ممیزی مصرف انرژی در صنعت سیمان

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱-۱. سیستم بازیافت حرارت در کارخانه های سیمان ۶
۱-۲. تجربیات اجراء شده سیستم بازیافت حرارت در کارخانه های سیمان در سراسر دنیا ۶
۱-۳. تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با مبدل THERMOWIR ۹
۱-۳-۱. محاسبه توان تولیدی سیستم پیشنهادی برای کارخانه سیمان ممیزی شده براساس نتایج اندازه گیری ۱۱
۱-۴. تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش بویلر بازیافت ۱۲
۱-۴-۱. مقدار انرژی الکتریکی قابل استحصال براساس نتایج اندازه گیری در کارخانه سیمان ممیزی شده ۱۵
۱-۵. تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش ORC ۲۰
۱-۵-۱. مقدار انرژی الکتریکی قابل استحصال براساس نتایج اندازه گیری کارخانه سیمان ممیزی شده ۲۱
۱-۶. تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش سیکل کالینا ۲۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱. میزان انرژی الکتریکی حاصل از بازیافت حرارت ازخنک کن و پیش گرمکن کارخانجات سیمان هندوستان ۸
جدول۱-۲. مشخصات تعدادی از کوره های کارخانه های سیمان ژاپن که مجهز به سیستم بازیافت حرارتی می باشند ۸
جدول۱-۳. مشخصات انرژیهای قابل بازیافت در کارخانه سیمان ممیزی شده ۱۱
جدول۱-۴. پتانسیل تولید انرژی الکتریکی از بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان با ظرفیت‌های مختلف ۱۳
جدول۱-۵. فرضیات اولیه برای طراحی سیستم بازیافت حرارت در صنعت سیمان ۱۵
جدول۱-۶. مشخصات انرژیهای قابل بازیافت کارخانه سیمان ممیزی شده ۱۶
جدول۱-۷. مقایسه ای بین سه روش تولید برق با استفاده از بازیافت حرارت در صنعت سیمان ۲۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱. اساس کار THERMOWIR ۱۰
شکل ۱-۲. نمونه ای از محدوده شرایط ترمودینامیکی سیستم تولید برق با THERMOWIR ۱۰
شکل ۱-۳. شماتیک فرایند تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم بازیافت حرارت ۱۴
شکل ۱-۴. شمایی از پروفایل دما در نقاط مختلف یک بویلر بازیافت حرارت ۱۵
شکل ۱-۵. دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک حاصل از احتراق ۱۶
شکل ۱-۶. نمایش گرافیکی نتایج شبیه سازی بازیافت انرژی گازهای داغ خروجی در کارخانه سیمان ممیزی شده با نرم افزار ترموفلو با مشعل کمکی ۱۸
شکل ۱-۷. نمایش نتایج شبیه سازی بازیافت انرژی گازهای داغ خروجی در کارخانه سیمان ممیزی شده با نرم افزار ترموفلو بدون مشعل کمکی ۱۹
شکل ۱-۸. نمونه هایی از شماتیک فرایند ORC ۲۰
شکل ۱-۹. شماتیک فرایند تولید برق با روش سیکل کالینا ۲۳

چکیده

گزارش حاضر به بررسی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم بازیافت حرارت در یک کارخانه سیمان ممیزی شده براساس نتایج اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در آن کارخانه اختصاص دارد. برای انحام محاسبات علاوه بر محاسبات دستی از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Thermoflow نیز استفاده شده است.

۱- سیستم بازیافت حرارت در کارخانه های سیمان

امروزه در کوره های مدرن تولید سیمان حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد حرارت ایجاد شده همراه گازهای خروجی از دستگاههای پیش گرم کن و توسط کلینکر داغ در دستگاههای سردکننده کلینکر به خارج راه می یابد وتلف می شود. دمای گاز های خروجی ازپیش گرم کن ها بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و دمای گازهای خروجی از سرد کننده های کلینکر بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد است که حرارت قابل توجهی به همراه دارد. علاوه بر اتلاف حرارت فوق مقادیر قابل توجهی گاز CO_2 در اثر سوخت مواد قابل احتراق ایجاد می گردد که بدون آنکه هیچ گونه بهره دهی داشته باشد باعث آلودگی محیط زیست می شود.

گازهای خروجی از پیش گرم کن ها و سرد کننده ها، منابع سوختی را از بین می برندو گازهای گلخانه ای زیادی به اتمسفر انتقال می دهند بدون آنکه هیچ کار مفیدی در کارخانه سیمان صورت گرفته باشد. به منظور جلوگیری از این ضایعات دستگاههای بازیافت حرارت درکارخانه های سیمان تعبیه می شوند[۱]. بازیافت حرارت از جریانهای گرم خروجی به طرق مختلفی انجام می‌شود. افزایش حرارت جریانهای ورودی(پیش گرم کردن سوخت ورودی)، افزایش دمای محیط فرایند و تولید انرژی الکتریکی از انرژی بازیافتی، طرق اصلی بکارگیری انرژی بازیافتی می‌باشند که با توجه به کیفیت و کمیت جریان گرم خروجی، یکی از این مسیرها جهت بازیافت حرارت استفاده می‌شود. کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی مزیت مستقیم و کاهش آلودگیهای زیست محیطی، اندازه تجهیزات و مصرف انرژی تجهیزات جانبی همگی از مزایای غیر مستقیم بازیافت حرارت از جریانهای خروجی می‌باشد. "کیفیت حرارت" در کنار کمیت انرژی موجود در جریان خروجی یکی از متغیرهای اصلی تأثیر گذار روی میزان توجیه‌پذیری اقتصادی طرح‌های بازیافت حرارت می‌باشد.

بازیافت حرارت از گازهای گرم خروجی از فرایند پخت و کولر دو منبع اصلی تأمین حرارت سیستم بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان می‌باشد. در حالی که میزان مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی برای تولید هر کیلوگرم کلینگر، ۸۰ کیلووات ساعت و ۷۰۶ کیلوکالری در دنیا است این میزان در سال ۷۹ در ایران به ترتیب برابر با ۱۱۵ کیلووات ساعت و ۸۰۰ کیلوکالری برای تولید هر کیلوگرم کلینگر بوده است.

۲- تجربیات اجراء شده سیستم بازیافت حرارت در کارخانه های سیمان در سراسر دنیا

در اواخر سال ۱۹۷۰ همزمان با بحران انرژی در اروپا و ژاپن تحقیقاتی در جهت استفاده از حرارت گازهای خروجی از پیش گرمکن و گریت کولر انجام گردید[۲]. بررسی ها نشان داد که بهترین روش، تبدیل انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی می باشد. طی فرآیند تولید کلینکر به روش خشک تبادل حرارتی بین گازهای خروجی و مواد خام وارد شونده به پیش گرمکن انجام می شود. گازهای خروجی از پیش گرمکن با دمای ۳۰۰-۴۰۰°C (مقدار این دما بستگی به تعداد دفعات پیش گرمکن دارد) قبل از وارد شدن به اتمسفر از برج خنک کن عبور کرده و به هدر می رود و فقط قسمتی از حرارت گاز های خروجی صرف خشک کردن مواد موجود در آسیای مواد

می شود. بعلاوه گازهای خروجی از گریت کولر نیز با حرارت حدود C ۲۵۰ مستقیماً وارد اتمسفر می شود که می توان از این حرارت تولید انرژی الکتریکی نمود[۳].

بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان یکی از روشهای متداول جهت افزایش بازده انرژی مصرفی است. ژاپن، پیشتاز در بازیافت انرژی برق است. ژاپنی ها ۳درصد از سیمان دنیا را تولید می کنند. آنها در سال ۲۰۰۵، ۶۶ میلیون تن سیمان تولید کردند و چهارمین تولیدکننده این کالای معدنی محسوب شدند. کشور ژاپن در بازیافت انرژی الکتریکی که به وسیله حرارت حاصل از گازهای خروجی سیستم پخت از کوره ها به دست می آید، پیشتاز هستند اما با این اوصاف ۲۰ تا ۴۰ درصد از قیمت تمام شده سیمان در ژاپن را هزینه انرژی تشکیل می دهد. ژاپنی ها نیز مانند چینی ها توانسته اند به وسیله بازیافت انرژی حرارتی ۳۰درصد از انرژی مورد نیاز کارخانجات سیمان را فراهم کنند[۴].

با استفاده از ژنراتورهای جانبی، کارخانجات سیمان قادرند تقریباً ۳۰٪ مجموع انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را تولید نمایند[۵]. این روش با توجه به اینکه قادر به کاهش انتشار گازهای SO_2 ، NO_x و CO_2 است از اهمیت خاصی برخوردار می باشد[۳]. در کشور چین ۲۴ واحد تولید سیمان با ظرفیت تولید بالای ۲۰۰۰ تن در روز از این روش استفاده می کنند. و حدوداً *KWh/ton clinker* ۳۶-۲۲ از کل انرژی مورد نیاز برای تولیدشان را از این طریق بدست می آورند[۴]. بعنوان مثال کارخانه ای واقع در چین دارای ۲ خط تولید ۲۵۰۰ تنی می باشد که در سال معادل ۲۰۰۰۰۰۰ تن سیمان تولید دارد و با استفاده از این سیستم بازیافت حرارت، ۵۴/۱۹۱ تن در سال از انتشار CO_2 می کاهد[۶].

همچنین در کارخانه تایشان واقع در چین دارای ۲ خط تولید با ظرفیتهای معادل ۲۵۰۰ تن (تأسیس شده در june2003) و ۵۰۰۰ تنی (تأسیس شده در November2004)، با استفاده از سیستم بازیافت حرارتی، در سال ۱۰۷/۱۱۶ تن از انتشار CO_2 می کاهد[۷]. از بین کارخانه های سیمان کشور هندوستان ۶۴ کارخانه از این سیستم استفاده می کنند که جمعاً MW ۲۱۰ انرژی الکتریکی تولید می نماید[۳].

بررسی نتایج حاصل از ۲۰ کارخانه سیمان هندوستان توسط NCB نشان داد که پتانسیل بازیافت حرارتی بسته به نوع پیش گرمکن و گریت کولر و تعداد طبقات پیش گرمکن حدوداً معادل *MW* ۵/۵-۳ می باشد[۴]. که سالانه سودی معادل ۲۰۰۰ میلیون روپیه به دنبال خواهد داشت. همچنین از میزان انتشار گاز دی اکسید کربن۱/۶۵ میلیون تن در سال کاسته می شود در جدول ۱مشخصات کارخانجات هندوستان که دارای سیستم بازیافت حرارت می باشند آورده شده است. در کارخانه های سیمان ژاپن ۳۳ واحد بازیافت حرارتی تأسیس شده است که مجموعاً حدود *MW* ۲۰۰ انرژی الکتریکی بدین روش تولید می شود[۳]. در جدول ۲جدول ۲ مشخصات تعدادی از کارخانجات سیمان ژاپن با سیستم بازیافت حرارت به همراه مقدار تولید انرژی الکتریکی آنها آورده شده است[۳].

جدول ۱. میزان انرژی الکتریکی حاصل از بازیافت حرارت ازخنک کن و پیش گرمکن کارخانجات سیمان هندوستان

PLANT CAPACITY	PH EXIT FLOW (Nm^3/hr) X 1000	GAS TEMP (°C)	COOLER FLOW (Nm^3/hr) X 1000	EXIT GAS TEMP (°C)	COGEN POTEN MW
A 3000, 4ST*	۱۸۶	۴۱۵	۲۵۸	۲۵۰	۴/۶
4500,5ST	۳۵۰	۳۲۰	۲۵۰	۲۵۰	۵/۵
B 3300,4ST	۲۸۹	۳۶۰	۱۲۹	۲۳۰	۴/۵
C 3000,4ST*	۱۹۴	۳۵۰	۲۲۷	۲۲۰	۳/۰
D 3300,6ST	۱۸۸	۲۹۵	۲۳۳	۲۴۵	۳/۲
E 3300,6ST	۲۳۴	۳۰۰	۱۶۵	۲۵۰	۳/۲
F 2x2800,6ST	۱۷۰	۳۰۰	۱۳۰	۲۵۰	۴/۴
G 2x1700,5ST	۱۵۷	۳۲۰	۱۲۰	۲۵۰	۴/۲
H 3300,4ST*	۲۰۰	۳۹۰	۱۵۴	۲۹۰	۴/۲
I 2250,5ST	۱۴۸	۳۷۸	۱۴۹	۲۶۰	۳/۲
J 2500,4ST	۱۷۲	۳۶۵	۱۲۰	۲۲۰	۳/۰
K 2225,5ST	۸۸	۳۰۰	۱۴۲	۲۲۰	۳/۴
L 2225,5ST	۸۸	۳۰۰	۱۴۲	۲۲۰	
M 3250,6ST	۲۲۵	۲۹۵	۲۴۰	۲۳۰	۳/۵
N 3000,4ST	۲۱۰	۳۶۰	۱۸۰	۲۲۰	۳/۷
O 3700,4ST	۱۵۱	۲۸۰	۲۲۳	۲۲۰	۳/۲
P 2000,5ST	۱۸۳	۳۳۰	۲۱۰	۲۴۰	۳/۴

کارخانه های که با علامت *مشخص شده اند مجهز به پیش گرمکن هستند و بقیه کارخانه دارای کلساینر هستند.

ST : تعداد طبقات پیش گرمکن

Suspension preheater: SP

جدول ۲. مشخصات تعدادی از کوره های کارخانه های سیمان ژاپن که مجهز به سیستم بازیافت حرارتی می باشند

نام کارخانه	تناژ تولیدی(تن/روز)	منبع حرارتی	انرژی الکتریکی تولید شده(KW)
Gifu	۵۷۰۰	AQC	۲۶۴۰
Hachinohe	۴۴۰۰	AQC	۲۲۰۰
Ako	۴۹۰۰	PH/AQC	۱۰۰۰۰
Ako	۷۲۰۰	AQC	۱۰۳۰۰
Kumagaya	۱۲۰۰۰	PH/AQC	۱۵۰۰۰
Kawara	۱۰۳۰۰	PH/AQC	۱۶۲۰۰
Kyushu	۲۱۳۰۰	PH/AQC	۲۲۰۰۰
Omi	۸۷۰۰	PH/AQC	۱۱۰۰۰
Tagawa	۷۰۰۰	PH/AQC	۹۰۰۰
Aomori	۴۵۰۰	PH/AQC	۷۳۰۰
Nanyo	۱۰۰۰۰	PH/AQC	۹۰۰۰
Toso	۷۰۰۰	PH/AQC	۸۲۰۰
Tsukumi	۱۳۷۰۰	PH/AQC	۱۸۰۰۰
Itoigawa	۷۹۰۰	PH/AQC	۸۹۰۰
Chichibu	۴۹۰۰	PH/AQC	۸۰۰۰
Ofunato	۱۱۰۰۰	PH/AQC	۱۷۶۰۰
Kochi	۷۷۰۰	PH/AQC	۸۹۰۰
Fujiwarta	۸۳۰۰	PH/AQC	۱۲۰۰۰
Hachinohe	۱۲۰۰۰	AQC	۱۰۰۰
Hitachi	۴۰۰۰	PH	۱۵۰۰
Nanyo	۲۰۰۰	PH/AQC	۱۳۰۰۰

PH : پیش گرمکن

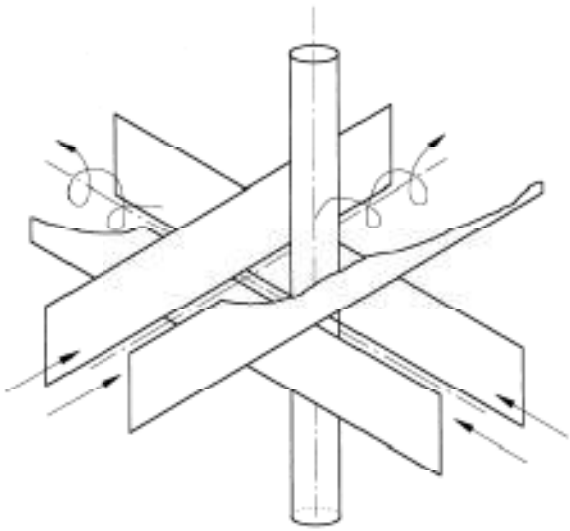
AQC : خنک کن گریت

۳- تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با مبدل THERMOWIR

THERMOWIR مبدل جدیدی با تعداد بسیار زیادی کانال می باشد. حلقه هایی در داخل THERMOWIR ایجاد شده و ذرات معلق به طرف دیواره های THERMOWIR پرتاب می شوند. بدین معنی که مرکز کانالها، جائیکه لوله های هدایت گرما قرار دارند، عاری از غبار نگهداشته می شوند[۸].

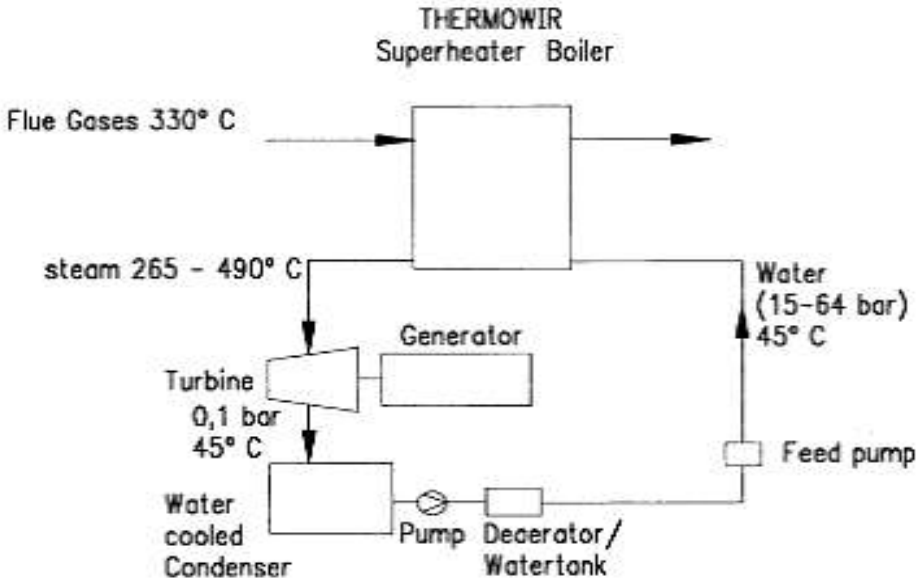
کارخانه های سیمان هزینه سنگینی از انرژی را توسط خروج گازها از دودکش تحمل می کنند. این گازها با درجه حرارت هایی بین ۲۵۰ تا۴۵۰ درجه سانتیگراد که شامل مقادیر قابل توجهی گرد و خاک بوده و در یک برج خنک کن قبل از هدایت گازها به سمت فیلتر، دمای آن پایین می آید. مقدار آب لازم جهت تهویه گازها در یک کارخانه ی سیمان به طور متوسط، ممکن است به T/h ۴۰ برسد. کمبود انرژی الکتریکی در بسیاری از قسمتهای دنیا، به ویژه در کشورهای در حال توسعه بازیافت حرارت را از گازهای دود کش جهت تولید این نوع انرژی ایجاد می نماید.

به کار گیری مبدلهای حرارتی معمولی برای بازیافت حرارت به طور مثال از گازها در صنعت سیمان بازدهی بسیار پایینی را با وجود بار گرد و خاک سنگین از خود نشان می دهند، غلظت گرد و غبار بالا در گازهای دودکش همچنین ممکن است به کار افتادن و نقص سیستم بینجامد. مبدل حرارتی THERMOWIR بطور مخصوصی توسعه یافته که حرارت اتلافی موجود در گازهای دودکش را با گرد و غبار زیادی که دارد بازیافت نماید و شامل ورقه های موازی که در یک زاویه مخصوص نسبت به جریان گاز مستقرند، می باشد. جریان گاز به جریانهای باریکی که هر کدام از روی هم در واحد MULTIWIR عبور می کند تقسیم می گردد. نیروی جنبشی حاصل از تغییر جهت نسبت به جهت اصلی در نتیجه انتقال دو جانبه، یک حرکت چرخشی در سیستم بوجود می آورد. ذرات جامد توسط نیروهای گریز از مرکز کانال به دیواره های THERMOWIR پرتاب می شوند(شکل ۱)[۹]. لوله انتقال حرارت دقیقاً در میان کانال قرار گرفته و به همین علت عاری از گرد و غبار باقی می ماند. گرد و غبار در دیواره ها و گوشه های کانال جمع شده و در فواصل زمانی مشخصی از گوشه های کانال پاک می گردد. لازم به ذکر است، ایجاد حرکت چرخشی در دود علاوه بر حذف گرد و غبار در مرکز کانال موجب بالا رفتن ضریب انتقال حرارت در مبدل نیز می گردد.



اساس کار THERMOWIR

THERMOWIR ترکیبی از staggered packing , Multicyclone می باشد. تعداد جریانهای بوجود آمده در عمل بسیار زیاد (چندین هزار) است. این جریانها هم چنین ضریب انتقال حرارت را نسبت به مقدار گاز مصرفی افزایش می دهد[۱۰]. بخار می تواند داخل لوله های THERMOWIR که از حرارت گازهای دودکش استفاده می کنند، تولید شود. این بخار می تواند یک واحد توربین ژنراتور را به راه بیندازد. نمونه ای از محدوده شرایط ترمودینامیکی سیستم تولید برق با THERMOWIER در شکل ۲شکل ۲ نشان داده شده است[۱۱].



نمونه ای از محدوده شرایط ترمودینامیکی سیستم تولید برق با THERMOWIR

یک واحد ۲/۶ مگاوات الکتریکی در کارخانه سیمان Shree در Beawar نصب شده است که در این واحد ۱۴۰/۰۰۰ Nm^3/h از گاز های دودکش با درجه حرارت ۴۰۰ درجه سانتی گراد وارد THERMOWIR می گردد و درجه حرارت آن تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد[۱۱].

نقاط اصلی و مثبت سیستم THERMOWIR در این کارخانه منتخب می تواند به شرح زیر خلاصه گردد[۸ و ۱۱]:

۱. کاهش ۶۰ درصد از گرد و غبار موجود در گازهای ورودی به ESP و کاهش بار روی آن
۲. راندمان بالا در مقایسه با مبدلهای مرسوم
۳. سرد کردن گازها تا دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد بدون استفاده از آب
۴. تولید ۲/۶ مگاوات الکتریکی قدرت که معادل ۱۰مگاوات حرارتی (راندمان۲۶٪) می باشد.
۵. کاهش آلودگی جوی به میزان ۱۴ میلیون کیلوگرم CO_2 در سال

هزینه سرمایه گذاری برای این طرح ۱ میلیون دلار آمریکا به ازای تولید هر مگاوات برق می باشد[۱۱]. بررسی هزینه ها نشان می دهد که سیستم THERMOWIR با سیستم های تولید نیروی دیگر قابل مقایسه می باشد و بازگشت سرمایه ای بین ۲ تا ۴ سال خواهد داشت[۸].

۴- محاسبه توان تولیدی سیستم پیشنهادی برای کارخانه سیمان ممیزی شده براساس نتایج اندازه گیری

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در کارخانه سیمان ممیزی شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات انرژیهای قابل بازیافت در کارخانه سیمان ممیزی شده

Flow ton/hr	Flow Nm^3/hr	N_2 %	H_2O %	SO_2 (ppm)	CO (ppm)	O_2 %	Temp. (ºC)	موقعیت
340.71	281581.07	68.71	18.4	0.0	60	3.25	305	گاز خروجی از سیکلونها
137.22	116490.36	0.7933	0.2	0.0	7	20.38	380	خروجی از .G.T به سمت الکتروفیلتر

در ادامه پتانسیل موجود برای بازیافت براساس نقاط دارای انرژی حرارتی تلف شده تعیین می گردد.

۴-۱. گاز داغ خروجی از پری هیتر

گاز داغ خروجی از پری هیتر از احتراق سوخت های فسیلی در کوره دوار کلینکر و نیز کلساینر بعد از گرم کردن مواد اولیه تغذیه شده، حاصل می شود.

نحوه طراحی سیستم پیش گرمکن مواد اولیه تغذیه شونده و اندازه و درشتی و دانه بندی آنها در خروجی سیستم، تاثیر بسزائی در دما و میزان گاز داغ خروجی و در نتیجه انرژی حرارتی تلف شده دارد. همچنین رطوبت

موجود در مواد اولیه نیز در طراحی این سیستم بسیار موثر و قابل اهمیت می باشد. براساس نتایج اندازه گیری کارخانه سیمان ممیزی شده میزان انرژی حرارتی تلف شده قابل استحصال برای این گاز با فرض دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای خروجی گازها از مبدل برابر است با:

$$Q = \dot{m} \times C_P \times \Delta T = (340.71 \times 10^3)\frac{Kg}{hr} \times 0.27\frac{KCal}{Kg.^\circ C} \times (305-200)^\circ C = 9.66 \times 10^6\ \frac{KCal}{hr}$$

$$Q = 11.23MW$$

۴-۲.گاز داغ خروجی از سیستم خنک کن کلینکر

مقدار گاز داغ خروجی از خنک کن کلینکر در کارخانجات مختلف با توجه به نحوه انتقال کلینکر و روش انباشت آن متغیر می باشد. همچنین این مقدار گاز داغ به درجه حرارت داخل کوره و ترکیب پوشش ناحیه زینترینگ نیز وابسته می باشد. براساس نتایج اندازه گیری در کارخانه سیمان ممیزی شده میزان انرژی حرارتی تلف شده قابل استحصال برای این گاز با فرض دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای خروجی گازها از مبدل برابر است با:

$$Q = \dot{m} \times C_P \times \Delta T = (137.22 \times 10^3)\frac{Kg}{hr} \times 0.24\frac{KCal}{Kg.^\circ C} \times (380-200)^\circ C = 5.93 \times 10^6\ \frac{KCal}{hr}$$

$$Q = 6.89MW$$

با در نظر گرفتن راندمان ۲۶٪ برای این سیستم تولید برق با استفاده از انرژی قابل بازیافت در کارخانه سیمان ممیزی شده می توان حدود ۴/۷۱ مگاوات ($Q = (11.23 + 6.89) \times 0.26 = 4.71MW$) انرژی الکتریکی تولید کرد.

با توجه به اینکه هزینه سرمایه گذاری برای این طرح ۱ میلیون دلار آمریکا به ازای تولید هر مگاوات برق می باشد، بازگشت سرمایه اجرای این طرح براساس قیمتهای بایارانه(تعرفه صنعتی) و بدون یارانه برق برابر است با:

$$Pay\ Back\ with\ subsidy = \frac{4.71(MW) \times 10000(million\ rial/MW)}{4.71(MW) \times 1000(KW/MW) \times 170(rial/KWh) \times 24(hr/day) \times 330(day/year)} = 7.43\,year$$

$$Pay\ Back\ with\ out\ subsidy = \frac{4.71(WM) \times 10000(million\ rial/MW)}{4.71(MW) \times 1000(KW/MW) \times 770(rial/KWh) \times 24(hr/day) \times 330(day/year)} = 1.64\,year$$

۵- تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش بویلر بازیافت

در تکنولوژیهای قدیمی یا جدید تولید سیمان که از پیش‌گرمکن‌های چهار یا پنج طبقه در سیستم پخت و از گریت کولر جهت خنک کردن کلینکر استفاده می‌کنند، قابلیت بهره‌گیری از سیستمهای بازیافت حرارت وجود دارد. گرمای بازیافت شده از دو منبع فوق در بویلرهای بازیافت حرارت صرف افزایش دمای آب و تبدیل آن به بخار شده که از انرژی آن در توربین بخار جهت تولید انرژی الکتریکی بهره‌گیری می‌شود.

بهای انرژی و کیفیت منبع گرمایی مهمترین فاکتورهای تأثیر گذار روی میزان توجیه پذیری اقتصادی سیستمهای بازیافت حرارت می‌باشد. بسته به نوع تکنولوژی و شرایط بهره‌برداری، گاز گرم خروجی از پیش‌گرمکن‌های چند طبقه‌ای دمایی در حدود ۳۷۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد و گاز گرم خروجی از کولر دمایی در حدود ۳۲۰ تا ۴۲۰ درجه سانتیگراد دارا می‌باشد که کیفیت نسبی مطلوبی را جهت بازیاب حرارت دارا می‌باشد.

جدول ۴ پتانسیل تولید انرژی الکتریکی را از بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان با ظرفیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۴. پتانسیل تولید انرژی الکتریکی از بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان با ظرفیت‌های مختلف

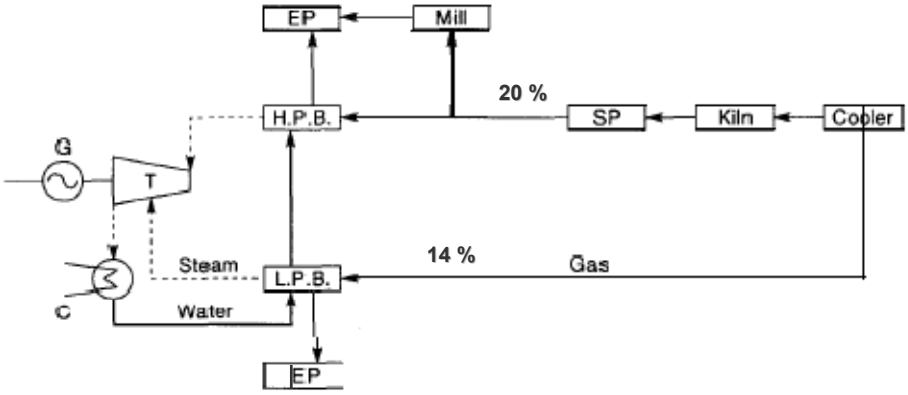
ظرفیت	دما و دبی گاز خروجی از پیش‌گرم‌کن	دما و دبی گاز خروجی از کولر	انرژی الکتریکی تولیدی
2500 ton/day	150000Nm^3/h-340℃	65000Nm^3/h-350℃	4.5MW
2×2500 ton/day	2×150000Nm^3/h-340℃	2×65000Nm^3/h-350℃	7.5MW
5000 ton/day	340000Nm^3/h-350℃	240000Nm^3/h-360℃	9MW
2×5000 ton/day	2×340000Nm^3/h-350℃	2×240000Nm^3/h-360℃	18MW

انرژی الکتریکی تولیدی به این روش بخشی از انرژی الکتریکی مصرفی کارخانه سیمان را تأمین می‌کند. بهره‌گیری از سیستم بازیافت حرارت در کارخانه‌های سیمان، ۲۰ تا ۳۸ کیلووات ساعت به ازای تولید هر تن کلینکر تولیدی در کارخانه‌های سیمان را تأمین می‌کند. انرژی تولیدی با این روش با توجه به کارکرد یا توقف آسیاب مواد متغیر خواهد بود. انرژی تولیدی در زمانهای توقف آسیاب مواد در حداکثر ظرفیت واحد می‌باشد.

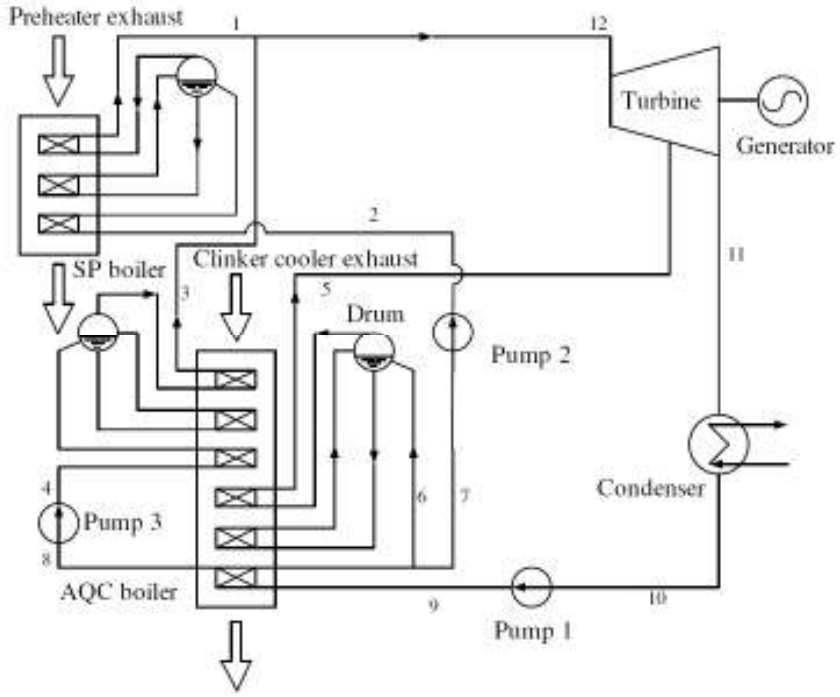
آب مورد نیاز بویلرها با آنالیز ویژه توسط تصفیه‌خانه آب تأمین می‌شود. آب تصفیه شده توسط پمپهای انتقال آب به بویلرها منتقل شده و بخار مافوق گرم حاصل شده از بازیافت حرارت، صرف تولید انرژی در توربین بخار می‌شود. دمای بخار میعان شده در برجهای خنک کن کاهش یافته و به مخزن ذخیره جهت استفاده مجدد منتقل می‌شود. تلفات آب در سیکل تولید حرارت نیز از طریق خط تأمین آب Make Up جبران می‌شود.

چشم انداز قیمتهای انرژی در کشور و رقابتی شدن بازار سیمان، ضرورت و اهمیت بالای بهینه سازی مصرف انرژی را در صنعت سیمان بیش از پیش روشن می‌کند.

در شکل ۳ شماتیک روش تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم بازیافت حرارت نشان داده شده است[۱۲ ، ۱۳ ،۱۴ و۱۵].



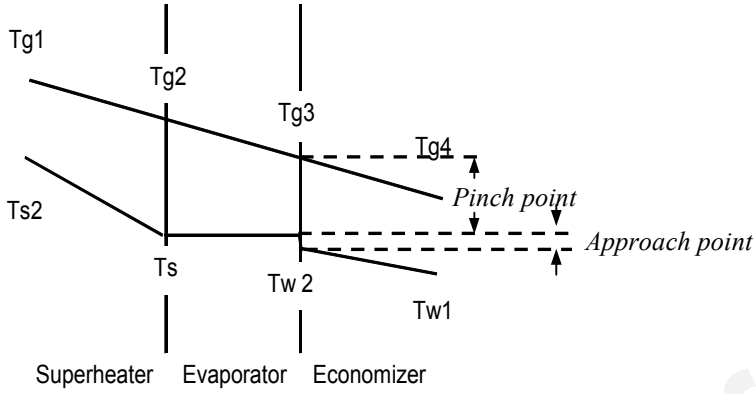
H.P.B. : High Pressure Boiler
L.P.M. : Low Pressure Boiler
T : Turbine
G : Generator
C : Condenser
SP : Suspension Preheater
EP : Electrostatic Precipitater



شماتیک فرایند تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم بازیافت حرارت

حدود ۲۰ درصد از ارزش حرارتی سوخت مصرفی از طریق پری هیتر و حدود ۱۴ درصد آن از طریق دودکش گریت کولر قابل بازیافت می باشد.

شمایی از پروفایل دمایی مبدل بازیافت حرارت در حالت کلی در شکل ۴ ملاحظه می گردد[۱۶ و ۱۷].



شمایی از پروفایل دما در نقاط مختلف یک بویلر بازیافت حرارت

در واقع از آنجا که مبدل بازیافت حرارت شامل سه بخش اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر است، تعیین پارامترهایی نظیر pinch point و approach point ضرورت دارد. pinch point، برابر با اختلاف دمای گازهای خروجی از اواپراتور و بخار اشباع(Tg3-Ts) و approach point برابر با اختلاف دمای آب ورودی به اواپراتور و بخار اشباع (Ts-Tw2) است. میزان این دو پارامتر بر سایز اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر تأثیرگذار است. معمولاً برای اجتناب از مشکلاتی نظیر لرزش و hammering در اکونومایزر، میزان approach point در بویلرهای بازیافت حرارت باید در محدوده مناسب قرار گیرد. محدوده بهینه این پارامترها برای طراحی سیستمهای بازیافت حرارت در صنعت سیمان در جدول ۵ ارائه شده است. [۱۵].

جدول ۵. فرضیات اولیه برای طراحی سیستم بازیافت حرارت در صنعت سیمان

Environment temperature (°C)	15
Environment pressure (MPa)	0.10135
Turbine isentropic efficiency (%)	85
Minimum degree of dryness of turbine exhaust (%)	88
Pump isentropic efficiency (%)	70
Pinch point temperature difference (°C)	10.0
Approach point temperature difference (°C)	5.0

۶- مقدار انرژی الکتریکی قابل استحصال براساس نتایج اندازه گیری در کارخانه سیمان ممیزی شده

همانگونه که قبلا اشاره شد، انرژی قابل بازیافت شامل گاز گرم خروجی از پیش‌گرمکن‌ها و گاز گرم خروجی از کولر می‌باشد که کیفیت نسبی مطلوبی را جهت بازیاب حرارت دارا می‌باشد.

در جدول ۶ مشخصات این دو جریان در فرایند تولید کارخانه سیمان ممیزی شده ارائه شده است.

جدول ۶. مشخصات انرژیهای قابل بازیافت کارخانه سیمان ممیزی شده

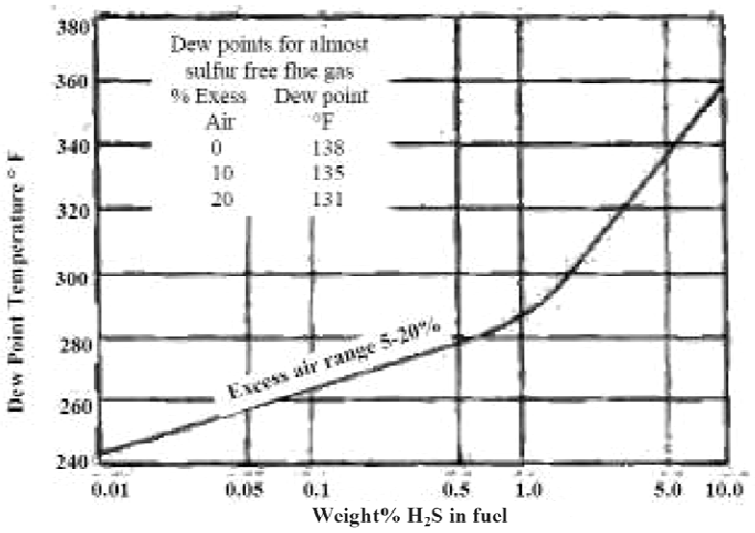
Flow ton/hr	Flow Nm^3/hr	N_2 %	H_2O %	SO_2 (ppm)	CO (ppm)	CO_2 %	O_2 %	Temp. (°C)	موقعیت
340.71	281581.07	68.71	18.4	0.0	60	9.66	3.25	305	گاز خروجی از سیکلونها
137.22	116490.36	0.7933	0.2	0.0	7	0.1	20.38	380	خروجی از .G.T به سمت الکتروفیلتر

دمای نقطه شبنم گازهای احتراق، تعیین کننده حداقل دمای گازهای احتراق خروجی از دودکش است. دمای نقطه شبنم دود خروجی، با توجه به صفر بودن درصد وزنی گوگرد در گازهای خروجی از پری هیتر و گریت کولر(*Sulfur free flue gas*) و با توجه به شکل ۵، ۱۳۵ درجه فارنهایت به دست می آید. بنابراین می توان حد نهایی سرد شدن گازهای احتراق را با توجه به دمای فیلم سیال در خروجی مبدل به دست آورد[۱۸]:

دمای فیلم گازهای احتراق در خروجی مبدل: $\frac{32+T_{f_0}}{2}=135^\circ F$

حد نهایی سرد شدن گازهای احتراق: $\Rightarrow T_{f_0}=238^\circ F=114.4^\circ C$

لازم به ذکر است که در این رابطه دمای فیلم، دمای هوا در فصل زمستان ۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.



دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک حاصل از احتراق

براساس نتایج اندازه در کارخانه سیمان ممیزی شده میزان انرژی حرارتی تلف شده قابل استحصال برای گازهای خروجی از پری هیتر با فرض دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای خروجی گازها برابر است با:

$$Q = \dot{m} \times C_P \times \Delta T = (340.71 \times 10^3)\frac{Kg}{hr} \times 0.27 \frac{KCal}{Kg.^\circ C} \times (305 - 150)^\circ C = 14.26 \times 10^6 \frac{KCal}{hr}$$

$$Q = 16.58MW$$

میزان انرژی حرارتی تلف شده قابل استحصال برای گازهای خروجی از گریت کولر با فرض دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای خروجی گازها برابر است با:

$$Q = \dot{m} \times C_P \times \Delta T = (137.22 \times 10^3)\frac{Kg}{hr} \times 0.24 \frac{KCal}{Kg.^\circ C} \times (380 - 150)^\circ C = 7.57 \times 10^6 \frac{KCal}{hr}$$

$$Q = 8.81MW$$

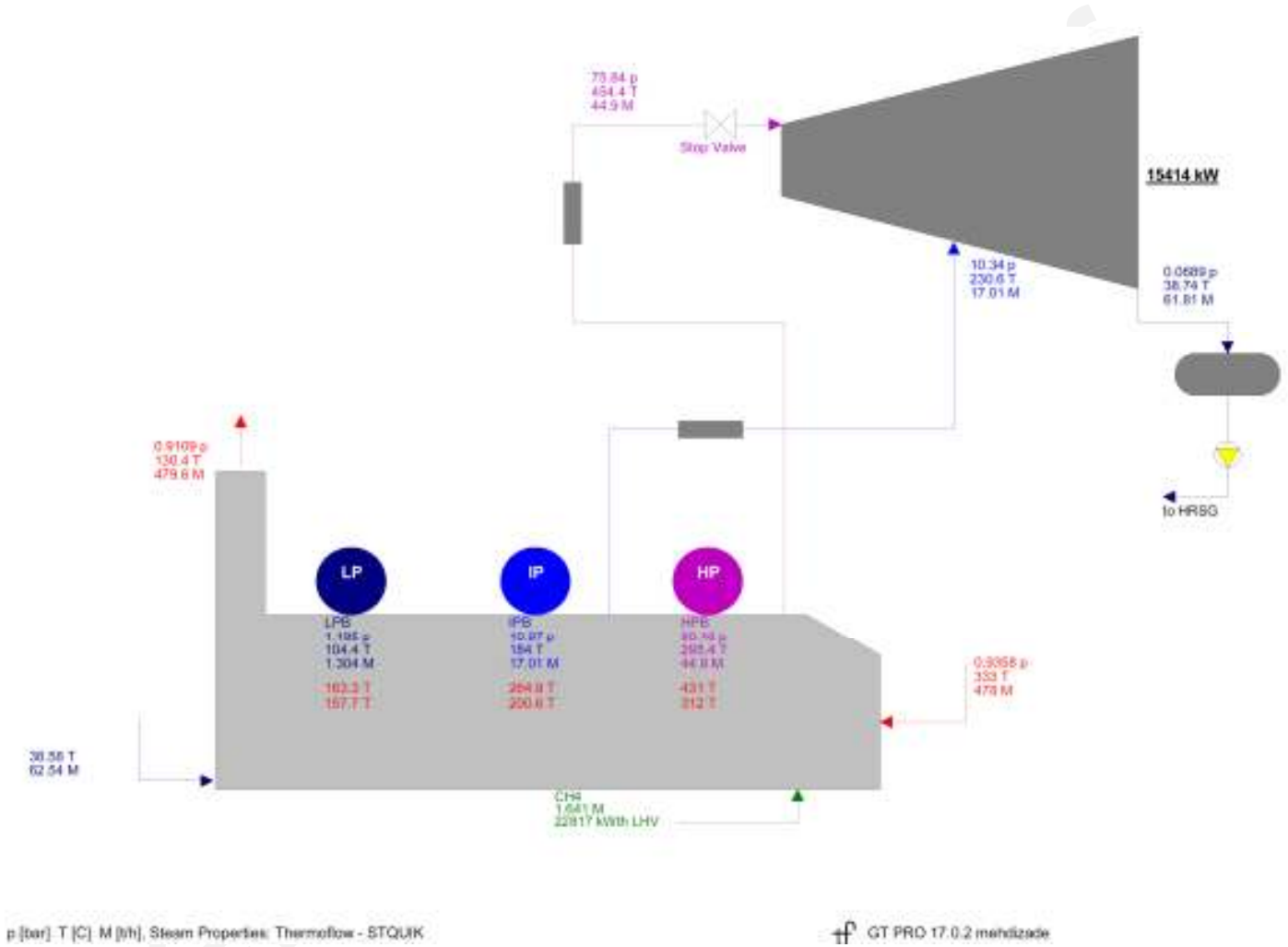
با در نظر گرفتن راندمان ۲۵٪ برای سیستم تولید برق با روش بویلر بازیافت حرارت براساس اندازه گیریهای انجام گرفته در کارخانه سیمان ممیزی شده، می توان حدود ۶/۳۵ مگاوات ($Q = (16.58 + 8.81) \times 0.25 = 6.35MW$) انرژی الکتریکی تولید کرد.

با توجه به اینکه هزینه سرمایه گذاری برای این طرح حدود ۱۶ میلیون دلار آمریکا می باشد[۱۹]، زمان بازگشت سرمایه اجرای این طرح براساس قیمتهای بایارانه(تعرفه صنعتی) و بدون یارانه برق برابر است با:

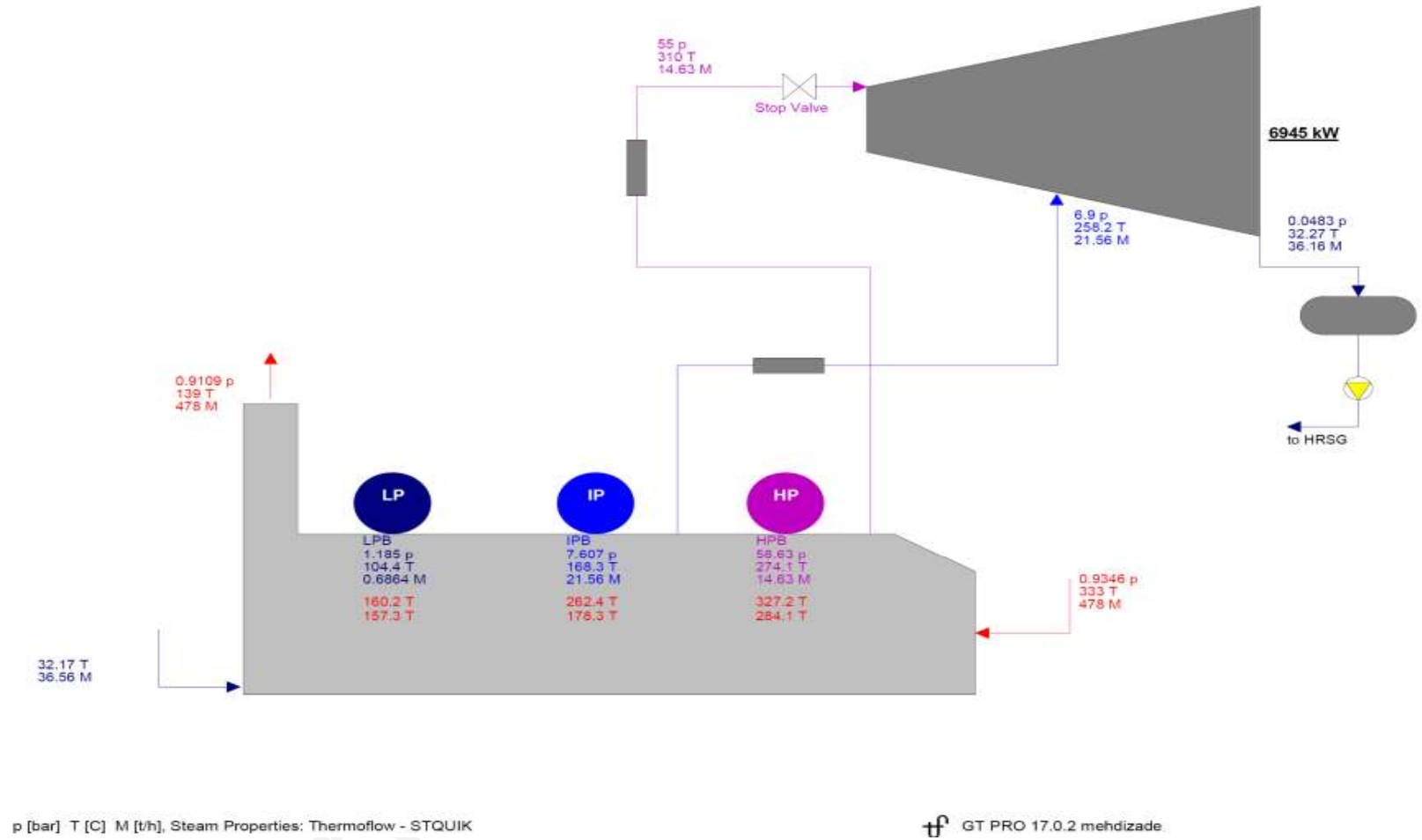
$$Pay\ Back\ with\ subsidy = \frac{1.6 \times 10^{12}(rial)}{6.35(MW) \times 1000(KW/MW) \times 170(rial/KWh) \times 24(hr/day) \times 330(day/year)} = 18.71year$$

$$Pay\ Back\ with\ out\ subsidy = \frac{1.6 \times 10^{12}(rial)}{6.35(MW) \times 1000(KW/MW) \times 770(rial/KWh) \times 24(hr/day) \times 330(day/year)} = 4.13year$$

لازم به ذکر است طبق شبیه سازی انجام گرفته با استفاده از نرم افزار شبیه ساز نیروگاه(Thermoflow)، پیشنهاد می گردد که در صورت استفاده از مشعل کمکی با ظرفیت ۲۲۸۱۷ کیلووات ساعت می توان حدود ۱۵/۴ مگاوات برق تولید کرد. نتایج شبیه سازی انجام گرفته جهت بازیافت انرژی گازهای داغ خروجی از کارخانه سیمان ممیزی شده با نرم افزار ترموفلو با مشعل کمکی و بدون مشعل کمکی به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ ارائه شده است.



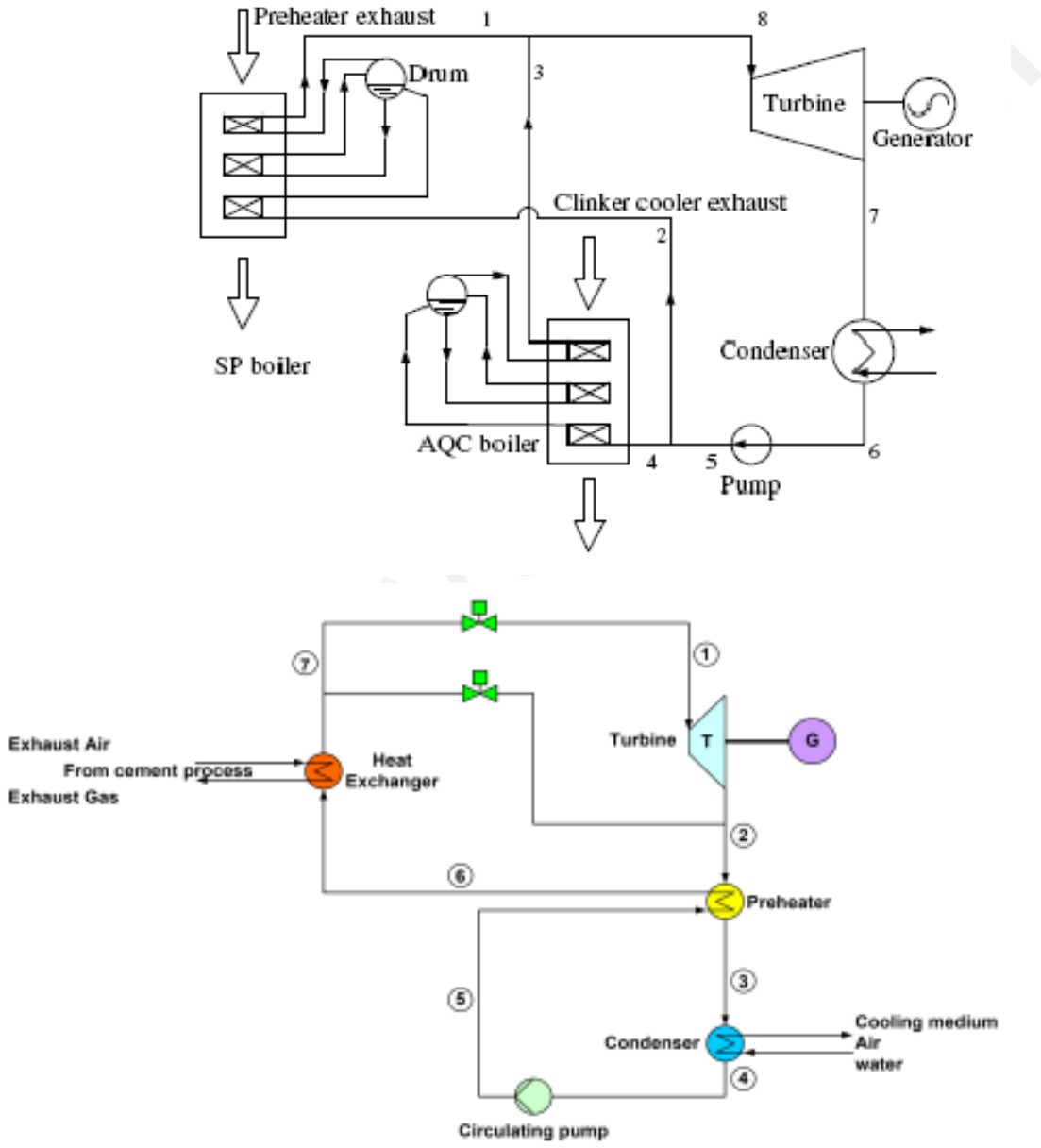
نمایش گرافیکی نتایج شبیه سازی بازیافت انرژی گازهای داغ خروجی در کارخانه سیمان ممیزی شده با نرم افزار ترموفلو با مشعل کمکی



نمایش نتایج شبیه سازی بازیافت انرژی گازهای داغ خروجی در کارخانه سیمان ممیزی شده با نرم افزار ترموفلو بدون مشعل کمکی

۷- تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش ORC[1]

روش تولید انرژی الکتریکی از پروسه ORC با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی، یکی از روشهای بسیار مدرن و جدید می باشد که علاوه بر صرفه اقتصادی به لحاظ موارد زیست محیطی نیز شایان توجه می‌باشد. نیروگاه های حرارتی که با تجهیزاتی که توسط سیالات اورگانیک کار می کنند، عمل می کنند، قادرند انرژی حرارتی با دمای پایین را به کار مکانیکی تبدیل نمایند. این نیروگاه ها تحت عنوان ORC-Plants معروفند و در دامنه ای وسیعی از قدرت طراحی و ساخته می شوند[۱۵ و ۱۹].



نمونه هایی از شماتیک فرایند ORC

1 . Organic Rankine cycle

انبساط برگشت ناپذیر بخار (② → ①) با یک ماشین انبساط آدیاباتیک نظیر توربین یا ماشین انبساط پیچی جایگزین می شود. متعاقباً بخار توسط سیستم خنک کن با فشار ثابت به درجه حرارت اشباع رسیده (③ → ②) و انرژی حرارتی حاصل در پروسه (③ → ②) توسط مبدل حرارتی مربوطه صرف پیش گرم کردن مایع می گردد. ادامه پروسه سرمایش و تقطیر بخار در کندانسور (④ → ③) اتفاق افتاده و توسط پمپ (⑤ → ④) فشار لازم تامین می گردد. گرمایش در فشار ثابت مایع (⑥ → ⑤) توسط بخار (بجای پیش گرم) در مقایسه با سیکل Clausis Rankine تامین می شود. سپس مایع در اواپراتور (⑦ → ⑥) در اثر گرمای منبع خارجی تبخیر می شود.

منبع گرمایش خارجی می تواند گاز داغ خروجی از کوره یا سیستم خنک کن کلینکر باشد. درجه حرارت کارکرد سیال در سیستم ORC (دمای منبع گرمایش خارجی) در محدوده $90^{\circ}C$ الی $300^{\circ}C$ متغیر می باشد. تولوئن و ایزوبوتان و آمونیاک بعنوان سیال در جریان در محدوده دماهای فوق الذکر در پروسس ORC بکار گرفته می شوند. این نوع از نیروگاه کاملاً جدید و مدرن و دارای محاسن عمده به ترتیب زیر می باشد:

- راندمان بسیار بالای توربین
- تنش مکانیکی بسیار کم در توربین بدلیل پائین بودن دور پره های آن
- اتصال مستقیم توربین به ژنراتور بدون استفاده از جعبه دنده
- عدم وجود سایش در پره های توربین بدلیل فقدان رطوبت
- عمر و دوام زیاد نیروگاه و تجهیزات مربوطه

۸- مقدار انرژی الکتریکی قابل استحصال براساس نتایج اندازه گیری کارخانه سیمان ممیزی شده

راندمان تولید انرژی الکتریکی یا پروسس ORC قابل مقایسه با راندمان نیروگاه های حرارتی (بخاری) با توربین یک مرحله ای است و در هر حال نباید فراموش نمود که منبع اصلی انرژی مورد استفاده این نیروگاه ها همان انرژی حرارتی اتلافی در صنایع می باشد. با بکارگیری پروسس ORC دمای گاز خروجی از کوره کلینکر و نیز سیستم خنک کن کلینکر تا حدود $140^{\circ}C$ قابل تقلیل می باشد که با توجه به دبی و حجم زیاد گازهای خروجی و اختلاف دمای ایجاد شده می توان به میزان انرژی حرارتی قابل استحصال پی برد.

خاطر نشان می سازد که امروزه در کشورهای صنعتی و بویژه در آمریکا صنایع سیمان به سرعت مبادرت به جایگزینی (یا ادغام) فیلترهای کیسه ای بجای فیلترهای الکترواستاتیکی نموده اند که علاوه بر دستیابی به استانداردهای زیست محیطی بهتر و برتر دارای هزینه بسیار کم تعمیر و نگهداری است. بویژه در صورت بکارگیری پروسس ORC و کاهش دمای گاز خروجی با استفاده از سیستم فوق (با توجه به نقطه شبنم و ضرورت دوری از محدوده آن) می توان حتی با استفاده از پارچه های پلی استر (تولید داخلی) نسبت به احداث و جایگزینی فیلترهای کیسه ای بجای فیلترهای الکترواستاتیکی اقدام نمود. در این صورت علاوه بر کاهش تعمیر و نگهداری سیستم های موجود، همه مصالح و ملزومات مربوطه در داخل قابل دسترس بوده و به سهولت از نیاز به

تامین قطعات یدکی و مصرفی خارجی مربوطه به فیلترهای الکترواستاتیکی فاصله گرفته و می توان با حذف این گونه فیلترها در مصرف انرژی الکتریکی نیز به مقدار قابل توجهی صرفه جوئی نمود. لازم به ذکر است که با این روش می توان بجای فیلتر کیسه ای هیبریدی که به کیسه های بسیار گران قیمت (خارجی) مجهز می باشند از کیسه های پلی استر بسیار ارزان تر استفاده نمود که با توجه مصرفی بودن کیسه ها در این گونه فیلترها، اهمیت اقتصادی آن در کاهش هزینه های جاری کارخانجات قابل توجه می باشد[۱۹].

راندمان الکتریکی پروسس ORC با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی در صنایع ۱۰٪ الی ۲۰٪ می باشد که به روش زیر قابل محاسبه می باشد:

η_{elec} = (انرژی تولید شده - انرژی مصرفی پروسس) / انرژی ورودی به سیستم حرارتی

در مجموع هر چه درجه حرارت عملکرد سیال پروسس پائین تر باشد، راندمان حاصله کمتر و بالعکس می باشد. به طور مثال اگر درجه حرارت سیال پروسس ORC در محدوده ۲۵۰°C الی ۳۰۰°C باشد راندمان الکتریکی در حدود ۲۰٪ قابل استحصال می باشد[۱۹].

براساس نتایج اندازه گیری سال ۱۳۸۹ در کارخانه سیمان ممیزی شده میزان انرژی حرارتی تلف شده قابل استحصال با فرض دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای خروجی گازها از فرایند ORC برابر با $(16.58 + 8.81) = 25.39MW$ است.

با در نظر گرفتن راندمان ۲۰٪ برای این سیستم تولید برق با استفاده از انرژی قابل بازیافت در سیمان عمران انارک می توان حدود ۵/۱ مگاوات انرژی الکتریکی تولید کرد.

با توجه به اینکه هزینه سرمایه گذاری جهت احداث یک نیروگاه با استفاده از پروسه ORC ۲-۱/۵ میلیون دلار آمریکا به ازای هر مگاوات توان الکتریکی تولیدی می باشد، زمان بازگشت سرمایه اجرای این طرح براساس قیمتهای بایارانه(تعرفه صنعتی) و بدون یارانه برق برابر است با:

$$Pay\ Back\ with\ subsidy = \frac{5.1(MW)\times 1.5\times 10^4(million\,rial/MW)}{5.1(MW)\times 1000(KW/MW)\times 170(rial/KWh)\times 24(hr/day)\times 330(day/year)} = 11.15year$$

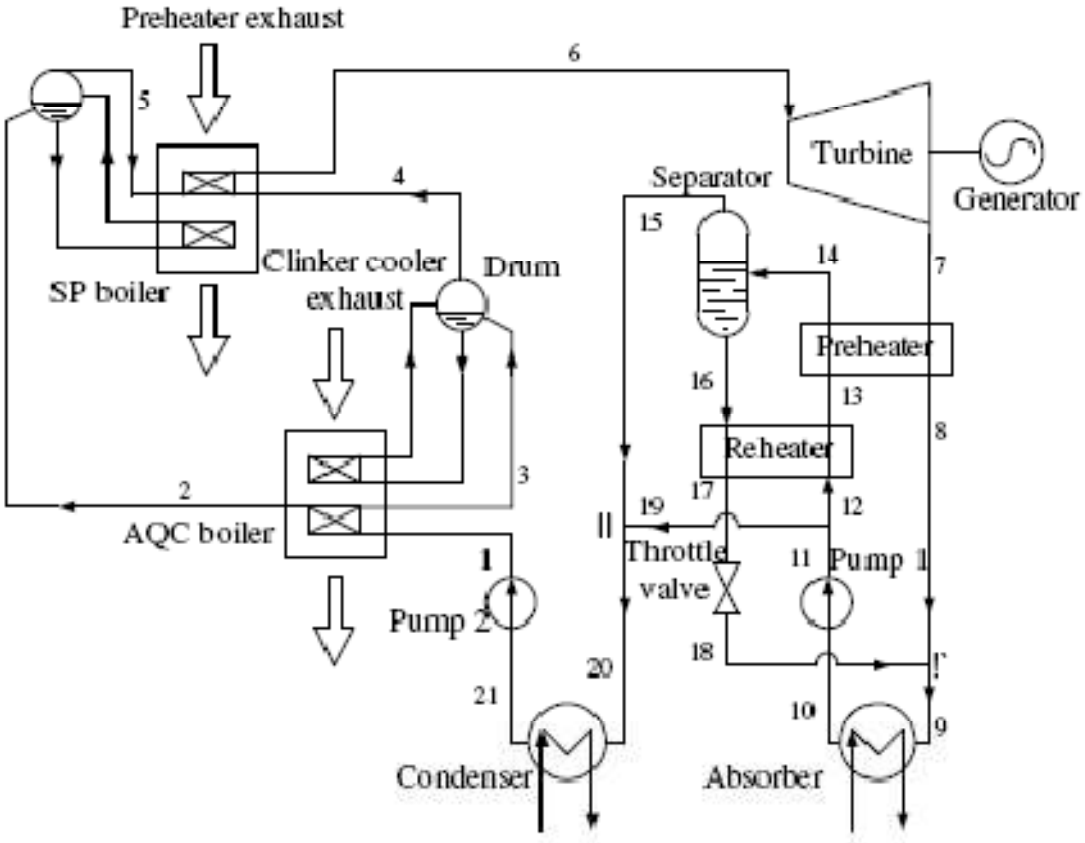
$$Pay\ Back\ with\ out\ subsidy = \frac{5.1(WM)\times 1.5\times 10^4(million\,rial/MW)}{5.1(MW)\times 1000(KW/MW)\times 770(rial/KWh)\times 24(hr/day)\times 330(day/year)} = 2.46year$$

۹- تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی بازیافت حرارت با روش سیکل کالینا۱

1 . Kalina cycle

در ادامه به بررسی تولید انرژی الکتریکی با روش سیکل کالینا با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی پرداخته خواهد شد[۱۵].

در این روش تولید انرژی الکتریکی، سیال فرایند مخلوطی از آب و آمونیاک است. شماتیک فرایند تولید برق با این روش در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شماتیک فرایند تولید برق با روش سیکل کالینا

در جدول ۷ مقایسه ای بین سه روش ORC و سیستم تولید برق با استفاده از سیکل بخار با دو فشار و سیکل کالینا با گازهای ورودی با شرایط مشابه نشان داده شده است[۱۵].

جدول ۷. مقایسه ای بین سه روش تولید برق با استفاده از بازیافت حرارت در صنعت سیمان

The performance of the ORC	
Turbine work (kW)	8948.06
Pump work (kW)	296.04
AQC boiler exhaust temperature (°C)	75.06
SP boiler heat input (kW)	18,573.811
AQC boiler heat input (kW)	23,362.279
Heat input (kW)	41,936.09
Net power output (kW)	8652.02
Thermal efficiency (%)	20.6
Exergy efficiency (%)	35.5

The performance of the dual-pressure steam cycle	
Turbine work (kW)	10,018.4
Pump 1 work (kW)	16.0
Pump 2 work (kW)	46.8
Pump 3 work (kW)	30.3
AQC boiler exhaust temperature (°C)	96.75
SP boiler heat input (kW)	18,573.8
AQC boiler heat input (kW)	21,351.4
Heat input (kW)	39,925.2
Net power output (kW)	9925.4
Thermal efficiency (%)	24.9
Exergy efficiency (%)	40.7

The performance of the Kalina cycle	
Turbine work (kW)	10,737.4
Pump 1 work (kW)	9.6
Pump 2 work (kW)	70.7
AQC boiler exhaust temperature(°C)	58.5
SP boiler heat input (kW)	18,573.8
AQC boiler heat input (kW)	24,890.2
Heat input (kW)	43,464.0
Net power output (kW)	10,492.4
Thermal efficiency (%)	24.1
Exergy efficiency (%)	43.0

همانگونه که از نتایج بر می آید:

- راندمان انرژی و اگزرژی سیکل کالینا از دو روش دیگر بیشتر است.

- از نظر افزایش میزان گرمای بازیافت شده از گازهای خروجی به ترتیب سیکل کالینا، سیستم ORC و سیستم تولید برق با استفاده از بخار با دو فشار قرار دارند.

- حسن سیستم ORC عدم محدودیت در تولید برق با دماهای پایین گازهای قابل بازیافت می باشد.

- از نظر بالا بودن هزینه سرمایه گذاری برای این سه روش به ترتیب سیکل کالینا، سیستم ORC و سیکل بخار قرار دارند.

مراجع

1. Tahsin Enginand Vedat Ari .Energy auditing and 25ecovery for dry type cement rotary kiln systems, A case study.2 July 2004

۲. ابوالقاسم پاکزاد، غلامرضا کبریایی، محمد تقی زیاری، "بازیافت حرارت و تصفیه گازهای دودکش"، سازمان بهره وری انرژی ایران(سابا)

3. Chawia, J.M., 1995 Apparatus fir heat transfer from dust laden gases to fluids , US patent application 60/0003.

4. Chawia, J.M., and G. Wiskot, 1992, Warmcubcrtraung-Berechnungen mit dem PC (Heat Transmission calculations with PC), pp. 100-103, VDI-Verlag, Dusseldorf.

5. J.M. Chawla, "Waste heat recovery from flue gases with substantial dust load.", Chemical Engineering and Processing 38 (1999) 365–371

6. CEMENT INDUSTRY, Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industry, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)

7. G. Kabir, A.I. Abubakar, U.A. El-Nafaty, "Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant" , journal homepage: www.elsevier.com/locate/energy

8. Rangan Banerjee , Uday Gaitonde, Shaleen Khurana, "Energy balance and cogeneration for a cement plant ", Applied Thermal Engineering 22 (2002) 485–494

9. Jiangfeng Wang, Yiping Dai , Lin Gao, " Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry" , journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

10. An American Society of Mechanical Engineers; "An American national Standard"; ASME PTC 4-2-1997; Performance Test Code on Gas Turbine Heat Recovery Steam Generator ";

11. V. Ganapathy, ABCO Industries;" Heat Recovery Steam Generators: Underestand the Basics"; Chemical Engineering Process; August 1996

۱۲. علی اصغر رستمی، "ممیزی و ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف و بازیافت انرژی در کوره های پالایشگاه اصفهان"، شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان

۱۳. حسین افشار باقری، زهره رحیمی، آرمان کاظمی، "بازیافت حرارتی گازهای خروجی ، کوره های سیمان و تولید انرژی الکتریکی، سیمان تهران

۱۴. پروین، عبدالرضا ، "استفاده از انرژی حرارتی گاز خروجی از کوره و سردکن کلینکر در صنعت سیمان و جایگزینی فیلتر کیسه ای بجای فیلتر الکترواستاتیکی در آن""، شرکت هوا فیلتر، سیمان، انرژی و محیط زیست

۱۵. تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها وزارت نیرو

۱۶. محمدرضا قهارپور- نادر سالک گیلانی-داوود سرجی ،ششمین همایش ملی انرژی-بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش الکتروموتورهای الکتریکی از طریق بکارگیری الکتروموتورهای راندمان بالا

17. Standard and cogged V-belts. Source: Dayco CPT, www.cptbelts.com

18. **Michigan Manufacturing Technology Center,** Manufacturing Efficiency Decision Support, Case Study - Cog Belts, http://meds.mmtc.org/casestudy.

19. Premium-Efficiency Motors : natural resources 26ecove

energyenergy.ir