

## احتراق

### ۱-۱ اصول و قواعد کلی احتراق

#### واکنش های احتراق

احتراق به عنوان واکنش شیمیایی سریع اکسیژن در مقابل عناصر قابل اشتعالی

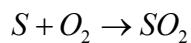
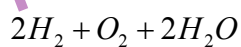
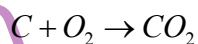
از سوخت تعریف می شود سه عنصر شیمیایی قابل اشتعال در زغال و نفت وجود

دارد که کربن هیدروژن و گوگرد می باشند.

معادلات شیمیایی اصلی برای یک احتراق کامل به شرح زیر می باشد:

(۴-۱)

(الف)



هنگامی که اکسیژن کافی موجود نباشد کربن بطور کامل نسوخته و به شکل

مونوکسید کربن باقی می ماند.

به منظور سوختن کامل یک سوخت چهار شرط اساسی زیر باید باشند.

۱- مقدار کافی اکسیژن برای سوخت باید فراهم شود.

۲- اکسیژن و سوخت نباید کاملاً با هم ترکیب شوند.

۳- ترکیب سوخت و اکسیژن هوا باید در حدود یا بالاتر از دمای افروزش نگه

داشته شود.

۴- حجم کوره باید به اندازه ای باشد که به ترکیب حاصل فرصت احتراق داده و شرایط آن را فراهم سازد.

مشعل کوره باید به اندازه ای باشد که به ترکیب حاصل فرصت احتراق داده و شرایط آن را فراهم سازد.

مشعل کوره اکسیژن هوا را فراهم کرده و بمنظور فرایند احتراق عمل ترکیب انجام می گیرد. از آنجائیکه ترکیب کامل اکسیژن هوا و سوخت در واقع غیرممکن است به این منظور اکسیژن زیادی باید فراهم شود تا فرایند احتراق کاملی رخ دهد. فرآیند ترکیب و میزان اکسیژن اضافی فراهم شده مشخص کننده این است

که آیا گازهای مفر حاوی هر دو حاصل از احتراق کامل و غیر کامل برابر خواهند بود. محصولات حاصل از احتراق ناقص شامل سوخت مشتعل نشده (نسوخته) = مونوکسیدکربن و مقدار کمی از سوخت ترکیب شده با اکسیژن می باشد اکثر محصولات حاصل از احتراق ناقص آلاینده های جوی می باشند.

### میزان گرمای سوخت (گرمای احتراق)

میزان گرمای سوخت از لحاظ مقدار یا میزان گرمای استاندارد احتراق آن برابر می باشد البته با اثری معکوس همچنین خاطر نشان کردیم که میزان گرمای مازوت ممکن است بطور دقیق تری از گرمای احتراق اجزای تشکیل دهنده بدست آید البته این امر در صورتی امکانپذیر است که ترکیب شیمیایی مشخص می شود (به جدول (3.1) مراجعه کنید. راههای برآورد میزان گرما از طریق علم مربوط به نوع

مازوت یا گرانی (ثقل) ویژه آن مشخص شدند. میزان گرمای گاز طبیعی تقریباً از طریق گرمای ترکیبات شیمیایی آن مشخص می شود.

در بخش 1,3 نشان دادیم که چگونه میزان گرمای تقریبی زغال ممکن است بر مبنای درجه آن بدست آید. هنگامی که تحلیل نهایی مشخص می شود میزان گرما برای احتراق کامل ممکن است به طور دقیق از طریق معادله دولانگ- برتلوت [ معادله (۹.1) ] بدست می آید بویژه در مسائلی از جمله احتراق ناقص زغال مطلوب است که میزان گرمای زغال مستقیماً از گرمای احتراق اجزای تشکیل دهنده آن بدست می آید. گرمای احتراق برای اجزای تشکیل دهنده اصلی

زغال در جدول ۱.۴ نشان داده شده است. اگرچه گرمای آزاد شده در حین سوخت کربن و تبدیل آن به مونوکسید کربن (CO) در جدول ۱.۴ نشان داده شده اما براحتی و به واسطه تفاوت میان گرمای احتراق کربن و مونوکسید کربن درج شده در جدول ۱.۴ قابل تشخیص می باشد.

در محاسبه و بررسی سوخت خوجود برای احتراق از طریق تجزیه نهایی زغال بطور کلی فرضیه حاصل می شود که تمام کربن و گوگرد به شکل عنصری و بمنظور احتراق موجود می باشد. با وجود این تمامی اکسیژن و نیتروژنی که از تجزیه نهایی گزارش شده با هیدروژن ترکیب می شوند. کل هیدروژن موجود برای احتراق کمتر از میزان مورد نیاز جهت ترکیب با اکسیژن و نیتروژن موجود در ذغال گزارش شده که به ترتیب  $H_2O^+$  و  $H_2N$  می باشند با توجه به کلیه فرضیات و در صورتی که تمام کربن نسوخته و به مونوکسید کربن  $CO_2$  تبدیل

شود از گرمای احتراق درج شد و در جدول ۴-۱ برای معرفی معادله ای جدید که به فرمول دولانگ - برتلود بسیار نزدیک می باشد می توان استفاده نمود.

برای ۱ گرم (g) زغال حاودی کربن  $C'W/O$  گرمای آزادشده و از طریق احتراق کربن در موقعیت استاندارد به شرح زیر می باشد.

$$= \left(\frac{C'}{100}\right)g \times \frac{97.000 \text{ cal / gmol}}{12 \text{ g / gmol}} = 81.0C \text{ cal / g}$$

به همین نحو برای گوگرد (هنگامی که  $S' =$  گوگرد  $W/O$  می باشد)

$$= \left(\frac{S'}{100}\right)g \times \frac{69.400 \text{ cal / gmol}}{32 \text{ g / gmol}} = 21.8S \text{ cal / g}$$

با وجود این چنانچه از هیدروژن  $H'W/O$  و اکسیژن  $O'W/O$  برخوردار باشیم

هیدروژن موجود  $H' - O'/8$  می باشد بدینوسیله:

$$= (H' - \frac{O'}{8}) \left(\frac{1}{100}\right)g \times \frac{68.310 \text{ cal / gmol}}{2 \text{ g / gmol}}$$

$$= 81.0C' + 341.5(H' - \frac{O'}{8}) + 21.8S' \text{ cal / g}$$

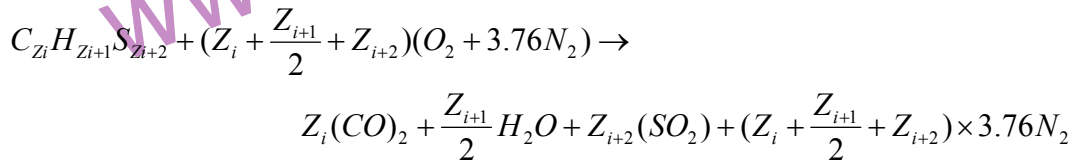
مقادیر  $C', H', O', S'$  بواسطه وزن کربن، هیدروژن، اکسیژن و گوگرد درصدی می باشند.

### نسبت هوا به سوخت از لحاظ نظری

اکسیژن مربوط به منظور فرآینداحتراق بواسطه اکسیژن موجود در هوا برای مشعل فراهم می شود. با توجه به طرح کوره دیگ بخار، فراهم نمودن اکسیژن کافی برای احتراق کامل به انضمام اکسیژن اضافی بمنظور فرایند ناقص ترکیب جریانی عادی می باشد. برای هر سوخت مولهای هوای خشک که از لحاظ نظری برای احتراق کامل لازم می باشد از طریق مولهای اکسیژن مورد نیاز مشخص می شوند. برای

سوختی که حاوی کربن، هیدروژن و گوگرد باشد ممکن است معادله شیمیایی متعادلی به شرح زیر ارائه شود:

از آنجائیکه هوا حاوی  $21\% O_2, N_2 79\%$  می باشد نسبت به مول های  $N_2$  به مولهای  $3074 O_2 = 79/21$  می باشد بدینوسیله در صورتی که سوخت در هوا مصرف شده و بسوزد نسبت زیر بدست میآید.



مشخص است که برای هر مول از کربن و گوگرد موجود در سوخت،  $4/76$  مول هوا مورد نیاز می باشد و برای هر کیلوگرم اتم از هیدروژن موجود در سوخت  $4/76/2 = 2/38$  مول از هوا مورد نیاز می باشد. از آنجائیکه وزن مولکولی هوا  $28/9 \text{ g/mol}$  می باشد، جرم هوای مورد نیاز برای هر گرم کربن،  $m'_{a/c}$  به شرح ذیل می باشد.

$$m'_{a/c} = \frac{1 \text{ g}}{12 \text{ gC} / \text{gmolC}} \times \frac{4.76 \text{ gmol air}}{\text{g molC}} \times 28.9 \text{ g} / \text{gmol air} = 11.47 \frac{\text{g air}}{\text{g carbon}}$$

به همین نحو  $4/3$  گرم هوا در ازای هر گرم ا گوگرد و  $34/4$  گر هوا در ازای هر گرم ا هیدروژن موجود مورد نیاز می باشد بدینوسیله:

$$m'_a = \left[ 11.47C' + 34.4(H' - \frac{O'}{8}) + 4.3S' \right] \left( \frac{1}{100} \right)$$

هنگامی که  $m'_a$  گرم هایی از هوای مورد نیاز برای احتراق کامل از ۱ گرم سوخت را نشان می دهد رابطه فوق برقرار است (جرم هوا / جرم سوخت)

هنگامی که  $m'_a$  گرم هایی از سوخت مورد نیاز برای احتراق کامل از ۱ گرم سوخت را نشان می دهد رابطه فوق برقرار است (جرم هوا / جرم سوخت)

گسترده نسبت های هوا به سوخت برای ذغال از لحاظ نظری از ۸/۵ تا ۱۲/۵ می باشد نسبت نظری هوا به سوخت برای مایع با سوخت های گازی با استفاده از معادله (۴.۴) یا شکل دیگری که تعدادی از اتم های هر کدام از عناصر اشتعالی را در یک مول مایع یا گاز مورد استفاده قرار می دهد قابل محاسبه می باشد. به این معنی

که....

$$M'_{a/F} = 4.76Z_c + 2.38Z_H + 4.76Z_S$$

$$M'_{a/F} = \text{moles of air per mole of fuel}$$

$$Z_c, Z_H, Z_S = \text{atoms C, H, and S per mole of fuel}$$

اتم های  $S, H, C$  هوای مورد نیاز در ازای هر مول از سوخت مصرف شده

( سوخته) باید همیشه بر مبنای تحلیل هر کدام از فرآیند های احتراق مشخص شود

هوای اضافی بیشتر از کمترین میزان نظری بمنظور دسترسی به احتراق کامل باید

فراهم شود. هوای اضافی بعنوان درصدی یا بواسطه کاربرد استعمال ضریب رقیق

سازی بیان می شود.

درصد هوای اضافی فراهم شده در حین عملیات به شرح زیر می باشد.

$$\% \text{excess air} = \frac{(m'_a)_{op} - (m'_a)_{theo}}{(m'_a)_{theo}} \times 100 = \frac{\text{used retically required}}{\text{mass of air theoretically}} \times 100$$

و این در حالی است که  $d$  ضریب رقیق سازی به شرح ذیل می باشد.

$$d = \frac{(m'_a)_{op}}{(m'_a)_{theo}} \times 100 = \frac{\text{mass of air to be used}}{\text{mass of air theoretically required}}$$

درصد هوای اضافی برای سیستم های کوره دیگ بخار با بالاترین میزان سود و کارایی بین ۱۵ و ۳۰٪ اختلاف دارد.

مثال ۱.۴

یک سوخت مایع حاوی ترکیبات شیمیایی  $C_{10}H_{22}$  با ۳۰٪ هوای اضافی می سوزد نسبت بکار رفته هوا به سوخت را مشخص کنید.

راه حل: مبنای راه حل : ۱ کیلوگرم مول از سوخت با در نظر گرفتن  $Z_C = 10$  و  $Z_H = 22$  می باشد.

بنابراین با توجه به معادله (۶.۴) رابطه زیر برقرار است.

$$M'_{a/F} = 4.76(10) + 2.38(22) = 99.96 \text{ kg mol air/kg mol fuel}$$

$$\text{وزن نظری هوای مورد نیاز} = 99.96 \text{ kg mol} \times 28.9 \frac{\text{kg}}{\text{kg mol}} + 2889 \text{ kg}$$

$$\text{وزن سوخت مورد استفاده} = Z_C(12) + Z_H(1) = 142$$

$$\text{نسبت سوخت/هوا} = \frac{2889 \text{ KG} \times 1.3}{142 \text{ kg}} = 20.3$$

نسبت واقعی هوا به سوخت:

شکل ۴-۱ نشان دهنده روندی محاسبه ای می باشد که بمنظور برقراری نسبت هوا به سوخت برای فرآیند احتراق مورد نظر توسط طرح و الگوساز مورد استفاده قرار می گیرد. نسبت واقعی بدست آمده پس از ساخت مشعل باید از طریق اندازه گیری های



تجربی اجزای سازنده گازی گاز دودکش برآورد شود. بمنظور اجرای این اندازه گیری سه روش متفاوت وجود دارد. اما یکی از این روشها که به وفور مورد استفاده قرار می گیرد تجزیه گر ساده گاز تراپردی ارست می باشد. تجزیه گر گاز ارست بمنظور معین نمودن و تشخیص اجزای حجمی و مولی مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، و اکسیژن در گاز مفر خشک مورد استفاده قرار می گیرد.

در یک اندازه گیری ویژه و نمادین یک نمونه گاز دودکش  $100\text{-cm}^3$  از روی آب در موقعیت های فراگیر جمع آوری شده و از یک سری محلول های شیمیایی عبور داده می شود. معمولاً اینگونه فرض می شود که نمونه از بخار و  $\text{SO}_2$  آزاد می باشد

زیرا هر بخار آبی در حین فرآیند جمع آوری تقطیر شده و  $\text{SO}_2$  نیز در گاز دودکش با آب موجود در محفظه جمع آوری فعل و انفعال انجام خواهد داد. از نمونه گاز دودکش برای دی اکسید کربن، مونوکسید کربن، اکسیژن و نیتروژن تجزیه می شود. معمولاً شناسگر (معرف) های به کار رفته محلول  $\text{KOH}$  بمنظور جابجایی  $\text{CO}_2$  محلول پایروگلول برای جابجایی  $\text{O}_2$  و مخلوط کلرید کاپروس

( $\text{Cu Cl}_2$ ) برای جابجایی  $\text{CO}$  می باشد آخرین گازی که جذب نشده باقی می ماند نیتروژن می باشد.

برای سوخت مایع تجزیه های نهایی و تجزیه ارست بمنظور ارزیابی نسبت واقعی هوا به سوخت کافی می باشند. تجزیه زائدات باقیمانده به عنوان ارزیابی تجزیه میزان گرمای بالاتر از آنها محسوب می شود. نتایج این تجزیه در واحدهای انرژی هر واحد از جرم زائد ( $\text{KJ/kg}$ ) گزارش می شوند. تجزیه زائدات بر این فرض می باشد که



تمام کربن نسوخته و خاکستر در حفره خاکستر پایین کوره جمع می شود. همچنین این تجزیه زائدات بعنوان کسر جرمی از کربن زائد (کیلوگرم ها از کربن زائد شد) یادرصدی از کربن اشتعالی که زائد شده است به حساب می آید در صورتی که  $32/778 \text{ kJ/Kg}$  بعنوان HHV (میزان گرمای بالا) برای کربن خالص در نظر گرفته شده بنابراین  $\beta$  کسر جرمی از کربن زائد شده (kg کربن / kg زائده) به شرح ذیل می باشد.

$$\beta = \frac{HHV.refuse}{HHV.purecarbon} = 3.05 \times 10^{-5} (HHV.refuse)$$

نسبت واقعی هوا به سوخت  $(m'_a)_{act}$  در فرآیند احتراق از طریق اطلاعات زائد حاصل و اطلاعات تجزیه نهایی و تجزیه ارست قابل محاسبه می باشد از تجزیه زائد حاصل  $m'_b$  جرمی از کربن سوخته شده در ازای هر واحد جرم زغال بدست می آید.

$$(m'_a)_{act} = \frac{kg \text{ air used}}{kg \text{ coal burned}} = \frac{\frac{mol \text{ air} \times \frac{kg \text{ air}}{mol \text{ air}}}{mol \text{ C} \times \frac{kg \text{ C}}{mol \text{ C}}} \times m'_b}{\frac{mol \text{ air}}{mol \text{ C burned}}}$$

$$(m'_a)_{act} = m'_b \left( \frac{28.9}{12} \right) \frac{mol \text{ air}}{mol \text{ C burned}} = 2.4 m'_b \times \frac{4.76 \text{ mol air}}{3.47 \text{ mol C}} \times \frac{mol N_2 \text{ in air}}{mol \text{ C}}$$

$$= 3.04 m'_b \frac{mol N_2 \text{ in air}}{mol \text{ C}}$$

در صورتی که هیچ نیتروژنی در سوخت وجود نداشته باشد مول های  $N_2$  موجود در هوا در ازای هر مول از کربن سوخته از طریق اجزای جمعی در تجزیه ارست حاصل می شود. بدین ترتیب رابطه زیر برقرار است.

$$(m'_b)_{act} = 3.04 m'_b \frac{(N_2)_{FG}}{(CO)_{FG} + (CO_2)_{FG}}$$

و این در صورتی است که  $(N_2)_{FG}, (CO_2)_{FG}, (CO)_{FG}$  اجزای جمعی  $N_2, CO_2, CO$  موجود در گاز دودکش می باشند با وجود این، کسر جرمی نیتروژن موجود در زغال  $(kgN_2/kgC)$  به خطای زیر در  $(m'_a)_{ack}$  منجر می شود.

$$m'_N \frac{kg N_2}{kg C} = m'_b \frac{kg C \text{ burned}}{kg coal} \left( \frac{4.76 \times 28.9}{3.76 \times 28} \right) \frac{kg air}{kg N_2} = 1.3 m'_N m'_b$$

بنابراین:

$$(m'_b)_{act} = 3.04 m'_b \frac{(N_2)_{FG}}{(CO)_{FG} + (CO_2)_{FG}} - 1.3 m'_N m'_b$$

اجزای جمعی  $(N_2)_{FG}, (CO_2)_{FG}, (CO)_{FG}$  موجود در گاز دودکش از طریق تجزیه ارست بدست می آیند همچنین  $m'_b$  از طریق تجزیه زائد و  $m'_N$  از طریق تجزیه نهایی سوخت حاصل می شوند میزان  $m'_b$  از طریق اطلاعات زائده و بواسطه محاسبات زیر بدست می آید.

$$m'_{Air} = 1.0 - \beta = \frac{kg \text{ ash}}{kg \text{ refuse}}$$

$$m'_r = \frac{kg \text{ refuse}}{kg \text{ coal}}$$

$$m'_c = m'_r - m'_a = \frac{kg \text{ unburned carbon}}{kg \text{ coal}}$$

و سرانجام  $m'_b$  به قرار زیر است.

$$m'_b = \frac{C'}{100} - m'_c = \frac{kg \text{ carbon burned}}{kg \text{ coal}}$$

این ترند به منظور مقایسه نسبت نظری هوا به سوخت در مقابل نسبت واقعی هوا به سوخت قابل استفاده می باشد.

۳-۴ تعادل های جرم و انرژی

## تعادل در جرم کوره

محاسبه تعادل و توازن مواد برای یک کوره شامل همان نظریات اساسی در مورد کوره های گازی، زغالی، و نفت سوز می باشد. تعادل مواد در یک فرآیند احتراق ساده،

جرم سوخت و هوای فراهم شده و برای کوره (با رطوبت موجود در هوا) و جرم خاکستر و فرآورده های حاصل از احتراق در کوره را تشکیل می دهد. شکل ۴.۳ نشان دهنده روابط درونداد و برونداد برای تعادل و توازن جرم می باشد.

تجزیه نهایی زمان ضروری نمی بتش اما یک تجزیه بمنظور مشخص نمودن محتویات کربن رطوبت و خاکستر لازم بوده و باید اجرا شود. در صورتی که هدف از

این تعادل نشان دادن شرایط کارکرد واقعی باشد در آن صورت تجزیه

(مثل تجزیه ارست) گاز دودکشی لازم و ضروری است. علاوه بر آن زائده حاصل از کوره باید برای خاکستر، کربن نسوخته و مواد دیگر تجزیه شود. هوایی که وارد کوره می شود احتمالاً از میانگین ترکیبات جوی و محتویات رطوبت بوده و یا اینکه فشار و رطوبت موجود ممکن است ارزیابی شوند.

تعادل هر ماده ای مستلزم مینا و اساسی برای محاسبه می باشد. این مینا ممکن است جرم واحد سوخت یا جرم سوخت بکاررفته در یک چرخه از عملکردی مشخص مثل دوره ای ۲۴ ساعته باشد متناوباً ممکن است ما ۱ کیلوگرم مول از سوخت در صورتی که ترکیبات آن شناخته شده می باشند یا ۱ کیلوگرم مول از ترکیب ویژه ای را (برای مثال کربن) استفاده کنیم.

شکل ۳.۴ (الف) اجزای تشکیل دهنده اصلی برای تعادل جرم کوره/ دیگ بخار؛ (ب)

مثالی از یک تعادل جرمی ویژه

ابتدا بگذارید تعادل جرمی را از نقطه نظر یک طراح بررسی کنیم.

مثال ۲.۴

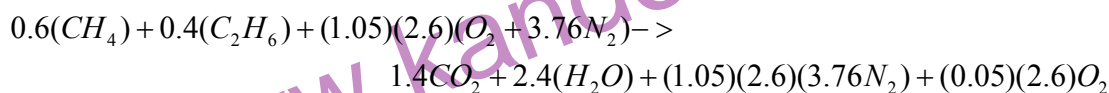
کوره ای را تصور کنید که گازی طبیعی در آن، حاوی ۶۰٪ متان و ۷۰٪ اتان، ۱۵٪ از هوای مورد نیاز برای احتراق کامل می سوزد. در این شرایط ما باید پخش و توزیع جرم فرآورده های حاصل از احتراق را مشخص نمائیم.

راه حل: اساس راه حل ۱ گرم مول سوخت گازی می باشد. اگر سوخت گازی را

بعنوان گاز کاملی فرض کنیم در آن صورت هر گرم مول از سوخت گازی حاوی ۰/۶

مول متان و ۰/۴ مول اتان خواهد بود. بنابراین معادله شیمیایی اصلی ما به شرح زیر

خواهد بود.



۱۴.۴

توجه کنید که بمنظور ایجاد تعادل و سنجش معادله شیمیایی فوق الذکر را بعنوان

تعداد مولهای  $CO_2$  دانسته و آن را از تعادل کربن مشخص می نمائیم.

$$x = 0.6 + 0.4(2)$$

و سپس تعداد مولهای  $H_2O$  را از تعادل هیدروژن تشخیص می دهیم.

$$2y = 0.6(4) + 0.4(6)$$

سرانجام مولهای اکسیژن را، Z، که باید به منظور فراهم سازی  $CO_2$  و  $H_2O$  شکل گرفته اضافه شوند، مشخص می نماییم.

$$2z = 1.4(2) + 2.4$$

با معادله شیمیایی متعادل و دانستن وزنهای مولکولی، می توانیم جرم بخارهای حاصل را مشخص نماییم.

$$\text{mass of } CO_2 \text{ produced} = 1.4 \frac{\text{g mol}}{\text{g mol fuel}} \times 44 \text{ g / g mol} = 61.6 \text{ g / g mol fuel}$$

$$\text{mass of } H_2O \text{ produced} = 2.4 \frac{\text{g mol}}{\text{g mol fuel}} \times 18 \text{ g / g mol} = 43.2 \text{ g / g mol fuel}$$

$$\text{mass of } N_2 \text{ remaining} = (1.05)(2.6)(3.76) \frac{\text{g mol}}{\text{g mol fuel}} \times \frac{28 \text{ g}}{\text{g mol}} = 287.4 \frac{\text{g}}{\text{g mol fuel}}$$

$$\text{mass of } O_2 \text{ remaining} = (0.05)(2.6) \frac{\text{g mol}}{\text{g mol fuel}} \times \frac{32 \text{ g}}{\text{g mol}} = 4.2 \text{ g / g mol fuel}$$

محاسبات جرم - تعادل برای یکی کوره زغال سوز تقریباً پیچیده است هنگامی که ما سعی در ایجاد تعادلی جرمی در یک کوره کارکرد داریم این پیچیدگی افزایش می یابد در این مورد اطلاعات زیر به مهندس مربوطه ارائه می شود. تجزیه سوخت، تجزیه زائده های موجود در حفره خاکستر، و تجزیه گاز دودکش، فشار هوای وارد شده کاربرد این اطلاعات در مثال ذیل نشان داده شده است.

مثال ۳.۴

اطلاعات زیر از آزمایش انجام شده بر کوره ای زغال سوز بدست آمده.

اطلاعاتی در مورد زائده حاصل از حفره خالی و خاکستر

محتویات خاکستر ۸۶/۲۳٪

محتویات کربن ۱۳/۷۷٪

دمای میانگین 124 c

میانگین گرمای خاس از  $0/23 \frac{\text{kcoul}}{\text{kg} \cdot \text{c}}$

۲۳ تا 124 c

---

تجزیه نهایی w/o

کربن ۶۶/۱۲

هیدروژن موجود ۳/۶۰

نیتروژن ۱/۴۰

آب ترکیب شده ۶/۲۱

گوگرد ۱/۶۰

رطوبت آزاد ۴/۴۸

---

خاکستر ۱۶/۵۹

جمع کل ۱۰۰/۰۰

کل میزان گرما  $10500 \frac{\text{kcoul}}{\text{kg}}$

کل وزن زغال سوخته ۴۵۰۰۰۰ kg

میانگین دمای زغال سوخته 23 c

## اطلاعاتی در مورد سوخت گازی

w/o	تجزیه ارست
۱۱/۷۰	دی اکسید کربن
۰/۱۱	دی اکسید گوگرد
۰/۱۴	مونوکسید کربن
۶/۳۷	اکسیژن
۸۱/۷۸	نیتروژن
۱۰۰۰۰	جمع کل
250c	دمای میانگین

## اطاعاتی در مورد هوا:

میانگین دمای مخزن خشک  $23^{\circ}\text{C}$

میانگین دمای مخزن مرطوب  $15^{\circ}\text{C}$

میانگین فشار بارومتری  $0/98$  بار

تعداد کل مواد را مشخص نمایید.

راه حل: اساس راه حل: ۱۰۰ کیلوگرم سوخت گاز

۱- جرم زائده ایجاد شده  $m_R$ : مقدار زائده ایجاد شده مستقیماً از طریق محتویات

خاکستر زغال قابل محاسبه می باشد.



با استفاده از اطلاعات حاصل از تجزیه نهایی رابطه زیر برقرار است.

$$\text{ash from coal} = 0.1659 \frac{\text{kg ash}}{\text{kg coal}} \times 100 \text{kg coal} = 16.59 \text{kg ash}$$

$$\text{ash from refuse} = 0.8623 \text{kg ash / kg refuse}$$

$$\text{mass of refuse formed} = \frac{16.59}{0.8623} = 19.24 \text{kg refuse}$$

۲- جرم محصولات گازی خشک  $m_{FG}$ : وزن محصولات گازی خشک از طریق تعادل

کربن قابل محاسبه می باشد برای این منظور انتخاب می شوند زیرا محتویات کربن

ذغال و محصولات گازی بدرستی قابل تشخیص می باشند.

الف: تعادل کربن: بمنظور مشخص نمودن محتویات کربن، ذغال، خاکستر از ۱۰۰

کیلوگرم ذغال سوخته استفاده کنید.

$$\text{carbon in the coal} = 100 \text{kg coal} \times 0.6612 \frac{\text{kg C}}{\text{kg coal}} = 66.12 \text{kg C}$$

$$\text{kg mol C in coal} = 66.12 \text{kg C} \times \frac{\text{kg mol C}}{12 \text{kg}} = 5.51 \text{kg mol C}$$

$$\text{carbon in refuse, C} = 19.24 \text{kg refuse} \times 0.1377 \frac{\text{kg C}}{\text{kg refuse}}$$

$$= 2.649 \text{kg C or } 0.22 \text{kg mol C}$$

بمنظور تشخیص کربن موجود در گاز دودکش ۱ کیلوگرم مول از گاز دودکش را

بعنوان اساسی برای محلول مورد استفاده قرار دهید.

کربن موجود در  $C_2 = CO_2$

$$= 1 \text{kg mol gas} \times 0.1170 \frac{\text{kg mol } CO_2}{\text{kg mol gas}}$$

$$\times 12 \frac{\text{kg C}}{\text{kg mol } CO_2} \times \frac{1 \text{kg mol C}}{12 \text{kg C}}$$

$$= 0.1170 \text{kg mol}$$

$$\text{carbon in CO} = C_1 = 0.0004 \text{kg mol}$$

$$\text{total carbon in flue gas} = C_1 + C_2 = 0.1174 \frac{\text{kg mol C}}{\text{kg mol flue gas}}$$

هم اکنون مول های گاز دودکش خشک درازای هر ۱۰۰ کیلوگرم زغال سوخته از طریق نتایج فوق قابل محاسبه می باشد.

$$= M_{FG} = \frac{C_{FG}}{C_1 + C_2}$$

$$= \frac{5.29 \text{ kg mol C}}{0.1174 \frac{\text{kg C}}{\text{kg mol flue gas}}} = 45.06 \text{ kg mol}$$

ب: کل محصولات گازی خشک: ۱۰۰ کیلوگرم زغال سوخته را بعنوان مینا و اساس محاسبات مورد استفاده قرار دهید.

$$\text{mass of } CO_2 = 45.06 \text{ kg mol gas} \times 0.1170 \frac{\text{kg mol } CO_2}{\text{kg mol gas}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{\text{kg mol } CO_2}$$

$$= 232 \text{ kg}$$

$$\text{mass of } CO = 45.06 \times 0.004 \times 28 = 0.505 \text{ kg}$$

$$\text{mass of } O_2 = 45.06 \times 0.0637 \times 32 = 91.85 \text{ kg}$$

$$\text{mass of } SO_2 = 45.06 \times 0.0011 \times 64 = 3.17 \text{ kg}$$

$$\text{mass of } N_2 = 45.06 \times 0.8178 \times 28.2 = 1039 \text{ kg}$$

$$\text{total mass of dry gaseous products} = 1366.5 \text{ kg}$$

۳- جرم هوای خشک فراهم شده برای احتراق،  $m_{da}$  وزن هوای خشک فراهم شده برای احتراق از طریق اطلاعات حاصل از تجزیه ارست و محتویات کربن موجود در زائده قابل محاسبه می باشد. روش دیگری نیز بر مبنای تعادل نیتروژن وجود دارد و

هوای خشک مورد استفاده برای احتراق نه تنها حاوی اکسیژن و نیتروژن می باشد بلکه مقادیر ناچیزی از گازهای نادر، عمدتاً آرگون، نیز در آن وجود دارد از آنجایی که نیتروژن و هم گازهای نادر خنثی و بی اثر می باشند شیوه معمول این است که گازهای نادر را بعنوان نیتروژن در نظر گرفته و با تعیین نمودن یک وزن مولکولی حد ۲۸/۳ برای نیتروژن جوی به آن را جبران کنیم. اساساً تمام نیتروژن از گروه عبور کرده و در گاز دودکش پدیدار می شود همچنین نیتروژنی که در ذغال موجود

می باشد در حین فرآیند احتراق آزاد شده و در گاز دودکش پدیدار می شود همچنانکه نشان داده شده محتویات نیتروژن سوخت در مقایسه با نیتروژن جوی ناچیز بوده و معمولاً نادیده انگاشته می شود.

تعال نیتروژن: ۱۰۰ کیلوگرم زغال سوخته شده را بعنوان اساسی برای راه حلتان مورد استفاده فرار دهید.

الف: نیتروژن موجود در گاز دودکش:

$$M_{N_{2,FG}} = 45.06 \text{ kg mol gas} \times 0.8178 \frac{\text{kg mol } N_2}{\text{kg mol gas}} = 36.85 \text{ kg mol } N_2$$

ب: نیتروژن زغال:

$$M_{N_{2,F}} = 100 \text{ kg coal} \times 0.014 \frac{\text{kg } N_2}{\text{kg coal}} \times \frac{1 \text{ kg mol } N_2}{28 \text{ kg } N_2} = 0.0496 \text{ kg mol } N_2$$

پ: وزن  $N_2$  موجود در گاز دودکش:

$$M_{N_{2,FG}} = 36.85 \text{ kg mol } N_2 \times 28.2 \frac{\text{kg } N_2}{\text{kg mol } N_2} = 1039 \text{ kg mol } N_2$$

ت: نیتروژن هوا

$$M_{N_{2,a}} = M_{N_{2,FG}} - M_{N_{2,F}} = 36.8 \text{ kg mol}$$

فرض می شود که هوای خشک حاوی ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن می باشد

بنابراین هوای خشک فراهم شده به شرح ذیل می باشد.

$$\text{Dry air supplied, } M_{da} = \frac{36.80 \text{ kg mol } N_2}{0.79 \frac{\text{kg mol } N_2}{\text{kg mol air}}}$$

یا

$$M_{da} = 46.58 \text{ kg mol} \times 29.1 \frac{\text{kg}}{\text{kg mol}} = 1355 \text{ kg}$$

۴- وزن رطوبت موجود در هوا: اساس راه حل: ۱۰۰ کیلوگرم ذغال سوخته بمنظور مشخص نمودن وزن، رطوبت هوا، راههای زیادی وجود دارد.

الف) با اندازه گیری و ارزیابی در جه انقباض رطوبت هوا و مشخص نمودن فشار جزئی بخار آب از جداول بخار برای دمای در جه انقباض.

ب) با دستگاه نم سنج که مستقیماً میزان رطوبت را ارزیابی میکند.

پ) از طریق دستگاه سنجش مخزن مرطوب و خنک.

ت) با تجزیه شیمیایی از طریق کاربرد خشک کننده ها بر مبنای اطلاعات مربوط به مخزن مرطوب و خشک که برای این منظور ارائه شده رطوبت مولال هوا

( مولهای رطوبت هوا در ازای هر مول از هوا) ۰/۰۱۲ می باشد ( به شکل ۶.۹ که نموداری در رابطه با دمای مخزن مرطوب و خشک نسبت به رطوبت مولال می باشد مراجعه کنید).

آب موجود در هوای خشکی که وارد می شود.

$$= M_{H_2O} = 0.012 \frac{kg \text{ mol } H_2O}{kg \text{ mol } air} \times 46.58 \text{ kg mol air} = 0.559 \text{ kg mol}$$

$$\text{وزن رطوبت هوا} = 0.559 \text{ kg mole} \times \frac{18 \text{ kg}}{\text{kg mol}} = 10.1 \text{ kg}$$

۵- حجم کل هوای مرطوب ارائه شده: ۱۰۰ کیلوگرم زغال را به عنوان اساسی

برای راه حلتان مورد استفاده قرار دهید

کل مولهای هوای خشک و مرطوب  $M_a = M_{da} + M_{H_2O} = 47.14 \text{ kg mol}$  در

موقعیت استاندارد (  $273^\circ K, 1.103 \text{ bar}$  ) یک کیلو گرم مول  $22.4 \text{ m}^3$  را اشغال می

کند. حجم میزان شده برای  $23^\circ C$  و  $V_a = .98 \text{ bar}$ :

$$V_a = 47.14 \times 22.4 \times \frac{1.013}{0.98} \times \frac{296K}{273K} = 1199m^3$$

۶- وزن رطوبت موجود در گاز دودکش: تجزیه گاز دودکش در مورد میزان

رطوبت اطلاعاتی ارائه نمی دهد. محتویات رطوبت از طریق تعادل

هیدروژنی که ترکیبات سوخت گازی خشک، محتویات رطوبت هوای

احتراق و محتویات هیدروژن و رطوبت سوخت را مورد بررسی قرار میدهد

قابل محاسبه می باشد.

تعادل هیدروژن: مبنا و اساس محلول = ۱۰۰ کیلوگرم زغال سوخته

$0.559 kg mol$  = رطوبت معرفی شده همراه با هوای خشک.

$0.345 kg mol$  =  $\frac{6.21}{18}$  (آب ترکیب شده) محتویات اب موجود در زغال

$0.249 kg mol$  =  $\frac{4.48}{18}$  (آب آزاد) رطوبت موجود بر روی زغال

$1.786 kg mol$  =  $\frac{3.60}{2.016}$  رطوبت هیدروژن موجود در زغال (تجزیه نهایی)

کل هیدروژن موجود در اب گاز دودکش

$$= M_{H_2O} = M_{H_2} = 0.559 + 0.345 + 0.249 + 1.786 = 2.939 kg mol$$

$$\text{رطوبت در گاز دودکش} = 2.939 kg mol \times 18 kg / mol = 52.9 kg$$

فشار جزئی رطوبت هوا ( $P'_{H_2O}$ ) با استفاده از میانگین فشار بارومتري

( هواسنج، فشارنگار) در رابطه ذیل بدست می آید.

$$P'_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_{FG}} P = \frac{2.939}{2.939 + 45.06} \times 0.98 = 0.06 bar$$

۷- حجم کل محصولات گازی: مبنا و اساسی برای راه حلتان = ۱۰۰ کیلوگرم

زغال

$$\begin{aligned} \text{کل مولهای گاز مرطوب} &= M_{FG} + M_{H_2O} \\ &= 45.06 + 2.939 = 48.0 \text{ kg mol} \end{aligned}$$

حجم کلی محصولات گاز دودکش  $V_{FG}$  در  $250^\circ C (253^\circ K)$  و  $0.98 \text{ bar}$  به قرار زیر خواهد بود

$$V_{FG} = 48.0 \times 22.4 \times \frac{1}{0.98} \times \frac{523}{273} = 21.0 \text{ m}^3$$

۸- خلاصه ای از تعادل مواد: محاسبات نهایی از طریق برگه ای حاوی تعادلات ثبت شده با یک نمودار گردشی قابل بررسی می باشد. نتایج حاصل در شکل ۳.۴

(ب) نشان داده شده است. همچنین عمل مواد برای نیتروژن، اکسیژن، کربن و هیدروژن قابل دستیابی می باشد این تعادل ها در تأیید درستی محاسبات نقش دارند. در این مثال نتایج حاصل نشانگر اختلاف و ناهمگنی ناچیزی می باشد که از خطاهای موجود در اطلاعات حاصل از آزمایش از جمله تجزیه درست و تجزیه نهایی ناشی می شوند.

تأثیر گوگرد بر تعادل جرم:

مثال قبلی شامل گوگرد موجود در زغال نمی باشد. چنانچه محتویات گوگرد کمتر از ۱٪ باشد و در صورتی که در این محاسبات گوگرد از اهمیت چندانی برخوردار نباشد خطای بسیار ناچیزی ارائه می شود. اولاً گنجاندن گوگرد در این محاسبات

مشکل به نظر می رسد زیرا گوگرد در تنوعی از اشکال شیمیایی موجود در زغال یافت می شود. ثانیاً تجزیه ارست محتویات  $SO_2$  موجود در گاز دودکش را گزارش می دهد زیرا بیشترین میزان گوگرد در آب دستگاه (ابزار) نمونه برداری جذب می شود.  $SO_2$  در گاز دودکش قابل ارزیابی می باشد. اما این روند بطور معمول مرتباً انجام نمی گیرد.

نشان داده شده است که نادیده انگاشتن احتراقی از مقادیر زیاد گوگرد موجود در سوخت خطایی جدی در محاسبات تعادل جرمی یا محاسبات تعادل انرژی ارائه نخواهد داد. بیشترین حد خطای ارائه شده به میزان ۳٪ برای بدترین مورد می باشد که در آن محتویات گوگرد بالا بوده و به شکل پیریتی (سولفید آهنی) موجود می باشند.

تعادل های انرژی:

در صورتی که فرآیند احتراق در شرایط استاندارد رخ دهد گرمای آزاد شده ممکن است مستقیماً از طریق گرمای استاندارد احتراق بدست آید. بیایید دوباره احتراق یک مخلوط (ترکیب) سوخت گازی را بررسی کنید.

مثال ۴.۴

فرض کنید احتراق یک مخلوط سوخت گازی حاوی ۶۰٪ متان و ۴۰٪ اتان توسط معادله (۱۴.۴) شرح داده شده و مشخص کننده گرمای آزاد شده می باشد.



راه حل : در صورتی که دوباره ۱ گرم مول سوخت گازی را بعنوان مبنای اساسمان در نظر گرفته و گرمای آزاد شده در ازای هر گرم مول را از طریق جدول ۸.۳ بیابیم رابطه ذیل برقرار است.

$$Q'_0 = 0.6(\text{standard heat of combustion of } CH_4) + 0.4(\text{standard heat of combustion } C_2H_6)$$

$$= 0.6(212,800) \frac{\text{cal}}{\text{g mol}} + 0.4(368,400) \frac{\text{cal}}{\text{g mol}} = \frac{275,000}{\text{g mol}}$$

۴.۱۵

با وجود این فرض کنید که فرآیند احتراق در دمای بالا رخ داده است  $T_1$  گرمای احتراق،  $Q'$ ، در  $T_1$  با گرمای استاندارد  $Q'_0$  در دمای استاندارد خودتان  $T_0$  یکسان نمی باشد. با وجود این سریعاً می توانیم از طریق کاربرد قاعده ترمودینامیکی (گرما پویاشناسی)،  $Q'$  را مشخص می نمائیم این قاعده بیانگر آن است که آزاد سازی انرژی خالص در مسافت پیمودن بین مرحله ۱ و ۲ از مسیری که گرما بین این دو مرحله اتخاذ کرده و طی می نمائیم مستقل می باشد بنابراین ممکن است تصور کنیم که در عوض از اجرای احتراق از لحاظ هم دمایی ( گرمایی) در  $T_1$  ابتدا می توانیم واکنش دهنده ها را تا  $T_0$  خنک کرده و سپس سوخت را در  $T_0$  مسعل سرانجام فرآورده های حاصل از احتراق را دوباره گرم نموده و به  $T_1$  می رسانیم از آنجایی که آزادسازی انرژی خالص در دو مسیر باید برابر باشند ممکن است رابطه زیر برقرار باشد.

$$Q' = Q_0' + Q_R' - Q_p'$$

بنابراین برحسب تعییرات آنتالپی رابطه فوق ممکن است به شرح ذیل بازنویسی

شود.

$$Q' = Q_0' + \Delta H_R - \Delta H_p$$

به شکل کلی تر می توان گفت رابطه ذیل برقرار است.

$$Q' = Q_0' + H_R - H_p$$

در حالت دوم (آخر) واکنش دهندهها را در دماهای مختلف مورد بررسی قرار

میدهیم.

از آنجائیکه سیستم ما اساساً در فشار ثابتی قرار داشته است بنابراین هیچ تغییری

در فاز وجود ندارد بنابراین آنتالپی I بعنوان جزء تشکیل دهنده در  $T'$  وابسته به  $T_0$

بطور ساده به شرح ذیل می باشد.

$$H_i = m_i \int_{T_0}^{T'} c_{pi} dT$$

چنانچه در معادله (۱۹.۴) را به  $(T' - T_0)/(T' - T_0)$  اضافه کنیم رابطه ذیل بدست

می آید.

$$H_i = \frac{m_i \int_{T_0}^{T'} c_{pi} dT}{T' - T_0} (T' - T_0)$$

در صورتی که

$$\frac{\int_{T_0}^{T'} c_{pi} dT}{T' - T_0} = c_{pi} = \text{میانگین گرمای ویژه}$$

بنابراین در صورتی که  $\tau_{pi}$  مشخص می باشد به سرعت می توانیم  $H_i$  ارزیابی می

کنیم معمولاً مقادیر زیر به عنوان جزو تشکیل دهنده موجود در  $\bar{c}_{pi}$  از طریق

میانگین گرمای ویژه مولال  $(\bar{c}_p)_{m,i}$  بدست می آیند در صورتی که

$$\bar{c}_p = (\bar{c}_{pi}) = (\bar{c})_{pmol} / mw_i$$

شده امکان پذیر است عبارات چند جمله ای موجود بر این اساس که  $(\bar{c}_p)_{m,i}$

بعنوان عملکردی از  $T'$  برای یک  $T_0 = 0^\circ C$  می باشد مشخص شده و در جدول ۲.۴

برای محصولات احتراق گازی معمول فهرست شده اند.

همچنین تعادل گرمای کاملی نیازمند بررسی آنتالپی خاکستر به انضمام آنتالپی

گازهای احتراق می باشد از آنجایی که ترکیبات دقیق خاکستر بطور دقیق شناخته

شده نمی باشد عبارات چند جمله ای دقیق نیز برای میانگین گرمای ویژه واثق و

شناخته شده نیستند.

میانگین گرماهای ویژه مولال برای گازهای معمول و موجود در محصولات

و فرآورده های احتراق مربوط به  $(0^\circ C)$  جدول ۲.۴

$H_2O$	$(\bar{c}_p)_{m,i} = 8/361 + 4/92 \times 10^4 T' + 4/46 \times 10^7 (T')^2$
$SO_2, CO_2$ و اکثر گازهای سه اتمی	$(\bar{c}_p)_{m,i} = 9/085 + 2/4 \times 10^3 T' + 2/77 \times 10^7 (T')^2$
$CO, O_2, NO_2$ و اکثر گازهای دو اتمی	$(\bar{c}_p)_{m,i} = 6/935 + 3/38 \times 10^4 T' + 0/43 \times 10^7 (T')^2$

تنها زمانی که زغال در حال سوختن و حتی خاکستر شدن موجود ناچیز می باشد

کل میزان خاکستر حاصل از اهمیت خاصی برخوردار است. در این صورت این

فرضیه وجود دارد که کل خاکستر  $SiO_2$  و میانگین گرمای خاصی را از حدود  $0/26 \text{ kcal/kg}^\circ \text{C}$  مورد استفاده قرار می دهد. تمام آب موجود در سوخت یا فرآیند احتراق تبدیل به گاز می شود. بنابراین آنتالپی بخار آب موجود در گازهای احتراق دربرگیرنده گرمای حاصل از گازشدگی می باشد.

$$H_w = m_w [(c_p)_{m,w} (T' - T_0) + h_{fg}]$$

$$H_w = \text{انتالپی آب}$$

$$m_w = \text{جرم آب}$$

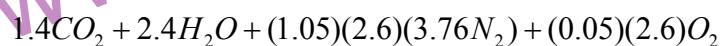
$$(\bar{C}_p)_{m,w} = \text{میانگین گرمای ویژه آب بین}$$

$$h_{fg} = \text{گرمای گازشدگی در آب}$$

مثال ۵.۴

بمراجعه به مثالمان که در آن مخلوطی حاوی ۶۰٪ متان و ۴۰٪ اتان در حجم در ۱۰۵٪ مقدار استوکیومتری هوا سوزانده شد می توانیم قواعدی را در رابطه با محاسبه آزادسازی انرژی نشان دهیم. سوخت گازی و هوا وارد اتاقک سربی احتراق در دمای اتاق می شوند و فرآورده های احتراق این اتاقک سربی را در دمای  $1000^\circ \text{C}$  ترک می نماید گرمای آزادشده را نسبت به دیواره های سربی اتاقک احتراقی که با آب خنک می شود درازای هر گرم مول سوخت مشخص نمائید.

راه حل : معادله شیمیایی متعادل ما رابطه زیر را ارائه می کند:



با استفاده و کاربرد ۱ گرم مول سوخت گازی بعنوان اساس و مبنایمان دریافتیم که گازهای حاصل ۶۱/۶ گرم  $CO_2$ ، ۴۳/۲ گرم  $H_2O$ ، ۴/۲۸۷ گرم  $N_2$  و ۴/۲ گرم بودند.

$$= Q'_0 + H_R - H_P$$

هم اکنون

$$\begin{aligned} Q'_0 &= 0.6(CH_4 \text{ heat of combustion} / g \text{ mol}) + 0.4(C_2H_6 \text{ heat of combustion} / g \text{ mol}) \\ &= 0.6 g \text{ mol} (212,790 \frac{cal}{g \text{ mol}}) + 0.4 g \text{ mol} (368,400) cal / g \text{ mol} \\ &= 275,000 cal \end{aligned}$$

چنانچه دمای اتاق به  $0^\circ C$  نزدیک باشد گرمای واکنش دهندهای مربوط به

$0^\circ C$  ناچیز و کم اهمیت می باشد.

$$Q' = Q_0 - \Delta H_P$$

$$= 275,000 - (1000C - T_0) \left[ (c_p)_{m,CO_2} \frac{61.6 g CO_2}{44 g / g \text{ mol}} + (c_p)_{m,H_2O} \frac{43.2 g H_2O}{18 g / g \text{ mol}} + (c_p)_{m,N_2} \frac{281.4 g N_2}{28 g / g \text{ mol}} + (c_p)_{m,O_2} \frac{4.2 g O_2}{32 g / g \text{ mol}} \right]$$

از طریق عبارات موجود در جدول ۳.۴ که  $1000c$  را برای  $T$  بکار برده اند می

توانیم مقادیر  $(\bar{c}_p)_{m,i}$  را برای محصولات تعیین و مشخص نمائیم.

در موقعیتی که معمولاً و اکثر واقع با آن برورد می کنیم سوخت در دمای اتاق

بوده اما هوای احتراق تا دمای سنجیده ای از پیش گرم شده است. در این شرایط

تحت دمایی که در آن احتراق رخ می دهد به حتمال زیاد ناشناخته باقی میماند ام

دمای گازهای خارج شده به راحتی ارزیابی می شوند در این مورد دوباره میتوانیم

گرمای آزاد شده را با دنبال نمودن مسیری فرضی میان راههای اولیه و نهایی

مشخص نمائیم این فرضیه وجود دارد که ابتدا باید تمام واکنش دهنده ها را تا دماییکه در آن گرمای استاندارد واکنش دهنده ها ارزیابی می شود (18c) خنک کرده این مسیر و راه فرضی باید با آزادسازی گرمای خالص در طول مسیر و افقی برابر باشد آزادسازی گرمای خالص در ازای هر مول سوخت  $Q'_i$  به قرار زیر می باشد.

$$Q'_i = Q'_0 + Q'_R - Q'_P$$

۴.۲۳

گرمای جایجا شده به واسطه خنک کردن واکنش دهنده ها از دمای اولیه  $T_0 = Q'_R$

انها تا

گرمای اضافه شده به واسطه گرم نمودن فرآورده ها از  $T_0$  به

$$Q'_P = \text{دمای خروجی}$$

تقریبا در تمام مواد سوختی که وارد میشود در دمای اتاق بوده و بدینوسیله رابطه زیر برقرار است.

$$Q'_i = Q'_0 + Q'_a - Q'_P$$

بنابراین می توانیم با استفاده از میانگین گرمای ویژه اجزای تشکیل دهنده و

گرمای گاز شدگی  $\Delta H_p = \Delta H_a, H_2O$  را محاسبه کنیم.

در صورتی که  $Q_1$  نشان دهنده گرمای آزاد شده از طریق کیلوگرم های  $M_F$  سوخت باشد و در شرایطی که هوای ورودی خشک است رابطه زیر برقرار می باشد.

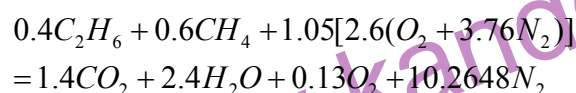
$$Q_1 = \frac{m_F}{MW_F} \left[ Q_0' + (c_p)_{m,a} (T_a - T_0) \frac{m_a}{MW_a} - \sum_i \frac{m_i}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) - m_w h_{fg} \right]$$

۴.۲۶

مثال ۴-۶

بگذارید برای بار دیگر روشی را برای احتراق مخلوطی و ترکیبی حاوی  $60/0$  از متان و  $40/0$  از اتان در  $1.05$  هواکه از لحاظ نظری مورد نیاز می باشد بکار برده و اجرا کنیم. این فرض وجود دارد که سوخت در دمای اتاق پذیرفته شده و هوای موجود تا  $500^\circ\text{C}$  از پیش گرم می شود در این شرایط باید گرمای آزاد شده در کوره را در صورتی که گازهای خروجی در دمای  $700^\circ\text{C}$  م می باشد. در انجام این محاسبات این فرضیه ساده وجود دارد که میانگین ظرفیت دمای مراحل از  $18^\circ\text{C}$  تا  $T$  با میانگین ظرفیت گرمایی مولان از  $0^\circ\text{C}$  تا  $T$  تافوتی جزئی دارد. این ساده سازی بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و بطور کلی وعمومی رضایت بخش می باشد این ساده سازی بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و بطور کلی و عمومی رضایت بخش می باشد.

راه حل: یک گرم سوخت را به عنوان مبنایی برای راه حل مورد استفاده قرار دهید. به معادله شیمیایی که قبلا برای احتراق این ترکیب گازی نوشته بودیم برمی گردیم. یعنی



ابتدا تعادل جرم را کامل می نمائیم وزن مولکولی مخلوط ( ترکیب) سوخت به قرار زیر می باشد.



$$0.4 \times 30 + 0.6 \times 16 = 21.6 \text{ kg / kg fuel}$$

جرم هوای پذیرفته شده در ازای هر جرم واحدی از سوخت را از طریق معادله

شیمیایی متعادل بدست میاوریم.

$$\begin{aligned} \text{mass of air} &= \frac{(\text{mol air / mol fuel}) \times \text{mol wt air}}{\text{wt fuel / mol fuel}} \\ &= \frac{(1.05 \times 2.6 + 1.05 \times 3.79 \times 2.6) \times 28.97}{0.4 \times 30 + 0.6 \times 16} = 17.43 \text{ kg air / kg fuel} \end{aligned}$$

پس وزن محصولات حاصل از احتراق را در ازای هر کیلوگرم مول سوخت بدست

می آوریم.

$$\text{mass of } CO_2 = \frac{1.4 \times 44}{21.6} = 2.85 \text{ kg / kg fuel}$$

$$\text{mass of } N_2 = \frac{10.29 \times 28}{21.6} = 13.31 \text{ kg / kg fuel}$$

$$\text{mass of } H_2O = \frac{2.4 \times 18}{21.6} = 2 \text{ kg / kg fuel}$$

$$\text{mass of } O_2 = \frac{0.13 \times 32}{21.6} = 0.193 \text{ kg / kg fuel}$$

موقعیت نسبتاً پیچیده تری در احتراق زغال بوجود می آید در این احتراق تمام

بخارهای خارجی به دقت بررسی و تجزیه می شود چنانچه درصدد باشیم محاسبه

دقیقی از آزادسازی گرما ارائه دهیم باید زغال نسوخته در ضایعات (یا بخار خاکستر)

و هرگونه مونوکسید کربن موجود در گاز دودکش را توجیه کنیم. برای این منظور

میزان گرمای زغال نسوخته و مونوکسید کربن موجود در بخارهای خروجی را کسر

نمائیم. بنابراین معادله ما برای آزاد سازی گرما  $Q_1$  به صورت زیر خواهد بود.

$$Q_1 = (Q_0 + Q_a - Q_p - Q_{cw}) \frac{m_F}{MW_F}$$

۲۷.۴

و این در صورتی است که  $Q'_{cw}$  گرمای احتراق زغال نسوخته بوده و مونوکسید کربن موجود در ضایعات و بخارهای خروجی هر مول سوخت و سایر کمیت ها در معانی پیشین خود باقی مانده اند. این روش با کاربردش برای احتراق زغال که در مثال (۳.۴) قبلاً شرح داده شده نشان داده می شود.

#### مثال ۷.۴ تعادل انرژی کوره

تعادل کامل انرژی کوره را با استفاده از اطلاعات ارائه شده در مثال ۳.۴ مشخص نمایید این تعادل به طور نموداری در شکل ۳.۴ نشان داد می شود.

راه حل: مینا و اسای بر راه حل: ۱۰۰ کیلوگرم زغال فراهم شود.

محاسبات درونداد انرژی:

۱- میزان سوخت: از مثال ۳.۴، میزان گرمای ثابت ۱۰/۵۰۰ گلوین کالری /

کیلوگرم

۲- آفتابی زغال: ۵

۳- آفتابی هوای خشک: ناچیز و کم اهمیت.

۴- آفتابی بخار آب موجود در هوا ( $H_{wa}$ ) (با استفاده از اطلاعات حاصل از مثال

۴,۳): با توجه به جداول الف ۴ و الف ۵ گرمای بخار دردمای  $23^{\circ}C$  به قرار ذیل

می باشد.

$$= 23 \text{ kJ/kg} = 58506 \text{ kcal/kg}$$

بدینوسیله با استفاده از اطلاعات حاصل از مثال ۴.۳، رابطه زیر برقرار است.

$$\text{انتالپی آب} = 18 \text{ kg / kg mol} \times 0.559 \text{ kg mol} \times 585.6 \text{ kcal / kg} = 5890 \text{ kcal}$$

$$\text{کل انرژی موجود} = 105.6 \times 10^4 \text{ kcal}$$

شکل ۴۰۴ تعادل انرژی برای یک کوره و دیگ بخار

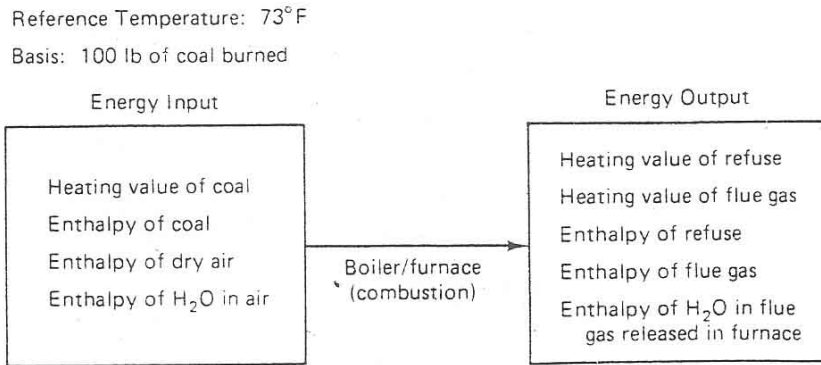


Figure 4.4 Energy balance for a furnace/boiler.

محاسبات برون داد انرژی:

۵- میزان گرمای زائده HV:

$$HV = 8055 C_r = 8055 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C} \times 2.649 \text{ kg C} = 21.340 \text{ kcal}$$

۶- میزان گرمای گاز دودکش: HV: میزان گرمای بر اساس محتویات مونوکسید

کربن گاز دودکش می باشد:

$$HV_{\text{me gas}} = \frac{m_{co}}{MW_{CO}} (HV_{CO}) = \frac{0.505}{28} \left( 67.620 \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol}} \right) = 1220 \text{ kcal}$$

۷- آنتالپی زائده  $H_r$ : آنتالپی به واسطه رابطه ذیل بر قرار است:

$$H_r = m_r (T_r - T_0) (c_p)_r$$

آنتالپی ها  $N_2, SO_2, O_2, CO_2, CO$  واسطه میانگین گرماهای ویژه آنها بدست می

آیند.

$$H_i = \frac{m_i}{W_i} (c_p)_{m,i} (T_{FG} - T_0)$$

$$\text{enthalpy of } CO_2 = \frac{232}{44}(250 - 233)9.29 = 11.870 \text{ kcal}$$

$$\text{enthalpy of } CO = \frac{0.505}{8}(250 - 23)7.05 = 21 \text{ kcal}$$

$$\text{enthalpy of } O_2 = \frac{91.85}{32}(250 - 23)9.92 = 111 \text{ kcal}$$

$$\text{enthalpy of } N_2 = \frac{103.9}{28.2}(250 - 23)7.02 = 58.710 \text{ kcal}$$

$$H_{FG} = \text{total enthalpy of stack gases} = 75,43 \text{ kcal}$$

۸- آنتالپی آب در گاز انباشته: آنتالپی رطوبت در گاز انباشته براساس گرمای  
گازشدگی و درجه گرمای بالا برای مولهای بخار آب  $\mu H_2O$  موجود در گاز دودکش  
می باشد.

مجددا با استفاده گرمای گاز شدگی به میزان  $10.570 \text{ kcal/kg mol}$  رابطه زیر برقرار  
است.

$$\text{گرمای ویژه بخار آب } (C_p)_{m,H_2O} = 8.20 \text{ kcal/kg}^\circ C$$

$$\text{گرمای گاز} = M_{H_2O} \times 10.570 = 2.939 \text{ kg mol} \times 10.542 \text{ kcal/kg mol} = 31.065 \text{ kcal}$$

شدگی

$$\begin{aligned} \text{انتالپی گرمای بسیار زیاد} &= M_{H_2O} (c_p)_{m,H_2O} (T_{FG} - T_0) \\ &= 2.939 \text{ kg mol} \times 8.20 \text{ kcal/kg}^\circ C \times (250 - 23)^\circ C \end{aligned}$$

$$\text{انتالپی گرمای بسیار زیاد} = 5470 \text{ kcal}$$

۹- گرمای آزاد شده: فرآیند مربوط به تعادل گرمای نهایی در شکل ۴.۴ خلاصه شده است.

$$Q_1 = (\text{available energy}) - (HV_{refuse} - HV_{nue\ gas} + H_r + H_{FG} + H_{H_2O/FG}) \\ = (105.6 \times 10^4) - (21,340 + 1220 + 447 + 75,430 + 36,450) \\ = 921,100 \text{ kcal}$$

#### ۴.۴ تعادل شیمیایی:

ویژگی ترمودینامیکی (گرماپویاشناسی) که نشان دهنده آن است که آیا یک واکنش شیمیایی را به خود رخ خواهد داد. پتانسیل ترمودینامیکی یا انرژی آزاد نام دارد. یک سیستم همیشه به سمت موقعیتی متمایل است که از حداقل میزان انرژی آزاد برخوردار باشد. کل انرژی آزاد  $G$  ویژگی گسترده ای بوده و به قرار زیر

تعریف میشود:

$$G = H - TS$$

برای کیلوگرم های  $m$  یک ماده خالص به واسطه مقادیر زیادی از  $h, s$ :  $G$  بدست می آید.

$$G = m(h + T_s)$$

در این صورت نیروی رانش در یک واکنش شیمیایی نشانگر تفاوت موجود در انرژی آزاد میان واحل اولیه نهایی می باشد  $\Delta G$  و در صورتی که دما ثابت باشد، رابطه زیر برقرار است.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

در صورتی که تغییر انرژی آزاد برای یک واکنش منفی باشد (واکنش گرمازا بوده و گرما را خارج می کند) واکنش خودبخود رخ می دهد.

### انرژی آزاد شکل گیری و تشکیل یک جزء تشکیل دهنده:

صفر در نظر گرفتن انرژی آزاد عناصر شیمیایی در فشار  $1 \text{ atm}$  و دمای اتاق قراردادی می باشد. انرژی آزاد استاندارد شکل گیری یک جزء تشکیل دهنده تغییر انرژی آزاد می باشد  $\Delta G_F^0$ . و این در صورتی است که یک مول از جزء شکل دهنده مستقیماً از طریق عناصر سازنده آن شکل گرفته و واکنش دهنده ها و فرآورده ها در دمای اتاق قرار گیرند و از فشاری جزئی  $1 \text{ atm}$  برخوردار می باشند. در صورتی

که واکنش در برخی دماهای بالاتری رخ دهد انرژی آزاد شکل گیری  $\Delta G_F^0$  از میزان متفاوتی برخوردار خواهد بود. از آنجائیکه ترمودینامیک بیانگر آن است که ویژگی های یک ماده در دو مرحله آخر ارائه شد ربطی به روش اتخاذ شده ندارد برای رسیدن به این مرحله ندارد بنابراین ما می توانیم  $\Delta G_F^0$  را از طریق  $\Delta G_F^S$  مشخص نمائیم. فرض می کنیم که بجای واکنش ساده اجزای تشکیل دهنده در دمای  $T'$ ، ابتدا واکنش دهنده ها را تا دمای اتاق خنک کرده و اجازه دهیم

واکنش رخ دهد و سپس فرآورده ها را گرم می کنیم تا به دمای  $T'$  بازگردند. از آنجائیکه نتیجه حاصل از روش مورد نظر باید با نتایج حاصل از اجرای ساده واکنش در دمای  $T'$  برابر باشد برای ۱ مول از محصول رابطه زیر برقرار می باشد.

$$\Delta G_f^0 = \Delta G_f^S - \int_{20}^T [n_{R1}(C_P)_{m,i} + n_{R2}(C_P)_{m,2} + \dots] dT + \int_{20}^{T'} [n_P(C_P)_{m,p}] dT$$

دراکثر موقعیت های واقعی فشارهای جزئی واکنش دهنده ها و محصولات در 1 atm نخواهد بود. تأثیر چنین تغییرات فشاری بر انرژی آزاد یک ماده ارائه شده از طریق رابطه ترمودینامیکی ارزیابی می شود به موجب آن در دمای ثابت رابطه زیر برقرار است.

$$dG = vdp$$

در جابجایی از موقعیت استاندارد،  $P_0$  به موقعیت کارکرد،  $P_1$  برای یک ماده ای که در واقع گازی مطلوب و ایده آل، می باشد رابطه زیر برقرار است.

(۴.۳۳)

$$\Delta G = \int_{p_0}^{p_1} vdp = RT \ln \frac{p_1}{p_0}$$

در صورتی که R ثابت گاز مطلوب می باشد، رابطه فوق برقرار است. انرژی آزاد شکل گیری،  $\Delta G_f$  برای یک جزء تشکیل دهنده که گازی مطلوب بوده و دارای فشار جزئی  $P_1$  در دمای T می باشد رابطه زیر برقرار است.

(۴.۳۴)

$$\Delta G_f = \Delta G_f^\circ + RT \ln \frac{p_1}{p_0}$$

چنانچه فشار جوی مد نظر بوده و  $P_0 = 1 \text{ atm}$  رابطه زیر برقرار است :

(۴.۳۵)

$$\Delta G_f = \Delta G_f^\circ + RT \ln p_1$$

هنگامی که ماده گازی مطلوب نباشد ، مقدار f را که فوگاسیتی نام دارد برقرار زیر تعریف می کنیم :



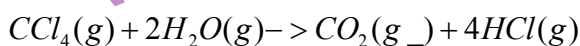
$$\int_{p_0}^{p_1} v dp = RT \ln \frac{f_1}{f_0}$$

در صورتیکه  $f_0, f_1$  در  $P_0, P_1$  به عنوان فوگاسیتی می باشد رابطه طزیر بر قرار است.

$$\Delta G_f = \Delta G_f^\circ + RT \ln \frac{f_1}{f_0}$$

ثبات تعادل،  $K_p$

واکنشی را در نظر بگیرید که به قرار زیر باشد و در دمای  $T$  رخ دهد:



۳۸.۴

مرحله اولیه بواسطه فشار جزئی تتراکلوریدکربن  $pccl_4$  و فشار جزئی بخار آب

$p_{H_2O}$  تعریف می شوند در مرحله آخر دی اکسی کربن و هیدروژن از فشارهایی

جزئی برخوردار می باند که بواسطه (از طریق)  $P_{HCl}, P_{CO_2}$  تعریف می شوند.

با استفاده از انرژی های آزاد شکل گیری، تغییر انرژی آزاد برای این سیستم،

به قرار زیر قابل بیان می باشد:

$$\Delta G = \Delta G_{f,CO_2} + 4\Delta G_{f,HCl} - (\Delta G_{f,CCl_4} + 2\Delta G_{f,H_2O})$$

هر یک از انرژی های آزاد شکل گیری در معادله (۴.۳۹) بر حسب انرژیهای آزاد

شکل گیری در دمای  $T$  و فشارهای جزئی اجزای تشکیل دهنده نیز قابل بیان می

باشند.

$$\Delta G_{f,CO_2} = \Delta G_{f,CO_2}^\circ + RT \ln p_{CO_2}$$

۴.۴۰ الف

$$4\Delta G_{f,HCl} = 4\Delta G_{f,HCl}^0 + RT \ln P_{HCl}$$

۴.۴۰ ب

$$\Delta G_{f,CCl_4} = \Delta G_{f,CCl_4}^0 + RT \ln P_{CCl_4}$$

۴.۴۰ پ

$$2\Delta G_{f,H_2O} = 2\Delta G_{f,H_2O}^0 + RT \ln P_{H_2O}^2$$

در صورتی که معادله (۴.۴۰ الف)-(۴.۴۰ ب) جایگزین معادله (۳۹ و ۴) شوند، رابطه زیر برقرار است:

۴.۴۰ ت

$$\Delta G = \Delta G_{f,C_2O}^0 + 4\Delta G_{f,HCl}^0 - (\Delta G_{f,CCl_4}^0 + 2\Delta G_{f,H_2O}^0) + RT [\ln P_{CO_2} + \ln p_{HCl} - (\ln P_{CCl_4} + \ln P_{H_2O}^2)]$$

۴ عبارت اول معادله (۴.۴۰) نشاندهنده تغییر در انرژی آزاد برای واکنش  $\Delta G^0$

می باشد و این در زمانی می باشد که محصولات و واکنش دهنده ها از فشار جزئی ۱ atm برخوردار می باشند در حالی که سایر عبارات نشان دهنده تأثیر فشارهای جزئی بر تغییر انرژی آزاد می باشند. در صورتی که معادله (۴.۴۱) را به صورتی

ساده تر بیان کنیم، رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{P_{CO_2} P_{HCl}^4}{P_{CCl_4} P_{H_2O}^2}$$

۴۲.۴

می بینید که در معادله ۴۲.۴ فشارهای جزئی محصولات در صورت و فشارهای جزئی واکنش دهنده ها در مخرج قرار دارند در بک واکنش شیمیایی چنانچه واکنش دهنده ها مصرف می شوند فشار آنها کاهش می یابد. در این صورت واژه

لگاریتم وسیع تر شده و ارزش و میزان  $\Delta G$  به سمت مثبت بودن پیش می رود (کمتر منفی می باشد) به همین نحو چنانچه واکنش ادامه یابد فشارهای محصولات که در صورت نشان داده شده اند افزایش می یابند هر دوی این تأثیرات باعث می شوند  $\Delta G$  کمتر منفی شود و بنابراین در نیروی رانش و واکنش کاهش یابد.

در حقیقت دو واکنش متقابل وجود دارند اولین واکنش پیشرو بوده و در آن بخار تتراکلورید کربن با بخار آب فعل و انفعال کرده و دی اکسید کربن و کلرید هیدروژن تولید میکند. در پس این واکنش نیروی رانش کاهش یافته در صورتی که واکنش همچنان پیش می رود و واکنش دهنده ها مصرف می شوند. واکنش دوم برعکس می باشد در این واکنش دی اکسید کربن و کلرید هیدروژن به منظور ایجاد تتراکلرید کربن و بخار آب فعل و انفعال می کنند این واکنش معکوس را می توان از طریق معادله شیمیایی زیر نشان داد.



۴۳.۴

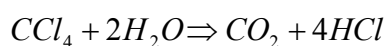
تغییر انرژی آزاد به قرار زیر خواهد بود.

$$\Delta G = (\Delta G)_{rev}^o + RT \ln \frac{P_{CCl_4} P_{H_2O}^2}{P_{CO_2} P_{HCl}^4}$$

و این در صورتی است که  $(\Delta G)_{rev}^o$  برای واکنش معکوس می باشد.

همچنانکه واکنش پیشرو ادامه یافته و پیش می رود تتراکلرید کربن و آب مصرف شده در حالی که  $CO_2$  و HCl تولید می شوند بنابراین این روند باعث کمتر منفی شدن  $\Delta G$  و کاهش نیروی رانش در پس این واکنش می شود.

بواسطه این واکنش های معکوس سیستم تماس به دستیابی به موقعیت متعادلی دارد که در آن این نیروهای رانش برابر می باشند. در این صورت رابطه زیر برقرار می باشد در این صورت رابطه زیر به دست می آید :



این در واقع موقعیت تعادل پویایی می باشد که در آن واکنش پیشرو و معکوس بطور همزمان و به یک میزان رخ می دهند یا به عبارتی  $\Delta G = 0$  می باشد. در صورتی که در معادله (۴.۴۲) باشد  $\Delta G = 0$  در این صورت رابطه زیر به دست می آید

$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{(P_{CO_2})(P_{HCl})^4}{(P_{CCl_4})(P_{H_2O})^2}$$

در رابطه فوق پرانتزها که نمادهای فشار را احاطه کرده اند نشان می دهد که این فشارها فشارهای تعادلی می باشد.

مقادیر  $T, R, \Delta G^0$  برای یک فرآیند هم دما ثابت می باشند این بدان معنی است که لگاریتم خارج قسمت و بدینوسیله خود خارج قسمت برای تعادل در دمای ارائه شده ثابت می باشد. این ثبات، ثبات تعادلی بیان شده در فشارهای جزئی  $k_p$  نام دارد. بنابراین ممکن است بمنظور تعریف ثبات تعادل  $k_p$  برای سیستمی که در آن تتراکلرید کربن را بخار آب فعل و انفعالاتی کرده و دی اکسید کربن کلرید هیدروژن تولید می کند از معادله (۴-۴۶) استفاده می شود.

$$K_p = \frac{(P_{CO_2})(P_{HCl})^4}{(P_{CCl_4})(P_{H_2O})^2}$$

در کل ثبات تعادل  $K_p$  برای واکنشی در فاز گازی ممکن است بعنوان محصولی از فشارهای تعادلی محصولات و فرآورده های گازی تعریف شود. و هر کدام از این محصولات گازی تا قدرت متناسبی در معادله شیمیایی ارتقا یافته و بخش بر فشارهای تعالی واکنش دهنده های گاز می شوند که هر کدام تا قدرت ضریب مناسبی در واکنش ارتقاء یافته اند. در این مورد رابطه زیر برقرار است.

$$K_p = \frac{(p_Y)^y (p_Z)^z}{(p_A)^a (p_B)^b}$$

توجه کنید که واحد ها برای  $K_p$  به توانهای  $a, b, y, z$  بستگی دارند. بنابراین واکنش شرح داده شده از طریق معادله  $K_p(46.4)$  حاوی واحدهای  $\text{atm}^{-2}$  می باشد.

هنگامی که یکی از واکنش دهنده ها در واقع گاز مطلوبی نباشند فشار جزئی مناسب باید با یک نسبت فوگایشی جایگزین شود. فرض کنید که در معادله (46.4) واکنش دهنده B گاز مطلوبی نباشد. در این صورت رابطه زیر برقرار است:

$$K_p = \frac{(P_Y)^y (P_Z)^z}{(p_A)^a (f_B / f_{ob})^b}$$

در موقعیت هایی که از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند ممکن است یکی از اجزای تشکیل دهنده جامد باشد. در این صورت نسبت فوگایشی برای این جزء تشکیل دهنده واحد می باشد.

$$K_p = \frac{(P_Y)^y (P_Z)^z}{(p_A)^a}$$

تفاوت  $K_p$  با  $K_a$

افزایش دمای یک سیستم واکنشی تعادلی بواسطه اضافه گرما ترکیب تعادلی را در سریکه منجر به جذب گرما می شود تغییر خواهد داد. تأثیر افزایش گرما در واکنش گرما زا باعث کاهش درجه ظهور تعادل می شود. ممکن است این تأثیر را از لحاظ کمی ارزیابی کنیم.

بنابراین  $\Delta B^\circ$  را بعنوان عملکردی از  $T$  با استفاده از همان روش به کار رفته برای  $\Delta B_F^\circ$  محاسبه و ارزیابی می کنیم نتایج حاصل از این محاسبات برای واکنش های ویژه و نمادین که از اهمیت زیادی برای فرآیند احتراق برخوردار می باشند در شکل (۵.۴) نشان داده شده اند.

شکل ۵.۴ ثبات تعادلی برای عوامل شیمیایی برگزیده

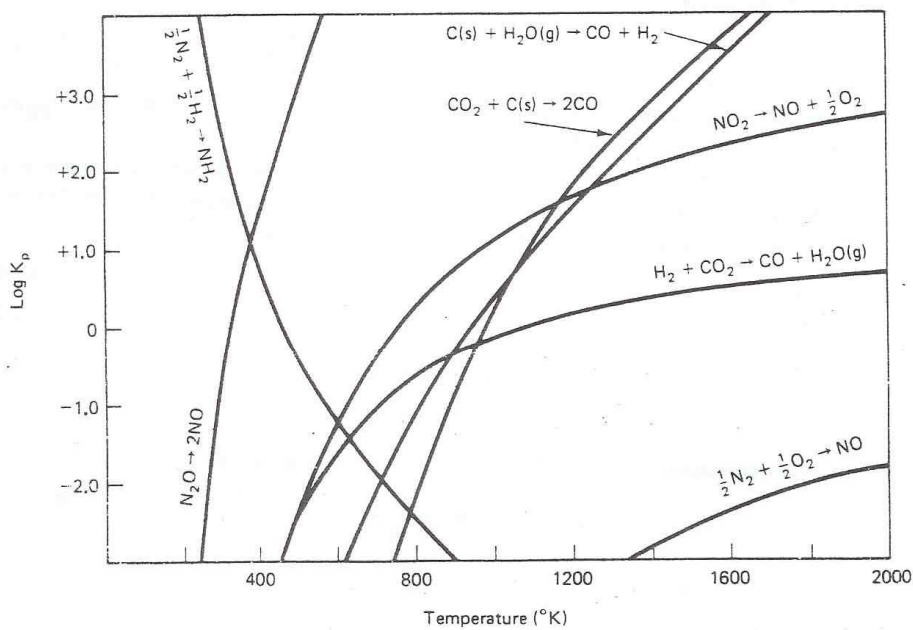
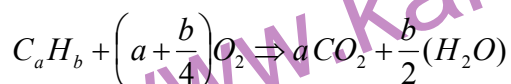


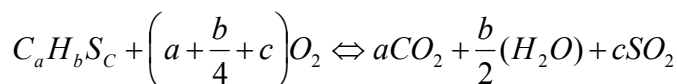
Figure 4.5. Equilibrium constants for selected chemical reactions.

## تعالد شیمیایی در فرآیند احتراق

در احتراق کامل کربن، هیدروژن، و گوگرد بمنظور ایجاد  $SO_2, H_2O, CO_2$  با اکسیژن فعل و انفعال می کنند. معادله نشان می دهد شکل کلی از یک احتراق کامل برای هیدروکربن می باشد.

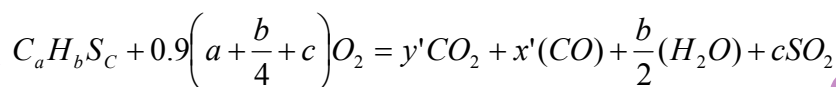


احتراق کاملی از مازوت حاوی مقداری گوگرد به قرار زیر خواهد بود:



در صورتی که حضور اکسیژن برای احتراق کامل هیدروکربن کافی نباشد بدان معنی است که هیدروژن و گوگرد به ترتیب سوخته و به  $SO_2, H_2O$  تبدیل می شوند اما مقداری از کربن تنها بمنظور تولید مونوکسید کربن می سوزد. CO مقدار باقیمانده از طریق تعادل معادله شیمیایی مشخص می شود. بنابراین چنانچه فقط

۹۰٪ از مقدار استوکیومتری اکسیژن موجود باشد معادله زیر بر قرار است:



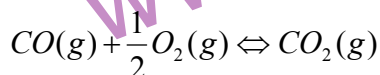
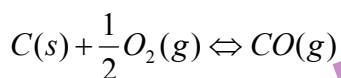
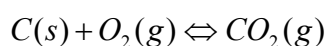
اما با توجه به تعادل کربن، رابطه زیر بر قرار است:

$$a = y' + x'$$

و به موجب تعادل اکسیژن

$$0.9\left(a + \frac{b}{4} + c\right) = y' + \frac{x'}{2} + \frac{b}{4} + c$$

با حل نمودن همزمان اکسیژن و کربن متعادل می توانیم مقادیر مربوطه  $CO_3, CO$  موجود را تشخیص دهیم. در احتراق زغتل هیدروژن و گوگرد مثل همیشه سوخته و به  $SO_2, H_2O$  تبدیل می شود با وجود این چندین واکنش متقابل وجود دارد که درجه احتراق کربن را مشخص می کند.



رابطه تعادل برآئی معادله به قرار زیر می باشد:

$$K_p = \frac{P_{CO_2}}{P_{O_2}}$$

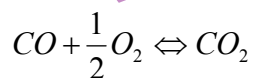
و این رابطه برای معادله به شرح زیر بر قرار است:

$$K_p = \frac{(p_{CO})^2}{p_{CO_2}}$$

در ماشین آلات و واحدهای صنعتی پیشرفته گازهاییکه ناحیه شعله را ترک می کنند ممکن است بیشتر از  $400C$  بوده و ثبات تعادل برای واکنش ها بسیار بالا می باشد. (الف  $59.4$ )، (ب  $59.4$ )، (پ  $59.4$ ) بنابراین تصور اینکه اینگونه واکنش ها خاتمه می یابند غیرعادی می باشد. واکنش (ت  $59.4$ ) واکنشی کندتر می باشد که با مقادیر مربوطه  $CO_3, CO$  که در معادله (۶۱.۴) ارائه شده اند همراه می باشد. میزان ثبات تعادل که به دما بستگی دارد از شکل ۵.۴ بدست می آید.



در دماهای بالا مخلوط و ترکیب های  $CO_3, CO$  تنها هنگامی بدست می آیند که کمتر از میزان استوکیومتری هوای موجود باشد.



واکنش فوق از ثبات تعادل بسیار بالا یی برخوردار بوده و در واقع کل اکسیژن مصرف می شود. با توجه به شرایط فوق الذکر در صورتی که کمتر از میزان استوکیومتری  $O_2$  فراهم باشد هیچ اکسیژنی در این سیستم تعادلی وجود ندارد. بالعکس هنگامی که اکسیژن اضافی (زیادی) فراهم شود در آن صورت هیچگونه  $CO$  موجود نمی باشد.

همانطوری که میدانیم در موقعیت های مناسب کربن می تواند بمنظور تولید  $H_2, CO$  میزان بخار آب را کاهش دهد. با وجود این در حضور اکسیژن  $H_2, CO$  تولید شده می سوزد و نیازی نیست کاهش بخار آب را در محاسبات احتراق طبیعی در نظر بگیریم. هنگامی که کمتر از میزان استوکیومتری اکسیژن موجود باشد مقادیر مربوطه از  $CO, C$  و  $CO_2$  اساساً از طریق میزان تعادل واکنش  $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO_2$  بدست می آیند و هنگامی که اکسیژن اضافی وجود داشته باشد ممکن است احتراق کاملی رخ دهد.

محاسبه ترکیبات تعادلی

از نقطه نظر تشخیص آزادسازی انرژی حاصل از احتراق لازم است تعادل شیمیایی تنها هنگامی که زغال یا کک با کمتر از میزان استوکیومتری هوا می سوزد در نظر گرفته می شود.

مثال ۸.۴

به طور ساده احتراق کک در نظر بگیرید که در ۸۰٪ از مقدار استیو کیومتری هوا در  $800^\circ K$  رخ می دهد معادله شیمیایی برای این فرایند به قرار زیر است:



راه حل ۱ گرم مول کربن را به عنوان فیاواساسمان در نظر گرفته و به واسطه آن تعادل اکسیژن و کربن به قرار زیر است :

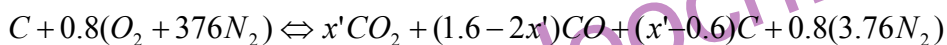
$$x' + \frac{y'}{2} = 0.8$$

$$x' + y + z' = 1$$

به منظور به دست آوردن  $Z, Y$  بر حسب  $X$  برای این دو معادله به طور همزمان راه حلی ارائه می دهیم :

$$y' = 1.6 - 2x' \quad z' = x' - 0.6$$

ممکن است معادله شیمیایی بر حسب  $X'$  نباشد :



به منظور تشخیص  $X'$  رابطه تعادلی را برای واکنش محدودمان به کار می بریم .

$$K_p = \frac{(P'_{CO})^2}{P'_{CO_2}} \quad C + CO_2 \Leftrightarrow 2CO$$

ممکن است فشارهای جزئی گازهای تشکیل دهنده از طریق بخش های مولی آنها قابل تشخیص نباشد از آنجایی که ما در دما و فشار جوی بالا قرار داریم ممکن است گازهای مطلوب در نظر گرفته شده و بدینوسیله برای جزء تشکیل دهنده فشار جزئی به قرار زیر باشد .

$$p'_j = \frac{n_j}{\sum n_i} p = \frac{n_j}{\sum n_i}$$

توجه کنید که ممکن است فشار کلی را کاهش دهیم و آنجای که این فشار برابر با می باشد رابطه زیر برقرار است :

$$n_{CO} = 1.6 - 2x'$$

$$n_{CO_2} = x'$$

$$n_{N_2} = 0.8(3.76)$$

$$p'_{CO} = \frac{1.6 - 2x'}{1.6 - 2x' + x' + 0.8(3.76)}$$

$$p'_{CO_2} = \frac{x'}{(1.6 - 2x') + x' + 0.8(3.76)}$$

بنابراین رابطه تعادلی زیر برقرار است :

$$K_p = \frac{(p'_{CO})^2}{p'_{CO}} = \frac{(n_{CO} / \sum n_i)^2}{n_{CO_2} / \sum n_i} = \frac{(n_{CO})^2}{n_{CO_2} (\sum n_i)} = \frac{(1.6 - 2x')^2}{x'[(1.6 - x' + 0.8(3.79))]}$$

با توجه به شکل ۴.۵ متوجه می شویم که با میزان  $R \ln k_p$

در  $800^\circ K$  در واقع  $\log k = -2.0$  یا  $k_p = 0.01$ . بنابراین معادله مورد نظر راه حلی

یافته و به قرار زیر آن را درج می نماییم .

$$0.01 = 1.6x' - (x')^2 + 3.01x' = (1.6 - 2x')^2$$

به این دلیل که در روش ساده سازی تمامی واکنش های شیمیایی را بطور همزمان مورد توجه قرار نداده ایم بنابراین ممکن است میزان  $x'$  بدست آمده واقعی و دقیق نباشد. به این معنی که میزان CO مورد نیاز از طریق رابطه تعادلی

ممکن است بیش از میزان ممکن در شرایطیکه تمام کربن فعل و انفعال می شود بنابراین باید همیشه حداکثر میزان ممکن را برای مولهای CO (یا حداکثر میزان ممکن برای  $K_p$ ) مشخص نموده و CO (یا  $K_p$ ) را بین میزان برابر بنمائیم تا به

این منظور میزان بیشتری پیش بینی شود. با توجه به معادله تعادلی کربن،

متوجه می شویم در صورتی که  $Z' = 0$  رابطه زیر برقرار است:

$$1 = x' + y'_{\max} = (0.8 + y') + y'$$
$$y'_{\max} = 0.133$$

توجه کنید که چون تمام کربن فعل و انفعال کرده در شرایط تعادلی وجود ندارد) تمام اجزای تشکیل دهنده موجود نمی باشد) و بدینوسیله میان  $p_{CO_2}$  و  $p_{CO}$  که

مستلزم رابطه ی تعادلی می باشند. دیگرهیچ رابطه ای وجود ندارد.

در موقعیت های واقعی بطور کلی دمای احتراق ناشناخته می باشد بنابراین باید بطور همزمان دمای شعله و درجه تعادل را از طریق فرآیند هم کنشی (فعل و انفعال) مشخص نماییم.

با توجه به شکل ۵.۴ و آزمایشات انجام شده در دماهای بالاتر از  $1300K$  واکنش

میان اکسیژن و نیتروژن موجود هوا می تواند مقادیر قابل مشاهده ای از NO

تولید نماید در نتیجه مقداری از این NO با اکسیژن ترکیب شده و  $NO_2$  در نظر

گرفته می شود زیرا نسبت واقعی N به O متغیر بوده و به تعداد عامل ها بستگی

دارد میزان  $NO_x$  ایجاد شده بسیار ناچیز می باشد که بر آزادسازی های انرژی

تأثیری ندارد. و بنا براین در این محاسبات در نظر گرفته می شود. با وجود این

واکنش مهم می باشد زیرا  $NO_x$  در واقع یک آلاینده مهم جوی به جوی به حساب

می آید اکسیدهای نیتروژن نیز از طریق وارون سازی برخی از اجزای تشکیل دهنده نیتروژن که از لحاظ ارگانی و نهادی (آلی) به هم وابسته می باشند و این وارون سازی در فرآیند احتراق رخ می دهد قابل تولید می باشد همچنین این فرآیند بر آزادسازی انرژی تأثیر می گذارد اما بعنوان منبع مهم دیگری از آلاینده ها نیز به حساب می آید.

### دماهای نظری شعله

دمای نظری شعله دمایی می باشد که از طریق احتراق آدیاباتیک (بی دررو) سوختی که سراسر با اکسیژن هوا ترکیب شده بدست می آید. حداکثر دمای نظری یک سوخت با احتراق ایجادشده بواسطه مقداری اکسیژن حالص که از لحاظ نظری مورد نیاز می باشد مطابقت دارد. به همین نحو حداکثر دمای شعله با استفاده از اکسیژن هوا به احتراق کامل ایجاد شده بواسطه مقدری هوای طبیعی که از لحاظ نظری مورد نیاز می باشد مطابقت دارد. این دما از حداکثر دمای شعله در اکسیژن خالص پایین تر می باشد در اتاقکهای سربی احتراق واقعی بواسطه احتراق کامل لزوم هوای اضافی، اتلاف و کاهش گرما نسبت به دیواره های اطراف و کاهش گرما نسبت به ذرات خاکستر معلق در فرآورده های احتراق، دمای شعله بیشتر کاهش می یابد. برآوردهای شعله برای طرح اتاقک سربی، کوره، دیگ بخار، یا توربیننگاری در فرآیند احتراق مورد نیاز می باشد. در بخشهای بعدی این فصل خواهیم دید که

چطور برآورد دمای شعله و افعی برای طرح کوره های دیگ های بخارماشین آلات بزرگ و پر قدرت مورد استفاده قرار می گیرند.

محاسبه دمای نظری شعله مبنی بر این فرض می باشد که گرمای آزادشد از طریق فرآیند احتراق بطور کامل توسط محصولات و فرآورده های حاصل از احتراق و هوای اضافی به طور کامل جذب می شود.

دمای گازهای حاصل همان دمای شعله مورد نظر می باشد. در بخش ۳.۴ مشخص کرده بودیم که تعادل گرما می تواند به قرار زیر درج شود.

۴.۶۳

$$Q_1' = Q_0' + \Delta H_a - \Delta H_p$$

و این در صورتی بود که سوخت در دمای اتاق قرار گرفت اما در این مورد هیچگونه آزادسازی خالصی از گرمای کوره وجود نداشت. به این معنی که تمام انرژی واکنش مورد استفاده قرار گرفته و مصرف می شود.

$$(c_p)_m = 6.935 + 0.000338T + 0.43 \times 10^{-7} T^2 \text{ (kcal / kg mol) for } O_2, N_2$$

$$(c_p)_m = 9.085 + 0.0024T - 0.277 \times 10^{-7} T^2 \text{ kcal / kg mol.}^\circ C \text{ for } CO_2$$

با توجه به جدول ۱.۴ مشخص است که زیر بر قرار است :

$$Q_0' = 97,000 \text{ cal / g mole and since } n_F = \frac{1}{12}$$

$$n_F Q_0' = 8080 \text{ kcal / kg C}$$

$$8080 \text{ kcal / kg C} = (6.935 + 0.935 \times 10^{-3} T + 0.43 \times 10^{-7} T^2) \text{ cal / kg mol.}^\circ C$$

$$\begin{aligned} & \times (T-18)^{\circ} C \times \left( \frac{0.53}{32} + \frac{10.528}{28} \right) kg \text{ mol} / kg C \\ & + (9.085 + 2.4 \times 10^{-3} T - 0.2777 \times 10^{-6} T^2) kg \text{ mol} .^{\circ} C \\ & \times (T-18)^{\circ} c \\ & \times \frac{3.67}{44} kg \text{ mol} / kg C \end{aligned}$$

هم اکنون مقادیر متغیر را در نظر گرفته و با توجه به اینکه سمت راست معادله

فوق با سمت چپ آن برابر می باشد ، مقادیر دقیقی را به دست می آوریم :

T (°C)	LHS	RHS
1000	8080	3860
2000	8080	8312
1900	8080	7867

By linear interpolation we find that the adiabatic flame temperature is  $\sim 1948^{\circ}C$ .

با تعریف خطی متوجه می شویم که دمای شعله آدیاباتیک  $\approx 1948^{\circ}C$

در صورت وجود احتراقی ناقص ( کمتر از میزان اکسیژن موجود موقعیت نسبتاً

پیچیده تری ایجاد می شود در این مورد باید بدانیم که تولید گرمای کلی به چه

مقدار  $CO, CO_2$  تولید شده که خود وابسته به تعادل شیمیایی بدست آمده می باشد

بستگی دارد.

نسبت  $CO$  به  $CO_2$  در گازهای حاصل از احتراق قبلاً در معادله زیر نشان داده شد:

$$K_p = \frac{(p'_{CO})^2}{p'_{CO_2}}$$

هنگاهی که کل مولهای هوا مشخص و شناخته شده می باشند واکنش کلی و عمومی احتراق را در نظر داشته باشید و مورد

توجه قرار دهید..

- گرمای احتراق ارایه شده در جدول ۱.۴ منفی می باشد زیرا این گرما از طریق واکنش آزاد می شود. با این وجود  $Q_0$  را مثبت در می دانیم زیرا نشان دهنده گرمای جذب شده از طریق گازهای حاصل می باشد.

$$1C + aH + bS + \left(\frac{a}{4} + b + d\right)(O_2 + 3.764N_2)$$

$$\Leftrightarrow (1x' - y')C + y'CO_2 + x'CO + \frac{a}{2}H_2O$$

$$+ bSO_2 + \left(d + \frac{a}{4} + b\right)(3.79N_2)$$

تعالادل اکسیژن به معادله دیگری منتج می شود. تصور کنید که کل تعداد مول ها ی هوای فراهم شده شناخته شده و مسخص می باشد بنابراین

$$y' + \frac{x'}{2} = d$$

$$x' = 2(d - y')$$

به منظور جایگزین کردن  $x'$  بر حسب  $y'$  مولهای  $CO_2$  می توان از معادله ۴.۶۸ استفاده نمود و نتیجه حاصل شناخته شده و منفردی است که از طریق رابطه تعالی قابل ارزیابی می باشد.

$$p'_{co} = \frac{x'}{x' + y' + \frac{a}{2} + b + \left(d + \frac{a}{4} + b\right)3.76} = \frac{x'}{\phi 0} = \frac{2(d - y')}{\phi 0}$$

$$p'_{co_2} = \frac{y'}{\phi 0}$$

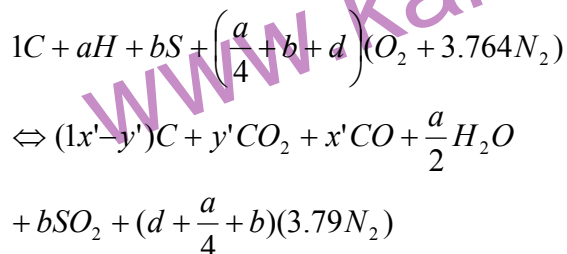
در صورت وجود احتراق ناقص ( کمتر از میزان استوکیومتری اکسیژن موجود) موقعیت نسبتاً پیچیده تری ایجاد می شود در این مورد باید بدانیم که تولید گرمای کلی به چه مقدار  $CO, CO_2$  تولید شده که خود وابسته به تعادل شیمیایی بدست آمده می باشند بستگی دارد.



$$K_p = \frac{(p'_{CO})^2}{p'_{CO_2}}$$

هنگامی که کل مول های هوا یا (d) مشخص و شناخته شده می باشد واکنش کلی و عمومی احتراق را در نظر داشته و مورد توجه قرار دهید.

• گرمای احتراق ارائه شده در جدول ۱.۴ منفی می باشد زیرا این گرما از طریق واکنش آزاد می شو با وجود این  $Q'_0$  را مثبت می دانیم زیرا نشاندهنده گرمای جذب شده از طریق گازهای حاصل می باشد.



معادله های ۶۹.۴ و ۷۰.۴ جایگزین معادله ۶۶.۴ برای  $K_p$  می شوند.

$$K_p = \frac{(x'/\phi)^2}{y'/\phi_0} = \frac{(x')^2}{y'\phi_0} = \frac{[2(d - y')]^2}{\phi_0 y'}$$

محاسبه دمای شعله به روشی نسبتاً مشابهی نسبت به مورد قبلی پیش می رود بمنظور محاسبه  $k_p$  و اجزای تکشیل دهنده گاز حاصل، مای T در نظر گرفته می

شود دمای جذب شده از طریق گاز حاصل در این دمای فرضی همراه با اجزای تشکیل دهنده گاز تعادلی محاسبه شده با گرمای واکنش در یک تعادل گرمایی مقایسه می شود. با وجود این در محاسبه و ارزیابی  $Q'_0$  نسبت واکنش گرما به گرمای جذب شده (سمت چپ معادله تعادل گرمایی نسبت به سمت راست آن)

دوباره در مقابل دمای شعله فرضی و راه حل بدست آمده هنگامی که نسبت واحد می باشد تعیین شده و نشان داده می شود.

\* همانطور که قبلاً متذکر شدیم تجزیه گر باید مطمئن شود که نسبت محدود

$CO/CO_2$  بیشتر نمی شود. در صورتی که رابطه تعادلی میزان بیشتری را پیش بینی نماید میزان محدود این نسبت باید مورد استفاده قرار گیرد.

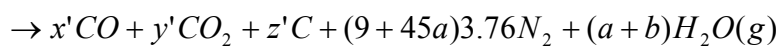
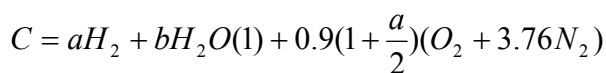
مثال ۱۰.۴

اشعه حاصل از کارخانه زغال تخلیص شده یک حلال ویژه حاوی ۰/۴ کیلوگرم هیدروژن برای هر کیلوگرم کربن می باشد سایر اجزای تشکیل دهنده فاقد

اهمیت می باشند دمای نظری (آدیاباتیک) اشعه حاصل از احتراق این محصول را با ۹۰٪ میزان بعنوان یک دوغاب آب حاوی ۴۰٪ سوخت اشباع می باشد.

راه حل :

مبنای دیگر برای راه حل : یک کیلوگرم مول کربن . معادله شیمیایی تعادلی به قرار زیر می باشد :



از آنجایی که سوخت حاوی ۰/۴ کیلوگرم هیدروژن . برای هر کیلوگرم کربن می

باشد ، برای ۱ گرم مول کربن رابطه زیر برقرار است :

$$a = \frac{12 \times 0.4}{2} = 2.4 \text{ kg mol } H_2$$

با وجود این سوخت همانند یک دوغاب اشیاع می شود

.  $40w/o H_2O$  سوخت  $60w/o H_2O$  بنابراین :

$$\frac{wt\ slurry}{kg\ mol\ C} = (12 + 2.4 \times 2) \div 0.4 = 42.0$$

$$\frac{mol\ H_2O}{mol\ C} = 42.0 \times 0.6 \div 18 = 1.4\ kg\ mol\ H_2O$$

پس روابط میان  $y'$  و  $x'$  را از طریق تعادل کربن و اکسیژن مشخص می نماییم.

$$x' + y' + z' = 1$$

$$0.9 \times 2 \times 2.2 = x' + 2y' + 2.4$$

یا

$$x' + 2y' = 1.56$$

پدینوسیله رابطه زیر بدست می آید.

$$K_p = \frac{(p'_{CO})^2}{p'_{CO_2}} = \frac{[x'/(x'+y'+1.25)]^2}{y'/(x'+y'+11.25)}$$

و این در شرایطی است که  $11.25 = (0.9 + 0.45a)3.76 + a + b$ .

در صورتی که کل کربن مصرف شود (یعنی  $z' = 0$ ) بنابراین خواهیم داشت.

$$\begin{cases} x' + y' = 1 \\ x' + 2y' = 1.56 \end{cases}$$

تحت این شرایط  $x' = 0.44$  و  $y' = 0.56$  می باشد. بنابراین رابطه زیر برقرار است.

$$(K_p)_{\max} = \frac{(0.44/12.25)^2}{0.56/12.5} = 0.0282$$

هم اکنون  $K_p$  را مشخص کرده و در صورتی که از  $(K_p)_{\max}$  بیشتر باشد آنرا با

$(K_p)_{\max}$  برابر خواهیم دانست. به منظور تشخیص دمای شعله با در نظر گرفتن

دمای خروجی گاز  $T_{exit}$  به عنوان دمای شعله از معادله تعادل گرما استفاده می کنیم.

$$\sum_j n_j Q'_0 = \sum_i \frac{m_i}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) + m_w h_{fg}$$

و این در شرایطی است که  $(\bar{C}_p)_{m,i}$  از طریق معادلات موجود در جدول p.4 بدست

می آید مقادیر مختلفی از  $T_{exit}$  را در نظر می گیریم. شرایطی ترتیب دهید که

$T_{exit} = 1000^\circ C (1273^\circ K)$  باشد.  $K_p$  را از طریق شکل ۵.۴ بدست آورده و به این

نتیجه می رسیم که  $K_p = 160$ . بنابراین رابطه زیر برقرار است.

$$K_p = (K_p)_{max} = 0.0282$$

$$x' = 0.44 \text{ g mol} \quad y' = 0.56 \text{ g mol}$$

$$(c_p)_m = \begin{cases} 7.219 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C & \text{for } CO.N_2 \\ 13.227 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C & \text{for } H_2O \\ 11.208 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C & \text{for } CO_2 \end{cases}$$

$$\sum_j n_j (Q'_0) = \left( \begin{array}{c} \text{heat from combustion} \\ \text{of } C \rightarrow CO \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{heat from combustion} \\ \text{of } H \rightarrow H_2O \end{array} \right)$$

$$LHS = 26.780 \text{ kcal / kg mol} \times 0.44 \text{ kg mol} + 94.400 \text{ kcal / kg mol} \times 0.56 \text{ kg mol} + 68.300 \text{ kcal / kg mol} \times 2.4 \text{ kg mol} = 228.600 \text{ kcal}$$

$$RHS = \sum \frac{m_i}{MW_i} (c_p) (T_{exit} - T_0) + m_x h_{fg}$$

$$= [7.216 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C \times (0.44 + 7.445) \text{ kg mol} + 13.227 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C \times 3.8 \text{ kg mol} + 11.208 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C \times 0.56 \text{ kg mol}] \times (1000 - 18) ^\circ C + 3.8 \text{ kg mol} \times 10.520 \text{ kcal / kg mol}$$

$$= 151.400 \text{ kcal}$$

$$\frac{LHS}{RHS} = 1.509$$

هم اکنون شرایطی را فراهم می سازیم که  $T = 1500^{\circ}C (1773^{\circ}K)$  باشد . دوباره

از شکل ۵.۴ استفاده کرد و

و بنابراین حدود بالاتر از می باشد نسبت را به عنوان دمایشان داده و آن را

به واسطه انبساطی که بر اساس آن روجی می یابیم .

\* هنگامی که کربن سوخته ثابت و به  $CO_2$  تبدیل می شود در موقعیت های

استاندارد گرمای آزاد شده از طریق کسر نمودن گرمای احتراق  $CO$  از گرمای

احتراق کربن بدست می آید.

بنابراین

$$\begin{aligned} RHS &= \sum \frac{m_i}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) + m_w h_{fg} \\ &= [7.388 \text{ kcal / kg mol.}^{\circ}C \times (0.44 + 7.445) \text{ kg mol } CO \text{ and } N_2 \\ &\quad + 15.99 \text{ kcal / kg mol.}^{\circ}C \times 3.8 \text{ kg mol } H_2O \\ &\quad + 12.06 \text{ kcal / kg mol.}^{\circ}C \times 0.59 \text{ kg mol } CO_2] \times (1500 - 18)^{\circ}C \\ &\quad + 3.8 \text{ kg mol } H_2O \times 10.520 \text{ kcal / kg mol} \end{aligned}$$

$$\frac{LHS}{RHS} = 1.003$$

و بنابراین  $T_{exit}$  حدودا بالاتر از  $1500^{\circ}C$  می باشد. نسبت  $LHS/RHS$  را به عنوان دما

نشان داده و آنرا به واسطه استنتاجی که بر اساس آن  $T_{exit} = 1505^{\circ}C$  می یابیم.

#### ۶.۴ محاسبه دماهای شعله واقعی

دمای شعله واقعی همیشه از دمای شعله آدیاباتیک پائین تر می باشد. زیرا همیشه

مقدار زیادی از گرما آزاد شده و وارد محیط می شود در صورتی که آزادسازی

گرمای در ازای هر واحد جرمی از سوخت مستقل شده  $Q_f$  بعنوان عملکردی از دما شناخته شود. تعادل گرما به قرار زیر خواهد بود.

۴.۷۲

$$\sum_j n_j (Q_0)_j = \sum_i \frac{m_i}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) + m_w h_{fg} - (c_p)_{m,a} (T_{air} - T_0) - \frac{m_a}{MW_A} + Q_1 m_F$$

در صورتی که دمای شعله را اندازه گرفته باشیم می توانیم  $Q_f$  را مشخص نمائیم.

مثال ۴.۱۱

جریان سوخت مثال ۱۱.۴ (سوخت ۰/۴ کیلوگرم کربن معلق دریک دوغاب حاوی ۴۰٪ سوخت) دوباره در ۹۰٪ از مقدار استوکیومتری هوا سوخته متشتعل می شود. فرض کنید که دمای شعله حاصل از احتراق حدود ۵۵۰c می باشد چه مقدار گرما در ازای هر کیلوگرم مول کربن سوخته از شعله ساطع می شود. راه حل با استفاده از  $T_{flame} = 550^\circ C$  ممکن است  $K_p$  را همچنانکه در مثال ۱۰.۴ انجام دادیم بدست آوریم در آن صورت  $K_p = 0.019$  بوده و این مقدار کمتر

از  $(K_p)_{flame}$  می باشد بنابراین لازم است با استفاده از روابط نشان داده شده  $x'$  و  $y'$

$z'$  محاسبه کنیم. اساسی راه حل با ۱ کیلوگرم مول کربن

$$\begin{cases} x' + y' + z' = 1 \\ x' + 2y' = 1.56 \end{cases}$$

$$K_p = 0.01898 = \frac{[x' / (x' + y' + 11.25)]^2}{y' / (x' + y' + 11.25)}$$

بنابراین موارد زیر بدست می آوریم.

$$x' = 0.371 \text{ kg mol}$$

$$y' = 0.594 \text{ kg mol}$$

$$z' = 0.035 \text{ kg mol}$$

$$\begin{aligned} \sum_j n_j (Q'_0) &= Q_{c \rightarrow co} + Q_{c \rightarrow co2} + Q_{H2 \rightarrow H2O(l)} \\ &= 26.780 \text{ cal g mol} \times 0.371 \text{ kg mol} \\ &\quad + 94.400 \text{ cal / g mol} \times 0.594 \text{ kg mol} \\ &\quad + 68.310 \text{ cal / g mol} \times 2.4 \text{ kg mol} \\ &= 229.950 \text{ kcal per mol of VC burned} \end{aligned}$$

فرض می کنیم که  $T_{exit} = T_{flame}$  و بنابراین برای  $T_{exit} = 550^\circ C$  رابطه زیر قرار دارد:

$$(c_p)_m = \begin{cases} 7.079 \text{ kcal / kg mol} \cdot ^\circ C & \text{for CO and } N_2 \\ 10.93 \text{ kcal / kg mol} \cdot ^\circ C & \text{for } H_2O \\ 10.32 \text{ kcal / mol} \cdot ^\circ C & \text{for } CO_2 \end{cases}$$

با توجه به تعادل گرمای حاصل از معادله ۷۲.۴ رابطه زیر برقرار است:

$$\sum_j n_j Q'_0 = 229,950 = \sum \frac{m_i}{MW_i} (cp)_{m,i} (T_{exit} - T_0) + m_w h_{fg} + Q_1 m_F$$

یا

$$\begin{aligned} 230.750 &= [7.07 \text{ kcal / kg mol } ^\circ C \times (0.371 + 7.445) \text{ kg mol} + 10.2969 \text{ kcal / kg mol} \cdot ^\circ C \\ &\quad \times 3.8 \text{ kg mol} + 10.32 \text{ kcal / kg mol} \cdot ^\circ C \\ &\quad \times 0.59 \text{ kg mol}] \times (550 - 18)^\circ C \\ &\quad + 3.8 \text{ kg mol} \times 10,52 \text{ kcal / kg mol} + Q_1 m_F \end{aligned}$$

$$Q_1 m_F = 229,950 - 94,700 = 135,180 \text{ kcal}$$

از آنجائیکه اساس و مبنای راه حل، ۱ کیلوگرم کربن بود بنابراین گرمای آزاد شده

می باشد بدون اندازه گیری دمای شعله لازم است به طور  $1350180 \text{ cal / kg mol} = 0$

همزمان  $Q_1$  و دمای شعله را ارزیابی کنیم دمای شعله واقعی را از طریق همان

فرآیند نموداری که قبلاً شرح دادیم مشخص می نمائیم. مجدداً نسبت به گرمای

واکنش سمت چپ معادله (۷۲.۴) را به سمت راست این معادله نشان داده و دمایی را که در آن این نسبت یکی می باشد از این طریق مشخص می نمائیم بمنظور ارزیابی و برآورد  $Q_1$  ابتدا بیائید تبادل انرژی میان یک دیواره سیاه هم دمایی با سطح  $A_T$  و یک شعله گازی خاکستری رنگ که این دیواره را پر می نماید در نظر بگیریم. در این صورت شعله انرژی را به میزان  $q_{rad}$  طبق رابطه زیر ساطع می نماید.

۴.۷۳

$$q_{rad} = A_T \sigma T_f^4 (\varepsilon G)_f$$

$$q_a = A_T \sigma T_c^4 (\alpha G)_c = A_T \sigma T_c^4 (\varepsilon G)_c$$

با وجود این دیواره در دمای مطلق  $T_c$  انرژی را ساطع کرده و بخشی از آن از طریق گاز جذب خواهد شد. نسبت جذب انرژی از طریق گاز به واسطه رابطه زیر بدست می آید:

۴.۷۴

$$q_a = A_T \sigma T_c^4 (\alpha G)_c = A_T \sigma T_c^4 (\varepsilon G)_c$$

میزان خالص تبادل تشعشع میان گاز و دیواره سیاه به قرار می باشد:

۷۵.۴

$$(q_{rad})_{net} = A_T \sigma [(\varepsilon G)_f T_f^4 - (\varepsilon G)_c T_c^4]$$

چنانچه هم اکنون میزان خالص تبادل میان حجم کل گاز و بخشی از دیواره را در نظر بگیریم برای مثال سطح قرار گرفته در مقابل لوله های دیگ بخار که دارای سطح می باشد رابطه زیر به دست می آید:



در این نمونه ساده

۷۷.۴

$$F_{TC} = (\varepsilon_G)_f \frac{AC}{A_T} \qquad F_{CT} = (\varepsilon_G)_c$$

در صورتی که  $(\varepsilon_G)_c$  نشر گاز در دمای  $A_c$  بوده و  $(\varepsilon_G)_f$  به همان مفهوم اولیه خود به کار رفته است.

ممکن است این مفهوم را با نمونه ای واقعی از یک اتاق احتراق سربی همراه با لوله های سرد که سیاه نمی باشند و تشعشع را جذب نموده و با سطوح نسوز خود تمام تشعشع منعکس بر خود را مجدداً ساطع می نماید گسترش می دهیم تبادل میان

تشعشع و سطح  $A_c$  را که هم اکنون را به عنوان سطوح مساحت لوله موثر واقع می شود ارائه می دهد اما  $F_{TC}$  و  $F_{CT}$  باید به منظور در بر گرفتن تأثیر سطح نسوز و نشر

سطح  $A_c$  مجدداً برزیابی شوند بدین منظور رابطه زیر بر قرار است :

$$F_{TC} = \frac{1}{\frac{A_T}{A_c \varepsilon_t} + \frac{1}{(\varepsilon_G)_f} - 1} \qquad F_{CT} = \frac{A_T / A_c}{\frac{A_T}{A_c \varepsilon_t} + \frac{1}{(\varepsilon_G)_c} - 1}$$

به این دلیل که سطح نسوز کل تشعشع دریافت شده را مجدداً ساطع می نماید

نشر آن در محاسبه گنجانده نمی شود کل میزان گرمای انتقال یافته از شعله موجود در دیگ بخار q در واقع مجموع انتقال گرمای تابشی و همچنین انتقال

گرمای همرفتی می باشد. یعنی

و این در صورتی است که h ضریب انتقال گرمای همرفتی می باشد و اکثر موارد

انتقال گرمای همرفتی تنها جزء ناچیزی از انتقال گرمای تشعشع موجود در اتاق

سربی احتراق می باشد که اغلب اهمیت چندانی ندارد.

شایان ذکر است که در محاسبه دمای شعله به روش پیشنهاد شده این میزان کافی آشفته‌گی ایجاد شده را در نظر می‌گیریم بطوری که دمای گاز خروجی میانگین دمای شعله برابر می‌باشند. در واقع در وضعیت آشفته محور نیز دمای گاز خروجی مجدداً ۱۰۰ تا ۱۶۰c از میانگین دمای تابشی کمتر می‌باشد.

هنگامی که دمای مطلق جذب کننده از دمای شعله کمتر باشد تشعشع در سطح سرد به عنوان عاملی اصلی در نظر گرفته نشده و در کاربرد و تنها یک انتشار مجاز می‌باشد. بنابراین معادله ۷۶.۴ به قرار زیر ساده تر می‌گردد.

۸۰.۴

$$q_{TC} = \alpha A_T F_{TC} (T_f^4 - T_c^4)$$

در برخی طرح‌های کوره (برای مثال آنهایی که دارای مشعل چرخشی می‌باشد) اساساً کل فرآیند احتراق در این مشعل رخ می‌دهد دمای شعله آدیاباتیک در راه خروجی اتاق مشعل بدست می‌آید. بنابراین دمای گازهای گرم چنانچه گازها از میان کوره برافراشته می‌شوند کاهش می‌یابد. با وجود این در صورتی که در ارتفاعات کوره مشعل‌های چرخشی وجود داشته باشند، برآورد دمای شعله ثابت ممکن است همچنان برای اهداف طرح اولیه معقول واقع شوند.

مثال ۱۲.۴

برای موقعیت مثال ۱۱.۴ سطح کوره مؤثر را در ازای هر کیلوگرم مول کربن سوخته در هر ساعت مشخص نمایید.

(۱) دو سطح کوره مؤثر ممکن است دردمای  $300^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شود. (۲) سطح جاذب از انتشاری حدود  $0/5$  برخوردار بوده و شعله ممکن است سیاه در نظر گرفته می شود.

راه حل: تحت این شرایط  $F = E_i(A_c / A_T)$  و معادله  $4.80$  به قرار زیر ساده خواهد شد.

$$\begin{aligned}q_{TC} &= \sigma \frac{A_c}{A_T} A_T (T_f^4 - T_c^4) = \sigma A_c E_i (T_f^4 - T_c^4) \\ &= 136.000 \text{ kcal/h} = 158,000 \text{ W} \\ \sigma &= 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \\ 158.000 \text{ W} &= 5.669 \times 10^{-8} (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4) A_c \times 0.5(823^4 - 573^4) \\ A_c &= 14.52 \text{ m}^2\end{aligned}$$

### انتشار شعله

بمنظور ارزیابی دقیق انتشار شعله شایان ذکر است که تشعشع حرارتی ساطع

شده از طریق شعله بواسطه سه پدیده اصلی می باشد:

- ۱- تشعشع مادون قرمز حاصل از گازهای ایجاد شده در فرآیند احتراق
- ۲- پیوستاری از تشعشع حرارتی حاصل از دوده در دماهای بالا و ذرات خاکستر
- ۳- نورتابی شیمیایی شکلی از تشعشع غیرتعدالی

نورتابی شیمیایی به میزان خیلی کمی در انتقال کل گرمای تابشی دخالت داشته

درمواقع کم اهمیت در نظر گرفته می شود. ابتدا باید تشعشع حاصل ساطع شده از

گازهای گرم را در نظر بگیریم. هنگامی که گاز گرم می شود تشعشعی را در

بخشهای خاصی از طیف مادون قرمز ساطع می نماید. بالعکس هنگامی که تشعشع

سیاه نرگی از جرم گاز گرمی عبور می کند این تشعشع در همان نواحی جذب می

شود. برخی از گازهای طیف های جذب نشرچشمگیری را در ناحیه مادون قرمز و در دماهای مطلوب و مورد نظر موجود در اتاقهای سربی احتراق نشان نمی دهند. با وجود این گازهایی مثل  $CO_3, SO_2, CO$  و بخار آب طیفهای جذبی را نشان داده که از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد از آنجائیکه  $SO_2, CO$  در شعله های صنعتی موجود می باشد از ابتدا تشعشع حاصل از  $CO_2$  و رطوبت آب برایمان مسئله ساز بود.

میزان تشعشع ساطع شده از طریق شعله گاز های حاوی  $H_2O, CO_2$  به دمای شعله گاز جرم گاز موجود در شعله و شکل هندسی جرم گاز بستگی دارد. در کل فشار ارائه شده جرم گاز موجود در یک شعله نیم کره ای بر حسب فرآورده فشار جزئی گاز تابشی ما شعاع نیم کره قابل بیان می باشد شایان ذکر است که مقدار تشعشع ساطع شده بعنوان نسبت تشعشع دریافتی از جرم گاز در مرکز بنای نیم کره ای به تشعشعی که در همین موقعیت دریافت خواهد شد ساختار سیاه نیم کره ای را ارائه می دهد که دارای همان شعاع می باشد این نسبت چیزی بیشتر از نشر گاز نمی باشد.

انتشار و نشر  $CO_2$  و بخار آب در فشار کلی  $1 \text{ atm}$  عاملان  $T$  برای مقادیر مصرف محصول  $PL$  می باشند برای سایر اشکال هندسی ما را جایگزین میانگین متوسط طول اشعه  $L_m$  می نامیم که ممکن است بعنوان عامل مناسبی برای تشعشع بر پوشش کلی مورد استفاده قرار میگیرد. (سط کلی حجم گاز) برای اشکال هندسی معمول و مورد نظر  $L_m / D$  بدست می آید که در اینجا  $D$  بعنوان یک خصیصه و

ویژگی محسوب می شود جدول ۳.۴ این نسبت و ویژگی  $D$  را برای اشکال هندسی معمول و مختلفی نشان می دهد. برای اشکال که در جدول نشان داده شده ن هنگامی که  $V$  نشانگر حجم گاز و  $A_T$  نشانگر سطح و مساحت کل احاطه کننده حجم گاز می باشد. در این صورت رابطه پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود.

$$L_m = 0.88 \times 4(V / A_T)$$

برای موارد عملی که بخار آب و دی اکسید کربن در گاز حاصل از احتراق فراهم می باشند کل تشعشع از احتراق هر جزء تشکیل دهنده که به دلیل سیاه شدگی و سایه افکنی طیفی بطور جداگانه در نظر گرفته شده اند کمتر می باشد. همچنین برخی سایه افکنی و سیاه شدگی طیفی وجود دارند که بواسطه دی اکسید گوگرد بوده و بعداً انتشار و نشر مخلوط را کاهش می دهد با وجود این تأثیر  $SO_2$  ناچیز و کم اهمیت می باشد.

اگرچه دستیابی به مقدار و میزان دقیقی از انتشار و نشر برای مخلوط (ترکیب)  $CO_2$  - بخار آب پیچیده می باشد. اما برآورد معقولی به راحتی قابل دستیابی است. در واقع در این ترکیبات  $\epsilon_G$  با افزایش دما به روشی که محصول  $\epsilon_G T$  که صرفاً به محصول  $(P'_{CO_2} + P'_W)L_M$  بستگی دارد کاهش می یابد. شکل ۶.۴ نشانگر این رابطه می باشد. میزان  $\epsilon_G T$  بطور جزئی با نسبت  $P'_W / P'_{CO_2}$  متفاوت می باشد اما همچنانکه در شکل می بینید بیش از گستره نسبت ۱ یا ۲ تغییر ناچیزی قابل مشاهده است.

شکل	ویژگی D	$L_m / D$
کره، گرد استوانه چرخشی به سمت راست	قطر	۰/۶۳
قطر = $\frac{1}{2}$ ارتفاع	قطر	۰/۴۵
قطر = ارتفاع	قطر	۰/۶
قطر $\times 2 =$ ارتفاع	قطر	۰/۷۳
$\infty =$ ارتفاع	قطر	۰/۹۰
استوانه موازی مستطیل شکل مکعب	لبه	۰/۶
$1 \times 1 \times 4$	کوتاه ترین لبه	۰/۸۱
سطوح صاف و موازی بیشمار فضا میان لوله ها	فاصله	۱/۸
ارتفاع دایره موجود در پشته لوله	فاصله	۳/۵

#### نمودار ۶-۴ انتشار نشر فرآورده های احتراق

گازهای احتراق که حاوی  $CO_2$  و بخار آب می باشد بطور کلی در این گستره قرار دارند. طبق شکل ۶.۴ بهترین تخمین در گستره ۸۵۰ تا  $1700^\circ K$  قرار دارد. با وجود این عدم دقت و درستی حاصل ببه واسطه کاربرد این فرآورده و تخمین

خارج از گستره ذکر شده احتمالاً کمتر از عدم ثبات و قعطیت در سایر اجزاء تشکیل دهنده حاصل از نشر گاز کوره می باشد.

### نشر دوده و ذرات سوخت

ذرات دوده در حین احتراق ایجاد می شوند و در واقع زمانی که هوای کافی برای فرآیند کامل وجود نداشته باشد یا اینکه هوا بخوبی با سوخت ترکیب نشود ذرات دوده کوچک بوده و حدوداً ۰/۰۲ تا ۰/۰۶  $\mu\text{m}$  می باشند.

تمرکز ذرات دوده در شعله از طریق تجزیه و تحلیل قابل پیش بینی نمی باشد تمرکز دوده واقعی باید از طریق برآورد و ارزیابی مشخص شود تشعشع دوده اغلب شیر افشانی و درخشش نام دارد.

انتشار و نشر در هرگونه طول موج ویژه  $\lambda$  انتشار تک فاز نام دارد و ربطی به اندازه ذرات دوده ندارد. از ابتدا این انتشار تکفام به کل حجم ذره در ازای هر واحد حجمی فضا  $u_s$  بستگی داشته است.  $\epsilon_\lambda$  به قرار زیر برآورد می شود.

۴.۸۱

$$\epsilon_\lambda = 1 - e^{-k'us L_m / \lambda}$$

و این در صورتی است که  $L_m$  نشانگر میانگین طول اشعه بوده و  $K'$  ثابت می باشد. انتگرالگیری بر کلیه طول موجهای منجر به حالتی برای انتشار و نشر دوده

$\epsilon_s$  می شود چنانچه

$$\epsilon_s = 1 - \left( 1 + \frac{K' T_{us} L_m}{c_2} \right)^{-4}$$

و این در صورتی است که  $C_2$  دومین ثبات تشعشع پلاتک می باشد مقادیر  $K'/C_2$  از لحاظ تجربی بواسطه ضریب شکست کمپلکس دوده بدست می آیند این مقادیر به نسبت هیدروژن به کربن زغال مصرف شده بستگی دارد. مقادیر  $K'/C_2$  در گستره ای به قرار زیر وجود دارند:

$$480m^{-1}/^{\circ}K < \frac{K'}{C_2} < 980m^{-1}/^{\circ}K \quad \text{for } 0 < \frac{H}{C} < 0.4$$

مقدار و میزان کاربردی حدود  $(85ft^1/QR)$   $500m^{-1}/QR$  خواهد بود تبدیل کربن به دوده در ساختار های زغال بادقت هنگامی که شعله درخشان و کاملاً مشهودی وجود داشته باشد حدود ۰.۲٪ خواهد بود. این مقدار را با انتشار دوده از ۰/۵ تا ۰/۷۵

مطابقت دارد. با وجود این تهت این شرایط شعله های زغال تنها بطور متوسطی درخشان بوده افزایشی حدود ۰/۱ برای انتشار گاز غیر درخشان معمولاً هنگامی که محاسبات بر مبنای میانگین دمای شعله می باشند، کافی است. حضور گردوغبار ذرات سوخت مشتعل و تقریباً سیاه در شعله ها می تواند به انتشار و نشر شعله افزوده شود. غباری از این ذرات ممکن است از طریق میانگین طول اشعه  $L_m$  و یک سطح پشتیبانی شده در ازای هر واحد جرمی از فضا  $A/V$  شرح داده و متمایز شود.

انتشار و نشر  $\epsilon_p$  غبار به واسطه ذرات طبق رابطه زیر برقرار است.

$$\epsilon_p = 1 - e^{-(A/V)L_m}$$



متناوباً ممکن است غبار ذرات موجود از طریق چگالی  $N$  میانگین مساحت پیش بینی شده در ازای هر ذره از  $A_p$  شرح داده شده متمایز شود. انتشار و نشر غبار به ترتیب زیر برقرار می باشد

$$\varepsilon_p = 1 - e^{-NA_p L_m}$$

بعنوان مثال ویژه و نمادین غباری حاوی  $200 \mu\text{m}$  ذرات مازوت،  $L_m = 3\text{m}$  و احتراقی در شرایط استوکیومتری منجر به اهدای غبار- ذره برای انتشاری در حدود  $0/30$  ثانیه می شود.

### انتشار کل شعله

انتشار تلفیق شده شعله بواسطه تشعشع حاصل از گازها، دوده، و ذرات ممکن است از طریق انتشار و نشر اجزاء تشکیل دهنده در صورتی که مشخص باشند برآورد شود.

$$\varepsilon_{comb} = 1 - (1 - \varepsilon_G)(1 - \varepsilon_s)(1 - \varepsilon_p)$$

## برآورد شرایط و الزامات سوخت

ممکن است به واسطه دانشی در مورد کل شرایط و الزامات و بخار گرمای آزاد شده در کوره به ازای هر واحد جرمی از سوخت الزامات سوخت با مشخص نمائیم .

کیفیت را از طریق محاسبات تعادل انرژی در کوره که در فصل ۴ متذکر شدیم مشخص مینمائیم. ممکن است مشکلمان را اینگونه بیان کنیم. جرم سوخت مورد نیاز را در ازای هر واحد زمان اراده شده مشخص نماید (۱) میزان بالاتری از گرمای سوخت ، (۲) تجزیه نهایی سوخت (۳) هوای اضافی بکار رفته و دمای هوای ورودی (۴) دمای گازهای خروجی و خاکسترها (۵) شرایط خروجی بخار و میزان تولید و (۶) دمای آب تغذیه.

این مسئله از طریق ایجاد تعادل گرما پیرامون کوره قابل محاسبه می باشد. بنابراین رابطه زیر را خواهیم داشت.

$$m_a h_a + m_F Q_0'' + m_1 h_{ss} = m_1 h_{ss} + m_F \left[ \sum_i \frac{m'}{MW_i} (c_p) (T_{exit} - T_0) \right] + m_w h_{fg} m_F + m_A (c_p)_A m_F (T_{ash} - T_0)$$

چنانچه هوای کوره‌هاز پیش گرم شده است ، هوای وارد شده به داخل کوره در

دمای اتاق می باشد و آنتالپی آن ناچیز بودن و نادیده انگاشته می شود . بنابر این ممکن است عبارت را حذف نموده تا با ساده سازی معادله زیر بدست آید :

$$m_1 (h_{ss} - h_1) = m_F \left\{ Q_0' - \left[ \sum_i \frac{m'}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) \right] - m_w h_{fg} - m_A (c_p)_A (T_{exit} - T_0) \right\}$$

یا

$$m_F = \frac{m_1(h_{ss} - h_1)}{Q_0 - \sum \frac{m'}{MW_i} (c_p)_{m,i} (T_{exit} - T_0) - m'_w h_{fg} - m'_A (c_p)_A (T_{exit} - T_0)}$$

( ۲.۵ ب )

در صورتی که بخار مجدداً در دیگ بخار گرم شود ، صورت سمت راست معادله

( ۲.۵ ب ) باید اصلاح شود تا گرمای آزاد شده در دستگاهی که مجدداً بخار را گرم

می نماید ، بدست آید .

### ۳.۵ وضعیت مولد بخار

#### طرح اولیه دیگ بخار استوانه ای شکل و آتش سوز

یک دیگ بخار استوانه ای ، ظرف لوله ای شکل پر از آبی می باشد که حاوی

تعدادی ظروف لوله ای شکل بوده که به عنوان کانالها و مجراهای برای جریان

گازهای حاصل از احتراق به کار می روند. گرما از گاز گرم و از طریق دیواره های

ظرف لوله ای شکل به داخل آب تحت فشار موجود در ظروف لوله ای منتقل می

شود.

طرح های اولیه دیگ بخار تنها بر مبنای یک ظرف لوله ای و استوانه ای شکل

بودند. چنانچه شرایط نیرو و انرژی افزایش می یابند، این چند ظرف استوانه ای به

منظور افزایش سطح انتقال گرما به کار برده می شود( به شکل ۵.۵ مراجعه

کنید). این طرح از دیگ بخار که در واقع ظرف استوانه ای آتش سوزی بوده تقریباً

تا اواخر قرن نوزدهم برای تولید انرژی و نیرو همچنان و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. هنوز از این طرح در برخی واحدهای کوچک به منظور تولید بخار برای فرایندهای صنعتی یا گرمای ساختمانهای تجاری استفاده می کنند.

سیستم دیگ بخار استوانه ای و آتش سوز از بعضی جهات مثل اندازه، فشار بخار، و میزان ایمنی عملکرد دارای محدودیت می باشد. در صورت ضعف و عدم توانایی این ظرف استوانه ای آتش سوز، آب می تواند مستقیماً وارد منطقه کوره شده و به سرعت مقادیر زیادی بخار تولید نماید که بخار ایجاد شده منجر به انفجار لوله می شود.

### پیشرفت طرح دیگ بخار آب استوانه ای

نگرانی هایی که از لحاظ امنیت کاری و محدودیت های دیگ بخار استوانه ای و آتش سوز وجود داشت، در واقع منجر به پیشرفت و ابداع طرح دیگری از دیگ بخار آب استوانه ای شکل شده در این طرح، آب در داخل لوله ها جریان داشته و گازهای احتراق نیز روی سطح آب جریان دارند. دوباره گرمای گاز گرم از طریق دیواره ظرف استوانه ای به داخل آب انتقال می یابد، که در این مورد این گرما داخل لوله می باشد.

اولین دیگ بخار استوانه ای در انگلستان توسط بسر ویلیام بلکی در سال ۱۷۶۶ ساخته شد و به ثبت رسید. جان استیونز، مخترع آمریکایی و بنیانگذار مؤسسه فناوری استیونز، دستگاه دیگ بخار استوانه ای را در سال ۱۸۰۳ ساخته و به ثبت

رساند. اولین کاربرد او در این زمینه به منظور ایجاد نیروی محرکه در یک قایق بخار بر روی رودخانه هادسن نزدیک شهر نیویورک بود.

اختراع بعدی در سال ۱۸۷۰ رخ داد و در واقع ابداع دستگاه دیگ بخار استوانه ای

و خمیده ای بود (به شکل ۵. ۶ مراجعه کنید). لوله های آبی خمیده با فضاهای

آبی موجود در عقب و جلو مرتبط بوده و در بالای آن محفظه بخاری نیز وجود

دارد. این طرح در واقع گردش بهتری را از آب موجود در لوله و همچنین منطقه

انتقال گرمای اضافی ارائه داد. بیست سال بعد، استرالیینگ طرح دیگری را ارائه

نمود که طبق آن لوله های مولد بخار به طور مستقیم به یک استوانه جداکننده

بخار مرتبط می شدند. به دلیل اینکه دستگاه دیگ بخار استرالیینگ دارای لوله

های بخار خمیده ای بود، طرح وی به عنوان دیگ بخار لوله ای شکل خمیده

معروف شد.

### طرح دیگ بخار / کوره خنک شده با آب

تغییرات اساسی در مفاهیم دستگاه دیگ بخار در اواخر دهه ۱۹۲۰ رخ داد. چنانچه

فرآورده های الکتریکی ایستگاه نیرو افزایش یافتند، در واقع ساخت واحدهای دیگ

بخار بزرگتر ضروری شد. کوره سوخت رسان و دیگ بخار مورد بررسی قرار گرفته

و محدودیت هایی در طرح آنها وجود داشت، بنابراین روشهای جدیدی برای

سوخت زغال موردنیاز واقع شدند. راه حل مربوط برای محدودیت های موجود در

طرح این دستگاه ها از طریق دستگاه زغال سوز گردکننده و طرح دیگ بخار و

کوره خنک شده با آب، ارائه داده شد. طرح های اولیه بطور ساده خنک سازی

کوره با آب را با طرح های دیگ بخار موجود یکی کرده، و سیستم خنک کننده کوره را از چرخش دیگ بخار جدا می سازد. این ترتیب در مدتی کوتاه به منظور سازماندهی و آرایش کاملی که در آن سطح خنک کننده کوره و سطح دیگ بخار به عنوان واحدی منفرد آراسته شدند، متوقف شد.

کوره های خنک کننده آب هم اکنون در کلیه دیگهای بخار تقریباً به کار می روند. لوله های حاوی آب بروی دیواره های کوره و بالای آن قرار می گیرند. آب موجود در این لوله ها به عنوان خنک کننده دیواره های کوره و بخش دیگ بخار دستگاہ نیرو به کار می رود. طرح کوره خنک شده با آب انتقال گرما را به بخش های ساختاری کاهش می دهد، بنابراین حجم بیشتری از کوره همراه با شرایط فشار و دمای بخار افزایش یافته باقی می ماند.

علاوه بر آن، ساختار خنک نمودن کوره با لوله های آب موجود در دیواره آن منجر به بهتر نمودن طرح مکانیکی آن شده و همچنین باعث کاهش اتلاف گرمای خروجی می شود. سطوح جذب کننده گرما که در کوره موجود می باشند گرمای ایجاد شده از طریق فرآورده های لاصل از احتراق را دریافت می کنند. مکانیزم

های اولیه انتقال گرما در کوره در واقع تشعشع از بستر سوخت و یا اجزای آن و تشعشع غیرتابشی از فرآورده های حاصل از احتراق می باشند. انتقال گرمای همرفتی از گازهای کوره نقش مهمی را ایفا می کنند. بنابراین چنین دیگهای بخاری اغلب دیگهای بخار تابشی نامیده می شوند. هر گونه رسوبی از خاکستر یا سرباره منجر به کاهش جذب مؤثر گرما از طریق سطوح موجود در دیواره کوره می

شود. کلیه طرح های اولیه دیگ بخار تابشی همانند بسیاری از طرح های دیگ بخار تابشی مدرن با مفهوم « چرخش طبیعی » ترکیب شدند. در جریان طبیعی دیگ بخار، تفاوت در گرانی (ثقل) ویژه میان آب و بخار ارائه کننده نیروی رانش برای جریان می باشد. این حالت در شکل ۷.۵ نشان داده شده است.

شکل ۷.۵ قاعده جریان طبیعی در دیگ بخار ( بدست آمده از قاعده انرژی، توسط ای. کالپ؛ رونوشت در سال ۱۹۷۹- مورد استفاده با اجازه شرکت کتاب ام سی گرو- هیل، نیویورک)

جریانات استاندارد آب از محفظه بخار از طریق لوله ای که به محفظه پایینی متصل شده جریان می یابد. ورود گرمای مشعل به داخل لوله مصرف کننده باعث کاهش چگالی شاره (سیال) در این منطقه یعنی همان لوله مصرف کننده شده و این امر باعث جریان روبه بالا و در واقع جریانی به سمت محفظه بخار می شود.

شکل ۵-۸ نشان دهنده ترسیمی از یک زغال گرد شده می باشد که با مفاهیم جریان طبیعی و دیگ بخار تابشی توأم شده است. آب از محفظه و استوانه گلی به سمت پایین، یعنی به طرف بخشهای فوقانی و پرکننده لوله های ردیف شده بر

روی دیواره های کوره فروزان جریان می یابد. چگالی پایین مخلوط بخار- آب در این لوله ها به طرف بالا- سمت راست که در آنجا استوانه و محفظه بخار وجود دارد، بالا می رود. بخار از این ترکیب جدا شده و به سمت استوانه مرکزی رفته و در آنجا جابجا می شود. آب تغذیه وارد محفظه استوانه موجود در سمت چپ شده و در آنجا با مایع اشباع شده موجود در استوانه مرکزی و استوانه موجود در سمت



چپ ترکیب می شود. مایع سردکننده به سمت پایین و به طرف محفظه و استوانه گلی جریان می یابد.

گازهای گرم که منطقه تابشی و فروزان را ترک می کنند، همچنان حاوی مقدار موجود انرژی می باشند که باید به کار گرفته شود. مقداری از این انرژی از طریق همرفت (وزش گرمایی) از گازهای گرم به لوله های دیگ بخار که از استوانه گلی به سمت دو استوانه بخار موجود در سمت راست جریان دارند، انتقال می یابند. انرژی اضافی از طریق همرفت به سمت بخاری که به داخل لوله های بیش از حد گرم شده جریان دارد، انتقال می یابد. خنک کنندگی بیشتر از طریق انتقال گرمای همرفتی به سمت آب تغذیه موجود در لوله های صرفه کار که از محفظه و استوانه گلی به سمت استوانه بخار موجود در بالا و طرف چپ جریان دارند، انتقال می یابد.

### تولید کننده های جدید بخار

میزان بخاری که از طریق جداسازی سطح در ازای هر واحد از سطح قابل تفکیک می باشد، بسیار محدود است. جداسازی سطح در یک محفظه بخار ساده برای جریانات میزان بالای بخار ایجاد شده از طریق دیگهای بخار مدرن کافی نمی باشد. در اینجا تفکیک کننده های مرکز گریز موجود در استوانه بخار موردنیاز می باشند (به بخش ۵.۵ مراجعه کنید).

اگرچه تفکیک کننده مرکز گریز بطور قابل توجهی به اتلاف بخش فوقانی افزوده می شود اما طول زیاد لوله های بالابرنده و پائین آورنده به یک دیفرانسیل کافی در



بخش فوقانی برای جریانی مناسب منجر می شود. یک دستگاه مدرن تولیدکننده بخار یا جریان طبیعی در شکل ۹.۵ نشان داده شده است همچنانکه در طرح اولیه موجود در شکل ۸.۵ نشان دادیم حجم زیادی از بخار در لوله های دیگ بخازر موجود در راستای دیواره های کوره تولید می شود ترکیب بخار - آب به سمت بالا و به طرف محفظه و استوانه اصلی بخار(محفظه بالایی) که در آن تفکیک کننده مرکز گریز بخار را از آب جدا می سازد جریان دراد. پس از عبور از خشک کن بخار موجود به سمت دو رادیاتور بسیار گرم کننده همرفتی جریان یافته و پیش می رود در این رادیاتور گازهایی که در کوره را ترک می کنند بخار تا دمای مطلوبی گرم می نمایند. مایع موجود در محفظه بخار با آب تغذیه ترکیب می شود و سپس از طریق لوله های موجود در سمت چپ به سمت پائین یعنی به طرف محفظه پائین تر جریان می یابد. مقداری از آن مایع درون محفظه پائین به سمت بالا تبخیر شده و به گاز تبدیل می شود. سری لوله های مرتبط کننده محفظه های پائینی و فوقانی جریان یافته و تا اندازه ای تبخیر شده و به گاز تبدیل می شود. سری لوله های موجود در سمت چپ بعنوان صرفه کار عمل می نمایند( رادیاتور آب تغذیه) سپس گازهای موجود به سمت رادیاتور و گرمکن هوا پیش رفته و هوای موجود را قبل از فرآیند احتراق گرم می نمایند. تعدادی از دیگهای بخار مدرن و امروزی به جای جریان و گردش طبیعی از جریاناتی که بطور مصنوعی ایجاد می شوند استفاده می کنند. این طرح در شکل ۱۰.۵ نشان داده شده است. عملکرد چنین دستگاههای تولید کننده و مولد بخار اساساً دستگاههای مولد در واحد طبیعی

همرفت می باشد. چنین و احدهایی در فشارهای بسیار بالا یی کارساز بوده و در واقع تفاوت کاهش یافته چگالی میان مایع و بخار گرمای جریان طبیعی موجود را محدود می سازد. این مولدان بخار اغلب واحدهای جریان ایجاد شده پمپ نامیده می شوند زیرا بخش فوقانی جریان طبیعی همچنان چشمگیر بوده و پمپ موردنظر بمنظور فراهم نمودن تنها بخشی از اتلاف بخش فوقانی استحکاک می باشد.

دیگهای بخاری که در آنها جریانات بطور مصنوعی ایجاد می شود قادر به تولید ۱۳۰/۰۰۰ تا ۳/۰۰۰/۰۰۰ کیلوگرم بخار در هر ساعت می باشد و البته این امر بستگی به طرح و ظاهر آن دارد. فشارهای بخار از فشار بحرانی پائین تر بوده و بطور کلی گستره ای حدود ۱۱۵ تا ۱۱۶ بار را شامل می شود (2400si تا 170).

#### دیگهای بخارتک مرحله ای (فشار کلی و دیگهای بخار بنسون)

هر دو مولداتن بخار جریان طبیعی و ساختگی بعنوان واحدها (دستگاهها) یی کخ مجدداً به حرکت درآمده جریان دارند. در نظر گرفته می شوند زیرا تنها یک قسمت از آب جاری موجود در لوله های مولد بخار تغلیظ شده و به بخار تبدیل می شود. مابقی آن نیز مجدداً جریان می یابد. در این دیگهای بخار که دارای طرح تک مرحله ای می باشند تمام آبی که وارد آن می شود تغلیظ شده و به بخار تبدیل می شود.

در این سیستم آب موجود در پمپ تغذیه به اصلی حدود ۳۴۰ بار (5000si) تحت فشار قرار می گیرد. این آب فشرده مستقیماً وارد بخش صرف کار موجود در دیگ

بخار می شود (به شکل ۱۱.۵ مراجعه کنید) و سپس به سمت بالا و به طرف مخزن خروجی و برون رو صرفه‌ج کار می رود. بنابراین آب به کمک لوله ای به سمت پائین و به طرف منطقه پائین تر کوره جریان می یابد، در این منطقه حرکت آن عوض شده و به سمت بالای رود تا دیواره های کوره را خنک نمودن سقف عقبی و جلویی کوره مورد استفاده قرار می گیرد. بعد از آن این مایع سیال با فشار و بواسطه وزش گرمایی و جریان همرفت از فضای محصور شده به سمت سیستم مخزن پائینی جریان می یابند. در این مخزن لوله ها مایع را به مخزن ورودی و درون رو که بیش از حد گرم کننده می باشد انتقال میدهد.

ظرفیت دیگ بخار تک مرحله ای از گستره ای حدود ۱۳۰/۰۰۰ تا ۴/۵۰۰/۰۰۰ کیلو گرم در ساعت برخوردار می باشد فشار کارکردی معمولاً بحرانی می باشد اما این دیگهای بخار در فشار بحران حدود ۲۴۰ بار نیز قادر به فعالیت می باشند. ( $350\text{psi}$ ) این سیستم مستلزم مقادیر زیادی آب خالص همراه با حداکثر درجه نالحصی برخی بخشهای درازای هر بیلون از آن می باشد.

### میزان اعتبار مرغوبیت و طرز عملکرد دستگاه دیگ بخار

دستگاههای مولد بخار بای موقعیت های کارکردی ویژه ای اختصاص داده شده‌اند و با توجه به ضمانت نامه و گارانتی در رابطه با طرز عملکرد آنها به فروش می رسند میزان مرغوبیت دیگ بخار معمولاً برحسب تولی بخار کیلوگرم در ساعت (پوند در ساعت) در دما و فشار مشخص و ویژه ای تعریف می شود. بخاری که مجدداً گرم شد ها ست برحسب میزان بخاری که در فشار و دمای بخار درون رو و برون رو

مجدداً گرم می شود در این شرایط مورد نیاز می باشد. ویژگی های طرز عملکرد نیز در برگیرنده تعیین اتلاف اصلی سیستم دیگ بخار و سرانجام محاسبه این کار آن می باشد.

کل گرمای افزوده به سردکن در برگیرنده گرمای افزوده به لوله های دیگ بخار، صرفه کار، تغلیظ، گرمکن، و بخشهای از سیستم دیگ بخار که مجدداً گرم می کنند می باشد.

در صورتی که میزان جریان جرم سوخت و دیگ بخار و سردکن دستگاه گرم کننده مجدد شناخته باشند یا ارزیابی شده باشند، کارایی دیگ بخار نیز از طریق معادله زیر قابل محاسبه می باشد:

در صورتی که این اطلاعات (میزان، جریان، جرم) موجود نباشند، بنابر این روشی جایگزین برای محاسبه کارایی دستگاه دیگ بخار مورد استفاده قرار می گیرد. ممکن است با توجه به معادله زیر بدست آوریم:

HHV مجدداً نشان دهنده میزان بالای گرمای زغال و یا سوخت بوده و خلاصه ای از اتلاف اصلی حاصل از سیستم دیگ بخار بر مبنای یک واحد جرم از ورودی سوخت می باشد.

اتلافات فوق الذکر به واسطه کاربرد اطلاعات و داده های حاصل از تجزیه نهایی سوخت، تجزیه ارست گاز دودکش، تجزیه زائده زغال، و اطلاعات فشار و دمای دیگ بخار قابل ارزیابی می باشند. از آنجایی که این پارامترها نسبت به میزان جریان جرم به طور دقیق تری قابل بررسی می باشند، معادله (۵.۵) برآورد دقیقی را از کارایی دیگ بخار ارائه خواهد داد. هر کدام از اتلاف فوق الذکر از طریق کاربرد فرایندهای محاسباتی قابل ارزیابی می باشند.

اولین اتلاف که بواسطه احتراق ناقص ایجاد شده است در واقع اتلاف انرژی حاصل از شکل گیری مونوکسید کربن در عوض دی اکسید کربن می باشد. این اتلاف با استفاده از داده ها و اصلاحات تجزیه وارست و اطلاعات زائده بدست می آید.

این اتلاف به طور معمول حدود  $2/5$  تا  $3/0$  درصد از انرژی فراهم شده را شامل می شود.

دومین اتلاف که به واسطه کربن نسوخته ایجاد می شود، مجدداً داده ها و اطلاعات حاصل از زائده را به کار برده و به طرز ساده بیان می شود:

در صورتی که در جرمی از کربن نسوخته موجود در زائده در ازای هر جرم سوخت باشد. مقادیر کربن در گستره ای بین ۱ تا ۲ درصد از انرژی موجود قرار دارند.

اتلاف گاز ، ، به واسطه هوای احتراق فراهم شده برای دیگ بخار حاصل می شود . این اتلاف گرمایی حساسی می باشد که از طریق نسبت هوای خشک واقعی به سوخت و دمای گاز محاسبه می شود :

وزن سوخت گازی خشک باید برای زائده رطوبت و بخشهای جرم هیدورژن بدست آمده از زائده و تجزیه نهایی تنظیم شود. گرمای ویژه با استفاده از اطلاعات و داده های مربوط به هوا قابل برآورد و ارزیابی می باشد. اتلاف گاز خشک می تواند به بزرگی ۱۰ درصد انرژی فراهم شده باشد.

دو اتلاف رطوبت به واسطه رطوبت موجود در سوخت و رطوبت موجود در هوای احتراق می باشند . اتلاف رطوبت سوخت هر کیلوگرم سوخت مشتعل شده طبق رابطه زیر برقرار است .

فشار جزئی رطوبت آب ممکن است بمنظور ارزیابی  $h$  برآورد شود فشار تقریباً جزئی بخار آب در شرایط خروجی گاز حاصل به میزان ۱ تا ۲ psia می باشد. رطوبت موجود در زمان بخار این دیگ بخار را به میزان ۵ تا ۶ درصد کاهش می دهد.

اتلاف رطوبت دوم از لحاظ میزان و بزرگی از  $L_4^0$  کمتر باشد. این مقادیر معمولاً به میزان ۰/۵ تا ۰/۸ درصد اتلاف و کاهش در کارایی در دیگ بخار می باشد کاهش و اتلاف  $L_5^0$  بواسطه رطوبتی می باشد که همراه با هوای احتراق وارد دیگ بخار شده و در دستگاه فوق العاده گرم کننده محصولا حاصل از احتراق را بجا می

گذارد. این اتلاف در واقع اتلاف گرمایی حساسی می باشد که با توجه به رابطه زیر برقرار است :

عباراتی که قبلاً تعریف نشده اند به شرح ذیل می باشد .

آخرین واژه اتلاف موجود که معمولاً در محاسبات کارآیی در دیگ بخار دخالت دارد اتلاف گرمایی بواسطه درخشش حرارتی دیگ بخار  $L_6^0$  می باشد. این درواقع اتلاف ناچیزی است که در کارآیی برای شرایط کارکردی دیگ بخار معمولی به میزان ۲ درصد می باشد. اتلاف تشعشع و تابش نمی تواند بطور ساده محاسبه شود اما با توجه به شکل ۱۲.۵ قابل برآورد می باشد.

$$L_6^0 = (HHV)_{coal} \times R_L \quad KJ/kg$$

پس از برآورد اتلافات دیگ بخار کارآیی آن از طریق معادله (۵.۵) محاسبه می شود. اگرچه روش فوق الذکر برآورد معقولی را از کارآیی دیگ بخار ارائه می دهد اما ممکن است برای ارزیابی ویژه و اختصاصی به اندازه کافی دقیق نباشد. جماعت مهندسان مکانیک در آمریکا (ASME) قانون ارزیابی نیرو را به عنوان منبعی که حاوی روش های مورد نیاز برای ارزیابی عملکرد و کارآیی این دیگ بخار می باشد ارائه داده اند.

#### ۴.۵ تجزیه و تحلیل مولد بخار

محاسبه بارهای حرارتی



ممکن است بارهای حراری و گرمایی موجود در بخشهای مختلف کوره از طریق تعادلات دمایی ساده بر جریانات آب و هوا مشخص شوند. برای این منظور مثالی رقمی ارائه می دهیم.

#### مثال ۱.۵

فرض کنید باید  $1000/000$  کیلوگرم در ساعت بخار را در  $160$  بار و گرمای بیش از حد را از آب ورودی در کوره در دمای  $50$  پایین تر از نقطه اشباع ایجاد نماییم. هوا به میزان فراهم می شود تا از پیش تا دمای  $200$  گرم شود. گرمایی را که باید به دستگاه بیش از حد گرم کننده دیگ بخار، صرفه کار و گرمکن هوا انتقال یابد، برآورد کنید.

راه حل

صرفه کار: آب وارد کوره می شود و بدینوسیله صرفه کار نیز در دمای  $50$  پایین تر از اشباع وجود دارد. اگر فرض کنیم که آب را تا نقطه ای نزدیک به اشباع گرم خواهیم کرد،  $15$  پایین تر از اشباع، در این صورت میزان گرمای منتقل شده به صرفه کار طبق رابطه زیر برقرار است:

با فرض اینکه آنتالپی آب مایع تحت تاثیر فشار قرار ندارد، آنتالپی های آب تغذیه را در بدست می آوریم، و بدینوسیله آنها را با آنتالپی های مایع اشباع شده در برابر در نظر می گیریم. با توجه به جدول بخار روابط زیر برقرار است:



دیگ بخار : آب موجود در دیگ بخار از دمای خروجی صرفه کار تا نقطه اشباع گرم شده و پس جریان بخار مورد نیاز ایجاد می شود . بنابراین تعادل گرمایی ایجاد شده به واسطه رابطه زیر که در واقع میزان گرمای منتقل شده به دیگ بخار می باشد ، برقرار است :

و این در صورتی است که در واقع آنتالپی ویژه بخار اشباع شده در ۱۶۰ بار باشد و سایر نمادها همان معانی پیش را داشته باشند . با توجه به جدول بخار رابطه زیر برقرار است :

دستگاه فوق العاده گرم کننده : بار گرمایی در این دستگاه ( گرمکن ) در صورتی که مایع سیال با میزان مورد نیاز فوق العاده گرم شود ، از طریق ( به واسطه ) تغییر آنتالپی که در این شرایط ایجاد می شود ، بدست می آید .  
و این در صورتی است که آنتالپی ویژه بخار در ۱۶۰ و ۲۰۰ گرمای بیش از حد می باشد .

هم اکنون از جدول بخار بیش از حد گرم شده استفاده می کنیم تا را مشخص نماییم .

گرمکن هوا : به واسطه تعادل گرمایی بر بخار هوا ، گرمای انتقال یافته به هوا به قرار زیر می باشد :

از آنجایی که به نزدیک می باشد، با خطای ناچیزی می توانیم بر مبنای از استفاده نماییم. با استفاده از شکل ۲.۴ معادله ای را برای میانگین گرمای ویژه مولان هوا بدست می آوریم:

انتقال گرما در دیگ بخار فروزان - تابشی

در فصل ۴ با شرح و توضیح میزان گرمای انتقال یافته از شعله به لوله های دیگ بخار موجود در سطوح نسوز، معادلاتی را گسترش و ارائه دادیم. در این مورد، هنگامی که جذب کننده کمتر از نصف گرمای شعله می باشد، رابطه زیر برقرار است:

میانگین برای برآورد  $(\epsilon_G)_F$  در بخش ۷.۴ شرح داده شده اند سطح کلی دیواره نسوز  $A_T$  ممکن است برای هرگونه مشکل هندسی فرضی بر آورد شود. سطح مؤثر  $A_C$  آن بخشی از سطح لوله مانند دیگ بخار می باشد که به طور مؤثر تشعشع را از شعله دریافت می کند نسبت  $A_C/A_T$  ممکن است از شکل ۱۳.۵ بدست آید. بنابراین ممکن است انتقال کل گرمای فروزان و تابشی در صورتی که  $T_c, T_f$  مشخص شده باشن تعیین شود میزان  $T_c$  بطورکلی در دمای اشباع مایع جوشان داخل لوله تعیین می شود از آنجائیکه ضریب انتقال گرمایی جوش بسیار بالا بوده و افت دمای دیواره لوله ناچیز می باشد تفاوت دمای میان دیواره های داخلی و خارجی لوله اهمیت زیادی دارد میزان  $T_f$  بطور کلی ناشناخته باقی مانده مجدداً با توجه به آنچه در فصل ۴ شرح دادیم تعیین شود.

شکل ۱۳.۵ عامل سطح مؤثر دیواره کوره

در صورتیکه طراح تلاش می کند که با بار گرمایی ارائه شده در دیگ بخار مواجه شود در واقع او باید مقداری از  $A_T$  را در نظر بگیرد سپس این طراح باد بیک ترتیب هندسی را برای لوله های دیگ بخار ردیف شده بر روی دیواره برگزیند تا  $A_C/A_T$  بدست آیند. با این مقدار کمیت ها و اطلاعات در مورد مقدار گرمکتی زغال ساختر ترکیبات، میزان احتراق، میزان هوا، و دمای هوا طراحی می تواند مجدداً  $q$  و  $T_F$  رامشخص نماید. در صورتی که میزان  $q$  رضایت بخش نباشد یک مقدار تعدیل یافته از  $A_T$  باید در نظر گرفته شود.

برای محاسبات تقریبی معمولاً این فرض وجود دارد که انتقال گرمای همرفت به داخل لوله های دیگ بخار در بخش فروزان ممکن است کم اهمیت باشد.

### لوله های انتقال دهنده گرما بر روی شعله

علاوه بر لوله های دیگ بخار که در دیواره های نسوز کار گذاشته شده اند معمولاً دو یا سه ردیف از این لوله ها در فضای بالای شعله به صورت معلق و آویزان قرار میگیرد. بطور کلی این لوله ها دیواره و حفاظ سرباره و یا لوله های حفاظی دیگ بخار نامیده می شود. این ردیف از لوله ها تشعشع را مستقیماً از شعله دریافت کره و ردیف های بعدی که در دیواره قرار گرفته اند تشعشع را از فشاری با درجه تشعشع بالا دریافت می کنند. ممکن است انتقال گرمایی تابشی را از شعله

به این لوله های موجود بر دیواره نسوز محاسبه نمائیم. با استفاده از شکل ۱۳.۵ برای بار دیگر میتوانیم  $A_C$  را بدست آوریم.

اگر بیشترین میزان تشعشع حاصل از شعله از طریق اولین ردیف لوله ها جذب می شود، اما مقداری از همین تشعشع که مسیر مستقیمی را طی می کند؛ توسط ردیف های جایگزین که ممکن است حاوی لوله های دستگاه فوق العاده گرم کننده باشند، جذب می شود. در نظر داشته باشید که میزان  $A_C/A_T$  برای یک ردیف از لوله ها که در شکل ۱۳.۵ ارائه شده است نشاتگر جزء  $X$  از

انتقال گرمای تشعشع مستقیم و خالص به سطح  $A_T$  می باشد. اگر جزء  $X$  از اشباع خالص نسبت به  $A_T$  توسط ردیف اول جذب شود ردیف دوم همان جزء  $X$  را از آنچه باقیمانده جذب میکند  $(1-X)$  به همین نحو ردیف سوم نیز جزء  $X$  را بعد دو ردیف فوق الذکر از آنچه باقیمانده جذب می کند. برای مثال در صورتی که برای ردیف اول  $A_C/A_T = 0/7$  برای ردیف دوم  $A_C/A_T = 0/21$  باشد بر این

اساس برای منحنی ۳ ردیف سوم موجود در شکل ۱۳.۵ حدود  $0/063$  از منحنی ۲ بدست می آید. در صورتیکه تحریک مخزن لوله ای عمیق موجود باشد برای کل مخزن  $A_C/A_T \sim 1/0$  می باشد.

و همچنین سطح سیاه  $A$  در که به طور کامل مشاهده به قرار زیر می باشد:

علاوه بر تشعشع مستقیم شعله، لوله های موجود در دیواره نیز تشعشع را از گازهی گرمی که در مخزن لوله جریان دارند دریافت می کند. باتوجه به شکل ۴ و

همانطوریکه شرح دادیم  $q$  که تبادل خالص میان گاز گرم در دمای  $T_G$  و همراه با اتشار  $\varepsilon_G$  می باشد.

\* از آنجائیکه جوش هسته ای در داخل لوله برقرار است این برآورد قابل قبول می باشد. با وجود مقادیر بالایی از بخار، با فرآیند جوش هسته ای تا هنگامی که دیواری با لایه نازکی از مایع پوشیده می باشد. ایجاد خواهد شد. در مقادیر بسیار بالاترین لایه نازکی خشک شده و پسرفت مشخصی در انتقال گرما قابل مشاهده است.

در صورتیکه این رابطه به قرار زیر ساده تر می گردد

در صورتی که سطح سرد بجای رنگ سیاه، خاکستری باشد جمع معادله فوق  $\varepsilon_1$  و تشعشع سرد منجر به کاهش اشعه های تابناک اولیه می شود. اما بازتاب و انعکاس ثانوی اهمیت از اهمیت زیادی برخوردار نبوده و در نظر گرفته نمی شود. برای اکثر محاسبات تنها کاربرد کافی می باشد. بدینوسیله تشعشع گازهای گرم به قرار زیر برآورد می شود.

مقدار  $\varepsilon_1$  برای هرگونه ماده موجود در لوله شناخته شده می باشد و  $\varepsilon_G$  ممکن است برای ترکیب گاز ارائه شده در صورتی که میانگین طول اشعه مشخص باشد بدست آید. با استفاده از شکل ۱۴.۵ میانگین طول اشعه را بدست می آوریم. گازهای گرمی که در لوله جریان دارند نیز گرما را از طریق همرفت به داخل لوله ها منتقل می نماید. انتقال کل گرما به ردیفی از لوله های موجود در مخزن طبق رابطه زیر بر قرار است:

تشعشع مستقیمی از شعله تنها در دو یا سه ردیف اول حائز اهمیت است در این مسافت کوتاه دمای گاز بطور آشکار تغییر کرده و معادلات (۱۶.۵) و (۱۷.۵) ممکن است همراه با A که نشانگر سطح لوله در ردیفهای موجود بر دیواره می باشد مورد استفاده قرار می گیرند. در ردیف های بعدی تشعشع مستقیمی از شعله ممکن است از اهمیت زیادی برخوردار نباشد. میزان انتقال کل گرما، ، در هر ردیف به قرار زیر می باشد:

برای دستیابی به انتقال گرما در راستای کل لوله ها، معادله زیر برقرار است:

میانگین لگاریتم اختلاف دمای میان گاز و سطح لوله موجود در مجموعه میزان انتقال گرمای تشعشع داخل لوله از گاز های گرم به کل مجموعه و این در صورتی است که معادل دسانش تشعشع داخل لوله، انرژی/ (جا) (زمانه) (تفاوت دمای دستگاه) می باشد. میزان به دمای سطح دریافتی، و تشعشع گاز و لوله بستگی دارد. از آنجایی که تشعشعات لوله تقریباً شرایط صنعتی و معمولی ثابت می باشند. در این صورت رابطه زیر برقرار است:

و این در صورتی است که رسانش تشعشع اصلی، تنها عملکردی از می باشد مقادیر در شکل ۵.۵ ارائه شده است، بدست می آید.

انتقال گرمای همرفتی

قبلاً نشان دادیم که ضریب انتقال گرمای جوش بالا بر داخل لوله ای موجود بر دیواره دیگ بخار باعث شدند که این مقاومت درواقع از اهمیت زیادی برخوردار

نباشد. در ناحیه دستگاه فوق العاده گرم کننده مقاومت و پایداری در مقابل انتقال گرما از بخار جریان داشته در داخل لوله ها از نظر بزرگی با مقاومت موجود در قسمت خارجی لوله یکی بوده و ممکن است بعد از این از اهمیت بیشتری برخوردار شود. با وجود این مقاومت در مقابل جریان گرما گاز و لایه های بخار نسبت به مقاومت دیواره لوله به طور چشمگیر بیشتر می باشد. مقاومت دیواره فلزی ممکن است از اهمیت زیادی برخوردار نباشد. در این صورت کل ضریب انتقال گرما، بر حسب رابطه زیر بر قرار است:

برای لوله های دستگاه فوق العاده گرم کننده موجود در ناحیه ای که انتقال گرمای تشعشع و تابناک داخل لوله در آن هنوز حائز اهمیت می باشد. بطور کلی نمی توانیم دمای سطح فلزی را مشخص نماییم اما دمای بخار داخل لوله قابل تشخیص می باشد. ممکن است ناحیه مورد نیاز برای دستیابی به درجه مطلوبی از گرمای بیش از حد را با دوبارخ نویسی و اصلاح معادله (۲۰۰۵) ارزیابی نماییم:

و طبق معادله اساس و مبنای بر میامگین کل لگاریتم اختلاف دمای میان گاز و جریان بخار نیز قابل ارزیابی می باشد (به شکل ۱۶.۵ مراجعه کنید) تغییر دمای مورد نیاز موجود در جریان گاز را از طریق تعادل گرمایی بهبود در مجموعه بدست نی آورین، یعنی،

روابط تجربی ونیمه تجربی مقاومت بمنظور ارزیابی ضریب لایه برای گازهای گرم جریان داشته در لوله های دستگاه فوق العاده گرم کننده و بخار داخل لوله ها ابداع



نشده است. بار یجریان مایعات داخل لوله ها را بطه‌دتیاس - بولتر بطور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد.

ویژگی های فیزیکی مایع در دمای توده مایع ارزیابی می شوند. این رابطه بمنظور ضریب انتقال گرما به بخار موجود در لوله های دستگاه فوق العاده گرم کننده مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین این رابطه برای جریان موازی با پیشته های لوله ها نیز بکار می رود. روابط مشابه بمنظور ارزیابی ضریب لایه برای پیشته های لوله ها در جریان متقاطع توسعه یافته است.

برای پیشته های یک در میان و بی تربیت لوله ها، ویز من رابطه زیرا را بدست آورد.

مقادیر با توجه به شکل ۱۷.۵ بدست می آیند (معمولاً) ( نشانگر آن است که ویژگی های مایع برای معادلات (۲۵.۵) و (۲۷.۵) در میانگین از دمای لایه نازک ارائه شده از طریق قابل ارزیابی می باشند.

در حالی که معادله (۲۶.۵) یا (۲۷.۵) ممکن است به منظور ارزیابی ضریب لایه نازک برای لوله های دیگر بخار باشد که در معرض گازهایی قرار گرفته اند که ناحیه تابشی کوره را ترک می نمایند، رابطه بر قرار است:



در این مورد بر مبنای حداقل سطح جریان میان لوله های می باشد و نیز در همان معنای پیش خود باقی می ماند.