‌شوند.

[6] sizing

نمونه سازی

در نمونه اولیه، یک کولر با ظرفیت برودتی حدودی ۱,۵ کیلووات مد نظر است. اجزایی مانند کمپرسور، فن‌ها، ترموستات و اجزای الکتریکی خریداری می‌شوند. کویل‌های اواپراتور که دارای لوله‌های مسی و فین‌های آلومینیومی هستند، با فرآیند انبساط[۷] لوله مسی درون فین ساخته می‌شوند. همچنین بدنه کولر با فرآیند برش و لیزر ورق، جوشکاری و رنگ کوره ساخته می‌شود. پس از اینکه تمام اجزاء آماده شد، فرآیند مونتاژ و شارژ گاز انجام خواهد شد. در حال حاضر فرآیند ساخت نمونه شروع شده و پیش‌بینی می‌شود نمونه اولیه طی یک ماه آینده آماده تست شود.

[7] expansion

۱۱- جمع بندی

تعامل با واحدهای صنعتی

اگرچه دوره فرصت مطالعاتی در شرکت بهینه‌سازان صنعت تاسیسات بوده است، لکن در این دوره به طرق مختلف فرصت تعامل با مجموعه‌های مختلف صنعتی دیگر ایجاد شد. این تعاملات در قالب بازدید، همکاری بر روی محصول مشترک و یا تبادل داده‌های مهندسی بوده است. توضیحات تکمیلی در خصوص این واحدهای صنعتی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ - تعاملات صنعتی

نام واحد صنعتی	محل	حوزه فعالیت	نوع تعامل
ژوپن گاز	اصفهان	تولید فن مشعل و تجهیزات گرمایشی	• ساخت ریکوپراتور کوره دوار • استعلام مشخصات فنی فن
چند واحد لعاب‌سازی	یزد	تولید لعاب مورد استفاده در صنعت کاشی و سرامیک	• داده برداری • رایزنی های فنی و اقتصادی نصب و اجرای ریکوپراتور
یک کارخانه کاشی و سرامیک	یزد	تولید کاشی و سرامیک	• بازدید از کوره و بررسی امکان بازیافت حرارت و کاهش مصرف انرژی
شیشه مینا	تهران	تولید شیشه و بطری و جار	• ارائه پروپوزال طراحی و ساخت ریکوپراتور • بازدید و داده برداری از کوره ها
پالایشگاه دهم فاز ۱۹ پارس جنوبی	بوشهر	پالایش گاز	• مناقصه مبدل حرارتی (تبادل داده‌های فنی)
ایرانول	تهران	پالایشگاه روغن	• مناقصه مبدل حرارتی(تبادل داده‌های فنی)
پاکمن	اصفهان	دیگ بخار و تجهیزات گرمایشی	• خنک‌کاری تجهیزات الکتریکی
سیمان هگمتانه	همدان	تولید سیمان	• امکان‌سنجی بازیافت حرارت اتلافی (WHR)
شاتل	تهران	IT	• تبادل داده‌های فنی در زمینه خنک‌کاری دیتاسنتر

نکات پایانی

دوره فرصت مطالعاتی تجربه ارزشمندی برای اعضای هیات علمی دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها است زیرا فرصتی برای رصد نیازهای واقعی صنعتی و یافتن سوالاتی است که هر یک می‌تواند سرفصلی برای یک مجموعه طرح‌های پژوهشی در کشور باشد. دوره فرصت مطالعاتی صنعتی یک پروژه نیست که دستاوردهای مشخص و در قالب‌های مرسوم داشته باشد؛ دستاوردهای این دوره از جنس ارتقاء و بهبود زاویه دید نسبت به مسائل صنعت است. طراحی یک محصول صنعتی، بررسی نتایج تست عملکرد محصول، تعامل با نیروی انسانی در سطوح مختلف، کار با اسناد مناقصات، چالش بین شرکتهای خصوصی و نهادهای دولتی، مشاهده تاثیر مشکلات اقتصادی یک صنعت بر اولویت‌بندی مسائل و... همگی مقولاتی هستند که پیچیدگی‌های خاص خود را داشته و درک این پیچیدگی‌ها خارج از فضای پژوهشی آکادمیک و با حضور در صنعت میسر خواهد شد. بدون درک صحیح از این مسائل نمی‌توان انتظار ارتباط سازنده و موثر بین پژوهشگران و صنعت، و تعریف صحیح و راهبری پروژه‌های پژوهشی مورد نیاز صنعت را داشت.