Archive of SID

اولین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه ۱۳۸۴ - تهران - دانشگاه تربیت مدرس
انجمن احتراق ایران

افزایش راندمان احتراق در بویلرهای نیروگاهی از طریق تنظیم هوای اضافی

امیر سهرابی کاشانی[۱]
پژوهشگاه نیرو
asohrabi@nri.ac.ir

چکیده

بررسی عملکرد احتراق در بویلرهای نیروگاهی یکی از مباحث مهم در تعیین تلفات انرژی خروجی از دودکش یک نیروگاه حرارتی می باشد. عوامل موثر در وضعیت عملکرد احتراق در بویلرها متاثر از پارامترهای متعددی می باشد که در این مقاله، مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق در ابتدا به عملکرد احتراق در یک بویلر نیروگاهی در قالب محاسبات مربوط به موازنه های انرژی و مواد در واکنشها و میزان هوای مورد نیاز احتراق در شرایط ایده ال و واقعی پرداخته می شود. پس از آن به اختصار به وضعیت موجود احتراق در بویلرهای نیروگاههای کشوراز نظر تنظیم هوای مورد نیاز احتراق اشاره می گردد. بررسی تلفات انرژی در بویلرهای نیروگاهی به ویژه تلفات ناشی از عدم تنظیم نسبت هوا به سوخت از مهمترین مباحثی است که در این مقاله مطرح می شود. در انتها راهکارهای مناسب بمنظور کاهش تلفات انرژی از دودکش از طریق تعیین شرایط بهینه احتراق در بویلر ارائه می گردد.

واژه های کلیدی: احتراق، بویلر، تلفات انرژی، نیروگاه، دودکش.

۱- مقدمه

امروزه بیش از ۹۵٪ انرژی مصرفی جهان از راه احتراق فراهم می شود. با وجود پژوهشهای روز افزون برای دستیابی به انرژیهای جانشین، اما در سده های آینده نیز احتراق ، به ویژه در نیروگاههای حرارتی که یکی از منابع مهم تولید انرژی الکتریکی در جهان می باشد، اهمیت خود را حفظ خواهد کرد.

از آنجا که ذخیره سوختهای فسیلی رو به اتمام است این سوختها پیوسته گرانتر می شوند و ناگزیر می بایستی به منابع دیگری روی آورد که دسترسی به آنها دشوارتر است. از این رو انجام فرایند احتراق با بازدهی هر چه بیشتر از اهمیت ویژه ای بر خوردار می گردد. بنا براین ملاحظه می گرددکه بررسی فرایندهای احتراق یک موضوع مهم و گسترش یافته علمی است و پیشرفت تکنولوژی در دهه گذشته بازتاب این حقیقت بوده است. پدیده های احتراق، از تاثیر فرایندهای شیمیایی و فیزیکی ناشی می شوند، به طوری که کاربردهای آن از دامنه دانشهای فیزیک و شیمی فراتر رفته و دانشهای کاربردی دیگر مانند آئرودینامیک و مهندسی مکانیک را در بر می گیرد. فرایندهای فیزیکی که در احتراق دیده می شوند در اساس آنهایی هستند که از انتقال جرم وانرژی پدید می آیند. گرما رسانایی، پخش گونه های شیمیایی، و جریان توده ای گازها همگی پیامدهای آزاد شدن انرژی شیمیایی در یک واکنش گرمای زای می باشد و از برهمکنش این فرایند هاست که پدیده احتراق به وجود می آیند [۱].

از طرفی یکی از سیالاتی که به مقدار زیادی در نیروگاهها و دیگر صنایع برای انتقال انرژی حاصل از احتراق به توربین از آن استفاده می شود، بخار است. نیروگاهها از جمله صنایعی هستند که به طور وسیعی از بخار استفاده می کنند. طبق گزارش

۱- مربی پژوهش

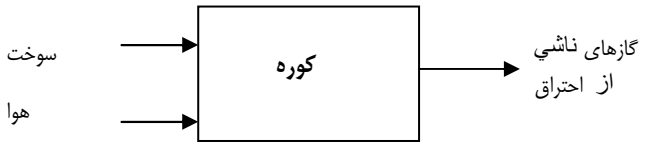
www.SID.ir

Archive of SID

انجمن بازیافت انرژی آمریکا، در این کشور در سال ۱۹۹۵ مجموعا $۱۶/۵۵\times۱۰^{۱۵}$ بی تی یو انرژی به صورت گرم کردن، تولید توان و الکتریسیته مصرف شده که از این مقدار دو سوم آن صرف تولید بخار شده است که معادل $۹/۳۴\times۱۰^{۱۵}$ بی تی یو می باشد. باتوجه به پر هزینه بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن از حیث انرژی، بهینه سازی عملکرد بویلر در تولید بخار از مواردی است که در بحث بازیافت و صرفه جویی انرژی در الویت بررسی قرار دارد. از آنجایی که یکی از مهمترین تجهیزاتی که در شبکه تولید بخار در اکثر صنایع از جمله نیروگاهها مورد استفاده قرار می گیرد، بویلرها هستند، بررسی و تحلیل و همچنین بهینه سازی عملکرد احتراق آنها از اهمیت ویژه ای بر خوردار می باشد[۶].

۲- احتراق در محفظه کوره بویلر

احتراق یک سوخت،تبدیل شیمیایی سوخت به محصولات احتراق همراه با آزاد سازی انرژی حرارتی ناشی از آن می باشد. اجزای محترقه یک سوخت گازی یا مایع، مثل کربن، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن توسط واکنشهای شیمیایی گرمازا با اکسیژن هوای احتراق در می آمیزند. محصولات احتراق شامل گازهای دوکش و باقیمانده های جامد از احتراق سوختهای مایع و جامد می باشند. گازهای دودکش حاوی ترکیبات آلوده کننده زیان آور مثل اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، منو اکسید کربن، دی اکسید کربن و بخار آب هستند. که البته بخار آب نیز از جمله گازهای آلوده کننده و زیان آور بشمار نمی رود. معادلات استوکیومتری تشریح ساده ای از واکنشهای احتراق کامل اجزای قابل احتراق سوخت با اکسیژن را بهمراه موازنه مواد و واکنشها بر مبنای مولی یا جرمی ارائه می کنند. شکل (۱) شمای کلی از فرایند احتراق را نشان می دهد.



شکل۱- شمای کلی از فرایند احتراق

واکنش اکسیداسیون کربن با اکسیژن به دی اکسید کربن عبارت است از:

$$C + O_۲ = CO_۲ + ۳۹۳/۵\ Mj/(kg\ mol) \qquad (۱)$$
$$۱\ kg\ mol\ C + ۱\ kg\ mol\ O_۲ = ۱ kg\ mol\ CO_۲$$
$$۱۲\ kg\ C + ۳۲\ kg\ O_۲ = ۴۴\ kg\ CO_۲$$

به طور مشابه برای احتراق هیدروژن نیز داریم:

$$H_۲ + ۰/۵\ O_۲ = H_۲O\ (\text{بخار آب}) + ۲۴۱/۸\ Mj/(kg\ mol) \qquad (۲)$$
$$۱\ kg\ mol\ H_۲ + ۰/۵\ kg\ mol\ O_۲ = 1 kg\ mol\ H_۲O$$
$$۲/۰۱۶\ kg\ H_2 + ۱۶\ kg\ O_2 = ۱۸/۰۱۶\ kg\ H_۲O$$

به طور مشابه داریم:

$$S + O_۲ = SO_۲ + ۲۹۶/۹\ Mj/(kg\ mol) \qquad (۳)$$
$$۱\ kg\ mol\ S + ۱\ kg\ mol\ O_۲ = ۱\ kg\ mol\ SO_۲$$
$$۳۲\ kg\ S + ۳۲\ kg\ O_۲ = ۶۴\ kg\ SO_۲$$

سوختهای گازی حاوی اجزای قابل احتراق از قبیل CH_4 , CO , H_2 , C_nH_m شامل C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} هستند. معادلات استو کیومتری برای احتراق سوختهای گازی بر مبنای مولی نوشته می شوند. راحتر این است که ۱۰۰ مول از سوخت در نظر گرفته شود. سپس تعداد مولهای واکنش گرما و محصولات، به ترتیب برابر با درصد حجمی اجزای سوخت و محصولات احتراق هستند.

www.SID.ir

Archive of SID

معادلات استوکیومتری زیر بر مبنای مولی را برای احتراق هیدروژن، منواکسید کربن، متان و هیدرو کربنهای بالاتر می توان نوشت:

$$H_2 + 0/5\,O_2 = H_2O + 241/8\,Mj/(kg\,mol) \quad (4)$$
$$1\,mol + 0/5\,mol = 1\,mol$$

$$CO + 0/5\,O_2 = CO_2 + 283\,Mj/(kg\,mol) \quad (5)$$
$$1\,mol + 0/5\,mol = 1\,mol$$

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad (6)$$
$$1\,mol + 2\,mol = 1\,mol + 2\,mol$$

$$C_nH_m + (n + m/4)O_2 = nCO_2 + m/2H_2O \quad (7)$$
$$1\,mol + (n + m/4)\,mol = n\,mol + m/2\,mol$$

- هوای تئوری لازم:

مقدار حداقل هوای لازم برای احتراق کامل یک واحد جرم سوخت ، هوای تئوری یا هوای استوکیومتری است. این هوا را می توان بر اساس جرم یا مول محاسبه کرد. مبنای جرم برای سوختهای جامد و مایع و مبنای مولی برای سوختهای گازی ترجیح داده می شوند. نسبت جرم هوای احتراق به جرم سوخت، نسبت هوا به سوخت نامیده می شود:

$$AF = m_{هوا}/m_{سوخت}\ (kg_{هوا}/kg_{سوخت}) \quad (8)$$

بر مبنای روابط استو کیومتری - یعنی معادلات (۱) و (۲) و (۳) نسبت هوا به سوخت تئوری بر حسب kg هوای خشک برkg سوخت به صورت زیر داده می شود:

$$AF_t = 1/0/232[2/67C + 7/94H + S - O] = 11/49C + 34/22H + 4/31(S - O) \quad (9)$$

که در آن O,S,H,C کسرهای جرمی در تجزیه و تحلیل نهایی سوخت جامد یا مایع هستند. حجم تئوری هوای خشک لازم برای سوزاندن ۱kg سوخت جامد یا مایع عبارت است از :

$$V_{a,t} = AF_t/\rho_{هوا} \quad (m^3/kg) \quad (10)$$

که در آن ρ دانسیته هوا در شرایط استاندارد (۱۰۱/۳ kPa , 0 C) و برابر با $1/293 kg/m^3$ است. تعداد مولهای تئوری اکسیژن لازم برای احتراق کامل ۱۰۰ مول سوخت گازی از معادله استوکیومتری داده شده در بالا محاسبه می شود و با ضرب در نسبت ۴/۷۶=۲۱ ÷ ۱۰۰ هوای تئوری لازم بدست می آید:

$$AF_{t,m} = 4/76[0/5(H_2 + CO) + 2CH_4 + (n + m/4)\,C_nH_m - O_2] \quad (11)$$

که در آن O_2, C_nH_m, CH_4, CO, H به ترتیب کسر مولی هیدروژن، منواکسید کربن، متان، هیدروکربنهای بالاتر، و اکسیژن در سوخت گاز هستند. در شرایط استاندارد کسر (مول سوخت/مول هوا) برابربا کسر (حجم سوخت/ حجم هوا) می باشد.فرض بر این است که H_2S در سوخت گاز موجود نیست.

- نسبت هوای اضافی:

برای رسیدن به احتراق کامل باید یک مقدار هوای اضافی علاوه بر مقدار تئوری فراهم شود. نسبت هوا به سوخت واقعی AF_a معمولا بر حسب نسبت هوای اضافی یا درصد هوای اضافی بیان می گردد. از تقسیم نسبت هوا به سوخت واقعی AF_a بر نسبت هوا به سوخت تئوری AF_t (استوکیومتری)، نسبت هوای اضافی (ضریب رقیق بودن) λ تعریف می شود:

$$\lambda = AF_a/AF_t \quad (12)$$

درصد هوای اضافی به صورت زیر تعریف می گردد:

www.SID.ir

Archive of SID

درصد هوای اضافی = ۱۰۰(λ-1)% (۱۳)

نسبت هوای اضافی λ بستگی به مشخصه های سوخت، طراحی کوره و نوع مشعل دارد. بنابراین λ برای سوخت گازی ۱/۱- ۱/۰۳ بوده در حالی که برای سوخت مایع بین ۱/۳ و ۱/۶ قرار دارد. در جایی که در محفظه های احتراق توربین گاز می تواند حتی بالاتر(حدود ۴) باشد. نسبت هوای اضافی واقعی در یک کوره را می توان از تجزیه و تحلیل گاز دودکش آن تعیین کرد.

- هوای واقعی لازم:

نسبت هوای خشک به سوخت واقعی عبارت است از :

$$AF_a = \lambda\, AF_t \quad (۱۴)$$

نسبت هوای تر به سوخت واقعی که بخار آب موجود در هوای اتمسفر در نظر گرفته می شود برابر است با:

$$AF_{a,w} = \lambda AF_t(1 + w) \quad (۱۵)$$

که در آن w نسبت رطوبت یا جرم بخار آب در واحد جرم هوای خشک است. حجم هوای خشک و مرطوب فراهم شده برای کوره به صورت زیر داده می شود:

$$V_a = \lambda AF_t/\rho_{هوا} \quad (۱۶)$$

$$V_{a,w} = \lambda AF_t(1/\rho_{هوا} + w/\rho_{آب}) \quad (۱۷)$$

که در آن ρ هوا و ρ آب به ترتیب دانسیته هوا و بخار آب برابر با ۱/۲۹۳m^3/kg و ۰/۸۰۴m^3/kg در شرایط استاندارد می باشد.

نسبت هوای اضافی AF_a/AF_t در سوختهای مایع و گازی به کار گرفته می شود تا تفاوت بین مخلوطهای سوخت و هوای رقیق و غنی مشخص شود . اگر این نسبت کمتر از یک باشد، مخلوط غنی و در غیر این صورت رقیق نامیده می شود.

- محصولات احتراق:

محصولات احتراق کامل یک سوخت ، حاوی $O_2,N_2,SO_2,H_2O,CO_2,NO_2$ است. وقتی احتراق غیر کامل صورت پذیرد، گاز دودکش همچنین حاوی CO و هیدروکربنهای نسوخته است. از معادلات استوکیومتری، معادلات (۱) تا (۷) ، مقدار اجزای گاز دودکش را می توان محاسبه کرد. سپس جرم هر جز برای احتراق کامل یک سوخت جامد یا مایع از معادلات استوکیومتری یعنی معادلات (۱) تا (۳) به دست می آید و سپس حجم از تقسیم جرم بر دانسیته حاصل می شود. جرم و حجم اجزای گاز دودکش برای احتراق استوکیومتری یک سوخت جامد یا مایع در جدول (۱) آمده است. حجم کلی نیتروژن در گاز دودکش برابر است با:

$$V_{N2} = ۰/۸N + ۰/۷۹V_a \quad (m^3/kg)$$

حجم کلی بخار آب با در نظر گرفتن رطوبت هوای محیط برابر است با:

$$V_{H2O} = ۱۱/۱۱H + ۱/۲۴M + ۱/۲۴w\lambda AF_t \quad (m^3/kg) \quad (۱۸)$$

جدول (۱) جرمها و حجمهای اجزای گاز دودکش برای احتراق استوکیومتری سوخت جامد و مایع

تجزیه و تحلیل نهایی بر مبنای شرایط سوختی	اکسیژن تئوری kg/kg	محصولات احتراق	
		kg/kg	m^3/kg
C	۲/۶۷C	۳/۶۷C	۱/۸۶۷C
H	۷/ ۹۴H	۸/ ۹۴H	۱۱/ ۱۱H
S	S	۲S	۰/۶۸
N	-	N	۰/۸ N
O	O	-	-
رطوبت (M)	-	M	۱/۲۴M

www.SID.ir

Archive of SID

حجم اکسیژن در گاز دودکش برابر است با:

$$V_{O2} = ۰/۲۱(\lambda-1)V_a \quad (m^3/kg)$$

در این جا λ نسبت هوای اضافی (ضریب رقیق بودن)، w نسبت رطوبت هوای احتراق برحسب (kg/kg) ، و Va حجم هوای واقعی برای هر kg سوخت است. تعداد مولهای اجزای گاز دودکش را نیز می توان از تعداد مولهای n عنصر N,O,S,H,C در هر kg سوخت از تجزیه و تحلیل نهایی آنالیز سوخت محاسبه کرد. موازنه مولی هر عنصر در سوخت و در گاز دودکش تعداد مولهای گاز دودکش را مشخص می نماید.

حجم گازی زیر (بر حسب m^3/m^3 سوخت گاز در شرایط استاندارد) در احتراق کامل سوخت گازی با هوای اضافی (برای λ>1) تشکیل می شود.[۵]

$$V_{CO۲} = CO_۲ + CO + CH_۴ + nC_nH_m \quad (۲۰)$$

$$V_{N۲} = N_۲ + ۰/۷۹\lambda AF_{t,m} \quad (۲۱)$$

$$V_{O۲} = ۰/۲۱(\lambda-1)AF_{t,m} \quad (۲۲)$$

$$V_{H۲O} = H_۲ + ۲CH_۴ + m/۲C_nH_m \quad (۲۳)$$

بنابراین حجم گاز تر دودکش از مجموع حجم تمام این اجزا به دست می آید:

$$V_g = V_{CO۲} + V_{NO2} + V_{O۲} + V_{H۲O} \quad (۲۴)$$

۳- وضعیت موجود احتراق در نیروگاهها

در تعدادی از نیروگاههای قدیمی هوای مورد نیاز احتراق برای مصارف مختلف سوخت یا بعبارت دیگر برای تولید مگاواتهای مختلف توسط منحنی هایی که شرکت های سازنده برای تنظیم احتراق بویلر تهیه نموده اند، تعیین می گردد. در این منحنی ها که از طرف شرکت سازنده ارائه می‌گردد مقادیرغلظت اکسیژن گازهای حاصل از احتراق نسبت به دامنه بار نیروگاه تعیین شده است . وظیفه اپراتوردر اینگونه نیروگاهها، تنظیم دستی فرمان باز و بست دمپرهای دمنده های هوای ورودی به بویلر براساس تطابق مقادیر اکسیژن موجود در گاز خروجی و منحنی مشخصه می باشد. در اینگونه سیستمها پس از گذشت زمان زیادی ، از حساسیت و دقت سنسورهای اکسیژن آنالایزرکاسته شده و مقدار صحیحی را نشان نمی دهد. علاوه بر این بدلیل کهنگی مشعلها و فرسایش دیگرعوامل مکانیکی موثر در بهبود شرایط احتراق ، منحنی های توصیه شده از طرف شرکتهای سازنده کارایی خود را نداشته و در نهایت شرایط وضعیتی را مقتضی می نماید که اپراتور می بایستی بطور تجربی هوای مورد نیاز احتراق را تنظیم نماید. این کار بسته به تجربه کاری بهره برداران از طریق مشاهده وضعیت شعله و دود خروجی از دودکش های نیروگاه انجام می گیرد. در تعدادی دیگر از نیروگاهها، کنترل هوای مورد نیاز احتراق از طریق مدار کنترل احتراق صورت می پذیرد.

وظیفه سیستم کنترل احتراق ، تأمین بهینه هوای مورد نیاز برای حداکثر بازدهی احتراق در بویلر می باشد. سیگنال فرمان کنترلر حلقه احتراق توسط مدار اصلی سیگنال تقاضای بار تعیین می شود. کنترلر مربوطه با فرمان سیگنال بار و سیگنال مربوط به اکسیژن آنالایزر، سیگنال متناسب جهت تأمین اپتیمم هوای مورد نیاز احتراق را صادر می نماید . خروجی حلقه کنترل اصلی نقطه کار حلقه داخلی را مشخص می نماید .این سیگنال، میزان تقاضای دبی هوای ورودی به کوره است و با سیگنال دبی‌هوای محاسبه شده ، مقایسه و تفاوت آن دو وارد کنترل کننده حلقه داخلی می شود .

بدین ترتیب حلقه کنترل خارجی ، میزان هوای مورد نیاز را تعیین می کند و سیگنال هوای خروجی از فن دمنده هوای ورودی پس از تصحیح توسط کنترلر هوای اضافی ، باسیگنال هوای تئوری مقایسه و نهایتا هوای موردنیاز بویلر برای احتراق کامل با درصد هوای اضافی طراحی شده ، کنترل می گردد. خروجی کنترل کننده ، پس از تبدیل به فرمان نیوماتیک و توسط بازوهای مکانیکی به دمنده هوای میرا کننده (سمت راست و چپ) همزمان اعمال می شود .

www.SID.ir

Archive of SID

همانطور که قبلا نیز ذکر گردید بر اثر گذشت زمان، سنسورهای سیستمهای اکسیژن آنالایزرحساسیت و دقت خود را از دست داده و سیگنالهای ارسالی به کنترلر از مقادیر واقعی منحرف شده وسیستم دچار خطا می گردد.

در هر صورت در هنگامیکه تنظیم هوای مورد نیاز احتراق بعللی دچار اشکال گردد احتراق بویلر یا با هوای کمتر از اندازه یا با هوای بیش از اندازه انجام می گیرد.

- احتراق با هوای بیش از اندازه:

آنچه مسلم است با ورود بیش از حد هوای مورد نیاز احتراق در کوره و علی رغم کامل شدن احتراق(حداقل تشکیل CO)آن بخش از هوای اضافی که در واکنش احتراق سوخت دخالتی نداشته از داخل‌شعله و کوره عبور نموده و بر اثر تماس مستقیم با محصولات احتراق قسمتی از انرژی گرمایی حاصل از واکنش را جذب نموده و دمای آن افزایش می یابد، به همین دلیل قسمتی از انرژی حرارتی بجای انتقال به واتروالها و سوپر هیترها از طریق دودکش به هوای محیط انتقال می یابد .

- احتراق با هوای کمتر از اندازه (احتراق ناقص) :

در هنگامی که هوای مورد نیاز جهت احتراق کامل در کوره تأمین نگردد (حتی در هنگامیکه هوا درحد استوکیومتری تأمین شود) اکسیژن لازم جهت اکسیداسیون تمامی کربن سوخت و تشکیل گاز دی اکسید کربن (CO_2) فراهم نشده و بخشی از آن به گاز منواکسیدکربن (CO) و ذرات دوده تبدیل‌می‌گردد .

اگر از نظر انرژی تشکیل ، ملکولهای گاز دی‌اکسید کربن و منواکسیدکربن را مقایسه نمائیم بدلیل پایداری بیشتر گاز دی اکسید کربن نسبت به گاز منواکسید کربن انرژی آزاد شده از واکنش تبدیل کربن به گاز دی اکسیدکربن نسبت به واکنش تبدیل کربن به منواکسید کربن بیشتر می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با تولید گاز منواکسید کربن و دوده در واکنش احتراق سبب کاهش انرژی آزاد شده درکوره و افت راندمان آن می‌گردد[۷].

۴ - تلفات انرژی در بویلر ها و کاهش آن

بویلرها از جمله تجهیزاتی هستند که برای تولید بخار در پالایشگاهها و صنایع شیمیایی بطور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به هزینه بر بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن، بهینه سازی و بررسی عملکرد آنها از اهمیت ویژه ای بر خوردار می باشد. بطور کلی تلفات انرژی در یک بویلر نیروگاهی از طریق اتلاف حرارت از بدنه، اتلاف انرژی حرارتی از طریق بلودان بویلر و اتلاف حرارت از دودکش می باشد [۶] .

الف - اتلاف حرارت از بدنه :

اتلاف حرارت از بدنه ناشی از دو مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی بوده که به علت بالاتر بودن دمای بدنه بویلر از دمای محیط ایجاد می شود. انتقال حرارت تشعشعی به محیط با توان چهارم بدنه و همچنین ضریب صدور سطح بستگی دارد. بنابراین با کاهش دمای بدنه می توان به میزان قابل ملاحضه ای اتلاف انرژی از این طریق را کاهش داد. انتقال حرارت جابجایی به محیط نیز به اختلاف دمای بدنه و محیط وسرعت باد وابسته می باشد. در مجموع کاهش اتلاف انرژی از بدنه تنها با کاهش دمای بدنه قابل دسترسی می باشد. مراجع مختلف دمای بدنه بویلرهای بزرگ را حدود ۶۵/۵ درجه سانتیگراد پیشنهاد می کنند. لازم به ذکر است درصد اتلاف حرارت از بدنه بویلر های بزرگ با توجه به نرم جهانی حدود ۱ تا ۱/۵ درصد می باشد. [۶]

ب - اتلاف حرارتی بلودان بویلر:

آب تغذیه بویلرها شامل کندانسه ها و آب جبرانی می باشد. از آنجایی که در این آبها همواره مواد محلول و غیر محلول وجود دارد بمنظور جلوگیری از افزایش غلظت و بالا بردن کیفیت عملکرد بویلرها، لازم است مقداری از آب در گردش بویلر

www.SID.ir

Archive of SID

تخلیه شود. معمولا بلودان بویلرها بین ۱۵ - ۳ درصد ظرفیت بخار تولیدی را به خود اختصاص می دهد. تحقیقات نشان می دهد بویلرهایی که تخلیه اضطراری آن بیش از ۵ درصد نرخ تولید بخار آن باشد، برای نصب سیستم بازیافت انرژی از طریق تخلیه اضطراری مناسب هستند. بازیافت حرارت از آب تخلیه اضطراری از دیگر روشهای بازیافت انرژی بوده که از اهمیت ویژهای بر خوردار می باشد. باتوجه به بالا بودن دمای آب تخلیه اضطراری، می توان با قرار دادن یک مبدل از این انرژی به منظور پیش گرم کردن آب جبرانی استفاده نمود. [۶]

ج - اتلاف حرارت از دودکش:

گازهای خروجی از دودکش یکی دیگر از مهمترین پتانسیل های بازیافت انرژی دربویلرها محسوب می شود. از آنجایی که گازهای خروجی از دودکش دارای دمای نسبتا بالایی هستند، می توان از انرژی آنها برای گرم کردن آب تغذیه یا هوای ورودی به بویلر استفاده کرد. مطالعات نشان می دهد به ازای کاهش ۲۰ در جه سانتی گراد دمای گاز خروجی یک درصد به راندمان بویلر اضافه می شود. لازم به ذکر است پارامترهای محدود کننده میزان کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش، دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک می باشد. زیرا کاهش بیش از حد دما باعث ایجاد اسید سولفوریک شده و خوردگی تجهیزات را به دنبال خواهد داشت. یکی از عوامل مهم و موثر در تلفات ناشی از دودکش میزان در صد هوای اضافی در بویلر می باشد. در فرایند احتراق به دلیل چهار برابر بودن نسبت نیتروژن به اکسیژن، امکان بر خورد مناسب مولکول های سوخت با مولکولهای اکسیژن موجود در هوا نسبت به اکسیژن خالص کاهش می یابد. لذاجهت انجام فرایند احتراق به طور تقریبا کامل همانطور که در مباحث قبل به آن اشاره گردید باید هوای بیشتری نسبت به حالت استوکیو متری در فرایند احتراق وارد نمود. از طرفی افزایش بیش از اندازه هوای اضافی بدلیل جذب حرارت تولید شده در ناحیه کوره دمای آن افزایش یافته و بهمراه گازهای خروجی از دودکش به محیط منتقل می گردد بطوریکه باعث کاهش راندمان بویلر می شود. علاوه بر این ازدیاد هوای اضافی میزان اکسیژن فضای داخل بویلر را افزایش داده و به علت دمای بالا باعث خوردگی و خرابی زودرس قسمتهای داخلی آن می‌شود [۶].

عملکرد یک بویلر نیروگاهی با ظرفیت حرارتی Q_b ،ظرفیت بخار m_s ، نرخ مصرف سوخت m_f ، و راندمان η_b مشخص می شود. ظرفیت حرارتی بویلر به عنوان گرمای خروجی مفید تعریف می شود و بر حسب کیلو وات اندازه گیری می شود:

$$Q_b = m_s\Delta h_s + m_{rh}\Delta h_{rh} + m_{at}\Delta h_{at} + m_{bd}\Delta h_{bd} \qquad (۲۵)$$

که در آن m نرخ جریان جرم بخار یا آب در داخل بویلر و Δ h تغییر آنتالپی بخار یا آب است. زیر نویسهای bd,at,rh,s به ترتیب مشخص کننده مولد بخار، بازگرم کننده، تنظیم کننده دما و خاموش کردن در یک نیروگاه هستند. ظرفیت بخار m_s نرخ تولید بخار در مولد بر حسب kg/hr است. مصرف سوخت بویلر به صورت زیر داده می شود:

$$m_f = Q_b/(HHV\eta_b) \qquad (kg/s) \qquad (۲۶)$$

که در آن HHV مقدار ارزش حرارتی بالایی سوخت و η_b راندمان بویلر است. راندمان بویلر بر مبنای HHV سوخت برابر است با:

$$\eta_b = ۱۰۰\times \text{انرژی ورودی کلی سوخت/گرمای کلی اضافه شده به سیال عامل} \qquad (۲۷)$$

یا :

$$\eta_b = ۱۰۰ \times (۱- \text{انرژی ورودی کلی سوخت /اتلاف حرارتی کلی}) \qquad (۲۸)$$

یا:

$$\eta_b = ۱۰۰ \times (HHV - q_{\text{اتلافی}}) / HHV\ \% \qquad (۲۹)$$

اتلافهای کلی حرارت در بویلر شامل اتلاف گاز خشک(DGL) ، اتلاف رطوبت(ML) ، اتلاف رطوبت در هوای احتراقی(MCAL)، اتلاف احتراق ناکامل(ICL)، اتلاف کربن نسوخته (UCL) می باشد که اتلاف تشعشعی یا دیگر اتلافها در نظر گرفته نشده اند. اتلاف گاز خشک به صورت زیر داده می شود:

$$DGL = m_{dg}C_{pg}(t_g-t_a) \qquad (kj/kg) \qquad (۳۰)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن $m_{dg} = AF_{a,d} + 1- R - M - 9H$ کیلو گرم گاز خشک دودکش در هر کیلو گرم سوخت، $AF_{a,d}$ نسبت هوای خشک به سوخت واقعی بر حسب کیلو گرم هوا بر کیلو گرم سوخت، C_{pg} گرمای ویژه گاز خشک دودکش برابر با kj/(kgK) ۱/۰۵، R کسر جرمی پس مانده در هر کیلو گرم سوخت ، M کسر جرمی رطوبت در سوخت، H کسر جرمی هیدروژن در سوخت، t_g دمای گاز دودکش ترک کننده از بویلر، و t_a دمای هوای ورودی به بویلر است. این کمیت R که به داخل کوره وارد می شود، عبارت است از:

$$R = \text{جرم پس مانده/ جرم سوخت} = A/A_f \qquad (۳۱)$$

که در آن A و A_f به ترتیب کسر جرمی خاکستر در سوخت و در پس مانده هستند.اتلاف رطوبت به صورت زیر داده می شود:

$$ML = (M + 9H)\,\Delta h_m \qquad (kj/kg) \qquad (۳۲)$$

که در آن Δh_m تغییر آنتالپی ویژه رطوبت در سیستم بویلر است. اگر ۳۰۰ <tg باشد، داریم:

$$\Delta h_m = ۲۴۴۲ + ۲/۰۹۳ t_g - ۴/۱۸۷ t_f \qquad (kj/kg) \qquad (۳۳)$$

اگر tg<300 C باشد:

$$\Delta h_m = ۲۴۹۳ + ۱/۹۲۶ t_g - ۴/۱۸۷ t_f \qquad (kj/kg) \qquad (۳۴)$$

که در آن t_f دمای سوخت ورودی به سیستم بویلر است. رطوبت در اتلاف احتراق هوا بصورت زیر داده می شود:

$$MCAL = AF_{a,d} W C_{pw} (t_g - t_a) \qquad (kj/kg) \qquad (۳۵)$$

که در آن w نسبت رطوبت هوای ورودی بویلر و C_{pw} گرمای ویژه بخار آب و معادل ۱/۹۲۶ kj/ (kgK) است.

اتلاف احتراق ناکامل عبارت است از:

$$ICL = ۲۳۶۳۰ C_b\, CO / (CO + CO_۲) \qquad (kj/kg) \qquad (۳۶)$$

که در آن $C_b = C - C_r$ جرم کربن نسوخته شده در جرم سوخت ، C کیلوگرم کربن در کیلو گرم سوخت (تجزیه و تحلیل نهایی) ، C_r کیلو گرم کربن نسوخته در هر کیلو گرم سوخت پس ماند اضافه شونده به کوره، وCO و CO_2 غلظت این ترکیبات در گاز خشک دودکش بر حسب درصد و طبق تجزیه و تحلیل آنالایزر دودکش می باشند. اتلاف کربن نسوخته برابر است با:

$$UCL = C_r HHV_{\text{کربن}} = ۳۲۷۷۸ C_r \qquad (kj/kg) \qquad (۳۷)$$

ترم RUL بخاطر تشعشع و جابجایی از سطح خارجی بویلر به محیط اطراف و همچنین اتلافهای گذرا، شامل اتلافهای راه اندازی و خاموش کردن به وجود می آید. مقدار RUL نسبتا کوچک است. بنابر این راندمان بویلر با دانستن تمام اتلافها از معادله (۲۹) تعیین می شود. [3]

۵- تنظیم هوای اضافی بویلر بمنظور کاهش تلفات دودکش

در شکل (۲) نمودار غلظتهای دی اکسید کربن، منواکسید کربن و اکسیژن بر حسب تغییرات میزان هوای اضافی رسم شده است.

همانطور که در این شکل پیداست ، محدوده بالاترین راندمان کار کوره مشخص شده است. این محدوده مکانی است که بیشترین اختلاف غلظت میان منحنی های دی‌اکسیدکربن و منواکسیدکربن و اکسیژن موجود است به عبارت دیگر محدوده کاری است که در آن غلظت دی اکسید کربن حداکثر و مقادیر غلظت اکسیژن و منواکسید کربن در حداقل قرار دارند .

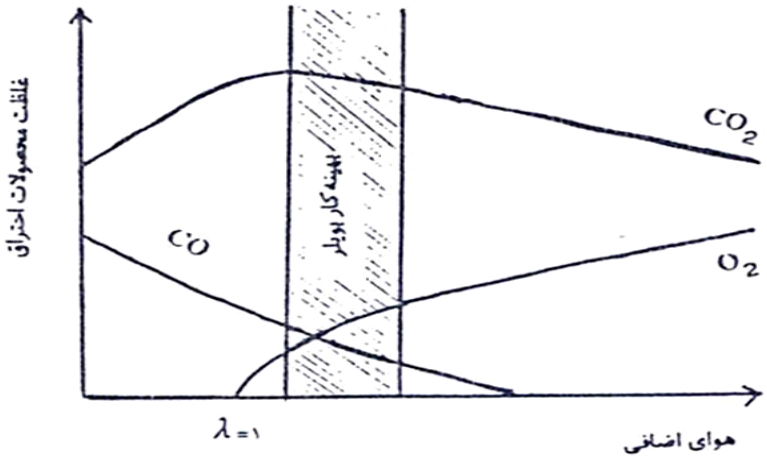
همانطـــور که در شکل (۲) مشاهده می شود محدوده هوای مصرفی در حالت بالاترین راندمان از مقدارهوای مصرفی در حالت استوکیومتری بیشتر و از حالتی که میزان منواکسید کربن به صفر می رسد کمتر می‌باشد .

به ازای مقادیر هوای اضافی بیش از محدوده بهینه کار کوره سبب افزایش تلفات انرژی حرارتی و به ازای محدوده کمتر از آن ، تلفات انرژی پتانسیل شیمیایی ناشی از خروج کربن و گاز منواکسید کربن افزایش می یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

منحنی فوق به ازای مصرف ثابت سوخت ترسیم شده است که میبایستی برای مصارف مختلف و یا به عبارت دیگر برای مگاواتهای مختلف بررسی گردد. جهت این امر می توان با نصب یک آنالایزر گازدودکش در مسیر گازهای خروجی از بویلر(قبل از پیش گرمکن های هوا) مقادیر O_2,CO,CO_2 موجود در گازهای حاصل از احتراق را اندازه گیری نمود جهت رسم منحنی های مورد نیاز می بایستی از حداقل بار یا حداقل مصرف سوخت یک واحد شروع نمود. پس از ثابت شدن سوخت مصرفی و یا انرژی خروجی براحتی می توان با تغییرات هوای ورودی به کوره تغییرات غلظت گازهای فوق را بررسی ورسم نموده و محدوده هوای مصرفی برای وضعیت بهینه احتراق را مشخص نمود.



شکل۲- منحنی غلظت گازهای حاصل از احتراق نسبت به تغییرات هوای اضافی در کوره

منحنی شکل (۳) نتایج حاصل از آنالیز انجام گرفته بر روی گازهای خروجی از بویلر یکی از نیروگاههای کشور را نشان می دهد.

همانطور که در این منحنی نشان داده شده است با گذشت زمان دمپرهای هوای ورودی به فن های دمنده هوای بویلر بازتر شده و اکسیژن بیشتری به محفظه کوره وارد می گردد. با افزایش غلظت اکسیژن در کوره غلظت گاز CO نیز کاهش می یابد. این کاهش تا رسیدن به غلظت صفر ادامه می یابد. پس از اتمام گاز CO در محفظه کوره با افزایش هوای ورودی به کوره سبب رقیق شدن گاز CO_2 در محفظه کوره می گردد. همانطور که در منحنی شکل(۳) نشان داده شده است، خط عبوری از غلظت ۳/۷۵ درصد اکسیژن، منطقه بهینه کارکرد احتراق در بویلر را نشان می دهد. در غلظت کمتر از این مقدار اکسیژن، احتراق ناقص و در غلظت بیشتر از آن علاوه بر اتلاف حرارتی بیشتر از دودکش سبب افزایش آلاینده NOxنیز می گردد که در هر صورت سبب کاهش راندمان احتراق در بویلر می گردد. این منحنی توسط نرم افزار دستگاه آنالایزر گازهای حاصل از احتراق ترسیم شده است که نوسانات ایجاد شده در آن ناشی ازکوتاه بودن زمان ما بین اندازه گیری توسط دستگاه آنالایزر می باشد. [۷]

بطور کلی هدف اصلی در این مقاله تنظیم هوای اضافی در بویلر های نیروگاهی یا دیگر کوره های مشابه می باشد. رسم منحنی شکل (۳) تنها برای یک بویلر نیروگاهی انجام شده که با ثبت مداوم آنالیز گازهای خروجی نسبت به تغییرات هوای ورودی (با سوخت ثابت) در هر بویلر یا کوره دیگری در صنایع مختلف قابل انجام می باشد بنابراین هوای بهینه برای یک سوخت ثابت مشخص، و می توان برای مصارف دیگر سوخت نیز تعیین گردد.

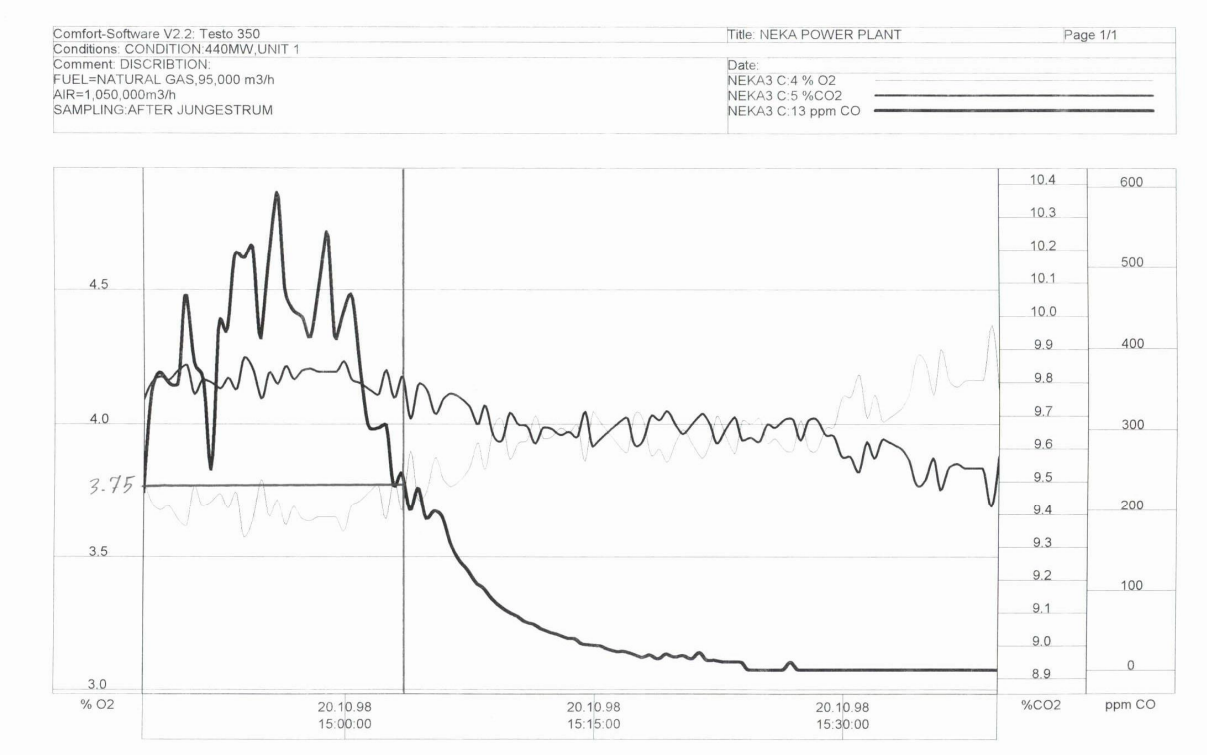
بدین ترتیب بارسم منحنی‌های مختلف برای مصارف مختلف سوخت ، محدوده کار بهینه برای هر مگاوات مشخص و در نهایت می توان منحنی نسبت هوا به سوخت برای مگاواتهای مختلف را ترسیم و در اختیار بهره برداران قرار داد.

www.SID.ir

Archive of SID

۶- نتیجه گیری

همانطور که در مباحث قبل به آن اشاره گردید اتلاف انرژی در یک بویلر نیروگاهی ناشی از عوامل متعددی می باشد که یکی از این عوامل میزان درصد هوای اضافی به بویلر می باشد. با تنظیم بهینه هوای اضافی به بویلر که یکی از راههای ساده و کم هزینه در کاهش تلفات ناشی از دودکش محسوب می‌گردد می توان به نتایج قابل توجهی دستیابی نمود. بر همین اساس در ادامه به نتایج تجربی حاصل از این آزمایشات بر روی تعدادی نیروگاهها که در هنگام نمونه برداری و آنالیز با این مشکل مواجه بوده اند اشاره می گردد.



شکل (۳) منحنی نتایج حاصل از آنالیز انجام گرفته بر روی گازهای خروجی از بویلر

طی مراجعه و اندازه گیری و آنالیز گازهای خروجی از بویلر واحدها ی نیروگاههای کشور در اکثر موارد اشکالاتی در سیستم تنظیم نسبت سوخت به هوا مشاهده گردید . نیروگاه زرگان بدلیل خرابی اکسیژن آنالایزرهای موجود در مسیر دود خروجی از واحد، در لحظه آزمایش بعلت کمبود هوای اضافی مورد نیاز، غلظت منواکسید کربن از مرز ۹ گرم بر متر مکعب تجاوز نموده بود که با تنظیم مقطعی آن سبب ۳ مگاوات افزایش بار را در پی داشت .

نیروگاه بندرعباس نیز در لحظه آزمایش بدلیل افزایش هوای اضافی مورد نیاز میزان اکسیژن وگازهای اکسید ازت موجود در گاز خروجی از بویلر آن افزایش یافته و باعث تلفات انرژی و در نتیجه افت نسبی راندمان شده است که با کم نمودن نسبت هوا به سوخت به میزان ۵ مگاوات افزایش بار را نشان داده است .

نیروگاه شهید منتظری اصفهان نیز همانند نیروگاه زرگان با همین مشکل مواجه بود که طی اندازه‌گیری بعمل آمده میزان گاز منواکسید کربن اندازه گیری شده در گاز خروجی از بویلر آن از مرز ۴۰۰۰ پی پی ام گذشته بود که با تنظیم نسبت سوخت به هوا برای همان مگاوات تولیدی سبب صرفه جویی ۱ تن در ساعت در مصرف سوخت گردید. جداول (۲) و (۳) و (۴) آنالیز کامل گازهای حاصل از احتراق نیروگاههای مورد آزمایش را بهمراه شرایط کارکرد بویلر در وضعیت قبل (۱) و بعد از اصلاحات (۲) نشان می دهد. همچنین میزان تغییرات راندمان و درصد هوای اضافی به بویلر نیز محاسبه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلرنیروگاه زرگان

شماره	بار MW	نوع سوخت	مصرف سوخت m^3/hr	دمای گاز خروجی C	دمای هوا C	% O_2	% CO_2	راندمان به درصد	CO ppm	NO ppm	NO_2 ppm	NO_x ppm	SO_2 ppm	درصد هوای اضافه
۱	۱۴۱	گاز	۳۵۲۵۰	۱۶۱/۴	۳۴	۰/۶	۱۰/۸	۸۱/۳	۱۰۴۰۴	۲۳۴	۰	۲۳۴	۰	۳
۲	۱۴۴	گاز	۳۵۲۵۰	۱۶۴	۳۴	۱/۱	۹/۹	۸۴/۳	۵	۳۰۹	۰	۳۰۹	۰	۵/۵

جدول ۳- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلر نیروگاه منتظری

شماره	بار MW	نوع سوخت	مصرف سوخت ton/hr	دمای گاز خروجی C	دمای هوا C	% O_2	% CO_2	راندمان به درصد	CO ppm	NO ppm	NO_2 ppm	NO_x ppm	SO_2 ppm	درصد هوای اضافه
۱	۲۰۰	مازوت	۴۸/۵	۱۶۱/۸	۳	۵/۱	۱۱/۹	۸۶	۸۹۴	۳۱۳	۰	۳۱۳	۱۳۵۵	۷
۲	۲۰۰	مازوت	۴۷/۵	۱۶۵/۲	۳	۵/۳	۱۲/۱	۸۹	۸	۳۸۰	۰	۳۸۰	۱۳۵۵	۱۱

جدول ۴- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلر نیروگاه بندر عباس

شماره	بار MW	نوع سوخت	مصرف سوخت ton/hr m^3/hr	دمای گاز خروجیC	دمای هوا C	% O_2	% CO_2	راندمان به درصد	CO ppm	NO ppm	NO_2 ppm	NO_x ppm	SO_2 ppm	درصد هوای اضافه
۱	۳۱۰	مازوت و گاز	۴۲/۷ ۲۷۰۰۰	۱۵۵/۳	۲۲	۶	۱۲/۹	۸۲/۳	۰	۱۱۳	۰	۱۱۳	۲۵۰	۱۶
۲	۳۱۵	مازوت و گاز	۴۲/۷ ۲۷۰۰۰	۱۶۰	۲۲	۵	۱۲/۷	۸۴/۵	۳	۹۵	۰	۹۵	۲۵۰	۱۲

همانطور که در جداول فوق مشاهده می گردد با تغییر (افزایش یا کاهش) میزان هوای اضافی به بویلر این سه نیروگاه، میزان تلفات انرژی از طریق دودکش کاهش یافته و راندمان احتراق به میزان قابل توجهی افزایش داشته است. کاهش این تلفات در برخی نیروگاهها بصورت افزایش بار الکتریکی و در برخی با کاهش مصرف سوخت نمایان می گردد. برخی از آلاینده های منتشره از دودکش نیز به شکل قابل توجهی کاهش پیدا نموده اند [۷].

مراجع

[1] - J.A.Barnard, J.N, Bradley, Flame & Combustion second edition,1985.
[2] - Gerd Knope, Flue Gas Analysis, 1989.
[3] - Dr. Andrew K.Jonws, Opimized Combustion Using Computational Modeling Combustion Unit,A.B.B
[4] - Anthony R.Martin,Maximizing Furnace Combustion Efficiency , Die Casting Engineer Magazine , July/August 1988.
[۵] - نیکولای خارتچنکو، سیستمهای انرژی پیشرفته، ترجمه اصغر برادران رحیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۰
[۶] - رسول سلفیان، فریبرز کریمی، ملک ارسلان صدری، مقاله بررسی عملکرد و میزان تلفات انرژی بویلر های پالایشگاه اصفهان، همایش ملی انرژی،۱۳۸۲
[۷] - دکتر منصور غیاث الدین، پروژه ملی بررسی اثرات زیست محیطی نیروگاههای سوخت فسیلی کشور، آنالیز گاز دود کش نیروگاهها، ۱۳۷۵.

www.SID.ir