فهرست:

طبقه بندی زغال سنگ 3

گاز های معادن زغال سنگ 6

فرمول های برای تخمین مقدار گاز بستر های زغال سنگ 22

روش های خالص سازی گاز خروجی از معادن زغال سنگ 24

روش های تولید توان از گاز های خروجی از معادن زغال سنگ 34

سیستم های ترکیبی تولید توان وحرارت(CHP) 55

بویلر های بازیاب حرراتی 60

بررسی یک نمونه سیستم بازیافت گاز معدن زغال سنگ در طبس 68

نتیجه گیری و پیشنهادات 73

منابع 74

مقدمه:

زغال سنگ یک ماده غیر همگن و نام گروهی از سوخت های جامد آلی است که شامل سنگ هـای رسـوبی احتراق پذیر میباشد. زغال سنگ از منابع مهم انرژی و اولین سوخت فسیلی مورد استفاده توسط بشر بعنوان منبع اصلی انرژی می باشد. زغال سنگ در ابتدا برای گرما و پخت وپز بکار برده میشد تا اینکه اولین بـار در سال 1621 از آن در کوره های ذوب آهن استفاده شد.

با پیدایش فن آوری تولید کک در سال 1775 میلادی و اختراع ماشین تولید بخـار در سـال 1769 میـزان مصرف زغال سنگ بطور قابل ملاحظه های افزایش یافت بطوری که هم اکنون در دنیا با کاربرد وسـیعی در صنایع همچون فولاد مواد شیمیایی و نیروگاه ها مورد استفاده قرار می گیرد.

در ایران این ماده ارزشمند بخاطر استخراج راحت و رازان قیمت نفت زیاد موزد توجه قرار نگرفته است.منابع شناخته شده ی ماده در ایران 1.6 میلیارد تن زغال است از از این بین 549 میلیون آن جزء ذخـایر قطعـی میباشد.در ایران حدود 124 معدن بزرگ و کوچک زغال دایر است. که سالیانه حـدود 2 میلیـون تـن زغـال سنگ را استخراج می کنند.

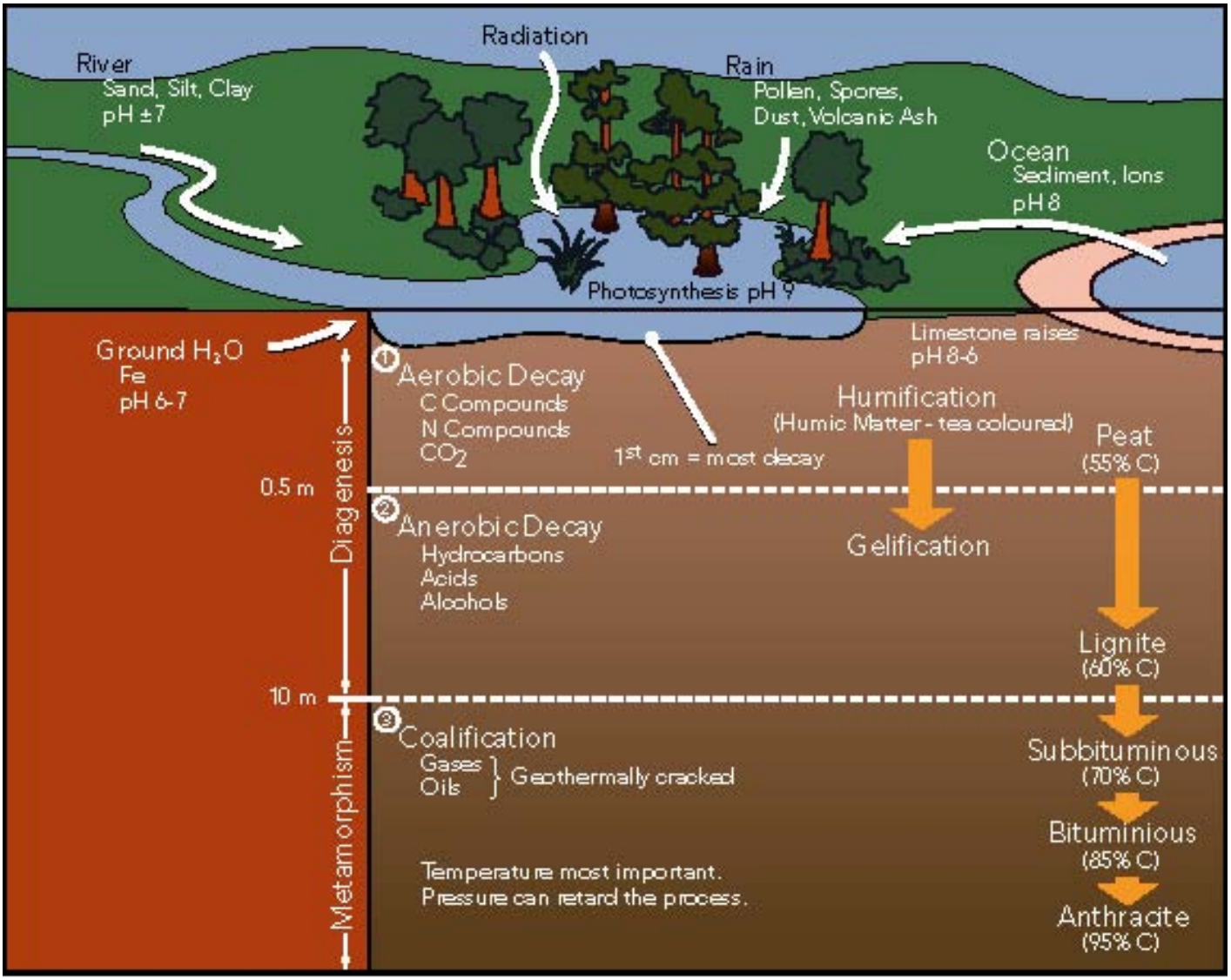
یکی از خواص معادن زغال سنگ،انتشار فراوان گاز متـان میباشـد .کـه در ایـن تحقیـق سـعی برگـرد آوری تکنولوژی های استفاده از این گاز ارزشمند هستیم.تا ضمن کاهش مصرف سوخت های فسیلی بـرای تولیـد توان و حرارت از الودگی گاز گلخانه ای چون متان جلوگیری نماییم.

در این تحقیق سعی بر استفاده از گاز متان معادن زغال سنگ در جهت تولید توان الکتریکی،گرمایش بـرای تقاضای مصرفی معدن و تجهیزات جانبی است.در بخـش هـای مختلـف بـا خصوصـیات گـاز معـادن زغـال سنگ،روش های خالص سازی گاز متان،روش های تولیـد تـوان،روش هـای تولیـد حـرارت و در نهایـت بـه انتخاب تجهیزات یک سیستم CHP و مطالعه یک نمونه از معادن زغال سنگ را انجام می دهیم.

طبقه بندی زغال سنگ:

زغال سنگ از تغییرات بیولوژیکی ناشی از افزایش فشار و بالا رفتن دما بر روی گیاهان از روزگاران بسیار دور بوجود آمده است. کربن موجود در زغال سنگ به صورت ترکیبات مختلف الی از جمله اسید های کربو کسیلیک متراکم شده و به صورت ترکیبات آروماتیک بدست آمده است.

طبقه بندی زغال سنگ در کشور های مختلف متنوع است چراکه اطلاعات حاصل از یک نوع خاص زغال سنگ را نمی توان به طور مشخص به گروه خاصی نسبت داد.تقسیم بندی زغال سنگ تا حدود زیادی به منشاء اولیه زغال, زمان تشکیل زغال,تغییرات انجام یافته در مراحل تبدیل به زغال, رفتار زغال طی احتراق و بسیاری از پارامتر های دیگر بستگی دارد. اصولا زغال را بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی و درجه فرایند زغال سازی به 4 گروه عمده بنام های آنتراسیت,بیتومیته, نیمه بیتومیته و لینگنت تقسیم می کنند. در این تقسیم بندی ضریب سوختن زغال (نسبت کربن فرار به کربن ثابت), که از پارامتر های مهم دسته بندی است. از زغال آنتراسیت به لیگنت کاهش میابد و بالعکس درصد هیدروژن ,اکسیژن و رطوبت از آنتراسیت به لیگنت افزایش میابد.در شکل(1)می توانیم نمایی کلی از وضعیت وانواع زغال سنگ را مشاهده نمود.



شکل(1) نمایی کلی از وضعیت شکل گیری انواع زغال سنگ

مطابق طبقه بندی دیگر که براساس کمیسیون اقتصادی اروپا بوده است انواع زغال سنگ به شرح زیر است:

1-زغال سنگ سخت:زغالی با ارزش حرارتی 5700kcal/Kg است.این سوخت بدون خاکستر،رطوبت و متوسط میزان درخشندگی آن در حدود 0.6 است به دو دسته تقسیم میشود حرارتی و کک شو و شامل زغال های آنتراسیت و بیتومیته میباشند. مرز بین زغال های حرارتی و کک شو را نمی توان دقیقا مشخص نمود چه بسیار زغال های که حرارتی نامیده میشوند در حالی که قابلیت تبدیل به کک را داشته و سپس در مصارف مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند.

-زغال کک شو: به زغال گفته میشود که امکان تولید کک برای استفاده در کوره های بلنـد بـرای آن فـراهم است.

- زغال حرارتی: زغالی که برای تولید حرارت و گرمایش مورد استفاده قرار میگیرد این زغال بصورت متـراکم و مرطوب است.

زغال آنتراسیت: این زغال در عمق بیشتر با گرادیان حرارتی زیادتری تشکیل میشوند.آنتراسیت زغالی اسـت سخت, شکننده که به کندی روشن میشود.دارای شعله آبی میباشند و حرارت تولید شده در ان از سایر زغال ها بیشتر است مقدار کربن آنتراسیت حدود 95٪ , هیدروژن 3٪ و اکسیژن 3٪, است. میزان کالری گرمـای تولیدی آنتراسیت 13500 تا 15500 کالری بر پوند زغال میباشد(کسلر 1976)

زغال بیتومیته: زغالی است سخت, متراکم و دارای لایه بندی که در مقابـل هـوا از هـم نمـی پاشـد.رطوبـت بالایی است.به خوبی شعله ور میگردد و رنگ شعله آن زرد است.مصرف این زغـال زیـاد اسـت مقـدار کـربن بیتومیته 85٪,هیدروژن 5٪, و اکسیژن 5٪ میباشد میزان گرمای تولید شده توسط ین نوع زغـال 12000 تا 15000 کالری به پوند زغال میباشد(کسلر 1976)

2-زغال سنگ قهوه ای:این زغال شامل بیتومیته و لیگنت میباشد.

-زغال نیمه بیتومیته : زغالی با ارزش حرارتی 4165 تا 5700 کیلو کالری به پوند و شامل 31٪ مواد فرار میباشد.این زغال در بسیاری از کشور ها بدلیل ارزش حرارتی بالا جزء گروه زغال های حرارتی قرار میگیرد.

- زغال لیگینت: زغالی که به زغال قهوای معروف است و در آن آثار گیاهی یافت میشـود درصـد رطوبـت ان بالا است و در مقابل هوا از هم میپاشد.میزان کربن ان 75 تا 80٪ ,هیدروژن5 تا 6٪ و اکسـیژن آن 10 تـا 15٪ است.میزان گرمای تولیدی این زغال 6000 تا 7500 کیلو کالری به پوند است.

یکی از اجزاءمیکروسکوپی اما مهم در خصوصیات زغال سنگ ماسرال ها نام دارند.این ذرات میکروسکوپی در بخش با لرزش زغال(مواد آلی)،شامل سه گروه لیپیتینیت ها،اینترینت و ویترینیت هستند.این مواد بـر روی خصوصیات انتشار گاز زغال سنگ سهیم هستند.

گاز های معادن زغال سنگ:

یکی از محصولات جانبی که از معادن زغال سنگ به دست میآید. گاز معدن میباشد .مقدار این گاز و ترکیب اجزاء آن برای هر معدن متفاوت میباشد.این گاز در بیشتر موارد به هوا تخلیه میشود.بـدون اینکـه از انـرژی نهفته در آن استفاده در جهت تولید انرژی صورت بگیرد.این عمل علاوه بر هدر روی انرژی که میتوان بدست آورد باعث آلودگی زیست محیطی میشود.

بیشترین جزء گازهای معدن زغـال سـنگ ، را گـاز متـان تشـکیل میدهـد. ایـن گـاز دارای ارزش حرارتـی معادل50010 کیلو کالری به ازاء هر کیلوگرم متان می باشد. مقدار متان تولیـدی از مـواد آلـی بسـتگی بـه ترکیبات مواد منبع اصلی و دوره زغال سازی دارد.منبع جهانیCoal mine methane بسیارفراوان است و در حدود $24x10^5$ میلیارد متر مکعب که درعمق 2000 متری زمین دفن شده است تخمین زده می شـود که تقریبا 2 برابر منبع گاز طبیعی می باشدیکی از بزرگترین منابع انتشار گاز متان در دنیا که دارای مضرات گازها ی گلخانه ای هم می باشد از همین بستر های زغال سنگی و معادن زغال سنگ می باشد.

که میتوان با استحصال این انرژی نهفته ، در جهـت تولیـد تـوان الکتریکـی، گرمـایش و سـرمایش بـه کـار بردوعلاوه بر موارد کاربردی بالا ، با توجه به دبی زیاد گاز، می توان با خالص سازی ، گاز را بـرای فـروش بـه عنوان گاز مصرفی خانگی استفاده نمود. ویا مایع سازی به عنوان گاز با ارزش LNG به فروش رساند.

متان منتشر شده در معادن زغال سنگ از 3 جریان مختلف منشاء می گیرند.

1-هوای تهویه معادن(0.1- 1٪ متان)

2-گاز های تخلیه شده از بسترها(Coal Seam)قبل از شروع به استخراج در معدن(60-95٪ متان)

3-گاز های تخلیه از معادن در حال کار و یا معادن متروکه(30-95٪ متان)

متان هوای تهویه، تقریبا 64٪ انتشار متان معادن زغال سنگ را در بر میگرد.

پتانسیل انتخاب برای استفاده از متان معدن زغال سنگ به طور خلاصه توسط US EPA فهرست شده است.این انتخاب ها به شرح زیر است.

-استفاده از متان معدن زغال سنگ درBlast Furnaces

-کاربرد متان معدن زغال سنگ در Brine Water Treatment

-استفاده همزمان از متان معدن زغال سنگ در کاربرد های Coal Fired و بویلر های صنعتی

-استفاده از متان معدن زغال سنگ در سیستم های تولید همزمان

-ارتقاء کیفیت متان معدن زغال سنگ از متوسط به عالی

-استفاده از متان معدن زغال سنگ در Fuel Cell

-استفاده از متان معدن زغال سنگ برای موتور های احتراق داخلی در خود معدن

-استفاده از متان معدن زغال سنگ جهت تولید LNG

-تولید توان الکتریکی با متان معدن زغال سنگ در ژنراتور ها و یا توربین ها

- استفاده از متان معدن زغال سنگ برای ایجاد گرمایش تجهیزات معدن

-تبدیل متان معدن زغال سنگ به سوخت های سینیتک

- استفاده از متان معدن زغال سنگ جهت تامین گرمایش مورد نیاز تهویه معدن زغال سنگ

- استفاده از متان معدن زغال سنگ در Coal Dryer

خصوصیات گاز های معادن زغال سنگ:

یکی از مهم ترین خطراتی که کارگران را در معادن زغال سنگ تهدید میکند گاز هایی است که مواد معدنی در معدن منتشر میکنند.این گاز های خطرناک به اندازهای بسیار زیاد و فراوان در معادن زغال سنگ انتشار میبابند.البته این نوع گازها در معادن نمک وگوگرد هم انتشار می یابند.

زغال انتراسیت دارای نسبت بالایی از این گاز است نسبت به دیگر انواع زغال سنگ نظیر بیتومیت.البته در این زغال سنگ گاز به علت ساختار زغال سنگ در داخل آن می تواند محبوس بماند ودر نتیجه خطر کمتری در معدن برای کارگران ایجاد می کند.اما در زغال های نرم تر بر عکس به خاطر نوع ساختار متخلخلی که زغال دارد گاز به راحتی در ان میتواند در فضا پخش شود و ریسک انفجار را بالا میبرد.

گاز های منتشر شده در معادن زغال سنگ دارای مقدار متنابهی هیدروکربن های سبک هستند که گاز مرداب(Marsh Gas)گفته می شود. این گاز در مرداب ها در اثر تجزیه گیاهان به وجود می اید.این گاز ها در معادن تحت عنوان Fire Damp شناخته میشود. در فرانسه به آن Grious گفته میشود. گاز ی که نشر پیدا میکند در یک ساختار ساده شامل 4 مولکول هیدروژن به یک مولکول کربن, وزن آن تقریبا یک چهارم وزن هوا است بنابرین قابلیت پخش شدن در فضای اطراف و بخصوص بالای فضای مسقف را داراست.

وقتی این گاز 4 تا 12 برابر حجم اش با هوا ترکیب شود به شدت قابلیت انفجار پیدا میکند.اگر مخلوط گاز بالا یا پایین این نسبت باشد به سادگی قابلیت اشتعال را داراست.اما بدون تخریب و با یک شعله آبی رنگ میسوزد.برای همین تهویه در معادن بسیار مهم است گاز ها را به اندازهای تخلیه میکنند,که حتی الامکان مشتعل شدن گازها را از ان ها گرفت.

یکی از ویژگی های عجیب برخی از معادن زغال سنگ این است که برخی معادن گاز را به صورت پیوسته منتشر نمی کنند بلکه به صورت یک حجم بزرگ و به طور ناگهانی آزاد می کنند این اتفاق بیشتر در گسل ها ,لایه ای نازک زغال سنگ و یا محفظه یا درزی که گاز در آن انباشته شده است به وجود می آید.این رها شدن مقدار زیادی گاز می تواند در اثر کار کردن کارگران و وسایل آن ها (دریل) در معادن

باشد.که خطرات بسیاری به همراه دارد. این حجم فشرده گاز حتی امکان تخریب محیط اطراف خود بخـاطر فشار بالای گاز را داراست این نوع حوادث بسیار خطرناک و فاجعه بار هستند.

ترکیبات گاز های انتشار یافته:

ترکیبات گاز های انتشار یافته از معادن زغال سنگ اکثرا شامل گاز متان میباشد. البته ترکیب اجزائ بسـیار متنوع است و بستگی به نوع زغال سنگ,محل و موقعیت معدن و .... دارد.جدول (1) ترکیبات را بـه صـورت تقریبی نشان میدهد. ودر جدول (2) خصوصیلت ترمودینامیکی گاز متان را نشان می دهد.

جدول(1): ترکیب تقریبی گاز های معادن زغال سنگ

نوع گاز	درصد تقریبی	قابلیت انفجار
متان	70 الی 98٪	گاز های قابل اشتعال
پروپان,اتان	0 الی 2٪	
اتیلن,استیلن	به مقدار بسیار ناچیز	
سولفید هیدروژن	به مقدار بسیار ناچیز	
دی اکسید کربن	0 الی 4٪	گاز های غیر قابل اشتعال
نیتروژن	0 الی 15٪	
اکسیژن	به مقدار بسیار ناچیز	

گاز های متصاعد شده در معدن , بدون رنگ ,بی بو ومزه میباشد و همین خطر آن را افزایش می دهد.همـان طور که ذکر شد ترکیب 5٪ تا 14.8٪ از متان با هوا قابلیت اشتعال را داراست .

جدول(2): مشخصات ترمودینامیکی گاز متان

آنتالپی گاز متان	-74.85 Kj/mol	دمای ذوب	-182.6 ^{0}C
انرژی ازاد گیبس	-50.69 Kj/mol	دمای جوش	-161.4^{0}C
دانسیته	186.19 Kj/dm^3	دمای بحرانی	190.6 ^{0}K
ظرفیت حرارتی	35.73 j/kmol	فشار بحرانی	46 atm
وزن مولکولی	16.04	حرارت تبخیر	8.85

تاثیرات خصوصیات زغال سنگ بر روی مقدار گاز متان انتشار یافته:

گاز بسترهای زغال سنگ نوعی گاز قابل اشتعال که عضو اصلی آن ها را گاز متان (CH_4) تسکیل می دهد،سایر اجزاء گاز متشکل از گاز های CO_2 ,N_2 می باشد،متان تولید شده در طی فرآیند زغال سازی (Coalification)در اثر فعالیت و تجزیه مواد آلی صورت می گیرد، نوع دیگر متان تولید شده در اثر فرآیند (Thermogenic) در دماهای بالای 50درجه و فشار بالاتری نسبت به حالت Biogenicکه در دمای زیر 50 درجه و در ارتفاعات کم از معادن صورت می گیرد،اتفاق می افتد.این گازهای تشکیل شده شامل 95٪ گاز متان می باشد.در بعضی از معادن مقدار ناچیزی از گاز های اتان و پروپان دیده شده است،معمولاًکمتر از 3٪ را گاز های نیتروژن و دی اکسید کربن تشکیل می دهد،متان خارج شده از بستر های زغال سنگ دارای ارزش حرارتی معادل 1000Btu/scf درخلوصیت 95٪ می باشد.

گاز های تولید شده در معدن های زغال سنگ (Coal Mine Methane) به چندین روش حفظ و نگهداری می شود.

1-به عنوان گاز آزاد

2-محلول در آبهای زیرزمینی در زیرمعادن زغال سنگ

3-جذب سطحی در زغال سنگ مثلا در(Micropores)که دارای ابعاد مختلفی هستند.

این تولید گاز از حالت نارسی و اولیه زغال سنگ در(Lignite)و(Bituminte) تا رسیدن به درجات بالاترو عمر بیشتر یعنی (Anthracite) ادامه دارد با رنج های مختلف تولید گاز که در مراحل جلـوتر ارتبـاط آنهـا واضح تر توضیح داده خواهد شد.

مقدارتولیدگاز متان به عوامل مختلفی بستگی دارد.

از جمله به :

1- آنالیزProximate Analysis

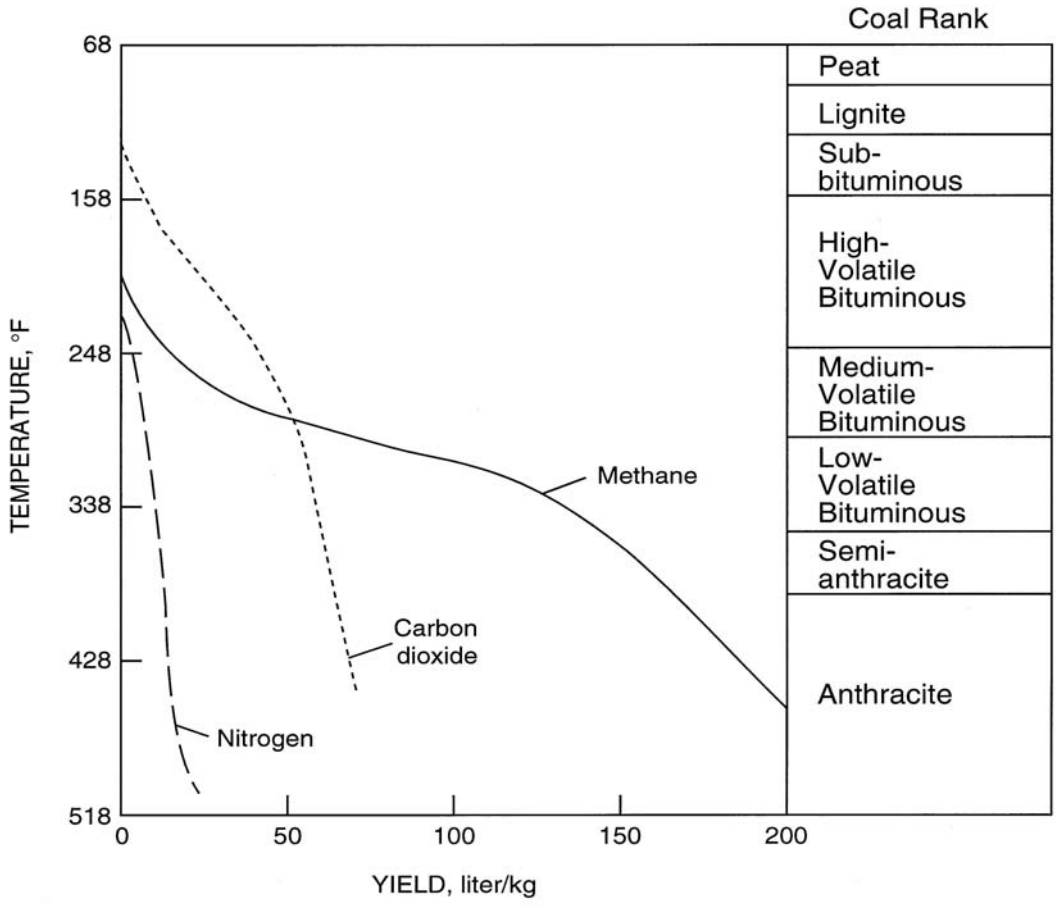
2-Coal rank

3-Meceral

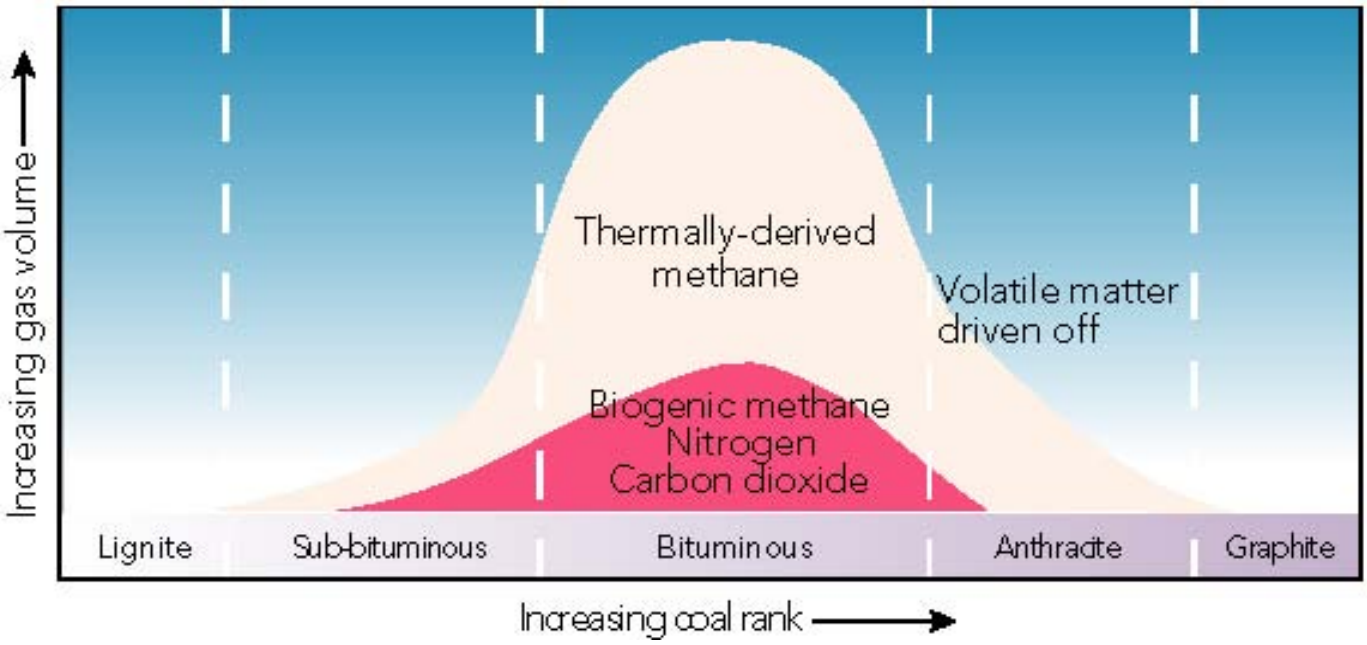
4-Depth of burial

5-Type of Coal

در شکل (2)و(3)ارتباط بین گاز تولیدی و پروسه زغال سازی(Coalification) را مشاهده می کنید.
در این شکل مشخصات با بالا رفتن عمر زغال سازی مقدار محصول بیشتر می شود.



شکل (2):نمودار مقدار تولید گاز در طی فرایند زغالسازی(Coalification)



شکل(3):نمودار مقدار تولید گاز نسبت به Coal Rank

حال با بررسی 3 نمونه زغال سنگ از معادن بـزرگ زغـال جهـان کـه توسـط دانشـمندان نمونـه بـرداری و آزمایشات (Proximate Analysis)و(Petro Graphic Analysis) را بروی زغال ها انجام داده اند .بـه بررسی اثرات پارامترهای مختلف در زغال می پردازیم.

نمونه اول:معدنی در منطقهBown در استرالیا.در جدول (3) آنالیز Petrographic را مشاهده می کنیم و در جدول (4) آنالیز Proximate را می بینیم.

جدول(3): آنالیز Petrographic

Petrographic analysis results

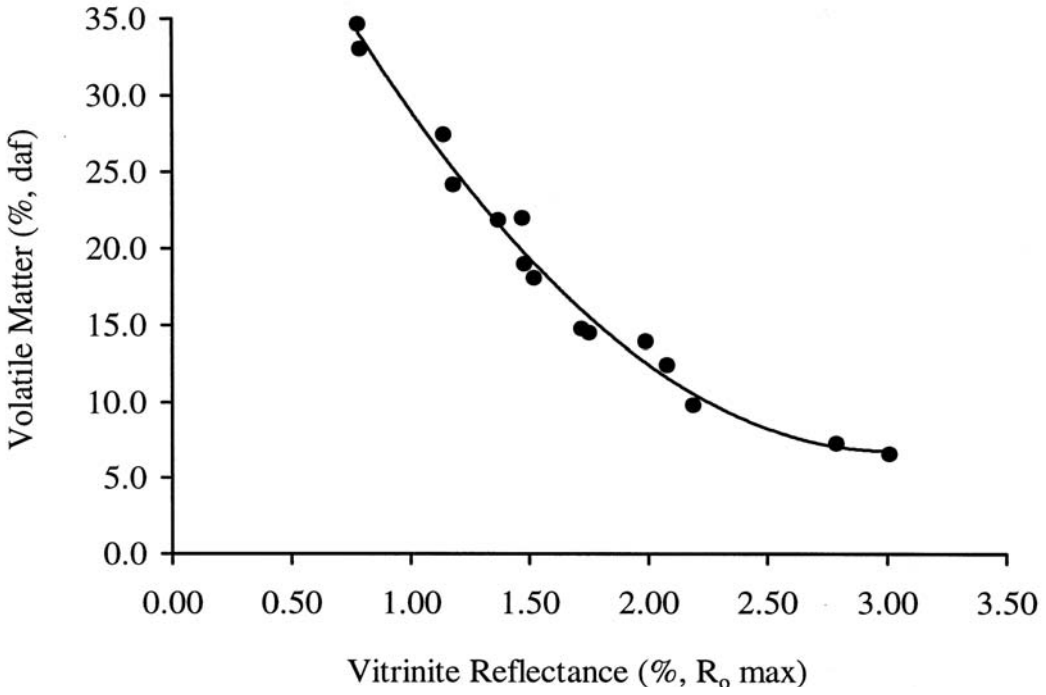
Sample	Maceral group composition					Collotelinite reflectance (% $R_{o\,max}$)
	Vitrinite (%)	Liptinite (%)	Inertinite (%)	Mineral matter (%)	Vitrinite (%, mmf)	
G1-02 (15CT) B	95.9	0.0	2.0	2.1	98.0	0.78
G1-02 (15CT) D	34.3	1.3	53.8	10.6	38.4	
G1-02 (14CT) B	96.9	0.0	0.6	2.5	99.4	0.79
G1-02 (14CT) D	15.4	1.0	76.6	7.0	16.6	
NM1-04 (P6) B	88.2	0.0	6.0	5.8	93.6	1.14
NM1-04 (P6) D-1	21.0	1.6	68.9	8.5	23.0	
NM1-12 B	90.6	0.0	6.7	2.7	93.1	1.18
NM1-12 D	28.7	0.2	68.0	3.1	29.6	
PH1-01 B	85.5	0.0	4.2	10.3	95.3	1.37
PH1-01 D	NA	NA	NA	NA	NA	
NM1-21 (P10) B	88.5	0.0	7.9	3.6	91.8	1.47
NM1-21 (P10) D-1	15.4	0.0	72.0	12.6	17.6	
PH1-03 B	92.1	0.0	2.8	5.1	97.0	1.48
PH1-03 D-1	22.6	0.0	69.0	8.4	24.7	
RS1-02 (249) B	92.9	0.0	3.0	4.1	96.9	1.52
RS1-02 (249) D-1	25.2	0.0	60.9	13.9	29.3	
PH1-08 B	86.0	0.0	9.8	4.2	89.8	1.72
PH1-08 D	20.6	0.4	66.2	12.8	23.6	
SM1-05 B	86.0	0.0	9.8	4.2	89.8	1.75
SM1-05 D-1	32.0	0.0	62.8	5.2	33.8	
PH1-12 B	90.1	0.0	5.0	4.9	94.7	1.99
PH1-12 D	20.0	0.4	58.4	21.2	25.4	
SM1-06 (B36) B	90.6	0.0	5.0	4.4	94.8	2.08
SM1-06 D-1	11.3	0.4	78.9	9.4	12.5	
NE1-09 B	89.8	0.0	4.7	5.5	95.0	2.19
NE1-09 D-1	27.3	0.8	65.9	6.0	29.0	
SK1-05 (B53) B	88.8	0.0	6.2	5.0	93.5	2.79
SK1-05 (B53) D-1	6.8	0.2	85.8	7.2	7.3	
SK1-07 B	91.4	0.0	3.5	5.1	96.3	3.01
SK1-07 D-1	34.8	0.0	53.2	12.0	39.5	

جدول(4): آنالیز Proximate

Proximate analysis results

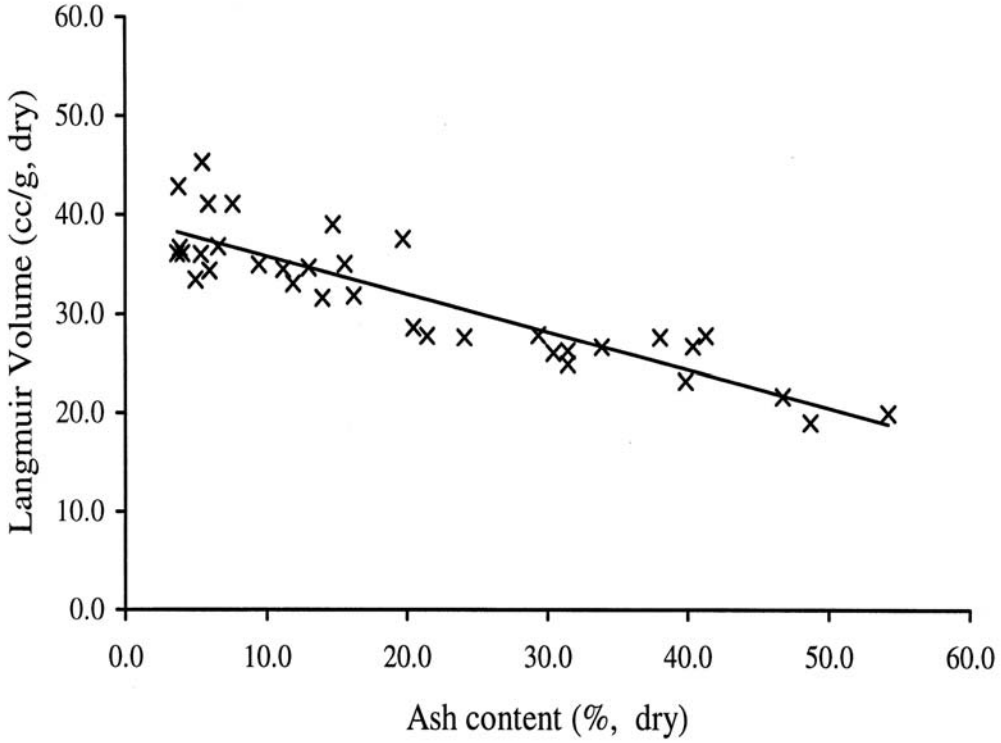
Sample	Inherent moisture (%, ar)	Ash (%, ar)	Volatile matter (%, ar)	Fixed carbon (%, ar)	Volatile matter (%, daf)
G1-02 (15CT) B	5.4	1.2	32.4	61.0	34.7
G1-02 (15CT) D	3.5	11.6	28.9	56.0	34.1
G1-02 (14CT) B	5.4	0.5	31.1	63.0	33.0
G1-02 (14CT) D	3.3	8.5	26.6	61.6	30.2
NM1-04 (P6) B	1.6	9.3	24.5	64.6	27.5
NM1-04 (P6) D	2.3	45.7	19.9	32.1	38.3
NM1-04 (P6) D-1	1.5	23.7	19.4	55.4	26.0
NM1-12 B	1.6	3.6	22.9	71.9	24.2
NM1-12 D	1.3	5.9	21.4	71.4	23.1
PH1-01 B	1.7	11.7	19.0	67.6	21.9
PH1-01 D	1.5	33.4	13.9	51.3	21.3
NM1-21 (P10) B	1.5	5.3	20.5	72.7	22.0
NM1-21 (P10) D	1.7	39.2	13.3	45.8	22.5
NM1-21 (P10) D-1	1.3	20.2	16.2	62.3	20.6
PH1-03 B	1.5	16.0	15.7	66.8	19.0
PH1-03 D	2.1	53.1	11.4	33.4	25.4
PH1-03 D-1	1.3	29.0	14.3	55.4	20.5
RS1-02 (249) B	1.2	3.8	17.2	77.8	18.1
RS1-02 (249) D	1.2	30.1	16.7	52.0	24.3
RS1-02 (249) D-1	1.2	31.1	12.9	54.8	19.1
PH1-08 B	1.3	4.0	14.0	80.7	14.8
PH1-08 D	1.3	13.7	15.2	69.8	17.0
SM1-05 B	1.4	6.5	13.8	78.3	14.5
SM1-05 D	2.4	30.7	13.6	53.3	20.3
SM1-05 D-1	1.6	11.0	13.1	74.3	15.0
PH1-12 B	1.2	4.9	13.1	80.8	14.0
PH1-12 D	1.2	21.2	11.8	65.8	15.2
SM1-06 (B36) B	1.6	5.8	11.5	81.1	12.4
SM1-06 (B36) D	2.2	37.2	10.0	50.6	16.5
SM1-06 (B36) D-1	1.5	12.8	11.3	74.4	13.2
NE1-09 B	1.7	7.5	8.9	81.9	9.8
NE1-09 D	1.9	39.6	6.6	51.9	11.3
NE1-09 D-1	1.5	15.3	8.7	74.5	10.5
SK1-05 (B53) B	2.8	5.3	6.7	85.2	7.3
SK1-05 (B53) D	2.4	40.3	6.8	50.5	11.9
SK1-05 (B53) D-1	2.3	14.4	7.1	76.2	8.5
SK1-07 B	2.2	3.7	6.2	87.9	6.6
SK1-07 D	1.4	48.0	15.6	35.0	30.9
SK1-07 D-1	2.1	19.3	6.6	72.0	8.4

نمودارهای تحلیلی براساس پارامتر های مختلف را در زیر مشاهده میکنیم.

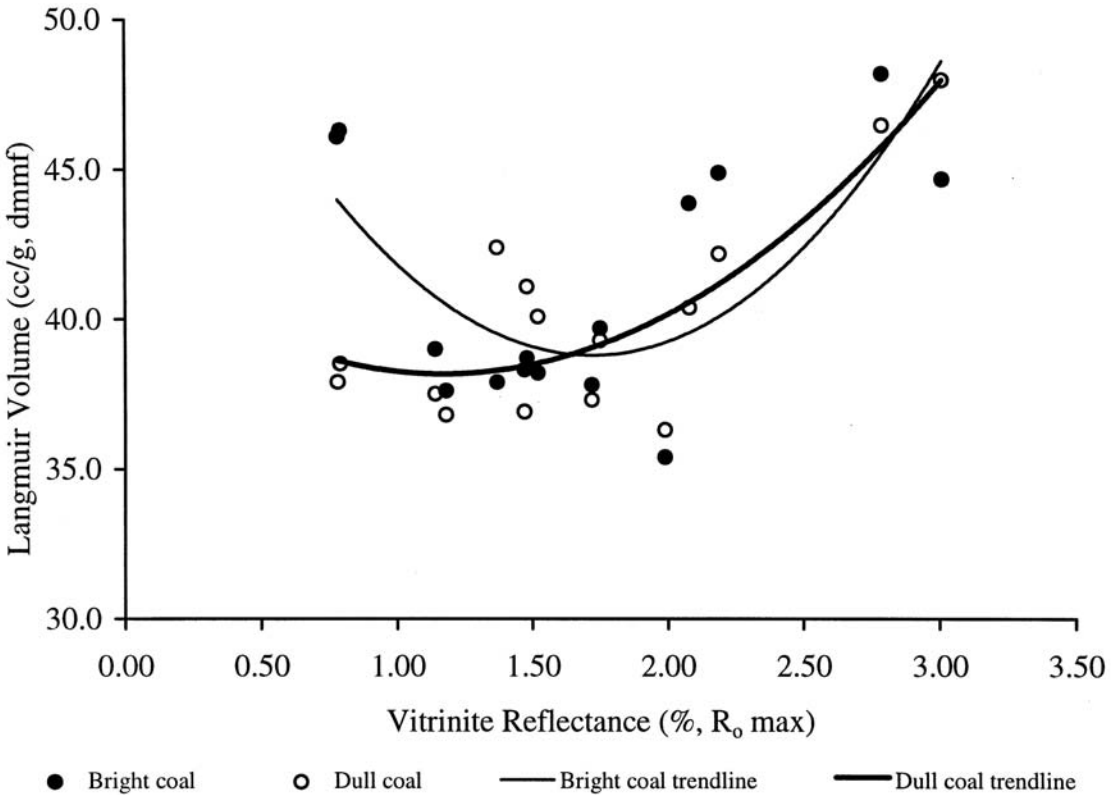


شکل(4):ارتباط بین ماکزیمم Reflectance of Vitrinite و ظرفیت مواد فرار در زغال های روشن(bright Coal)

معادله روند این نمودار به صورت: $V_M=5.44\ R^2-32.9R+56.4$; $r^2=0.98$ است.



شکل(5):موادمعدنی در زغال سنگ ها مانند خاکستر،به عنوان یک کاهش دهنده در مقدار جذب گاز در زغال های خام عمل میکند.معادله روند این نمودار به صورت $V_L=-0.38\ Ash+39.6$; $r^2=0.79$ است.



شکل(6):روند تغییر Langmuir Volume در ارتباط با Coal Rank در زغال های روشن وتیره دارای دو معادلـه متفـاوت است.برای زغال سنگ روشن: $V_L=5.90R^2-20.3R+56.2$; $r^2=0.54$ و بـرای زغـال تیـره(Dull Coal): $V_L=2.90R^2-6.77R+42.1$; $r^2=0.70$ است.

نمونه دوم در کشور چین واقع شده است ونام محدوده عملیاتی آن Southeastern Ordos می باشد.

جدول (5): آنالیز Petrographic

Coal lithotype, coal maceral and vitrinite reflectance of the main coal seams in the Weibei Coalfield

Sample no.	Sampling location		Coal seam	Coal lithotype	R_o (%)	Coal maceral (%)		
	Coal district	Coal mine				Vitrinite	Inertinite	Minerals
SSP11-1	Hancheng	Sangshuping	11	Semi-bright	1.77	80.8	13.5	5.7
SSP11-2	Hancheng	Sangshuping	11	Dull	1.79	13.9	48.7	37.4
SSP11-3	Hancheng	Sangshuping	11	Dull	1.77	86.7	10.4	2.9
SSP11-4	Hancheng	Sangshuping	11	Semi-dull	1.83	41.0	53.8	5.2
SSP11-5	Hancheng	Sangshuping	11	Semi-bright	1.83	69.3	30.0	0.7
XYK2-1	Hancheng	Xiayukou	2	Bright	1.76	61.6	38.0	0.4
XYK2-2	Hancheng	Xiayukou	2	Semi-bright	1.80	69.6	30.4	<0.1
XYK2-3	Hancheng	Xiayukou	2	Semi-bright	1.83	73.8	24.1	2.1
XYK3-1	Hancheng	Xiayukou	3	Semi-dull	1.78	75.0	24.5	0.5
XYK3-2	Hancheng	Xiayukou	3	Semi-dull	1.74	75.1	23.8	1.1
XYK3-3	Hancheng	Xiayukou	3	Dull	1.78	74.2	20.9	4.9
XYK3-4	Hancheng	Xiayukou	3	Semi-dull	1.84	18.8	72.8	8.4
LY5-1	Hancheng	Liaoyuan	5	Semi-dull	1.71	73.0	24.8	2.2
LY5-3	Hancheng	Liaoyuan	5	Semi-bright	1.70	71.0	28.5	0.5
LY5-4	Hancheng	Liaoyuan	5	Semi-bright	1.74	63.0	35.1	1.9
LY5-5	Hancheng	Liaoyuan	5	Bright	1.67	20.3	78.1	1.6
XSH3-1	Hancheng	Xiangshan	3	Semi-bright	1.81	77.3	21.1	1.6
XSH3-2	Hancheng	Xiangshan	3	Semi-bright	1.90	77.1	22.0	0.9
XSH3-3	Hancheng	Xiangshan	3	Dull	1.90	16.3	80.2	3.5
XSH3-4	Hancheng	Xiangshan	3	Dull	1.88	61.5	35.5	3.0
WC5-1	Chenghe	Wangcun	5	Semi-dull	1.76	73.8	18.7	7.5
QJH5-1	Chenghe	Quanjiahe	5	Semi-bright	1.57	69.2	30.0	0.8
QJH5-2	Chenghe	Quanjiahe	5	Semi-dull	1.60	28.3	69.4	2.3
QJH5-3	Chenghe	Quanjiahe	5	Semi-dull	1.60	68.4	30.8	0.8
QJH5-4	Chenghe	Quanjiahe	5	Dull	1.86	65.1	33.7	1.2
JY5-1	Pubai	Jinyu	5	Dull	1.55	64.4	32.9	2.7
JY5-2	Pubai	Jinyu	5	Semi-bright	1.55	38.4	60.6	1.0
JY5-3	Pubai	Jinyu	5	Semi-bright	1.57	77.5	21.4	1.1
JY5-4	Pubai	Jinyu	5	Dull	1.56	58.5	30.2	11.3
XC10-1	Tongchuan	Xinchang	10	Semi-bright	1.79	80.6	17.4	2.0
XC10-2	Tongchuan	Xinchang	10	Semi-dull	1.82	72.7	26.8	0.5
XC10-3	Tongchuan	Xinchang	10	Semi-dull	1.89	85.6	14.0	0.4
XC10-4	Tongchuan	Xinchang	10	Semi-bright	1.64	87.9	9.5	2.6
YP5-1	Tongchuan	Yuanpan	5	Semi-dull	1.60	77.1	22.2	0.7
YP5-2	Tongchuan	Yuanpan	5	Semi-dull	1.62	75.3	18.6	6.1
YP5-3	Tongchuan	Yuanpan	5	Semi-bright	1.60	72.4	26.2	1.4
YP5-4	Tongchuan	Yuanpan	5	Semi-bright	1.59	74.8	20.7	4.5
TY5-1	Tongchuan	Taoyuan	5	Semi-bright	1.58	82.5	14.9	2.6
TY5-2	Tongchuan	Taoyuan	5	Semi-bright	1.63	64.6	33.6	1.8
TY5-3	Tongchuan	Taoyuan	5	Semi-bright	1.60	74.1	15.7	10.2

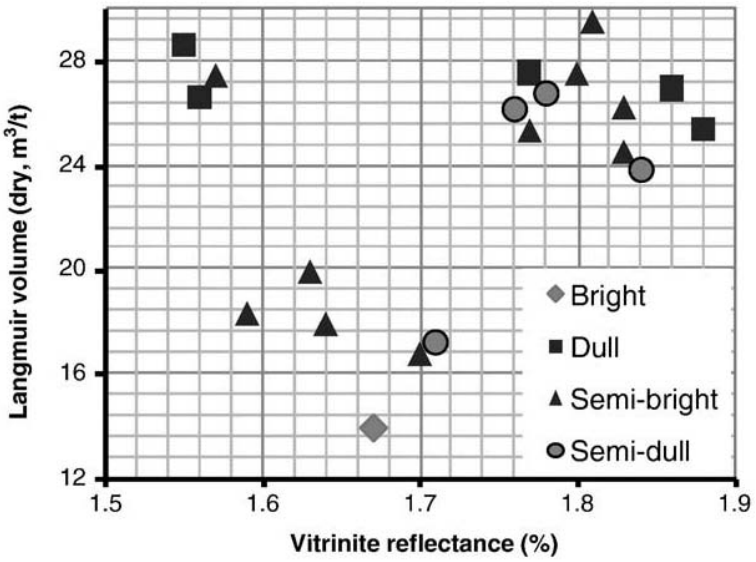
Abbreviations: R_o = mean max vitrinite reflectance.

جدول(6): آنالیز Proximate

Sample no.	Coal seam	Depth (m)	M_d (%)	A_d (%)	EM (%)	V_L(m^3/t)		P_L (MPa)	P_R (MPa)	G_E (m^3/t)	G_D (m^3/t)	Saturation (%)
						(as-received)	(DAF)					
SSP11-1	11	430	0.57	19.34	1.20	19.24	25.36	1.98	8.50	16.5	14.0	85.0
SSP11-3	11	430	0.52	23.28	0.98	20.89	27.56	1.89	8.50	17.2	14.0	81.5
SSP11-5	11	430	0.54	18.65	1.10	19.56	24.54	1.71	8.50	16.5	14.0	84.8
XYK2-2	2	390	0.92	4.83	2.65	25.36	27.54	1.52	6.79	21.2	12.5	58.9
XYK2-3	2	390	0.92	5.70	2.16	24.56	26.25	1.53	6.79	20.0	12.5	62.5
XYK3-1	3	400	0.88	12.08	2.15	21.75	26.16	1.68	7.01	18.4	12.5	68.1
XYK3-4	3	400	0.80	17.00	1.24	18.54	23.87	1.72	7.01	15.8	12.5	79.3
LY5-1	5	320	3.21	6.22	3.21	15.61	17.24	0.45	6.55	14.6	9.0	61.6
LY5-3	5	320	2.50	4.28	2.50	15.61	16.75	0.66	6.55	14.2	9.0	63.5
LY5-5	5	320	3.28	10.40	3.28	12.01	13.91	0.31	6.55	11.5	9.0	78.5
XSH3-1	3	260	0.88	6.05	2.10	25.23	29.54	1.95	2.55	15.6	10.0	64.2
XSH3-4	3	260	1.04	20.69	1.65	21.29	25.41	1.87	2.55	11.5	10.0	87.2
WC5-1	5	330	0.71	25.12	1.26	18.14	26.74	1.95	3.39	12.6	6.5	51.6
QJH5-1	5	230	0.80	10.84	2.25	23.36	27.47	1.81	2.54	14.2	6.6	46.6
QJH5-4	5	230	0.80	13.20	2.12	24.24	26.95	1.76	2.54	13.7	6.5	47.5
JY5-1	5	260	0.85	14.31	2.25	25.14	28.58	1.96	3.67	15.8	6.2	39.2
JY5-4	5	260	0.76	20.12	1.23	23.89	26.57	2.15	3.67	13.3	6.2	46.8
XC10-4	10	370	5.26	5.30	3.29	15.20	17.90	2.23	3.78	10.1	5.6	55.6
YP5-4	5	330	3.90	3.85	3.25	15.60	18.30	2.21	3.44	10.3	5.5	53.7
TY5-2	5	320	2.50	19.03	2.50	15.61	19.90	0.78	3.37	12.7	5.5	43.5

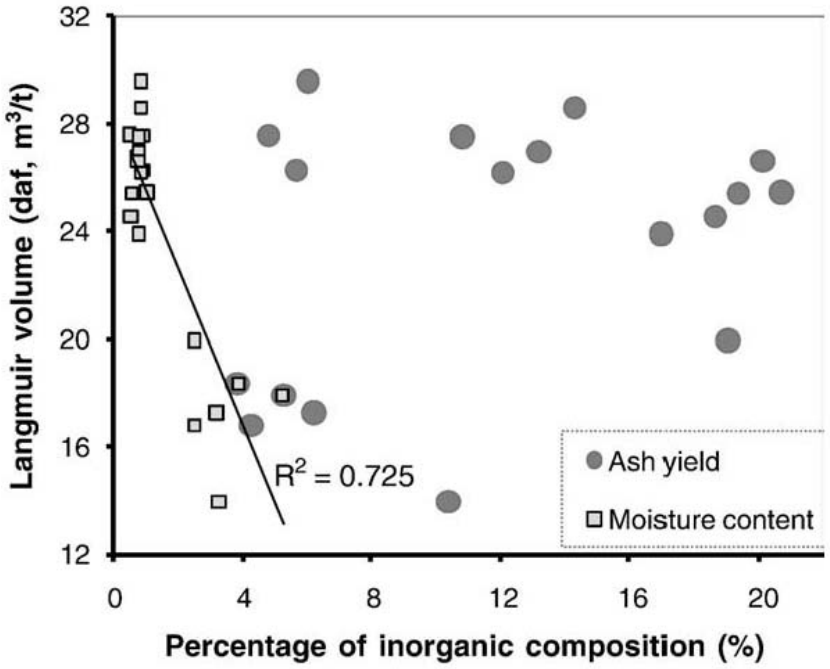
Refer to Fig. 3 and Table 1 for sample locations.

M_d = Moisture content (%, air dry base), A_d = Ash yield (%, air dry base), EM = Equilibrium moisture content (%), V_L = Langmuir volume (m^3/t), P_L = Langmuir pressure (MPa), P_R = Approximate reservoir pressure (MPa), G_E, Estimate gas content from the Equation, $G_E=(1-A_d-M_d)\times V_L\times P_R/(P_L+P_R)$, ($m^3$/t), G_D = In-place gas content (m^3/t), Saturation = Percentage of G_D/G_E , (%).



شکل(7): مقایسه حجم لانگمیر نسبت زغال هایی بامرتبه(rank) زغال سنگ

مقایسه حجم لانگمیر نسبت زغال هایی بامرتبه(rank) مختلف در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل(8): مقایسه حجم لانگمیر نسبت به زغال هایی با مقدار خاکستر مختلف

مقایسه حجم لانگمیر نسبت زغال هایی مقدار خاکستر مختلف در شکل8 نشان داده شده است.

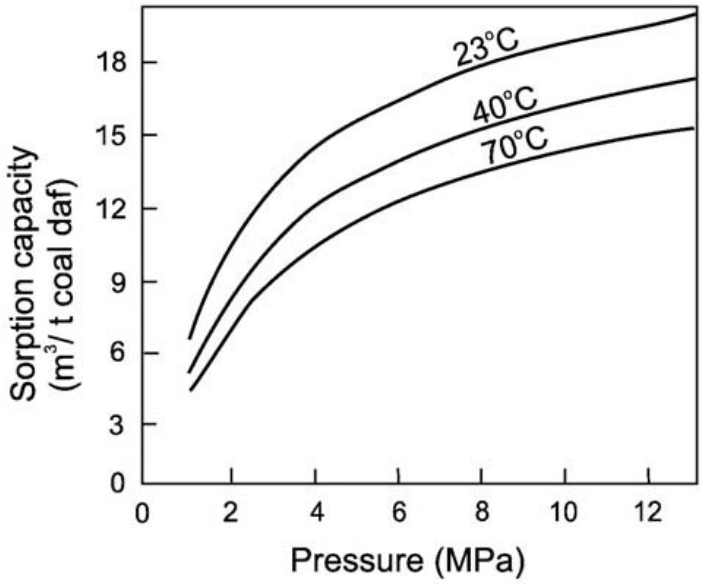
نمونه سوم در حوزه Silecian در جنوب لهستان واقع است.

جدول(7):آنالیز Proximate

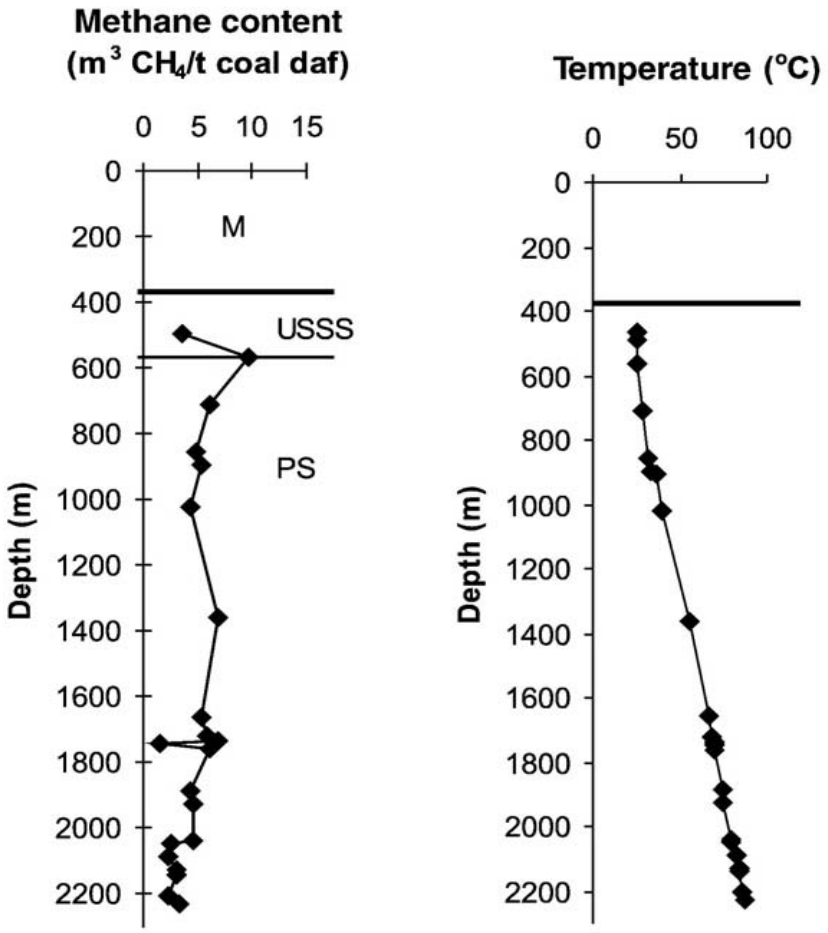
Methane contents and coal parameters in the area south of the Bzie-Czechowice fault.

Depth (m)	G (m^3/t coal daf)	M^a (wt.%)	A^a (wt.%)	V^{daf} (wt.%)	C^{daf} (wt.%)	H^{daf} (wt.%)	$O+N^{daf}$ (wt.%)	H/C
869	7.56	2.75	23.13	34.13	79.27	4.86	15.02	0.74
877	5.27	2.91	18.53	31.62	80.02	5.20	13.93	0.78
929	0.62	3.20	28.94	28.76	–	–	–	–
940	0.18	4.98	7.29	29.35	83.33	4.83	11.10	0.70
972	0.21	4.37	15.47	31.03	81.56	5.10	12.97	0.75
1002	0.26	3.07	25.76	31.70	81.18	5.41	12.50	0.80
1003	0.14	3.02	15.98	30.14	81.55	4.87	13.05	0.72
1033	0.69	5.21	15.00	30.74	83.14	4.76	11.48	0.69
1065	4.39	5.55	18.12	30.07	81.72	4.99	12.68	0.73
1091	2.64	9.09	26.76	29.67	81.27	5.11	12.82	0.75
1119	4.60	8.09	22.24	30.18	80.96	5.15	13.48	0.76
1132	4.97	2.84	36.26	31.47	80.38	5.28	12.83	0.79
1178	6.24	8.74	26.16	32.25	79.11	5.13	14.47	0.78
1232	5.92	2.68	9.29	31.84	84.03	4.65	10.65	0.66
1310	5.13	2.34	15.75	29.80	82.63	4.92	11.15	0.71
1320	1.63	9.30	28.84	29.03	84.15	5.08	10.20	0.72
1332	4.45	4.35	15.48	29.90	83.60	5.09	9.69	0.73
1360	5.67	2.56	22.57	29.11	84.47	5.30	9.39	0.75
1364	4.33	2.34	16.22	29.29	84.31	5.11	9.95	0.73
1380	7.09	4.73	15.74	28.83	83.79	5.00	10.34	0.72
1416	10.83	2.12	12.95	28.42	85.86	4.71	8.93	0.66
1440	6.96	2.30	10.62	27.56	85.89	4.54	9.24	0.63
1449	10.73	2.09	12.98	28.06	84.47	4.96	9.57	0.70
1460	4.09	5.02	19.43	27.73	83.60	4.92	10.83	0.71
1469	5.79	1.64	16.32	27.92	85.52	5.01	9.06	0.70
1483	6.58	1.37	11.90	26.87	84.40	5.20	9.87	0.74
1545	10.80	1.41	7.19	25.72	85.57	4.94	9.12	0.69
1569	5.30	2.16	2.74	24.69	85.41	4.74	9.42	0.67
1654	6.48	1.97	15.85	25.22	83.66	5.03	10.56	0.72

G—Methane content, M^a—Moisture, analytical state, A^a—ash content, analytical state, V^{daf}—volatile matter, dry ash free state, C^{daf}—carbon content, dry ash free state, H^{daf}—hydrogen content, dry ash free state, $O+N^{daf}$—oxygen and nitrogen content in total, dry ash free state, "–" analysis was not carried out.



شکل(9): نسبت جذب سطحی زغال سنگ به فشاری که در ان نمونه برداری انجام شده است.



شکل(10):نسبت عمق نمونه بردازی زغال سنگ به مقدار متان

جدول 3و4 نشان دهنده این است که مواد فرار (Volatile matter(DAF) به طور مستقیم و محکم با Maximum Reflectance of Vitrine رابطه دارد که در شکل4 نشان داده شده است.

در شکل 2 رابطه بین مواد فرار و(R_0%) به صورت تابعی زیر در آمده:

$$V_M=5.44R_0^2-32\ R_0+56.4 \quad :r^2=0.98 \qquad (1)$$

اثر رطوبت بر ظرفیت جذب سطحی(Adsorption Capacity):

اثر رطوبت بر ظرفیت جذب سطحی زیادات به طوری که 1٪ افزایش رطوبت باعث کاهش 25٪ و 5٪ رطوبت باعث کاهش 65٪ در جذب می شود.

اثر خاکستر(Ash) بر ظرفیت جذب سطحی:

طبق شکل5 مقدارAsh رابطه مستقیم با ظرفیت جذب سطحی دارد.نمودار نشان می دهد که با افزایش خاکستر(Mineral Matter) مقدار(V_L) کاهش می یابد.طبق رابطه زیر:

$$V_L=-0.38Ash-39.6 \quad :r^2=0.79 \qquad (2)$$

همین نتیجه را در مورد شکل8 می توان دید.

اثر(Rank) بر ظرفیت جذبی:

طبق شکل 6 مقدار(V_L) برای زغال(Bright)وزغال(Dull) از هم جدا می باشد.

بسیاری از محققان نشان داده اند که مجموع جذب متان با افزایشCoal Rank افزایش می یابد.بیشتر محققان اعتقاد دارند کهBright Coal با Vitrinite بالاتر قابلیت جذب بالای نسبت به زغال Dull با Inertinite بیشتر دارد.

قابل ذکر است با افزایش دما قابلیت جذب سطح کاهش می یابد.مانند شکل 9 .

بیان فرمول هایی برای تخمین مقدار گاز بستر های زغال سنگی:

$$G_E = (1-A_d-M_d) \times V_L \times P_R/(P_L+P_R) \quad (3)$$

M_d =رطوبت

A_d = خاکستر

V_L = حجم Langmuir (The maximum adsorption isotherm capacity)

P_L= فشار Langmuir (From methane adsorption isotherm experiment)

فرضیات فرمول(3):

1)مخزن تماما گاز متان تولید نماید.

2)دمای مخزن 30^0C در نظر گرفته شود.

رابطه زیر حجم جذب شده متان با فشار و دما را براساس رطوبت و خاکستر زغال بیان میکند.

$$V= \{(100-M-A)/100\} \times V_w/V_d \{K (P)^N - b\times T\} \quad (4)$$

$$(V_w/V_d)= 1/(0.25\times M\times 1) \quad (5)$$

M =رطوبت

V= حجم متان جذب شده (CC/g)

A % =خاکستر

V_w =(CC/g) حجم گاز جذب شده در زغال تر

V_d =(CC/g) حجم گاز جذب شده در زغال خشک

$K = 0.8(FC/VM)+5.6$

$T = 2.5+ (h/100) +T0$

T= دمای آن عمق

T0 =دمای سطح زمین

h =عمق (متر)

برای تخمین متان زغال در محل از فرمول زیر میتوان استفاده نمود:

(6) $$V= (1/100) \times (100-\%Moisture-\%Ash) \times 0.75 \times \{K_0 (0.096h)^n-0.14(1.8h/100+11)\}$$

$V=K_0Pn- bT$

V=حجم گاز جذب شده (CC/gr of Moisture &Ash Free Coal)

P=فشار(atm)

T=دما (^0C)

K_0=عدد ثابت

b=عدد ثابت

n_0=عدد ثابت

برای بدست اوردن K_0و n_0می توان از رابطه زیر برحسب Proximate Analysis استفاده نمود.

(7)

$$K_0=0.8(FC/VM) +5.6$$

$$n_0=0.315-0.001(FC/VM)$$

* معادله Langmuir :

(8) $$V=V_L \{P/ (P_L+P)\}$$

Vحجم گاز جذب شده=(atm)

P فشار=(Mpa)

V_L=Langmuirحجم Std m^3/t

P_L=Langmuirفشار Mpa

روش خالص سازی(Purification)و (Separation)،گاز خروجـی از معـادن زغـال سنگ:

همان طور که می دانیم معادن زغال سنگ به طور پیوسته در حال انتشار گاز متان بـا درصـد غلظـت هـای متفـاوت هسـتند.رنـج غلظـت متـان موجـود در گـاز خروجـی از معـادن از 20٪ بـرای (Coal seam methane)تا معادن فعال(Coal mine methane) که در آن غلظت گاز متـان بـه 80٪ میرسـد. از گـاز متان منتشر شده علاوه بر اینکه از آن پس از خالص سازی و جدا سازی می توان برای تامین قـدرت و تـوان استفاده نمود.یکی از عوامل بسیار مهم گرمایش جهانی زمین می باشد.گاز متان 20 برابر دی اکسید کـربن از نظر گازهای گلخانه ای اثر تخریبی بیشتری دارد.

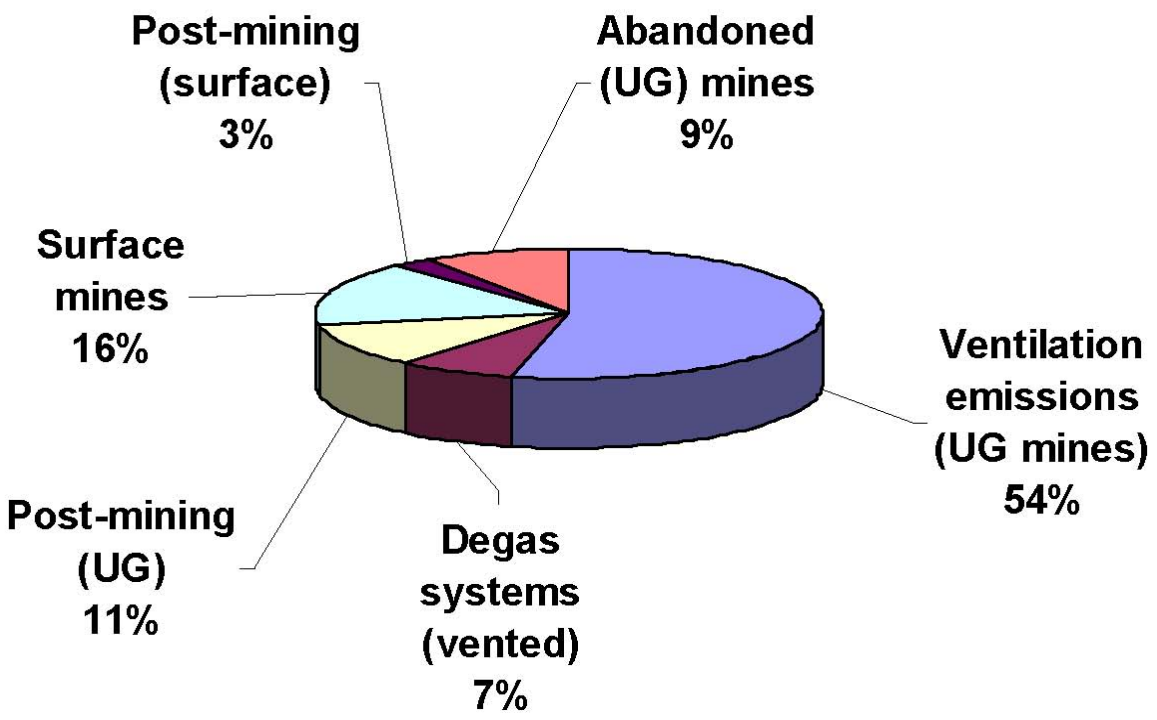
بنابراین خالص سازی و رساندن غلظت گاز متان به درصدی بالا که بتوان از آن برای تولیـد قـدرت اسـتفاده نمود امری ضروری است .

در شکل 11 غلظت های متفاوت انتشار گاز متان را در یک معدن چینی در سال 2005 مشاهده می نمایید.

Date	Ventilation air		Drainage gas												VAM, %
	CH_4, %	CH_4, m^3/min	Surface goaf		roof		Return fringe		Gas gate		In-seam		others		
			CH_4,%	CH_4, m^3/min	CH_4, %	CH_4, m^3/min	CH_4, %	CH_4, m^3/min	CH_4, %	CH_4, m^3/min	CH_4, %	CH_4, m^3/min	CH_4, %	CH_4, m^3/min	
10/10/05	0.22	57	50-80	9	8	2.5	6	1.5	26	27	10	2	12	13.6	50.8

شکل(11):غلظت های متفاوت انتشار گاز متان از قسمت های مختلف معدن زغال سنگ

در شکل 12 منابع متعدد انتشار گاز متان در معادن زغال سنگ نشان داده شده اسـت(تصـاویر مربـوط بـه معادن کشور آمریکا می باشدهمچنین درصد هرکدام از منابع انتشار نشان داده شده است.



شکل (12):منابع متعدد انتشار گاز متان در معادن زغال سنگ

به طور کلی روشهای زیادی برای جداسازی و یا خالص سازی گازهای معادن زغـال سـنگ وجـود دارد.ولـی چند روش به طور معمول برای بالا بردن غلظت متان در گاز خروجی معادن استفاده می کردند.

1- Membrane Separation

2- Pressure Swing Adsorption

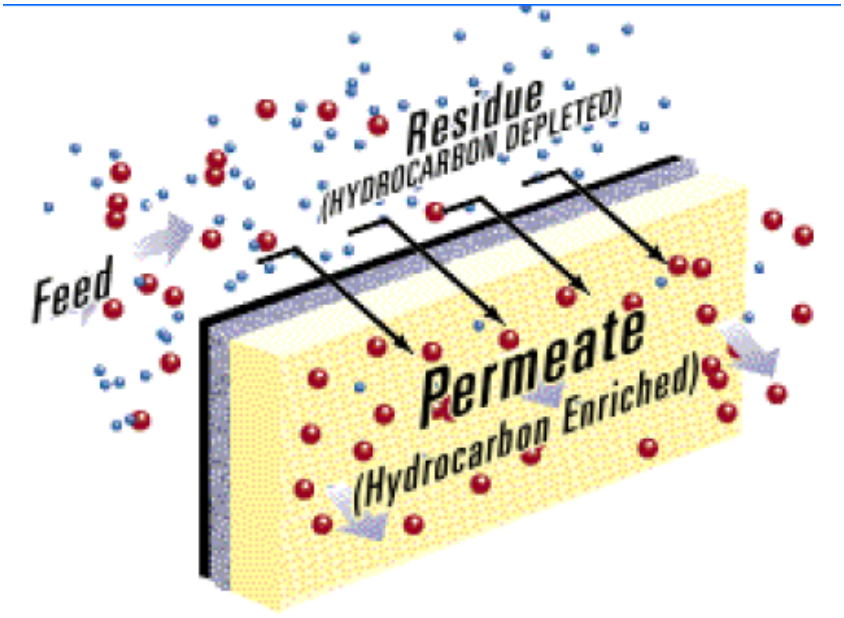
3- Combustion Deoxygenating

4- Low Temperature Separation (Cryogenic Purification)

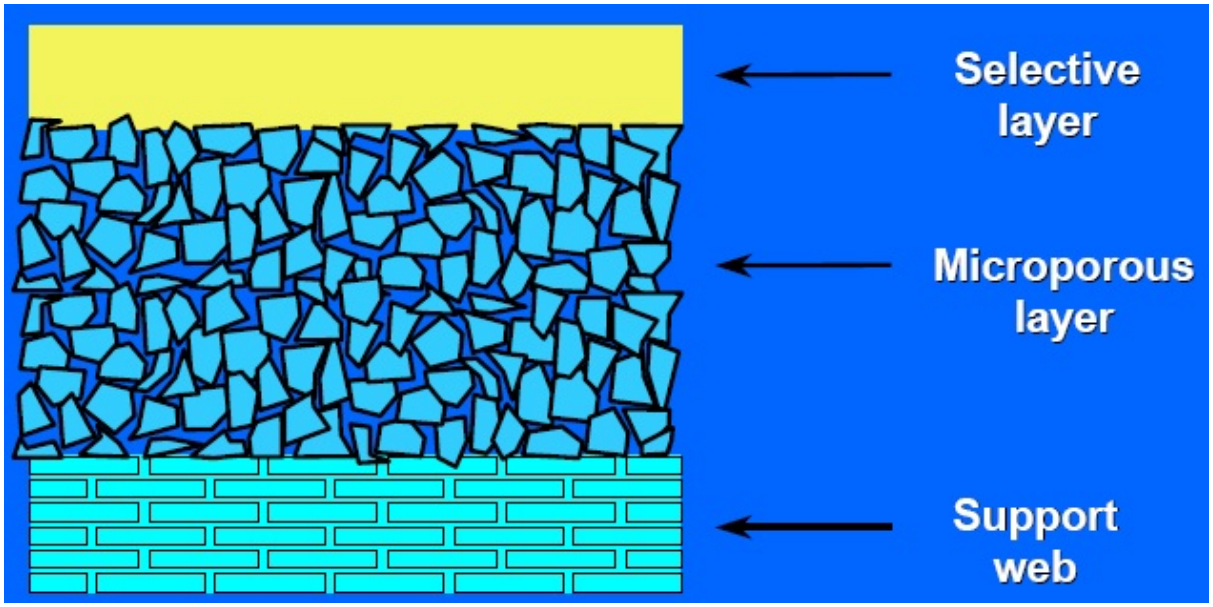
روش 1) Membrane Separation:

این تکنولوژی در سال های اخیر بسیار رشد داشته است.اما وجود بعضی مشکلات مانند عدم اثبات عملکرد طولانی مدت این روش در صنعت و یا مطمئن نبودن از هزنیه های نگهداری باعث شده است که صنعت خود را با این تکنولوژی همگام نکرده است.این روش از جهاتی با روش PSA (که در مرحله بعد توضیح میدهیم)از لحاظ وجود دو منطقه پر فشار و کم فشار در دو طرف غشاء مشابه است.از طرفی این روش دارای مزینتی هم نسبت به PSA است . وآن عملکرد پیوسته ان است.

این روش بر اساس قابلیت تراوش(Infiltration) مواد آلی یکدست به منظور جدا سازی اجزای مشخص ترکیبات گازی می باشد.یکی از مزایای این روش تجهیزات ساده،فضای کمی که برای کار اشغال می کند،عملکرد پیوسته و عدم تغییر فاز در ترکیبات گازی است.وقتی ترکیبات گازی متراکم و فشرده شد،فشار اجزاء در یک طرف غشاء(دیواره)Membrane بالاتر از طرف دیگر می شود.به خاطر اختلاف فشار به وجود آمده اجزای گاز شروع به حرکت از طریق دیواره(غشاء)به طرف دیگر آن می کند،نفوذ پذیری(Permeability Related) به ضریب نفوذ پذیری اجزای سطح دیواره(غشاء)و اختلاف فشار بستگی دارد.برای مثال ضریب نفوذ پذیری بخار H_2 و HN_3 بالا است.بنابراین این گازها سریع تر از بقیه گازها می توانند نفوذ کنند. شکل 13 و14برشی از یک غشاء را نشان می دهد.



شکل13-برشی از یک دیواره غشایی



شکل14-برشی از یک دیواره غشاء

ضریب نفوذ پذیریCo_2 وH_2SوO_2 کوچکتر است در حالی که ضریبN_2،CH_4،C_2H_6 از بقیه هم کوچکتر است.

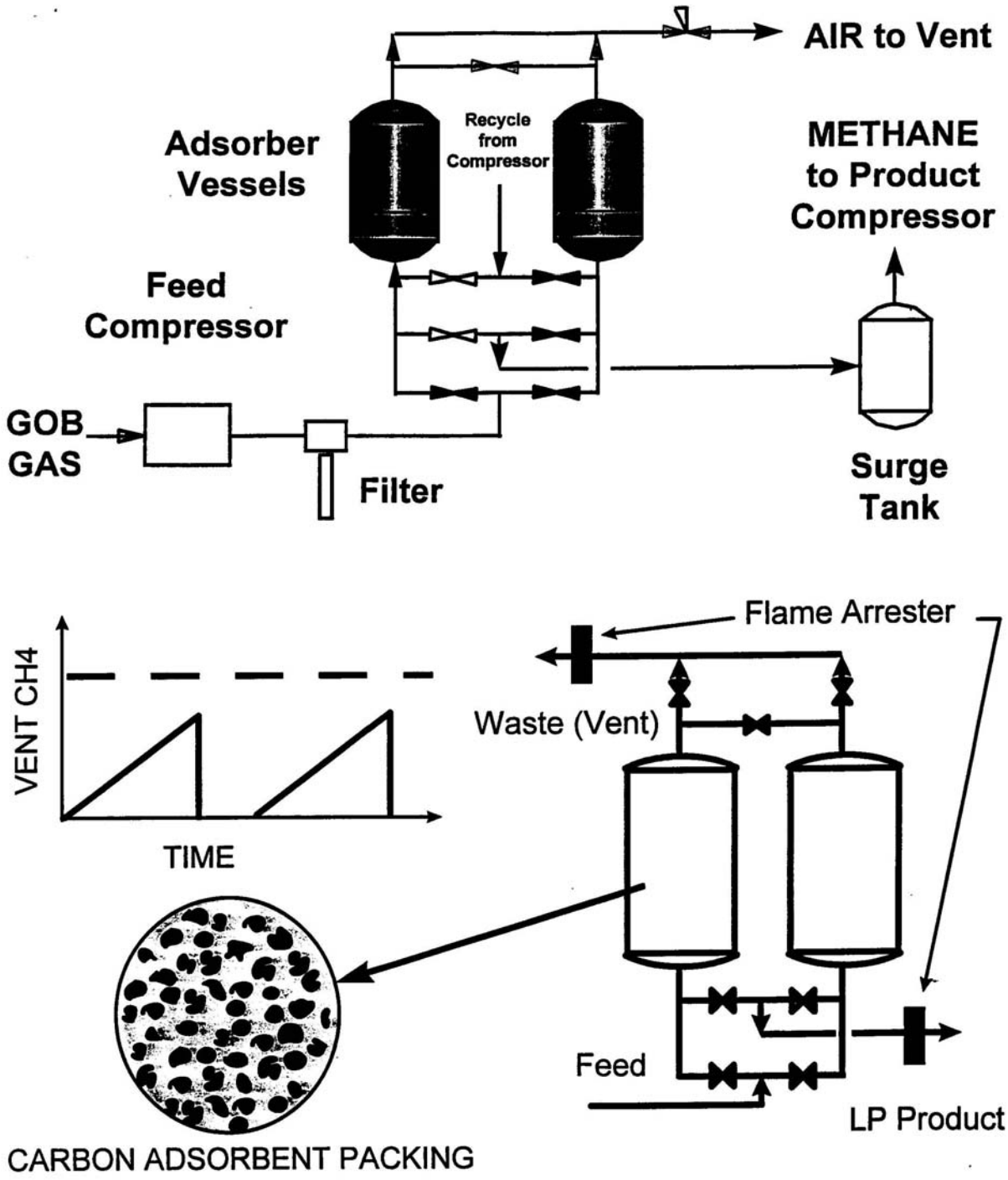
درصد حضورO_2درCBM حدود 10-5٪ می باشد،بنابراین ضروری است با ایجاد اختلاف فشار بالاترO_2 را از ترکیبات گازی حذف نموده،با بالا رفتن اختلاف فشار،فشار جزیی متان هم بالا می رود و با بالا رفتن ضریب نفوذ پذیریO_2،ضریب برای متان هم بالا می رود و این باعث هدر رفتن بیشتر متان می شود. یکی از رو شهای اجرای این مکانیزم این است که ترجیحا به متان اجازه عبور از دیواره را بدهیم ,در حالی که بقیه ناخالصی ها پشت غشاء باقی بماند. یکی از اصلی ترین محدودیت های این تکنولوژی ساخت تجیهزات برای مقیاس های بزرگ می باشد,زیرا در مقیاس های بزرگ نیاز به ساختار های صلبیتی عظیم، نیاز داریم که بتوانند اختلاف فشار زیاد دو طرف را تحمل کند.از طرفی در صورت خرابی قسمتی از غشاء کلیه دیواره غشاء باید تعویض گردد.که ممکن است موجب توقف موقتی پروسه شود.

روش2) Pressure Swing Adsorption (PSA):

این روش مانند روش Solvent adsorption عمل میکند (که بیشتر در پالایشگاه های گازی کاربرد دارد). اما با این تفاوت که در روش جدید جاذب ها به صورت جامد هستند. ونمی توانند مانند سیال در پروسه جریان داشته باشند.در نتیجه چون بعد از مدتی بخاطر جذب ناخالصی های موجود در متان استخراجی از معادن اشباع میشوند.نیاز به احیاء مجدد دارند .پس این روش به صورت پیوسته کار نمی کند بلکه با موازی کردن تعدادی از مخازن جاذب ها و عبور جریان گاز به ترتیبی که زمان لازم برای احیاء مجدد جاذب اشباع شده بدست آورد, مانع از عملکرد پیوسته کل سیستم خالص سازی می گردند.

مطابق شکل 15 روشPSA بر این اساس عمل می کند که اجزای متفاوت گازمتان هر کدام دارای ظرفیت جذب مختلفی می باشد.در جاذب های مختلف جامد مثل الک(Sieve),مولکول های مختلف ناخالصی ها نظیر کربن, نیتروژن و.... جذب میشود.در طی فرآیند(PSA) جذب تحت فشار بالا اتفاق می افتد و پس دهی(Desorption) در فشار پایین. یک بخش کوچکی از تولید برای شستشو.(احیای) جاذب مورد استفاده قرار می گیرد.معمولا این روش به وسیله 2 ستون که به صورت متناوب کار می کنند اجزاء می شود.مزایای روشPSA مصرف کم انرژی،زمان کوتاه برای جذب و عملکرد ساده می باشد.عیب های این روش نسبت بازیابی کم متان که بین 40 تا50٪ می باشد.این جذب کم به علت فضاهای خالی موجود میان لایه های جاذب است که گاز در آنها به تله می افتد.مقداری هم که باید برای احیاء جاذب استفاده گردد.در این روش رابطه میان درصد بازیابی و درصدخلوص مخالف و متناقض هم هستند.این مکانیزم بخاطر محدودیت در ساخت مخازن بزرگ که عملکرد مناسبی داشته باشد, در مقیاس های کوچک و یا متوسط کاربرد دارد.در این روش باید با توجه به مشخصات گاز در یافتی از معادن و مقدار ناخالصی ها طراحی تکمیلی انجام گیرد.معمولا در روش PSA دو جاذب مورد استفاده قرار میگیرد.1- جاذب دی اکسید کربن 2- جاذب نیتروژن(این جاذب قابلیت جذب اکسیژن, و دی اکسید کربن را هم داراست).

قابل ذکر است در صورت وجود ناخالصی های دیگر میتوان از جاذب های دیگر در مخازن موازی استفاده نمود.



شکل15-نمایی از پروسه PSA و نحوه عملکرد

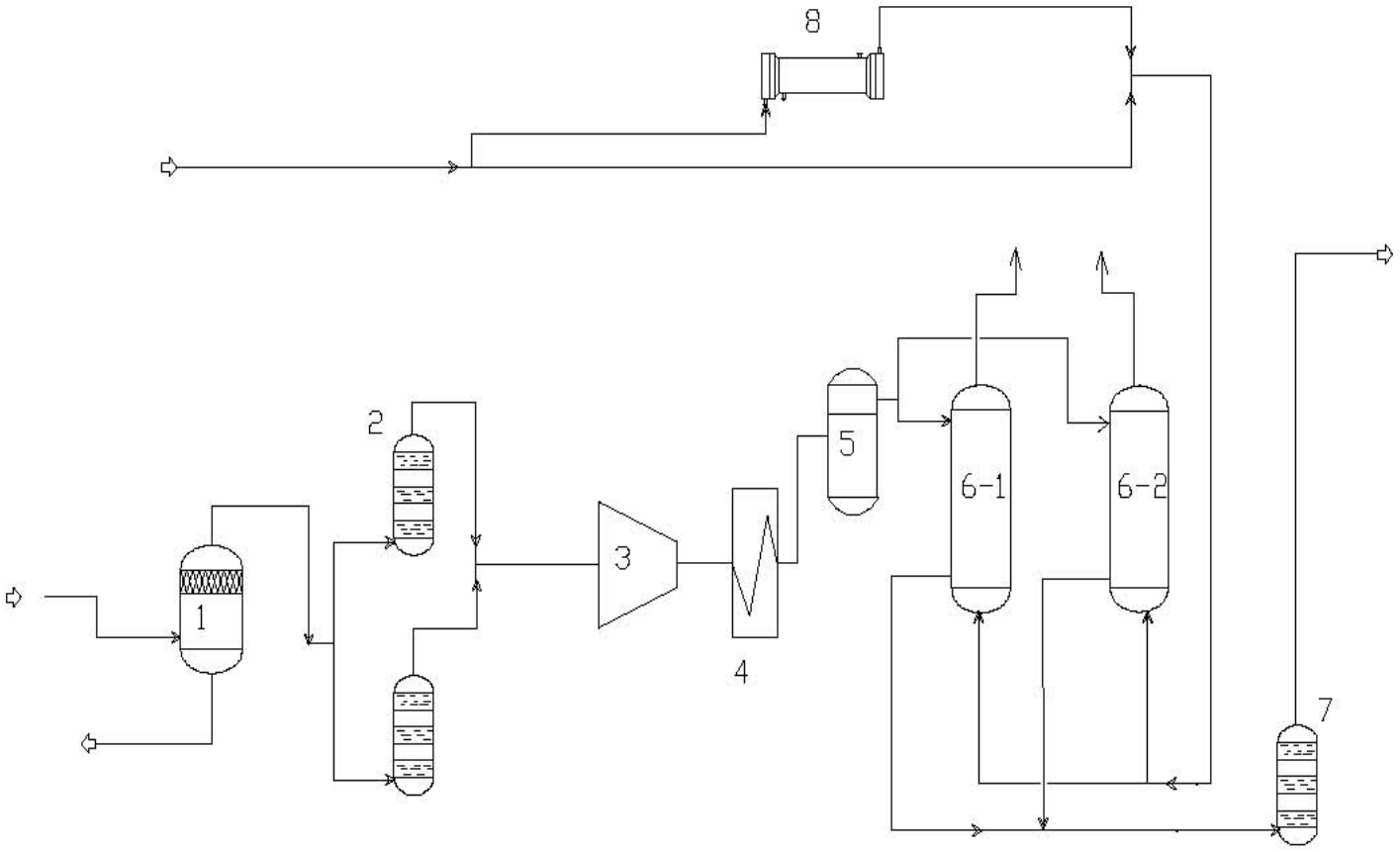
روش3) : یکی دیگر از راه های خالص سازی و پاک سازی اکسیژن گاز معادن زغال به وسیله احتراق است. در این روش خلوص بالایی از متان بدست می آید و درصد اکسیژن به شدت کاهش می یابد حدود 5٪ ،این روش نیاز به تجهیزات پیچیده و نیاز به سرمایه ی بالایی دارد.در طی این پروسه مقدارH_2S،Co،Co_2(در

صورت وجودH_2Sدر گاز معدن)افزایش می یابد.Co_2 را که مـی تـوان در فرآینـد آب زدایـی (Hydration Molecular sieve) جدا نمود.یکی دیگر از معایب این روش مصرف بالای انرژی به علاوه عملکـرد نسـبتا پیچیده پروسه می باشد.

4-روش جدا سازی در دمای بسیار کم(Cryogenic Purification):

در این روش ترکیبات گازی به صورت مایع در دما و فشار کم در می آید،سپس اجزای گاز برای دمای تبخیر خودشان جداسازی را صورت می بخشند.این روش یکی از روشهای رایج برای جداسازی گازمعادن یا CBM می باشد.با این روش می توان (LNG) با درصد خلوصی بسیار بالایی ایجـاد نمـود کـه هـم بـرای صـادرات استفاده گردد و هم در تولید توان استفاده شود.در این روش ابتدا فشار گـاز را بـالا مـی برنـد.بـرای پروسـه جداسازی و مایع سازی،سپس به منظور جدانمایی بخار آب و Co_2 موجود در گـاز پروسـه زیـر را اجـرا مـی نماید.در جدا کننده(1)جای ذرات ریز آب جدا می شود.درجدا کننده(2) تمام گرد و غبـار و ریزگـرده هـا از گاز جدا می شود.گازCBM تمیز وارد کمپرسور(3) می شود تا متراکم گردد.سپس در کولر(4)خنک شـده و وارد جداگانه(5)می گردد.برای جداسازی آب های کندانس شده در تراکم و خنک سازی ،از این مرحلـه گـاز به خشک کن وارد می شود.(1-6 یا 2-6) که یکی کار می کنـد و دیگـریStandby اسـت سـپس بعـد از خروج از خنک کننده دوباره فیلتر شده(7) و وارد مرحله مایع سازی می گردد.

فاز مایع سازی طبقFlow Diagram زیر بعد از انجام عملیات تبرید هنوز مقداری از اکسیژن و هوا به صورت گاز باقی مانده است که خارج می شود و مایع جهت جداسازی بهتر به مبدل های حرارتی فرستاده می شود که براساس دمای تبخیر گاز ما جدا می شوند.قابل ذکر است که در شکل زیر مبرد گازN_2 می باشد.



شکل(16):بلوک دیاگرام روش خالص سازی Cryogenic

در جدول 8 می توان مقایسه ای بین رو ش های ذکر شده را مشاهده کرد.

جدول(8):مقایسه ای بین روش های خالص سازی

Technology	Mechanism	Principle	Application status
Purification			
Purification for town gas	Separation	Gas purification process	Demonstrated in full-scale units providing pipeline gas
Power generation/cogeneration			
Reciprocating gas engine	Combustion	Combustion in engine combus-tor	Mitigation Utilisation—demonstrated
Conventional gas turbine	Combustion	Combustion in conventional gas turbine/engine combustor	Mitigation Utilisation—demonstrated
Co-firing in power stations	Combustion	Combustion inside boilers	Mitigation Utilisation—demonstrated
Fuel cell power generation	Electrochemical reaction	Electrochemical process	Mitigation Utilisation—being proposed as a concept
Chemical feedstocks			
Chemical feedstocks: methanol and carbon black	Synthetic	Synthetic processes	Mitigation Utilisation—being tested in a pilot-scale unit

به جزء روش های بالا روش های جداگانه هم برای جداسازی دیگر اجزاء ترکیب گازی معدن زغال سنگ وجود دارد. یکی از مشکل ترین و گران ترین مسئله,جدا سازی نیتروژن است.که هنوز تحت تحقیقات بسیاری برای اقتصادی کردن وابداع روش های جدید می باشد.

پاک سازی جریان گاز از ذرات ریز جامد یکی از ضروریات پیش از خالص سازی است زیرا وجود ذرات ریز باعث ایجاد سایش,خوردگی در تجهیزات بخصوص در سرعت ,دما وفشار بالا می شود.

پاک سازی اکسیژن, به طور کلی اول هر گونه از فرایند های خالص سازی به منظور کاهش ریسک انفجار سعی بر جداسازی اکسیژن می باشد.بخصوص در فرایند Cryogenic Purification به علت کمپرس کردن گاز خطر انفجار افزایش میابد.معمولا جداسازی اکسیژن توسط کاتالیزورهایی انجام می گیرد.یکی از راه کارهای این کاتالیزورها اکسیداسیون مقداری از متان موجود در پروسه و تبدیل ان به دی اکسید کربن میباشد.البته این راه کار این عیب را دارد، که از تولید نهایی متان می کاهد. از طرفی این کاتالیزور برای انجام پروسه به حرارتی حدود 400C نیاز دارد.که این خود به انرزی زیادی برای تامین حرارت نیاز دارد.

در روش PSA این عمل توسط جاذب نیروژن انجام می گیرد.

بخار آب موجود در گاز های استخراجی از معادن زغـال سـنگ بایـد قبـل از انجـام پروسـه خـالص سـازی بخصوص در نوع Cryogenic جدا شود .زیرا در خالص سازی به روش Cryogenic گاز تحت فشـار بـالا قرار می گیرد و تا دماهای بسیار پایین سرد میشودو در اثر حضور بخـار اب یـخ ایجـاد میشـود. بـرای پـاک سازی گاز های معدن زغال سنگ از بخار اب می تـوان از Zeolite در مخـازن اسـتفاده نمـود.وقتـی ایـن ماده(Zeolite)اشباع شود میتوان با عبور هوای داغ از آن دوباره آنرا احیاء نمـود.یـک پیشـنهاد دیگـر بـرای جداسازی بخار آب استفاده از رطوبت گیر ژلیکول(Gelycol) است.

- **مقایسه ای بین تکنولوژی های خالص سازی:**

روش **PSA** یک رو رایج در سایزهای کوچک ومتوسط در صنایع گوناگون میباشد.و معمولا مشـکل خاصـی در عملکرد و یا نگهداری آن دیده نشده است.به علاوه همان طور که گفتیم این سیستم بـه صـورت پیوسـته عمل نمیکند(Semi batch) بلکه با موازی کردن مخازن مشابه آنرا به صورت پیوسته تبـدیل میکننـد.ایـن ویژگی(Semi batch) به کل پروسه قابلیت انعطاف پذیری را با توجه به نوساناتی که ممکن است دردبـی و ترکیبات جریان گاز رخ دهد را , می دهد.

استفاده از روش Cryogenic بسیار در صنایع کاربرد دارد .نگرانـی اصـلی از ایـن روش در اسـتفاده از ایـن روش نوسان در دبی گاز ورودی به سیستم است زیرا ممکن در رنج عملکرد سیستم قرار نگیرد وانجام پروسه خالص سازی را دچار توقف کند.بازگردشی (Recycling) جریان گاز به ثبات عملکرد پروسه خالص سـازی تا حدودی کمک می کند و آنرا تصصیح می نماید اما ممکن است باعث افزایش هزینه هـای عملیـاتی شـود. بنابراین ملاک استفاده از این روش خالص سازی(Cryogenic) توانایی معدن در تخلیه گاز با دبـی ثابـت و یا طراحی سیستم بر اساس بخش کوچکی از از گاز های تخلیه شده معدن زغال سنگ انجام گیرد.

استفاده از روش غشائی(Membrane) دارای روند رو به رشدی در صنایع مـی باشـد.امـا بـه طـور کلـی در مقیاس های کوچک به کار میرود. اما نگرانی که در مورد این تکنولوژِی وجود دارد.دوام و پایداری سیستم در عملکرد متوالی و طولانی مدت است,زیرا این سیستم قابلیت تعمیر را نـدارد. واگـر دچـار آسـیب شـود کـل

سیستم (مدل) باید تعویض گردد. یکی از مزایای این تکنولوژی نصب ساده در کل سیستم است اما در تعداد های زیاد نصب سیستم غشایی ممکن است نگهداری و عملکرد کل سیستم دشوار گردد.

متان معدن زغال سنگ دارای تغییرات زیادی در کیفیت است.یکی از دلایل مهم در این نوسان کیفیت نشتی لوله های انتقال گاز میباشد که آلودگی های هوا را به داخل لوله انتقال وارد شده و از کیفیت آن میکاهد.

حال با توجه به تکنولوژی های ذکر شده و مطالعات اقتصادی که در این روش ها انجام گرفته است. میتوان نتایج زیر را مشاهده کرد:

-اگر غلظت متان موجود در گاز های معدن زیر 40٪ باشد بعید است که خالص سازی جریان گاز عملی باشد , حتی در در طراحی های گران قیمت هم این امر عملی نیست زیرا برای انجام خالص سازی متان در حالتی که مقدار کمی از این گاز در جریان تخلیه ای معدنها وجود دارد,مقدار قابل توجهی گاز های گلخانه ای آزاد مشود که این خود مغایر اصل استفاده از گاز معدن میباشد.

-جریان های گازی با غلظت متان بین 40 تا 70٪ این گاز ها را میتوان بعد از فرآوری به کیفیت گاز لوله کشی(Pipeline quality) رساند.اما این عمل در صورتی از لحاظ اقتصادی قابل توجیه میباشد که با کمک های دولتی همراه باشد.

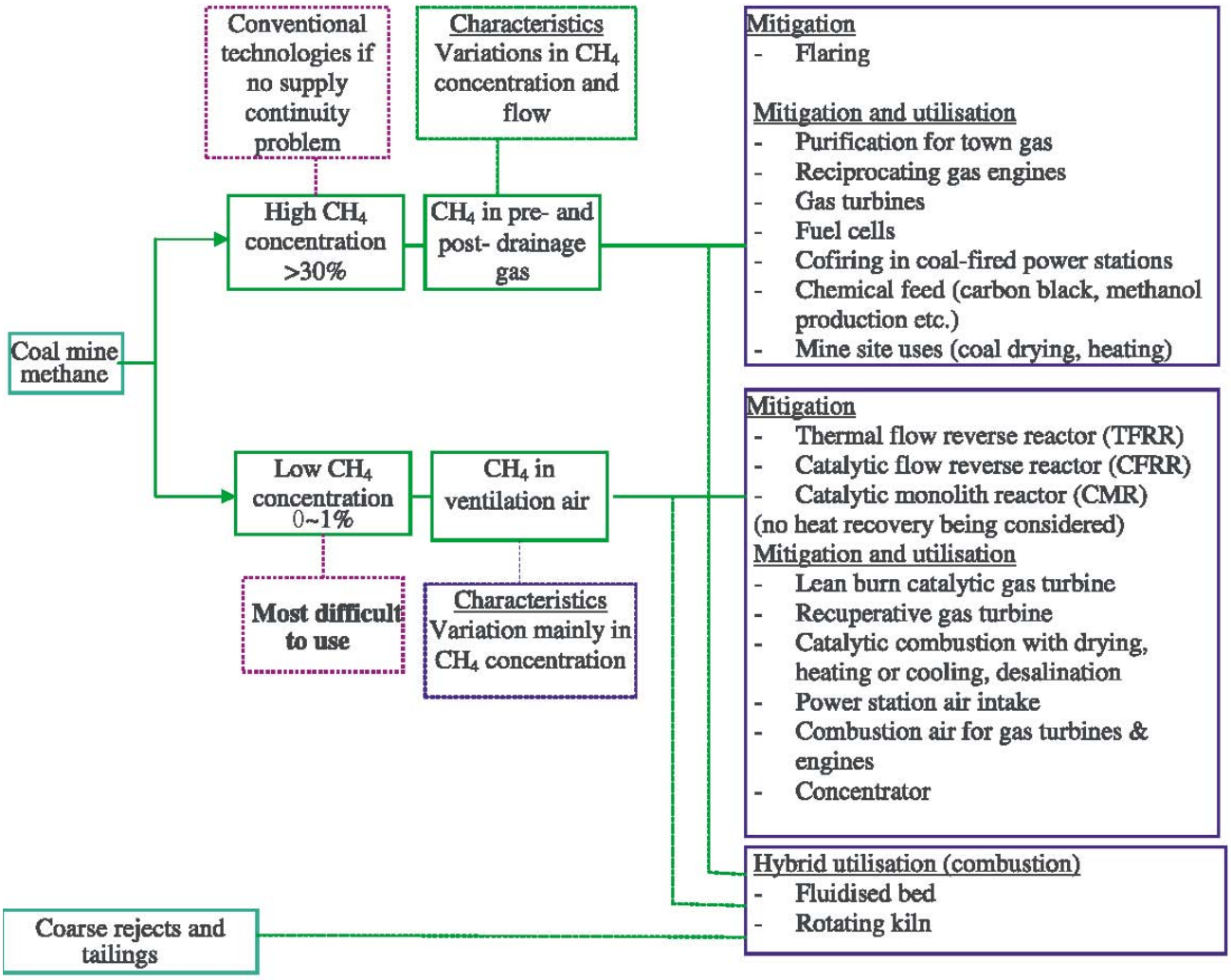
- در آخر اگر جریان گاز های معدن دارای غلظت بالای 70٪ متان باشد, قابلیت اجرای یک واحد خالص سازی این گازها را دارد. زیرا میتوان انتظار برگشت سرمایه را از انجام این پروژه با فروش گاز خالص شده را داشت.

روش های تولید توان از گاز های خروجی از معادن زغال سنگ:

تولید الکتریسیته یکی از جاذبه های بازیابی گاز های معدن زغال سنگ است زیرا معادن زغال سنگ نیاز مبرم به الکتریسیته دارند.الکتریسیته برای راه اندازی تقریبا همه تجهیزات و ماشین الات داخل معدن از قبیل فن های تهویه معادن, تسمه های انتقال مواد,تجهیزات نمک زدایی از زغال و تصیفه زغال مورد نیاز است. سیستم تهویه معدن به مقدار زیادی الکتریسته نیاز دارد زیرا 24 ساعته و 7 روز هفته باید در حال کار, بدون وقفه باشند.

در امریکا تقریبا به ازاء هر تن استخراج زغال 24Kw توان الکتریسیته مورد نیاز است.و برای آماده سازی زغال وانجام فرایند های تصفیه ناخالصی های زغال به ازاء هر تن زغال سنگ به 6Kw توان الکتریسیته مورد نیاز است.

یک نگاه کلی به تکنولوژی های قابل استفاده در مورد به کار گیری از گاز متان منتشر شده در معادن زغال سنگ در شکل17 به نمایش در آمده است.



شکل(17):دیاگرام جامع از روش های جهت تولید توان الکتریکی

به طور کلی 3 تکنولوژی, قابلیت تولید توان از گاز های تخلیه از معادن زغال سنگ را دارا هستند.

1- توربین گاز(Gas Turbine)

2- موتورهای گازی(Gas Engine)

3- پیل سوختی(Fuel Cell)

یکی از اولین شرایط استفاده از تکنولوژی های بالا داشتن غلظت مناسب متان برای هر کدام از روش های بالا است. بهر حال می دانیم که تغییر در دبی و یا غلظت متان ورودی به هر روش های بالا بر عملکرد پیوسته و پایدار واحد تولید توان تاثیر دارد. جدول9 خلاصه ای از تکنولوژی های بالا را به همراه تفاوت های ان نشان میدهد.

جدول(9): مقایسه ای تکنولوژی های رایج تولید توان :

Technology	Gas engines	Gas turbines	Fuel cells
Mechanism	Combustion	Combustion	Electrochemical reaction
Operating temperature	1800–2000 °C	1400–1650 °C	150–200, 600–950 °C
Minimum CH_4 requirement	40% (spark-ignition) [2,5], 5% (homogenous charge compression ignition) [52,53]	30% (conventional), 1% (catalytic turbine) [54]	Pre-drainage gas and medium quality post-drainage gas (>50%) [5]
Potential issues			Still under development, high cost

1-توربین گاز:

توربین گاز یکی از تجهیزات پیچیده در نیروگاه های جهت تولید توان می باشد.نیروگاه های توربین گاز معمولا به علت راه اندازی سریع برای تنظیم تقاضای شبکه کشوری مورد استفاده قرار می گیرند.از طرفی میتوان از گازهای خروجی آن در سیکل های ترکیبی برای باز تولید توان استفاده می شود.

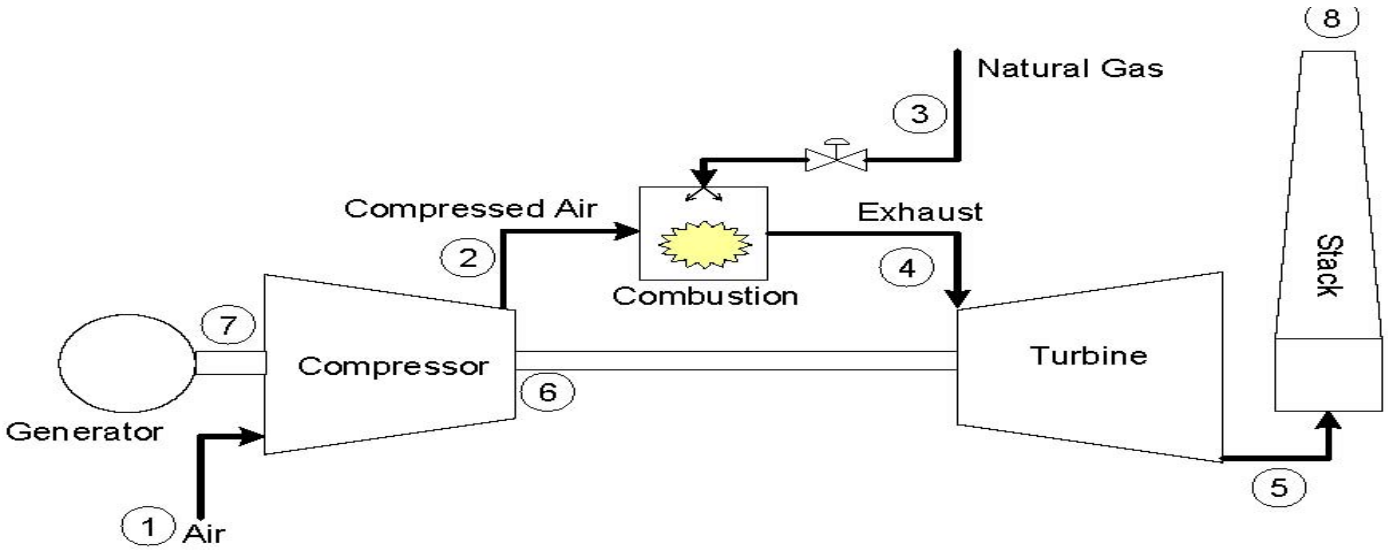
مراحل عملکردی توربین گاز به این شکل است که هوای اتمسفر توسط کمپرسور که نیروی حرکتی خود را از توربین سیستم میگیرد,فشرده میشود سپس این هوای فشرده به محظه احتراق منتقل میشود. در محفظه احتراق هوای فشرده وگاز تزریقی دچار احتراق میشوند. گاز های تولیدی از احتراق دارای حرارتی معادل 1000 درجه سیلسوس می باشند .این گاز های پر انرژی به سمت پره های توربین هدایت شده که باعث چرخش توربین میشوند .شفت توربین به شفت ژنراتور متصل است و چرخش شفت ها باعث تولید توان را در ژنراتور میشود.

به طور کلی 2 سیکل برای توربین گازی وجود دارد .1-سیکل باز 2-سیکل بسته

توربین گاز جریان بزرگتری از گاز را نسبت به روش های دیگر میتوانند مورد استفاده قرار دهد زیرا این سیکل از یک جریان پیوسته گاز استفاده میکند در نتیجه این سیکل به عنوان یک موتور توان بزرگ استفاده میشود.استفاده از میکرو توربین ها برای تولید توان ازگاز های تخلیه معدن زغال سنگی که دارای کیفیت متوسطی بوده قبلا ازموده شده است. طراحی های اخیر در زمینه توربین گاز باعث بالا رفتن بازدهی

توربین,افزایش طول عمر توربین و پایین آمدن هزنیه نگهداری توربین نسبت بـه طراحـی هـای قبلـی شـده است.

برای بکار گیری توربین گاز با سوخت متان معادن زغال سنگ باید محفظـه احتـراق آنـرا بـه نـوع ویـژه ای طراحی نمود,که قابلیت ایجاد شعله پایدار را با استفاده از گازی با غلظت متان 30٪ و ارزش حرار تی 100 مگا ژول بر متر مکعب را داشته باشد.بنابراین توربن های معمـولی بـا محظـه احتـراق بهینـه شـده قابلیـت استفاده در معادنی که قادر به تولید دبی ثابتی از جریان گاز هستند را داراست.



شکل(18): سیکل توربین گازی

2-موتور های گازی احتراق داخلی:

موتور های گازی احتراق داخلی به طور رایج برای تولید توان از طریق گاز های با کیفیـت متوسـط اسـتفاده میشود. به طور کلی2 مدل موتور احتراق داخلی داریم,موتور های احتراق جرقه ای(Spark Engine) بـا سیکل اتو و موتورهای احتراق کمپرسی(Compression Engine) با سـیکل دیـزل.از لحـاظ قطعـات مکانیکی هر دو سیکل ذکر شده یکسان هستند.

در معدن شماره 1 منطقه Nelms در اویاهوی امریکا یک موتور احتراق داخلی با توان 225Kw ,ساخته شده توسط شرکت جنرال موتور و با حمایت دپارتمان انرژی امریکا (DOE) نصب و راه اندازی شده است. در موتور یاد شده طراحی کاربراتور در این موتور اجازه استفاده از سوخت هایی با رنج غلظت 20 تا 80٪ متان را میدهد. نمونه دیگر در استرالیا در منطقه Appin Colliery ،54 موتور یک مگاوات از شرکت کاترپیلار از نوع احتراق جرقه ای نصب شده است. سوخت این موتور ها توسط دو منبع متان زغال سنگ تامین می گردد.ترکیبات سوخت گازی بدست آمده از این دو منبع به صورت 50-85٪ متان ,0-5٪ دی اکسید کربن و تا بالای 50٪ هوا است.

به طور کلی با اینکه توسط تحقیقات اثبات نشده است اما این را فرض می گیریم که ,مینیمم غلظت متان مورد استفاده در موتورهای احتراق جرقه ای 40٪ است. مطالعات بر روی موتور های احتراق کمپرسی نشان میدهد که این نوع موتور میتواند با غلظت های به کمی 5٪ هم عملکرد داشته باشد.

شکل19-نمایی از یک موتور گاز تولیدی شرکت کاترپیلار

4- پیل سوختی:

پیل سوختی یک سیستم تبدیل انرژی از نوع مبدل الکتروشیمیایی است که توانایی تبدیل مستقیم انرژی یک سوخت و اکسید کننده را به انرژی الکتریکی را داراست.سوخت اولیه مورد استفاده در یک پیل سوختی برای بهره برداری از انرژی شیمیایی آن می تواند بطور وسیعی براساس کارکرد آن ها تغییر یابد.پیل های سوختی دارای بازدهی بالایی در میان دیگر روش ها میباشد.

یک پیل سوختی الکتریسیته را از طریق واکنش های الکترو شیمیایی مطابق اصول یک باتری استاندارد تولید میکند.امروزه تنها پیل های سوختی از هیدروژن که اطمینان بالایی در در استفاده دارد را به عنوان سوخت استفاده می نمایند ,اما تحقیق بر روی گسترش پیل های سوختی بر اساس سوخت متان در حال انجام است.

سه نوع پیل سوختی برای تولید توان مورد استفاده قرار می گیرد. 1- Phosphoric acid

2-Molten carbonate 3- Solid Oxide

در Phosphoric Acid ,این نوع پیل سوختی به صورت تجاری بسیار مورد استفاده قرار میگیرد و دارای بازدهی 40-80٪ میباشد.این پیل سوختی در دمای 150-200 درجه سیلیسوس عمل می کند.

متان معدن زغال سنگ می تواند به عنوان یک تولید کننده هیدروژن با تغییر برروی ساختارش عمل کند و مورد استفاده این پیل سوختی قرار گیرد. انواع دیگر پیل سوختی نظیر Molten carbonate و Solid Oxide در دمای بالا(از 600-950 در جه سیلیسوس)کار میکنند. در این دمای بالا پیل سوختی قادر به شکستن ساختار هیدرو کربن ها و تولید هیدروژن به صورت داخلی می باشد .در نتیجه این پیل ها قادر به دریافت مستقیم متان معدن زغال سنگ هستند.مینیم غلظت متان مورد نیاز برای این نوع پیل ها باید مورد تحقیق قرا گیرد.اما به طور تجربی می توان تخمین زد که 50٪ غلظت متان مورد نیاز است.و باید خاطر نشان کرد که برای پیل های سوختی باید از متان با کیفیت متوسط استفاده نمود.

با اینحال قیمت پیل های سوختی بالا است واین مانع از تمایل به تجاری شدن آن می شود.به علاوه در پیل های سوختی دما بالا هنوز تحقیقاتی در حال انجام است که بتوان هزنیه اولیه بالای آنر ا کم کرد و قابلیت اطمینان آنرا بالا تر برد.به هر حال این نوع از تولید توان(Fuel cell) در اینده دارای کاربردهای بسیاری می شود که این از طریق پیشرفت های تکنولوژی که منجر به کاهش هزنیه ساخت و نگهداری می شود قابل دسترسی خواهد بود.

تکنولـــوژی هـــای اســـتفاده از گـــاز متـــان تهویـــه شـــده از معـــادن زغـــال سنگ(Ventilation Air Methane):

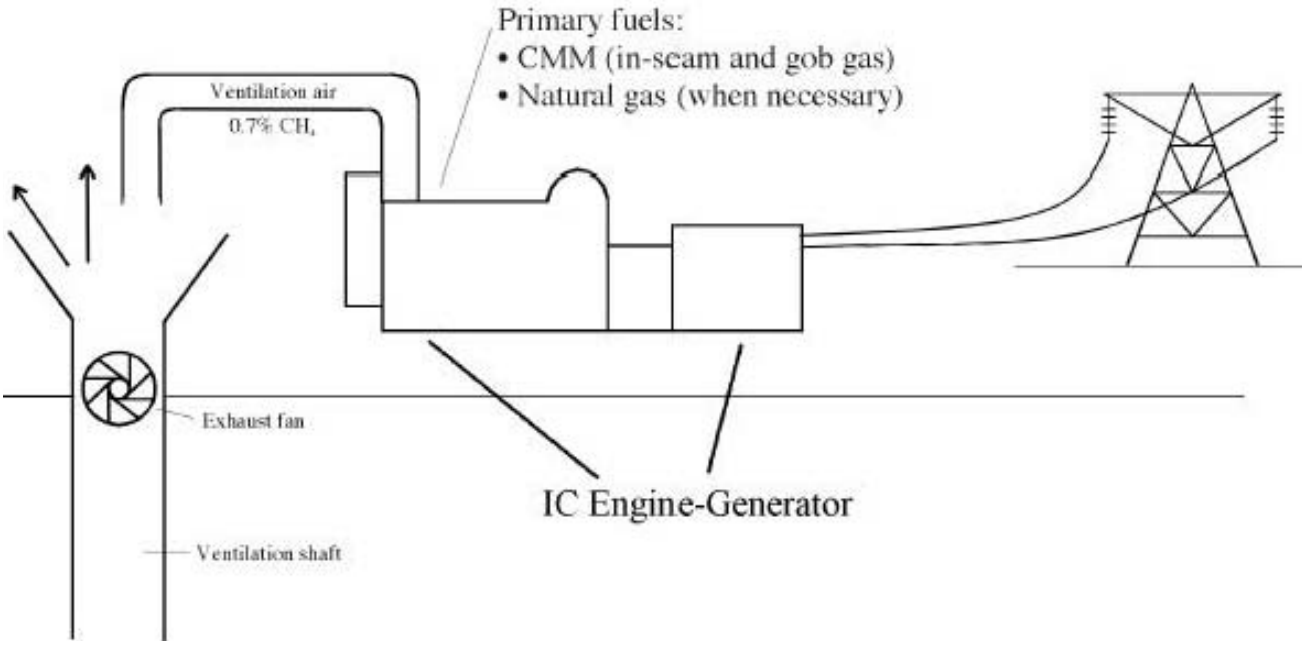
در بخش های گذشته ذکر شد که در معادن زغال سنگ گاز متان یه مقدار فـراوان منتشـر مـی شـود.بـرای ایجاد امنیت وجلوگیری از انفجارمعدن زغال سیستم های تهویه جامعی برای این گونه معادن در نظر گرفته میشود.در این سیستم ها حجم بزرگی از هوای تازه به درون معدن ارسال میشود تا ضـمن تـامین اکسـیژن مورد نیاز کارگران ،غلظت گاز متان در معدن را کاهش دهد. غلظت قابل قبول برای متان در معدن زغال زیر 1٪ است که در صورت بالا رفتن آلارم خطر انفجار به صدا در می آید.

با توجه به حجم بالای هوای تهویه معدن با اینکه غلظت متان معمولا زیر 1٪ است در جهان حـدود 70٪ از انتشار گاز متان معادن حاصل متان تهویه شده از معدن است. به طور مثالدر معادن زغال سنگی اسـترالیا،در یک معدن گازی زغال سنگ(Gassy coal mine)به طور حدودی بین 150 تا 300 متر مکعـب متـان در هر ثانیه با غلظت های بین 0.3-1٪،خارج میشود . به طور تئوری با استفاده از این حجم گاز میتوان سالی در حدود MW2979 الکتریسیته تولید نمود.در شکل20 می توان نمایی شماتیک از نحوه استفاده از متـان حاصل از گاز تهویه را نشان داد.از طرفی گاز متان یک گازبا اثر بالای گلخانه ای است، و اثری حدود 20 برابر دی اکسید کربن دارد. در نتیجه رها کردن این گاز باعث ضررهای زیست محیطی بالایی می شود به طـوری که حدود 6.5٪ از گاز های گلخانه ای در استرالیا حاصل اثر همین گاز می باشد.

استفاده از این گاز ها به خاطر اینکه غلضت متان در ترکیب آن بسیار پایین اسـت.و نیازمنـد طراحـی هـای بهینه در بخش تکنولوژی های استفاده از آن می باشد، کمی بحث برانگیز است.واضح است که بـازدهی ایـن تکنولوژی ها با افزایش غلظت متان موجود در هوای تهویه افزایش می یابد.

استفاده از این تکنولوژی ها به دو دسته تقسیم می گردند: 1- استفاده فرعی (کمکی) 2- استفاده اصلی

با توجه به جدول 10 که در آن تکنولوژی های قابل استفاده ار متان حاصل از هوای تهویه نشـان داده شـده است در این جدول مرحله اجرایی شدن و یا تحقیقاتی این تکنولوژی هـا نشـان ذکـر شـده اسـت. توضـیح مختصری از این روش های استفاده، را ارائه می نماییم.



شکل 20-نمایی از استفاده از متان حاصل از تهویه معدن زغال سنگ

کاربردهای فرعی(کمکی) از متان هوای تهویه معدن:

کاربردهای فرعی متان هوای تهویه معدن معمولا به عنوان جایگزین هوای احتراق درسیستم های احتراقی استفاده میشود.استفاده از این گاز به عنوان هوای احتراق این مزیت را دارد که به عنوان سوخت مکمل عمل کرده ومیتواند عملکرد احتراق را بهبود ببخشد.

طبق جدول 10 ، متان هوای تهویه می تواند در سیستم های زیر مورد استفاده قرار گیرد.

1- Pulverized coal –fired power station

2- واحد های احتراقی متان(Methane combustion units)

3- موتور های احتراق داخلی(IC)

4-توربین های گاز (Gas turbine)

جدول10- طبقه بندی تکنولوژی های استفاده از متان هوای تهویه

Technology	Oxidation mechanism	Principle	Application
Ancillary uses			
Combustion air for conventional pf power station	Thermal	Combustion in pf power station boiler furnace	Mitigation Utilisation – demonstrated in a pilot-scale unit, and being considered for a full-scale demonstration
Combustion air for gas turbine/engine	Thermal	Combustion in conventional gas turbine/engine combustor	Mitigation Utilisation – not demonstrated yet
Hybrid waste coal/ tailing/methane combustion in a kiln	Thermal	Combustion inside a rotating combustion chamber	Mitigation Utilisation – being trialled in a pilot-scale unit
Hybrid waste coal/ tailing/methane combustion in a fluidised bed	Thermal	Combustion inside a fluidised bed and freeboard	Mitigation Utilisation – being proposed as a concept
Principle uses			
Thermal flow reverse reactor (TFRR)	Thermal	Flow reverse reactor with regenerative bed	Mitigation – demonstrated Utilisation – not demonstrated yet
Catalytic flow reverse reactor (CFRR)	Catalytic	Flow reverse reactor with regenerative bed	Mitigation – demonstrated Utilisation – not demonstrated yet
Stand-alone catalytic combustor (monolith)	Catalytic	Monolith reactor with a recuperator	Mitigation – demonstrated Utilisation – not demonstrated yet
Catalytic lean burn gas turbine	Catalytic	Gas turbine with a catalytic combustor and a recuperator	Mitigation – combustion demonstrated Utilisation – being developed in a lab-scale unit
Recuperative gas turbine	Thermal	Gas turbine with a recuperative combustor and a recuperator	Mitigation – demonstrated Utilisation – demonstrated in a pilot-scale unit, and need for further modifications (?)
Concentrator	N/A, adsorption	Multi-stage fluidised/moving bed using adsorbent, and a desorber	Mitigation Utilisation – under development

.

1- Pulverized Coal –Fired Power Station :

با تحویل هوای تهویه از معدن که داری غلظت کمی گـاز متـان میباشـد، میتـوان در سیسـتم نیروگـاهی Pulverized . به عنوان هوا ی احتراق در کلیه بخش ها استفاده نمود. یک مدل تحقیقاتی- آزمایشگاهی از این سیستم تهیه شده است که نشان میدهد استفاده از متان هوای تهویه قابلیت اجرا را دارد.بـه خصـوص اگر این نیروگاه ها در نزدیکی معادن زغال سنگ احداث گرددند.یک مدل کاملا صنعتی در استرالیا برای یک نیروگاه تنظیم شده است در این طرح به حدود 220 مترمکعب بر ثانیه هوای تهویه برای ورودی هـوا مـورد نیازاست.

معمولادبی و غلظت متان موجود در هوای تهویه بر عملکـرد پایـدار،کوره بـویلر نیروگـاه اثـر دارد.از طرفـی استفاده از متان هوای تهویه بر پیچیدگی عملکرد نیروگاه از لحاظ بررسی بازدهی نیروگـاه ،امنیـت معـدن میافزاید.این احتمال وجود دارد که در اثر عدم کنترل کامل بر دبی و غلظت متان، با افزایش سـریع غلظـت متان از حدود 0٪ به 0.8٪ در اثر بالا رفتن دمای احتراق،ایجاد رسوب(Fouling)، صدمات زیادی به بـویلر وارد گردد.

2- کوره های دوار(Rotary Kiln):

یکی دیگر از کاربرد های متان هئای تهویه در سیستم های ترکیبی برای سوختن متان اضافی به علاوه زغال های مصرف نشده(Waste Coal) است.شرکت CSIRO جدیدا تکنولوژی به بازار عرضه نمـوده اسـت.در این روش استفاده انتظار میرود که زغال های نامرغوب با استفاده از گاز های متان حاصـل از تخلیـه و متـان حاصل از هوای تهویه، در یک کوره دوار بسـوزد. بـرای مـواد زائـد(زغـال) کـه دارای کیفیتـی بسـیار پـایین هستند.نقش متان تخلیه شده از معدن بسیار مهم است زیرا داشتن یک احتراق مناسب بـا اسـتفاده از زغـال های اضافی بدون یک شعله کمکی (با سوزاندن گاز های تخلیه شده از معـدن کـه دارای کیفیتـی مناسـب است)بسیار مشکل است .در صورت نبود سوخت های گازی برای شعله کمکی ،استفاده از زغال های مرغوب توصیه می شود.البته آزمایشات نشان داده است که این کاربرد به علت راندمان پـایین احتـراق زیـاد کـاربرد ندارد.

3-موتور های احتراق داخلی(IC):

موتورهای احتراق داخلی معمولا از گاز های با کیفیت متوسط برای تولید گاز استفاده می نماید.همچنین این موتور ها برای استفاده از جریان هوای تهویه به عنوان جایگزین هوای احتراق وروردی مناسب هستند.این طرح اگر در نزدیکی معدن زغال انجام گیرد،نیازی به سرمایه گذاری سنگین برای استفاده از جریان هوای تهویه ، ندارد.باید متذکر شد که در این روش به علت بالا رفتن دمای احتراق تا حدود 1800 در جه سانتی گراد،امکان انتشاراکسید های نتیروژنی(No_x) وجود دارد.در معدن Appin Colliery در استرالیا،54 موتور احتراق داخلی باتوان هر کدام 1 مگاوات نصب شده است. برای سوخت این موتور ها از متان گاز های تخلیه(Gas drainage)به عنوان سوخت اصلی استفاده می شود.عملکرد این موتور ها اثبات میکند که متان هوای تخلیه شده تنها بین 4- 10٪ به عنوان سوخت موتور عمل میکند. در حال حاضر به خاطر مسائل عملکردی و نگهداری موتور ها از این گاز در موتور های احتراق داخلی استفاده نمی شود.

در جدول 11 تفاوت ها در کاربردهای فرعی(کمکی) نشان داده شده است.

جدول11-نگاه کلی به کاربرد های فرعی متان هوای تهویه از معدن

Technology	Feature	Comb. temp.	Technical feasibility and engineering applicability	Potential issues
Pulverised coal-fired power station	Pulverised coal-fired furnace	1400~ 1650°C [8]	Tech: yes Eng: not demonstrated	- Limited sites - Potential operational problems to existing boilers
Hybrid waste coal/tailings /methane in a rotating kiln	Rotating kiln	1200~ 1550°C	Tech: not sure Eng: not demonstrated	- Self-sustaining combustion - Minimum requirement for waste coal/tailings quality
Hybrid waste coal/tailings /methane in a fluidised bed	Fluidised bed	850~ 950°C [9]	Tech: yes Eng: not demonstrated	- Minimum requirement for waste coal/tailings quality - Proving test needed for CH_4 oxidation
Conventional gas turbines	Gas turbine	1400~ 1650°C [10]	Tech: maybe Eng: not demonstrated	- Small percentage of turbine fuel - A lot of CH_4 emitted via by-passing air if no other compressor. But if so, increasing system complexity, and decreasing capacity of using ventilation air
Internal combustion engines	Engine	1800~ 2000°C [11]	Tech: yes Eng: demonstrated	- Small percentage of engine fuel - Using a small percentage of ventilation air

*Tech – technical feasibility; Eng – engineering applicability

کاربرد های اصلی متان هوای تهویه معدن زغال سنگ:

کاربرد های اصلی از متان موجود در هوای تهویه در جدول10 نشـان داده شـده اسـت. در ایـن کاربردهـا، از متان به عنوان سـوخت اصـلی در بیشـتر کاربردهـا اسـتفاده مـی شـود.مکـانیزم اکثـر روش هـا بـر اسـاس اکسیداسیون متان در ترکیب با هوا در دمای بالا است.

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad \Delta H_{(298)} = -802.7 \text{ kJ/mol}$$

دربعضی از این این کاربردها می توان، توان تولید نمود و در بعضی فقط می توان تولید حرارت انجام داد.

کاربردهای اصلی به دسته بندی زیر تقسیم می گردد:

1- Thermal Flow Reversal Reactor(TFRR)(راکتور جریان گرمایی معکوس)

2- Catalytic Flow Reversal Reactor(CFRR)(راکتور جریان کاتالسیتی معکوس)

3- Catalytic Monolith Reactor(CSIRO)

4- Catalytic Lean-Burn Turbine

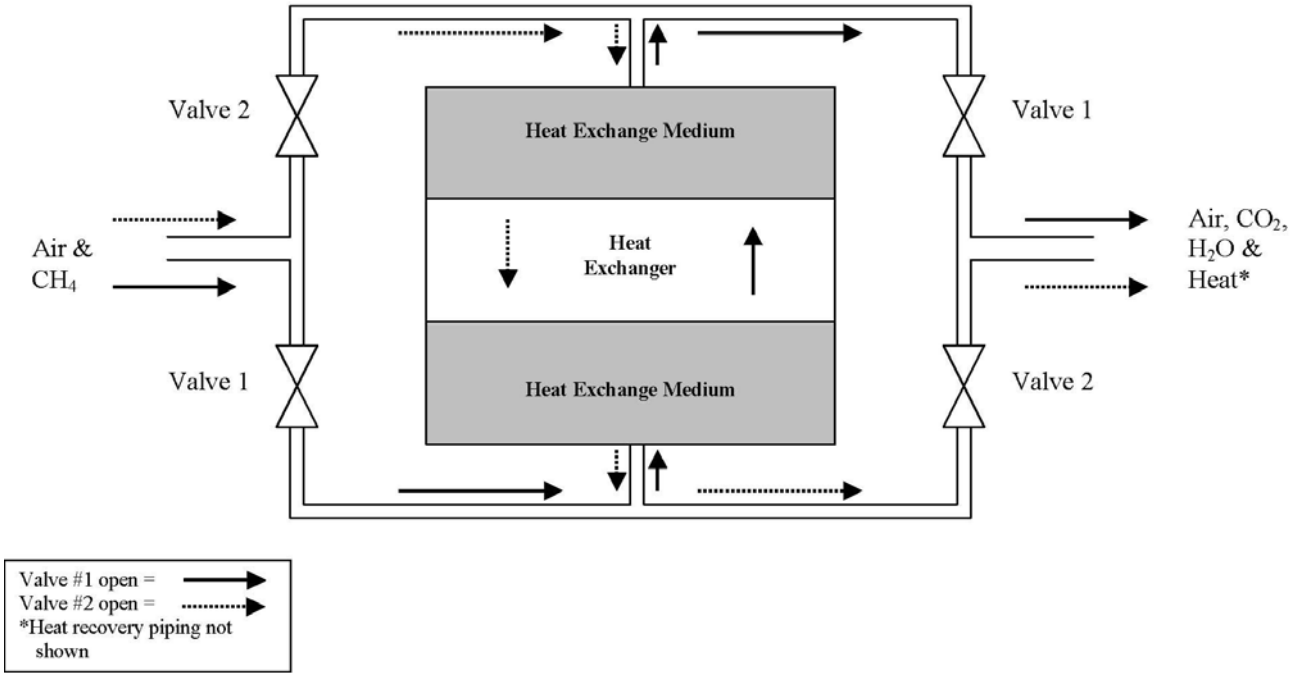
5- Recuperative Lean-Burn Gas Turbine

*1-*Thermal Flow Reversal Reactor(TFRR) (راکتور جریان گرمایی معکوس):

در این پروسه از اصول مبدل های گرمایی بین یک گاز(متان در هوای تهویه شـده)و یـک جامـد(بسـتر یـک واسطه جهت نگهداری و انتقال حرارت که معمولا از نوعی سرامیک است)اسـتفاده مـی شـود.در شـکل 21 ، هوای تهویه از سمت چپ وارد و از سمت راست مبدل را ترک میکند.یک سیکل از فرایند شامل دو جریـان معکوس است که هر کدام در نصف سیکل گردش دارند.با توجه به شکل 21 در ابتداء سیکل شیرهای شماره 1 باز و شیرهای شماره 2 بسته باشند،در نتیجه جریان از راکتور از پایین به بـالا عبـور میکنـد.بعـد از وقفـه زمانی که توسط سیستم و براساس پروفیل دمایی معین شده است شیر های 1بسته شده و شیر هـا ی2 بـاز می شود. تا جریان در بخش بالایی راکتور به جریان بیافتد.

برای شروع پروسه عملکردی ، المنت های حرارتی- الکتریکی سطح مبدل را تا دمایی حـدود 1000 در جـه سانتی گراد برای راه اندازی اولیه پروسه گرم می کنند.در طی نصف سیکل اول ،هوای تهویه در دمای محیط

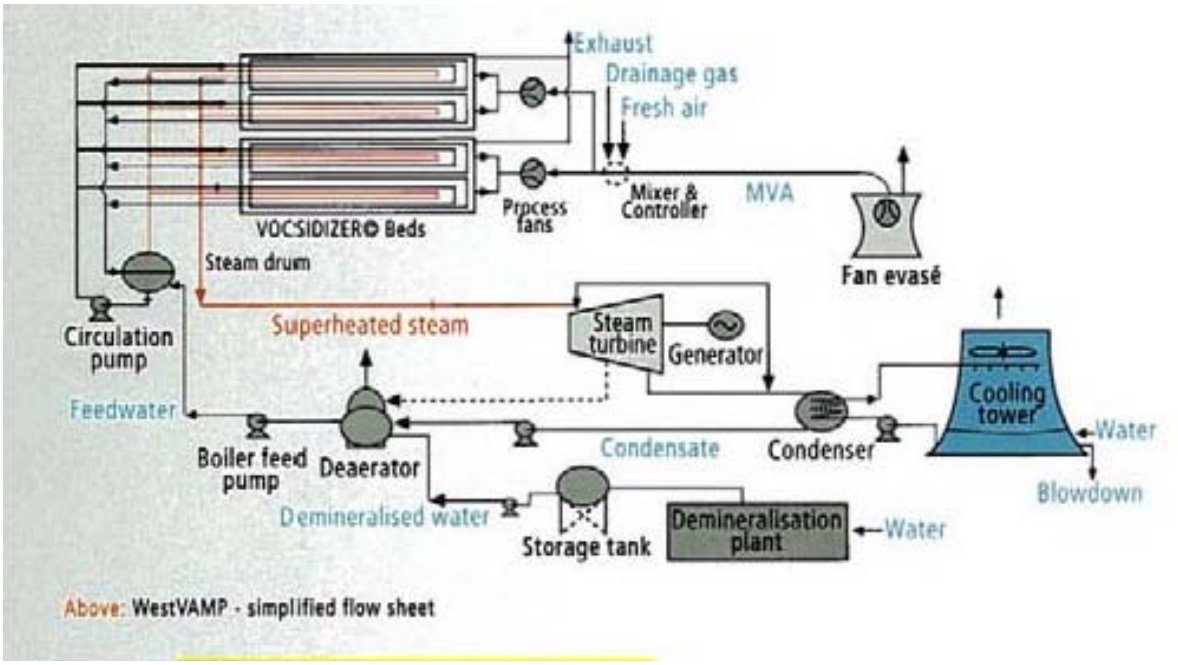
وارد راکتور میشودو در یک مسیر عبور می کند.اکسیداسیون متان در نزدیکی مرکز بستر وقتی که دمایی هوای تهویه در اثر پیش گرمایش به دمای احتراق متان برسد، اتفاق می افتد.اگر بتوان دمای بستر را به طور ثابت بالا نگاه داشت همه متان موجود در هوا می سوزد و ایجاد حررات میکند.



شکل21-نمایی از راکتور TFRR

اگر گاز تا دمای احتراق خودبخودی متان حرارت نبیند،واکنش های اکسیداسیون متوقف میشود، زیرا سطح گرم مبدل در اثر عبور جریان هوا سرد شده و پروسه از کار می افتد.در این نوع راکتور مقدار سطح مبدل حرراتی و پیش گرمایش مداوم جهت ادامه زنجیر وار اکسیداسیون کامل، بسیار مهم هستند.

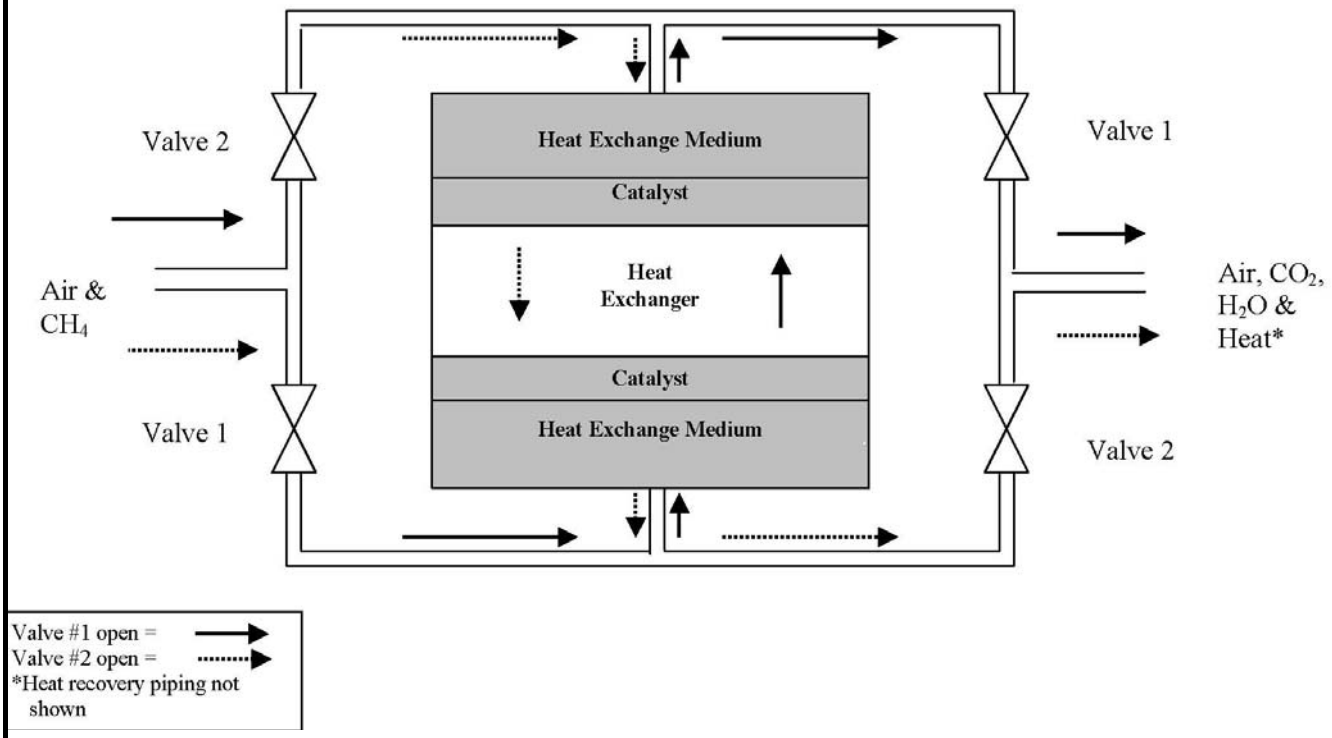
این تکنولوژی در منطقه Applin Colliery استرالیا در سال 2001-2002 نصب شده است[1].استفاده از این روش نشان داد که سیستم قادر است با استفاده از حرارت تولیدی در TFRRو سیستم های بازیافت حرارتی در طول 12 ماه سال اب گرم مصرفی را تهیه کند و یا برای گرمایش محیطی منطقه به کار رود.شکل 22 نمایی از کل سیستم بازیافت براساس راکتور TFRR را نشان میدهد.در این سیکل با استفاده از 2700مترمکعب بر ساعت هوای تهویه از معادن منطقه با غلظت 0.9٪ موفق به تولید 6 مگا وات توان الکتریکی میگردد.



شکل22- نمایی از سیستم نصب شده در Applin Colliery

2- Catalytic Flow Reversal Reactor(CFRR) (راکتور جریان کاتالسیتی معکوس) :

طرز عملکرد این راکتور هم مشابه راکتورTFRR می باشد.شکل 23 نمـایی از پروسـه درا یـن نـوع راکتـور نشان میدهد.در شکل مشاهده می کنیم که این راکتور از 3 قسمت تشکیل شده است.



شکل23- نمایی از راکتورCFRR

در عبور جریان هوا از بالا به پایین ،قسمت بالایی گرمایی لازم برای هوای تهویه ورودی را تامین میکند تا به دمای احتراق در حضور کاتالیزور برسد.گاز های احتراق بوجود امده به قسمت پایین جریـان میابنـد.و باعـث افزایش حرارت در طرف دیگر بستر مبدل میگرددند. کاتالیزور در جهت اکسیداسیون متان استفاده میشود.

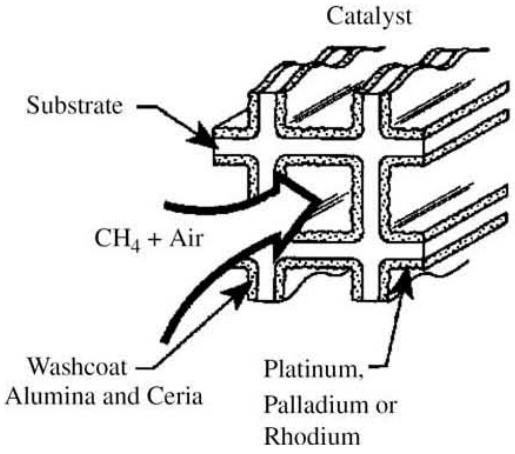
در این نوع از راکتور ها از Pd/Al_2O_3 یا از Pt/Al_2O_3 به عنـوان کاتـالیزور در جهـت اکسیداسـیون متـان استفاده می شود . راکتورها در 3 نوع مختلف وجود دارد.

1- Honeycomb Monolith 2-Packed Bed 3-Fluidized Bed

به طور مثال راکتور CFRR از نوع راکتور های بستر بسته(Packed Bed)می باشد.

3-Catalytic Monolith Reactor :

این نوع راکتور هم مانند راکتور CFRR عمل می کند با این تفاوت که شکل راکتور متفاوت است.در شـکل 2 می توان راکتور Honeycomb Monolith را مشاهده نمـود.ایـن راکتـور دارای مشخصـات بهتـری در جهت تولید توان و حرارت است به طور مثال از نظـر افـت فشـار در راکتـور در وضـعیت بهتـری نسـبت بـه Packed Bed قرار دارد. راکتـور Honeycomb Monolith دارای سـاختاری بـه صـورت کانـال هـای موازی با دیواره ای متخلل که کاتالیزور ها در بر میگیرد، است.ساختار این راکتور به طور معمول از سـرامیک ودر بعضی مدل ها از فلز ساخته میشود. مواد کاتالیزور که معمولا از فلزات نجیـب نظیـز پـالادیم و پلاتنـیم تشکیل شده است و در درون دیوارها قرار گرفته است.



شکل24-نمایی از راکتور Monolith

درجدول 12 میتوانید مقایسه ای بین این نوع راکتور را می بینیم.این جدول نشان میدهد که افت فشار زیادی در راکتور Packed bed نسبت به Honeycomb monolith وجود دارد. که این پارامتر خود بر ابعاد راکتور برای سایزهای مختلف تاثیر بسزائی دارد.

جدول12-مقایسه ای بین انواع راکتور های کاتالیستی

Feature	Honeycomb monolith	Fluidised bed	Packed bed
Pressure drop	Low	Somewhat higher than for a monolith	Inherently high
	Pressure drops in the bed are higher for packed bed than monolithic bed when both are assembled in reverse flow reactors		
	1494.4 Pa[a]	1494.4–2490.7 Pa[a]	
	753.15 Pa[a]		33,150.0 Pa[a]
	The pressure drop of the monoliths is one to two orders of magnitude lower than in packed beds		
Geometrical surface area	32.3 cm^{-1}		11 cm^{-1} using cylindrical pellets of 1/8 in. × 1/8 in.
Mechanical strength	Monoliths are used because of low pressure drop and high mechanical strength required for the harsh conditions encountered in environmental applications		
Resistance to dusting	Monoliths can be used in harsh conditions when dust is present in high concentrations		

حداقل غلظت متان در هوای تهویه جهت کارکرد سیستم های TFRR,CFRR,CMR:

همانطور که ذکر شد حجم متان در هوای تهویه معادن زغال سنگ بسیار بالاست اما غلظت و تغییرات مربوط به آن هم زیاد است.

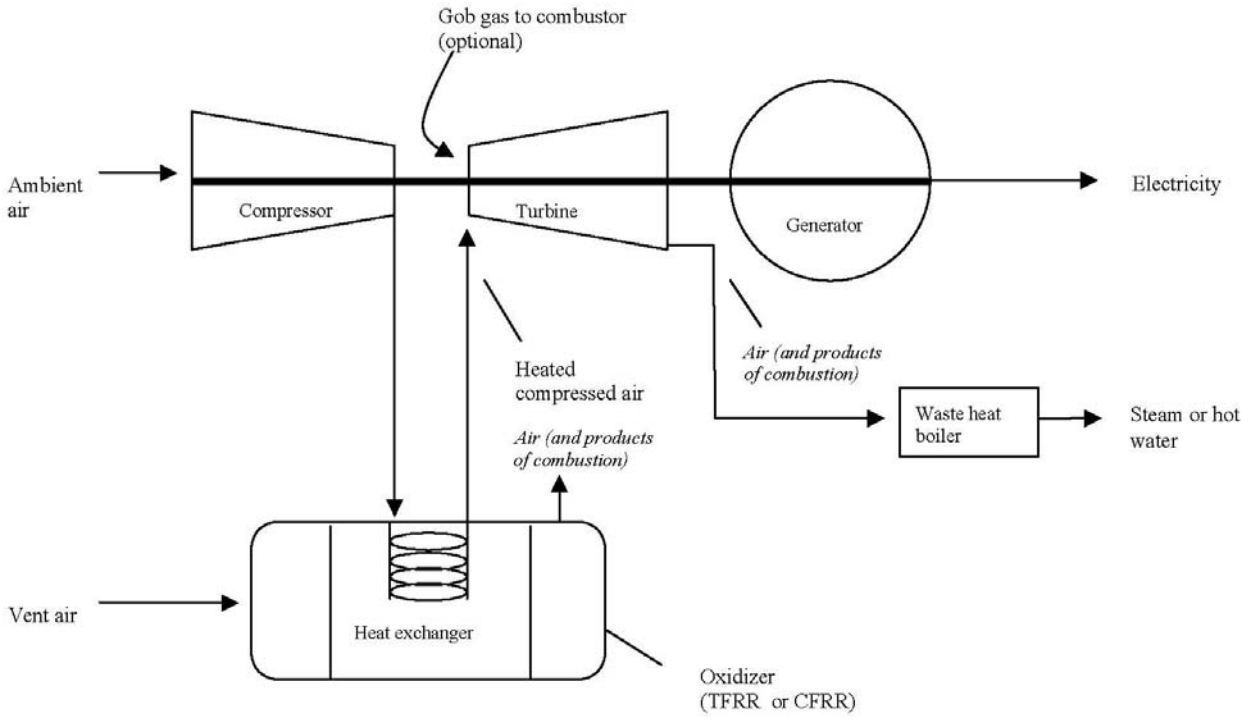
این تغییرات در غلظت متان میتواند در عملکرد پایدار راکتور ها تاثیر گذار باشد. برای مثال از آزمایشاتی که بر روی راکتور TFRR انجام شده است .نشان میدهد که این سیستم میتواند تا غلظت 0.2٪ متان در هوای تهویه دارای عملکرد قابل قبولی باشد. در مورد راکتورهای CFRR غلظت متان حداقل باید 0.1٪ باشد. و در مورد راکتور CMR(Catalytic Monolith Reactor) این مقدار ،حدود 0.4٪ متان است .

جدول 13 مشخصات عملکردی و تفاوت های راکتور ها را نشان می دهد.

شکل25 میتوان یک سیکل CHP(تولید همزمان)را مشاهده کرد که با استفاده از راکتورهای ذکرشده بوجود امده است.

جدول 13-مقایسه ای بین تکنولوژی های استفاده از متان هوای تهویه:

Feature	MEGTEC TFRR	CANMET CFRR	CSIRO CMR
Principles of operation	Flow reversal	Same as TFRR	Monolith reactor
Catalyst	No	Yes	Yes
Auto-ignition temperature	1000°C	350~800°C	500°C
Experience	600+ units in field, some operating on methane	Bench-scale trials with simulated mine exhaust	Bench-scale study on combustion
Cycle period length	Shorter	Longer	Continuously
Minimum CH_4 concentration	0.2%	0.1%	0.4%
Applicability	CH_4 mitigation	CH_4 mitigation	CH_4 mitigation
Possibility of recovering heat to generate power	Need additional fuel to increase CH_4 concentration and maintain it constant	Need additional fuel to increase CH_4 concentration and maintain it constant	Need additional fuel to increase CH_4 concentration and maintain it constant
Variability of CH_4 concentration	Variable	Variable	Variable
Plant size	Huge	Larger	Compact
Operation	More complicated	More complicated	Simple
Lifetime	N/A	N/A	>8,000 hours for catalysts,
NO_x emission	Higher	Low	Low (<1ppm)
CO emission	Low	Low	Low (~0ppm)



شکل25-نمایی از یک سیستم تولید همزمان توان-حرارت

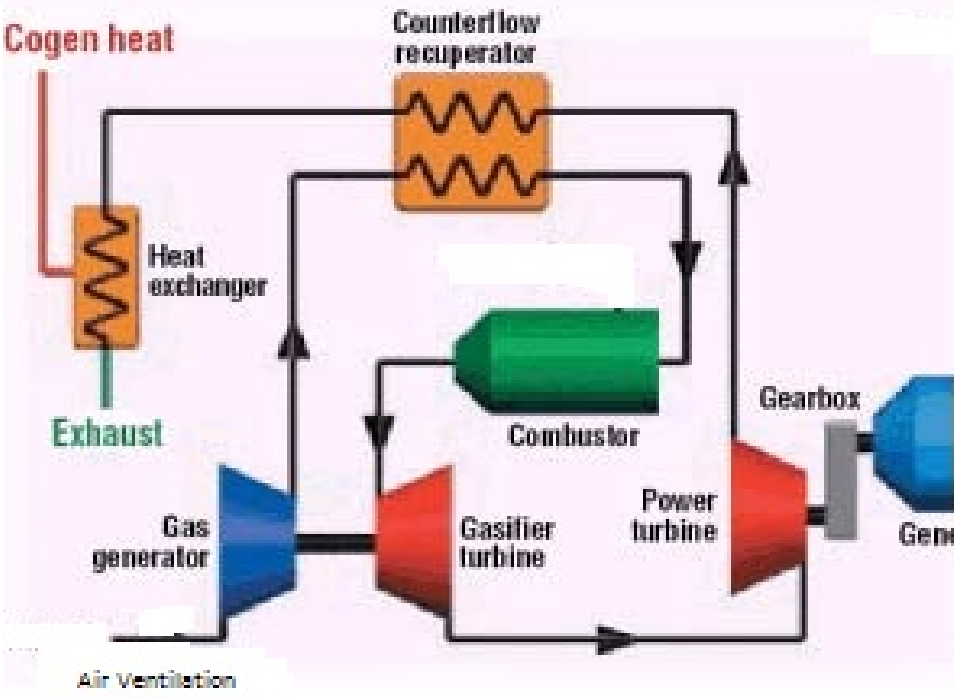
برای معدن زغال سنگی که نیاز کمی به برق دارند و نیازمند برق اضافی نمی باشند یـا دارای تـوان مصـرفی متغییر هستند.بدین جهت این معادن علاقمند در جهت سرمایه گذاری در تکنولوژی هستند که گاز متان در هوای تهویه را بدون تولید توان از بین ببرد.در ایـن حالـت اسـتفاده از روش هـایCFRR,TFRRوCMR بهترین گزینه می باشد.زیرا با استفاده از حرارت بازیابی از این راکتور ها می توان جهت تولید بخار ،آب گـرم مصرفی و یا ایجاد گرمایش محیطی استفاده نمود.

4- Lean-Burn Gas Turbine :

چندین نوع توربین گازی باسوخت گاز رقیـق در دنیـا وجـود دارد. ایـن دسـته بنـدی شـامل : EDL 's Recuperative Gas Turbine, (CSRIO) Lean Burn Catalytic turbine و Ingersoll-Rand(IR) 's Micro Turbine با محفظه کاتالیستی

جدول 14 مقایسه بین خصوصیات این توربین ها را نشان می دهد.

تکنولوژی توربین های گـازی بـا رکوپراتـور: ایـن نـوع تـوربین هـا مطـابق شـکل26 دارای یـک رکوپراتـور هسـتند.ایـن نـوع تـوربین از گـاز هـای احتـراق جهـت پـیش گرمـایش هـوای تهویـه متـان دار بـرای رساندن دمای آن، پیش از ورود به محفظه احتراق به دمای خود اشتعالی متان استفاده میکند.



شکل26-نمایی از توربین های Recuperative

در رکوپراتور های این نوع توربین هوای تهویه تا حدود 700-1000 درجه سانتی گراد گرم می شود تا با رسیدن به دمای خود اشتعالی متان موجود در هوا در محفظه احتراق ، مشتعل و ایجاد حرارت و توان نماید. طبق گزارشات این نوع توربین ها با هوای تهویه ای که دارای غلظت بالای 1.6٪ باشد عمل کرده به شرطی که هوای ورودی به محفظه احتراق تا 700 درجه سانتی گراد پیش گرم شده باشد. برای عملکرد این نوع توربین ها نیاز به افزودن مقداری متان برای رساندن غلظت به 1.6٪ وجود دارد.

برای معادنی که هوای تهویه دارای مینیمم متان جهت راه اندازی در توربین های با رکوپراتور وجود ندارد، می توان از توربین های کاتالسیتی استفاده نمود .این توربین ها با غلظت متان 1٪ هم دارای عملکرد مناسبی می باشند. ازلحاظ ترمودینامیکی وتوربین های گازی کاتالیستی می توانند در غلظت متان کمتر از 0.8٪ عمل کنند.اما تولید توان در این غلظت بسیار مشکل است ودارای راندمان پایینی میباشد. در توربین های کاتالیستی نسبت بسیار رقیق سوخت وهوا در کمپرسور متراکم میشود،سپس درمحفظه کاتالیزوری می سوزانیم.در توربین های که با گاز رقیق عمل می کنند .دیگر از گاز های احتراق برای رقیق کردن ویا خنک کاری داخلی توربین استفاده نمی گردد.

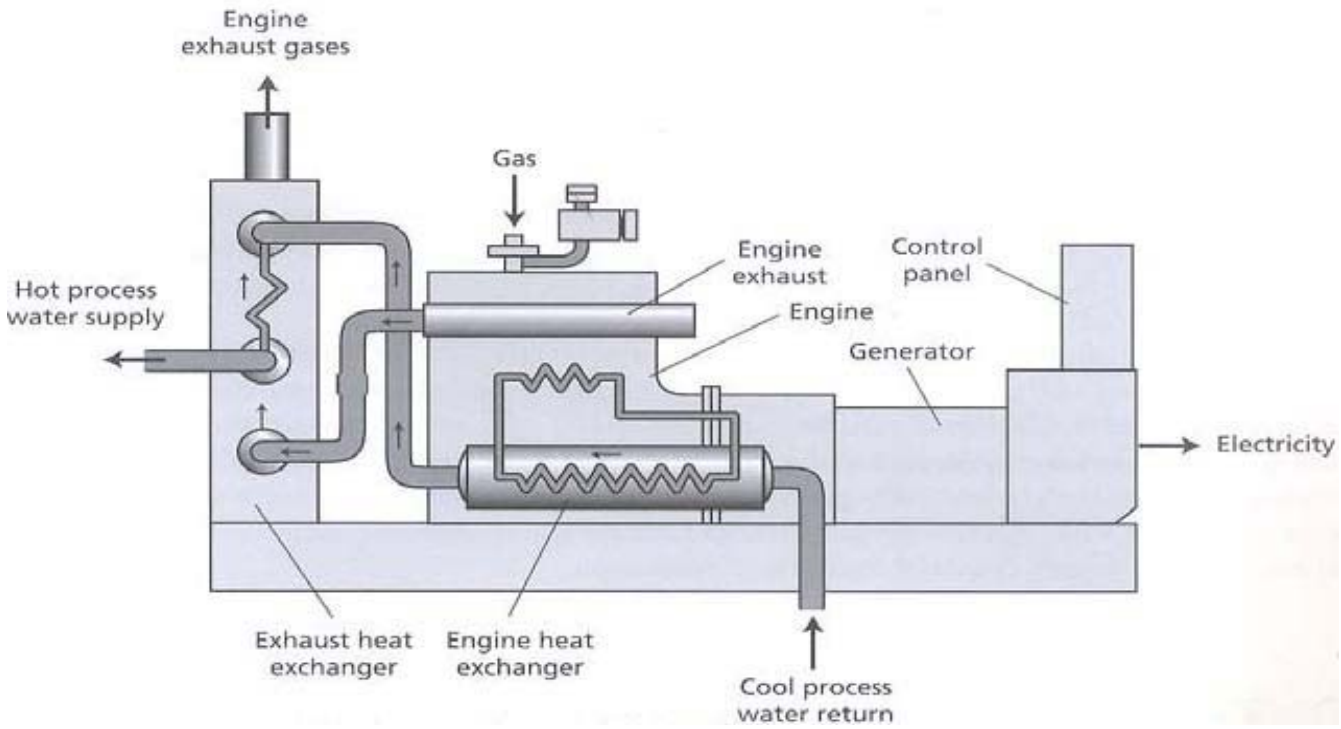
جدول 14 مقایسه بین خصوصیات ا نواع توربین ها

Feature	EDL Recuperative Turbine	CSIRO Catalytic Turbine	IR Catalytic Microturbine
Principles of operation	Air heater inside combustion chamber	Monolith reactor	Monolith reactor
Catalyst	No	Yes	Yes
Auto-ignition temperature	700~1000°C	500°C	N/A
Experience	Pilot-scale trial	Bench-scale study on combustion	Conventional microturbine development
Cycle period length	Continuously	Continuously	Continuously
Minimum CH_4 concentration for operation	1.6%	1%	1%
Applicability	CH_4 mitigation and power generation and need additional fuel to increase CH_4 concentration	CH_4 mitigation and power generation and need additional fuel to increase CH_4 concentration	CH_4 mitigation and power generation and need additional fuel to increase CH_4 concentration
Possibility of recovering heat	Feasible (power generation)	Feasible (power generation)	Feasible (power generation)
Variability of CH_4 concentration	Constant	Constant	Constant
Operation	Simple and stable	Simple and stable	Simple and stable
Lifetime	May be shorter due to the high temperature combustion heat exchanger	>8,000 hours for catalysts, and 20years for a turbine.	N/A
NO_x emission	Higher	Low (<3ppm)	Low
CO emission	Low	Low (~0ppm)	Low

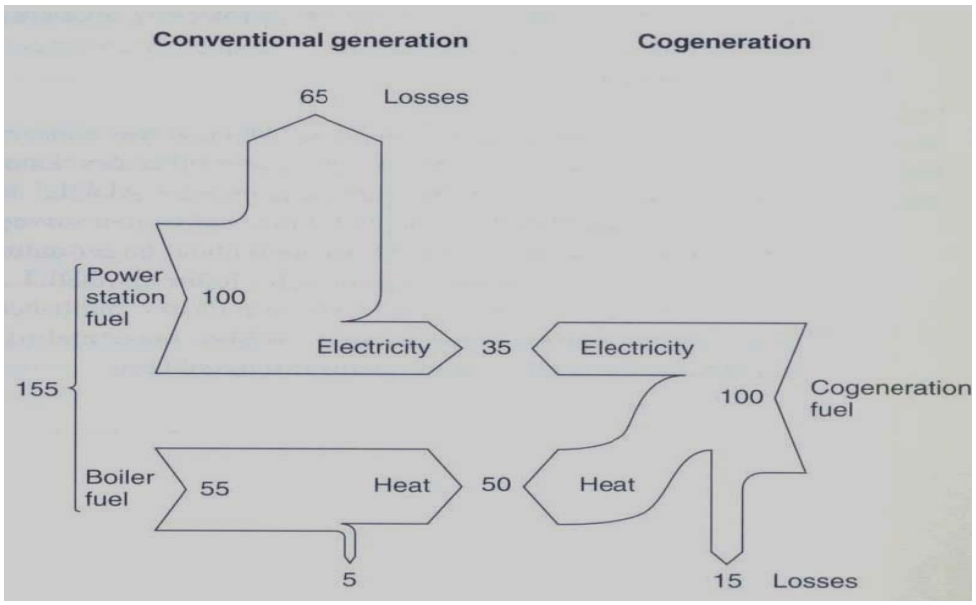
سیستم های ترکیبی تولید توان الکتریکی و گرمایش (CHP):

سیستم های CHP(Combined Heat &Power), غالبا برای تولید توان الکتریکی و حرارت همزمان طراحی و استفاده میشود.یک محرک اولیه(موتور یا توربین)انرژی شیمیایی سوخت را ازاد نموده و به توان الکتریکی ئر محور خروجی تبدیل می کند.در این موارد ,محور محرک با یک ژنراتور کوپل شده و توان الکتریکی تولید میشود. از طرف دیگر حداکثر راندمان موجود برای محرک اولیه دستگاه و مولد کمتر از 50٪ است.و این به معنی اتلاف بیش از از انرژی سوخت بصورت حرارت می باشد.

بیشترین اتلاف حرارت در گاز های خروجی از محرک اولیه است که با قرار دادن مبدل حرارتی گرمای اتلافی به شکل حرارت با دمای بالا بازیافت می شود.در شکل 26 نمایی از اجزاء اصلی یک سیستم CHP نشان داده شده است. در شکل 27 مقایسه ای بین دو سیستم معمولی و سیستم CHP نشان داده شده است.

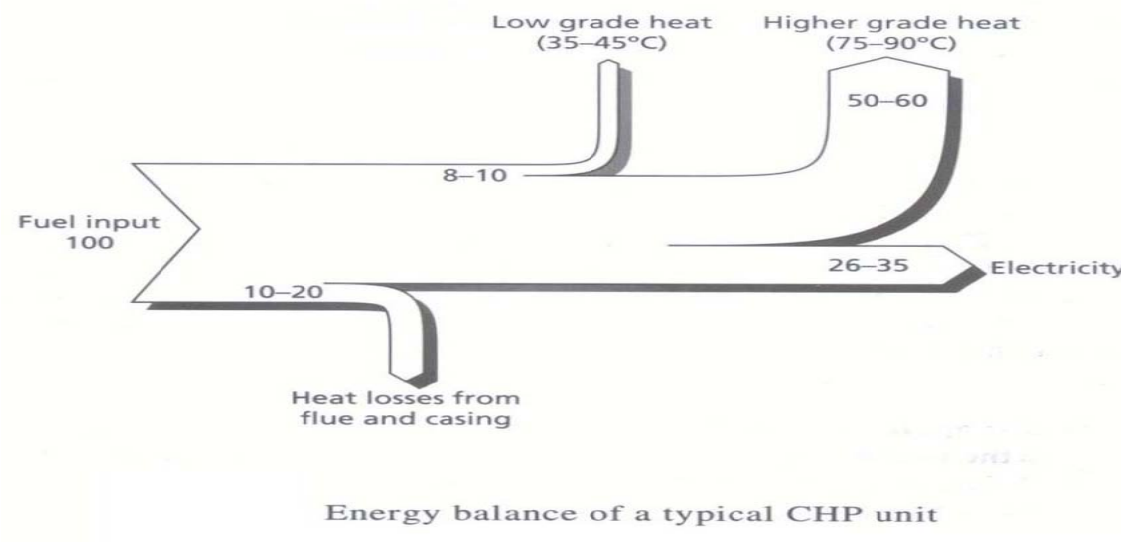


شکل(26):یک نمای کلی از یک سیستمCHP



شکل(27):مقایسهای بین دو سیستم معمولی و سیستم تولید همزمان

در شکل 28 بالانس انرژی در یک واحد مشترک برق و حرارت(CHP) را نشان می دهد.



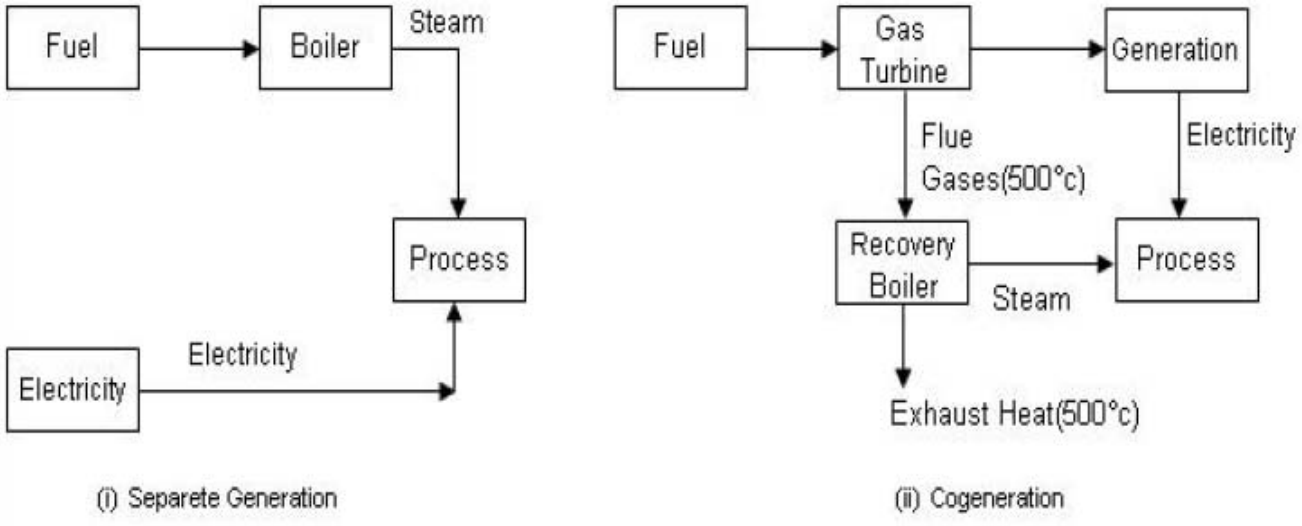
Energy balance of a typical CHP unit

.

شکل (28:بالانس انرژی در یک واحد مشترک برق و حرارت(CHP)

سیستم های CHP نسبت به یسیستم های رایج 35٪ سوخت کمتری مصرف می نماینـد.از طرفـی توسـط فیلترهای از آزاد شدن الاینده ایی مانند No_x, Co_2, Co جلوگیری می کند.

در زیر دیاگرام29و سیستم با تولید مشترک و با تولید مجزا نشان داده شده است.



شکل(29):مقایسه دو سیستم با تولید مشترکCHP و یکی با تولید مجزا

سیستم های CHP دارای 4 قسمت مهم هستند.

1-محرک های ا ولیه

2-تجهیزات الکتریکی

3-دستگاهای بازیابی حرارتی

4-مصرف کننده ای حرارتی

1-محرک های اولیه(Prime Movers):

محرک های اولیه شامل دستگاهایی است که انرزی سوخت را بـه قـدرت محـور چرخنـده تبـدیل کـرده تـا ژنراتورهای برقی را به حرکت در اورند.

محرک های اولیه که غالبـا در سیسـتم هـای تولیـد همزمـان اسـتفاده میشـوند. عبارتنـد از: تـوربین هـای بخار,توربین های گاز و موتور های رفت وبرگشتی.

Table II: Summary of CHP Technologies			
CHP system	Advantages	Disadvantages	Available sizes
Gas turbine	High reliability. Low emissions. High grade heat available. No cooling required.	Require high pressure gas or in-house gas compressor. Poor efficiency at low loading. Output falls as ambient temperature rises.	500 kW to 40 MW
Microturbine	Small number of moving parts. Compact size and light weight. Low emissions. No cooling required.	High costs. Relatively low mechanical efficiency. Limited to lower temperature cogeneration applications.	30 kW to 350 kW
Spark ignition (SI) reciprocating engine	High power efficiency with part-load operational flexibility. Fast start-up. Relatively low investment cost. Can be used in island mode and have good load following capability. Can be overhauled on site with normal operators. Operate on low-pressure gas.	High maintenance costs. Limited to lower temperature cogeneration applications. Relatively high air emissions. Must be cooled even if recovered heat is not used. High levels of low frequency noise.	< 5 MW
Diesel/compression ignition (CI) reciprocating engine			High speed (1,200 RPM) ≤4MW Low speed (60-275 RPM) ≤65MW
Steam turbine	High overall efficiency. Any type of fuel may be used. Ability to meet more than one site heat grade requirement. Long working life and high reliability. Power to heat ratio can be varied.	Slow start up. Low power to heat ratio.	50 kW to 250 MW
Fuel Cells	Low emissions and low noise. High efficiency over load range. Modular design.	High costs. Low durability and power density. Fuels requiring processing unless pure hydrogen is used.	200 kW to 250 kW

شکل(30):انواع سیستم های CHP

توربین های گازی(Gas Turbine):

توربین های گازی ثابت همانند توربین های بخار در بسیاری از نیروگاهها بـه عنـوان تجهیـزات عمـده طـرح میباشند.بسیاری از تجهیزات توربین گازی ثابت مشابه با توربین های گاز هواپیما می باشند.

در حقیقت هر دو این توربین ها در سیستم های تولید همزمان استفاده می گردد.

به علت مقادیر زیاد هوای مصرفی(جرم هوای کل در مقایسه با جرم سوخت در حدود 100 برابر میباشـد.)در فرایند احتراق توربین گاز گاز اگزوز خروجی دارای غلظت بالایی نیتروژن و اکسیژن میباشد.

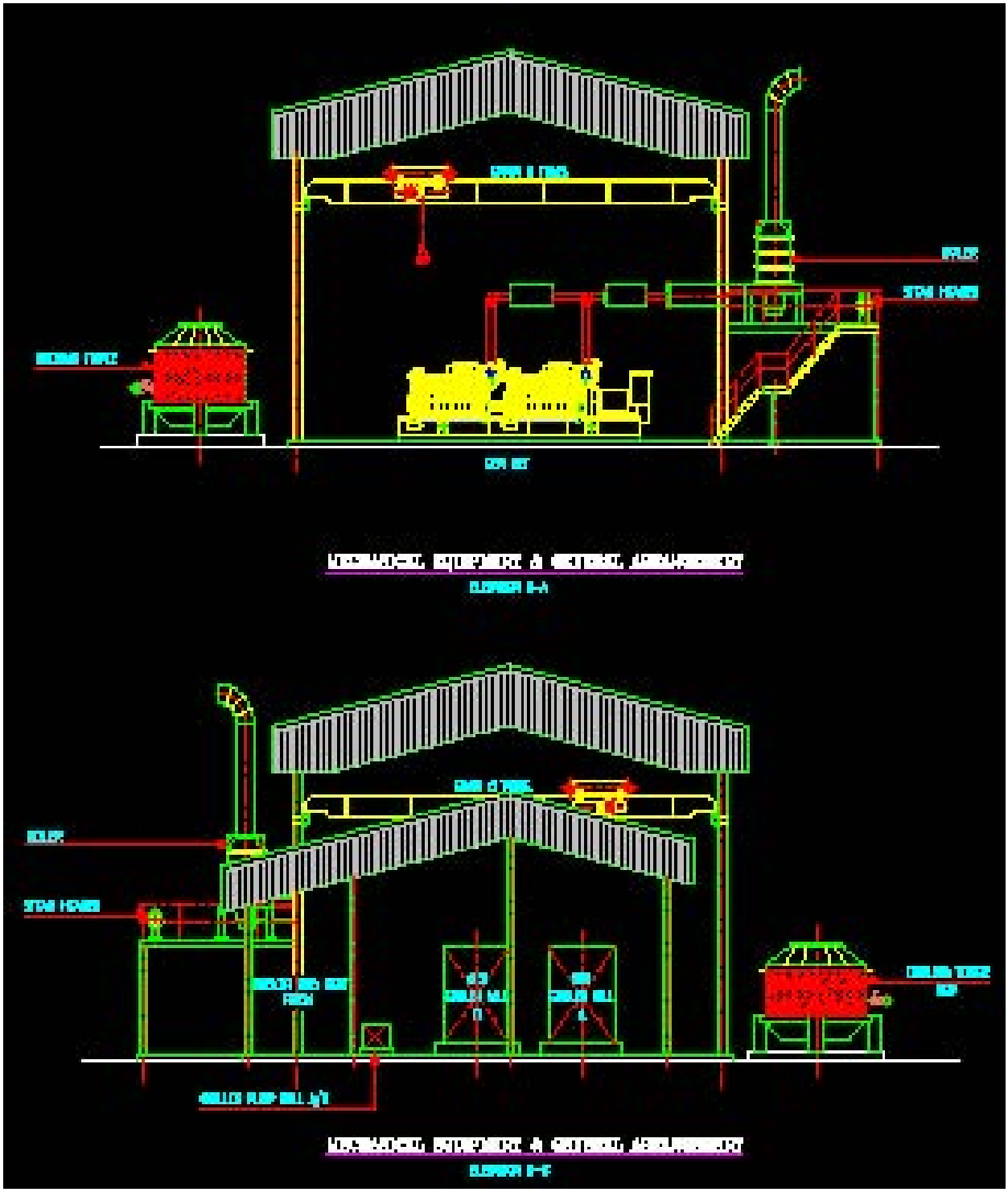
توربین گازی فاقد سیکل خنک کن میباشد وتنها منبع حرارتی گاز های خروجی از توربین است کـه دمـایی در حدود 500 درجه سانتیگراد را دارد. این منبع امکان تولید بخـار در واحـد Heat Recovery Steam Generator(HRSG) را فراهم می اورد. که یک بویلر ساده و بدون آتش است. بـدین شـکل 60٪ انـرژی سوخت به شکل حرارت بازیافت شده و راندمان کلی 80-90٪ برای سیستم CHP قابی دستیابی است.

در سیستم بازیافت مورد نظر ما که در معادن زغال سنگ به کـاربرده مـی شـود. از موتـور هـای گـاز جهـت سوزاندن و تولید توان از متان گاز های تخلیه و از توربین های گاز جهت مصرف گاز متان هوای تهویه معدن استفاده میشود.

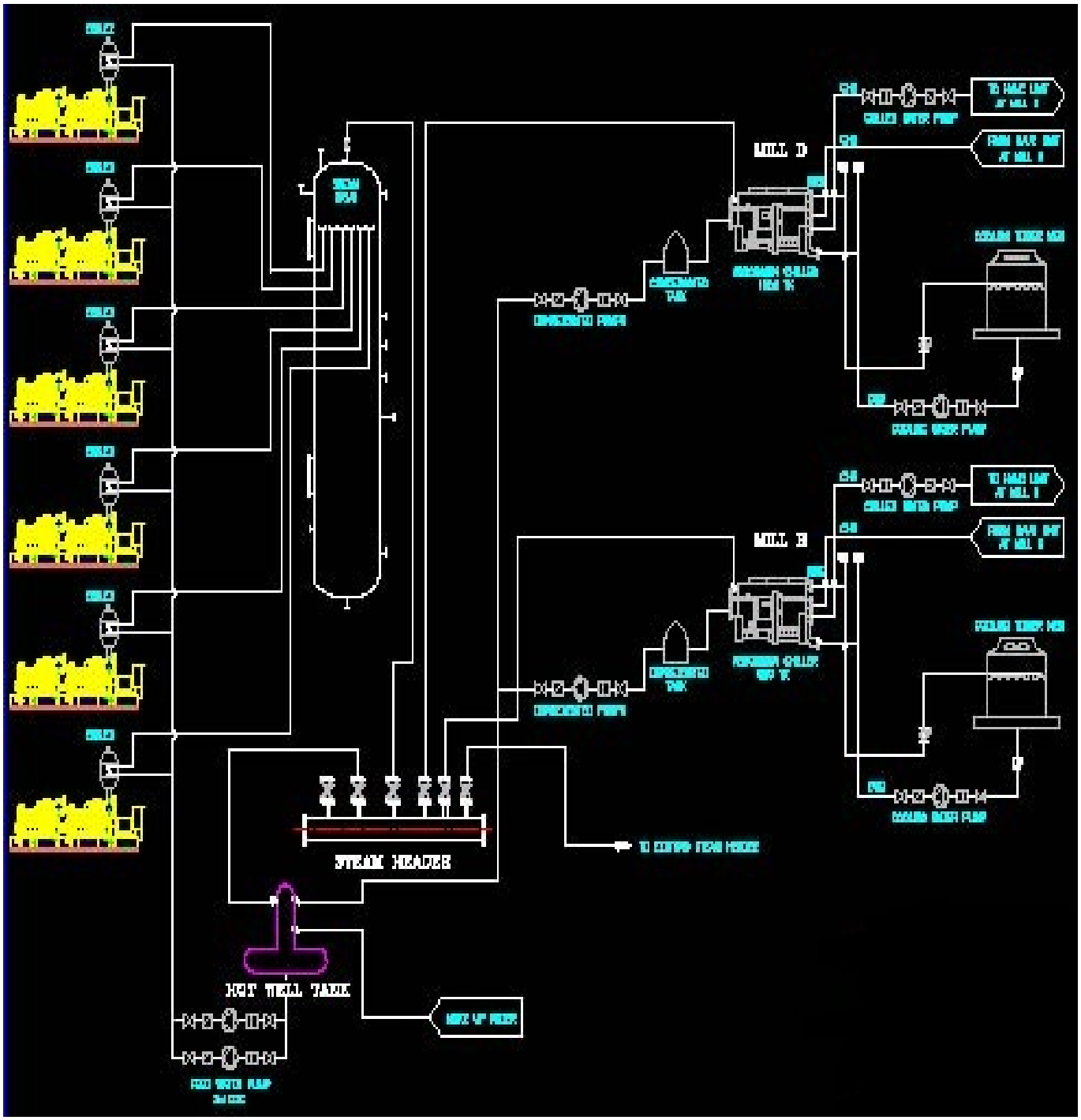
از گاز خروجی از هر دو این سیستم ها میتوان در جهت تولید حرارت جهت گرمایش و حتی تولید سرمایش با استفاده از بخار تولیدی در چیلر های جذای دست یافت.

در شکل 31نمایی از یک موتور گاز ی به همراه بویلر و چیلر های جذبی را میتوان مشاهده نمود.لازم به ذکر است که موتور گازی استفاده شده تولیدی شرکت کارترپیلار میباشد.

در شکل 32 نمایی از داگرام جریان از موتور های گازی تا چیلر های جذبی را مشاهده نمود.



شکل31- نمایی از قرارگیری سیستم CCHP با استفاده از موتور های گازی

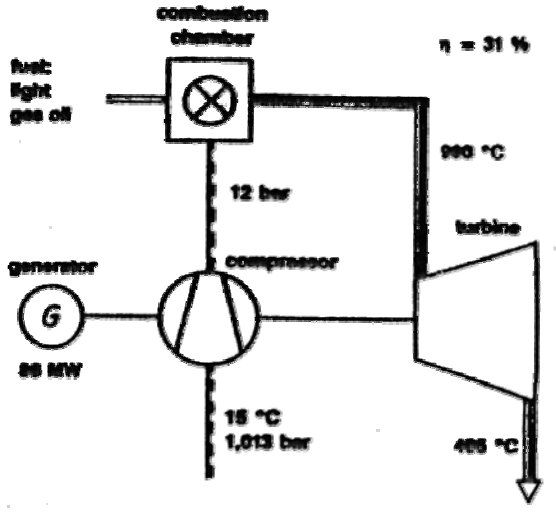


شکل32- نمایی دیاگرام سیستم CCHP با استفاده از موتور های گازی

بویلر های بازیاب حرارتی(Heat Recovery Steam Generator) :

یکی از تجهیزات مهم در بحث بازیافت حرارتی ، بویلر های بازیاب حرراتی میباشد.این نوع بویلر ها در نیروگاه های گازی معولا به کار میروند.زیرا در سیکل توربین گاز هوای متراکم شده توسط کمپرسور در محفظه احتراق به همراه سوخت مایع یا گاز مشتعل می‌گردد که دمای گاز حاصله حدود 1200 درجه سانتیگراد می‌رسد. گازهای حاصل از احتراق با دمای بالا وارد توربین گازی شده و تا فشار محیط منبسط می‌شوند و انرژی خود را از دست می‌دهند (انجام کار با انبساط گاز).

گازهای دفع شده به اتمسفر دمایی در حدود 600 درجه سانتی‌گراد دارند که باعث تلفات بیش از حد انرژی حرارتی می‌شود. حدود دو سوم انرژی تولیدی توسط توربین گاز صرف به حرکت درآوردن محور کمپرسور شده و یک سوم باقیمانده به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.برای استفاده از حجم زیاد گاز های داغ که دارای پتانسیل بالایی هم میباشند از بویلرهای بازیاب حرراتی استفاده می نماییم.



شکل33 : سیکل ساده توربین گاز

مهم ترین دسته‌بندی بویلرهای بازیاب بر مبنای وجود یا عدم وجود مشعل در آنها می‌باشد که هر دو مورد براساس سطوح مختلف فشار در توربین بخار نیز تقسیم می‌شوند. سیکل‌های ترکیبی تک فشاره، دو فشاره و سه فشاره از انواع موجود می‌باشند.

معمولاً بویلرهایی بدون مشعل با تولید دو سطح بخار کاربرد بیشتری داشته و متداولتر هستند. در ایـن نـوع، دو سطح فشار ضعیف و فشار قوی مطرح می‌باشد که تعیین مقدار بهینه فشارها اهمیت بسیاری دارد.

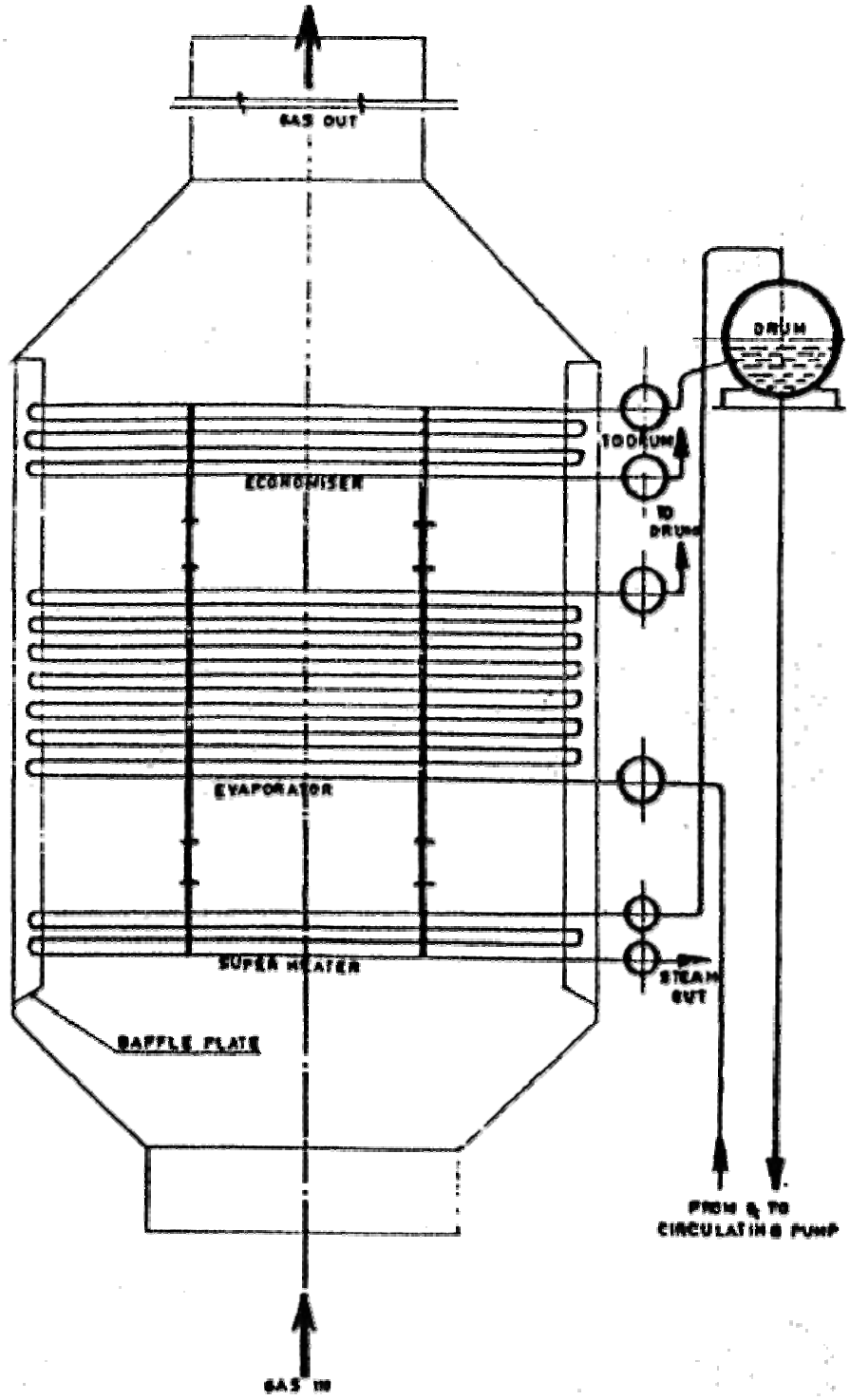
طبقه‌بندی از دیدگاه شکل ظاهری بویلر:

بویلرها از نظر طرز قرارگیری المانهای حرارتی و جهت عبور دود از آنها به دو دسته زیر تقسیم می‌گردند.

- بویلرهای عمودی

در این بویلرهـا مطـابق شـکل34 دود از پـایین وارد مبـدل حرارتـی شـده و لولـه‌هـای هـر المـان حرارتـی (اکونومایزر، اواپراتور، سوپرهیترها) به صورت افقی قرار دارند. در اوپراتور اختلاف فشار حاصل در اثر اخـتلاف دانسیته بخار و آب برای گردش طبیعی کافی نمی‌باشد و از یک پمپ برای به گردش درآوردن آب و بخار در داخل بویلر استفاده می‌شود.

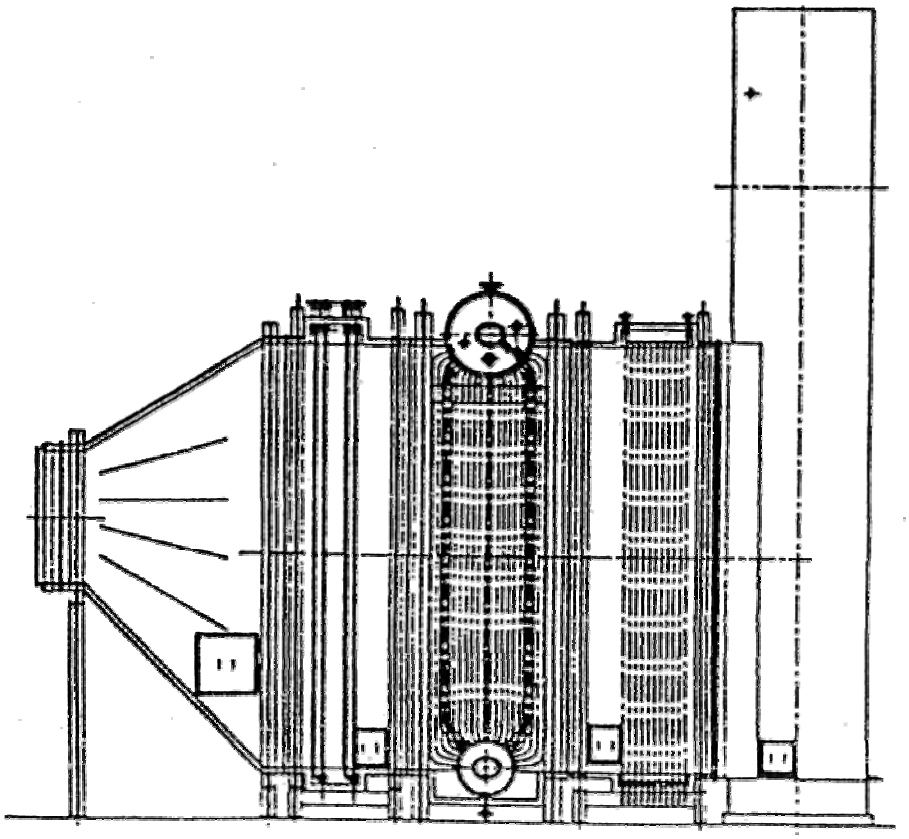
مزیت این بویلر توانایی راه‌اندازی سریعتر و سطح زیربنای کوچکتر می‌باشد.



شکل34 : شمای داخل یک بویلر بازیاب عمودی

بویلرهای افقی:

در این بویلرها جهت حرکت دود به صورت افقی است همانطور که در شکل 35 نشان داده شده است. لوله‌های هر المان حرارتی به صورت عمودی بوده و هدرهای لوله‌ها در بالا و پایین می‌باشند. اختلاف دانسیته بین آب و بخار در اواپراتور باعث ایجاد گردش طبیعی در سیستم می‌گردد. نسبت گردش با موازنه بین مقاومت اصطکاکی سیستم و اختلاف فشار ناشی از تغییر دانسیته سیال معین می‌گردد. این نسبت معمولا با توجه به شرایط سیستم بین 5 تا 50 می‌باشد. (برای بخار فشار ضعیف بین 50-20 و برای بخار فشار قوی بین 9-5)



شکل35: شمای داخل یک بویلر بازیاب افقی

- طبقه‌بندی از دیدگاه استفاده یا عدم استفاده از مشعل

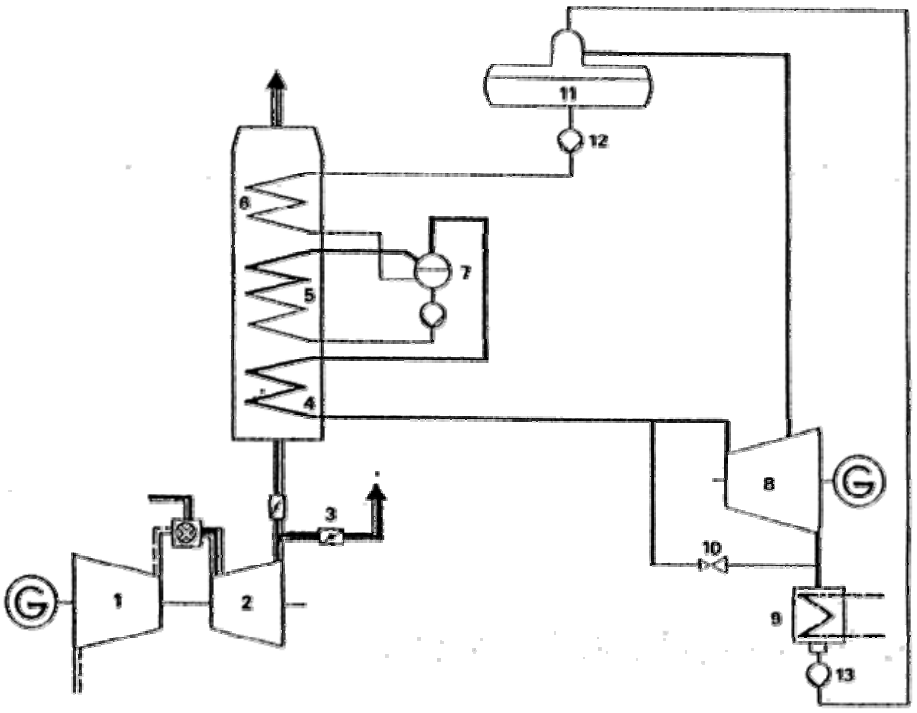
با توجه به نوع استفاده، بویلر بازیاب می‌تواند با مشعل (احتراق اضافی) یا بدون مشعل باشد. در هر دو حالت فوق گازهای خروجی از توربین گاز وارد بویلر خواهند شد.

- بویلرهای بازیاب بدون مشعل:

در نیروگاه بدون مشعل اضافی تمام سوخت در سیکل توربین گاز محترق می‌شود. در حقیقت بویلر بازیاب بدون مشعل ، یک مبادله کننده حرارتی بوده که در آن سیال گردشی سیکل توربین بخار توسط دود خروجی از توربین گاز بدون اضافه کردن انرژی گرمایی دیگری گرم می‌شود.

این نوع از بویلر بازیاب به دلیل سادگی، ارزانی و راندمان بالای سیکل ترکیبی حاصل، کاربرد وسیعی دارد. این بویلر باید جوابگوی راه‌اندازی سریع توربین گاز در فاصله زمانی کم بوده و به همین علت باید از قابلیت اعتماد و اطمینان و دسترسی بالایی برخوردار باشد. معمولاً در کانال ورودی دود خروجی از توربین گاز به داخل بویلر بازیاب یک مسیر کنار گذر دود نیز پیش‌بینی می‌گردد. در زمان راه‌اندازی واحد می‌توان به وسیله دمپرهای تعبیه شده در کانال میزان دبی دود در بویلر را به نحوی تنظیم کرد که افزایش درجه حرارت سیال گردشی سیکل بخار در بویلر روند مناسبی داشته باشد. این دمپرها که در مسیر اصلی و کنار گذر دود قرار دارند، در هنگام خارج شدن سیکل بخار از مدار، نقش حفاظت از بویلر را بر عهده دارند. در این حالت مسیر کنار گذر سریعا باز شده و مسیر ورودی دود به بویلر بسته می‌شود.

شکل 36 شمای یک بویلر بازیاب بدون مشعل در سیکل ترکیبی و دریچه کنار گذر آن را نشان می‌دهد.



Flow diagram of the single-pressure system

1	Compressor	6	Economizer	11	Feedwater tank/ deaerator
2	Gas turbine	7	Boiler drum	12	Feedwater pump
3	Bypass stack	8	Steam turbine	13	Condensate pump
4	Superheater	9	Condenser		
5	Evaporator	10	Steam bypass		

شکل 36 : سیکل ترکیبی تک فشار بدون مشعل

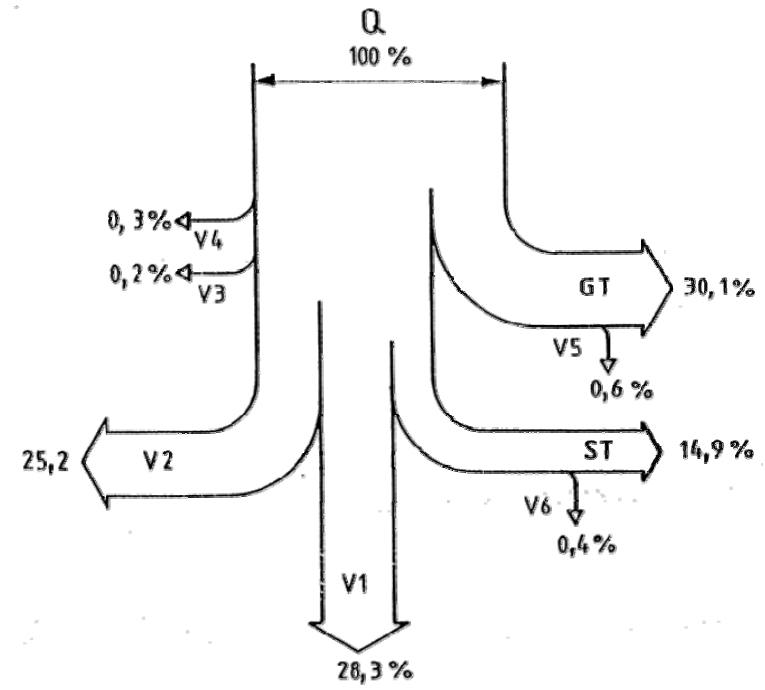
بویلرهای بازیاب بدون مشعل بر حسب سطوح فشار در توربین و یا استفاده‌های دیگر، به سه دسته تک فشاره، دو فشاره و سه فشاره تقسیم می‌شوند.

- سیستم تک فشاره

ساده‌ترین آرایش برای نیروگاه سیکل ترکیبی، سیستم تک فشاره بدون مشعل می‌باشد. این سیستم، شامل یک یا چند توربین گاز، یک بویلر بازیاب، یک توربین بخار کندانسه، یک کندانسور و یک هیتر آب تغذیه (دی‌اریتور) می‌باشد. بخار مورد نیاز دی اریتور از یکی از طبقات توربین بخار تامین می‌گردد.

مطابق شکل 36 بویلر بازیاب شامل 3 قسمت پیش گرمکن آب تغذیه (اکونومایزر)، اواپراتور و سوپرهیتر می‌باشد. اواپراتور می‌تواند گردش طبیعی یا اجباری باشد.

در سیکل ترکیبی تک فشاره مطابق نمودار شکل37، 45٪ انرژی حرارتی بـه انـرژی الکتریکـی (30/1٪ در توربین گاز و 14/9٪ در توربین بخار) تبدیل می‌شود. تلفات انرژی گرمایی باقیمانده در کندانسور 28/3٪ در دودکش 25/5٪ و در سایر قسمتها 1/5٪ می‌باشد.



Energy Flow Diagram for the Single-Pressure Combined-Cycle Plant

Q	Energy input
V1	Loss in condenser
V2	Loss in stack
V3	Loss due to radiation in waste heat boiler
V4	Loss in flue gas bypass
V5	Loss in generator and radiation, gas turbine
V6	Loss in generator and radiation, steam turbine
GT	Electricity produced in the gas turbine
ST	Electricity produced in the steam turbine

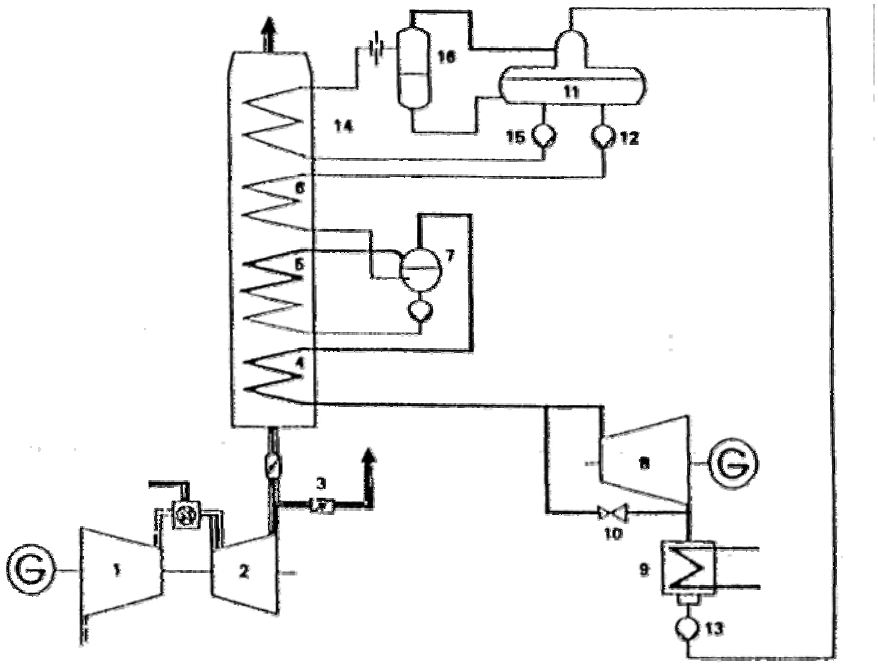
شکل 37: دیاگرام مصرف انرژی در سیکل ترکیبی تک فشاره

بویلرهای تک فشاره به دو نوع زیر تقسیم می‌شود:

الف) سیستم تک فشاره با حلقه پیش گرم کن در بویلر بازیاب.

عمده‌ترین اشکال سیستم‌های تک فشاره عدم استفاده کامل از انرژی دود خروجی از توربین گاز می‌باشد. راه حل ساده جبران این عیب، استفاده از یک مبدل حرارتی اضافی در انتهای بویلر برای گرفتن حـرارت اضـافی دود و استفاده از این انرژی برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه می‌باشد. این مبدل باید به گونه‌ای طراحی گـردد که دمای دود خروجی از بویلر زیر نقطه شبنم نرسد. بنابراین فرستادن مستقیم آب خروجی از کندانسور بـه

داخل بویلر غیر ممکن است. برای این منظور آب خروجی از کندانسور را به وسیله آب یا بخار در دی اریتـور پیش گرم می‌شود.



Simplified Flow Diagram of the Single-Pressure System with Flash System as a Preheating Loop

1	Compressor	9	Condenser
2	Gas turbine	10	Steam bypass (high pressure)
3	Flue gas bypass (optional)	11	Feedwater tank, deaerator
4	Superheater	12	Feed pump (high pressure)
5	Evaporator	13	Condensate pump
6	Economizer	14	Preheating loop (flash system)
7	Boiler drum (high pressure)	15	Booster pumps
8	Steam turbine	16	Flash tank

شکل38- دیاگرام ساده سیستم تک فشاره با سیستم آب پاششی به عنوان حلقه پیش گرم‌کن

شکل 38 مربوط به استفاده از سیستم آب پاششی می‌باشد. درصدی از آب دی‌اریتـور توسـط یـک پمـپ بـا فشار بالا به درون حلقه پیش گرم داخل بویلر فرستاده می‌شود. آب گرم شده در این المان وارد فلاش تانـک می‌شود. فلاش تانک با تغییر فشار آب گرم درصدی از آن را به بخار تبدیل کرده و به دی‌اریتور مـی‌فرسـتد؛ آب باقیمانده در فلاش تانک نیز مستقیماً به دی اریتور وارد می‌شود.

بررسی یک نمونه سیستم بازیافت از گاز های استحصالی در معدن زغال سنگ طبس:

معدن طبس یکی از بزرگترین معادن زغال سنگ ایران می باشد. تولید سالیانه این معدن در حدود 1 میلیون تن زغال در سال می باشد.با توجه به اطلاعات زیر قصد بررسی هزنیه و فایده در این معدن ، با استفاده از سیستم باز یافت از گاز های قابل اشتعال را ،داریم.

*مقدارمتان استحصالی (Drainage Methane Gas) به ازاء استخراج هر تن زغال سنگ در حدود 17.7 مترمعکب می باشد.

*مقدار متان بدست آمده از تهویه هوای معدن زغال سنگ (Air Ventilation Methane) برابر با 13000 متر معکب در روز است .

دیاگرام سیستم باز یافت را در شکل 38 نشان داده شده است.

این سیستم متشکل از یک دستگاه تصفیه (Scrubber)، سیستم ذخیره سازی متان بدست آمده(Storage)، توربین گازی برای تولید توان از متان هوای تهویه (Lean Gas Turbine) و موتورهای گازی برای تولید توان از گاز های تخلیه از معدن زغال سنگ(Gas Engine).

حل مسئله:

مفروضات:

مقدار ارزش حرارتی گاز متان (LHV): $36\ Mj/m^3$

دانسیته گاز متان(ρ): $0.8\ kg/m^3$

راندمان توربین گازی(Lean Gas Turbine): 30٪

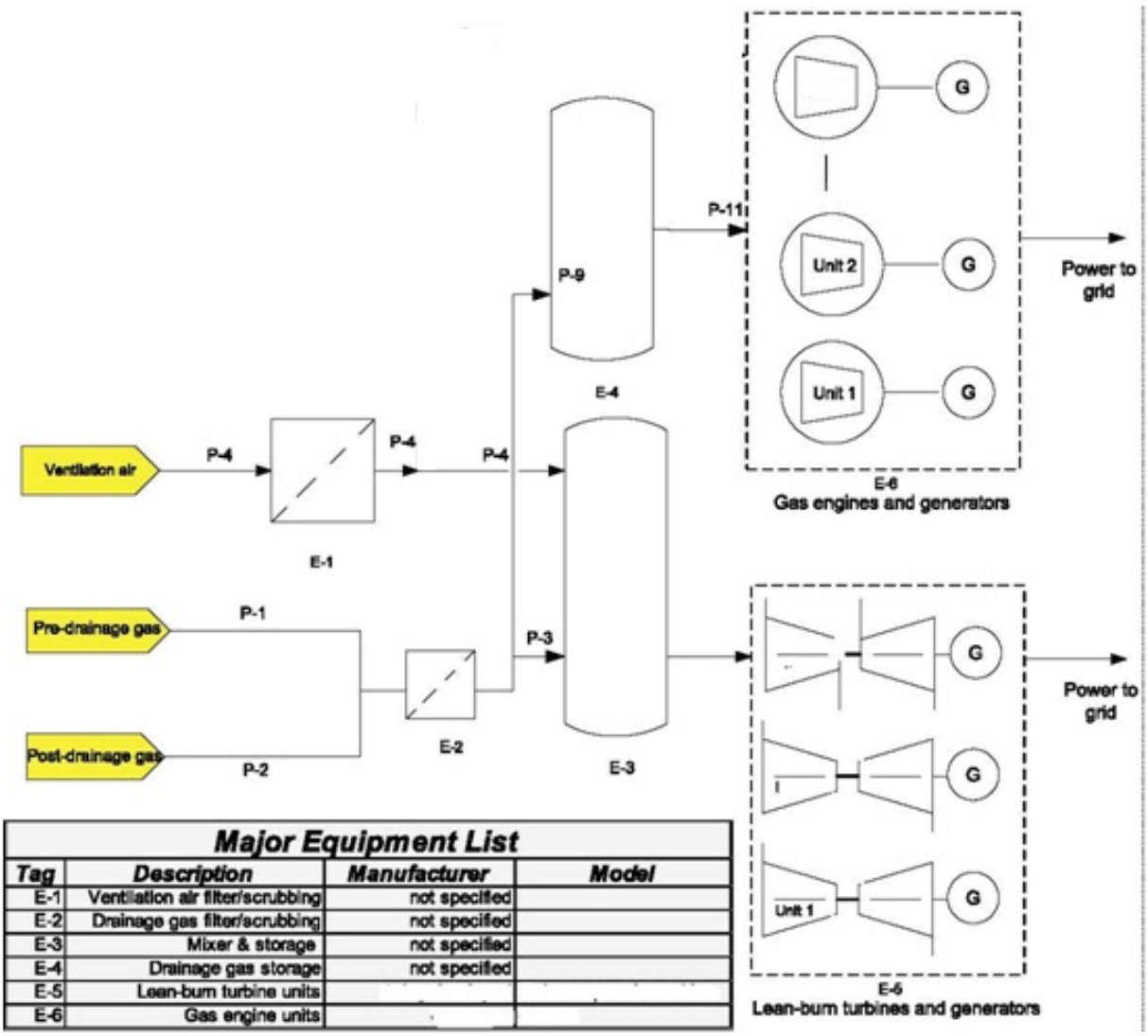
راندمان موتور گازی (Gas Engine): 35٪

تولید سالیانه زغال سنگ در معدن طبس: 1 میلیون تن در سال

مقدار کارکرد سالیانه: 7000 ساعت در سال

مقدار گاز استحصالی از تخلیه در معدن(Drainage Methane Gas): $17700000\ m^3/year$

مقدار گاز استحصالی از هوای تهویه در معدن(Air Ventilation Methane Gas): $13000\ m^3/day$



Major Equipment List			
Tag	Description	Manufacturer	Model
E-1	Ventilation air filter/scrubbing	not specified	
E-2	Drainage gas filter/scrubbing	not specified	
E-3	Mixer & storage	not specified	
E-4	Drainage gas storage	not specified	
E-5	Lean-burn turbine units		
E-6	Gas engine units		

شکل38- دیاگرام سیستم تولید توان از گاز های متان بدست آمده از معدن زغال سنگ

محاسبات:

از معادله 11،10 به محاسبه مقدار توان قابل استحصال از متان تخلیه بدست می آید.

$$Q^{\cdot} = m_{Methane} \times LHV \qquad (10)$$

Q = مقدار توان قابل استحصال از گاز متان (Mw)

m = مقدار دبی گاز متان (m^3/s)

LHV = مقدار ارزش حرارتی گاز متان (Mj/m^3)

$$Q^{\cdot} = 25.28\ Mw$$

$$w_{engine} = Q^{\cdot} \times {}_{gas\ engine} \qquad (11)$$

= راندمان موتور گازی (*Gas engine*)

مقدار توان بدست آمده از موتور گازی با مصرف گاز های تخلیه معدن زغال سنگ

از معادلات 12،13 مقدار توان بدست آمده از متان هوای تهویه را محاسبه می کنیم.

$$Q^{\cdot} = m_{Methane}^{\cdot} \times LHV \qquad (12)$$

Q = مقدار توان قابل استحصال از گاز متان (Mw)

m = مقدار دبی گاز متان (m^3/s)

LHV = مقدار ارزش حرارتی گاز متان (Mj/m^3)

$$Q^{\cdot} = 6.77\ Mw$$

$$w_{gas\ turbine} = Q^{\cdot} \times {}_{gas\ turbine} \qquad (13)$$

= راندمان توربین گازی (*Lean Gas Turbine*)

مجموع توان قابل استحصال از متان معدن زغال سنگ معادل **10.88 مگا وات** توان الکتریکی می باشد.

برای برآورد هزینه و فایده این طرح به چیدمان تجهیزات ، قیمت خرید، قیمت سوخت مصرفی و قیمت برق توجه می کنیم.با استفاده از جداول 14و15 که قیمت سرمایه گذاری در بخش از تولید توان شامل: توربین گازی،موتور گازی به ارائه تحلیل هزینه فایده می پردازیم.

مفروضات :

قیمت برق : 5 سنت به ءازاء هر کیلو وات ساعت

قیمت گاز متان: 4 سنت به ازاء هر متر معکب گاز

طول عمر طراحی تجهیزات: 15 سال

نرخ تنزیل: 12٪

قیمت سرمایه گذاری در قسمت استفاده از متان هوای تهویه با توربین گازی (Air Ventilation Methane) :

جدول14:قیمت سرمایه گذاری در بخش توربین گازی:

شرح تجهیزات	قیمت هر واحد تجهیز	تعداد هر تجهیز	قیمت کل هر تجهیز($)
توربین گاز رکوپراتوری متان2 مگا وات	855 $/kw	1	1710000
فن برای هوای تهویه	9000	1	9000
فیلتر هوای تهویه	70000	1	70000
فن برای گاز تخلیه	22000	1	22000
فیلتر برای گاز تخلیه	40000	1	40000
لوله کشی گاز تخلیه	200000	1	200000
مخزن ذخیره و mixer	100000	1	100000

قیمت سرمایه گذاری در قسمت استفاده از متان تخلیه شده با موتور گازی (Drainage Methane) :

جدول15:قیمت سرمایه گذاری در بخش موتور گازی:

شرح تجهیزات	قیمت هر واحد تجهیز	تعداد هر تجهیز	قیمت کل هر تجهیز($)
موتورگازی با توان3مگاوات(کاترپیلار)	3000000$	3	9000000
مخزن ذخیره و mixer	30000	1	30000
فن برای گاز تخلیه	48000	1	48000

با انجام محاسبات اقتصادی جدول 16را بدست می آوریم:

جدول 16:نتایج محاسبات اقتصادی:

IRR	**٪23**
NPV	**8/748/ 078 دلار**
دوره بازگشت سرمایه	**4 سال و یک ماه**

این نتایج نشان میدهد که با آزاد سازی قیمت حامل های انرژی به راحتی می توان این پروژه را اقتصادی دید.

نتیجه گیری وپیشنهادات:

با توجه به ذخایر بسیار زیاد زغال سنگ در ایران ، استفاده از این سیستم بازیافت مـی توانـد مـورد توجـه و تحقیقات بیشتر قرار گیرد .اگر سیاست های انرژی به سوی استفاده از ایـن مـاده بـا ارزش در سـبد انـرژی کشور سوق پیدا کند. همان طور که گفته شد این سیستم قابلیت تولید تـوان وحـرارت بـه طـور همزمـان را داراست و حتی می توان با استفاده از گاز های داغ خروجی از موتور گازی و توربین گازی بـه تولیـد بخـار و تولید توان به صورت سیکل ترکیبی دست یافت.

منابع :

1- H.Farzaneh, Process Engineer -2008

2- H,Farzaneh ,Management In Industrial-2009

3- Shi Su ,Andrew Beath .An Assessment Of Mine Methane Mitigation And Utilization Technologies.Australia.2004

4- Shi-Su, Jenny Angrew. Catalytic Combustion of Coal Mine Ventilation Air Methane.Australlia.2005

5- Su.S. Progress In Development Ventilation Air Methane Mitigation And utilization Technology-Australlia-2005

6- Kaaeid A.Lokhnadwalla ,New Membrane Application In Gas Processing ,USA

7- Dina Kruger. A Guide For Methane Mitigation. EPA . 1996

8- Ann G.Kim . The Composition of Coal Bed Gas .USA -1973

9-روش های استخراج زیرمینی(زغال سنگ)- تالیف: دکتر کاظم اورعی –سال1384

10- مقدمه ای بر سیستم های تولید مشترک برق وحرارت-تالیف مطب میری (سابا)- سال 1383

11- طراحی وبهینه سازی بویلر HRSG- گردآوری:محمد متقی(دانشگاه کاشان)- سال 1386