



منظمة الأقطار العربية المصدر للبتروك (أوبك)



تقنية تحويل الفحم إلى سوائل وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2018.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف 24959000 (+965) - فاكس 24959755 (+965)

P.O. Box 20501 Safat Kuwait 13066

Tel.: (+965) 24959000 – Fax.: (+965) 24959755

Website : www.oapecorg.org

Email: oapec@oapecorg.org

Email: oapec@oapec.fasttelco.com



منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)



تقنية تحويل الفحم إلى سوائل وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط





مقدمة

تقنية تحويل الفحم إلى سوائل وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط

أدى توجه مصافي النفط نحو تكرير النفوط الثقيلة والحامضية إلى ارتفاع معدل إنتاج المخلفات الثقيلة والمنتجات الثانوية. وللاستفادة من توفر الكميات الكبيرة من هذه المنتجات المنخفضة القيمة، لجأت بعض شركات الطاقة إلى استخدامها كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية، إلا أن صدور تشريعات حظر استخدام الوقود الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت أدى إلى تراجع الطلب على هذه المنتجات، وخصوصاً الفحم البترولي، مما أدى إلى انخفاض سعره حتى أصبحت بعض المصافي تخصص جزءاً من ميزانيتها لتغطية نفقات تخزينه وتصريفه، وأحياناً دفنه في حفر خاصة. ولتفادي هذه النفقات برزت تقنية تحويل الفحم إلى سوائل، أو ما يسمى علمياً بتقنية التغويز، كأحد الحلول الممكنة لتصريف المنتجات الثانوية والنفايات الخطرة الناتجة عن عمليات التكرير، وتحويلها إلى منتجات عالية القيمة.

تهدف الدراسة إلى إلقاء الضوء على مراحل تطور عملية تحويل الفحم إلى سوائل ومكوناتها الأساسية، وخصائصها، والدوافع التي أدت إلى تطويرها، وانعكاسات تطبيقها على مصافي تكرير النفط.

يتناول **الفصل الأول** مراحل تطور عملية تحويل الفحم إلى سوائل، والدوافع التي كانت وراء ازدهارها أو تراجعها. كما يتضمن شرحاً لأهم المبادئ الأساسية للتقنيات المستخدمة في تحويل الفحم إلى سوائل، مع الإشارة إلى مزايا وسلبيات كل تقنية من هذه التقنيات من حيث ظروف التشغيل، وتكاليف الإنشاء، والأداء التشغيلي، والمردود الاقتصادي.



ويتضمن **الفصل الثاني** فوائد تطبيق عملية تحويل الفحم إلى سوائل، وانعكاساتها على الأداء التشغيلي والاقتصادي لمصافي تكرير النفط، وذلك من خلال تحويل المنتجات الثانوية الرخيصة الثمن إلى منتجات عالية القيمة، وتحسين مرونة تكرير أنواع ثقيلة من النفط الخام، وتمكين المصافي من تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بخفض الانبعاثات.

أما **الفصل الثالث** فيتضمن عرضاً لبعض الأمثلة العملية لتطبيق عمليات تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي تكرير النفط في بعض مناطق العالم والدول الأعضاء في أوابك، مع الإشارة إلى أهم الفوائد التي أمكن الحصول عليها والتحديات التي واجهت مراحل الإنشاء والتشغيل، والحلول التي اتبعت لتذليلها.

وفي الختام استعرضت الدراسة بعض الاستنتاجات والتوصيات التي يمكن من خلالها تعزيز الاستفادة من تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي تكرير النفط. وجاء من أهمها ضرورة تكثيف التعاون بين كافة مراكز الأبحاث العلمية لمتابعة تطوير هذه التقنية، والعمل على تخفيض تكاليفها الاستثمارية والتشغيلية بما يساهم في تشجيع المصافي على تطبيقها والاستفادة من انعكاساتها الإيجابية على تحسين ربحية صناعة التكرير.

تأمل الأمانة العامة أن تساهم هذه الدراسة في تقديم ما يعزز جهود المختصين في الدول الأعضاء، لتطوير مصافي تكرير النفط، والارتقاء بأدائها التشغيلي والاقتصادي إلى أعلى المستويات المنشودة.

والله ولي التوفيق،،

الأمين العام

عباس علي النقي



قائمة المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
1	مقدمة
3	قائمة المحتويات
7	قائمة الأشكال
10	قائمة الجداول
11	ملخص تنفيذي
19	قائمة المصطلحات والمختصرات
21	الفصل الأول: عمليات تحويل الفحم إلى سوائل
23	مقدمة
23	1-1: التطور التاريخي لعمليات تحويل الفحم إلى سوائل
25	2-1: خصائص وأنواع الفحم
27	3-1: أنواع عمليات تحويل الفحم إلى سوائل
28	1-3-1: عملية التحلل الحراري
30	2-3-1: عملية التسييل المباشر
33	1-2-3-1: عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة
33	• عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I
35	• عملية الفحم المكرر بالمذيب الثانية SRC-II
36	• عملية التسييل المباشر EDS
40	1-2-3-2: عمليات التسييل المباشر بمرحلتين
43	• عملية التسييل المباشر بمرحلتين بالعامل الحفاز CTSL
45	• عملية الاستخلاص بالمذيب السائل
47	1-3-3: عملية التسييل غير المباشر
49	1-4-3: أنواع مفاعلات التغويز
51	• مفاعل السرير الثابت أو المتحرك
51	• مفاعل الجريان المحمول
53	• مفاعل التغويز بالسرير المميع
54	• عمليات التغويز بمفاعل السرير المميع
56	• عمليات التغويز بمفاعل السرير الثابت



رقم الصفحة	الموضوع
85	1-7-1: تلبية متطلبات التشريعات البيئية
86	2-7-1: تعزيز الاستفادة من الموارد المحلية للطاقة
89	3-7-1: مرونة استخدام لقائم متنوعة
89	4-7-1: مرونة تغيير أنواع المنتجات
90	5-7-1: فوائد غير مباشرة
90	8-1: تحديات صناعة تحويل الفحم إلى سوائل
90	1-8-1: تحديات تقنية
91	2-8-1: تحديات بيئية
92	3-8-1: تحديات اقتصادية
95	الفصل الثاني: انعكاسات تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل على مصافي النفط
97	مقدمة
97	1-2: مكونات مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط
98	2-2: لقائم مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط
99	1-2-2: الفحم البترولي
102	2-2-2: القار
104	3-2: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي في مصافي النفط
106	1-3-2: توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
108	2-3-2: إنتاج غاز طبيعي اصطناعي
109	3-3-2: إنتاج الهيدروجين
111	4-3-2: تحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل
112	1-4-3-2: إنتاج السوائل الهيدروكربونية بطريقة فيشر تروبش
116	2-4-3-2: تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين
119	3-4-3-2: تحويل الغاز الاصطناعي إلى أوليفينات
120	4-2: دوافع تطبيق تقنية تحويل الفحم في صناعة تكرير النفط
121	1-4-2: تحسين ربحية صناعة تكرير النفط
124	2-4-2: تعزيز مرونة تكرير النفوط الثقيلة
125	3-4-2: الحصول على منتجات عالية القيمة
127	4-4-2: توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
128	5-4-2: الحصول على الهيدروجين بتكلفة منخفضة
130	6-4-2: تحسين التزام المصفاة بمتطلبات التشريعات البيئية



رقم الصفحة	الموضوع
131	1-6-4-2: الانبعاثات الهوائية
133	2-6-4-2: النفايات الصلبة
134	3-6-4-2: المياه الملوثة
134	7-4-2: الاستفادة من فرص تكامل مجمع التغويز مع عمليات المصفاة
135	1-7-4-2: تكامل مجمع التغويز مع عمليات تحويل مخلفات التكرير الثقيلة
136	2-7-4-2: تكامل الوحدات المساندة
137	• تكامل وحدات تنقية الهيدروجين
138	• تكامل وحدات فصل الهواء
138	• تكامل وحدة معالجة المياه الحامضية
138	• تكامل المنتجات الثانوية لعملية فيشر- ترويش
139	5-2: تحديات تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي في مصافي النفط
139	1-5-2: صعوبة تغويز الفحم البترولي
140	2-5-2: تكاليف الإنشاء والتشغيل
141	الفصل الثالث: أمثلة لمشاريع تحويل الفحم إلى سوائل في العالم
143	مقدمة
144	1-3: مجمع تغويز مصفاة شل برنيس الهولندية
148	2-3: مجمع تغويز مصفاة الدورادو - ولاية كنساس
151	3-3: مشروع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل -كنساس الأمريكية
153	4-3: مشروع تغويز مصفاة موتيفا في ولاية ديلاور
154	5-3: مشروع تغويز كاليفورنيا
157	6-3: مشروع تغويز مصفاة جامناغار - الهند
161	7-3: مجمع تغويز مصفاة فوجيان
163	8-3: مجمع التغويز في مصفاة جازان -المملكة العربية السعودية
164	الخلاصة والاستنتاجات
166	قائمة المراجع
175	Abstract



رقم الصفحة	الموضوع
131	1-6-4-2: الانبعاثات الهوائية
133	2-6-4-2: النفايات الصلبة
134	3-6-4-2: المياه الملوثة
134	7-4-2: الاستفادة من فرص تكامل مجمع التغويز مع عمليات المصفاة
135	1-7-4-2: تكامل مجمع التغويز مع عمليات تحويل مخلفات التكرير الثقيلة
136	2-7-4-2: تكامل الوحدات المساندة
137	• تكامل وحدات تنقية الهيدروجين
138	• تكامل وحدات فصل الهواء
138	• تكامل وحدة معالجة المياه الحامضية
138	• تكامل المنتجات الثانوية لعملية فيشر- ترويش
139	5-2: تحديات تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي في مصافي النفط
139	1-5-2: صعوبة تغويز الفحم البترولي
140	2-5-2: تكاليف الإنشاء والتشغيل
141	الفصل الثالث: أمثلة لمشاريع تحويل الفحم إلى سوائل في العالم
143	مقدمة
144	1-3: مجمع تغويز مصفاة شل برنيس الهولندية
148	2-3: مجمع تغويز مصفاة الدورادو - ولاية كنساس
151	3-3: مشروع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل -كنساس الأمريكية
153	4-3: مشروع تغويز مصفاة موتيفا في ولاية ديلاور
154	5-3: مشروع تغويز كاليفورنيا
157	6-3: مشروع تغويز مصفاة جامناغار - الهند
161	7-3: مجمع تغويز مصفاة فوجيان
163	8-3: مجمع التغويز في مصفاة جازان -المملكة العربية السعودية
164	الخلاصة والاستنتاجات
166	قائمة المراجع
175	Abstract



قائمة الأشكال

رقم الصفحة	الشكل
الفصل الأول	
25	الشكل 1-1: تطور استخدام الفحم كوقود في توليد الطاقة الكهربائية في المملكة المتحدة 2000-2016
29	الشكل 1-2: مخطط عملية إنكول لتحويل الفحم بطريقة التحلل الحراري
32	الشكل 1-3: مخطط عملية التسييل المباشر لتحويل الفحم إلى سوائل
34	الشكل 1-4 : مخطط عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I
36	الشكل 1-5: مخطط عملية الفحم المكرر الثانية SRC-II
37	الشكل 1-6: مخطط عملية EDS
39	الشكل 1-7: مخطط سير عملية H-Coal
41	الشكل 1-8: مراحل عملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين
43	الشكل 1-9: مخطط عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين ITSL
44	الشكل 1-10: مخطط عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL
46	الشكل 1-11: مخطط عملية الاستخلاص بالمذيب السائل LSE
48	الشكل 1-12: مخطط عملية تسييل الفحم غير المباشر
50	الشكل 1-13: أنواع مفاعلات تغويز الفحم
53	الشكل 1-14: مخطط مفاعل تغويز الجريان المحمول بمرحلتين
55	الشكل 1-15: مخطط عملية تغويز وينكلر
57	الشكل 1-16: مخطط عملية التغويز بالسريير الثابت ويلمان غالوشا
59	الشكل 1-17: عملية تغويز بمفاعل الجريان المحمول بمرحلتين E-Gas
62	الشكل 1-18: مخطط عملية تغويز شل بمفاعل الجريان المحمول
64	الشكل 1-19: مخطط عملية تغويز تكساكو
66	الشكل 1-20: مخطط عملية التحويل الهجينة
67	الشكل 1-21: مخطط عملية التحويل المشتركة
69	الشكل 1-22: مخطط عملية التحويل المشتركة لوماس كريست
71	الشكل 1-23: منظومة نزع الغاز الحامضي من الغاز الاصطناعي
72	الشكل 1-24: مفاعل وحدة تحويل غاز أول أكسيد الكربون بالماء
73	الشكل 1-25: سير عملية استرجاع الكبريت
74	الشكل 1-26: منظومة نزع الجسيمات الدقيقة من الغاز الاصطناعي
76	الشكل 1-27: منظومة تحضير الفحم اللقيم في مجمع التغويز



رقم الصفحة	الشكل
77	الشكل 1-28: منظومة فصل الخبث
78	الشكل 1-29: معالجة المياه الحامضية في مجمع تحويل الفحم إلى سوائل
80	الشكل 1-30: تغيير كفاءة تحويل الكربون بتغيير نسبة الفحم البترولي في اللقيم
81	الشكل 1-31: تأثير رفع الضغط في المغوز على نسبة الميثان في الغاز الاصطناعي
83	الشكل 1-32: تأثير نوع المادة المؤكسدة في مكونات الغاز الاصطناعي
84	الشكل 1-33: تأثير نوع العامل الحفاز في تغيير مكونات منتج عملية فيشر ترويش
86	الشكل 1-34: فرص معالجة الملوثات البيئية من الغاز الاصطناعي
87	الشكل 1-35: عدد وحدات تحويل الفحم إلى غاز المتوقع تشغيلها في أوروبا الغربية 2020-2030
الفصل الثاني	
98	الشكل 1-2: مخطط عملية تغويز الفحم البترولي في مصفاة تكرير النفط
100	الشكل 2-2: مخطط ارتباط عمليات التكرير مع مجمع التغويز في مصفاة النفط
103	الشكل 2-3: مخطط عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب
104	الشكل 2-4: مخطط عملية كسر اللزوجة
107	الشكل 2-5: مخطط دورة التغويز المتكاملة المدمجة لتوليد الطاقة في مصافي النفط
108	الشكل 2-6: مخطط تحويل الغاز الاصطناعي إلى وقود غازي
110	الشكل 2-7: مراحل عملية تحويل الغاز والماء لرفع تركيز الهيدروجين في الغاز الاصطناعي
111	الشكل 2-8: وحدات تنقية الهيدروجين من الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز المصفاة
112	الشكل 2-9: خيارات إنتاج الوقود السائل من مجمع تغويز الفحم البترولي في المصفاة
113	الشكل 2-10: مخطط عملية فيشر- ترويش لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سائل
117	الشكل 2-11: مراحل عملية تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين
118	الشكل 2-12: مخطط عملية تحويل الميثانول إلى غازولين
119	الشكل 2-13: مراحل تحويل الغاز الاصطناعي إلى أوليفينات
120	الشكل 2-14: مخطط عملية تحويل الميثانول إلى أوليفينات
122	الشكل 2-15: مخطط عمليات التوليد المتعدد الأهداف
124	الشكل 2-16: مقارنة اقتصادية بين خيارات استغلال الفحم البترولي
125	الشكل 2-17: لقائم وحدة التغويز في مصفاة النفط
126	الشكل 2-18: منتجات مجمع التغويز في مصافي تكرير النفط
132	الشكل 2-19: مقارنة كمية الانبعاثات والنفايات الصلبة من أنواع محطات توليد الطاقة الكهربائية
134	الشكل 2-20: مخطط تصريف مياه مناولة الفحم البترولي في وحدة التغويز
136	الشكل 2-21: مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات التكرير



رقم الصفحة	الشكل
136	الشكل 2-22: مقارنة بين هامش الربح الإجمالي لتكامل مجمع التغويز مع العمليات التحويلية
137	الشكل 2-23 تكامل وحدات تنقية الهيدروجين مع وحدات توليد الطاقة
139	الشكل 2-24 خيارات استغلال الغاز الاصطناعي غير المحول المنتج من مفاعل فيشر- ترويش
الفصل الثالث	
144	الشكل 3-1: مخطط تكامل مشروع التغويز مع الوحدات القائمة في مصفاة برنيس
146	الشكل 3-2: مخطط مجمع تغويز مصفاة شل برنيس
148	الشكل 3-3: مخطط سير عمليات التكرير في مصفاة إلدورادو- كنساس
149	الشكل 3-4: مكونات مجمع تغويز مصفاة إلدورادو- كنساس
152	الشكل 3-5: مخطط وحدات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل
154	الشكل 3-6: مكونات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة موتيفا
156	الشكل 3-7: مخطط وحدات مجمع تغويز كاليفورنيا
159	الشكل 3-8: مكونات مجمع تغويز مصفاة جامناغاز
161	الشكل 3-9: مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات مصفاة جامناغاز



قائمة الجداول

رقم الصفحة	الجدول
الفصل الأول	
26	الجدول 1-1: مقارنة خصائص أنواع الفحم المنتج من حوض إبلونويز- ولاية إنديانا الأمريكية
35	الجدول 2-1: مزايا وسلبيات طريقة تسييل الفحم المكرر بالمذيب SRC-I
40	الجدول 3-1: مزايا وسلبيات عملية H-Coal
50	الجدول 4-1: مقارنة بين خصائص أنواع مفاعلات تغويز الفحم
79	الجدول 5-1: تغيير مكونات الغاز الاصطناعي عند نسب مختلفة من مزيج لقيم عملية التغويز
87	الجدول 6-1: توزيع طاقة وحدات توليد الطاقة الكهربائية بالفحم المتوقعة في دول أوروبا الغربية
88	الجدول 7-1: موقع وطاقة وتكلفة إنشاء وحدات ساسول لتسييل الفحم
89	الجدول 8-1: توزيع كمية منتجات وحدة ساسول
الفصل الثاني	
99	الجدول 1-2: خصائص بعض لقائم عملية التغويز في مصافي النفط
101	الجدول 2-2: مقارنة بين خصائص الفحم البترولي والفحم شبه البيتوميني
102	الجدول 3-2: مقارنة بين الفحم البترولي الأخضر والفحم المكلسن (فحم الأقطاب)
106	الجدول 4-2: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز في مصافي النفط
116	الجدول 5-2: مقارنة بين مواصفات الغازولين المنتج من مصافي النفط والغازولين المنتج من الميثانول في الولايات المتحدة الأمريكية
129	الجدول 6-2: المؤشرات الاقتصادية لحالتي تشغيل مشروع تغويز الفحم البترولي
الفصل الثالث	
145	الجدول 1-3: مواصفات لقيم مجمع تغويز مصفاة برنيس الهولندية
147	الجدول 2-3: التوازن المادي لمصفاة برنيس قبل وبعد مشروع التغويز
147	الجدول 3-3: مقارنة كمية انبعاثات مصفاة برنيس قبل وبعد مشروع التغويز
160	الجدول 4-3: توزيع مجالات استهلاك الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز مصفاة جامناغاز

ملخص تنفيذي

تقنية تحويل الفحم إلى سوائل وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط

انطلقت فكرة تطبيق تقنية تحويل الفحم البترولي إلى سوائل في عمليات تكرير النفط بتأثير عاملين أساسيين، أولهما ارتفاع معدل تكرير النفوط الخام الثقيلة والحامضية، نتيجة تراجع جودة النفط الخام في الأسواق العالمية، وثانيهما تنامي صرامة متطلبات التشريعات التي تمنع طرح انبعاثات أكاسيد الكبريت الناتجة عن استخدام الوقود الثقيل في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

التطور التاريخي لعمليات تحويل الفحم إلى سوائل

تعود بداية تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى منتجات سائلة إلى القرن الثامن عشر، في كل من أوروبا والولايات المتحدة، حيث كانت تطبق لإنتاج غاز المدينة Town Gas من الفحم المنتج محلياً. ثم أثناء الحرب العالمية الثانية في ألمانيا لتأمين وقود بديل للنفط الخام، لكنها تراجعت بعد انتهاء الحرب، نتيجة الهبوط الحاد لأسعار النفط في عقد الخمسينيات، باستثناء جنوب أفريقيا، وذلك في ظل صعوبة الحصول على النفط الخام أو المنتجات النفطية من الخارج نتيجة الحصار الاقتصادي الذي كان مفروضاً عليها في ذلك الوقت.

في السنوات الأولى للقرن الحادي والعشرين ازدهرت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل من جديد، مدفوعة بارتفاع أسعار النفط، وتنامي الطلب على المنتجات البترولية، وصدور تشريعات حظر استخدام الوقود الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت.



أنواع عمليات تحويل الفحم إلى سوائل

تصنف عمليات تحويل الفحم إلى سوائل ضمن ثلاث مجموعات، الأولى مجموعة عمليات التحلل الحراري Pyrolysis، أو الكربنة Carbonization، والثانية مجموعة عمليات التسييل المباشر Direct Liquification، والثالثة مجموعة عمليات التسييل غير المباشر Indirect Liquification.

يتركز الفرق بين عمليات التسييل المباشر وغير المباشر في أن عملية التسييل المباشر تبدأ بمرحلة إذابة الفحم بمذيب، في شروط قاسية من درجات الحرارة والضغط، تتبعها مرحلة التكسير الهيدروجيني. أما عملية التسييل غير المباشر فتبدأ بمرحلة تحويل الفحم إلى مزيج غازي يتكون من الهيدروجين H_2 ، وأول أكسيد الكربون CO، يطلق عليه اسم الغاز الاصطناعي Synthetic Gas، ثم يحول هذا الغاز إلى سوائل هيدروكربونية بعملية تسمى "فيشر تروبش".

أنواع مفاعلات التغويز

تصنف مفاعلات التغويز تبعاً لمكان دخول اللقائم السائلة، أو الغازية، أو الصلبة إلى جسم المفاعل، وطريقة التماس فيما بينها، أو حسب التصميم الهندسي لبنية المفاعل إلى ثلاث أنواع. مفاعلات السرير الثابت Fixed-Bed أو المتحرك Moving-Bed، ومفاعل السرير المميع Fluidized-Bed، ومفاعل الجريان المحمول Entrained Flow.

عمليات معالجة وتنقية الغاز الاصطناعي

يحتوي الغاز الاصطناعي على بعض الغازات التي يمكن أن تخفض من قيمته الحرارية، علاوة على الشوائب الأخرى، كالجسيمات الدقيقة التي يمكن أن تؤدي إلى حدوث أضرار جسيمة في وحدات استغلال ومعالجة الغاز الاصطناعي.



يدخل الغاز الاصطناعي البارد إلى عمود امتصاص يحتوي على محلول أميني Amine solution لامتصاص معظم كمية كبريتيد الهيدروجين وجزء من غاز ثاني أكسيد الكربون. أما الغاز الحامضي المنزوع من المحلول فيسحب إلى وحدة استرجاع الكبريت¹ SRU. يتم في هذه العملية تحويل الكبريت الموجود في الغاز الحامضي على شكل غاز كبريتيد الهيدروجين H₂S إلى كبريت سائل Liquid sulfur وماء. ويطلق على هذه العملية اسم تفاعل كلاوس Claus، نسبة إلى العالم الذي اخترعها في أواخر القرن التاسع عشر.

ولخفض نسبة غاز أول أكسيد الكربون في الغاز الاصطناعي يمرر على وحدة تحويل الغاز بالماء²، حيث يتفاعل غاز أول أكسيد الكربون مع الماء ليشكل الهيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون، في مفاعل يحتوي على عامل حفاز مصنوع من الحديد والكروم، ويعمل في درجات حرارة وضغط عاليين.

كما يمكن فصل الجسيمات الصلبة من الغاز الاصطناعي بطريقتين، الأولى طريقة المرشحات الساخنة الجافة³ تتركب قبل دخول الغاز الاصطناعي إلى منظومة التبريد. والثانية هي طريقة الكاشطات المائية، تتركب على خط الغاز الاصطناعي الخارج من منظومة التبريد.

العمليات المساندة لمجمعات تحويل الفحم

تتكون العمليات المساندة من عدد من الوحدات التي توفر الخدمات اللازمة لإتمام عملية تحويل الفحم والزيوت الثقيلة إلى منتجات عالية القيمة. بعض هذه الوحدات تتعلق بمجمع تحويل الفحم إلى سوائل، مثل منظومة تحضير اللقيم، ومنظومة فصل الخبث

¹ Sulfur Recovery Unit

² Water Gas Shift Reactor

³ Dry hot filters



والسخام، وبعضها الآخر مشترك بين مجمع التغويز وعمليات التكرير في المصفاة كوحدة فصل الهواء، ووحدة معالجة المياه الملوثة.

العوامل المؤثرة في كفاءة عملية تحويل الفحم إلى سوائل

تعتمد كفاءة عملية تحويل الفحم إلى سوائل على عدة عوامل، أهمها سعر كل من الفحم والنفط الخام في الأسواق العالمية. فعندما تنخفض أسعار النفط الخام تنخفض تكلفة التكرير، وبالتالي تصبح المصادر الأخرى للوقود غير مجدية اقتصاديا. كما يؤثر في ربحية عمليات تحويل الفحم إلى سوائل عوامل تقنية تتعلق بنوع اللقيم، ونوع المنتجات المطلوبة، وحجم المفاعل، ونوع المادة المؤكسدة.

فوائد عملية تحويل الفحم إلى سوائل

أدى صدور التشريعات البيئية الخاصة بالحد من طرح الملوثات الناتجة عن حرق الوقود الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت والشوائب الملوثة للبيئة، إلى تراجع نسبة استهلاك الفحم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية بشكل ملحوظ في العديد من مناطق العالم. وكان لهذا التوجه دور في ازدهار عملية تغويز الفحم باعتبارها تساهم في خفض الانبعاثات الملوثة للبيئة، وذلك من خلال توفير فرصة فصل الملوثات من الغاز الاصطناعي المنتج من عملية التغويز قبل استخدامه كوقود.

وفي ضوء سعي دول العالم إلى تعزيز الاستفادة من مواردها المحلية لتلبية الطلب المتنامي على الطاقة وتقليص اعتمادها على الاستيراد من الأسواق الخارجية، يعتبر الفحم أحد المصادر الهامة للطاقة بالنسبة للدول التي تمتلك احتياطات كبيرة.

من أهم الخصائص التي تميز صناعة تحويل الفحم إلى سوائل مرونة استخدام أنواع عديدة من اللقائم. فبالإضافة إلى الفحم الحجري يمكن استخدام الفحم البترولي والمخلفات الثقيلة المنتجة من مصافي النفط، والكتلة الحيوية. كما تتميز تقنية تحويل الفحم بمرونة إنتاج طيف واسع من المنتجات من خلال تحويل الغاز الاصطناعي المنتج إلى



كيماويات، أو وقود سائل أو وقود غازي اصطناعي نظيف يستخدم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

كما أن لتطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل فوائد أخرى غير مباشرة، حيث أنها تساهم في تعزيز الاقتصاد القومي من خلال استغلال الموارد الطبيعية، وتلبية حاجة السوق المحلية من الطاقة، إضافة إلى توفير فرص عمل لتشغيل وصيانة مجمعات تحويل الفحم.

تحديات صناعة تحويل الفحم إلى سوائل

على الرغم من التطورات المهمة التي شهدتها صناعة تحويل الفحم إلى سوائل خلال العقود الماضية، إلا أنها لا تزال تعاني من تحديات كثيرة منها تقنية، ومنها بيئية، وأخرى اقتصادية.

من المشكلات التقنية التي تواجه عمليات تحويل الفحم إلى سوائل تأثر ظروف تشغيل العملية باختلاف خصائص الفحم اللقيم. حيث أن لكل نوع من أنواع الفحم خصائص مختلفة عن الأنواع الأخرى مما يستدعي الالتزام بنوع واحد من أنواع الفحم بما يتلاءم مع تصميم المفاعل تفادياً لوقوع مشكلات تشغيلية قد تؤدي إلى توقف العملية. من جهة أخرى تواجه صناعة تحويل الفحم إلى سوائل تحديات بيئية ناتجة عن ارتفاع معدل استهلاك المياه في كل من عمليات استخراج الفحم وعمليات التحويل إلى سوائل.

أما التحديات الاقتصادية فتتركز أسبابها في تقلبات أسعار النفط والمنتجات النفطية في الأسواق العالمية، إضافة إلى ارتفاع تكاليف التشغيل والاستثمار.

انعكاسات تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي على مصافي النفط

شهدت فكرة تطبيق عملية تغويز الفحم البترولي والزيوت الثقيلة اهتماماً ملحوظاً من قبل القائمين على صناعة تكرير النفط في العقدين الماضيين، وذلك نظراً للفوائد الاقتصادية والتقنية العديدة التي يمكن الحصول عليها، علاوة على اعتبار هذه التقنية أحد الحلول الواعدة لمشكلة تصريف النفايات الخطرة الناتجة عن تكرير النفط الثقيل.



مكونات مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط

تتشابه عملية تحويل الفحم البترولي في مصافي النفط، أو ما يطلق عليه علمياً بتقنية التغويز، مع عملية تحويل الفحم إلى سوائل في العديد من المكونات، حيث يتكون مجمع تغويز الفحم البترولي من مفاعل التغويز، وعمليات معالجة الغاز الاصطناعي، والعمليات اللاحقة التي تهدف إلى استغلال الغاز الاصطناعي وتحويله إلى منتجات قابلة للاستهلاك في المصفاة، أو للمزج مع المنتجات النهائية.

يتوقف اختيار مكونات مجمع التغويز على طبيعة عمل المصفاة ومدى حاجتها إلى منتجات عملية التغويز، فقد يحتوي على واحدة أو أكثر من هذه الوحدات، كوحدة دورة التغويز المتكاملة المدمجة¹ IGCC. وقد تحتوي على وحدة لإنتاج الهيدروجين، أو إنتاج السوائل الهيدروكربونية بعملية فيشر-ترويش، أو إنتاج الميثانول.

تنتج مصافي النفط مخلفات رخيصة الثمن، تتوقف كميتها وخصائصها على نوع عمليات التكرير، ونوع النفط الخام المكرر. ومن أهم هذه المخلفات الفحم البترولي، والزيوت الثقيلة كمخلفات التقطير الفراغي، والقار المنتج من وحدة كسر اللزوجة Visbreaker tar، وقار عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب De-asphalter pitch. وتعتبر تقنية التغويز أحد الخيارات الممكنة لتحويل هذه المخلفات إلى منتجات عالية القيمة.

خيارات استغلال الغاز الاصطناعي في مصافي النفط

يمكن تصنيف خيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز في مصافي النفط ضمن المجموعات الرئيسية التالية:

- توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
- إنتاج غاز طبيعي اصطناعي

¹Integrated Gasification Combined Cycle



- إنتاج زيوت اصطناعية ووقود وسائل النقل
- الكيماويات الأساسية لإنتاج البتروكيماويات
- إنتاج الهيدروجين

تساهم عملية تغويز الفحم البترولي في تزويد المصفاة بالسوائل الهيدروكربونية من خلال تحويل الغاز الاصطناعي المنتج من مفاعل التغويز إلى مفاعل فيشر- تروبش، حيث يتم تحويل الغاز إلى سائل هيدروكربونية ويتم فصلها في وحدات التكرير في المصفاة. أو تحويل الغاز الاصطناعي إلى ميثانول، ثم تحويل الميثانول إلى غازولين. كما يمكن إنتاج الأوليفينات التي تتكون بشكل رئيسي من الإيثيلين والبروبيلين بعملية التكسير بالعامل الحفاز Catalytic Cracking للميثانول المنتج من الغاز الاصطناعي.

دوافع تطبيق تقنية تحويل الفحم في صناعة تكرير النفط

أدى تنامي الطاقة الإنتاجية لوحدات التفحيم المؤجل في مصافي العالم إلى ارتفاع نسبة المخلفات الثقيلة التي تنتج من تكرير النفط الخام الثقيل، كالفحم البترولي والقار والأسفلت، وبالتالي ازدادت الحاجة إلى تطوير تقنيات حديثة لتحسين الاستفادة من هذه المنتجات وتحويلها إلى منتجات عالية القيمة، يمكن أن تساهم في تحسين الأداء الاقتصادي لصناعة تكرير النفط بطريقة آمنة وغير ضارة بالبيئة.

كما ساهم توجه العديد من مصافي النفط في العالم نحو تكرير نفوط ثقيلة وحامضية تحتوي على نسب مرتفعة من الشوائب الكبريتية في مضاعفة معدلات استهلاك الهيدروجين. وهذا ما دفع المصافي إلى الاهتمام بتقنية تغويز الفحم البترولي باعتبارها وسيلة اقتصادية لتوفير الهيدروجين بتكاليف أدنى مقارنة بعمليات إنتاج الهيدروجين بعملية التهذيب البخاري¹ للغاز الطبيعي أو الناقتا.

¹ Naphtha Steam Reformer



من الدوافع الأخرى لتطبيق تقنية التغويز في مصافي النفط ما تساهم به من خفض للأثر البيئي لمحطات توليد الطاقة الكهربائية، من خلال تطبيق دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC التي تتميز بكفاءة حرارية عالية عند استخدام الغاز الاصطناعي كوقود في العنفة الغازية مقارنة بتقنيات توليد الطاقة الكهربائية الأخرى التي تستخدم الفحم المسحوق كوقود Pulverized Coal.

تجدر الإشارة إلى أن مجمع التغويز يتكامل مع وحدات مصفاة النفط من خلال عدة مجالات، مثل التكامل مع عمليات التكرير، والتي تساهم في تحسين الأداء التشغيلي والاقتصادي لمصافي النفط، من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة، وخفض التكاليف الاستثمارية والتشغيلية نتيجة المشاركة في الوحدات المساندة، كوحدة استرجاع الكبريت، ووحدة معالجة الغاز الحامضي، ووحدة إنتاج الهيدروجين.



قائمة المصطلحات والمختصرات

List of Terms & Abbreviations

English	عربي
Air Emission	انبعاثات هوائية
Atmospheric Distillation	تقطير جوي
Anode Coke	فحم الأقطاب
Ash	رماد
Barrel per Day, b/d	برميل/اليوم، (ب/ي)
British Coal Corporation, BCC	مؤسسة الفحم البريطانية
Carbonization	كربنة
Catalytic Reforming	تهذيب بالعامل الحفاز
Catalytic Hydrocracking	تكسير هيدروجيني
Catalytic Two-Stage Liquefaction, CTSL	عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز
Calcined Petcoke	فحم بترولي مكلسن
Catalyst	محفز/عامل حفاز
Charcoal	فحم نباتي
Coal Fluidized Bed Gasifier, CFB	مغوز فحم بالسريير المميع
Coke	فحم الكوك
Co-Processing	عمليات مشتركة
Coal To Liquid, CTL	تحويل الفحم إلى سوائل
Coal Liquefaction	تسييل الفحم
Deactivation	إخماد
De-Asphalter Pitch	قار نزع الأسفلتينات بالمذيب
Delayed Coking	تفحيم مؤجل
Direct Liquefaction	تسييل مباشر
Dissolver	مفاعل إذابة
Ebullated-bed reactor	مفاعل سريير نبضي
Endothermic Reaction	تفاعل ماص للحرارة
Enhanced Oil Recovery, EOR	الاستخلاص البترولي المعزز
Entrained Flow Reactor	مفاعل الجريان المحمول
Exxon donor solvent process, EDS	عملية إكسون للتسييل المباشر للفحم
Fluidized Bed Reactor	مفاعل السريير المميع
Fluidized Catalytic Cracking	التكسير بالعامل الحفاز المائع
Gasification	تغويز



English	عربي
Hybrid Conversion	عملية تحويل هجينة
Hydrogen Transfer Membrane, HTM	أغشية نقل الهيدروجين
Hydrotreating	هدرجة/ معالجة هيدروجينية
Hydrofinishing	الإصلاح الهيدروجيني
Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC	دورة التغويز المتكامل المدمجة
Isomerization	أزمنة
Liquid Solvent Extraction, LSE	الاستخلاص بالمذيب السائل
Methyl Tertiary Butyl Ether MTBE	ميثيل ثلاثي بيوتيل إيثير
Non-Integrated Two-Stage Liquefaction, NISL	عملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين
Olefinic Hydrocarbons	هيدروكربونات أوليفينية
Paraffins	بارافينات
Part Per Million	جزء في المليون
Particulate Matter	الجسيمات الدقيقة
Pounds per square inch gauge, psig	رطل على البوصة المربعة
Pressure Swing Absorption Unit, PSA	وحدة الامتزاز بالضغط المتأرجح
Propane Extraction	الاستخلاص بالبروبان
Pyrolysis	تحلل حراري
Quench tower	برج تبريد مائي
Slag	خبث
Slurry Coal	فحم طيني
Smog	ضباب دخاني
Solvent Coal Reactor, SRC	عملية الفحم المكرر بالمذيب
Stripper	عمود نزع
Sulphur Recovery Unit, SRU	وحدة استرجاع الكبريت
Synthetic Gas, Syngas	غاز اصطناعي
Synthetic Natural Gas, SNG	غاز طبيعي اصطناعي
Thermal Cracking	تكسير حراري
Thermal power plant	محطة حرارية
Vacuum Distillation	تقطير فراغي
Variable Speed Screw Feeder	ملقم حلزوني متغير السرعة
Vis-breaker Tar	قار عملية كسر اللزوجة

تقنية تحويل الفحم إلى سوائل
وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط

الفصل الأول

عمليات تحويل الفحم إلى سوائل

- 1-1: التطور التاريخي لتقنيات تحويل الفحم إلى سوائل
- 2-1: خصائص وأنواع الفحم
- 3-1: أنواع عمليات تحويل الفحم إلى سوائل
- 4-1: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي
- 5-1: العوامل المؤثرة في كفاءة عملية تحويل الفحم إلى سوائل
- 6-1: فوائد وتحديات تقنية تحويل الفحم إلى سوائل.





الفصل الأول

عمليات تحويل الفحم إلى سوائل

مقدمة

انطلقت فكرة تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل في عمليات تكرير النفط بتأثير عاملين أساسيين، أولهما ارتفاع معدل تكرير النفوط الخام الثقيلة والحامضية، نتيجة تدهور جودة النفط الخام في الأسواق العالمية، وثانيهما تنامي صرامة متطلبات التشريعات التي تمنع طرح انبعاثات أكاسيد الكبريت الناتجة عن استخدام الوقود الثقيل في محطات توليد الطاقة الكهربائية، حيث تصل نسبة الكبريت في بعض أنواع زيت الوقود إلى 4% وزناً، وفي الفحم البترولي إلى 5-7% وزناً، ونسبة المعادن إلى 300 جزء في المليون (ج.ف.م). يتناول هذا الفصل مراحل تطور عملية تحويل الفحم إلى سوائل هيدروكربونية قابلة للاستخدام، والدوافع التي أدت إلى ازدهارها أو تراجعها. كما يتضمن هذا الفصل شرحاً لأهم التقنيات المستخدمة في تحويل الفحم إلى سوائل، مع الإشارة إلى مزايا وسلبيات كل تقنية من هذه التقنيات من حيث ظروف التشغيل، وتكاليف الإنشاء، والأداء التشغيلي، والمردود الاقتصادي.

1-1: التطور التاريخي لعمليات تحويل الفحم إلى سوائل

تعود بداية تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى منتجات سائلة إلى القرن الثامن عشر، في كل من أوروبا والولايات المتحدة، حيث كانت تطبق لإنتاج غاز المدينة Town Gas من الفحم المنتج محلياً.

في بداية القرن العشرين طورت تقنية تحويل الفحم في كل من ألمانيا، والمملكة المتحدة، فأصبحت تنتج السوائل الهيدروكربونية على شكل منتج ثانوي من عملية تحويل الفحم الحجري إلى فحم الكوك Coke. وكانت هذه السوائل تستخدم في مجالات متعددة،



إما على شكل وقود، أو مذيبات، أو مواد حافظة للخشب، أو مواد أساس لصناعة الأصباغ المشتقة من قار الفحم الحجري. (Bartis, J., et al, 2008)

ازدهرت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل هيدروكربونية أثناء الحرب العالمية الثانية في ألمانيا لتأمين وقود بديل للنفط الخام، لكنها تراجعت بعد انتهاء الحرب، وتوقفت جميع وحدات تسهيل الفحم في ألمانيا وبقية مناطق العالم عن العمل، حيث أصبحت غير مجدية اقتصادياً بعد الهبوط الحاد لأسعار النفط في عقد الخمسينيات نتيجة اكتشاف كميات كبيرة من احتياطات النفط في منطقة الشرق الأوسط. إلا أنه حدث استثناء لهذه القاعدة في جنوب أفريقيا، وذلك بهدف تأمين الوقود السائل من الفحم الحجري الذي يتوفر لديها بكميات كبيرة بينما لا تمتلك احتياطات للنفط الخام، وخصوصاً في ظل صعوبة الحصول على الوقود أو النفط الخام أو المنتجات النفطية من الخارج نتيجة الحصار الاقتصادي الذي كان مفروضاً عليها منذ عقد الخمسينيات وحتى منتصف الثمانينيات من القرن الماضي. (DTI, 1999)

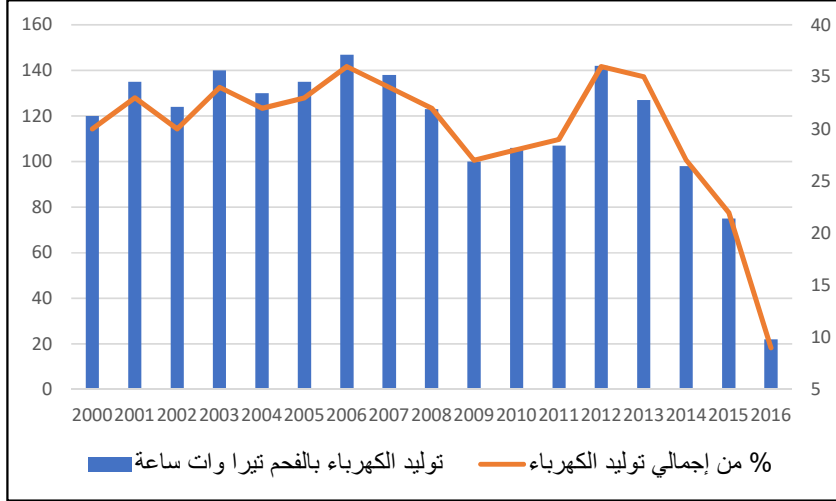
وفي مطلع عقد السبعينيات استعادت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل دورها في جذب اهتمام بعض الدول، نتيجة ارتفاع أسعار النفط الخام، فبدأ تطبيق العديد من برامج البحث والتطوير لتحسين الأداء التشغيلي والاقتصادي لعمليات التحويل في كل من الولايات المتحدة الأمريكية، والمملكة المتحدة، وألمانيا، واليابان. وفي منتصف الثمانينيات تراجعت الصناعة مرة أخرى بتأثير انخفاض أسعار النفط في الأسواق العالمية.

في السنوات الأولى للقرن الحادي والعشرين ازدهرت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل من جديد، مدفوعة بارتفاع أسعار النفط، وتنامي الطلب على المنتجات البترولية، وصدور تشريعات الحد من الانبعاثات الملوثة للبيئة التي تحظر استخدام الوقود الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت، حيث سجل استخدام الفحم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية تراجعاً في السنوات الأخيرة الماضية، وتركز التراجع في كل من أوروبا الغربية، والولايات المتحدة الأمريكية. يبين الشكل 1-1 تطور استخدام الفحم

كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية في المملكة المتحدة خلال الفترة 2000-2016 (The Economist, 2017).

وحيث أن البنية التحتية لاقتصاد الدول المتقدمة تعتمد بشكل كبير على استهلاك النفط ومشتقاته، فقد اعتبرت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل أحد المصادر الرديفة للحصول على وقود محركات وسائل النقل في حال حدوث أي نقص في إمدادات المنتجات البترولية إلى الأسواق العالمية. (DTI, 1999).

الشكل 1-1: تطور استخدام الفحم كوقود في توليد الطاقة الكهربائية في المملكة المتحدة خلال الفترة 2000-2016



المصدر: The Economist, 2017

2-1: خصائص وأنواع الفحم

الفحم وقود أحفوري صلب، تشكل نتيجة تحول بقايا النباتات المتجمعة بين طبقات الصخور العميقة بتأثير الضغط والحرارة لملايين السنين، ولهذا سمي بالفحم الحجري. يحتوي الفحم الحجري على نسبة عالية من الكربون، ونسبة منخفضة من الهيدروجين لا تتجاوز 5%، وهي نسبة متدنية مقارنة ببعض أنواع المنتجات البترولية، حيث تصل في الغازولين، على سبيل المثال، إلى 12.5%، وفي وقود الطائرات إلى 14.5%.



يصنف الفحم الحجري تبعاً لدرجة الصلابة إلى اللبغيت، والفحم البيتوميني، وفحم الأنثراسيت. (Hurd, D., Park, S., & Kan, J., 2014)

- **اللبغيت Lignite**، أو (الفحم البني) ويصنف على أنه من أدنى أنواع الفحم جودة، نظراً لانخفاض قيمته الحرارية، واحتوائه على نسبة عالية من الماء تصل إلى 65% وزناً، مما يجعل عملية نقله غير اقتصادية، وبالتالي يستخدم بشكل واسع لتوليد الطاقة الكهربائية، أو كلقيم لمشاريع تحويل الفحم إلى كيماويات في موقع قريب من المنجم.

- **الفحم البيتوميني Bituminous**، وهو ذو جودة أعلى من اللبغيت، ولكنه أدنى من الأنثراسيت، حيث تتراوح نسبة المياه فيه ضمن المجال 3-16% وزناً، ويقسم إلى نوعين، فحم حراري وآخر يسمى فحم الكوك، يستخدم الفحم البيتوميني الحراري كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية، أما فحم الكوك فيستخدم في صناعة الفولاذ.

- **الأنثراسيت Anthracite**، يصنف عالمياً على أنه من أجود أنواع الفحم الحجري، نظراً لارتفاع قيمته الحرارية، وانخفاض محتواه من الماء. يبين الجدول 1-1 مقارنة خصائص أنواع الفحم المنتج من حوض إيلونويس Illinois، في ولاية إنديانا الأمريكية.

الجدول 1-1: مقارنة خصائص أنواع الفحم المنتج من حوض إيلونويس- ولاية إنديانا الأمريكية

ليغيت	بيتومين	أنثراسيت	% وزناً
39	15.9- 2.2	16.3-2.8	الرطوبة Moisture
31.4	78.2- 44.9	85.7- 80.5	الكربون الثابت Fixed Carbon
4.2	11.7- 3.3	20.2- 9.7	رماد Ash
0.4	4- 0.7	0.77- 0.6	كبريت Sulphur
54- 40	57- 42	58- 50	الكثافة الكلية (رطل/قدم ³) Density

المصدر: Bowen, B., Irwin, M., & Canchi, D., 2008

3-1: أنواع عمليات تحويل الفحم إلى سوائل

شهدت عمليات تحويل الفحم إلى سوائل العديد من التطورات في السنوات الماضية، مستفيدة من تقنيات تكرير النفط الخام، أهمها:

- المعالجة الهيدروجينية.
- الاستخلاص بالمذيب للفحم ثم المعالجة الهيدروجينية للمواد المستخلصة منه.
- تحويل الفحم إلى غاز اصطناعي Synthetic Gas، ثم تحويل الغاز إلى وقود سائل وكيمويات.

تصنف عمليات تحويل الفحم إلى سوائل ضمن ثلاث مجموعات، الأولى مجموعة عمليات التحلل الحراري Pyrolysis، أو الكربنة Carbonization، والثانية مجموعة عمليات التسييل المباشر Direct Liquification، والثالثة مجموعة عمليات التسييل غير المباشر Indirect Liquification. (Kozak, M., 2007)

يتركز الفرق بين عمليات التسييل المباشر وغير المباشر في أن عملية التسييل المباشر تتكون من خطوتين رئيسيتين، أولهما إذابة كمية كبيرة من الفحم بمذيب، في شروط قاسية من درجات الحرارة والضغط، تتبعها مرحلة التكسير الهيدروجيني. أما عملية التسييل غير المباشر فتبدأ أولاً بمرحلة تحويل الفحم إلى مزيج غازي يتكون من غاز الهيدروجين H_2 ، وأول أكسيد الكربون CO، يطلق عليه اسم غاز اصطناعي Synthetic Gas، ثم يحول هذا الغاز إلى سوائل هيدروكربونية بعملية تسمى "فيشر تروبش". كما طورت عمليات تعتمد على دمج كلا عمليتي التسييل المباشر وغير المباشر في عملية واحدة، أطلق عليها اسم العمليات الهجينة، وذلك بهدف تعظيم الاستفادة من مزايا الطريقتين والحد من سلبياتهما. (Bajura, A., & Eyring, E., 2016)



1-3-1: عملية التحلل الحراري

تعتبر عملية التحلل الحراري Pyrolysis من أقدم تقنيات الحصول على السوائل الهيدروكربونية من الفحم، وهي عملية مشابهة لعملية إنتاج فحم الكوك التي ينتج عنها سائل يشبه القار كمنتج ثانوي، حيث يسخن الفحم في وعاء مغلق إلى درجات حرارة عالية، تصل إلى 950 °م، وتساهم الحرارة في تفكيك المركبات الطيارة وسحبها خارج الوعاء، مما يؤدي إلى رفع نسبة الكربون في الفحم المتبقي.

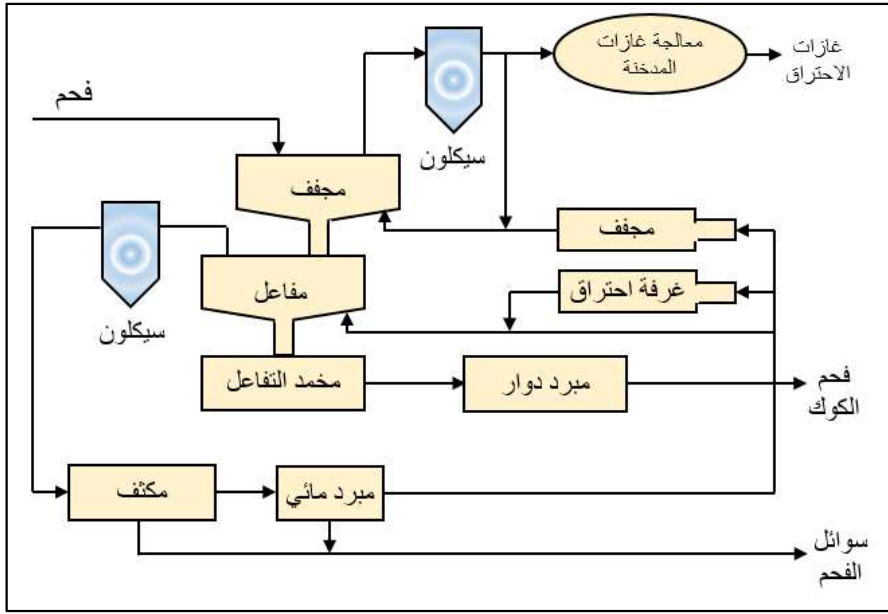
تصنف عملية التحلل الحراري بأنها عالية التكلفة، مقارنة بعمليات التحويل الأخرى، كما أن كمية السوائل الهيدروكربونية (قار الفحم Coal Tar) الناتجة عنها قليلة جداً، وتتنحصر استخداماتها في تصنيع منتجات العزل المائي، أو كمادة خام في صناعة الأصبغة، أو صناعة الأدوية، والدهانات، حيث لا يمكن استخدامها كوقود في وسائل النقل إلا بعد إخضاعها لعمليات معالجة في مصافي تكرير النفط لتعديل خصائصها.

بعض عمليات التحلل الحراري تجري في درجات حرارة معتدلة، وتسمى بعمليات التحلل الحراري المخفف، وتطبق غالباً لتحسين خصائص بعض أنواع الفحم الرديء، وذلك بخفض محتواه من الكبريت ورفع قيمته الحرارية. أما المنتجات الرئيسية لهذه العملية فهي فحم الشوي Charcoal، أو فحم الكوك Coke، أو الفحم شبيه الكوك Semi-coke. وجميع هذه الأنواع تصنف على أنها وقود صلب عديم الدخان (Smokeless Solid Fuel). (Hook, M., & Aleklett, K., 2009)

من الأمثلة العملية على تقنية التحلل الحراري المخفف عملية إنكول Encoal التي طورت في العام 1992 من قبل شركة SGI International في الولايات المتحدة الأمريكية، ولا تزال قائمة حتى الآن لإنتاج فحم عالي القيمة الحرارية ومنخفض محتوى الكبريت لاستخدامه كوقود، إضافة إلى إنتاج كمية من السوائل الهيدروكربونية. وتبلغ

طاقتها القصوى ألف طن من فحم الكوك يومياً. يبين الشكل 1-2 مخطط عملية إنكول لتحويل الفحم بطريقة التحلل الحراري. (DTI, 1999)

الشكل 1-2: مخطط عملية إنكول لتحويل الفحم بطريقة التحلل الحراري



المصدر: Hook, M. & Aleklett, K., 2009

تبدأ عملية إنكول بطحن الفحم اللقيم ثم غربلته قبل إدخاله إلى مكثف دوار لتسخينه بتيار من الغاز الساخن، وذلك بهدف نزع الرطوبة من الفحم دون أن تصل درجة حرارته إلى القيمة التي تبدأ فيها عملية تغيير بنيته التركيبية. بعد ذلك يمرر الفحم الجاف إلى مسخن دوار رئيسي لرفع درجة حرارته إلى 540 °م، بواسطة تيار الغاز الساخن الراجع. ويجب في هذه المرحلة ضبط درجة الحرارة حتى لا تتغير خصائص الفحم.

يمرر الفحم الخارج من المسخن إلى مبرد، ومنه إلى مرحلة الإخماد Deactivation التي تتكون من عملية معالجة بتيار من الغاز مع نسبة محددة من الأوكسجين في سرير مميع هزاز Vibrating Fluidized Bed. تهدف عملية الإخماد إلى تثبيت الفحم المنتج بواسطة الأكسدة الخفيفة لخفض احتمالات حدوث مخاطر الاشتعال



الذاتي. يسحب بعد ذلك الفحم المثبت إلى مبرد ثم إلى التخزين لاستخدامه كوقود صلب على شكل مسحوق ناعم يحتوي على نسبة منخفضة من الكبريت، وصالح للاستخدام كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

أما تيار الغاز الخارج من المسخن فيسحب إلى برج تبريد مائي Quench tower لتكثيف السوائل المشتقة من الفحم، مع إبقاء الماء في الطور الغازي، أما الغاز غير المتكاثف فيعاد الجزء الأكبر منه إلى المسخن، والباقي يستخدم كوقود لتأمين الحرارة اللازمة لكل من المسخن والمجفف.

يمكن رفع كمية السوائل الهيدروكربونية المنتجة من عملية التحلل الحراري بتخفيض درجة حرارة المفاعل، حيث تطبق في هذه الحالة عملية التحلل الحراري المخفف التي يمكن من خلالها الحصول على كمية أكبر من السوائل الهيدروكربونية، بنسبة تصل إلى أعلى من 20% مقارنة بعملية التحلل الحراري في درجات الحرارة المرتفعة. (DTI, 1999)

1-3-2: عملية التسييل المباشر Direct Liquefaction

طورت عملية التسييل المباشر للفحم في عام 1913 من قبل العالم الألماني فريدريك بيرغيوس Friedrich Bergius. بعد ذلك تم تطوير العملية خلال عشرينيات القرن العشرين لتعديل خصائص ونوع منتجاتها بما يتناسب مع تغيرات الطلب.

في عام 1935 أنشئت أول وحدة على نطاق تجاري تعتمد على عملية التسييل المباشر في مدينة بيلينغهام Billingham في المملكة المتحدة، وكان الهدف منها إنتاج 150 ألف طن/السنة من السوائل الهيدروكربونية المكونة من الغازولين وزيت الفحم Creosote Oil. ومع بداية الحرب العالمية الثانية ازدهرت هذه العملية في كل من ألمانيا والمملكة المتحدة، ووصل عدد الوحدات في ألمانيا إلى ثمانية عشر وحدة تسييل مباشر، مقارنة بتسع وحدات تسييل غير مباشر، وبلغ إجمالي إنتاجها في أربعينيات القرن العشرين



حوالي أربعة ملايين طن من الغازولين سنوياً، أو ما يعادل 90% من إجمالي استهلاك ألمانيا. (Minchener, J., 2011)

يطحن الفحم في عملية بيرغيوس إلى حبيبات دقيقة، بحيث يمكن مزجه مع الزيت الثقيل المشتق من الفحم والسوائل الثقيلة المتبقية من عملية التسييل ليشكل لقيم طيني Slurry Feed تصل نسبة الفحم فيه إلى حوالي 30-50%. ثم يسحب اللقيم بعد ذلك إلى مرحلة التفاعل بوجود الهيدروجين والعامل الحفاز. أما السوائل الهيدروكربونية الناتجة فتسحب إلى مرحلة التكرير لفصلها إلى منتجات قابلة للاستهلاك.

تصلح عملية التسييل المباشر لمعالجة أنواع عديدة من اللقائم، منها الفحم البيتوميني الحاوي على نسبة عالية من المركبات الطيارة¹، وفحم الليغنيت ذو الرماد المنخفض. يبين الشكل 1-3 مخطط عملية التسييل المباشر لتحويل الفحم إلى سوائل.

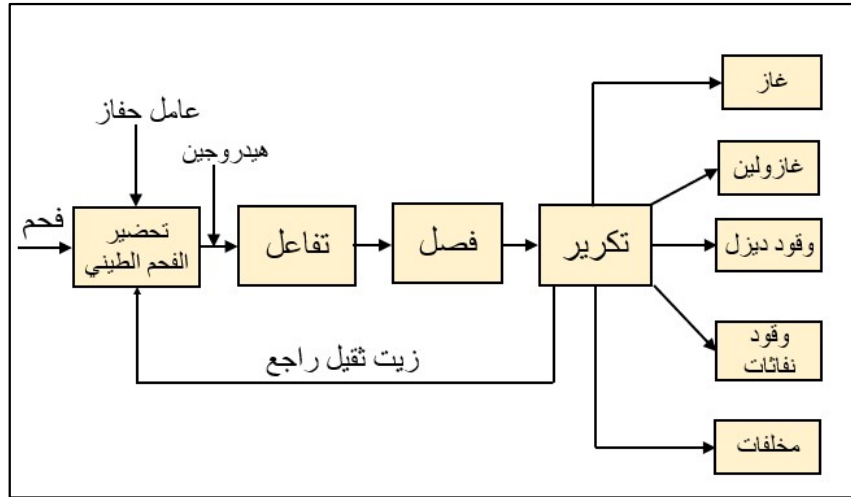
تصنف عملية التسييل المباشر على أنها التقنية الأعلى كفاءة مقارنة بالعمليات الأخرى، حيث تصل الكفاءة الحرارية الإجمالية² للعملية ضمن المجال 60-70%. (DTI, 1999). وتصل نسبة إنتاج المقطرات السائلة في بعض الوحدات العاملة إلى 70% وزناً من الفحم الجاف الخالي من المعادن. كما أن جودة منتجاتها أعلى بكثير من جودة منتجات عمليات التحلل الحراري، ويمكن استخدامها كوقود في محطات توليد الطاقة الثابتة مباشرة دون الحاجة إلى عمليات معالجة إضافية، ويمكن مزجها مع النفط الخام اللقيم الداخل إلى مصافي النفط لتعزيز إنتاج المقطرات السائلة في المصفاة، حيث أنها تحتوي على نسب أخفض من الكبريت والنيتروجين والفينولات والعطريات، وغيرها، وذلك بسبب استخدام الهيدروجين في العملية، ولكنها تحتاج إلى عمليات معالجة لتصبح قابلة للاستخدام كوقود في وسائل النقل. (Höök, M., et al., 2014)

¹ High volatile bituminous coals

² Overall thermal efficiency



الشكل 1-3: مخطط عملية التسييل المباشر لتحويل الفحم إلى سوائل



المصدر: NETL, 2007

تقسم عمليات التسييل المباشر إلى مجموعتين، الأولى مجموعة عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة، والثانية مجموعة عمليات التسييل المباشر بمرحلتين. تحتوي عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة على مفاعل واحد رئيسي، أو مجموعة مفاعلات على التسلسل لإنتاج المقطرات، إضافة إلى عمليات معالجة هيدروجينية للمقطرات المنتجة لتحسين جودة مواصفاتها. أما عمليات التسييل المباشر بمرحلتين فتحتوي على مفاعلين، أو مجموعتي مفاعلات على التسلسل، يتم في المفاعل الأول تسييل الفحم، إما بدون عامل حفاز، أو بوجود عامل حفاز منخفض الفعالية، يستخدم لمرة واحدة. ثم تسحب سوائل الفحم الثقيلة الناتجة من المرحلة الأولى إلى المفاعل الثاني لمعالجتها بالهيدروجين، بوجود عامل حفاز عالي الفعالية لإنتاج مقطرات ذات مواصفات عالية الجودة.

كانت عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة هي الأكثر شيوعاً، إلى أن أضيفت المرحلة الثانية في منتصف عقد السبعينيات من القرن العشرين، وذلك بهدف زيادة كمية المقطرات المنتجة من عملية التسييل وتحسين خصائصها.

(NETL, 2007)



1-2-3-1: عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة

مع تنامي الاهتمام بحماية البيئة من التلوث في منتصف عقد الستينيات بدأ التركيز على إجراءات تطوير عمليات تحويل الفحم إلى سوائل لتخفيف أثرها الضار على البيئة. وعلى الرغم من نجاح إجراءات تطوير بعض العمليات في كل من المملكة المتحدة واليابان، إلا أنها أثمرت بشكل ملحوظ في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث نجح الباحثون في تطوير عملية التحلل الحراري "بوت بروخ" Pott-Broche القديمة التي تعمل بدون عامل حفاز لتحسين خصائص الفحم، وخفض محتواه من الكبريت والرماد مقارنة بالفحم اللقيم، وذلك لاستخدامه كوقود أنظف في محطات توليد الطاقة الكهربائية. وسميت العملية المطورة بعملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I¹، ثم صدرت بعدها عملية ثانية SRC-II التي تتميز بنسبة إنتاج أعلى للسوائل الهيدروكربونية. كما تم تطوير تقنيتين أخريين في نفس الفترة في الولايات المتحدة الأمريكية، تعتمدان على مبدأ التسييل المباشر بمرحلة واحدة، الأولى هي عملية EDS²، والثانية عملية H-coal.

• عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I

طورت عمليات الفحم المكرر بالمذيب SRC-I من قبل شركة سبنسر للكيمياويات Spencer Chemical Co. في عام 1962، ثم انتقلت إلى شركة غولف أويل Gulf Oil الأمريكية في عام 1967 والتي قامت بإنشاء وحدة تجريبية مصغرة طاقتها 0.5 طن/اليوم، ثم استبدلت هذه الوحدة بوحدين في عام 1974، الأولى في ويلسونفيل Wilsonville، تبلغ طاقتها 6 طن/اليوم، والثانية في مدينة فورت لويس Fort Lewis بولاية واشنطن طاقتها 50 طن/اليوم. وكان الهدف من عملية الفحم المكرر بالمذيب هو تحويل الفحم الرديء إلى وقود صلب نظيف لاستخدامه كوقود في محطات

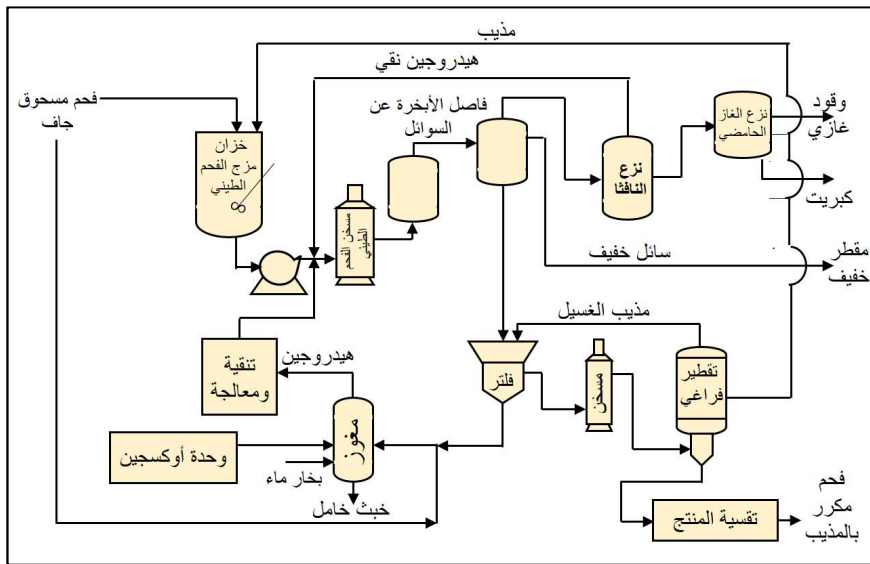
¹ Solvent Refined Coal

² Exxon Donor Solvent

توليد الطاقة الكهربائية. كما تمتاز عملية SRC-I بإمكانية إنتاج كمية أعلى من السوائل مقارنة بعمليات التسييل المباشر الأخرى.

تعتمد عملية SRC-I على مبدأ مزج كل من الفحم والهيدروجين والمذيب في مفاعل الإذابة Dissolver لإنتاج وقود ثقيل غير قابل للتقطير، لكنه يصلح للاستخدام كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية بعد تنقيته من الرماد. ونظراً لعدم استخدام عامل حفاز في العملية فإن معدلات الهدرجة تكون منخفضة، كما أن نسبة الهيدروجين إلى الكربون H/C في السوائل الثقيل المنتج متماثلة تقريباً مع النسبة في الفحم اللقيم. **الشكل 4-1** مخطط عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I

الشكل 4-1 : مخطط عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I



المصدر: Lee, S., Speight, J., & Loyulka, S., 2015

من سلبيات عملية SRC-I عدم إمكانية فصل الرماد من المنتج الثقيل بواسطة عملية التقطير الفراغي، وقد طورت عملية خاصة لنزع الرماد تعتمد على مبدأ الاستخلاص بالمذيب الخفيف لترسيب المكونات الثقيلة غير القابلة للانحلال بالتولوين،



وكامل كمية الرماد، فضلاً عن الفحم غير المحول. يبين الجدول 2-1 أهم مزايا وسلبيات طريقة تسييل الفحم المكرر بالمذيب SRC-I.

الجدول 2-1: مزايا وسلبيات طريقة تسييل الفحم المكرر بالمذيب SRC-I

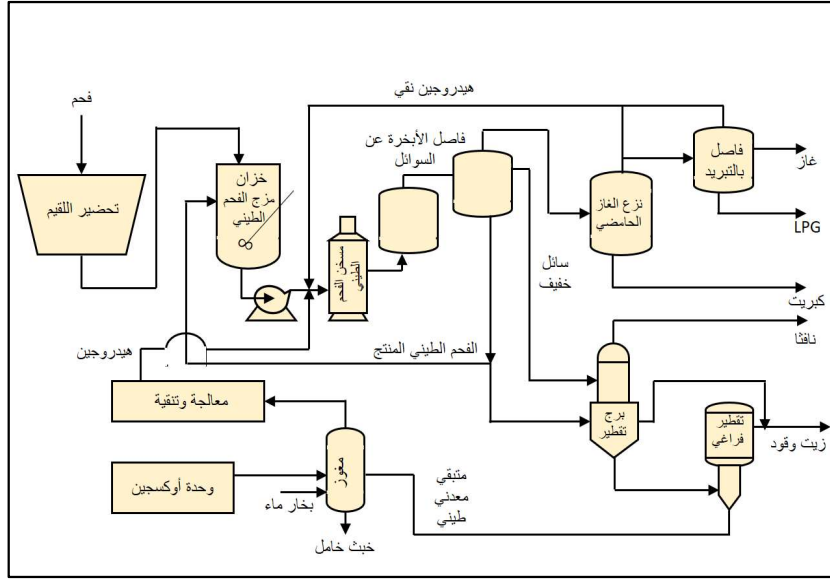
المزايا	السلبيات
الحصول على وقود ذي مواصفات جيدة لمحطات توليد الطاقة الكهربائية يمتاز بقيمة حرارية عالية	ضعف جودة المذيب المقطر
ظروف تشغيل العملية معتدلة	تكرار حالات اختلاط المذيب بالمنتج
العملية سهلة التشغيل ولا تحتوي على عامل حفاز	عدم إمكانية تجزئة منتج العملية بالتقطير الفراغي

• عملية الفحم المكرر بالمذيب الثانية SRC-II

طورت عملية الفحم المكرر بالمذيب الثانية SRC-II بهدف الحصول على منتجات هيدروكربونية سائلة بدلاً من المنتجات الثقيلة التي يتم الحصول عليها في العملية الأولى SRC-I، وهي أيضاً عملية حرارية تستخدم المواد المعدنية الموجودة في الفحم كعامل حفاز وحديد، وتتم المحافظة على تركيز عال من المعادن في المفاعل من خلال تدوير الطمي الزيتي الثقيل. كما تتميز عملية الفحم المكرر بالمذيب الثانية SRC-II بشدة قساوة ظروف التشغيل مقارنة بالعملية SRC-I، إضافة إلى توفر إمكانية استخدام عملية التقطير الفراغي لفصل الرماد من المنتج الثقيل، كما أن متبقي عملية التقطير الفراغي بما في ذلك الرماد يحول إلى وحدة التغويز لتوليد الهيدروجين اللازم للعملية.

من الخصائص الأخرى التي تميز عملية SRC-II مقارنة بالعملية SRC-I ارتفاع نسبة الهيدروجين إلى الكربون في المنتجات، وبالتالي يمكن استخدامها كوقود في وسائل النقل بعد معالجتها بالهيدروجين. يبين الشكل 1-5 مخطط عملية الفحم المكرر الثانية SRC-II.

الشكل 5-1: مخطط عملية الفحم المكرر الثانية SRC-II



المصدر: DTI, 1999

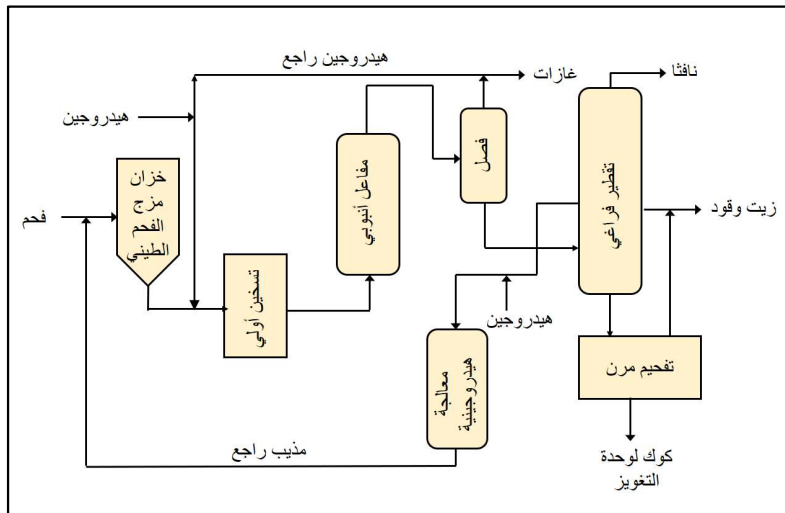
• عملية التسييل المباشر EDS

بدأت شركة إكسون بتطوير عملية EDS في منتصف سبعينيات القرن الماضي، وتمكنت في العام 1980 من إنشاء وحدة تجريبية مصغرة Pilot Plant طاقتها 250 طن/اليوم في مدينة بايتاون في ولاية تكساس الأمريكية، واستمرت عمليات البحث والتطوير على هذه الوحدة لغاية عام 1985، وذلك بهدف تحسين كفاءة إنتاج المقطرات السائلة وتخفيض تكاليف الإنشاء. (DTI, 1999)

يحضر الفحم الطيني بمزج الفحم المسحوق مع المذيب الراجع، ثم يمزج معه الهيدروجين قبل إدخاله إلى مسخن أولي، بعد ذلك يسحب المزيج إلى مفاعل أنبوبي بسيط يتدفق فيه السائل من الأسفل إلى الأعلى، بدرجة حرارة تتراوح بين 425-450 °م، وضغط 2575 رطل على البوصة المربعة psig، ولا يحتوي على عامل حفاز. ينتج من أعلى المفاعل الأنبوبي مركبات تتكون من نافثا ومقطرات وسطى ومقطرات ثقيلة. تسحب المقطرات الثقيلة الحاوية على نسبة من المقطرات الوسطى إلى مفاعل معالجة

هيدروجينية يحتوي على عامل حفاز مصنوع من النيكل والمولبيديوم أو الكوبالت والمولبيديوم المحمول على الألومينا، بسرير ثابت يعمل بدرجة حرارة 370 م°، وضغط 1600 رطل على البوصة المربعة. أما المنتجات الخفيفة فتسحب إلى أبراج الفصل للحصول على الناфта وزيت الوقود، والبواقي الثقيلة التي تستخدم كلقيم لوحدة التفحيم المرن Flexy coking لتحويلها إلى مقطرات خفيفة. يبين الشكل 6-1 مخطط عملية EDS (NETL, 2007).

الشكل 6-1: مخطط عملية EDS



المصدر: Mourit, F., & Kelly, J., 2014

تعتمد كفاءة عملية EDS ونسبة إنتاج المقطرات السائلة بشكل كبير على نوعية الفحم اللقيم، حيث يمكن أن تصل إلى 36% في حالة فحم الليغنيت، وإلى 38% للفحوم شبه البيتومينية، وإلى 39-46% في حالة الفحوم البيتومينية (جميع النسب على أساس الفحم الجاف والخالي من الرماد). كما يمكن زيادة نسبة المقطرات إلى حوالي 60% في حالة الفحوم البيتومينية، وذلك من خلال تعديل ظروف تشغيل العملية، كإرجاع جزء من متبقي التقطير الفراغي إلى مرحلة الفحم الطيني.



• عملية H-Coal

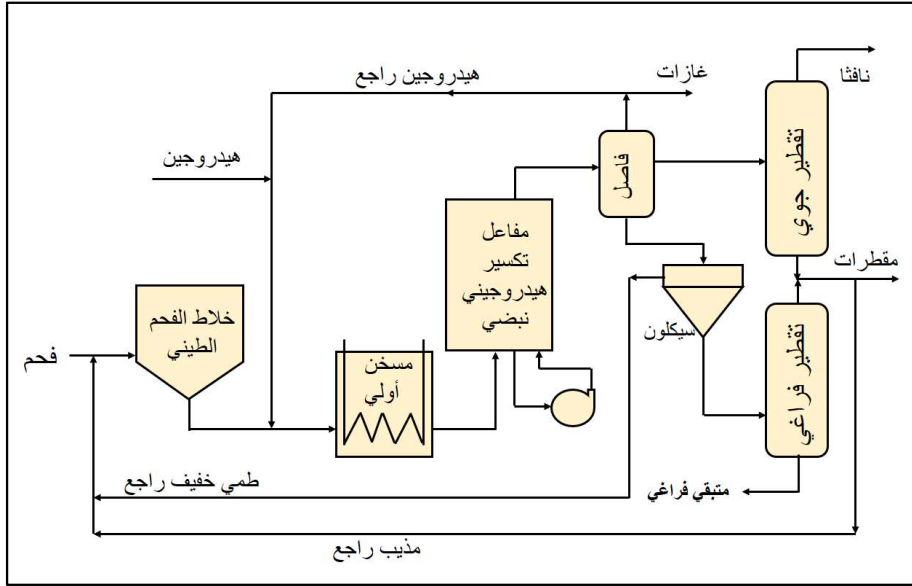
طورت عملية التسييل المباشر بمرحلة واحدة H-Coal من قبل شركة HRI اعتماداً على مبدأ عملية H-oil المستخدمة لتحسين خصائص الزيوت الثقيلة، حيث قامت الشركة بإنشاء وحدة تجريبية مصغرة طاقتها 200 طن/اليوم في كاتليتسبورغ Catlettsburg بولاية كنتاكي Kentucky عام 1980، واستمرت لغاية 1983 حيث تم إنشاء وحدة تجارية في بريكينريدج Breckinridge بنفس الولاية. (Winslow, J., & Schmetz, E., 2011)

في هذه العملية يضاف الهيدروجين إلى الفحم الطيني المكون من مزيج الفحم المسحوق مع المذيب الراجع من عملية فصل المنتجات الهيدروكربونية. وبعد تسخين المزيج يدخل إلى مفاعل تكسير هيدروجيني يحتوي على عامل حفاز مصنوع من النيكل والمولبيديوم، أو الكوبالت مع المولبيديوم المحمول على الألومينا، بسرير نبضي¹، في درجة حرارة تصل إلى 425-455 °م، وضغط 2900 رطل على البوصة المربعة.

تسحب منتجات المفاعل إلى أبراج فصل، حيث تكثف المنتجات العلوية ثم تسحب إلى عمود تقطير جوي لإنتاج النافثا والمقطرات الوسطى، بينما يسحب المنتج السفلي إلى سلسلة من السيكلونات، حيث يعاد جزء منه إلى مرحلة الفحم الطيني. أما التيار الخارج من أسفل السيكلونات فيسحب إلى عمود تقطير فراغي، حيث يمكن فصل الذرات الصلبة مع منتج أسفل العمود، بينما تسحب مقطرات التقطير الفراغي كمنتج للتصدير إلى خارج الوحدة. **الشكل 7-1** مخطط سير عملية H-Coal.

¹ Ebullated-bed reactor

الشكل 7-1: مخطط سير عملية H-Coal



المصدر: Mourit, F., & Kelly, J., 2014

تتميز عملية H-Coal بخصائص السرير النبضي الذي يوفر كفاءة مزج عالية، حيث يمكن التحكم بدرجة الحرارة داخل المفاعل، ومراقبتها بشكل أفضل من طريقة المفاعل ذي السرير الثابت، وبالتالي يمكن تفادي الارتفاع الكبير في درجات الحرارة الناتج عن تفاعل التكسير الهيدروجيني الناشر للحرارة Exothermic، فضلاً عن أن المفاعل النبضي يوفر إمكانية استبدال العامل الحفاز التالف أثناء وجود الوحدة في العمل، وبذلك يمكن المحافظة على استمرار فعالية عالية للعامل الحفاز، وبالتالي يمكن أن تصل كفاءة التحويل في عملية H-Coal إلى 95%، ونسبة إنتاج المقطرات إلى 50% من كمية الفحم الجاف. يلخص الجدول 3-1 مزايا وسلبيات عملية

(Hook, M., & Aleklett, K., 2010) H-Coal



الجدول 3-1: مزايا وسلبيات عملية H-Coal

مزايا	سلبيات
تسييل الفحم وإنتاج المقطرات يتم في مفاعل واحد	ارتفاع درجة حرارة التفاعل تؤدي إلى ارتفاع نسبة الغازات 12-15% نتيجة زيادة التكسير الحراري
المنتجات تحتوي على نسبة هيدروجين/كربون عالية	ارتفاع نسبة استهلاك الهيدروجين
طاقة إنتاج عالية نتيجة سرعة تفاعلات التكسير الهيدروجيني	ارتفاع نسبة إنتاج زيت الغاز الفراغي 345-540 م° الذي يحتاج إلى عمليات معالجة صعبة في المصافي
إمكانية إزالة الرماد من خلال تغويز متبقي التقطير الفراغي لإنتاج الهيدروجين اللازم للعملية	ارتفاع كمية منتج زيت الغاز الفراغي تفرض وجود غلاية مستقلة للتقطير الفراغي

المصدر: Lee, S., Speight, J., & Loyulka, S., 2015

على الرغم من التطور الذي وصلت إليه عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة إلا أنها بقيت تعاني من السلبيات التالية:

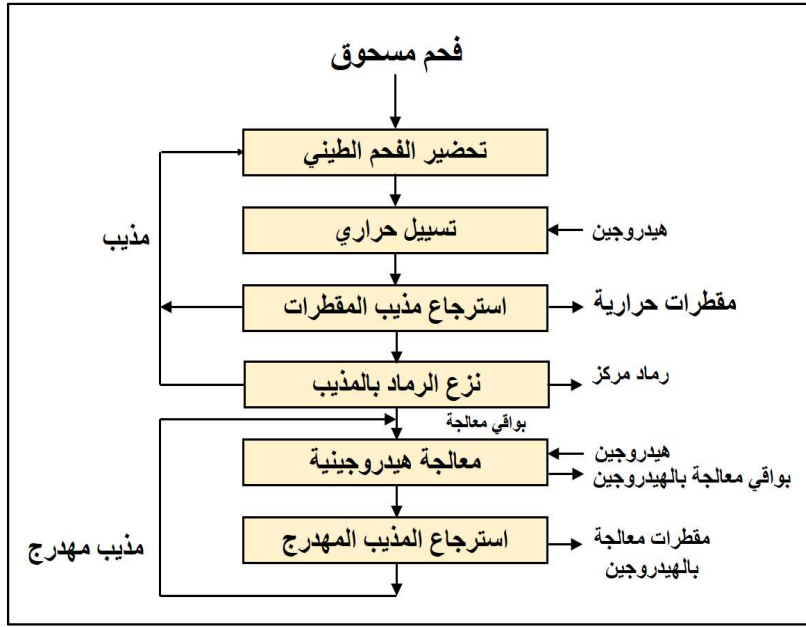
- قساوة ظروف التشغيل، كارتفاع درجة حرارة التفاعل إلى المجال 430-460 م°، وطول زمن البقاء إلى 20-26 دقيقة، وهي الشروط التي يجب تحقيقها للوصول إلى كفاءة تحويل مقبولة للفحم، أو نسبة المواد القابلة للإذابة في محلول تتراهيدروفوران Tetrahydrofuran إلى أعلى من 90%.
- انخفاض نسبة المقطرات المنتجة من هذه العمليات، حيث لا تتجاوز 50% عندما يكون اللقيم من الفحم البيتوميني، وتنخفض النسبة إلى أدنى من ذلك في حال استخدام لقيم من الفحم شبه البيتوميني Semi-Bituminous Coal.
- ارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل.

2-2-3-1: عمليات التسييل المباشر بمرحلتين

تهدف عمليات التسييل المباشر بمرحلتين إلى تحسين أداء عمليات التسييل المباشر بمرحلة واحدة، وتعظيم إنتاج المقطرات العالية القيمة، كالسوائل الهيدروكربونية المستخدمة كوقود في وسائل النقل، وذلك من خلال إدخال عملية التكسير الهيدروجيني LC-Fining إلى البواقي الثقيلة المنتجة من عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I

وتحويلها إلى مقطرات سائلة، وسميت العملية المطورة بعملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين NTSL¹. يبين الشكل 8-1 مراحل عملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين.

الشكل 8-1: مراحل عملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين



المصدر: Lee, S., Speight, J & Loyulka, S., 2015

على الرغم من التطور الذي طرأ على عملية التسييل غير المتكاملة بمرحلتين NTSL بإضافة عملية المعالجة الهيدروجينية إلى عملية الفحم المكرر بالمذيب SRC-I ، بقيت العملية ضعيفة الكفاءة بسبب صعوبة قابلية منتجاتها لتفاعلات التكسير الهيدروجيني، فضلاً عن حاجتها إلى درجة حرارة تفاعل مرتفعة تصل إلى أعلى من 430 °م، وسرعة فراغية منخفضة حتى تكتمل تفاعلات التحويل إلى سوائل. كل هذه النواقص دفعت الباحثين إلى تطوير هذه العملية إلى عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين.

¹Non-Integrated Two Stage Liquefaction

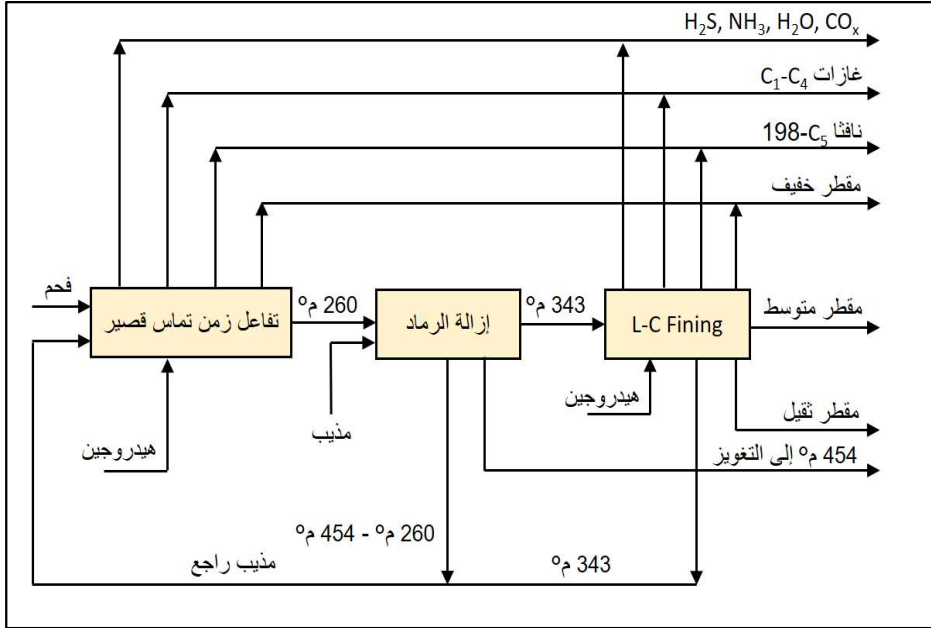


طورت عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين في سبعينيات القرن العشرين من قبل مجموعة شركات مكونة من كونسول Consol، وموبيل Mobil، وويلسونفيل Wilsonville، حيث أظهرت دراسة تفاعلات التحلل الحراري للفحم التي قامت بها هذه الشركات أنه يمكن تطوير عملية تحويل الفحم إلى سوائل هيدروكربونية من خلال تسريع قابلية الانحلال في محلول تتراهيدروفوران بشكل كامل، وخلال مدة زمنية قصيرة جداً تتراوح بين 1-5 دقائق فقط، حيث يمكن في هذه الفترة القصيرة إهمال حدوث تفاعلات الهدرجة في الطور الغازي، وبالتالي فإن معظم كمية الهيدروجين تأتي من المذيب في الطور السائل. وقد أطلق على هذه العملية اسم عملية التسييل في زمن تماس قصير ¹SCT

في مطلع ثمانينيات القرن العشرين طورت شركة لوماس Lumus الأمريكية عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين بحيث تتكون من ثلاث عمليات أساسية هي، عملية التسييل في زمن تماس قصير SCT، وعملية نزع الرماد Deashing، وعملية التكسير الهيدروجيني للبواقي الثقيلة LC-Fining. يبين الشكل 1-9 مخطط عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين ITSL.

¹ Short Contact Time

الشكل 1-9: مخطط عملية التسييل المباشر الحرارية المتكاملة بمرحلتين ITSL



المصدر: Mourit, F., & Kelly, J., 2014

● **عملية التسييل المباشر بمرحلتين بالعامل الحفاز CTSL**

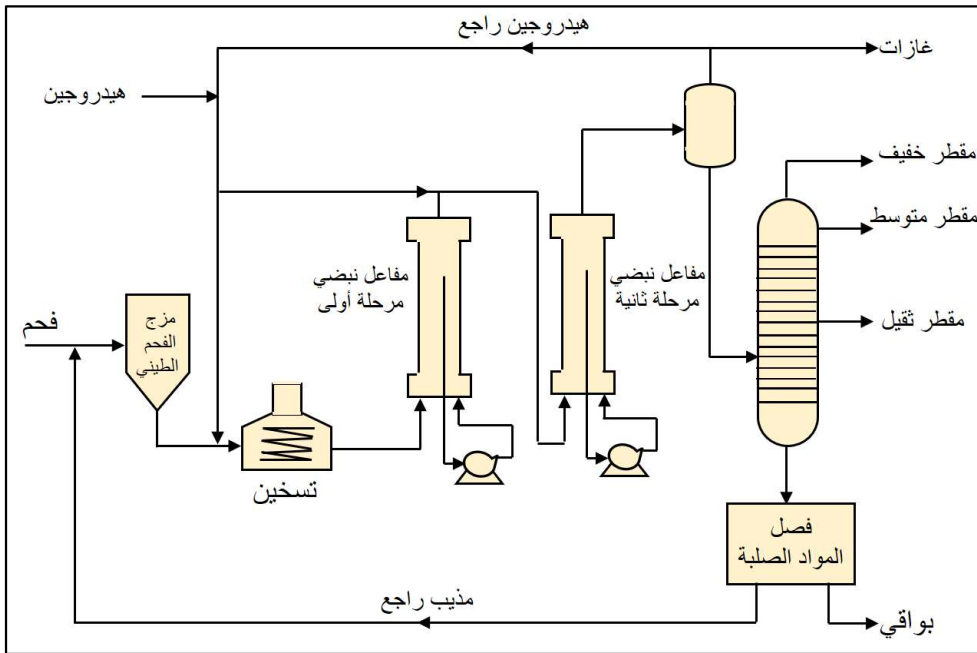
طورت عملية التسييل المباشر بمرحلتين بالعامل الحفاز ¹ CTSL من قبل شركة USDOE الأمريكية، وهي نسخة مطورة من عملية H-Coal ذات المرحلة الواحدة التي طورتها شركة HRI في ويلسونفيل الأمريكية. (DTI, 1999)

تحتوي عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL على مفاعلين أو مجموعتين من المفاعلات على التسلسل. يتم في المفاعل الأول تسييل الفحم، إما بالطريقة الحرارية بدون عامل حفاز، أو بوجود عامل حفاز منخفض الفعالية مماثل للعامل الحفاز المستخدم في عمليات التسييل بمرحلة واحدة. ثم تسحب سوائل الفحم الثقيلة الناتجة من المرحلة الأولى إلى المفاعل الثاني لمعالجتها بالهيدروجين، بوجود عامل حفاز

¹ Catalytic Two-stage Liquefaction

عالي الفعالية، للحصول على مقطرات بمواصفات متوافقة مع القيم المطلوبة. يبين الشكل 10-1 مخطط عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL.

الشكل 10-1: مخطط عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL



المصدر: DTI, 1999

في عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL يضاف الهيدروجين إلى الفحم الطيني المكون من مزيج الفحم المسحوق مع المذيب الراجع من عملية فصل المنتجات الهيدروكربونية. بعد ذلك يسخن المزيج ثم يدخل إلى مفاعل تكسير هيدروجيني يحتوي على عامل حفاز من النيكل مع المولبيديوم المحمول على الألومينا، حيث يميع المزيج في مفاعل ذي سرير نبضي Ebbled-Bed Reactor، وبدرجة حرارة تصل إلى 400-410 °م، وضغط 17 بار في حال استخدام لقيم من الفحم البيتوميني، وترتفع درجة الحرارة إلى أعلى من هذه القيمة في حال معالجة الفحم شبه البيتوميني. يقوم العامل الحفاز بدور منح الهيدروجين، وإذابة الفحم لتجزئة بنيته إلى مركبات أصغر.



تنتقل منتجات المفاعل الأول مباشرة إلى أسفل المفاعل الثاني الذي يعمل تحت ضغط مماثل لضغط المفاعل الأول، لكن بدرجة حرارة أعلى تصل إلى 430-440°م، ويحتوي أيضاً على عامل حفاز، ولكن ليس بالضرورة مماثل للعامل الحفاز المستخدم في المرحلة الأولى. بعد ذلك تسحب السوائل الهيدروكربونية الناتجة من المفاعل الثاني إلى عمود تقطير جوي لفصل المقطرات ذات درجة الغليان الأدنى من الدرجة 400 °م. أما منتج قاع عمود التقطير الجوي فيحتوي على مذيب وفحم غير متفاعل ومركبات معدنية، حيث يسحب إلى وحدة فصل المواد الصلبة، ثم يعاد جزء منه أو كله إلى مرحلة تحضير الفحم الطيني. (DTI, 1999)

تصل نسبة إنتاج المقطرات الهيدروكربونية من عملية التسييل المباشر بمرحلتين بوجود العامل الحفاز CTSL حتى 65% وزناً من إجمالي كمية الفحم اللقيم الجاف، وقد تزيد عن هذه القيمة في بعض الحالات.

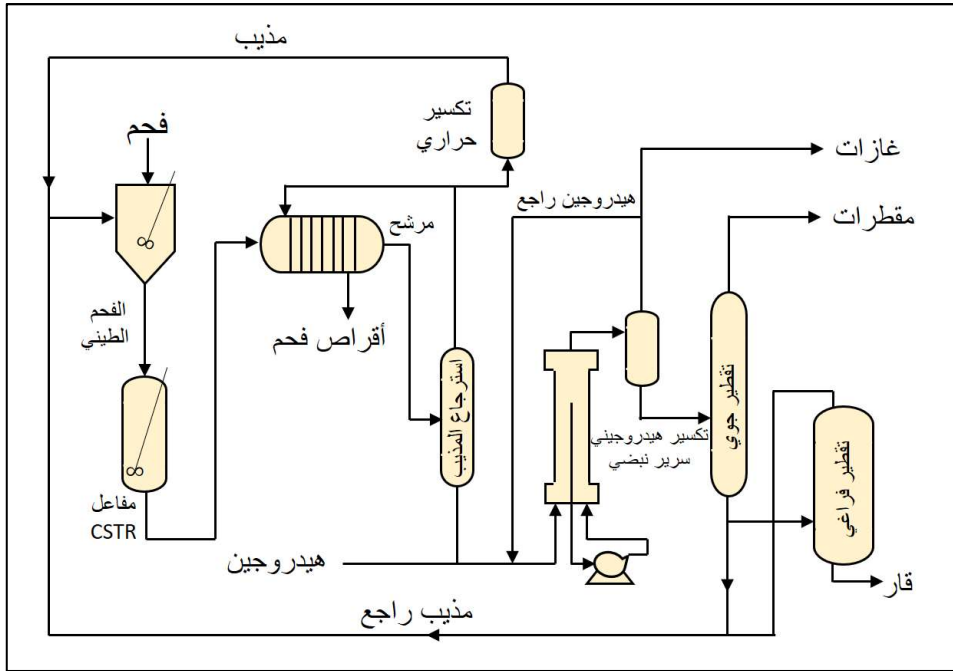
• عملية الاستخلاص بالمذيب السائل

طورت عملية الاستخلاص بالمذيب السائل LSE¹ من قبل مؤسسة الفحم البريطانية BCC² خلال الفترة ما بين عامي 1973-1995، حيث تم إنشاء وحدة تجريبية مصغرة طاقتها 2.5 طن/اليوم في منطقة شمال ويلز، عملت مدة أربع سنوات متواصلة إلى أن تم إيقافها. وعلى الرغم من قيام الشركة بإعداد تصاميم تفصيلية لوحدة تجريبية طاقتها 65 طن/اليوم، إلا أنه لم تظهر أية خطط لإنشاء مثل هذه الوحدة حتى هذا التاريخ. يبين الشكل 1-11 مخطط عملية الاستخلاص بالمذيب السائل LSE.

Liquid Solvent Extraction¹

British Coal Corporation²

الشكل 11-1: مخطط عملية الاستخلاص بالمذيب السائل LSE



المصدر: Mourit, F., & Kelly, J., 2014

في عملية LSE يحضر الفحم الطيني بمزج الفحم المسحوق مع المذيب الراجع من عملية فصل المنتجات الهيدروكربونية. ثم يمرر المزيج بعد ذلك إلى مرحلة الاختزال Digestion بدون عامل حفاز، والتي تتكون من مفاعلين أو أكثر على التسلسل، يحتوي كل منهما على خلاط للتحريك المستمر بدرجة حرارة تصل إلى 400-440 °م، وضغط يتراوح بين 10-20 بار، وهذا الضغط يهدف إلى تخفيف عملية تبخر المذيب، ولا يستخدم الهيدروجين في هذه المرحلة، حيث أن العامل الحفاز يقوم بدور مانح للهيدروجين بنسبة تصل حتى 2% وزنا من كمية الفحم. (DTI, 1999)

يبرد المنتج الخارج من مرحلة الاختزال جزئياً ثم ينقل إلى مرحلة الترشيح لفصل الفحم غير المتفاعل والرماد. وفصل السوائل الهيدروكربونية تغسل حشوات المرشح بالزيت الخفيف ثم تجفف تحت الضغط الفراغي. أما السوائل المنزوعة من حشوات



المرشح فتسحب إلى مرحلة التقطير لاسترجاع زيت الغسيل الخفيف، ثم يعاد تسخينه ويمزج معه الهيدروجين ليسحب إلى مفاعل نبضي، أو عدة مفاعلات موصولة على التسلسل.

تبرد المنتجات الخارجة من المفاعل ويخفض ضغطها، ثم تسحب إلى برج تقطير جوي للحصول على المقطرات الخفيفة التي تعاد إلى برج التقطير الرئيسي، ويعاد الباقي إلى مرحلة الفحم الطيني كمذيب. أما منتج أسفل برج التقطير فيسحب جزء منه إلى برج تقطير فراغي لنزع المركبات الخفيفة منه، وذلك لتحسين مواصفات الفار المنتج وإعادة جزء منه إلى مرحلة التكسير الحراري لاستخدامه كمذيب.

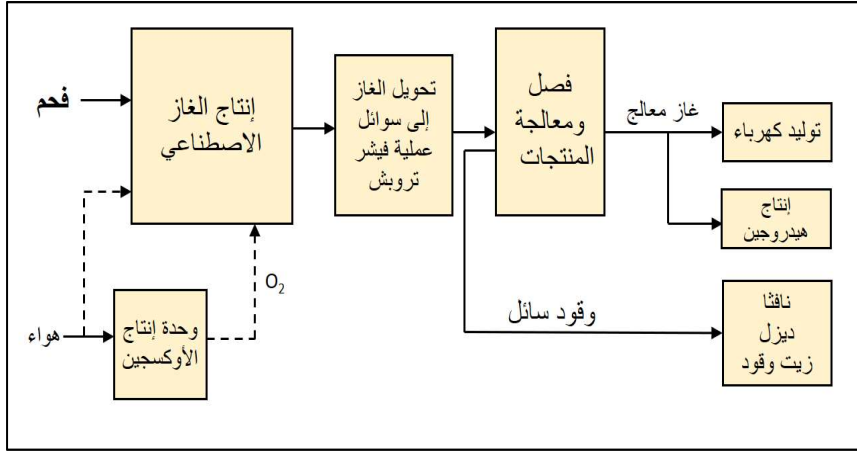
3-3-1: عملية التسييل غير المباشر

تتكون عملية التسييل غير المباشر Indirect Liquification من مرحلتين أساسيتين، يتم في المرحلة الأولى تحويل الفحم إلى غاز اصطناعي (مرحلة التغويز)، ثم تأتي عملية معالجة وتنقية الغاز الاصطناعي لتخليصه من المركبات الكبريتية التي تؤدي إلى تسمم العامل الحفاز في العمليات اللاحقة. أما المرحلة الثانية فتتكون من مفاعل يحتوي على عامل حفاز لتحويل الغاز الاصطناعي إلى منتجات هيدروكربونية سائلة في عملية فيشر- تروپش Fisher & Tropsh، التي طورت من قبل العالمين الألمانين فيشر وتروپش في العام 1925، ودخلت في طور الإنتاج التجاري في العام 1930.

يعمل مفاعل تحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل في ظروف منخفضة من درجات الحرارة والضغط لإنتاج السوائل الهيدروكربونية. ويمكن التحكم بنوعية المنتجات النهائية تبعاً لنوع العامل الحفاز المستخدم وظروف تشغيل المفاعل. فهي إما أن تكون من البارافينات Paraffins أو الهيدروكربونات الأوليفينية Olefinic Hydrocarbons، أو الكحولات Alcohols كالميثانول. يبين الشكل 1-12

مخطط عملية تسييل الفحم غير المباشر (Bartis, J., et al., 2008)

الشكل 12-1: مخطط عملية تسييل الفحم غير المباشر

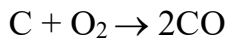
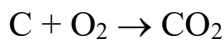


المصدر: Bartis, J., et al., 2008

طبقت تقنية التسييل غير المباشر في مناطق عديدة من العالم، وأشهرها مجمع ساسول SASOL في جنوب أفريقيا الذي يعمل منذ عام 1956، ويتكون من ثلاث وحدات تنتج الغازولين ووقود الديزل، ولقائم الصناعات البتروكيمياوية، والشموع.

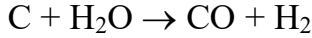
تعتمد نسبة غاز الهيدروجين H₂ إلى غاز أول أكسيد الكربون CO في الغاز الاصطناعي المنتج من مفاعل التغويز على كل من تركيز الهيدروجين والكربون في اللقيم، ونوع المغوز، ونوع العامل الحفاز المستخدم فيه. (Kerester, A., 2014)

تتكون عملية التغويز من خطوتين أساسيتين. في الخطوة الأولى تسخن المواد الكربونية لفصل الهيدروكربونات والقار والمواد الطيارة الأخرى، لتشكل الفحم النباتي Charcoal أما الخطوة الثانية فيجري فيها تحويل الفحم الخالي من المواد الطيارة إلى غاز اصطناعي، وهي عملية أكسدة جزئية، حيث يتفاعل الأوكسجين، أو الهواء الغني بالأوكسجين، مع المواد الكربونية الصلبة على النحو التالي: (EPRI, 2010)

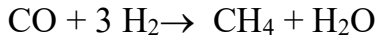
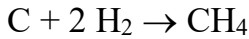




أما التفاعل مع البخار فيتم على النحو التالي:



يمكن توجيه التفاعل في شروط من درجات حرارة مرتفعة وضغط منخفض، للحصول على الميثان كما يلي:



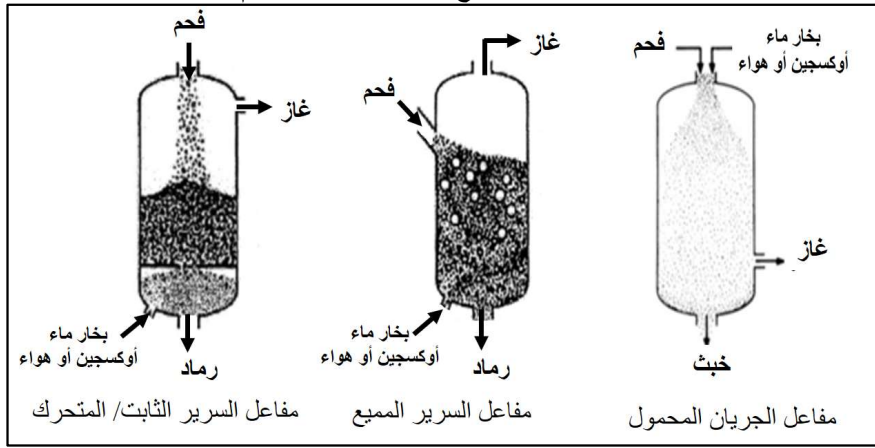
4-3-1: أنواع مفاعلات التغويز

يشكل مفاعل التغويز Gasifier الجزء الرئيسي من عملية تحويل الفحم والزيوت الثقيلة إلى غاز اصطناعي، وهو على شكل وعاء تتفاعل فيه اللقائم مع الأوكسجين أو الهواء في درجات حرارة مرتفعة. (Kerester, A., 2014)

يوجد أنواع عديدة من مفاعلات التغويز تختلف فيما بينها من حيث ظروف التشغيل، والتصميم الهندسي. كما تصنف مفاعلات التغويز تبعاً لمكان دخول اللقائم السائلة، أو الغازية، أو الصلبة إلى المفاعل، وطريقة التماس فيما بينها، أو حسب التصميم الهندسي لبنية المفاعل إلى ثلاث أنواع، مفاعلات السرير الثابت Fixed-Bed أو المتحرك Moving-Bed، ومفاعل التغويز بالسرير المميع Fluidized-Bed، ومفاعل التغويز بالجريان المحمول Entrained Flow. يبين الشكل 1-13 أنواع مفاعلات التغويز. كما يبين الجدول 1-4 مقارنة بين خصائص أنواع مفاعلات تغويز الفحم.



الشكل 1-13: أنواع مفاعلات تغويز الفحم



المصدر: Mathew, T., 2013

الجدول 4-1: مقارنة بين خصائص أنواع مفاعلات تغويز الفحم

سرير الجريان المحمول	السرير المميع	السرير الثابت	
0.4-2 ثانية	20-150 دقيقة	1-3 ساعة	زمن البقاء
أصغر من 100 ميكرون	6-10 مم	6-50 مم	حجم حبيبات الفحم
0.28-1.17	0.25-0.97	0.14-0.081	O2/فحم
0.10-1.20	0.11-1.93	0.28-3.09	بخار ماء/فحم
كافة الأنواع	كافة الأنواع غير القوالب	معظم الأنواع - بدون حبيبات ناعمة	نوع الفحم
1250-1600	900-1050	420-650	مجال درجة الحرارة °م
30-80	10-30	1-10	مجال الضغط (جوي)
نسبة الغازات المنتجة (مول %)			
65-95	60-80	40-70	CO + H2
0.1-2	3-5	5-15	CH4
300-550	300-400	250-320	القيمة الحرارية (وحدة بريطانية/ قدم مكعبة)
عالية	متوسطة	منخفضة	الكفاءة

المصدر: Mathew, T., 2015



• مفاعل السرير الثابت أو المتحرك

في مفاعل السرير الثابت يوضع الفحم على حوامل ثابتة بينما تمر مادة التغويز (البخار، أو الهواء، أو الأوكسجين) من الأسفل إلى الأعلى عبر الأسرة المثبتة، وتخرج الغازات المنتجة من قمة المفاعل. ويشترط في هذا النوع من المفاعلات أن تكون حبيبات الفحم خشنة لتأمين النفاذية الكافية لعبور مادة التغويز.

أما في مفاعل السرير المتحرك فينتقل الفحم ومادة التغويز باتجاهين متعاكسين، أي أن الفحم يتساقط من الأعلى بينما يتصاعد الغاز إلى الأعلى عبر أسرة الفحم. ويقسم المفاعل إلى جزئين رئيسيين، يتم في الجزء العلوي تجفيف الفحم (منطقة التجفيف) بينما يتم في الجزء السفلي تفاعلات التغويز (منطقة التغويز)، وبما أن درجة الحرارة في قمة المفاعل أخفض من الجزء السفلي يتولد من هذا المفاعل كمية سوائل هيدروكربونية أعلى نسبياً. وفي كلا النوعين من المفاعلات يكون زمن بقاء الفحم طويل نسبياً مقارنة بالأنواع الأخرى، وبالتالي يتوفر زمن طويل للتفاعل والتماس بين المواد داخل المفاعل. ينزع الرماد من أسفل المفاعل على شكل رماد جاف أو خبث. تتميز مفاعلات السرير الثابت أو المتحرك بالخصائص التالية: (Ratafia-Brown, J., et al., 2002)

- ✓ انخفاض معدل استهلاك المادة المؤكسدة.
- ✓ إمكانية معالجة لقائم مختلفة من السوائل الهيدروكربونية كالكوار والزيوت.
- ✓ ارتفاع الكفاءة الحرارية.
- ✓ لا يمكن معالجة فحم على شكل قوالب إلا بعد إجراء بعض التعديلات على تصميم المفاعل، كما توجد صعوبة في إمكانية معالجة الفحم الناعم.

• مفاعل الجريان المحمول Entrained Flow

لا يحتوي هذا المفاعل على سرير تحمل عليه المواد الصلبة، حيث يمزج الفحم المطحون على شكل حبيبات ناعمة مع تيار الغاز قبل حقنه في المفاعل، فيحدث الاحتراق



وتفاعل التغويز داخل حبيبات الفحم المحمولة في تيار الغاز. ولتحقيق متطلبات شروط تعليق ذرات الفحم في تيار الغاز يجب تأمين سرعة فراغية عالية للغاز الداخل، وضمان أبعاد متناهية الصغر لقطر حبيبات الفحم.

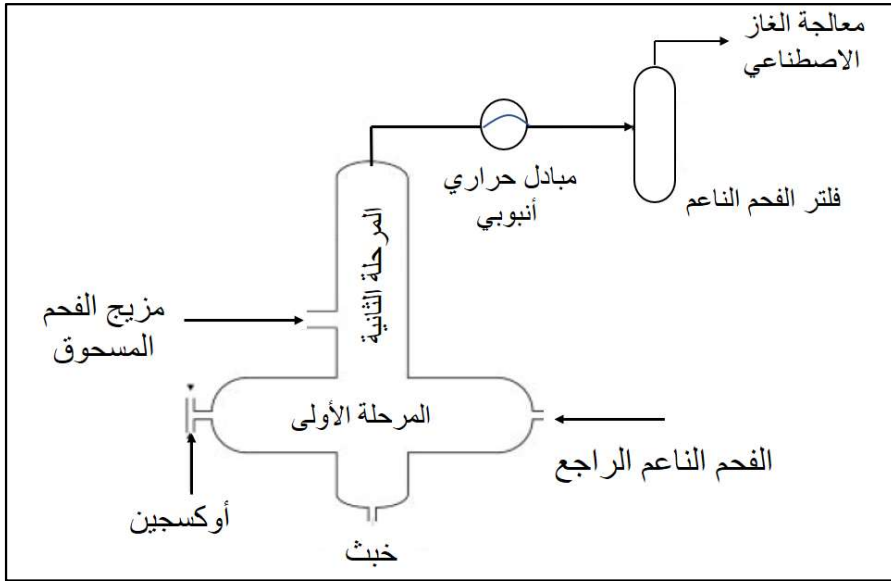
من خصائص مفاعل تغويز الجريان المحمول بأن زمن بقاء المواد المتفاعلة قصير جداً، لا يتجاوز بضعة ثواني، وهذا يستوجب العمل بدرجات حرارة مرتفعة للوصول إلى كفاءة التحويل المطلوبة في هذا الزمن القصير، وبالتالي تتطلب العملية استهلاك كمية أعلى من الأوكسجين.

يتميز مغوز الجريان المحمول أنه لا يتطلب أية شروط خاصة لمواصفات اللقيم المستخدم، على الرغم من أن ارتفاع نسبة الرطوبة والرماد في اللقيم يؤدي إلى ارتفاع نسبة استهلاك الأوكسجين إلى الحد الذي يجعل العملية غير اقتصادية مقارنة بالتقنيات الأخرى. (Lee, S., Speight, J., & Loyulka, S., 2015)

تعمل كافة مغوزات الجريان المحمول في درجة حرارة مرتفعة تصل إلى المجال 1330-1650°م، ويمكن أن يكون لها عدة تصاميم منها ما هو بمرحلة واحدة، ومنها ما هو بمرحلتين، ومنها ما يكون اتجاه الجريان من الأسفل إلى الأعلى أو بالعكس. (EPRI, 2010)

يهدف تصميم مغوز الجريان المحمول بمرحلتين إلى تحسين كفاءة التفاعل وخفض معدل استهلاك الهيدروجين، حيث أن الفحم الداخل إلى المرحلة الثانية يخفض درجة حرارة الغاز الاصطناعي الخارج، وبالتالي يسمح بتوجيه التفاعل نحو إنتاج كمية أعلى من الميثان. وتزداد نسبة إنتاج الميثان كلما زادت كمية الفحم الداخلة إلى المرحلة الثانية. يبين الشكل 1-14 مخطط مفاعل تغويز الجريان المحمول بمرحلتين.

الشكل 1-14: مخطط مفاعل تغويز الجريان المحمول بمرحلتين



المصدر: Nurthy, B., 2014 p.10

● مفاعل التغويز بالسريير المميع

يعمل مفاعل التغويز بالسريير المميع Fluidized Bed Gasifier على لقيم جاف ومطحون عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (550-1000 م°) وذلك لتفادي حدوث ظاهرة تكتل الرماد التي تؤدي إلى عدم انتظام حالة التميع في السريير. لهذا يجب أن تكون درجة انصهار رماد الفحم اللقيم أعلى من درجة حرارة التفاعل في مفاعل التغويز.

تشير الأبحاث العلمية إلى أن نوعي مفاعلات التغويز بالسريير الثابت والمميع غير مناسبين لتغويز الفحم البترولي، بينما يتميز مفاعل الجريان المحمول بكفاءة أعلى ونسبة تحويل عالية للكربون، وذلك للأسباب التالية: (Nurthy, B. et al, 2014)

✓ شدة الحساسية لتغير حجم حبيبات الفحم، حيث أن مفاعلي السريير الثابت والمميع يشترط فيهما أن يكون الفحم اللقيم على شكل حبيبات كبيرة الحجم وذات قابلية تفاعل عالية، وذلك للمحافظة على النفاذية Permeability عبر السريير الثابت،



كما تتطلب شروطاً صارمة بالنسبة لخاصية المتانة الفيزيائية وسلوك التحول إلى فحم الكوك Coking لحبيبات الفحم اللقيم.

✓ بما أن المفاعلين يعملان في درجات حرارة منخفضة فإنهما مناسبين للفحم الذي يتميز بقابلية تفاعل أعلى، كالليغنيت والفحم البني، أو الأنواع التي تحتوي على مركبات طيارة لا عضوية ضارة يمكن أن تسبب تآكل المعادن عند درجات الحرارة المرتفعة.

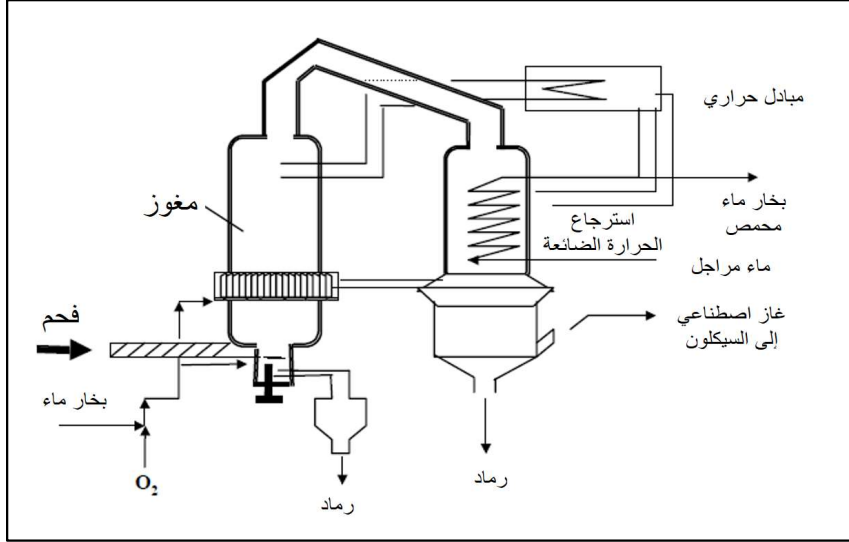
• عمليات التغويز بمفاعل السرير المميع

تعتبر عملية وينكلر Winkler من أقدم عمليات تحويل الفحم التي تستخدم مفاعل التغويز بالسرير المميع منذ أن طورت في أوروبا في عشرينيات القرن العشرين. في هذه العملية يجفف الفحم المسحوق قبل إدخاله إلى المفاعل بواسطة ملقم حلزوني متغير السرعة Variable Speed Screw Feeder. يعمل المفاعل في مجال درجة حرارة 815-1000°م، وتحت الضغط الجوي، فتتفاعل ذرات الفحم مع الأوكسجين وبخار الماء لتنتج غاز غني بالهيدروجين وأول أكسيد الكربون، ونظراً لارتفاع حرارة التفاعل فإن كمية السوائل والقار الناتجة تكون قليلة جداً.

يحول الغاز المنتج إلى وحدة غسيل بالماء، ثم إلى سيكلون ومنه إلى مرسب كهروستاتيكي، وذلك لتخليصه من الرماد العالق فيه، والذي يشكل حوالي 70% من كمية الرماد الناتج من العملية. (Harris, D., and Roberts D., 2013)

لتفادي انصهار ذرات الرماد بتأثير درجة الحرارة المرتفعة، ومنع تراكم الرواسب في مخرج المفاعل يبرد الغاز إلى الدرجة 150-205°م بواسطة مبادل حراري. ويستفاد من الحرارة الضائعة في توليد بخار الماء. بعد ذلك يسحب الغاز الاصطناعي النظيف إلى خارج الوحدة. يبين الشكل 1-15 مخطط عملية تغويز وينكلر.

الشكل 1-15: مخطط عملية تغويز وينكلر



المصدر: Lee, S., Speight., & Loyalka, S. 2015

تتميز عملية وينكلر بالخصائص التالية:

- ✓ إمكانية معالجة لقائم متنوعة من الفحم، تتدرج من فحم اللغنيث إلى الفحم البترولي.
- ✓ إمكانية تغويز الفحم الحاوي على نسبة عالية من الرماد دون مواجهة صعوبات.
- فعلى الرغم من أن استخدام فحم يحتوي على نسبة عالية من الرماد يؤدي إلى زيادة نسبة الرواسب والمواد غير القابلة للاحتراق، إلا أن انخفاض ثمنها يعطي للعملية ميزة اقتصادية.
- ✓ إمكانية تغويز لقائم سائلة كالزيوت الثقيلة إضافة إلى الفحم، حيث أن إضافة الوقود السائل يساهم في تحسين القيمة الحرارية للغاز الاصطناعي المنتج، وبالتالي تعزيز المردود الاقتصادي للعملية.
- ✓ مرونة التشغيل عند نطاق واسع من معدلات الطاقة الإنتاجية، حيث يمكن تخفيض معدل الطاقة الإنتاجية إلى الحد الذي يحافظ على تمييع الفحم، والحد الأقصى الذي يضمن صهر كامل كمية الرواسب المتبقية.



✓ سهولة توقيف العملية خلال دقائق معدودة من خلال قطع تيار الأوكسجين والفحم الداخل.

✓ سهولة إجراء عمليات الصيانة لمفاعل التغويز، وذلك لبساطة تركيبه حيث أنه يتكون من الداخل من جدار مبطن بالقرميد يحتوي على محقن لغاز التفاعل قابل للفك بسهولة.

• عمليات التغويز بمفاعل السرير الثابت

تعتبر عمليات التغويز التي تستخدم مفاعل التغويز بالسرير الثابت من العمليات القديمة التي صممت لتغويز أنواع رخيصة من الفحم لإنتاج غاز منخفض القيمة الحرارية، يصلح للاستخدام كوقود للتدفئة أو لتوليد الطاقة الكهربائية. أحد الأمثلة على عمليات التغويز التي تستخدم مفاعل السرير الثابت عملية ويلمان غالوشا.

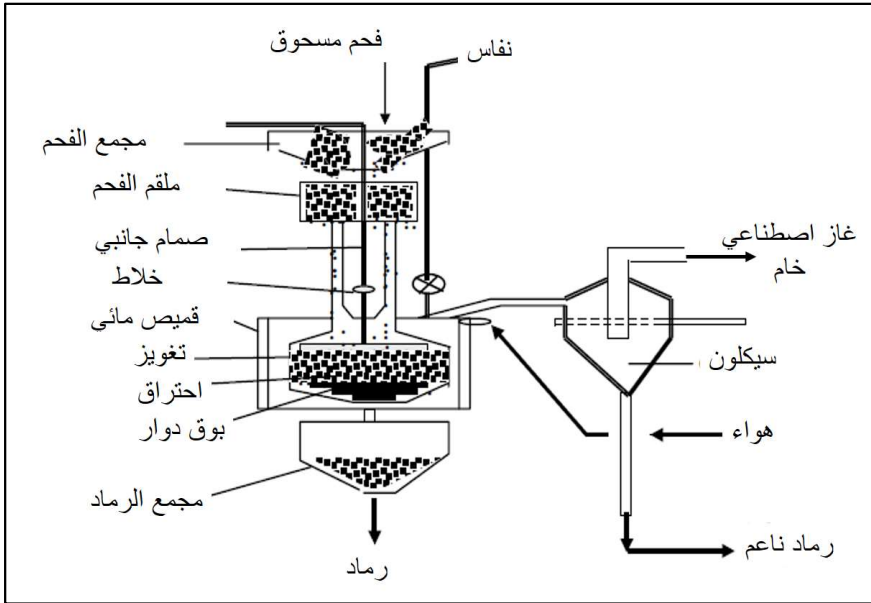
تطبق عملية تغويز ويلمان غالوشا Wellman-Galusha على نطاق تجاري منذ أكثر من أربعين عاماً، ويمكن أن تنتج نوعين من الغاز، الأول غاز منخفض القيمة الحرارية عند استخدام الهواء كمادة تغويز، والثاني غاز اصطناعي متوسط القيمة الحرارية عند استخدام الأوكسجين كمادة تغويز. تصنف عملية ويلمان غالوشا تحت مجموعة عمليات التغويز التي تستخدم مفاعل السرير الثابت، وقد طور المفاعل بإضافة خلاط لتحريك المواد وتعزيز كفاءة التفاعل. يغلف هيكل المفاعل بقميص مائي، وبالتالي لا يحتاج السطح الداخلي للمفاعل إلى تبطين بالقرميد.

يعمل المفاعل بدرجة حرارة 540-650 °م وتحت الضغط الجوي. يلغم الفحم المسحوق إلى أعلى المفاعل عبر أنبوب عمودي، بينما يدخل الهواء وبخار الماء من أسفل السرير الثابت، عبر فوهات نفخ. يحتوي المفاعل على حاجز حديدي في الأسفل لإزالة الرماد بشكل منتظم، حيث يدخل مزيج بخار الماء والهواء من أسفل الحاجز المعدني إلى

السرير الثابت لينتشر عبر الرماد، مروراً بمنطقة الاحتراق ثم عبر منطقة التغويز. كما يمرر الغاز المنتج عبر فاصل على شكل سيكلون لتخليصه من ذرات الرماد العالقة.

يتكون الغاز الاصطناعي المنتج من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون والميثان والنتروجين وثاني أكسيد الكربون، وذلك عند استخدام الهواء كمادة تغويز، أما عند استخدام الأوكسجين فتتخفض نسبة النتروجين ويتحول الغاز من منخفض القيمة الحرارية إلى متوسط القيمة الحرارية. يبين الشكل 16-1 مخطط عملية التغويز بالسرير الثابت ويلمان غالوشا.

الشكل 16-1: مخطط عملية التغويز بالسرير الثابت ويلمان غالوشا



المصدر: Visagie, J. 2008

• عمليات التغويز بمفاعل الجريان المحمول

يوجد عدة أنواع لعمليات التغويز بالجريان المحمول تمنح المستخدم إمكانية اختيار النوع الذي يناسبه من حيث الأداء الاقتصادي والتشغيلي، ومدى تلبية متطلبات التشريعات البيئية. بعض العمليات تعمل على مبدأ اللقيم الجاف مثل عمليات شركة شل Shell،



وسمينز Siemens ، وأهدي Uhde، وتي بي آر أي TPRI ، وبعضها الآخر يعمل بطريقة اللقيم الطيني مثل عمليات شركة تكساكو، Texaco، و جي إي GE، وكونوكو فيليبس Conoco Philips. تعتبر عمليات التغويز بمفاعل الجريان المحمول الأكثر ملاءمة للقائم المنتجة من مصافي النفط، وذلك نظراً لإمكانية عملها في درجات حرارة مرتفعة، حيث يمكنها تغويز لقائم ذات قابلية تفاعل منخفضة مثل الفحم البترولي، والفحم المنتج من عمليات تكرير رمال القار. (Nurthy, B., 2014)

○ عملية تغويز شركة كونوكو فيليبس E-Gas

تطبق عملية التغويز E-Gas على نطاق تجاري منذ أكثر من ثلاثين عاماً، كإحدى التقنيات المتطورة لتحويل الفحم إلى غاز طبيعي اصطناعي¹ SNG يستخدم كوقود لتوليد الطاقة الكهربائية، وإنتاج هيدروجين، إضافة إلى إنتاج مواد كيميائية. طورت هذه التقنية من قبل شركة كونوكو فيليبس وأدخلت عليها العديد من التطورات تركز معظمها في تحسين كفاءة العملية وتعزيز إجراءات خفض الأثر البيئي. (CBI, 2015)

يطحن الفحم اللقيم مع الماء لتحويله إلى الشكل الطيني، ثم يسحب بواسطة مضخة، ويلتقي مع تيار أوكسجين عالي النقاوة بواسطة خلاط، ثم يحقن المزيج في المرحلة الأولى لمفاعل الجريان المحمول، حيث يخضع لدرجات حرارة عالية إلى الحد الكافي للوصول برماد اللقيم الصلب إلى أعلى من درجة الانصهار Melting Point.

يتساقط الرماد المائع عبر فوهات متركزة في أسفل المرحلة الأولى من المفاعل إلى مبرد مائي Water Quench فيتحول إلى خبث زجاجي خامل، حيث يتم فصله بطريقة مستمرة من أسفل المفاعل، بينما يفصل الكربون الراسب في مياه الخبث لإرجاعه إلى منطقة التغويز بهدف إخضاعه لعملية تحويل مرة ثانية.

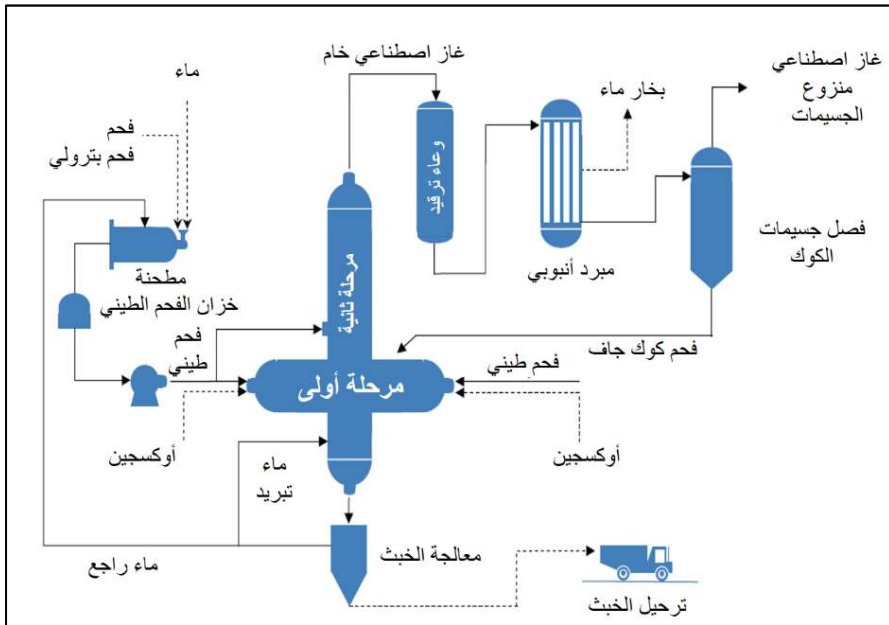
¹ Synthetic Natural Gas

ينطلق الغاز الاصطناعي المنتج من المرحلة الأولى إلى المرحلة الثانية للمفاعل، حيث تحقق كمية إضافية من مزيج الفحم الطيني، فيتحلل الفحم حرارياً بتأثير الحرارة المرتفعة للغاز الاصطناعي في تفاعل ماص للحرارة Endothermic reaction، وذلك لتحسين كفاءة التحويل الإجمالية لعملية التغويز.

ينطلق الغاز الاصطناعي المنتج من المرحلة الثانية للمفاعل إلى مبرد، حيث تتم الاستفادة من الحرارة الممتصة في توليد بخار ماء عالي الضغط، ثم يمرر الغاز البارد عبر مرشح أنبوبي لتخليصه من الجسيمات الفحمية الناعمة، وإعادتها إلى مفاعل التغويز لتحويل الكربون الموجود في هذه الجسيمات إلى غاز اصطناعي. أما الغاز الاصطناعي الخارج من المرشح فيسحب إلى وعاء غسيل بالماء لتخليصه من الكلوريدات، ثم يرسل إلى خارج حدود الوحدة للاستفادة منه كوقود أو إخضاعه لعمليات تصنيع أخرى. **الشكل 17-1**

مخطط عملية تغويز مفاعل الجريان المحمول بمرحلتين E-Gas

الشكل 17-1: مخطط عملية تغويز مفاعل الجريان المحمول بمرحلتين E-Gas



المصدر: CBI, 2015



تتميز عملية التغويز E-Gas بالعديد من الخصائص التي تجعلها إحدى أكثر عمليات تحويل الزيوت الثقيلة إلى غاز اصطناعي كفاءة وانتشاراً. من أهم هذه الخصائص ما يلي: (Faegh, A., et al., 2015)

- ✓ تحتوي عملية E-Gas على منظومة متطورة لتحضير اللقيم تساهم في رفع كفاءة تحويل الكربون إلى أعلى من 99%.
- ✓ وجود حراقات دائمة الاشتعال للمحافظة على درجة حرارة مفاعل التغويز في حالة جاهزية، ولضمان سلامة وسهولة عمليات تشغيل أو إعادة تشغيل المجمع.
- ✓ استمرار عملية إزالة الخبث بواسطة منظومة بسيطة، ولا تحتاج إلى عمليات صيانة مكلفة.
- ✓ دور خصائص تصميم مفاعل التغويز بمرحلتين في تحسين القيمة الحرارية للغاز الاصطناعي المنتج، إضافة إلى تحسين كفاءة استخدام الطاقة.
- ✓ دور التصميم الفريد لمبرد الغاز الاصطناعي في تعظيم الاستفادة من الحرارة الضائعة من خلال إنتاج بخار ماء عالي الضغط كمنتج عالي القيمة، مما يؤدي إلى خفض تكاليف التشغيل الإجمالية للعملية.
- ✓ ميزات عملية إزالة الجسيمات الصلبة الدقيقة والجافة واسترجاعها إلى منظومة التغويز التي تساهم في تحسين كفاءة تحويل الكربون، وتفادي تشكل الماء الأسود أو الرمادي، وبالتالي عدم تشكل مياه ملوثة تحتاج إلى عمليات معالجة مكلفة.
- ✓ إمكانية تدوير المياه الملوثة المنتجة من عمليات أخرى خارج مجمع عملية التغويز، إلى مفاعل التغويز.



• عملية تغويز شركة شل بمفاعل الجريان المحمول

طورت عملية شل لتغويز الفحم¹ SCGP في عقد الخمسينيات من القرن الماضي، ثم بدأ إنشاء الوحدات التجريبية في السبعينيات والثمانينيات في كل من هولندا وألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية إلى أن وصل عدد الوحدات العاملة على نطاق تجاري إلى 28 وحدة في عام 2015. (Berg, R., Chen, Z., & Chua, S. 2015)

يستخدم غاز النيتروجين الخامل كوسط حامل لنقل مسحوق الفحم الجاف، بقطر حبيبات لا يزيد عن 90 ميكرو متر، إلى مفاعل التغويز ذي الجريان المحمول، المزود بتصميم خاص لاحتوائه على حراقات عديدة، وجدار مكون من أنابيب عالية الضغط تساهم في فصل آمن للرماد والغاز الاصطناعي بكفاءة عالية، بأقل تكاليف صيانة ممكنة.

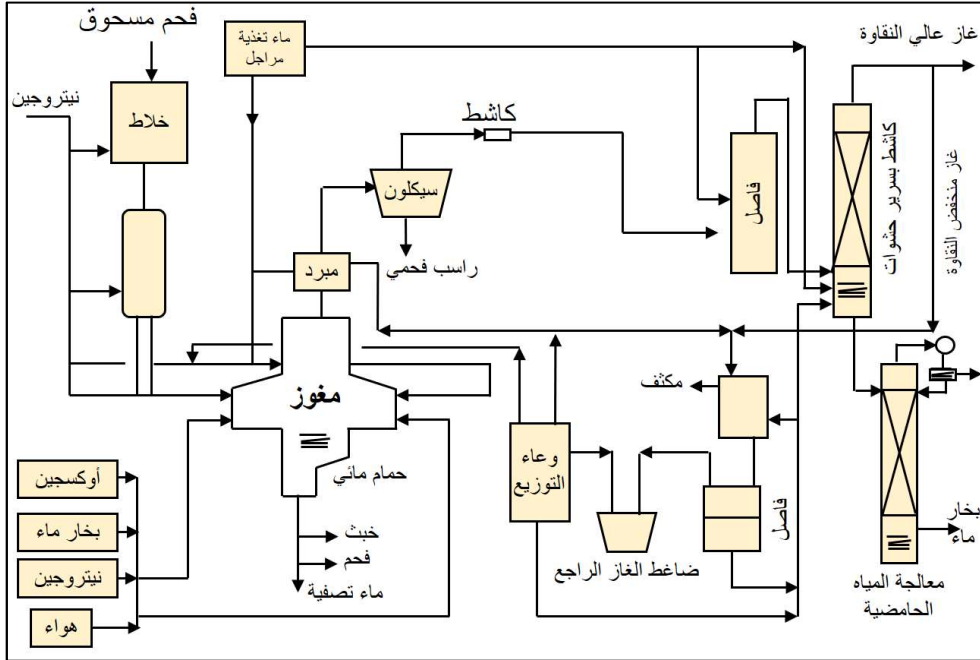
يلتقي مزيج مسحوق الفحم الجاف مع الأوكسجين والبخار قبل دخوله إلى المغوز، حيث تصل درجة حرارة اللهب إلى 1800-2000 °م، وضغط تشغيلي حوالي 30 بار، فيتفاعل المزيج، ويتساقط الرماد المنصهر إلى الأسفل ليمر عبر حمام مائي، حيث يمكن استخلاصه على شكل صلب، وبالتالي يمكن خفض نسبة الملوثات في المياه الخارجة من المفاعل. (Shell, 2010)

قبل خروج الغاز الاصطناعي من قمة المغوز يخضع لعملية تبريد بالماء إلى الدرجة 900 °م، ثم يبرد ثانية في مبرد خارجي، حيث يستفاد من الحرارة الكامنة في توليد بخار ماء عالي ومتوسط الضغط كمنتج ثانوي عالي القيمة، بعد ذلك يمرر الغاز الاصطناعي المنتج عبر كاشط وسيكلونات لتخليصه من الرماد العالق فيه، حيث يعاد الرماد مع الكربون غير المتفاعل إلى قسم التغويز.

¹ Shell Coal Gasification Process

يتكون الغاز الاصطناعي من أول أكسيد الكربون بنسبة 62-63%، وهيدروجين بنسبة 28%، مع كمية بسيطة من ثاني أكسيد الكربون. يبين الشكل 1-18 مخطط عملية تغويز شل بمفاعل الجريان المحمول.

الشكل 1-18: مخطط عملية تغويز شل بمفاعل الجريان المحمول



المصدر: Berg, R., Chen, Z., & Chua, S. 2015

ساهمت أعمال البحث والتطوير في ابتكار تقنيتين لتغويز الفحم بطريقة Shell ، سميت الأولى عملية تغويز شل¹ SGP تهدف إلى تحويل مخلفات التكرير الثقيلة إلى غاز اصطناعي، والثانية عملية شل لتغويز الفحم SCGP، وتهدف إلى تحويل اللقائم الهيدروكربونية الصلبة مثل الفحم البترولي والفحم البيتوميني وفحم الأنتراسيت



وفحم الليغنيت (الفحم البني) إلى غاز اصطناعي. وتتميز عملية شل بالخصائص التالية:

(Lee, S., Speight, J., & Loyalka, S. 2015)

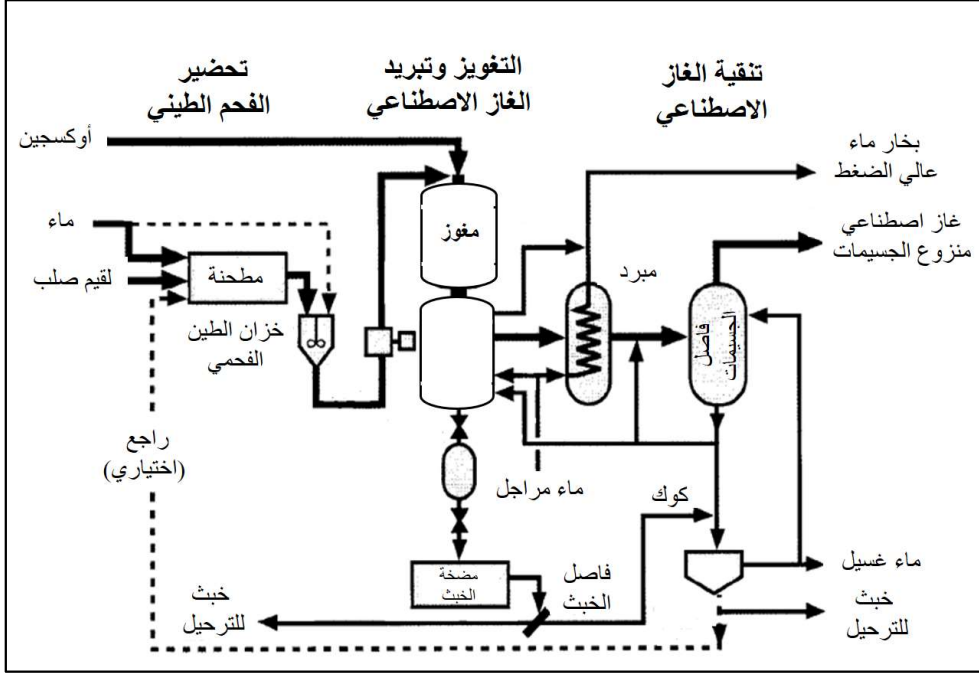
- ✓ ارتفاع الكفاءة الحرارية إلى المجال 75-80%
- ✓ ارتفاع كفاءة استرجاع الطاقة الحرارية الضائعة من خلال إنتاج بخار ماء محمص عالي الضغط¹.
- ✓ إنتاج غاز اصطناعي نظيف، وبأقل كمية من المنتجات الثانوية.
- ✓ إمكانية إنشاء وحدات ذات طاقة إنتاجية عالية تساهم في تخفيض تكاليف الإنشاء والتشغيل من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم.
- ✓ ذات أثر بيئي متوافق مع متطلبات التشريعات الخاصة بحماية البيئة من التلوث.

● عملية تغويز تكساكو بمفاعل الجريان المحمول

تستخدم عملية تغويز تكساكو Texaco مغوز من نوع الجريان المحمول تحت ضغط عال نسبياً بواسطة حقن الأوكسجين أو الهواء مع بخار الماء بجريان متوافق. يمزج الفحم المسحوق بالزيت أو الماء ليصبح على شكل مزيج طيني قابل للضخ. يحقن المزيج الطيني في أعلى مغوز عمودي يتكون من وعاء يعمل بضغط عالية، ومبطن بجدار قرميدي. تطبق هذه العملية بشكل أساسي للحصول على غاز اصطناعي غني بغاز أول أكسيد الكربون إضافة إلى ثاني أكسيد الكربون، والهيدروجين، وكمية قليلة من الميثان، بينما لا يحتوي على زيت أو قار نظراً لأن العملية تتم في درجة حرارة مرتفعة. يبين الشكل 19-1 مخطط عملية تغويز تكساكو.

High Pressure Superheated Steam¹

الشكل 1-19: مخطط عملية تغويز تكساكو



المصدر: Shilling, N., 2010

يعمل مغوز تكساكو في درجة حرارة تتراوح ضمن المجال 1100-1370 °م، وضغط 20-85 بار، وهو نسخة مطورة من عملية الأكسدة الجزئية التي طورتها الشركة، وأثبتت كفاءة عالية في تغويز النفط الخام والهيدروكربونات الأخرى. الخاصة الرئيسية التي تميز عملية تكساكو هي استعمال الفحم اللقيم على شكل طيني مما يساهم في تبسيط إجراءات تشغيل عملية تحضير اللقيم الداخل إلى المغوز.

يتكون مغوز تكساكو من وعاء عمودي يحتوي في الأعلى على غرفة أكسدة جزئية مبطنة بالقرميد الحراري، وفي الأسفل يحتوي على مبرد مائي لتبريد الخبث المنصهر والغازات الناتجة. كما يستفاد من الحرارة الضائعة في توليد كمية كبيرة من بخار الماء، مما يساهم في تحسين الكفاءة الحرارية للعملية. كما تتميز عملية تكساكو بخاصة أخرى تساهم في تعزيز الكفاءة الحرارية للمغوز، وهي انخفاض نسبة الماء في



الفحم الطيني التي تساعد على خفض استهلاك الأوكسجين اللازم لتبخير المياه في اللقيم المكون من الماء ومسحوق الفحم.

يسحب الخبث الخارج من مرحلة التبريد إلى عمليات معالجة أخرى. أما الغاز الاصطناعي المنتج فيسحب من مرحلة الفصل إلى مرحلة المعالجة لتخليصه من ذرات الكربون والرمد، حيث يتم إرجاعها إلى منظومة تحضير الطين الفحمي، ثم يسحب الغاز النظيف إلى وحدات المعالجة.

5-3-1: مقارنة بين عمليات التسييل المباشر وغير المباشر

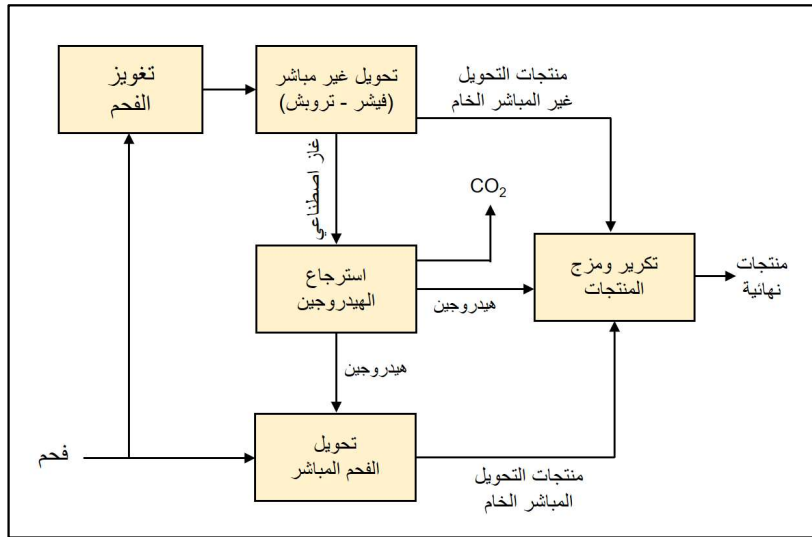
على الرغم من تعقيد عمليات التسييل غير المباشر إلا أن لها مزايا وخصائص تجعلها أفضل من عمليات التسييل المباشر، وذلك للأسباب التالية:
(Minchener, A., 2011)

- يستخدم الأوكسجين وبخار الماء في عملية التسييل غير المباشر لكي تتم تفاعلات تكسير جزيئات الفحم وتحويلها إلى سوائل، بينما تحتاج عملية التسييل المباشر إلى الهيدروجين.
- يمكن نزع المواد غير المرغوبة من الغاز الاصطناعي المنتج، كالمركبات الكبريتية بسهولة في عملية التسييل غير المباشر.
- تتميز عملية التحويل غير المباشر بإمكانية استخدام لقائم متنوعة أخرى كالفحم البترولي والمخلفات البترولية الثقيلة، والغاز الطبيعي، والكتلة الحيوية.
- تصل قيم الضغط ودرجة حرارة التفاعل في عملية التسييل المباشر إلى مستويات أعلى من عملية التسييل غير المباشر.
- على الرغم من سهولة وبساطة تطبيق تقنيات التقاط وتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعث من عملية التسييل غير المباشر إلا أن عملية التسييل المباشر تتميز بكفاءة حرارية أعلى، ونسبة انبعاثات أدنى.



- تتكون منتجات عملية التحويل المباشر للفحم من الناфта والمقطرات الوسطى، لكنها تختلف عن منتجات عملية التحويل غير المباشر في أنها غير قابلة للاستهلاك المباشر إلا بعد معالجتها وتحسين خصائصها، نظراً لاحتوائها على نسبة عالية من العطريات والهيدروكربونات الحلقية، ونسبة منخفضة من الهيدروجين.
 - تتميز عملية التسييل غير المباشر بإمكانية الحصول على مواد كيميائية يمكن استخدامها كلقائم في صناعة البتروكيماويات، علاوة على إنتاج وقود النقل.
- ولتعظيم الاستفادة من مزايا الطريقتين، وتقادي سلبياتهما، صممت عملية سميت بعملية التحويل الهجينة Hybrid Conversion، وذلك من خلال دمج كلا عمليتي التسييل المباشر وغير المباشر. يبين الشكل 1-20 مخطط عملية التحويل الهجينة.

الشكل 1-20: مخطط عملية التحويل الهجينة



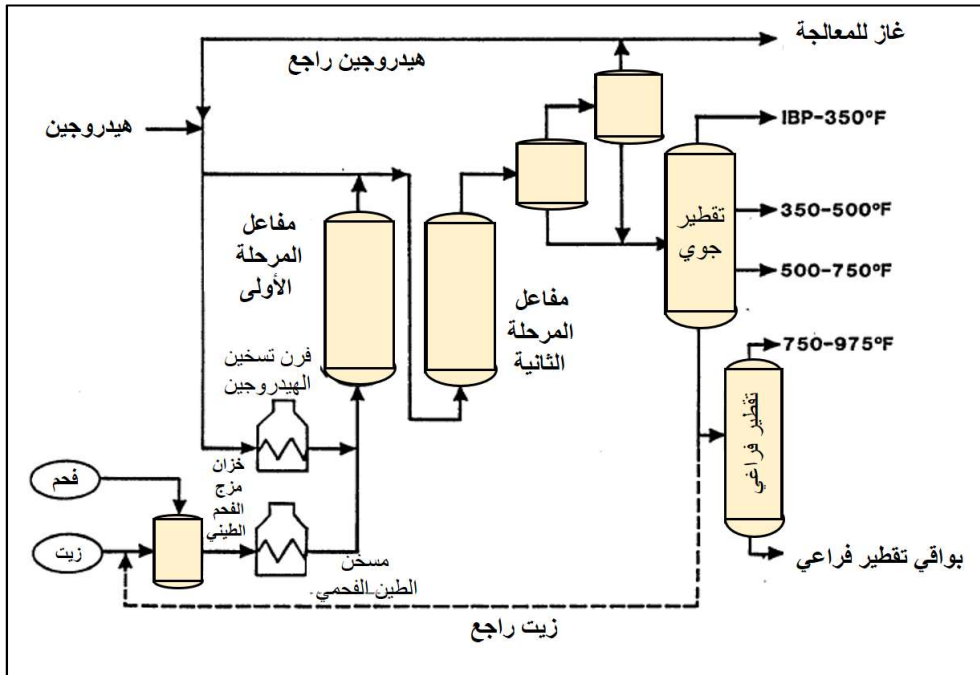
المصدر: Miller, C., 2007

1-3-6: عمليات التحويل المشتركة

تختلف العمليات المشتركة Co-Processing عن عمليات تسييل الفحم العادية من حيث إمكانية تحويل لقائم تتكون من سوائل هيدروكربونية مشتقة من مصادر أخرى

غير الفحم إضافة إلى عملية تحسين خصائص الفحم في آن واحد. كما تختلف العمليات المشتركة عن غيرها من العمليات في أنها تستخدم في معظم الحالات لقائم هيدروكربونية ثقيلة ذات درجات غليان مرتفعة، أو منتجات نفطية منخفضة القيمة مثل البيتومين، والقار، أو النفط الخام الثقيل جداً، أو مخلفات عمليات تقطير النفط التقليدية، لتقوم بدور العامل المساعد على تكوين الطور الطيني، إضافة إلى دورها كوسط ناقل للفحم بدلاً من المذيب المستخدم في عمليات التسييل الأخرى، ويمكن أن تكون العملية بمرحلة واحدة أو مرحلتين، وبالتالي يمكن القول أن معظم السوائل الهيدروكربونية الناتجة من هذه العمليات مشتقة من النفط أكثر من الفحم، وهذا ما يجعل الهدف الرئيسي لعمليات التحويل المشتركة هو تكامل عمليات تسييل الفحم مع عمليات تحويل مخلفات التكرير الثقيلة إلى منتجات عالية القيمة في مصافي النفط. **الشكل 1-21** مخطط عملية التحويل المشتركة.

الشكل 1-21: مخطط عملية التحويل المشتركة



المصدر: (Gillis, D., VanWees, D., Zimmerman, P., 2009)



تتميز عمليات التحويل المشتركة بانخفاض التكاليف الاستثمارية، كما أن إضافة الهيدروكربونات المشتقة من النفط تحسن من اقتصادية العملية من خلال خفض سعر اللقيم. (Duddy, J., McLean, J., and Smith, T., 2007)

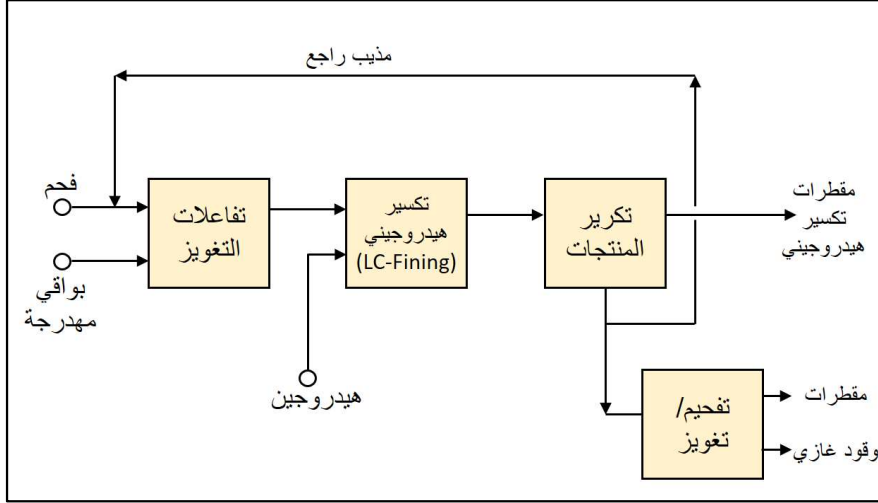
• عملية لوماس كريست المشتركة **Lumms Crest Co-processing**

طورت عملية لوماس كريست المشتركة في النصف الأول من عقد الثمانينيات، بإنشاء وحدة تجريبية مصغرة طاقتها 0.25 طن/اليوم، وهي عملية مقتبسة من عملية التحلل الحراري المتكاملة بمرحلتين ITSL¹ التي طورتها شركة لوماس كريست. كما تتميز هذه التقنية في أن المنتجات البترولية الثقيلة تهرج قبل استخدامها كمذيب ووسط حامل للفحم الطيني. وهذه الخاصة تساهم في توفير الهيدروجين الذي يؤدي إلى تحلل الفحم وخفض فرص حدوث تفاعلات التفحيم وإعادة البلمرة.

يمزج الفحم الناعم مع المخلفات البترولية المهدرجة، ثم يسحب المزيج إلى مفاعل لا يحتوي على عامل حفاز، حيث أن زمن التفاعل فيه قصير، ويعمل بدرجة حرارة 430-450 °م، وضغط 140 بار. تؤخذ نواتج التفاعل إلى مفاعل بسرير نبضي يعمل بظروف مماثلة من درجة الحرارة والضغط بوجود عامل حفاز للمعالجة الهيدروجينية.

تصل نسبة تحويل الفحم في هذه العملية إلى 95% وزناً من كمية الفحم الجاف الخالي من الرماد. أما كفاءة تحويل المخلفات البترولية الثقيلة فلا تتجاوز 70-80%. كما تتراوح نسبة إنتاج المقطرات الهيدروكربونية ضمن المجال 50-55% من كمية اللقيم. يبين الشكل 1-22 مخطط عملية التحويل المشتركة لوماس كريست.

الشكل 1-22: مخطط عملية التحويل المشتركة لوماس كريست



المصدر: Miller, C., 2007

• عملية التحويل المشتركة CANMET

طبقت عملية CANMET لأول مرة على نطاق تجاري في عام 1985 كوحدة تكسير هيدروجيني للزيوت الثقيلة في مصفاة شركة بتروكندا Petro-Canada في مونتريال بطاقة قدرها 5000 برميل/اليوم. ثم حولت الوحدة بعد ذلك إلى عملية تحويل مشتركة بتمويل من ثلاث شركات هي رينبرون أ.ج Rheinbraun A.G، ومؤسسة أموكو Amoco Corporation، وهيئة ألبرتا لأبحاث وتكنولوجيا رمال القار AOSTRA.

يمزج الفحم المطحون مع العامل الحفاز القابل للاستخدام مرة واحدة، ومخلفات التقطير الفراغي المنتجة من المصفاة أو البيتومين، ثم يضاف الهيدروجين إلى المزيج الناتج ليُدخل بعد ذلك إلى مفاعل ذي مرحلة واحدة يعمل بدرجة حرارة ضمن المجال 440-460 °م، وضغط 100-150 بار، وتبلغ نسبة الفحم حوالي 30-40% وزناً من إجمالي اللقيم. تسحب السوائل الخارجة من المفاعل إلى برج تقطير لفصلها إلى مقطرات قابلة للتقطير ومخلفات غير قابلة للتقطير. يمكن أن تصل كفاءة تحويل الفحم في هذه



العملية إلى 98% على إجمالي كمية الفحم الجاف الخالي من الرماد. كما يمكن أن تصل كفاءة تحويل مخلفات التقطير الفراغي والبيتومين حتى 70%. ويمكن أن تصل نسبة إنتاج المقطرات من العملية لغاية 80% من إجمالي اللقيم على أساس الفحم الجاف والخالي من الرماد.

1-4-4: عمليات معالجة وتنقية الغاز الاصطناعي

يحتوي الغاز الاصطناعي المنتج من عملية تحويل الفحم على العديد من الغازات غير المرغوبة التي يمكن أن تخفض من قيمته الحرارية، علاوة على الشوائب الأخرى كالجسيمات الدقيقة Particulates التي يمكن أن تؤدي إلى حدوث أضرار جسيمة في وحدات استغلال الغاز الاصطناعي. وتتوقف نسبة الشوائب والغازات غير المرغوبة على عوامل عديدة كخصائص اللقيم أو ظروف تشغيل عملية التغويز. فعلى سبيل المثال، تزداد نسبة غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S ، الذي يعتبر من أكثر المركبات غير المرغوبة في الغاز الاصطناعي، بارتفاع نسبة الكبريت في الفحم اللقيم. وفيما يلي شرح مبسط لأهم عمليات المعالجة.

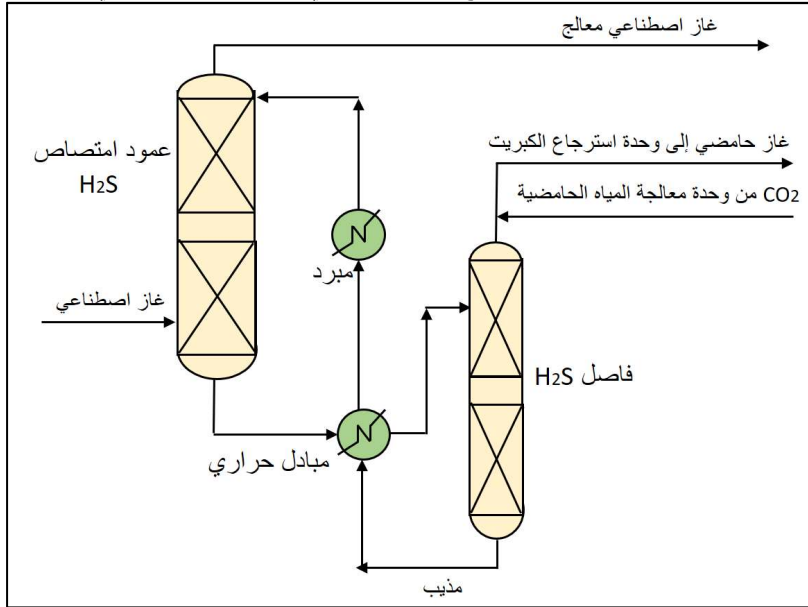
1-4-4-1: منظومة فصل الغاز الحامضي

تستخدم عملية فصل الغاز الحامضي على نطاق واسع في صناعة تكرير النفط ومعالجة الغاز الطبيعي منذ عقود طويلة. وفي مجمع تحويل الفحم إلى سوائل تطبق عملية فصل غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S من الغاز الاصطناعي المنتج. أما كبريتيد الكربونيل COS فلا يمكن فصله إلا بعد تحويله إلى كبريتيد الهيدروجين بعملية التحلل المائي Hydrolysis، حيث يتفاعل كبريتيد الكربونيل مع الماء بوجود عامل حفاز ليتحول إلى غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 وكبريتيد الهيدروجين H_2S . يدخل الغاز الاصطناعي البارد بعد ذلك إلى عمود امتصاص يحتوي على محلول أميني Amine solution لامتصاص معظم كمية كبريتيد الهيدروجين وجزء من غاز ثاني أكسيد الكربون.

بعض العمليات تستخدم مذيب فيزيائي مثل سيليكسول Selexol (ثنائي ميثيل إيثير، أو بولي إيثيلين غليكول)، أو ريكتيسول Rectisol، بدلاً من محلول الأمين، وتتميز المذيبات الفيزيائية بعدم قابليتها للتفاعل مع الغاز، وبالتالي لا تتشكل الأملاح الثابتة حرارياً والتي يمكن أن تسبب حدوث مشكلات في منظومة المعالجة (Denton, D., 2005)

يسحب محلول الأمين الغني (أو المذيب الفيزيائي) من أسفل عمود الامتصاص إلى عمود نزع Stripper، لنزع الغازات الحامضية الممتصة، ثم إعادة استخدام المحلول مرة أخرى. أما الغاز الحامضي المنزوع من المحلول فيسحب إلى وحدة استرجاع الكبريت¹ SRU. يبين الشكل 23-1 منظومة نزع الغاز الحامضي من الغاز الاصطناعي.

الشكل 23-1: منظومة نزع الغاز الحامضي من الغاز الاصطناعي

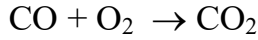


المصدر: Hurd, D., Park, S., & Kan, J. 2014

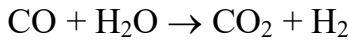


2-4-1: وحدة تحويل أول أكسيد الكربون

يحتوي الغاز الاصطناعي على نسبة عالية من غاز أول أكسيد الكربون CO الذي يؤدي عند احتراقه إلى تشكيل غاز ثاني أكسيد الكربون CO₂ حسب التفاعل التالي:

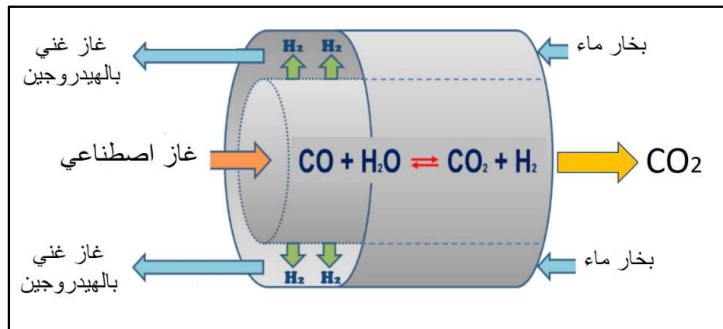


ولخفض نسبة غاز أول أكسيد الكربون يمرر الغاز الاصطناعي على وحدة تحويل الغاز بالماء¹ حيث يتفاعل غاز أول أكسيد الكربون مع الماء ليشكل الهيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون، في مفاعل يحتوي على عامل حفاز مصنوع من الحديد والكروم، ويعمل في درجات حرارة وضغط عاليين، حسب التفاعل التالي:



تكمُن أهمية هذه العملية في توفير فرصة فصل غاز ثاني أكسيد الكربون قبل انطلاقه إلى الغلاف الجوي نتيجة الحرق، كما تساهم في تحسين القيمة الحرارية للغاز الاصطناعي المنتج، من خلال رفع تركيز غاز الهيدروجين. يبين الشكل 24-1 مفاعل وحدة تحويل غاز أول أكسيد الكربون بالماء. (Killmeyer, R., et al., 2003)

الشكل 24-1: مفاعل وحدة تحويل غاز أول أكسيد الكربون بالماء



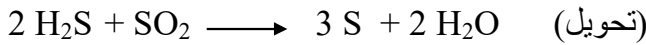
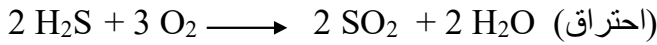
المصدر: Radcliffe, A., et al., 2016

¹ Water Gas Shift Reactor

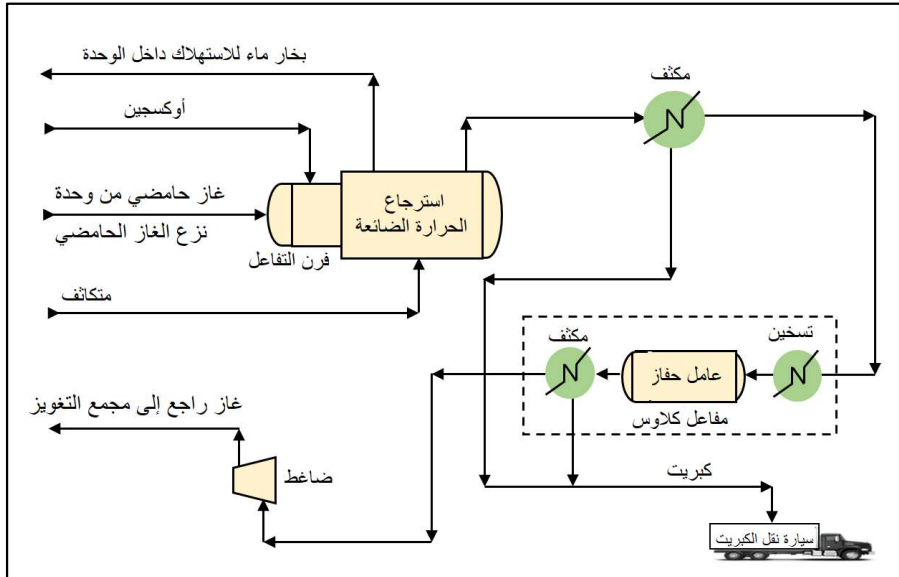
3-4-1: وحدة استرجاع الكبريت

يتم في هذه العملية تحويل الكبريت الموجود في الغاز الحامضي على شكل غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S إلى كبريت سائل Liquid sulfur و ماء. ويطلق على هذه العملية اسم تفاعل كلاوس Claus، نسبة إلى العالم الذي اخترعها في أواخر القرن التاسع عشر. يبين الشكل 25-1 مخطط سير عملية استرجاع الكبريت.

يعتمد مبدأ عملية كلاوس على حرق ثلث كمية غاز H_2S لتحويله إلى غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 الذي يتفاعل مع الجزء المتبقي من H_2S بوجود عامل حفاز مصنوع من الكوبالت والموليبيديوم المحمول على سيرير ثابت من الألومينا الفعالة، لينتج الكبريت الحر حسب التفاعلين التاليين:



الشكل 25-1: سير عملية استرجاع الكبريت



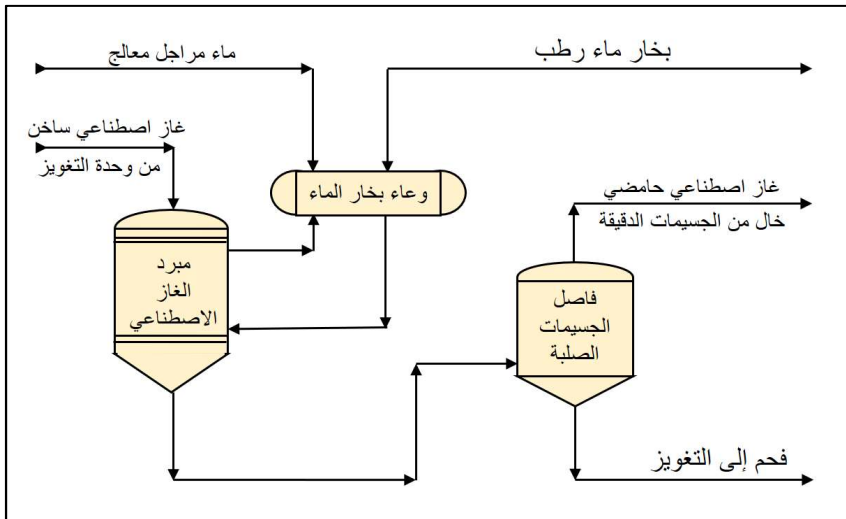
المصدر: Orhan, O., et al., 2014



4-4-1: وحدة نزع الجسيمات الدقيقة

يحتوي الغاز الاصطناعي الخارج من مفاعل التغويز على جسيمات دقيقة من الرماد والفحم، وهناك طريقتان لفصل الجسيمات الصلبة من الغاز الاصطناعي، الأولى طريقة المرشحات الساخنة الجافة! تركيب قيل دخول الغاز الاصطناعي إلى منظومة التبريد. والثانية هي طريقة الكاشطات المائية²، وهي الأكثر شيوعاً، تركيب على خط الغاز الاصطناعي الخارج من منظومة التبريد. وتتميز الطريقة الثانية بإمكانية فصل الكلوريدات الموجودة في الغاز الاصطناعي بواسطة الماء، والتي يمكن أن تسبب حدوث مشكلات تأكل في أوعية ومعدات عمليات استغلال الغاز الاصطناعي اللاحقة. أما الجسيمات الدقيقة المنزوعة من الغاز الاصطناعي في منظومة الكاشطات المائية فيتم تدويرها إلى مفاعل التغويز. يبين الشكل 26-1 منظومة نزع الجسيمات الدقيقة من الغاز الاصطناعي.

الشكل 26-1: منظومة نزع الجسيمات الدقيقة من الغاز الاصطناعي



المصدر: Amick, P., 2006

¹ Dry hot filters

² Water scrubbers



1-5: العمليات المساندة لمجمعات تحويل الفحم

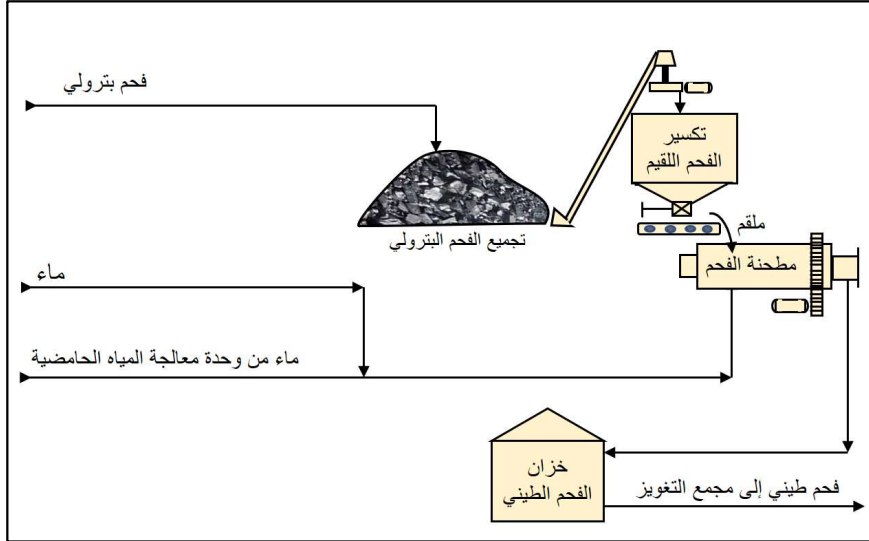
تتكون العمليات المساندة من عدد من الوحدات التي توفر الخدمات اللازمة لإتمام عملية تحويل الفحم والزيوت الثقيلة إلى منتجات عالية القيمة. بعض هذه الوحدات خاصة بمجمع تحويل الفحم إلى سوائل، مثل منظومة تحضير اللقيم، ومنظومة فصل الخبث والسخام، وبعضها الآخر مشترك بين مجمع التغويز وعمليات التكرير في المصفاة كوحدة فصل الهواء، ووحدة معالجة المياه الملوثة.

1-5-1: منظومة تحضير اللقيم

تختلف طبيعة عمليات تحضير لقائم مجمع التغويز في مصافي النفط حسب نوع اللقيم المستخدم، فعندما يكون اللقيم سائلاً تكون عمليات التحضير بسيطة بالنسبة للمصفاة، أما إذا كان اللقيم صلباً كالفحم البترولي فتكون عمليات التحضير أكثر تعقيداً.

تتكون عمليات تحضير اللقيم الرطبة من طحن اللقيم، ثم مزج المسحوق مع الماء لتشكيل مزيج يحتوي على نسبة مياه تتراوح بين 60-65%، وذلك لضخه إلى مفاعل التغويز عندما يكون المفاعل من النوع الذي يستقبل اللقيم على شكل مزيج طيني، مثل مفاعل تكساكو. أما إذا كان المفاعل من النوع الذي يستقبل اللقيم جافاً مثل مفاعل شركة شل SHELL، عندئذ تبدأ عملية تحضير اللقيم بطحن الفحم، ثم نقله إلى خزان توزيع لضخه إلى مفاعل التغويز بواسطة غاز ناقل مثل النيتروجين N_2 ، أو غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 . وقد يستخدم الزيت كمادة حاملة لذرات الفحم المسحوق في الفحم الطيني بدلاً من الماء. يبين الشكل 1-27 منظومة تحضير الفحم اللقيم في مجمع التغويز.

الشكل 1-27: منظومة تحضير الفحم اللقيم في مجمع التغويز



المصدر: Amick, P., 2006

2-5-1: وحدة فصل الهواء

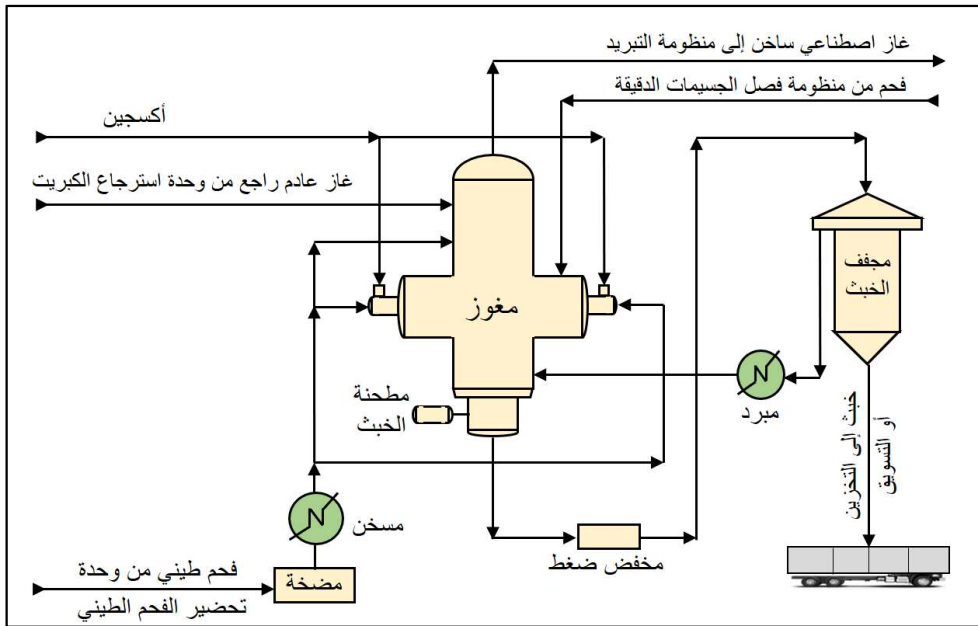
يحصل مجمع التغويز على الأوكسجين اللازم من وحدة فصل الهواء بطريقة التبريد، حيث يتحول الهواء الجوي المضغوط إلى سائل، ثم يفصل إلى أوكسجين ونيتروجين. تعتمد نقاوة الأوكسجين المنتج من وحدة فصل الهواء على كفاءة عملية تجزئة الهواء السائل، والتي يشترط أن تكون نقاوته أعلى من 95% حتى يصبح صالحاً للاستخدام في مجمع التغويز. (Marano, J. 2003)

يسحب الأوكسجين المنتج من وحدة الهواء إلى مجمع التغويز لرفع ضغطه إلى القيمة المناسبة لضغط المغوز. أما النيتروجين المنتج من وحدة فصل الهواء فيستخدم لأغراض عديدة في المصفاة، كتنظيف الأوعية من الغازات القابلة للاشتعال قبل إجراء عمليات الصيانة واللحام باللهب المفتوح، أو الحقن في الأوعية الفارغة لمنع دخول الأوكسجين الجوي بهدف حمايتها من التآكل.

3-5-1: منظومة فصل الخبث/ السخام

عندما يتعرض الفحم لدرجات الحرارة المرتفعة في عملية التغويز ينصهر الرماد مشكلاً الخبث المنصهر الذي يجب إزالته من المغوز. وتختلف طريقة فصل الخبث تبعاً لنوع عملية التغويز. فعلى سبيل المثال، في مغوز تكساكو يتجمع الخبث على الجدران الداخلية للمغوز، ثم يتدفق باتجاه الأسفل إلى غرفة منفصلة ليتم تبريده باستخدام الماء الراجع ويتصلب، ثم يزال بشكل دوري من الغرفة لينقل إلى خارج المصفاة للتخلص منه. وقد يستفاد من الخبث باستخدامه كمادة بناء. يبين الشكل 28-1 مخطط منظومة نزع الخبث من مغوز تكساكو.

الشكل 28-1: منظومة فصل الخبث في مغوز تكساكو



المصدر: Amick, P., 2006

تعتمد كمية الخبث المتكون على نوع اللقيم الداخل إلى المغوز، فالزيوت الثقيلة لا تحتوي على رماد، وقد يحتوي الفحم البترولي على كمية قليلة غير كافية من الرماد فيصبح تجمعه غير ممكن على الجدران الداخلية للمغوز، عندئذ تستخدم بعض الإضافات

لزيادة كمية الرماد وتعزيز قدرته على التجمع، وبالتالي تسهيل عملية فصله وجريانه إلى غرفة نزع الخبث. (Marano, J. 2003)

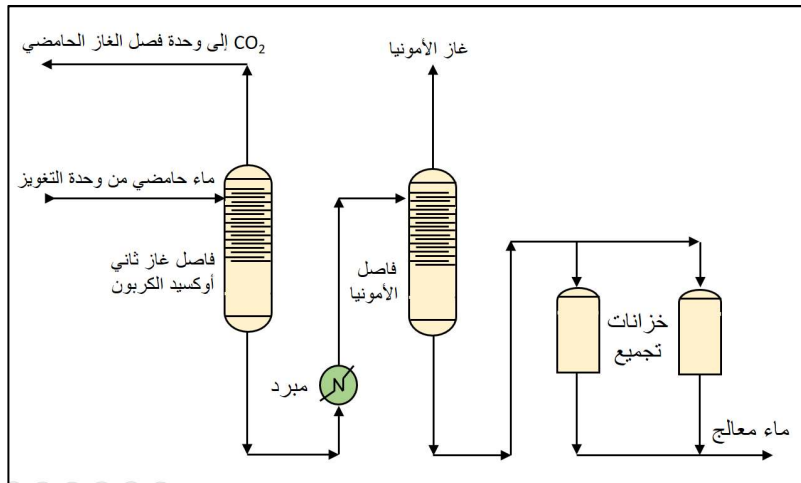
كما يحتوي الخبث على ذرات كربون غير محولة Unconverted Carbons إضافة إلى الرماد المنصهر من اللقيم الصلب، وأثار من المعادن المنصهرة التي توجد عادة في الزيوت الثقيلة مثل الفناديوم والنيكل.

يمكن استرجاع المعادن من الخبث بطرق عديدة منها طريقة الاستخلاص بالنافثا، حيث تفصل المعادن من الخبث بينما يعاد الكربون إلى المغوز.

4-5-1: معالجة المياه الحامضية

ينتج عن مجمع التغويز مياه حامضية تحتاج إلى معالجة لتصبح قابلة لإعادة الاستخدام. تتكون عملية المعالجة من مرحلتين أساسيتين، يجري في الأولى نزع غاز ثاني أكسيد الكربون، بينما يتم في المرحلة الثانية نزع الأمونيا. **الشكل 1-29** معالجة المياه الحامضية في مجمع تحويل الفحم إلى سوائل.

الشكل 1-29: معالجة المياه الحامضية في مجمع تحويل الفحم إلى سوائل



المصدر: Amick, P., 2006

1-6: العوامل المؤثرة في كفاءة عملية تحويل الفحم إلى سوائل

تعتمد كفاءة عملية تحويل الفحم إلى سوائل على عدة عوامل، أهمها سعر كل من الفحم والنفط الخام في الأسواق العالمية. فعندما تنخفض أسعار النفط الخام تنخفض تكلفة التكرير، وبالتالي تصبح المصادر الأخرى للوقود غير مجدية اقتصاديا. كما يؤثر في ربحية عمليات تحويل الفحم إلى سوائل عوامل تقنية تتعلق بنوع اللقيم، ونوع المنتجات المطلوبة، وحجم المفاعل، ونوع المادة المؤكسدة.

1-6-1: نوع اللقيم

يؤثر مردود عملية تحويل الفحم إلى سوائل بخصائص ونوع اللقيم المستخدم في العملية، حيث أشارت دراسة أجريت في جامعة باهانغ Pahang الماليزية إلى أن مكونات الغاز الاصطناعي المنتج من المغوز تختلف باختلاف نسبة الفحم البترولي في اللقيم المكون من مزيج الفحم والفحم البترولي، باستخدام الهواء كمادة تغويز. فعندما تكون نسبة الفحم البترولي صفر يلاحظ أن نسبة الهيدروجين في الغاز الاصطناعي تصل إلى 38.35% مول، بينما تنخفض النسبة إلى 4.26% مول عندما تكون نسبة الفحم البترولي في مزيج اللقيم 100% مول. يبين الجدول 1-5 تغير مكونات الغاز الاصطناعي عند نسب مختلفة من مزيج لقيم عملية التغويز.

الجدول 1-5: تغير مكونات الغاز الاصطناعي عند نسب مختلفة من مزيج لقيم عملية التغويز

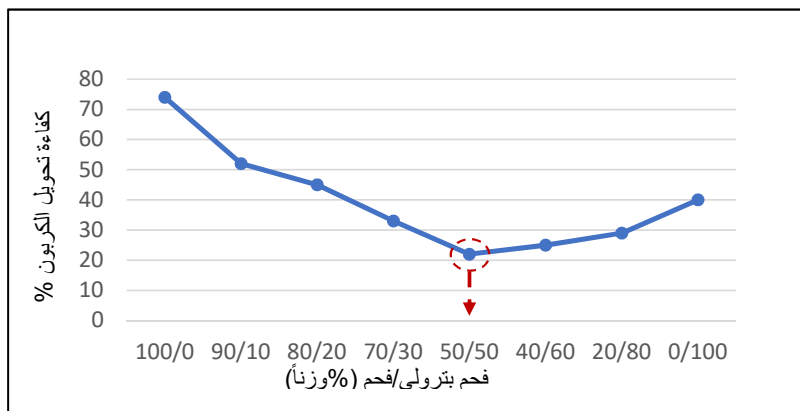
نسبة المزيج (فحم: فحم بترولي)						مكونات الغاز الاصطناعي % مول
(100 :0)	(70 :30)	(50 :50)	(40 :60)	(10 :90)	(0 :100)	
4.26	2.28	5.74	21.89	37.7	38.35	H ₂
0.61	1.27	0.22	2.2	4.28	4.92	CO
6.57	8.64	15.78	7.88	0.44	0.29	O ₂
8.43	7.09	2.82	4.57	6.53	6.92	CO ₂
0.67	0.41	0.1	1.16	1.14	0.84	CH ₄
0.02	0.11	0	0.13	0.17	0.14	C ₂ H ₄
0	0.01	0	0.02	0.01	0.01	C ₂ H ₆
0	0.01	0	0.01	0	0.01	C ₂ H ₂

المصدر: Muda, N., & Boosraha, M., 2013



من جهة أخرى، أشارت الدراسة إلى أن كفاءة تحويل الكربون تتخفض كلما ارتفعت نسبة الفحم البترولي في اللقيم إلى أن تصل حتى 50% وزناً، ثم تعود للارتفاع كلما زادت نسبة الفحم البترولي. يبين الشكل 1-30 تغير كفاءة تحويل الكربون بتغير نسبة الفحم البترولي في اللقيم.

الشكل 1-30: تغير كفاءة تحويل الكربون بتغير نسبة الفحم البترولي في اللقيم



المصدر: Muda, N., & Boosraha, M., 2013

1-6-2: حجم حبيبات الفحم اللقيم

قام العالمان تايلور وسميث بدراسة تأثير حجم حبيبات الفحم البترولي على كفاءة التفاعل في عدة أنواع من مفاعلات التغويز، وأظهرت النتائج أن لحجم الحبيبات تأثير مهم على كفاءة التفاعل، وخصوصاً في المفاعلات التي تستخدم عوامل حفازة، حيث أن حجم الحبيبات يؤثر على مساحة سطح التماس بين الفحم وحبيبات العامل الحفاز.

(Murthy, B., et al, 2014)

1-6-3: نوع المنتجات المطلوبة من مجمع التغويز

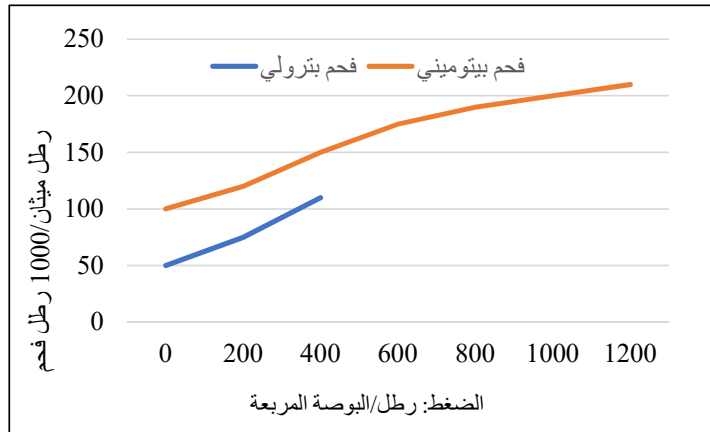
تختلف كفاءة عملية التغويز تبعاً لنوع المنتجات المطلوب إنتاجها من العملية. فإذا كان الهدف من المشروع هو إنتاج الهيدروجين، أو الأمونيا، أو الميثانول، أو سوائل عملية فيشر تروبش، فيفضل في هذه الحالة أن تحتوي مكونات الغاز الاصطناعي المنتج

من عملية التغويز على أعلى نسبة ممكنة من أول أكسيد الكربون والهيدروجين. ويعتبر وجود الميثان في هذه الحالة مادة غير مرغوبة، ويؤثر سلباً على اقتصادية المشروع. أما إذا كان هدف المشروع هو الحصول على غاز لتشغيل وحدة دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC لتوليد الطاقة الكهربائية بدون منظومة التقاط غاز ثاني أكسيد الكربون فوجود الميثان في هذه الحالة يعزز كفاءة المشروع، ويخفض معدل استهلاك الأوكسجين. ولكن عندما يكون الهدف هو إنتاج الطاقة الكهربائية والحصول على أكبر كمية ممكنة من CO_2 لاستخدامه في عمليات الاستخلاص البترولي المعزز EOR فوجود الميثان في الغاز الاصطناعي في هذه الحالة يخفض من كفاءة منظومة التقاط غاز CO_2 .

1-6-4: ظروف تشغيل عملية التغويز

تتغير مكونات الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز بتغير ظروف التشغيل، فعلى سبيل المثال، تعتمد نسبة الميثان في الغاز الاصطناعي على قيمة الضغط في المغوز، حيث ترتفع النسبة كلما ارتفعت قيمة الضغط. بينما لدرجة الحرارة تأثير معاكس، حيث يتعزز إنتاج الميثان مع انخفاض درجة حرارة التفاعل. يبين الشكل 1-31 تأثير رفع الضغط في المغوز على نسبة الميثان في الغاز الاصطناعي.

الشكل 1-31: تأثير رفع الضغط في المغوز على نسبة الميثان في الغاز الاصطناعي



المصدر: EPRI, 2010



كما تؤثر ظروف التشغيل على نسبة الكبريت في الغاز الاصطناعي المنتج، فعند خفض درجة الحرارة في مفاعل التغويز يتحول الكبريت الموجود في الفحم إلى غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S ، كما يتحول حوالي 3-10% من الكبريت إلى كبريتيد الكربونيل ^{1}COS . في هذه الحالة يجب إضافة مفاعل لتحويل كبريتيد الكربونيل إلى كبريتيد الهيدروجين قبل إدخاله إلى وحدة معالجة الغاز الحامضي التقليدية التي يتم فيها نزع كبريتيد الهيدروجين من الغاز الاصطناعي.

ويؤثر رفع شدة ظروف تشغيل عملية التغويز في تحويل الروابط النيتروجينية الموجودة في الوقود إلى نيتروجين غازي وأمونيا NH_3 ، وهذا يؤدي إلى تعزيز تفاعلات تكسير الأمونيا إلى هيدروجين ونيتروجين. (EPRI, 2010)

5-6-1: حجم المغوز

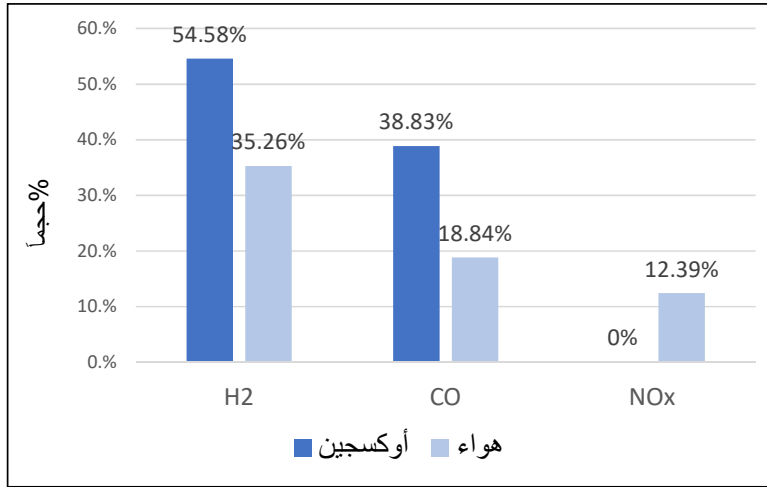
لحجم المفاعل دور مهم في كفاءة عملية التغويز، فبالإضافة إلى دوره في تحسين ربحية العملية من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم، يساهم الحجم الكبير في الحصول على كفاءة أعلى وتوفير القدر الكافي من الغاز اللازم لاستقرار عمل العنفات الغازية في وحدات توليد الطاقة بدورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC. (EPRI, 2010)

6-6-1: نوع المادة المؤكسدة

يساهم استخدام الأوكسجين بدلاً من الهواء في تعزيز كفاءة تحويل الكربون من خلال رفع نسبة الهيدروجين وأول أكسيد الكربون، وخفض أكاسيد النيتروجين في الغاز الاصطناعي المنتج. يبين الشكل 1-32 تأثير نوع المادة المؤكسدة في مكونات الغاز الاصطناعي. (Aghahosseini, S., Dincer, I., Naterer, G., 2011)

Carbonyl Sulfide ¹

الشكل 1-32: تأثير نوع المادة المؤكسدة في مكونات الغاز الاصطناعي



المصدر: Aghahosseini, S., Dincer, I., Naterer, G., 2011

1-6-7: نوع العامل الحفاز في عملية فيشر تروبش

تختلف مكونات وخصائص منتجات عملية التغويز باختلاف نوع العامل الحفاز المستخدم. فعلى سبيل المثال يستخدم في عملية فيشر تروبش ثلاث أنواع من العوامل الحفازة. وعندما يستخدم عامل حفاز من الكوبالت بدرجة حرارة منخفضة CLTFT¹، تشكل الألكينات النسبة العظمى في مكونات الغاز الاصطناعي المنتج، في حين ترتفع نسبة الأوليفينات والأوكسجينات عند استخدام الحديد في درجات الحرارة المنخفضة ILTFT²، أما عند استخدام الحديد في درجات الحرارة المرتفعة IHTFT³ فتزداد نسبة العطريات في المنتج (Gibson, P., 2007). يبين الشكل 1-33 تأثير نوع العامل الحفاز في نسب مكونات منتج عملية فيشر تروبش.

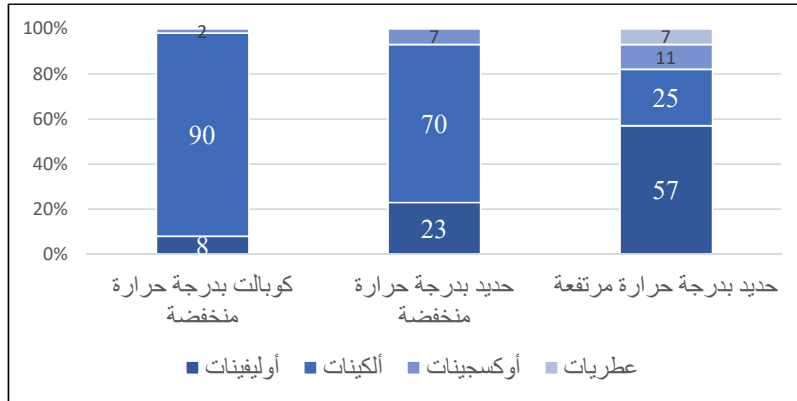
¹ Cobalt Low Temperature Fisher-Tropsch

² Iron Low Temperature Fisher-Tropsch

³ Iron High Temperature Fisher-Tropsch



الشكل 1-33: تأثير نوع العامل الحفاز في تغيير مكونات منتج عملية فيشر تروپش



المصدر: Gibson, P., 2007

8-6-1: الطاقة الإنتاجية لمجمع التغويز

يرتفع المردود الاقتصادي لمجمع التغويز كلما كانت الطاقة الإنتاجية مرتفعة، حيث تنخفض التكاليف الاستثمارية وتكاليف التشغيل، وذلك من خلال الاستفادة من مبدأ اقتصاد الحجم. (IEA, 2009)

9-6-1: موقع المشروع

يكتسب موقع مشروع تغويز الفحم أهمية كبيرة من حيث دوره في توفير أجور نقل اللقائم عندما يكون قريب من موقع حقول الإنتاج، أو تكلفة نقل المنتجات عندما يكون قريباً من الأماكن التي يرتفع فيها الطلب على المنتجات، أو من موانئ التصدير إلى الأسواق الخارجية.

7-1: فوائد عملية تحويل الفحم إلى سوائل

على الرغم من توفر الفحم بكميات كبيرة في العديد من مناطق العالم إلا أن دوره في مزيج الطاقة قد تراجع مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى كالنفط والغاز الطبيعي، وذلك نظراً لصعوبة نقله ومناولته، ومحدودية استخدامه، علاوة على ارتفاع تكلفة إجراءات تلبية متطلبات التشريعات البيئية التي تضبط كمية الانبعاثات الناتجة عن استخدامه كوقود.



وتعتبر تقنية تحويل الفحم إلى سوائل أحد الطرق التي تساعد على تخفيف انعكاسات صعوبة نقل الفحم من منطقة لأخرى، إضافة إلى تأمين فرصة إنتاج سوائل هيدروكربونية يمكن الاعتماد عليها في حال حدوث نقص في إمدادات مصادر الوقود الأخرى.

تشير العديد من الدراسات الاستشرافية إلى توقع ازدهار صناعة تحويل الفحم إلى سوائل في العقدين القادمين في معظم مناطق العالم، وستتركز الزيادة في الدول التي تمتلك احتياطات مهمة من الفحم، مدفوعة بعوامل عديدة منها ما يعتمد على تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بالحد من طرح الملوثات إلى البيئة، ومنها ما يتعلق بالتوجه نحو الاعتماد على الموارد الذاتية في تأمين الطلب المحلي المتنامي على الطاقة.

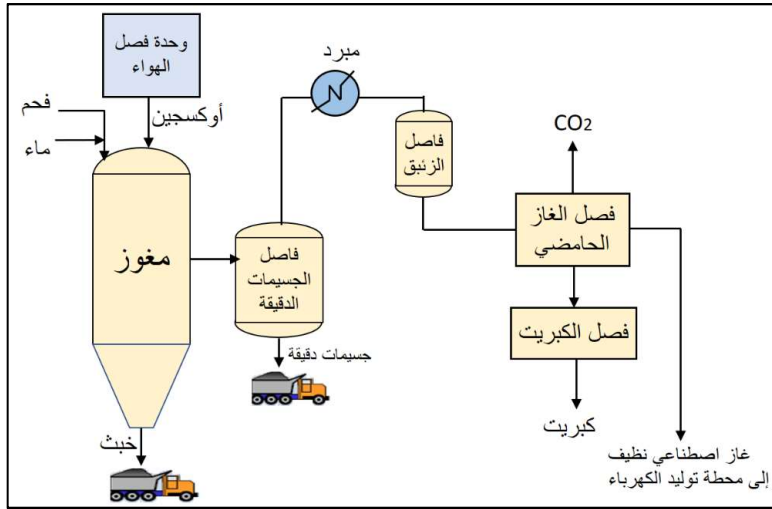
1-7-1: تلبية متطلبات التشريعات البيئية

أدى صدور التشريعات البيئية الخاصة بالحد من طرح الملوثات الناتجة عن حرق الوقود الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت والشوائب الملوثة للبيئة، إلى تراجع نسبة استهلاك الفحم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية بشكل ملحوظ في العديد من مناطق العالم، وخصوصاً في أوروبا الغربية. وعلى الرغم من إعلان كل من ألمانيا وبولندا عن إنشاء محطتين تعملان على الفحم الحجري بطاقة إجمالية تصل إلى 5 جيجا وات، إلا أن أكثر من ثلثي محطات توليد الطاقة العاملة في أوروبا يعود تاريخ إنشائها إلى أكثر من ثلاثين عاماً، وسيتم إغلاقها قريباً. أما في أوروبا الشرقية فلا تزال كل من بلغاريا وجمهورية التشيك واليونان تعتمد على الفحم كوقود بنسبة 40% من إجمالي محطات توليد الطاقة الكهربائية، على الرغم من عدم وجود خطط لإنشاء محطات جديدة.

(The Economist, 2017)

من جهة أخرى، تساهم عملية تغويز الفحم في خفض الانبعاثات الملوثة للبيئة، وذلك من خلال توفير فرصة فصل الملوثات من الغاز الاصطناعي المنتج من عملية التغويز قبل استخدامه كوقود. يبين الشكل 1-34 فرص معالجة الملوثات البيئية من الغاز الاصطناعي.

الشكل 1-34: فرص معالجة الملوثات البيئية من الغاز الاصطناعي



المصدر: Denton, D., 2005

1-7-2: تعزيز الاستفادة من الموارد المحلية للطاقة

في ضوء سعي دول العالم إلى تعزيز الاستفادة من مواردها المحلية لتلبية الطلب المتنامي على الطاقة وتقليل اعتمادها على الاستيراد من الأسواق الخارجية، يعتبر الفحم أحد المصادر الهامة للطاقة بالنسبة للدول التي تمتلك احتياطات كبيرة. فعلى سبيل المثال، أطلقت دول الاتحاد الأوروبي مبادرة الفحم النظيف التي تسعى من وراء تطبيقها إلى تحقيق تقدم ملموس في استغلال مواردها الذاتية، وفي نفس الوقت خفض اعتمادها على استيراد النفط الغاز من الخارج، علاوة على تلبية متطلبات الاتفاقيات الدولية للحد من الانبعاثات الملوثة للبيئة، وذلك من خلال تطبيق تقنية التقاط وخرن غاز الكربون لاستخدامه في عمليات الاستخلاص البترولي المعزز في حقول بحر الشمال CCS. تتكون المبادرة من مرحلتين أساسيتين: (Bezdek, R., 2015)

- **المرحلة الأولى**، وهي المرحلة التي يمكن تنفيذها على المدى القريب، وتتضمن إعادة تشغيل محطات توليد الطاقة الكهربائية التي كانت تعمل على حرق الفحم كوقود، والتي أوقفت بسبب ارتفاع معدل انبعاثات الكربون عن القيم المسموحة،



ويبلغ إجمالي طاقتها حوالي 21 جيجا وات/الساعة، وذلك بعد تزويدها بمعدات التحكم بانبعثات الكربون والكبريت. وسيوفر تشغيلها حوالي 2-3 مليار قدم مكعب من الغاز المستورد من روسيا. يبين **الجدول 1-6** توزيع طاقة وحدات توليد الطاقة الكهربائية المتوقفة التي تعمل على حرق الفحم كوقود في دول أوروبا الغربية.

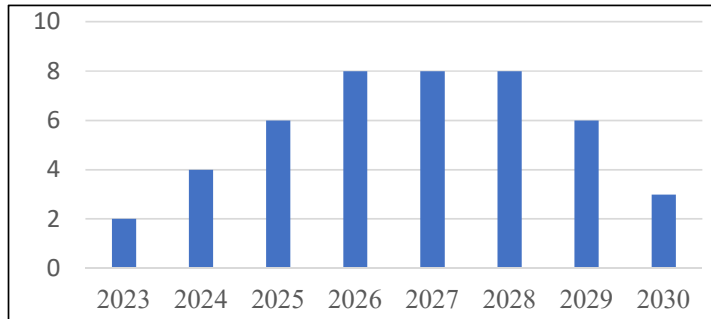
الجدول 1-6: توزيع طاقة وحدات توليد الطاقة الكهربائية بالفحم

المتوقفة في دول أوروبا الغربية

الدولة	الوحدات المتوقفة (ميغاوات)	النسبة من الإجمالي %
فرنسا	1155	5
ألمانيا	7977	37
إيطاليا	383	2
هولندا	2658	12
اسبانيا	345	2
المملكة المتحدة	8856	41
الإجمالي	21374	100

- **المرحلة الثانية**، وهي المرحلة التي ستنفذ على المدى البعيد، وتتضمن إنشاء وحدات تحويل الفحم إلى غاز لإنتاج غاز طبيعي اصطناعي لاستخدامه كبديل للغاز الطبيعي المستورد، ومن المتوقع أن تبدأ الإنتاج في عام 2023، ثم تدخل تباعاً لغاية 2030. يبين **الشكل 1-35** عدد وحدات تحويل الفحم إلى غاز اصطناعي المتوقع تشغيلها في أوروبا الغربية خلال الفترة 2023-2030.

الشكل 1-35: عدد وحدات تحويل الفحم إلى غاز اصطناعي المتوقع تشغيلها في أوروبا الغربية خلال الفترة 2023-2030



المصدر: Yong-Wang, L., 2015



كما تساهم عملية تحويل الفحم في الحصول على أنواع متعددة من السوائل الهيدروكربونية التي يمكن استخدامها كوقود، وخصوصاً عند دمجها مع تقنية دورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC لتوليد الطاقة الكهربائية وإنتاج سوائل هيدروكربونية أو كيماويات في عملية واحدة. أحد أهم المشاريع التي توضح دور عملية تحويل الفحم إلى سوائل في تنويع مصادر الطاقة هو مشروع ساسول لتحويل الفحم إلى سوائل في جنوب أفريقيا، حيث كان الهدف الأساسي من إنشائه هو الاستفادة من الكميات الكبيرة من الفحم المتوفر في جنوب أفريقيا لتلبية الطلب المحلي على وقود وسائل النقل، كبديل عن النفط الخام الذي كان استيراده محظوراً على جنوب أفريقيا في خمسينيات القرن الماضي.

(Hook, M. & Aleklett, K., 2009)

بدأ مشروع ساسول في عام 1955 بإنشاء وحدة لإنتاج 6000 ب/ي من الغازولين في مدينة ساسولبيرغ Sasolburg. وفي عامي 1981 و 1982 تم تشغيل الوحدتين الأخريين Sasol-II و Sasol-III في مدينة سيكوندا Secunda، طاقة كل منهما 40 ألف ب/ي من السوائل الهيدروكربونية باستخدام نفس التقنية، مع إدخال بعض التطورات على جودة العامل الحفاز المستخدم. يبين الجدول 7-1 موقع وطاقة وتكلفة إنشاء وحدات تحويل الفحم إلى سوائل ساسول. كما يبين الجدول 8-1 توزيع كمية منتجات وحدة

(Lee, S., Spight, J., & Loyalka, S. 2015) Sasol-II

الجدول 7-1: موقع وطاقة وتكلفة إنشاء وحدات ساسول لتسييل الفحم

الوحدة	الموقع	تاريخ بدء الإنتاج	الفحم اللقيم طن/اليوم	السوائل برميل/اليوم	تكاليف الإنشاء مليار دولار
ساسول-I	ساسولبرغ/ جنوب أفريقيا	1955	6600	6000	-
ساسول-II	سيكوندا/ جنوب أفريقيا	1981	30000	40000	2.9
ساسول-III	سيكوندا/ جنوب أفريقيا	1982	30000	4000000	3.8

المصدر: Lee, S., Spight, J., & Loyalka, S. 2015

الجدول 1-8: توزيع كمية منتجات وحدة ساسول-II

المنتج	طن/السنة
وقود محركات	1650000
إيثيلين	204000
كيماويات	94000
منتجات قار	204000
أمونيا	110000
كبريت	99000
إجمالي	2361000

المصدر: Perineau, S., 2013

حقق مشروع ساسول نجاحاً ملحوظاً جعله نموذجاً مثالياً ومتميزاً، وذلك للأسباب

التالية: (Gibson, P., 2007)

- توفر احتياطي كبير من الفحم الحجري والغاز الطبيعي، يزيد عن مليار طن.
- توفر كميات كافية من الموارد المائية في موقع المشروع.
- انخفاض تكاليف الإنشاء.
- وجود بنية تحتية جيدة كالطرق البرية، وخطوط السكك الحديدية، إلخ....
- الدعم الحكومي لمشاريع الصناعة وبشكل خاص مشاريع الطاقة.
- وجود قوانين مشجعة للاستثمار ودافعة للمستثمرين.

1-7-3: مرونة استخدام لقائم متنوعة

من أهم الخصائص التي تميز صناعة تحويل الفحم إلى سوائل مرونة استخدام أنواع عديدة من اللقائم. فبالإضافة إلى الفحم الحجري يمكن استخدام الفحم البترولي والمخلفات الثقيلة المنتجة من مصافي النفط، والكتلة الحيوية.

1-7-4: مرونة تغيير أنواع المنتجات

تتميز تقنية تحويل الفحم بمرونة إنتاج طيف واسع من المنتجات من خلال تحويل الغاز الاصطناعي المنتج إلى كيماويات، أو وقود سائل أو وقود غازي طبيعي اصطناعي نظيف يستخدم كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية.



1-7-5: فوائد غير مباشرة

لتطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل فوائد أخرى غير مباشرة، حيث أنها تساهم في تعزيز الاقتصاد من خلال استغلال الموارد الطبيعية، وتلبية حاجة السوق المحلية من مصادر الطاقة، إضافة إلى توفير فرص عمل جديدة لتشغيل وصيانة مجمعات تحويل الفحم.

1-8: تحديات صناعة تحويل الفحم إلى سوائل

على الرغم من التطورات المهمة التي شهدتها صناعة تحويل الفحم إلى سوائل خلال العقود الماضية، وخصوصاً في الدول التي تمتلك احتياطات كبيرة من الفحم، وتعتمد على الاستيراد في تأمين حاجتها من النفط الخام أو المنتجات النفطية، إلا أنها لا تزال تعاني من تحديات كثيرة منها تقنية، ومنها بيئية، وأخرى اقتصادية.

1-8-1: تحديات تقنية

من المشكلات التقنية التي تواجه عمليات تحويل الفحم إلى سوائل تأثر ظروف تشغيل العملية باختلاف خصائص الفحم اللقيم. حيث أن لكل نوع من أنواع الفحم خصائص مختلفة عن الأنواع الأخرى مما يستدعي الالتزام بنوع واحد من أنواع الفحم بما يتلاءم مع تصميم المفاعل تفادياً لوقوع مشكلات تشغيلية قد تؤدي إلى توقف العملية. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تحدث مشكلة انسداد مخرج الغاز في المفاعل في حال تحطم قطع الفحم إلى حبيبات صغيرة الحجم، مما يؤدي إلى حدوث اضطراب في ظروف عمل المفاعل يمكن ان ينتج عنه توقيف اضطراري للوحدة.

يمكن تفادي انعكاسات المشكلات التقنية من خلال تعديل تصميم معدات الوحدة بما يتوافق مع خصائص ومواصفات اللقيم المستخدم، علاوة على ضرورة تعزيز جهود البحث العلمي لتحسين الأداء التشغيلي للعمليات وتحسين مردودها الاقتصادي.

1-8-2: تحديات بيئية

تواجه صناعة تحويل الفحم إلى سوائل تحديات بيئية ناتجة عن ارتفاع معدل استهلاك المياه في كل من عمليات استخراج الفحم وعمليات التحويل إلى سوائل هيدروكربونية. كما ينتج عن عمليات التحويل انبعاثات ملوثة للبيئة، علاوة على الجسيمات الدقيقة التي تنتج عن مناولة الفحم ونقله من المنجم إلى موقع وحدات التحويل. وفيما يلي أهم التحديات البيئية والحلول الممكنة لمواجهتها.

• ارتفاع معدل استهلاك المياه

يعتبر الماء جزءاً حيوياً بالنسبة لعملية تحويل الفحم إلى سوائل، سواء كماء ساخن لتوليد بخار الماء اللازم ككقيم في وحدة إنتاج الهيدروجين، أو لعمليات التبريد. فعلى سبيل المثال يبلغ استهلاك وحدة تحويل فحم إلى سوائل طاقتها الإنتاجية 50 ألف برميل/اليوم في الولايات المتحدة الأمريكية حوالي 40-50 ألف متر مكعب في اليوم. وهذه الكمية لا تتضمن استهلاك الماء اللازم لعملية طحن الفحم ومزجه بالماء قبل إدخاله إلى مفاعل التغويز. كما تستهلك عملية تحويل الفحم إلى سوائل كمية كبيرة من المياه في تبريد ومعالجة الغاز الاصطناعي المنتج، علاوة على كمية المياه المعالجة اللازمة لتوليد بخار الماء اللازم لمفاعل تحويل الفحم إلى غاز اصطناعي. (IEA, 2009)

• ارتفاع معدل انبعاثات مجمع تحويل الفحم

يحتاج إنتاج برميل واحد من المنتجات الهيدروكربونية السائلة في عملية تحويل الفحم إلى سوائل إلى حوالي نصف طن من الفحم، وبالتالي فإن إنشاء وحدة ذات طاقة إنتاجية كبيرة سيؤدي إلى زيادة الطلب على الفحم الحجري الذي ينتج عنه أضرار جسيمة للبيئة نظراً لما تطرحه عمليات الاستخراج من كميات كبيرة من المياه الحامضية الضارة بالتربة، والتي يمكن أن تلوث طبقات المياه الجوفية الصالحة للشرب. إضافة إلى أن عمليات استخراج الفحم تتطلب إزالة الغلاف الأخضر للتربة. (NRDC, 2008)



أشارت نتائج دراسة نشرها مجلس حماية الموارد الطبيعية في الولايات المتحدة¹ NRDC في عام 2008 لبحث الأثر البيئي لصناعة تحويل الفحم إلى سوائل أن إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن دورة حياة غالون واحد من الغازولين المنتج من مصافي النفط، بدءاً من البئر وحتى الاستهلاك في وسائل النقل، يبلغ 25 رطل، بينما تبلغ كمية انبعاثات الكربون الناتجة عن دورة حياة السوائل المنتجة من عملية تحويل الفحم إلى سوائل حوالي 50 رطل. أما في حال تركيب معدات التقاط انبعاثات الكربون في وحدات تحويل الفحم فإن كمية الانبعاثات تقترب من كمية انبعاثات الغازولين المنتج من المصافي.

1-8-3: تحديات اقتصادية

شهدت صناعة تحويل الفحم إلى سوائل تغيرات متكررة منذ نشوئها تراوحت بين الازدهار والتراجع، وتركزت معظم أسباب هذه التغيرات في تقلبات أسعار النفط والمنتجات النفطية في الأسواق العالمية. فعندما ترتفع أسعار النفط يبدأ البحث عن مصادر بديلة للحصول على السوائل الهيدروكربونية، وتصبح الصناعات الأخرى كصناعة تحويل الفحم إلى سوائل مجدية اقتصادياً، بينما تصبح خاسرة عندما يتراجع سعر النفط الخام، وتراجع معه أسعار المنتجات النفطية.

• ارتفاع تكاليف التشغيل والاستثمار

لا تقتصر التحديات الاقتصادية على تآرجح أسعار النفط الخام، بل هناك أسباباً أخرى، كارتفاع تكاليف التشغيل والاستثمار، وهذا يستدعي تدخل الحكومات لدعم مثل هذه المشاريع. (IEA, 2009)

أشارت دراسة أجرتها جامعة أوبسالا Uppsala السويدية في عام 2008 حول الجدوى الاقتصادية لوحدات تحويل الفحم إلى سوائل أن سعر تعادل إنتاج النفط

¹ Natural Resources Defense Council



الاصطناعي¹ بعملية التسييل غير المباشر في الولايات المتحدة الأمريكية مقابل سعر النفط يتراوح ضمن المجال 25-40 دولار أمريكي للبرميل، وذلك تبعاً لحجم الإجراءات البيئية المتبعة في الوحدة. كما أشارت دراسات سابقة أن ربحية الوحدة تبدأ عندما يكون سعر النفط الخام حوالي 35 دولار أمريكا للبرميل. أما في الصين فبلغ سعر تعادل إنتاج النفط الاصطناعي بطريقة التحويل المباشر للفحم عند سعر النفط الخام يقارب 24 دولار أمريكي. إلا أن التطورات الاقتصادية والتغيرات التي طرأت على أسعار النفط الخام في السنوات الأخيرة قد رفعت سعر التعادل إلى المجال 48-75 دولار أمريكي للبرميل، وبالتالي فقد توصلت الدراسات إلى نتيجة تؤكد على ضرورة تعزيز جهود البحث والتطوير لخفض تكاليف التشغيل والاستثمار، والاعتماد على تقنيات تحسين الأداء، واختيار الموقع الملائم، واللقيم المناسب. (Hook, M.& Aleklett, K., 2010)

• عدم اليقين في استقرار أسعار النفط المستقبلية

تسود حالة من عدم اليقين في مدى استقرار أسعار النفط الخام نتيجة الاضطرابات السياسية في العديد من مناطق العالم، إضافة إلى عدم إفصاح المستهلكين عن الخطط المستقبلية لمعدلات الطلب على الطاقة. وهذه الحالة تزيد من مخاوف المستثمرين على ربحية المشروع. فعلى سبيل المثال، خطت الصين لإنشاء عدد من وحدات تحويل الفحم إلى وقود ديزل في عام 2013 بهدف إنتاج ما يعادل 10% من إجمالي كمية زيت الديزل التي تستورده من الخارج بحلول عام 2020، بكلفة استثمارية تقدر بحوالي خمسة عشر مليار دولار، لكنها أوقفت تنفيذ بعض هذه المشاريع في عام 2014 بسبب ضعف الجدوى الاقتصادية بعد تراجع أسعار النفط. (ExxonMobil, 2014)

¹ سعر التعادل Break-even هو القيمة التي تتساوى فيها كلفة إنتاج النفط الاصطناعي مع سعر النفط الخام التقليدي في الأسواق العالمية، وهي طريقة لحساب ربحية مشروع إنتاج بدائل النفط من مصادر غير تقليدية.



تقنية تحويل الفحم إلى سوائل
وانعكاساتها على صناعة تكرير النفط

الفصل الثاني

” انعكاسات تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل

على مصافي النفط”

1-2: مكونات مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط

2-2: لقائم مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط

3-2: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي في مصافي النفط

4-2: دوافع تطبيق تقنية تحويل الفحم في صناعة تكرير النفط

5-2: تحديات تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط





الفصل الثاني

انعكاسات تطبيق تقنية تحويل الفحم على مصافي النفط

مقدمة

شهدت فكرة تطبيق عملية تحويل الفحم البترولي والزيوت الثقيلة إلى سوائل اهتماماً ملحوظاً من قبل القائمين على صناعة تكرير النفط في العقدين الماضيين، وذلك نظراً للفوائد الاقتصادية والتقنية العديدة التي يمكن الحصول عليها، علاوة على اعتبار هذه التقنية أحد الحلول الواعدة لمشكلة تصريف النفايات الخطرة الناتجة عن تكرير النفط الخام الثقيل. يستعرض هذا الفصل المكونات الرئيسية لمجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط، وأنواع اللقائم المستخدمة، وخيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز، وأهم دوافع ومبررات تطبيق هذه التقنية، وانعكاساتها على الأداء التشغيلي والاقتصادي لمصافي تكرير النفط، مع الإشارة إلى أهم التحديات التي تواجه هذه التقنية، وسبل مواجهتها.

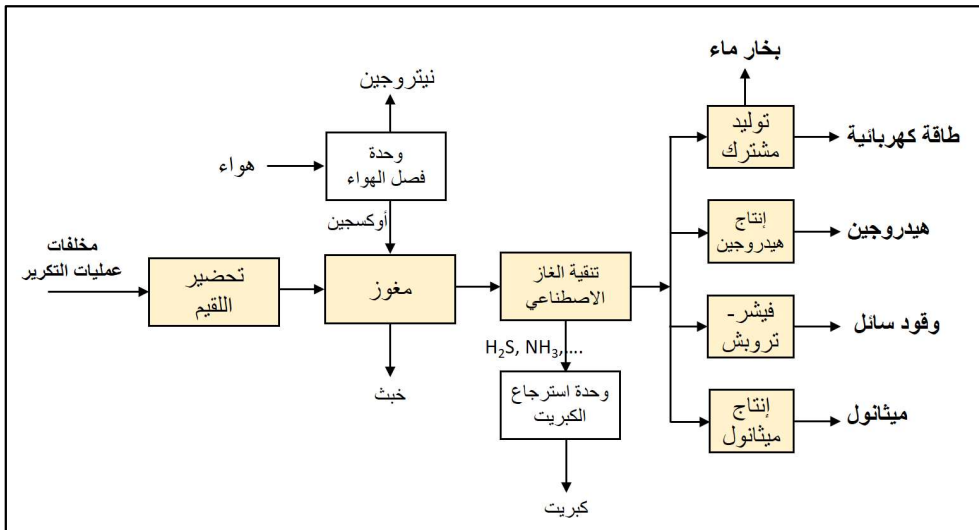
2-1: مكونات مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط

تتشابه عملية تحويل الفحم في مصافي النفط مع عملية تحويل الفحم إلى سوائل في العديد من المكونات، ويطلق عليها اسم عملية التغويز Gasification حيث يتكون مجمع تحويل الفحم من مفاعل التغويز، وعمليات معالجة الغاز الاصطناعي، والعمليات اللاحقة التي تهدف إلى استغلال الغاز الاصطناعي وتحويله إلى منتجات قابلة للاستهلاك أو للمزج مع المنتجات النهائية للمصفاة. (Sethi, N., Bakishi, V., Kumar, M., 2015) يتوقف اختيار مكونات مجمع تحويل الفحم على طبيعة عمل المصفاة ومدى حاجتها إلى منتجات عملية التغويز، فقد يحتوي على واحدة أو أكثر من هذه الوحدات. وقد تحتوي



على وحدة لإنتاج الهيدروجين عندما تحتاج المصفاة إلى هذه المادة، أو إنتاج السوائل الهيدروكربونية بعملية فيشر- ترويش، أو إنتاج الميثانول، أو وحدة دورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC عندما تحتاج المصفاة إلى الكهرباء وبخار الماء. يبين الشكل 1-2 مخطط عملية تحويل الفحم إلى سوائل في مصفاة النفط.

الشكل 1-2: مخطط عملية تحويل الفحم إلى سوائل في مصفاة تكرير النفط



المصدر: Chhoa, T., 2005

2-2: لقائم مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط

تنتج مصافي النفط مخلفات رخيصة الثمن، تتوقف كميتها وخصائصها على نوع عمليات التكرير، ونوع النفط الخام المكرر. ومن أهم هذه المخلفات الفحم البترولي، والزيوت الثقيلة كمخلفات التقطير الفراغي، والقار المنتج من وحدة كسر اللزوجة Visbreaker tar، وقار عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب De-asphalter pitch. وتعتبر تقنية التغويز أحد الخيارات الممكنة لتحويل هذه المخلفات إلى منتجات عالية القيمة. يبين الجدول 1-2 خصائص لقائم تقنية التغويز في مصافي النفط (Marano, J., 2003)

الجدول 1-2: خصائص لقائم تقنية التغويز في مصافي النفط

الخصائص	وحدة القياس	فحم بترولي	مخلفات تقطير فراغي	قار كسر اللزوجة	قار نزع الأسفلتينات
كربون	% وزناً	88.6	84.9	86.1	85.1
هيدروجين	% وزناً	2.8	10.4	10.4	9.1
نيتروجين	% وزناً	1.1	0.5	0.6	0.7
كبريت	% وزناً	7.3	4.2	2.4	5.1
أوكسجين	% وزناً	0.0	0.5	0.5	
رماد	% وزناً	0.2	0.0		0.1
هيدروجين/كربون	جزئيء/جزئيء	0.188	0.727	0.720	0.640
الكثافة النوعية	15.5 °C	0.863	1.028	1.008	1.070
درجة الكثافة	°API	-	6.2	8.88	0.8
القيمة الحرارية العليا (جاف) HHV	مليون وحدة حراري بريطانية/رطل	14.85	17.72	18.6	17.28
القيمة الحرارية الدنيا (جاف) LHV	مليون وحدة حراري بريطانية/رطل	14.48	16.77	17.6	16.45

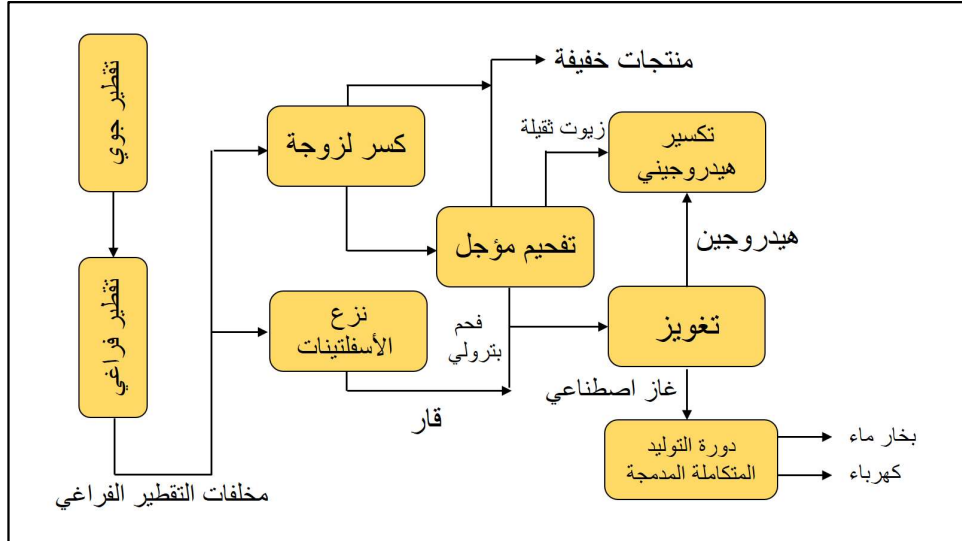
المصدر: Marano, J., 2003

1-2-2: الفحم البترولي

الفحم البترولي هو أحد المنتجات الثانوية لعملية التفحيم، وهي عملية تكسير حراري تهدف إلى تحويل المخلفات الثقيلة لعملية تقطير النفط إلى منتجات خفيفة.

تصنف عملية التفحيم المؤجل Delayed coking على أنها من أكثر العمليات التحويلية نمواً في العالم، نظراً لما تتمتع به من كفاءة عالية في تحويل طيف واسع من مخلفات التقطير الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة قابلة للاستخدام كوقود في وسائل النقل، كالغازولين، والديزل، ووقود الطائرات، إضافة إلى زيوت التزيت والشموع. يبين الشكل 2-2 مخطط ارتباط عمليات التكرير مع مجمع التغويز في مصفاة النفط.

الشكل 2-2: مخطط ارتباط عمليات التكرير مع مجمع التغويز في مصفاة النفط



المصدر: Beeston, S., 2014

تعتمد جودة الفحم البترولي المنتج على محتوى الشوائب في النفط الخام المكرر، حيث تصل نسبة الكبريت في بعض الأنواع إلى 5-7% وزناً، ونسبة معادن كالفناديوم والنيكل إلى أكثر من 500 جزء في المليون، علاوة على ارتفاع محتواه من الراسب الكربوني¹ (Santos, A., Jose da Silva, R., & Reino, M., 2015)

وعلى الرغم من انخفاض قابليته للتفاعل (التحول إلى غاز) Reactivity، يتميز الفحم البترولي بارتفاع قيمته الحرارية التي تبلغ 30.25-34.91 ألف جول/كغ، وهي أعلى بحوالي 20% من الفحم الحجري الذي تبلغ قيمته الحرارية ضمن المجال 24.45-30.25 ألف جول/كغ. كما يحتوي الفحم البترولي على نسبة منخفضة من الرماد ضمن المجال 0.1-0.3% وزناً، بينما تصل في الفحم الحجري إلى 8-20% وزناً. يبين الجدول 2-2 مقارنة بين خصائص الفحم البترولي والفحم شبه البيتوميني

¹ Conradson Carbon Residue

الجدول 2-2: مقارنة بين خصائص الفحم البترولي والفحم شبه البيتوميني

الخصائص	وحدة القياس	فحم بترولي	فحم شبه بيتوميني
الرطوبة	% وزناً	6.23	19.0
الكبريت الكلي	% وزناً	6.94	0.22
القيمة الحرارية HHV	ألف جول/كغ	35	21.5
رماد	% وزناً	0.34	7.6
مواد طيارة	% وزناً	12.88	46.8
كربون ثابت	% وزناً	86.78	45.6
التحليل الجاف			
كربون C	% وزناً	89.45	65.6
هيدروجين H	% وزناً	2.8	4.53
نيتروجين N	% وزناً	0.05	0.83
كلور CL	% وزناً	0.01	0.1
كبريت S	% وزناً	7.48	0.18
رماد	% وزناً	0.2	7.61
أوكسجين O2	% وزناً	0.01	21.15

المصدر: Nurthy, B., 2014

يستخدم الفحم البترولي الأخضر Green Petroleum Coke في صناعة الألمنيوم بعد معالجته بعملية الكلسنة، ويسمى بالفحم البترولي المكلسن Calcined Petroleum Coke، أو فحم الأقطاب Anode Coke. تهدف عملية الكلسنة إلى تخليص الفحم البترولي من المركبات الهيدروكربونية الطيارة بتسخينه إلى درجات حرارة مرتفعة، حيث تسحب المواد الطيارة الناتجة لاستخدامها كوقود لتوليد الطاقة وبخار الماء. يبين الجدول 2-3 مقارنة بين الفحم البترولي الأخضر والفحم المكلسن (فحم الأقطاب).

كما يستخدم الفحم البترولي كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية في العديد من مناطق العالم، مثل الهند، والصين، واليابان، وروسيا، وألمانيا، والمملكة المتحدة، وفرنسا، والولايات المتحدة الأمريكية، وكندا، وفنزويلا، والمكسيك، والأرجنتين والبرازيل، إلا أن استخدامه تراجع في العقدين الماضيين بسبب إصدار تشريعات حظر حرق الوقود الحاوي على نسب عالية من الشوائب الملوثة للبيئة.



على الرغم من استخدامات الفحم البترولي العديدة، لكنه بقي يصنف بأنه منتج ثانوي منخفض القيمة، فعلى سبيل المثال، تعتمد بعض المصافي على تصدير الفحم البترولي إلى الأسواق الخارجية، وقد تتحمل المصفاة خسائر كبيرة ناتجة عن تكاليف التخزين عندما تتعثر قنوات التصريف المعتادة، وذلك نظراً لصرامة التشريعات التي تفرض اتخاذ إجراءات مكلفة في موقع النقل والتخزين لضمان عدم تطاير ذرات الفحم الناعم إلى الهواء الجوي، أو انجراف الفحم إلى المجاري المائية الطبيعية. (API, 2014)

الجدول 2-3: مقارنة بين الفحم البترولي الأخضر والفحم المكلسن (فحم الأقطاب)

المكونات	وحدة القياس	فحم بترولي أخضر	فحم مكلسن (فحم أقطاب)
مواد طيارة	% وزناً	10.5-9.0	0.15-0.08
رطوبة	% وزناً	14-8	0.4-0.2
رماد	% وزناً	0.14-0.09	0.18-0.10
كبريت	% وزناً	0.85-0.70	0.78-0.7
فناديوم	ج.ف.م	230-180	250-200
نيكل	ج.ف.م	200-180	220-200
سيليكون	ج.ف.م	80-40	60-20
حديد	ج.ف.م	120-80	100-60
صوديوم	ج.ف.م	90-70	100-50
كالسيوم	ج.ف.م	40-20	40-20
مؤشر قابلية الطحن ¹		70-80	20-40

المصدر: Santos, A., Jose da Silva, R., & Reino, M., 2015

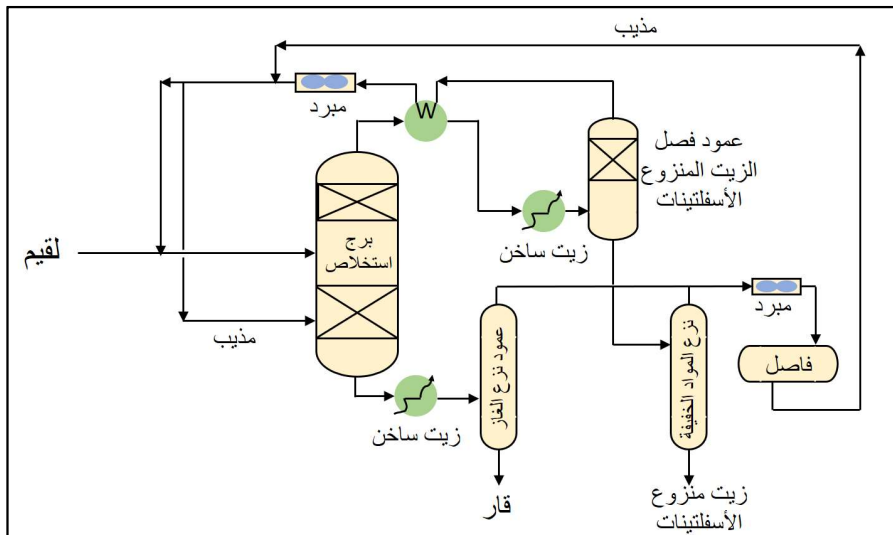
2-2-2: القار

يعتبر القار Pitch أحد المنتجات الثانوية لعملية نزع الأسفلتينات بالمذيب، وعملية كسر اللزوجة.

¹ Hardgrove Grindability Index HGI مؤشر قابلية الطحن ليس له وحدة قياس، يستخدم لقياس جودة الفحم المكلسن ومدى مساوته، وكلما كان الرقم صغيراً يُوْشَر ذلك على جودة أفضل. (ASTM, 2011)

تهدف عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب¹ إلى تحويل بواقي التقطير الفراغي الثقيلة إلى زيت قابل للاستخدام كلقيم في وحدات التكسير بالعامل الحفاز المانع² FCC، أو وحدات إنتاج زيوت التزيت الأساس. أما القار الثقيل فيستخدم كلقيم في وحدات التفحيم، أو في صناعة مواد العزل، أو لتعبيد الطرقات. (Beeston, S., 2014). يبين الشكل 2-3 مخطط عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب.

الشكل 2-3: مخطط عملية نزع الأسفلتينات بالمذيب



المصدر: Beeston, S., 2014

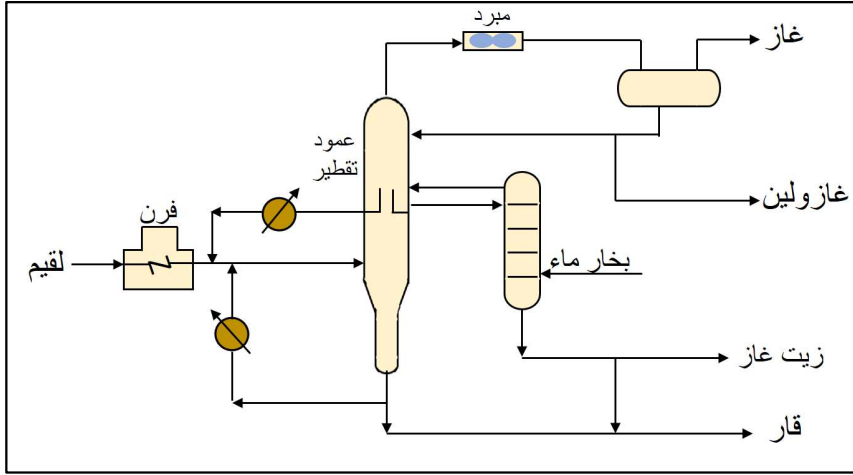
كما ينتج القار الثقيل من عملية كسر اللزوجة Visbreaker، التي تهدف إلى نزع المواد الخفيفة والمقطرات الوسطى من بواقي التقطير الفراغي الثقيلة، وفي نفس الوقت خفض لزوجته، وخفض كمية المادة المذيبة اللازمة لتعديل مواصفاته بما يتوافق مع المعايير المطلوبة. (Castaneda, L., Munoz, J., Ancheyta, J., 2013) يبين

الشكل 2-4 مخطط عملية كسر اللزوجة

¹ Solvent De-asphalting

² Fluidized Catalytic Cracking

الشكل 2-4: مخطط عملية كسر اللزوجة



المصدر: Wallace, P., 1998

2-3: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي في مصافي النفط

ساهمت الأبحاث العلمية في تطوير فرص الاستفادة من الغاز الاصطناعي المنتج من عملية التغويز في مصافي النفط. من هذه الفرص إنتاج أنواع عديدة من السوائل الهيدروكربونية مثل الغازولين، ووقود الديزل، ووقود النفاثات، والشموع، وإنتاج الهيدروجين، أو الوقود الغازي الاصطناعي، والكيماويات كالأمونيا، والميثانول، والإيثلين، والبروبيلين، والبوليمر، والكحول، وغيرها. (Chemik, T., 2010).

يصنف الغاز الاصطناعي المنتج من عملية التغويز ضمن ثلاث مجموعات، منخفض، ومتوسط، ومرتفع القيمة الحرارية، وذلك تبعاً لنسب المكونات الداخلة في تركيبه.

(Lee, S. Speight, J., Loyalka, S., 2015)

- **غاز منخفض القيمة الحرارية**، يتكون بشكل رئيسي من أول أكسيد الكربون والهيدروجين، وبعض الغازات الأخرى، حيث تبلغ قيمته الحرارية من 150 إلى 300 وحدة بريطانية/القدم المكعبة. ويعود سبب انخفاض قيمته الحرارية إلى احتوائه على نسبة مرتفعة من الغازات غير المرغوبة مثل النيتروجين أو المركبات



الحاوية على النيتروجين، وغاز ثاني أكسيد الكربون، والماء، إضافة إلى غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S الذي يعتبر من أكثر الشوائب غير المرغوبة، ويجب نزعه من الغاز الاصطناعي قبل إدخاله إلى عمليات لاحقة.

تعتمد نسبة غاز كبريتيد الهيدروجين في الغاز الاصطناعي على نسبة الكبريت في لقيم مجمع التغويز، كما يعود سبب انخفاض القيمة الحرارية إلى استخدام الهواء كمادة مؤكسدة في عملية التغويز بدلاً من الأوكسجين النقي.

● **غاز متوسط القيمة الحرارية**، يتكون بشكل رئيسي من أول أكسيد الكربون، والهيدروجين ونسبة من الميثان وثاني أكسيد الكربون، إضافة إلى غازات أخرى مختلفة، وتتراوح قيمته الحرارية ضمن المجال 300-700 وحدة حرارية بريطانية/قدم المكعبة. ويستخدم الأوكسجين الحر في مفاعل التغويز لإنتاج الغاز المتوسط القيمة الحرارية. يستخدم هذا النوع من الغاز الاصطناعي في معظم الحالات لإنتاج الميثانول والهيدروكربونات العالية القيمة بواسطة عملية فيشر تروبش، وإنتاج أنواع عديدة من الكيماويات. كما يمكن استخدامه أيضاً كوقود لتوليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء.

● **غاز عالي القيمة الحرارية**، يتكون بشكل رئيسي من الميثان، وتبلغ قيمته الحرارية حوالي 900-1000 وحدة حرارية بريطانية/القدم المكعبة، ويمكن استخدامه كبديل للغاز الطبيعي نظراً لاقتراب مواصفاته من مواصفات الغاز الطبيعي.

كما يمكن تصنيف خيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز

في مصافي النفط ضمن المجموعات الرئيسية التالية: (Denton, D., 2005)

- توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
- إنتاج غاز طبيعي اصطناعي
- إنتاج زيوت اصطناعية ووقود وسائل النقل
- الكيماويات الأساسية لإنتاج البتروكيماويات



• إنتاج الهيدروجين

يبين الجدول 2-4 خيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز في مصافي النفط.

الجدول 2-4: خيارات استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز في مصافي النفط

غاز اصطناعي				
ميثانول وكحولات	زيت اصطناعية	هيدروجين	غاز طبيعي اصطناعي	توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
<ul style="list-style-type: none"> • غازولين • ديزل • إثيلين • بروبيلين • فورم ألدهايد • ميثيل أمين • حمض الخل • ثنائي ميثيل إيثر 	<ul style="list-style-type: none"> • مقطرات خام • غازولين • ديزل • وقود نفاثات • نافثا • إثيلين • بروبيلين • أوليفينات • زيت أساس 	<ul style="list-style-type: none"> • معالجة هيدروجينية • تكسير هيدروجيني • تصنيع الأمونيا • تصنيع اليوريا • تصنيع الأسمدة • خلايا الوقود 	<ul style="list-style-type: none"> • ميثان • وقود غازي 	<ul style="list-style-type: none"> • دورة التوليد المتكاملة المدمجة • التوليد المشترك

المصدر: Hook, M., & Aleklett K., 2009

2-3-1: توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء

يعتبر مشروع إنشاء مجمع توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء أحد الخيارات المهمة لاستغلال الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز في مصافي النفط.

يعتمد مبدأ استغلال الغاز الاصطناعي في توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء على تكامل تقنية التغويز مع تقنية توليد الطاقة في عنفات غازية وبخارية، وتسمى بدورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC¹، وتتكون من ثلاث وحدات أساسية، وهي:

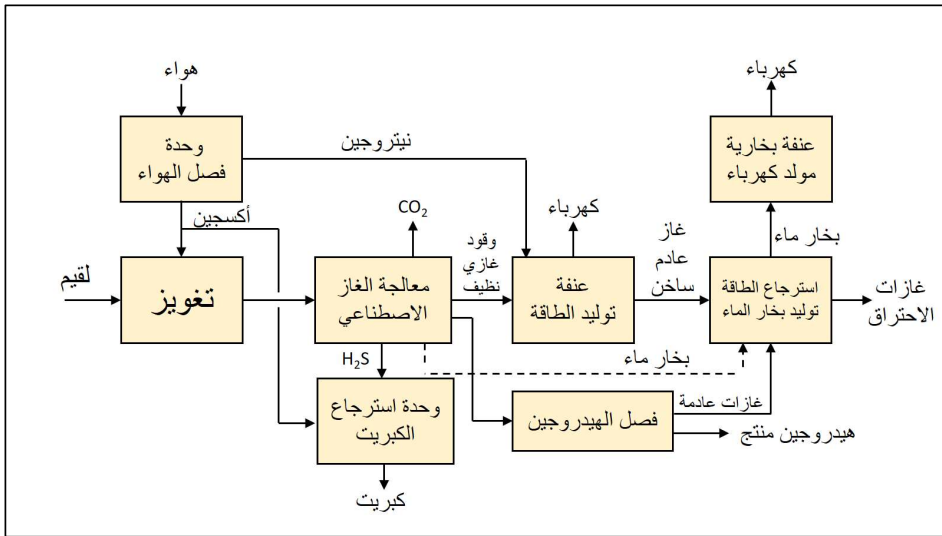
(ESCAP, 2014)

¹ Integrated Gasification Combined Cycle.

- عنفة غازية Gas Turbine التي تحرق الوقود وتنتج الطاقة الكهربائية بواسطة إفلات ضغط غازات العادم.
- مولد بخار استرجاع الحرارة العادمة HRSG الذي يولد بخار الماء بالاستفادة من حرارة غازات الاحتراق الضائعة من العنفة الغازية
- عنفة بخارية لتوليد طاقة كهربائية إضافية بإفلات ضغط بخار الماء المنتج من مولد بخار استرجاع الحرارة العادمة.

يتوقف اختيار نموذج محطة توليد الطاقة الأنسب على مدى حاجة المصفاة لكل من الكهرباء وبخار الماء. فإذا كانت حاجة المصفاة إلى الكهرباء فقط بدون بخار الماء فإن نموذج الدورة المتكاملة مع وجود عنفة بخارية للاستفادة من بخار الماء الفائض في توليد الطاقة الكهربائية هو الأنسب. أما في حالة الحاجة إلى بخار الماء فيمكن عندئذ الاستغناء عن العنفة البخارية، وتحويل كامل كمية بخار الماء إلى الشبكة. يبين الشكل 5-2 مخطط دورة التغويز المتكاملة المدمجة لتوليد الطاقة في مصافي النفط.

الشكل 5-2 مخطط دورة التغويز المتكاملة المدمجة لتوليد الطاقة في مصافي النفط

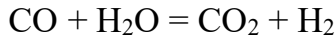
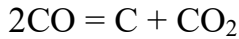
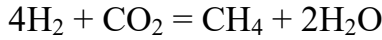
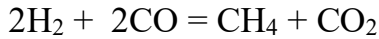
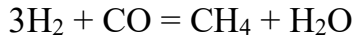


المصدر: Koppel, P., and Lorden, D., 2009



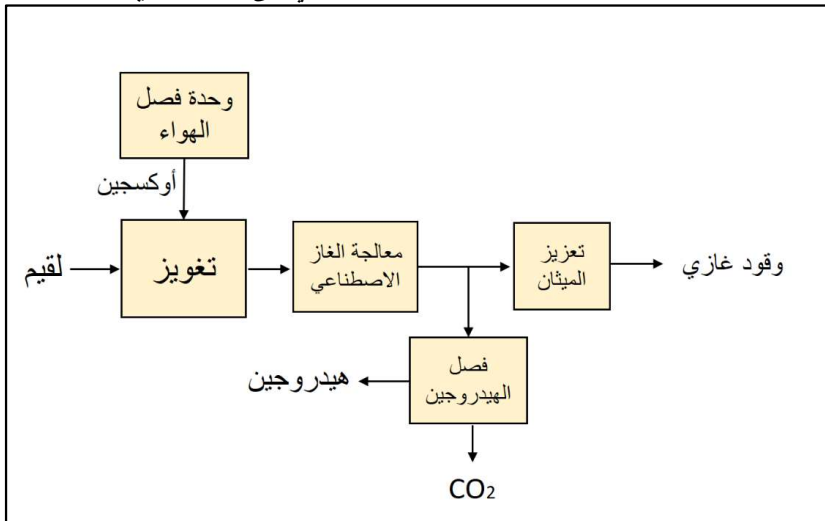
2-3-2: إنتاج غاز طبيعي اصطناعي

يمكن استغلال الغاز الاصطناعي المنتج من وحدة التغويز في إنتاج غاز بمواصفات مماثلة للغاز الطبيعي. فبعد معالجة الغاز الاصطناعي وتخليصه من الشوائب يمرر على مرحلة تفاعل تعزيز نسبة الميثان Methanation Reaction، الذي يتم بين الهيدروجين وأول أكسيد الكربون بوجود عامل حفاز على النحو التالي:



تستخدم عوامل حفازة عديدة في تفاعل تعزيز الميثان، وتختلف فعاليتها حسب نوع المعدن المصنوع منها، وذلك حسب الترتيب التالي: الرينيوم، والنيكل، والكوبالت، والحديد، والمولبيديوم. يبين الشكل 6-2 مخطط تحويل الغاز الاصطناعي إلى وقود غازي.

الشكل 6-2 : مخطط تحويل الغاز الاصطناعي إلى وقود غازي



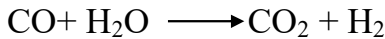
المصدر: Amick, P., 2006

3-3-2: إنتاج الهيدروجين

عند إنشاء مجمع التغويز في مصافي النفط، يمكن الاستفادة من اللقائم الرخيصة الثمن التي تعتبر منتجات ثانوية لتحويلها إلى هيدروجين بتكلفة منخفضة نسبياً، مقارنة بعمليات إنتاج الهيدروجين الأخرى، حيث تستهلك مصافي النفط كميات كبيرة من الهيدروجين لاستخدامه في عمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني. (Jacobs, 2015)

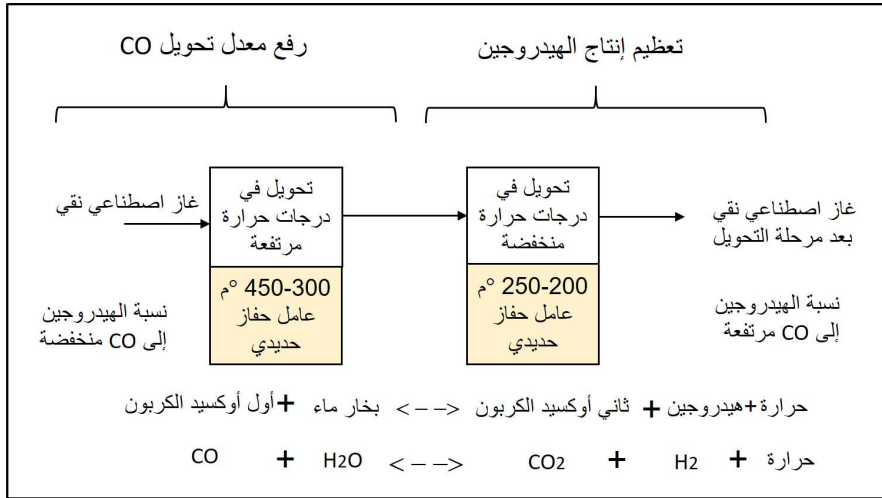
عندما يصمم مجمع التغويز لإنتاج الهيدروجين في المصفاة يصبح مخطط سير عملية التغويز أكثر تعقيداً، حيث يضاف إلى المجمع وحدات فصل الهيدروجين من الغاز الاصطناعي، علاوة على تعديل ظروف تشغيل المغوز لتعظيم نسبة الهيدروجين في الغاز الاصطناعي المنتج.

يوجد أكثر من طريقة لفصل الهيدروجين من الغاز الاصطناعي، أهمها طريقة تحويل غاز أول أكسيد الكربون إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون CO₂، وتصل كفاءتها إلى حوالي 98% أو أكثر، وذلك حسب التفاعل التالي:



تتكون وحدة تحويل الماء والغاز من مفاعلين يحتويان على عامل حفاز من الحديد. يدخل الغاز الاصطناعي الحاوي على نسبة منخفضة من الهيدروجين إلى المفاعل الأول ذي درجة الحرارة المرتفعة 300-450 °م، ثم إلى المفاعل الثاني ذي درجة الحرارة المنخفضة 200-250 °م. يبين الشكل 2-7 مراحل عملية تحويل الغاز والماء لرفع تركيز الهيدروجين في الغاز الاصطناعي.

الشكل 2-7: مراحل عملية تحويل الغاز والماء لرفع تركيز الهيدروجين في الغاز الاصطناعي



المصدر: Hurd, D., Park, S., & Kan, J., 2014:

بعد تحويل غاز أول أكسيد الكربون إلى هيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون يسحب الغاز الناتج إلى وحدة تنقية بواسطة الأغشية Membrane، وذلك لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون. (Evenson, C., & Waters, D., 2011)

كما يمكن رفع درجة نقاوة الهيدروجين المنتج من وحدة التحويل باستخدام طريقة الامتزاز بالضغط المتأرجح¹ PSA، وطريقة أغشية نقل الهيدروجين² HTM، وقد يحتوي المجمع على نوع أو أكثر من هذه الطرق للحصول على النقاوة المطلوبة.

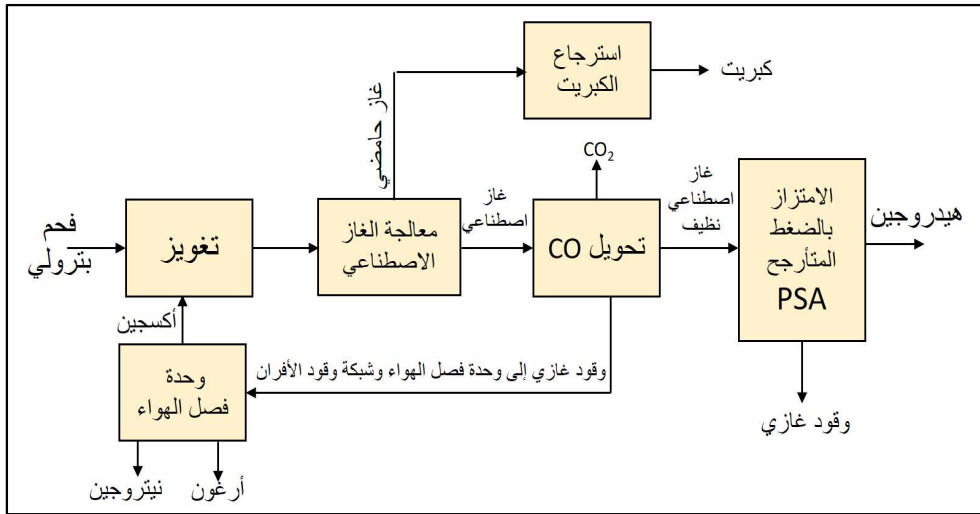
تتكون وحدة الامتزاز بالضغط المتأرجح PSA من وعائين يحتويان على أسرة من مادة ذات خاصية امتصاص انتقائية للميثان وغاز أول أكسيد الكربون CO، وثاني أكسيد الكربون CO₂، والماء H₂O، تحت الضغط المرتفع. ثم تنزع المواد الممتصة بتخفيض الضغط في وعاء الامتزاز، بعد أن يحول الغاز اللقيم إلى الوعاء الثاني. تتم العملية بشكل

¹ Pressure Swing Adsorption

²² Hydrogen Transfer Membrane

دوري لينتج عنها وقود غازي منخفض إلى متوسط القيمة الحرارية. أما الهيدروجين المنتج من وحدة الامتزاز بالضغط المتأرجح فيمكن أن تبلغ نقاوته حوالي 99.8% باستخدام عدد مناسب من أسرة مادة الامتزاز في الوعاء. كما يمكن أن تصل كفاءة فصل الهيدروجين من الغاز الاصطناعي اللقيم إلى 90%. **الشكل 2-8** يبين وحدات تنقية الهيدروجين من الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز المصفاة. (Gupta, S., et al., 2015)

الشكل 2-8: وحدات تنقية الهيدروجين من الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز المصفاة



المصدر: Gupta, S., et al., 2015

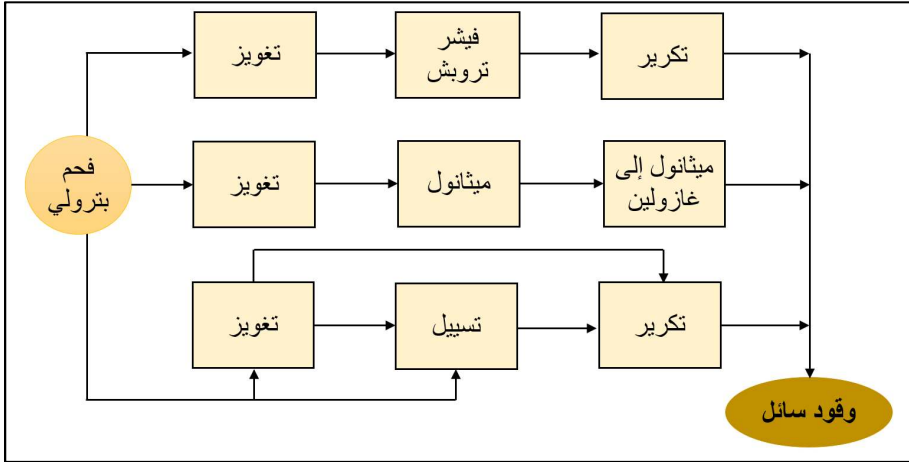
2-3-4: تحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل

يمكن الحصول على السوائل الهيدروكربونية من مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة النفط من خلال الخيارات المبينة في **الشكل 2-9**، وهي:

- مسار عملية فيشر - تروبش، وذلك بتحويل الغاز الاصطناعي المنتج من مفاعل التغويز إلى مفاعل فيشر- تروبش، حيث يتم تحويل الغاز إلى سوائل هيدروكربونية، ويتم فصلها في وحدات التكرير في المصفاة.
- مسار تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين، يتم فيه تحويل الغاز الاصطناعي المنتج من مفاعل التغويز إلى ميثانول، ثم تحويل الميثانول إلى غازولين.



- مسار عملية التحويل المشتركة، حيث يتم تطبيق عمليتي التسييل والتغويز معاً، ثم تحول منتجات العمليتين إلى وحدات التكرير في المصفاة لفصل السوائل إلى منتجات ذات مواصفات متوافقة مع مواصفات منتجات تكرير النفط.
- الشكل 2-9: خيارات إنتاج الوقود السائل من مجمع تغويز الفحم البترولي في المصفاة**



المصدر: ExxonMobil, 2014

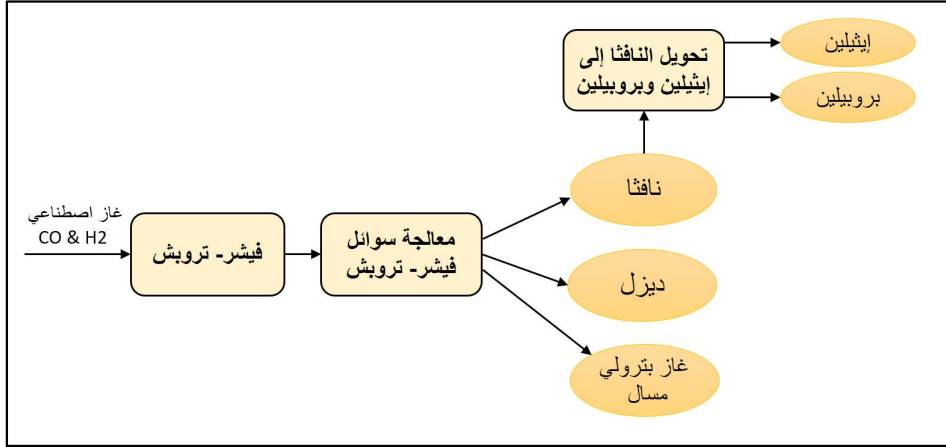
2-3-4-1: إنتاج السوائل الهيدروكربونية بطريقة فيشر ترويش

اكتشفت عملية فيشر - ترويش في عشرينيات القرن العشرين من قبل العالمين فيشر وترويش، وتعتمد على مبدأ إدخال الغاز الاصطناعي المكون من أول أكسيد الكربون CO، والهيدروجين H₂ إلى مفاعل يحتوي على عامل حفاز مصنوع من الحديد، أو الكوبالت. وتتكون منتجات عملية فيشر - ترويش من مزيج من الهيدروكربونات التي تخضع لعملية فصل إلى منتجات تتكون من ميثان وبروبان، ونافتا، وديزل، ووقود نفاثات، إضافة إلى مركبات ثقيلة تصنف على أنها شموع. يبين الشكل 2-10 مخطط عملية فيشر - ترويش لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل.

لكي تصبح منتجات عملية فيشر ترويش قابلة للاستخدام كوقود في محركات وسائل النقل يجب معالجتها لتحسين خصائصها. فعلى سبيل المثال يبلغ الرقم الأوكتاني للنافتا

المنتجة حوالي 40 بطريقة البحث، وهي قيمة منخفضة، لهذا تحول إلى وحدة تهذيب
بالعامل الحفاز لرفع الرقم الأوكثاني المناسب. (Elangovan, S., 2012)

الشكل 2-10: مخطط عملية فيشر - ترويش لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل



المصدر: INL, 2013

ينتج عن تفاعلات البلمرة في عملية فيشر- ترويش مجموعة من السلاسل الهيدروكربونية التي تحتوي على ذرات الكربون. ولأطوال هذه السلاسل الكربونية دور في تحديد نسب المكونات التي ستننتج من العملية، وهي الغازات الخفيفة، والنافثا والديزل والشموع. ويمكن التحكم بهذه النسب من خلال تعديل ظروف تشغيل العملية، أو تغيير نوع العامل الحفاز المستخدم في المفاعل. إلا أن فعالية عملية التحكم محدودة، وبالتالي لا يمكن تفادي تشكل بعض المنتجات غير المرغوبة. فعلى سبيل المثال، يمكن تعظيم نسبة إنتاج الغازولين، وخفض نسبة إنتاج الديزل، إلا أن هذا النظام من التشغيل يرافقه ارتفاع كبير في نسبة الغازات الخفيفة لا يمكن تفاديه، وخصوصاً الميثان. وقد جرت محاولات لتفادي إنتاج كمية كبيرة من الميثان، وذلك من خلال تعظيم إنتاج الشموع التي يمكن تكسيدها لإنتاج سوائل تستخدم كوقود في وسائل النقل.

تساهم الخصائص العالية الجودة التي تميز منتجات عملية فيشر- ترويش في حصولها على أسعار تفضيلية تفوق أسعار منتجات مصافي النفط التقليدية، حيث أن



استخدامها للمزج مع منتجات المصفاة الحاوية على نسب مرتفعة من الكبريت يمكن المصفاة من توفير التكاليف الاستثمارية الباهظة اللازمة لإنشاء وحدات المعالجة الهيدروجينية. فعلى سبيل المثال يتميز وقود الديزل المنتج من عملية فيشر- ترويش باحتوائه على نسبة منخفضة جداً من الكبريت، لا تزيد عن 1 ج.ف.م، وهي أدنى بكثير من النسبة المحددة في المعايير الأوروبية والأمريكية الخاصة بمواصفات الديزل المستخدم في محركات وسائل النقل، والتي تبلغ 10 ج.ف.م. كما يتميز وقود الديزل المنتج من عملية فيشر- ترويش بأنه خال تقريباً من المركبات العطرية، ويحتوي على نسبة مرتفعة من البارافينات، وبالتالي فإن رقمه السيتاني مرتفع جداً، وقد يصل في بعض أنواع وقود الديزل المنتج من عمليات التغويز إلى المجال 70-80، وهذه القيمة أعلى بكثير من قيمة الرقم السيتاني للديزل المنتج من تكرير النفط التي تتراوح قيمته ضمن المجال 40-55. (Radom, I., 2008)

تجدر الإشارة إلى أن الرقم السيتاني المرتفع يساهم في خفض انبعاثات وقود النقل الملوثة للبيئة، وذلك نتيجة تحسين عملية إقلاع المحرك عند درجات الحرارة المنخفضة، والتي تؤدي إلى خفض كمية السخام والهيدروكربونات الملوثة للبيئة التي تنبعث من المحرك أثناء الدقائق الأولى لعمل المحرك قبل ارتفاع درجة حرارته. كما يساهم ارتفاع الرقم السيتاني في خفض معدل انبعاثات أكسيد النيتروجين والجسيمات الدقيقة التي تنطلق من المحرك إلى البيئة بعد ارتفاع درجة حرارته.

أشارت نتائج دراسات أجريت على بعض مجمعات تحويل الفحم إلى سوائل، كمجمع ساسول في جنوب أفريقيا، إلى إمكانية مزج وقود النفاثات المنتج من وحدة فيشر- ترويش مع الوقود Jet A أو Jet A-1 المنتج من مصافي النفط حتى 50%. فضلاً عن أن اختبارات الأداء التي قامت بها إدارة القوى الجوية الأمريكية أثبتت سلامة استخدام وقود النفاثات من

¹ الرقم السيتاني هو قياس مقدار قابلية وقود الديزل للاشتعال. وكلما كان الرقم كبيراً كانت سرعة اشتعال الوقود عند دخوله إلى غرفة احتراق الوقود في المحرك أسرع.



تقنية فيشر- ترويش للمزج مع وقود النفاثات JP-8 المستخدم في معظم الطائرات الحربية الأمريكية. إلا أن بعض هذه الدراسات أشارت إلى وجود مشكلتين في مزج وقود النفاثات المنتج من عملية فيشر- ترويش مع وقود النفاثات التقليدي المنتج في مصافي النفط، الأولى تتعلق باللدائن المطاطية Elastomers التي تستخدم كمادة مانعة للتسرب في منظومة وقود محركات بعض الطائرات القديمة، حيث أنها تنتفخ عند تعرضها للهيدروكربونات العطرية، لكن عندما تتعرض هذه المادة إلى وقود فيشر- ترويش الحاوي على نسبة منخفضة من العطريات فإن ذلك يؤدي إلى انكماشها، وبالتالي احتمال حدوث تسرب للوقود من خزان وقود الطائرة. المشكلة الثانية هي أن كثافة الطاقة الحجمية لوقود النفاثات المنتج من فيشر- ترويش أدنى بمعدل 3.7% من الوقود التقليدي المنتج من النفط. وحيث أن الحد الأقصى المسموح لكمية الوقود في الطائرة يتحدد بحجم خزان الوقود، فإن استخدام وقود فيشر ترويش يؤدي إلى خفض مجال المسافة المتاحة للطيران، إلا أن الانخفاض يعتبر طفيفاً.

أما انخفاض نسبة الكبريت في وقود فيشر- ترويش فليس له تأثير يذكر على القيمة السعرية لهذا المنتج، حيث أن المعايير البيئية الدولية لا تزال متساهلة في الحد من نسبة الكبريت في وقود النفاثات التي تصل إلى 3000 جزء في المليون. وبالتالي فإنه من غير المتوقع أن يكتسب المنتج أهميته قبل صدور تشريعات جديدة تفرض خفض نسبة الكبريت في وقود النفاثات.

تتراوح نسبة النافثا المنتجة من عملية فيشر- ترويش ضمن المجال 20-40% من إجمالي منتجات العملية. وتشير الدراسات الاقتصادية إلى أن قيمة النافثا أدنى من قيمة الديزل بحوالي 30%، وذلك بسبب انخفاض رقمها الأوكتاني (40 إلى 50 بطريقة البحث) وصعوبة تحويلها إلى غازولين في مصافي النفط التقليدية، مما يجعلها ملائمة أكثر للاستخدام كوقود في وحدات صناعة البتروكيماويات.



2-4-3-2: تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين

ابتكرت عملية تحويل الميثانول إلى غازولين في سبعينيات القرن العشرين من قبل مؤسسة موبيل للبحث والتطوير، والتي تحول اسمها إلى مؤسسة إكسون موبيل للبحث والتطوير¹، حيث وجد الباحثون أن بنية وحجم فراغات حبيبات بعض أنواع العوامل الحفازة المصنوعة من الزيوليت يمكنها تعزيز عملية تحويل الهيدروكربونات إلى مركبات هيدروكربونية مماثلة في تركيبها لمكونات الغازولين مثل الأوليفينات Olefins، والبارافينات المتفرعة Branched Paraffins، والعطريات Aromatics والتي لها دور مهم في رفع الرقم الأوكتاني للمزيج الهيدروكربوني. كما يتميز الغازولين المنتج من عملية تحويل الميثانول بخلوه من الكبريت. يبين الجدول 2-5 مقارنة بين مواصفات الغازولين المنتج من مصافي النفط والغازولين المنتج من الميثانول في الولايات المتحدة الأمريكية. (ExxonMobil, 2014)

الجدول 2-5: مقارنة بين مواصفات الغازولين المنتج من مصافي النفط والغازولين المنتج من الميثانول في الولايات المتحدة الأمريكية

غازولين من الميثانول	صيف 2009	
0	3.7	أوكسجين (%وزناً)
26.5	35	عطريات (%حجماً)
0.3	1	بنزين عطري (%حجماً)
12.6	18	أوليفينات (%حجماً)
0	10	كبريت (ج.ف.م)

المصدر: ExxonMobil, 2014

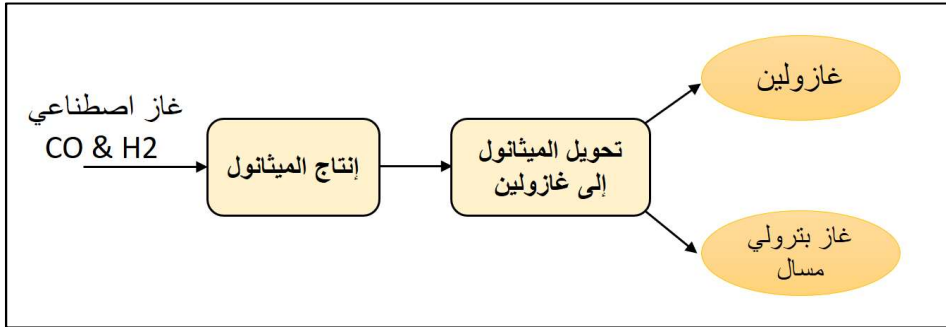
في ثمانينيات القرن العشرين أنشئت أول وحدة تجريبية لإنتاج الغازولين من الميثانول في ألمانيا، طاقتها 100 ب/ي، بالتعاون بين كل من إدارة الطاقة الأمريكية والحكومة الألمانية. بينما بدأت أول وحدة تجارية بالعمل عام 1985 في مونتوني

¹ ExxonMobil Research & Development Corporation

Motunui- نيوزيلاندا، بدعم من الحكومة النيوزيلاندية، طاقتها 14500 ب/ي، واستمرت في العمل لأكثر من عشر سنوات، ثم توقفت بسبب هبوط أسعار النفط إلى مستويات منخفضة، إلى أن أعيد تشغيلها من جديد بعد ارتفاع الأسعار في عام 2008. (ExxonMobil, 2016)

تتكون عملية تحويل الغاز الاصطناعي المنتج من عملية التغويز إلى غازولين من مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى تحويل الغاز الاصطناعي إلى ميثانول، وفي المرحلة الثاني يحول الميثانول إلى غازولين. يبين الشكل 11-2 مراحل عملية تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين.

الشكل 11-2: مراحل عملية تحويل الغاز الاصطناعي إلى غازولين

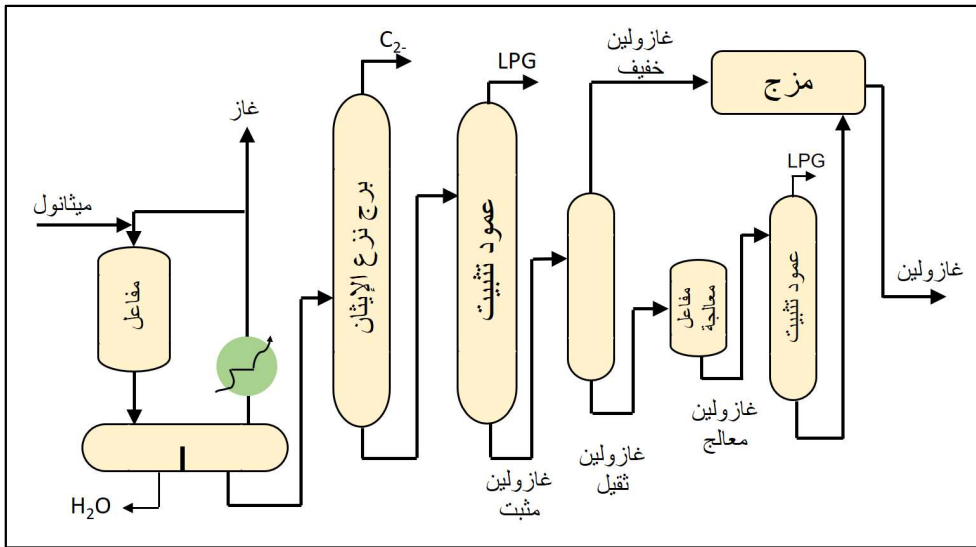


المصدر: INL, 2013

بعد مرحلة تحضير وتنقية الغاز الاصطناعي لتعديل نسبة الهيدروجين إلى أول أكسيد الكربون إلى القيمة الملائمة لإنتاج الميثانول تأتي مرحلة تحويل الغاز الاصطناعي النظيف إلى ميثانول في ظروف تشغيل معتدلة من درجات الحرارة تبلغ 200 °م والضغط حوالي 750 رطل/البوصة المربعة، في تفاعل ناشر للحرارة بشكل طفيف. أما المرحلة الثانية التي يتم فيها تحويل الميثانول إلى غازولين فتتم في مفاعل ذي سرير ثابت يحتوي على عامل حفاز مصنوع من النحاس، وفي شروط مرتفعة من درجات الحرارة تصل

ضمن المجال 300-400 م°، والضغط 25-35 ميغا باسكال. يبين الشكل 12-2 مخطط سير عملية تحويل الميثانول إلى غازولين.

الشكل 12-2: مخطط عملية تحويل الميثانول إلى غازولين



المصدر: Helton, T., & Hindman, M., 2014

يكتسب المفاعل الحرارة الأولية اللازمة للتفاعل من مصدرين، أولهما خارجي، والثاني من تفاعل الغاز الاصطناعي على سطح العامل الحفاز الناشر للحرارة، حيث يتم التحكم بحرارة المفاعل من خلال إرجاع الغاز غير المتفاعل إلى المفاعل.

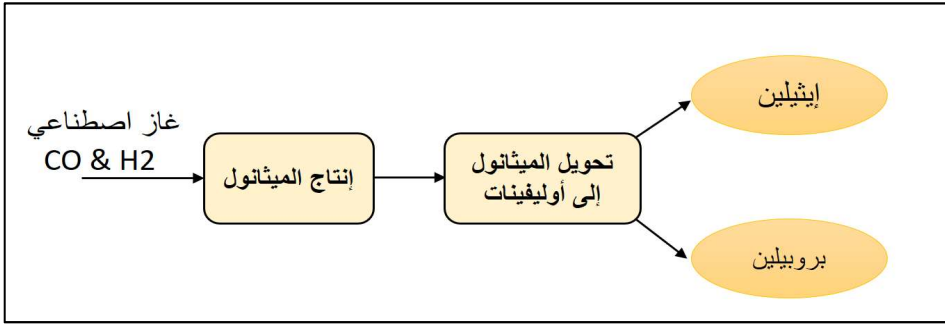
يسحب الغازولين المنتج من المفاعل إلى عملية التجزئة التي تبدأ بعملية التثبيت لنزع المركبات الخفيفة المكونة من الإيثان والغازات الخفيفة، إضافة إلى الغاز البترولي المسال LPG الذي يعتبر منتجاً ثانوياً من عملية تحويل الميثانول إلى غازولين، بنسبة تتراوح بين 10 إلى 12% من إجمالي منتجات العملية، حيث يصدر للاستخدام كوقود منزلي بديل عن الغاز الطبيعي، أو كوقود لمحركات وسائل النقل. أو إعادته إلى مفاعل تحويل الغاز الاصطناعي للحصول على مزيد من الغازولين، أو مزجه مع الغازولين

المنتج. أما الغازولين المثبت فيسحب إلى مرحلة التقطير لفصل الغازولين الخفيف عن الثقيل.

2-3-4-3: تحويل الغاز الاصطناعي إلى أوليفينات

يمكن إنتاج الأوليفينات التي تتكون بشكل رئيسي من الإيثيلين والبروبيلين بعملية التكسير بالعامل الحفاز Catalytic Cracking للميثانول المنتج من الغاز الاصطناعي. يبين الشكل 2-13 مراحل تحويل الغاز الاصطناعي إلى أوليفينات.

الشكل 2-13: مراحل تحويل الغاز الاصطناعي إلى أوليفينات



المصدر: INL, 2013

يدخل الميثانول إلى مفاعل السرير المميع، حيث تتحرك جزيئات العامل الحفاز بشكل حر داخل المفاعل، ولا تتجمع في منطقة محددة، كما يزود المفاعل بدارة تنشيط للعامل الحفاز ليعاد استخدامه.

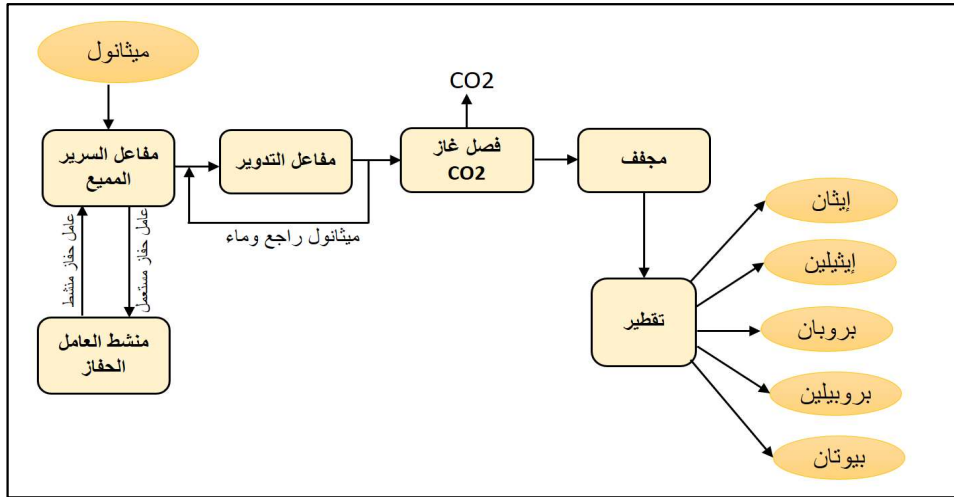
يعمل المفاعل في درجة حرارة تصل إلى 350 °م، وضغط 0.2 ميغا باسكال. تتكون منتجات المفاعل من مزيج من الإيثيلين C_2H_4 ، والبروبيلين C_3H_6 ، والميثانول غير المتفاعل CH_3OH ، والماء H_2O ، وغاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، وبعض الهيدروكربونات الأخرى، مثل الإيثان C_2H_6 ، والبروبان C_3H_8 ، والبيوتان C_4H_{10} ، وسلاسل هيدروكربونية أثقل من البيوتان (C_4+) .



يسحب الميثانول غير المتفاعل الممزوج بالماء إلى عملية تبريد وتكثيف لتحويله إلى سائل، ثم يعاد المزيج المتكاثف إلى مفاعل السرير المميع لتحويله إلى أوليفينات مرة أخرى. أما العامل الحفاز المستعمل فيسحب من المفاعل إلى وعاء تنشيط لحرق فحم الكوك المترسب عليه بواسطة الهواء الساخن، ثم يعاد إلى مفاعل السرير المائع. وتكرر هذه العملية باستمرار. (Hurd, D., Park, S., & Kan, J., 2014)

تخضع الأوليفينات الخارجة من مفاعل التدوير لعمليات معالجة أخرى بهدف تخليصها من ثاني أكسيد الكربون وضغطها بعد ذلك لتحويلها إلى الحالة السائلة، ثم يتم إدخالها إلى مرحلة الفصل بالتقطير، لفصلها إلى إيثان، وبروبان، وبيوتان، وبروبيلين، وإيثيلين. يبين الشكل 14-2 مخطط عملية تحويل الميثانول إلى أوليفينات.

الشكل 14-2: مخطط عملية تحويل الميثانول إلى أوليفينات



المصدر: Hurd, D., Park, S., & Kan, J., 2014

2-4: دوافع تطبيق تقنية تحويل الفحم في صناعة تكرير النفط

أدى تراجع جودة النفط الخام، وازدياد الأنواع الثقيلة والحاوية على نسب عالية من الشوائب، وما رافقه من تنامي الطلب على المنتجات الخفيفة والعالية الجودة، إلى توجه معظم مصافي النفط في العالم نحو توظيف استثمارات باهظة في مشاريع إنشاء عمليات



تحويل المنتجات الثقيلة غير المرغوبة، الناتجة عن تكرير النفط الثقيلة، إلى منتجات خفيفة تلبي متطلبات التشريعات الخاصة بحماية البيئة من التلوث. (Gupta, S., et al., 2015)

كما أدى لجوء مصافي النفط إلى توسيع طاقة العمليات التحويلية، لتعظيم الاستفادة من مخلفات التقطير الثقيلة، إلى ظهور كميات فائضة من مخلفات التكرير المنخفضة القيمة كالفحم البترولي والقار، والتي أصبحت تشكل عبئاً على مصافي النفط نظراً لصعوبة تصريفها، علاوة على ظهور التشريعات التي تمنع استخدامها كوقود بسبب احتوائها على نسب عالية من الشوائب الملوثة للبيئة، مما دفع القائمين على صناعة التكرير إلى البحث عن سبل لتصريف هذه المخلفات بطرق آمنة.

حظيت فكرة تطبيق عملية تغويز الفحم البترولي والزيوت الثقيلة اهتماماً ملحوظاً كإحدى الوسائل الممكنة لتصريف مخلفات التكرير الثقيلة، وذلك نظراً للفوائد العديدة التي يمكن أن تحصل عليها صناعة تكرير النفط، منها ما هو تقني، ومنها ما هو اقتصادي. (Sudero, M., et al., 2009)

1-4-2: تحسين ربحية صناعة تكرير النفط

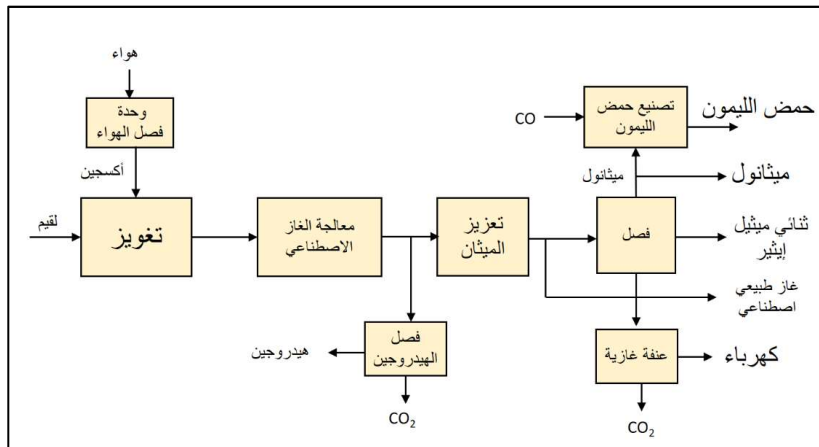
أدى ارتفاع تكاليف الإنشاء إلى تصنيف تقنية تحويل الفحم إلى سوائل على أنها غير مجدية اقتصادياً منذ عقود طويلة، في معظم مناطق العالم، وخصوصاً في المناطق التي تمتلك احتياطات كبيرة من الغاز الطبيعي، إلا أن الدراسات الإحصائية التي أجريت في العقدين الماضيين أشارت إلى حدوث ارتفاع ملحوظ في عدد وحدات تحويل الفحم إلى سوائل في العالم، وأن حوالي 15% من إجمالي طاقة عمليات التغويز، المخطط إنشاؤها في السنوات الخمس القادمة، تعتمد على الفحم البترولي كلقيم باعتبارها إحدى الطرق الواعدة لتحويل بواقي التقطير الثقيلة غير المرغوبة إلى منتجات عالية القيمة.

تعود الفوائد الاقتصادية لتطبيق تقنية التغويز في مصافي النفط إلى المرونة العالية في تحويل أنواع عديدة من اللقائم الأحفورية أو المتجددة، أو المخلفات الصلبة إلى غاز



اصطناعي (Abadie, L., & Chamorro, J., 2009) ، فقد أدى تنامي الطاقة الإنتاجية لوحدات التفحيم المؤجل في مصافي العالم إلى وجود فائض في إنتاج الفحم البترولي، فأصبح يعتبر أحد المنتجات الثانوية التي تشكل عبئاً ثقيلاً على البلدان المنتجة، إلا أن هذه الحالة تغيرت بعد تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل التي أتاحت الفرصة أمام مصافي النفط لتحويل الفحم البترولي إلى منتجات خفيفة عالية القيمة قابلة للاستخدام كوقود في وسائل النقل، علاوة على إمكانية تحويله إلى غاز طبيعي اصطناعي نظيف يمكن استخدامه كوقود بديل للغاز الطبيعي لتوليد الطاقة الكهربائية، وبخار الماء، وإنتاج الهيدروجين، وإنتاج الكيماويات في مجمع واحد، أو ما يسمى بالتوليد المتعدد الأهداف. Polygeneration يبين الشكل 2-15 مخطط عمليات التوليد المتعدد الأهداف.

الشكل 2-15: مخطط عمليات التوليد المتعدد الأهداف



المصدر: Bajura, A., & Eyring, E., 2016

قامت شركة أميك فوستر ويلر AMEK-FosterWheeler بإجراء دراسة مقارنة بين ربحية عدد من خيارات استغلال الفحم البترولي في مشروع إنشاء مجمع تغويز الفحم البترولي المنتج من وحدة التفحيم في إحدى مصافي النفط في منطقة الشرق الأوسط، تبلغ طاقتها 100 ألف برميل في اليوم، وكمية الفحم البترولي المنتج 5.75 طن/اليوم، وبفرض سعر زيت الوقود الثقيل 80 دولار أمريكي للبرميل، وسعر الفحم البترولي 60 دولار



أمريكي للطن، وسعر الهيدروجين 2000 دولار أمريكي للطن، حيث تم حساب مقدار الوفرة الناتج من تكلفة زيت الوقود الثقيل من خلال الخيارات التالية:

● "حالة الأساس" توليد الطاقة الكهربائية بمحطة تعتمد على حرق الوقود الثقيل، وبيع الفحم البترولي المنتج للتصدير.

● توليد الطاقة الكهربائية في محطة التغويز بالسرير المميع الدوار¹

● توليد الطاقة الكهربائية في محطة التغويز بالسرير المميع الدوار، وإنتاج الهيدروجين.

● توليد الطاقة الكهربائية بدورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC.

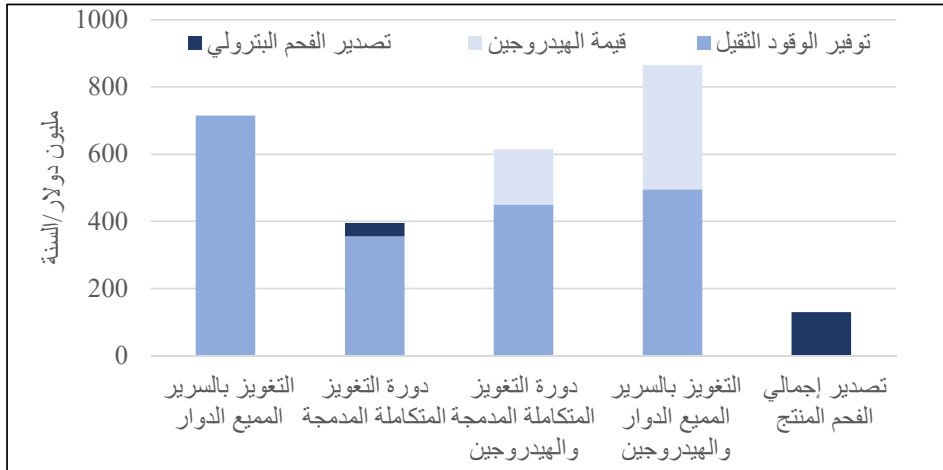
● توليد الطاقة الكهربائية بدورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC وإنتاج الهيدروجين.

أشارت نتائج الدراسة إلى أن توليد الطاقة الكهربائية بدورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC وإنتاج الهيدروجين هو الخيار الأكثر ربحية مقارنة بالخيارات الأخرى. (Beeston, S., 2015) يبين الشكل 2-16 مقارنة اقتصادية لخيارات استغلال الفحم البترولي في مصافي النفط.

¹ Circulating Fluidized Bed Gasifier



الشكل 2-16: مقارنة اقتصادية بين خيارات استغلال الفحم البترولي



المصدر: Beeston, S., 2015

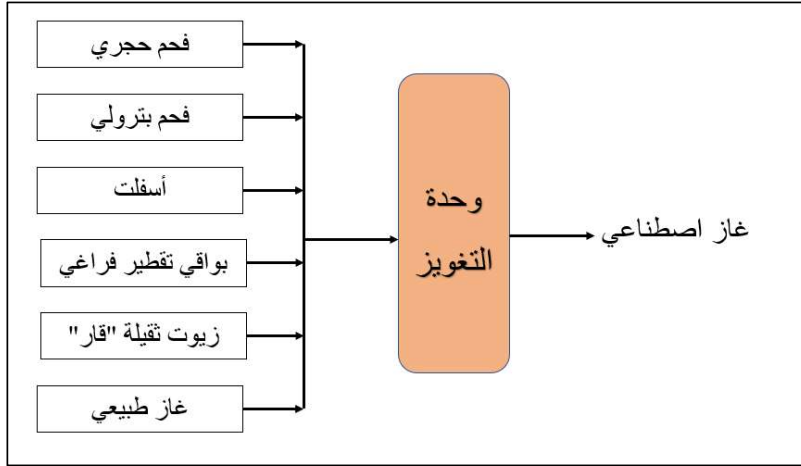
2-4-2: تعزيز مرونة تكرير النفوط الثقيلة

أدى ارتفاع إمدادات الأنواع الثقيلة من النفط الخام، وتراجع معدل إنتاج أنواع النفط الخام الخفيف في الأسواق العالمية إلى دفع العديد من مصافي النفط في معظم مناطق العالم إلى تعزيز قدرتها على تكرير هذه الأنواع للاستفادة من فارق السعر في تحسين الربحية. ونظراً لارتفاع نسبة المخلفات الثقيلة التي تنتج من تكرير النفط الخام الثقيل، كالفحم البترولي والقار والأسفلت، ازدادت الحاجة إلى تطوير تقنيات حديثة لتحسين الاستفادة من هذه المنتجات وتحويلها إلى منتجات عالية القيمة، يمكن أن تساهم في تحسين الأداء الاقتصادي لصناعة تكرير النفط بطريقة آمنة وغير ضارة بالبيئة.

(Santos, A., da Silva, R., & Reino, M., 2015)

كما يعزز أهمية دور تقنية تحويل الفحم في صناعة التكرير إمكانية استخدام لقائم أخرى رخيصة من خارج المصفاة كالفحم الحجري، والغاز الطبيعي. يبين الشكل 2-17 أنواع لقائم عملية التغويز في مصفاة النفط. (Bajura, A., & Eyring, E., 2016)

الشكل 2-17: لقائم وحدة التغويز في مصفاة النفط



المصدر: Huskey, T., 2009

تجدر الإشارة إلى أن دمج عملية تحويل الفحم البترولي إلى سوائل مع عمليات مصافي النفط لا يتطلب إجراء تعديلات جوهرية على سير عمليات التكرير، علاوة على أن تقنية التغويز تساهم في تحسين العائد الاقتصادي لمشاريع تطوير المصفاة من خلال تعزيز فرص تكرير أنواع ثقيلة من النفط الخام.

3-4-2: الحصول على منتجات عالية القيمة

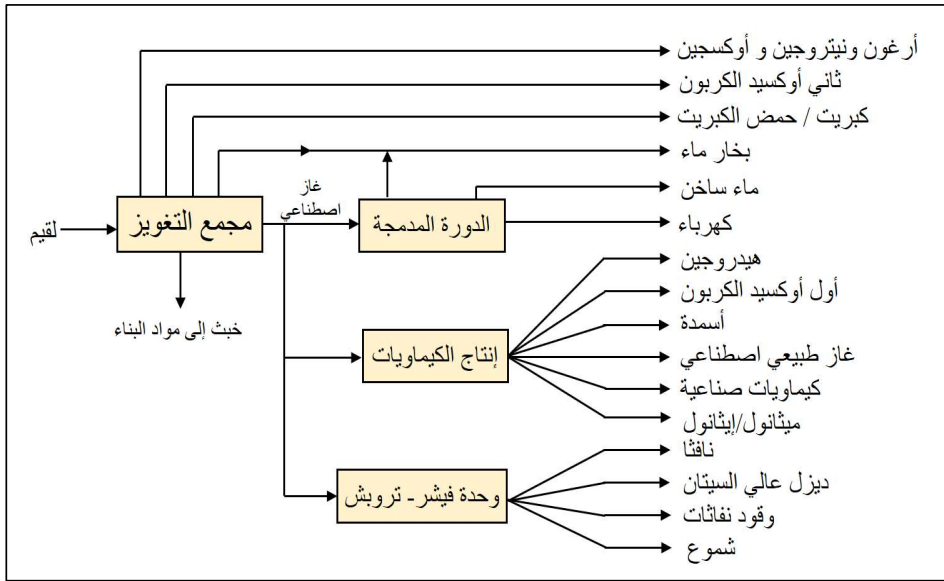
تتميز عملية التغويز بإمكانية إنتاج سوائل هيدروكربونية عالية القيمة يمكن إضافتها إلى منتجات المصفاة، نظراً لتطابق مواصفاتها وخصائصها مع مواصفات الوقود المنتج من تكرير النفط، علاوة على ما تقدمه هذه العملية من منتجات متنوعة ذات أهمية كبيرة للمصفاة، كالهيدروجين، وبخار الماء، والكهرباء، والمنتجات الكيماوية (ميثانول، أمونيا، وغيرها....).

ساهمت التطورات الحديثة في تنوع منتجات تقنية التغويز في مصافي النفط ومجالات استخدامها. فبعد أن كان الدور الرئيسي للغاز الاصطناعي المنتج من عمليات تحويل الفحم في العقود الأولى للقرن الماضي هو الحصول على وقود لتدفئة المنازل،



أصبح من الممكن تحويل الغاز إلى وقود سائل يستخدم في وسائل النقل بعملية فيشر-تروبش، ثم تطورت عملية التحويل بحيث يمكن إنتاج لقائم لصناعة البتروكيماويات، أو لإنتاج الهيدروجين اللازم لعمليات المعالجة الهيدروجينية في مصافي النفط، إضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الغاز الاصطناعي كوقود في وحدات دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC. (Jacobs, 2015) **الشكل 2-18** أنواع منتجات مجمع التغويز في مصافي تكرير النفط.

الشكل 2-18: منتجات مجمع التغويز في مصافي تكرير النفط



المصدر: Shilling, N., 2010

يمكن لعملية التغويز أن تعزز إنتاج مصافي النفط من المنتجات البترولية الخالية من الشوائب الملوثة للبيئة، وذلك من خلال تحويل الغاز الاصطناعي المنتج من مفاعل التغويز إلى سوائل هيدروكربونية، كالميثانول، والأمونيا، والهيدروكربونات البارافينية الخالية من الكبريت، والتي تصنف على أنها وقود ديزل يحتوي على نسبة منخفضة جداً من الكبريت ULSD، ويمكن مزجها مع منتج المصفاة للمساعدة في تلبية متطلبات التشريعات البيئية التي تحظر استخدام الوقود الحاوي على نسب عالية من الشوائب



الكبريتية الملوثة للبيئة. كما يمكن لتقنية التغويز أن تساهم في تعويض النقص الذي يحصل في كمية بعض المنتجات المهمة في المصافي نتيجة تطبيق بعض متطلبات التشريعات البيئية، مثل قرار حظر استخدام مركبات الرصاص كمادة مضافة لتعزيز الرقم الأوكتاني الذي أدى إلى حدوث نقص في كمية إنتاج المصفاة من الغازولين.

كما يمكن لتقنية تحويل الفحم البترولي والزيوت الثقيلة الرخيصة الثمن في المصفاة إلى منتجات سائلة خفيفة أن تساهم في مواجهة مشكلة النقص في نسبة إنتاج الغازولين والمنتجات الخفيفة الأخرى التي تعاني منها بعض المصافي، علاوة على أن عملية التغويز تمتاز بمرونة عالية في إمكانية تغيير نوع المنتجات، بتطبيق تعديلات بسيطة على الوحدة. فعلى سبيل المثال يمكن تغيير نوع مكونات منتج عملية فيشر تروبش بتغيير نوع العامل الحفاز المستخدم في المفاعل.

4-4-2: توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء

تستهلك مصافي النفط كميات كبيرة من الغاز الطبيعي كوقود لتوليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء اللازمين لعمليات التكرير. وقد أثبتت التجارب العملية أن تطبيق تقنية دورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC تساهم في تحسين ربحية المصفاة من خلال استبدال الغاز الطبيعي المستخدم كوقود في العنفة بالغاز الاصطناعي المنتج من وحدة التغويز، حيث أن استبدال نوع الوقود لا يحتاج سوى إلى تعديلات بسيطة لتتناسب مع الفرق في القيمة الحرارية بين الغاز الطبيعي والغاز الاصطناعي.

لا تقتصر فوائد دمج تقنية التغويز في عمليات مصافي النفط على توفير إمكانية حصول المصفاة على معظم كمية الوقود اللازمة لعمليات التكرير من منتجات عملية تحويل الفحم البترولي والمخلفات الثقيلة الثانوية بل تساهم أيضاً في خفض استهلاك الطاقة وترشيد استخدامها، علاوة على الاستفادة من عوائد تصدير الطاقة الكهربائية الفائضة التي توفرها دورة التوليد المتكاملة المدمجة إلى الشبكة العامة. (Goldhammer, B., et al., 2008)



2-4-5: الحصول على الهيدروجين بتكلفة منخفضة

تواجه مصافي النفط في العالم منذ مطلع تسعينيات القرن العشرين ضغوطاً متنامية لإجراء تعديلات صارمة على منتجاتها، مثل خفض نسبة الكبريت في الوقود المستخدم في وسائل النقل مثل الغازولين والديزل إلى مستويات منخفضة جداً تصل إلى أقل من 5 جزء في المليون ، وذلك في إطار تلبية متطلبات التشريعات البيئية التي تفرض مواصفات خاصة للمنتجات البترولية بحيث تكون خالية من الشوائب الملوثة للبيئة، مما أدى إلى تنامي حاجة مصافي النفط إلى إنشاء وحدات معالجة هيدروجينية جديدة، وبالتالي ارتفع معدل استهلاك المصافي من الهيدروجين الباهظ التكلفة. وقد أدى ذلك إلى تحميل المصافي أعباء مالية ضخمة نتيجة ارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين. كما ساهم توجه العديد من مصافي النفط في العالم نحو تكرير نفوط ثقيلة وحامضية تحتوي على نسب مرتفعة من الشوائب الكبريتية في مضاعفة معدلات استهلاك الهيدروجين. كل هذه العوامل ساهمت في تنامي الاهتمام بتقنية تغويز الفحم البترولي باعتبارها وسيلة اقتصادية لتوفير الهيدروجين بتكاليف أدنى مقارنة بعمليات التهذيب البخاري¹ للغاز الطبيعي أو الناftا. (Kerester, A., 2014)

أشارت دراسة اقتصادية، لتقييم جدوى إنشاء مجمع تغويز مخلفات التكرير في مصفاة نفط لإنتاج الهيدروجين إضافة إلى الطاقة الكهربائية. أجريت الدراسة بالتعاون بين جامعة هاجيتيب التركية، وجامعة ووترلو الكندية. (Orhan , O., et al, 2014)

يتكون مجمع التغويز من مرحلة تحضير اللقيم، حيث يطحن البترولي الفحم إلى مسحوق ناعم ثم يخلط مع الماء لتشكيل المزيج الطيني. يدخل المزيج إلى المغوز بدرجة حرارة 1371 °م وضغط 44.8 بار، ثم يسحب الغاز الاصطناعي الخارج من المغوز إلى مبرد، حيث يستفاد من الحرارة في إنتاج بخار الماء. بعد ذلك يمرر الغاز الاصطناعي إلى مرحلة فصل الجسيمات الدقيقة ثم مرحلة نزع الأمونيا، ومنها إلى مفاعل تعظيم نسبة

¹ Naptha Steam Reformer



الهيدروجين من خلال تفاعل غاز أول أكسيد الكربون مع الماء، ثم مرحلة نزع كبريتيد الهيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون، ومنها إلى في وحدة استرجاع الكبريت (كلوس) حيث يتم تحويل الغاز الحامضي إلى كبريت حر. بعد ذلك يحول الغاز المعالج إلى مرحلة تحسين جودة الهيدروجين المنتج والتي يتم فيها تنقية الهيدروجين وتحويل الكمية المتبقية من أول أكسيد الكربون إلى ميثان.

يسحب الغاز الاصطناعي النظيف إلى مرحلة الحرق لتوليد الطاقة الكهربائية، وتؤخذ غازات الاحتراق الناتجة إلى عنفة لتوليد الطاقة الكهربائية، ويستفاد من حرارة غازات الاحتراق قبل خروجها من المدخنة في توليد بخار الماء. أما البخار المنتج فيسحب إلى مجموعة عنفات بخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.

تبلغ الطاقة الإنتاجية للمجمع 175 طن/اليوم من الفحم البترولي بكلفة استثمارية إجمالية 1.07 مليار دولار أمريكي، لإنتاج الكهرباء بمعدل 437 ميغا وات/ساعة، وهيدروجين بمعدل 12850 كغ/الساعة.

بلغت التكلفة الاستثمارية المباشرة وغير المباشرة للمشروع حوالي 1.07 مليار دولار أمريكي، وتكاليف التشغيل 115.58 مليون دولار في السنة.

أشارت الدراسة إلى أن كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من دورة التغويز المتكاملة المدمجة تبلغ 3.45 سنت أمريكي لكل كيلو وات ساعة، وكلفة الهيدروجين 1.38 دولار أمريكي لكل كيلو غرام. يبين الجدول 2-6 المؤشرات الاقتصادية لحالتي تشغيل مشروع تغويز الفحم البترولي.

الجدول 2-6: المؤشرات الاقتصادية لحالتي تشغيل مشروع تغويز الفحم البترولي

50:50 كهرباء: هيدروجين	100% كهرباء	
153475000	127580000	الأرباح (دولار أمريكي/السنة)
6.9	8.3	زمن استرداد رأس المال (سنة)

المصدر: Orhan , O., et al, 2014



2-4-6: تحسين التزام المصفاة بمتطلبات التشريعات البيئية

أشارت العديد من الدراسات إلى أن كمية الانبعاثات المنطلقة من تغويز الفحم البترولي في مجمع توليد الطاقة الكهربائية أدنى مقارنة بحالة استخدام نفس كمية الفحم البترولي كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية، وذلك بسبب توفر إمكانية تحويل الكبريت الموجود في اللقيم إلى كبريت حر يمكن نقله بسهولة إلى خارج المصفاة. (Middleton, D., 2014)

كما أن الخبث المكون من الكربون غير المتفاعل والمعادن الثقيلة والرماد، يمكن فصله بشكل مباشر من المغوز، والاستفادة منه في استرجاع المعادن الثمينة بطريقة أسهل من منظومة الاحتراق المباشر، فضلاً عن إمكانية التقاط أكثر من 95% من الزئبق الموجود في اللقيم. (Khosravi, M., & , Anil Khadse, A., 2013)

تساهم تقنية التغويز في خفض الأثر البيئي لمحطات توليد الطاقة الكهربائية، من خلال تطبيق دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC التي تتميز بكفاءة حرارية عالية عند استخدام الغاز الاصطناعي كوقود في العنفة الغازية مقارنة بتقنيات توليد الطاقة الكهربائية الأخرى التي تستخدم الفحم المسحوق كوقود Pulverized Coal، وبالتالي ينعكس ذلك على خفض نسبة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، علاوة على أن انبعاثات أكاسيد الكبريت SO_x تكون أخفض من خلال نزع الكبريت من الغاز الاصطناعي قبل إدخاله إلى العنفة.

كما يساهم تطبيق تقنية دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC في حفظ الموارد الطبيعية بما تتميز به من انخفاض في معدل استهلاك الماء مقارنة بتقنية حرق الفحم المباشر كوقود، حيث أن إمكانية نزع الكبريت من الغاز الاصطناعي قبل دخوله إلى محطة دورة التغويز المتكاملة المدمجة يلغي الحاجة إلى تركيب منظومة نزع أكاسيد الكبريت من غازات الاحتراق التي تستهلك كميات كبيرة من المياه. (Barnes, I., 2011)



1-6-4-2: الانبعاثات الهوائية

أشارت مجموعة من التقارير التي أصدرتها مراكز أبحاث استشارية في عام 2010، وأخرى صادرة عن شركات تشغيل مجمعات تغويز الفحم، في كل من الولايات المتحدة الأمريكية واليابان، أن معدل الانبعاثات التي تطلقها معظم مجمعات تغويز الفحم البترولي التي أنشئت في مصافي النفط خلال العقود الثلاث الماضية كانت متوافقة مع متطلبات المعايير الخاصة بضبط الانبعاثات الهوائية الملوثة للبيئة، مقارنة بمحطات توليد الطاقة الكهربائية التي تستخدم حرق الوقود بشكل مباشر. (Tiefenbacher, J., 2010)

تجدر الإشارة إلى أن كفاءة توليد الطاقة الكهربائية في وحدات دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC أعلى مقارنة بالطرق الأخرى، علاوة على سهولة تركيب منظومة التقاط وخرن غاز ثاني أكسيد الكربون، يمكن التقاط أكثر من 90% من غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغاز الاصطناعي المنتج من عملية تغويز الفحم ونقله إلى أماكن الاستهلاك أو التخزين. كما أن عملية حرق الوقود ينتج عنها نفايات صلبة ضارة بالبيئة، بينما في عملية التغويز يمكن فصل كامل كمية المركبات الكبريتية الموجودة في اللقيم تقريباً من خلال معالجة الغاز الاصطناعي المنتج من تقنية التغويز بطريقة كلاوس وتحويلها إلى كبريت حر قابل للتصدير بشكل آمن لاستخدامه في الصناعة، كإنتاج حمض الكبريت، أو كمبيد حشري زراعي. ولتقييم الأثر البيئي لوحدة إنتاج الطاقة الكهربائية بطريقة دورة التغويز المتكامل المدمجة مع وحدات توليد الكهرباء بتقنيات أخرى مثل وحدة الاحتراق بالسرير المميع تحت الضغط الجوي¹ AFBC بوجود وحدة خفض انتقائي بدون عامل حفاز² SNCR، ووحدة الاحتراق بالسرير المميع المضغوط³ PFBC بوجود وحدة

Atmospheric Fluidized Bed Combustion¹

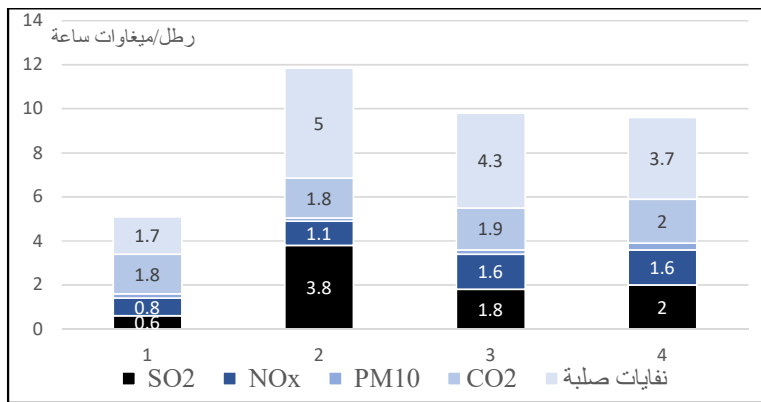
Selective Non-Catalytic Reduction²

Pressurized Fluidized Bed Combustion³



خفض انتقائي بدون عامل حفاز¹ SNCR، ووحدة توليد كهرباء بالفحم المسحوق بوجود وحدة نزع كبريت² FGD ومنظومة خفض انتقائي بالعامل الحفاز SCR تبين أن كمية الانبعاثات والملوثات الصلبة التي تنتج من وحدة إنتاج الطاقة الكهربائية بطريقة دورة التغويز المتكامل المدمجة بدون منظومة خفض انتقائي بالعامل الحفاز هي أدنى من الوحدات الأخرى. يبين الشكل 19-2 مقارنة كمية الانبعاثات والنفايات الصلبة من أنواع محطات توليد الطاقة الكهربائية.

الشكل 19-2: مقارنة كمية الانبعاثات والنفايات الصلبة من أنواع محطات توليد الطاقة الكهربائية



المصدر: (Ratafia, J., et al., 2002)

1. وحدة دورة التغويز المتكامل المدمجة IGCC بوجود منظومة خفض انتقائي بالعامل الحفاز³ SCR.
2. وحدة الاحتراق بالسرير المميع بالضغط الجوي⁴ AFBC بوجود وحدة خفض انتقائي بدون عامل حفاز⁵ SNCR.
3. وحدة الاحتراق بالسرير المميع المضغوط⁶ PFBC بوجود وحدة خفض انتقائي بدون عامل حفاز⁷ SNCR.
4. وحدة توليد كهرباء بالفحم المسوق بوجود وحدة نزع كبريت⁸ FGD ومنظومة خفض انتقائي بالعامل الحفاز SCR.

Selective Non-Catalytic Reduction¹

Flue Gas Desulfurization²

Selective Catalytic Reduction³

Atmospheric Fluidized Bed Combustion⁴

Selective Non-Catalytic Reduction⁵

Pressurized Fluidized Bed Combustion⁶

Selective Non-Catalytic Reduction⁷

Flue Gas Desulfurization⁸

2-6-4-2: النفايات الصلبة

لتقنية التغويز دور مهم في خفض كمية النفايات الصلبة التي تنتج عن عمليات التكرير، حيث أن كمية النفايات الصلبة والمياه الملوثة الناتجة عن وحدة دورة التغويز المتكامل المدمجة أدنى بمعدل 30-50% مقارنة بمحطات توليد الطاقة الكهربائية الأخرى، وذلك نظراً لإمكانية نزع هذه النفايات في عملية التغويز بمعدات أقل تعقيداً من المعدات المستخدمة في نزع المعادن في عملية الحرق المباشر للفحم كوقود، فضلاً عن أن الرماد الناتج عن عملية التغويز يمكن تصريفه بسهولة دون أي أثر سلبي على البيئة. فعلى سبيل المثال، يمكن التقاط أكثر من 95% من كمية الزئبق باستخدام مفاعل بسرير ثابت يحتوي على الكربون المنشط (Activated Carbon). (Kerester, A., 2014)

كما لتقنية التغويز دور في توفير التكاليف التي تدفعها مصافي النفط لتصريف النفايات المنتجة من عمليات التكرير، كالحماة المنتجة من وحدات معالجة المياه الملوثة، والرواسب الزيتية الناتجة عن تنظيف قاع خزانات النفط والمنتجات البترولية الثقيلة، والعوامل الحفازة التالفة¹. (Orr, D., & Maxwell, D., 2000)

يساهم تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي في مصافي النفط في خفض الأثر البيئي للمصفاة الناتج عن نقل ومناولة الفحم البترولي المنتج من عمليات التفحيم المؤجل وتصريفه بطريقة آمنة، كما تخفف من تكاليف الإجراءات الوقائية أثناء عمليات النقل والتخزين.

تجدر الإشارة إلى أنه يمكن الاستفادة من نفايات عملية التغويز، كالرماد والخبث بدلاً من دفنهما في التربة، وذلك من خلال استرجاع المعادن الثمينة، كالفناديوم والنيكل، وبالتالي لا يبقى من العملية مخلفات صلبة تحتاج إلى عمليات مكلفة للتخلص منها.

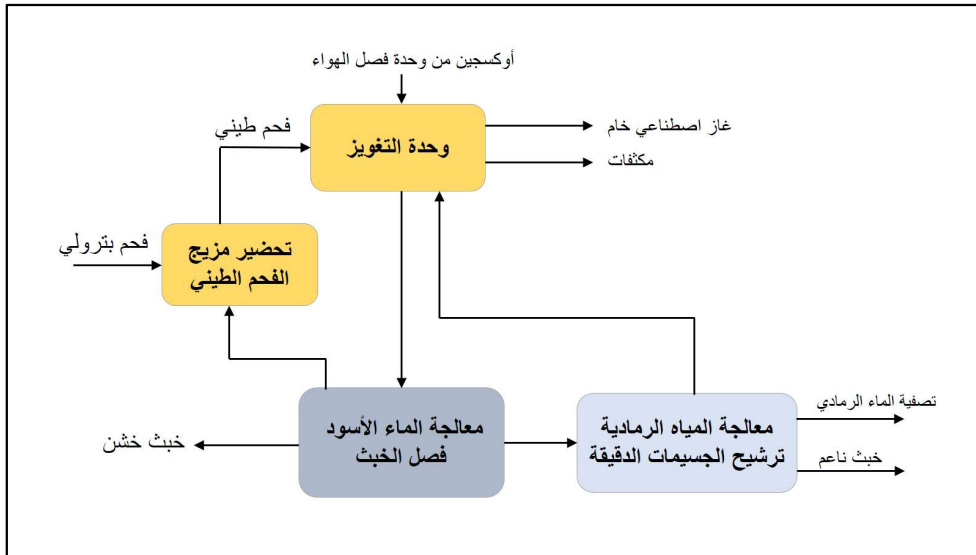
¹ Spent Catalysts



3-6-4-2: المياه الملوثة

تنتج عن عمليات مناولة ونقل وتخزين الفحم البترولي في المصفاة كمية كبيرة من المياه الملوثة بذرات الفحم الدقيقة، يعاد استخدام الجزء الأكبر منها، بينما يتم التخلص من الجزء الباقي بعد إخضاعها لعمليات ترشيح ومعالجة مكلفة حتى تصل إلى مواصفات متوافقة مع متطلبات التشريعات البيئية. أما في حال وجود وحدة تغويز في المصفاة فيمكن التخلص من المياه الملوثة بطريقة آمنة باستخدامها في عملية تحضير الفحم الطيني الداخل إلى مفاعل التغويز بعد ترشيحها وفصل الجسيمات الدقيقة منها. **الشكل 2-20** مخطط تصريف مياه مناولة الفحم البترولي في وحدة التغويز. (Gupta, S., et al., 2015)

الشكل 2-20: مخطط تصريف مياه مناولة الفحم البترولي في وحدة التغويز



المصدر: Gupta, S., et al., 2015

7-4-2: الاستفادة من فرص تكامل مجمع التغويز مع عمليات المصفاة

يتكامل مجمع التغويز مع وحدات مصفاة النفط من خلال عدة مجالات، أولها التكامل مع عمليات التكرير، والتي تساهم في تحسين الأداء التشغيلي والاقتصادي لمصافي النفط، من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة، وخفض التكاليف الاستثمارية والتشغيلية نتيجة



المشاركة في الوحدات المساندة، كوحدة استرجاع الكبريت، ووحدة معالجة الغاز الحامضي، ووحدة إنتاج الهيدروجين. (Penrose, C., et al., 1999)

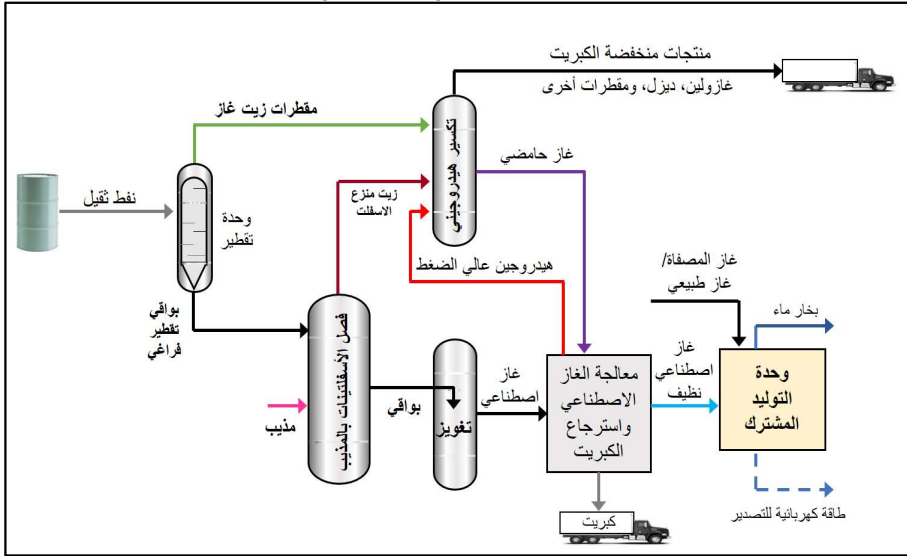
تتوقف الاستفادة من فرص تكامل مجمع التغويز مع عمليات مصفاة النفط على مدى توفر الطاقة الإنتاجية لبعض العمليات الموجودة في المصفاة. فعلى سبيل المثال، في حال وجود طاقة إنتاجية احتياطية كافية من وحدة استرجاع الكبريت، أو توفر إمكانية تطويرها لرفع طاقتها الإنتاجية، يمكن في هذه الحالة ربط مجمع التغويز مع الوحدة القائمة بدلاً من إنشاء وحدة جديدة خاصة بالمجمع. من العمليات الأخرى التي يمكن أن تشترك فيها مع وحدات المصفاة، منها وحدة معالجة المياه الملوثة، ووحدة مياه التبريد، والوحدات الخدمية الأخرى.

1-7-4-2: تكامل مجمع التغويز مع عمليات تحويل مخلفات التكرير الثقيلة

تساهم العمليات التحويلية في تحسين الأداء الاقتصادي للمصفاة من خلال تحويل مخلفات التكرير الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة. وقد أشارت دراسة أجرتها شركة شل غلوبال سوليوشنز¹، إلى أن إنشاء وحدة تكسير حراري عميق² في إحدى المصافي الهولندية أدى إلى رفع هامش الربح الإجمالي Gross Margin من 28 إلى 34 دولار أمريكي. وعند إضافة وحدة التغويز أدى إلى رفع هامش الربح الإجمالي إلى 97 دولار أمريكي لكل طن من مخلفات التكرير الثقيلة الداخلة إلى وحدة التكسير الحراري العميق، مستفيدة من القيمة المضافة التي جاءت من تكامل مجمع التغويز مع وحدة التكسير الحراري. يبين الشكل 2-21 مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات التكرير في مصفاة تكرير النفط. كما يبين الشكل 2-22 مقارنة بين هامش الربح الإجمالي لتكامل مجمع التغويز مع العمليات التحويلية.

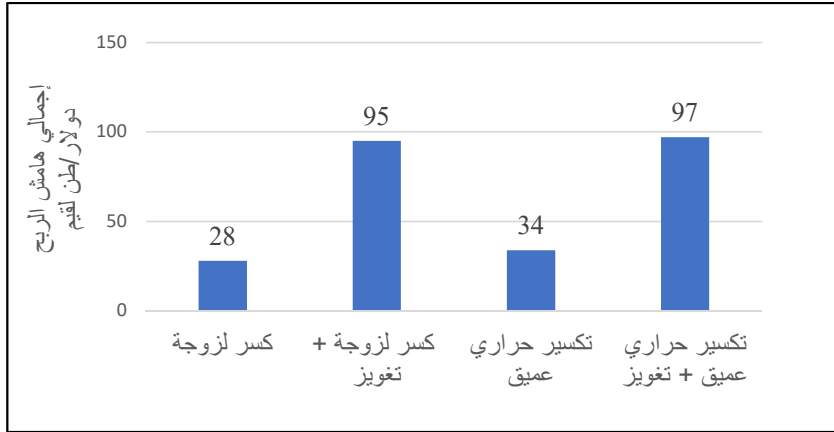
Shell Global Solutions¹
Deep Thermal Cracking²

الشكل 2-21: مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات التكرير



المصدر: Penrose, C., et al., 1999

الشكل 2-22: مقارنة بين هامش الربح الإجمالي لتكامل مجمع التغويز مع العمليات التحويلية



المصدر: Zuideveld, P., Chen, Q., and Bosch, P., 2000

2-7-4-2: تكامل الوحدات المساندة

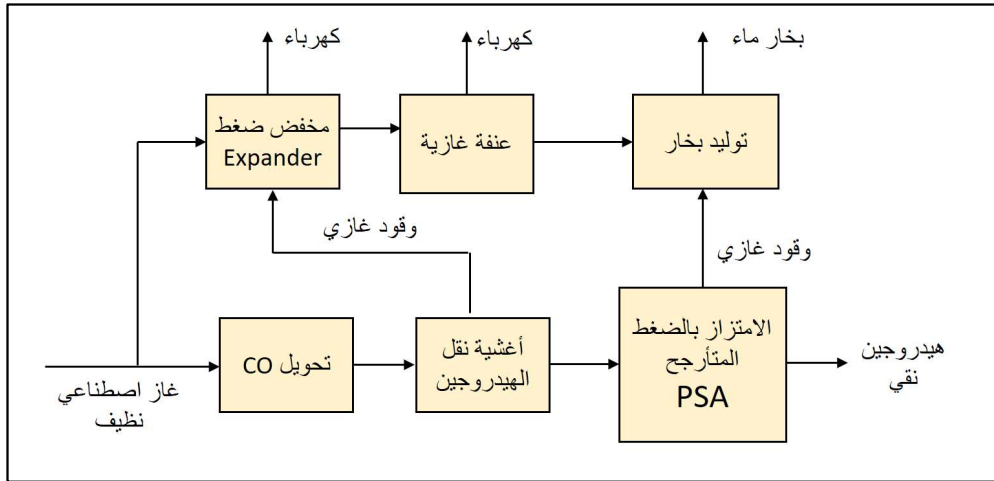
تشارك كل من عمليات التكرير في مصفاة النفط و وحدات مجمع التغويز في حاجتها إلى العديد من الوحدات المساندة، كوحدات تنقية الهيدروجين، ووحدة فصل الهواء، و وحدات معالجة المياه الملوثة، وبالتالي فإن إنشاء مجمع التغويز في مصفاة النفط يعزز

إمكانية خفض التكاليف الاستثمارية، وتكاليف التشغيل والصيانة من خلال الاستفادة من التكامل بين الوحدات المساندة، أو استغلال الطاقة الفائضة في الوحدات القائمة في المصفاة إن وجدت. (Marano, J., 2003)

• تكامل وحدات تنقية الهيدروجين

يساهم التكامل بين مجمع التغويز و وحدات إنتاج الهيدروجين القائمة في المصفاة في تعزيز الاستفادة من الغازات الفائضة عن عملية تنقية الهيدروجين من الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع التغويز بطريقة الامتصاص بالضغط المتأرجح من خلال استخدامه كوقود في وحدة إنتاج بخار الماء. كما يمكن تحويل الغاز غير القابل للنفوذ من الغشاء Non-Permeate في وحدة غشاء نقل الهيدروجين HTM إلى وحدة إفلات الضغط Expander للاستفادة منه في توليد الطاقة الكهربائية. يبين الشكل 2-23 تكامل وحدات تنقية الهيدروجين مع وحدات توليد الطاقة.

الشكل 2-23 تكامل وحدات تنقية الهيدروجين مع وحدات توليد الطاقة



المصدر: Marano, J., 2003



• تكامل وحدات فصل الهواء

تستهلك المصفاة كمية كبيرة من النيتروجين لعمليات عزل وتنظيف المعدات والخزانات قبل تسليمها لعمليات الصيانة، أما الأوكسجين فيعتبر منتجاً ثانوياً حيث أن فرص استخدامه محدودة في عمليات التكرير، بينما يعتبر من المواد الأساسية في تفاعلات عملية التغويز، وبالتالي فإن إنشاء مجمع التغويز في المصفاة يوفر فرصة الاستفادة من الأوكسجين الفائض بدلاً من تصريفه إلى الهواء الجوي.

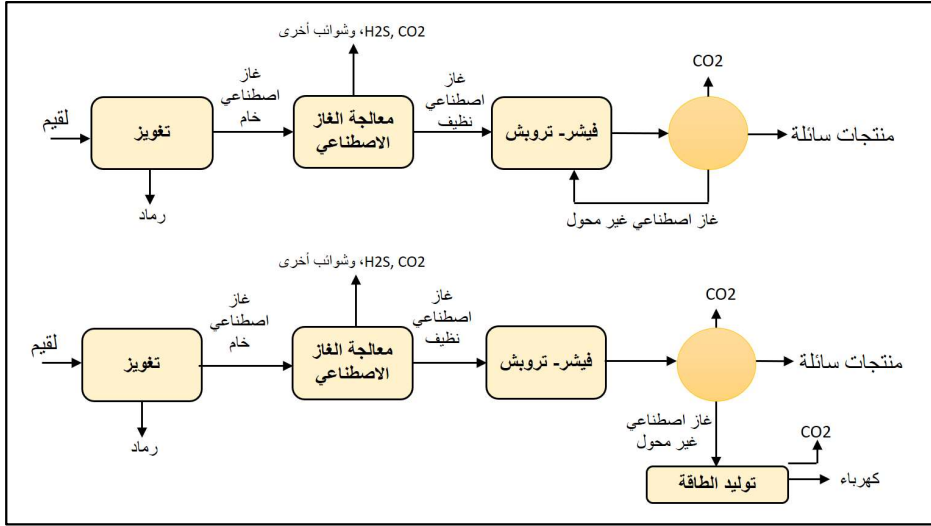
• تكامل وحدة معالجة المياه الحامضية

تعتبر وحدة معالجة المياه الحامضية في مصافي النفط من الوحدات المساندة الضرورية لنزع الشوائب والملوثات من المياه الخارجة من عمليات التكرير. وفي حال إنشاء مجمع التغويز في المصفاة يمكن تحويل المياه الحامضية الخارجة منه إلى وحدة معالجة المياه التابعة للمصفاة، أما في حال عدم توفر طاقة استيعاب فائضة فيمكن دمج الوحدتين في وحدة كبيرة الحجم، وبذلك يمكن خفض تكاليف التشغيل والاستثمار اللازمة عند إنشاء وحدتي معالجة منفصلتين.

• تكامل المنتجات الثانوية لعملية فيشر- ترويش

ينأثر مستوى كفاءة عملية فيشر- ترويش بعوامل عديدة منها ما يتعلق بخصائص اللقيم، ومنها ما يتعلق بنوعية العامل الحفاز المستخدم. ولتحسين الكفاءة الإنتاجية للعملية ورفع معدل إنتاج السوائل يتم إرجاع الغاز غير المحول $Unconverted\ gas$ إلى المفاعل. وقد تلجأ بعض المصافي إلى مسار آخر، يسمى مسار هيكل التوليد المتعدد الأهداف $Polygeneration$ ، حيث يتم استخدام الغاز الاصطناعي غير المحول كوقود في محطة دورة التوليد المتكاملة المدمجة لإنتاج الطاقة الكهربائية بدلاً من إرجاعه إلى مفاعل فيشر- ترويش. يبين الشكل 2-24 خيارات استغلال الغاز الاصطناعي غير المحول الخارج من مفاعل عملية فيشر- ترويش.

الشكل 2-24 خيارات استغلال الغاز الاصطناعي غير المحول المنتج من مفاعل فيشر- ترويش



المصدر: Mantripragadaa, H., & Rubina, E., 2009

2-5: تحديات تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي في مصافي النفط

تواجه تقنية التغويز بعض التحديات عند تطبيقها في مصافي النفط، منها تحديات اقتصادية كارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل، ومنها تقنية تتعلق بخصائص الفحم البترولي، وأخرى بيئية ناتجة عن ارتفاع معدل استهلاك المياه اللازمة لتفاعلات التغويز.

2-5-1: صعوبة تغويز الفحم البترولي

يتطلب اكتمال تفاعلات تغويز الفحم البترولي درجات حرارة أعلى، مقارنة بدرجة حرارة تفاعلات الفحم البيتوميني، ولمواجهة هذه المشكلة تلجأ بعض الشركات إلى مزج الفحم البترولي بنسبة من أنواع الفحم الأخرى. كما أثبتت دراسة قام بها العالمان تايلر وسميث Tyler & Smith أنه يمكن تحسين كفاءة عملية تغويز الفحم البترولي بخفض حجم حبيبات الفحم الداخل إلى المفاعل، وبالتالي يمكن خفض درجة الحرارة اللازمة لإتمام تفاعلات التغويز. (Khosravi, M., & Anil Khadse, A., 2013)



2-5-2: ارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل

تختلف تكاليف إنشاء وتشغيل مجمع تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط تبعاً لنوع عملية التحويل وموقع المشروع، لكنها بشكل عام تعتبر عالية وزمن استرداد رأس المال يصل إلى 7-9 سنوات.

كما ترتبط الجدوى الاقتصادية لمشروع تحويل الفحم إلى سوائل هيدروكربونية بأسعار النفط الخام. فقد أشارت دراسة قامت بإعدادها جامعة ويست فيرجينيا في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2016 إلى أن تكلفة إنتاج السوائل الهيدروكربونية من عملية تحويل الفحم البترولي إلى سوائل تبلغ حوالي 25 دولار أمريكي للبرميل، وبالتالي حتى يكون المشروع مجد اقتصادياً يجب أن يكون سعر برميل النفط الخام أعلى من 30 دولار أمريكي. تجدر الإشارة إلى أنه على الرغم من التطورات المهمة التي أدخلت على تقنية التغويز في العقود الماضية، إلا أنها لا تزال بحاجة إلى المزيد من التحسين، من خلال تطبيق التكنولوجيا المتطورة في المجالات الرئيسية التالية: (Berg, R., 2015)

- خفض تكاليف الاستثمار والتشغيل في وحدات مجمع التغويز.
- ابتكار عوامل حفازة متطورة ذات فعالية أعلى وتكلفة أقل.
- تعظيم الاستفادة من فرص التكامل بين منظومات مجمع التغويز ووحدات المصفاة.
- اختبار منتجات مجمع التغويز، والعمل على تحسين خصائصها، وتعزيز فرص ومجالات استخدامها.
- ابتكار تقنيات فصل جديدة، كالأغشية المرنة Membranes ذات كفاءة أعلى للاستفادة منها في استغلال الغاز الاصطناعي وإنتاج مركبات متنوعة.

الفصل الثالث

أمثلة لمشاريع تحويل الفحم إلى سوائل في العالم

1-3: مجمع تغويز مصفاة شل برنيس الهولندية

2-3: مجمع تغويز مصفاة فوجيان

2-3: مجمع تغويز مصفاة إلدورادو -ولاية كنساس- الولايات المتحدة الأمريكية

3-3: مشروع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل - كنساس- الولايات المتحدة الأمريكية

4-3: مشروع تغويز مصفاة فاليرو في ولاية ديلاور

5-3: مشروع تغويز كاليفورنيا

6-3: مشروع تغويز مصفاة جامناغار- الهند

7-3: مجمع تغويز فوجيان-الصين

8-3: مجمع التغويز في مصفاة جازان -المملكة العربية السعودية





الفصل الثالث

أمثلة لمشاريع تحويل الفحم إلى سوائل في العالم

مقدمة

شهدت فكرة تطبيق تقنية تحويل الفحم البترولي في مصافي النفط اهتماماً واسعاً في تسعينيات القرن العشرين، وعلى الرغم من بعض التحديات التي تواجه هذه التقنية كارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل، إلا أنها اعتبرت في تلك الفترة "إحدى تقنيات المستقبل"، نظراً لما تقدمه من فوائد تساهم في تحسين هامش ربحية المصافي، وتعزيز مرونتها في تكرير أنواع ثقيلة وحامضية من النفط الخام، علاوة على تمكينها من تلبية الطلب المتنامي على وقود وسائل النقل.

من أكثر العوامل التي ساهمت في انتشار تطبيق تقنية تحويل الفحم إلى سوائل في مصافي النفط كان صدور التشريعات الخاصة بالحد من حرق الوقود الحاوي على نسبة عالية من الشوائب الملوثة للبيئة، مما دفع القائمين على صناعة تكرير النفط إلى البحث عن حلول اقتصادية لتصريف مخلفات التكرير الثقيلة مع المحافظة على الالتزام بمتطلبات التشريعات البيئية الصارمة.

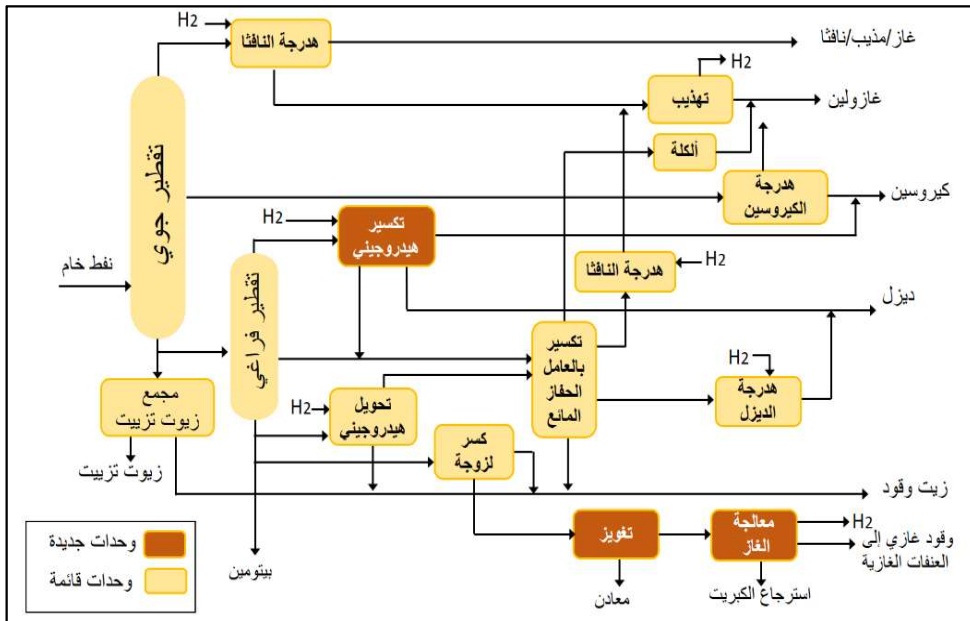
يعرض هذا الفصل بعض الأمثلة العملية لمشاريع تطبيق تقنية تغويز الفحم البترولي في مصافي النفط في مناطق مختلفة من العالم، مع الإشارة إلى الفوائد التي حققها تنفيذ المشروع للمصفاة، والتحديات التي واجهت تنفيذ المشروع، والطرق التي اتبعت لحلها.



1-3: مجمع تغويز مصفاة شل برنيس الهولندية

أنشئ مجمع تغويز مصفاة "شل- برنيس" Shell-Pernis كجزء من مشروع إنشاء وحدة تكسير هيدروجيني، وذلك في إطار خطة خفض إنتاج المصفاة من المخلفات الثقيلة إلى الصفر. يبين الشكل 1-3 مخطط تكامل مشروع التغويز مع وحدات مصفاة برنيس.

الشكل 1-3: مخطط تكامل مشروع التغويز مع الوحدات القائمة في مصفاة برنيس



المصدر: Higman, C., & Eppinger, M., 1994

يعتبر مجمع تغويز مصفاة برنيس أحد أهم المشاريع النموذجية لتقنية التغويز متعدد الأهداف Polygeneration، تبلغ طاقته حوالي 1650 طن/اليوم من المخلفات الثقيلة لوحدة كسر اللزوجة، والحاوية على نسبة عالية من الكبريت والنيتروجين والمعادن. يبين الجدول 1-3 مواصفات لقيم مجمع تغويز مصفاة برنيس.

يهدف مجمع تغويز مصفاة برنيس إلى إنتاج 285 طن/اليوم من الهيدروجين اللازم لوحدات التكسير الهيدروجيني والمعالجة الهيدروجينية، وغاز طبيعي اصطناعي يحتوي على نسبة منخفضة جداً من الكبريت لاستخدامه كوقود بديل للغاز الطبيعي في عنفات



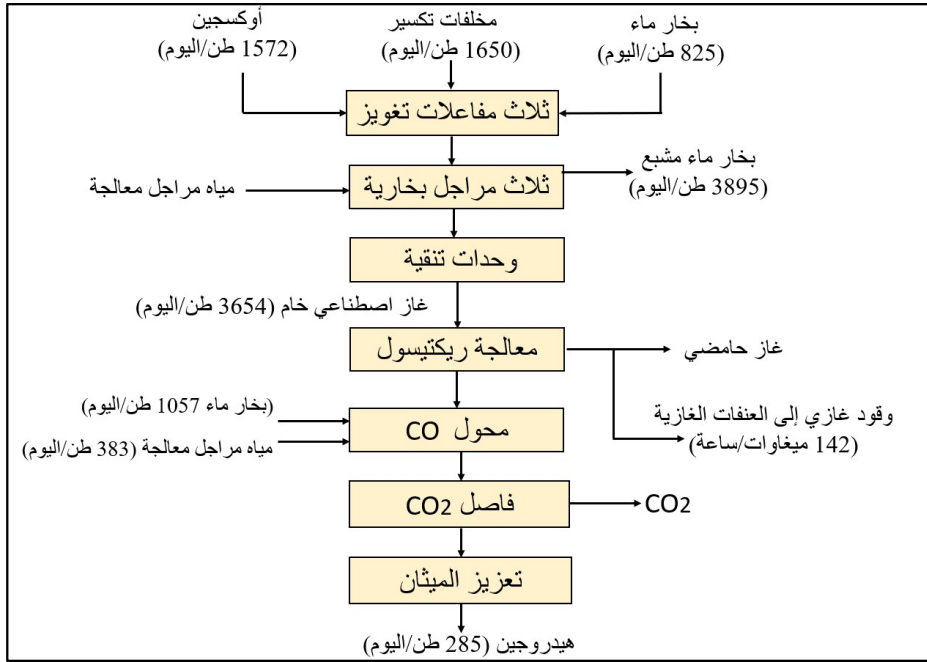
غازية وبخارية لإنتاج الطاقة الكهربائية بمقدار 142 ميجاوات/ ساعة، إضافة إلى بخار الماء اللازم لعمليات التكرير. (Simbeck, D., & Johnson, H., 2001)

الجدول 1-3: مواصفات لقيم مجمع تغويز مصفاة برنيس الهولندية

أسفلت	مخلفات كسر اللزوجة	تحليل مكونات اللقيم
84.37	85.42	كربون C (%وزناً)
9.67	9.93	هيدروجين H (%وزناً)
5.01	4.00	كبريت S (%وزناً)
0.52	0.30	نيتروجين N (%وزناً)
0.35	0.20	أوكسجين O (%وزناً)
0.08	0.15	رماد (%وزناً)
100	100	المجموع
300	270	فناديوم
75	120	نيكل
30	30	صوديوم
2000	10000	اللزوجة عند الدرجة 100 م° (سنتي ستوك)
1.07	1.10	الكثافة عند الدرجة 15 م° (غ/سم ³)

يتكون مجمع تغويز مصفاة برنيس من ثلاث وحدات تغويز من تصميم شركة شل الهولندية، اثنتان لإنتاج الهيدروجين، والثالثة لتوليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء باستخدام دورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC. كما يحتوي المجمع على وحدة معالجة من نوع (ريكتيسول) لنزع الغاز الحامضي من الغاز الاصطناعي، ووحدة فصل غاز ثاني أوكسيد الكربون من الغاز الاصطناعي، ووحدة تحويل أول أوكسيد الكربون إلى ثاني أوكسيد الكربون، ووحدة تعزيز الميثان لتعظيم إنتاج الهيدروجين، إضافة إلى الوحدات المساندة، كوحدة فصل الهواء، ووحدة تحضير اللقيم. يبين الشكل 2-3 مخطط مجمع تغويز مصفاة شل برنيس. (Walter, S., 2014)

الشكل 2-3: مخطط مجمع تغويز مصفاة شل برنيس



المصدر: Walter, S., 2014

نتائج تنفيذ المشروع

ساهم تنفيذ مشروع تغويز مصفاة برنيس في تحقيق النتائج التالية:

- رفع نسبة إنتاج المشتقات الخفيفة العالية القيمة من 78% إلى 85%، وخفض نسبة إنتاج زيت الوقود الثقيل بمعدل 40% مقارنة بما كانت عليه قبل تنفيذ المشروع، حيث ارتفعت كمية المنتجات البيضاء من 12.8 إلى 14 مليون طن/السنة، بينما انخفضت كمية زيت الوقود من 3.5 إلى 2.1 مليون طن/السنة.
- رفع معدل إنتاج الكبريت الحر في المصفاة من 0.11 إلى 0.33 مليون طن/السنة.
- رفع نسبة تكرير النفط الخام الثقيل الحاوي على نسبة عالية من الكبريت من 63% إلى 84% من إجمالي الطاقة التكريرية للمصفاة، حيث تم رفع كمية النفط الثقيل من 11.3 إلى 15 مليون طن/السنة، وخفض كمية النفط الخام الخفيف من 4.5 إلى



2.8 مليون طن/السنة. يبين الجدول 3-2 التوازن المادي لمصفاة "برنيس" قبل وبعد تنفيذ مشروع التغويز.

- خفض اعتماد المصفاة على استيراد الغاز الطبيعي من الخارج. (Shell, 2010)
- خفض كمية انبعاثات المصفاة من ثاني أكسيد الكبريت إلى الهواء الجوي من 35 إلى 24 ألف طن/السنة، وخفض أكاسيد النيتروجين من 12 إلى 7 ألف طن/السنة، وخفض كمية انبعاثات الجسيمات الدقيقة من 4 إلى 1.9 ألف طن/السنة. أما إجمالي كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون فقد ارتفع من 5 إلى 6.1 مليون طن/السنة. (Higman, C., & Eppinger, M., 1994) يبين الجدول 3-3 مقارنة بين انبعاثات مصفاة برنيس قبل وبعد تنفيذ مشروع التغويز.

الجدول 3-2: التوازن المادي لمصفاة برنيس قبل وبعد مشروع التغويز

بعد مشروع التغويز (مليون طن/السنة)	قبل مشروع التغويز (مليون طن/السنة)	
المدخلات		
15.0	11.3	نפט خام عالي الكبريت
2.8	4.5	نפט خام منخفض الكبريت
0.1	2.1	لقائم أخرى
17.9	17.9	مجموع المدخلات
المخرجات		
14.0	12.8	المنتجات البيضاء
2.1	3.5	زيت الوقود
16.4	16.4	مجموع المخرجات

الجدول 3-3: مقارنة كمية انبعاثات مصفاة برنيس قبل وبعد مشروع التغويز

بعد مشروع التغويز	قبل مشروع التغويز	
24	35	SO ₂ (ألف طن/السنة)
7	12	NO _x (ألف طن/السنة)
1.9	4.0	جسيمات دقيقة PM (ألف طن/السنة)
6.1	5.0	CO ₂ (مليون طن/السنة)

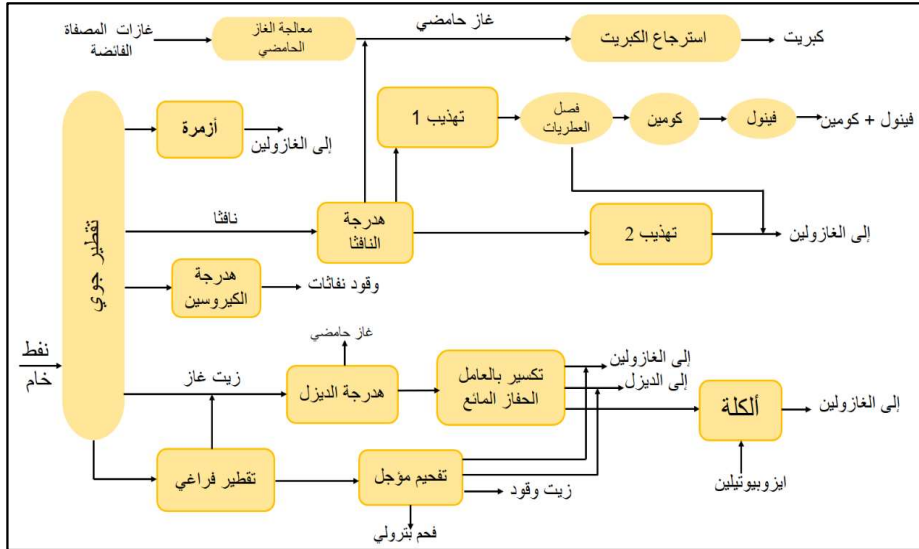


2-3: مجمع تغويز مصفاة الدورادو - ولاية كنساس

تعود بداية تشغيل مصفاة الدورادو El-Dorado، في ولاية كنساس Kansas الأمريكية، إلى عام 1917 بطاقة تكريرية قدرها 2000 ب/ي، ثم خضعت لعدة مشاريع تطوير وتوسيع إلى أن وصلت طاقتها التكريرية إلى 100 ألف ب/ي. وتتكون المصفاة حالياً من العمليات التالية:

- وحدات تقطير جوي وفراغي
- وحدات تهذيب للنافثا بالعامل الحفاز وأزمنة وألكلة
- وحدة تكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدة تفحيم Delayed Coking
- وحدة إنتاج هيدروجين
- وحدة استرجاع كبريت
- مجمع إنتاج عطريات وفينول وأسيتون

يبين الشكل 3-3 مخطط سير عمليات التكرير في مصفاة الدورادو
 الشكل 3-3: مخطط سير عمليات التكرير في مصفاة الدورادو-كنساس

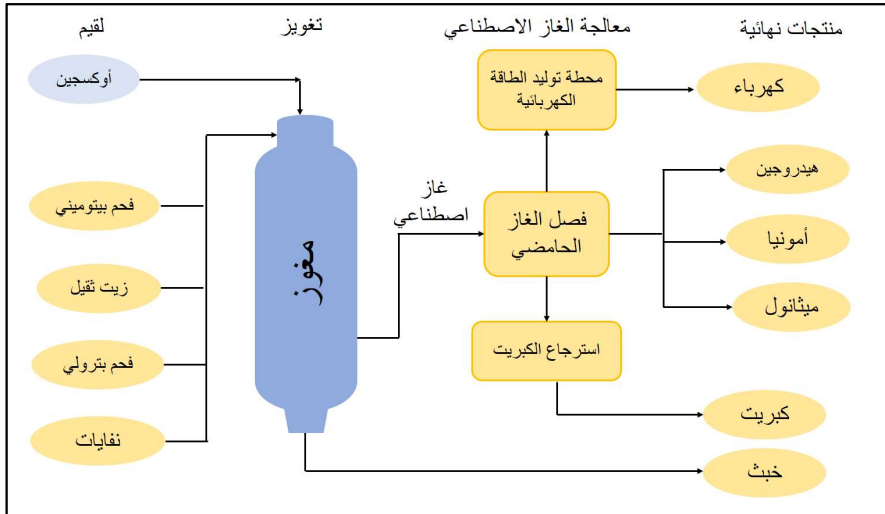


المصدر: Rhodes, A. 2010

أنشئ مجمع التغويز في مصفاة إلدورادو عام 1996 كجزء من مشروع تطوير المصفاة الذي يهدف إلى تعظيم إنتاج المقطرات الخفيفة من خلال عملية التفحيم التي تهدف إلى تكسير مخلفات التقطير الثقيلة لتحويلها إلى منتجات خفيفة عالية القيمة.

يتكون مجمع تغويز مصفاة الدورادو من مغوز، ووحدات معالجة الغاز الاصطناعي التي تتكون من وحدة فصل الغاز الحامضي ووحدة استرجاع الكبريت، إضافة إلى العنفة الغازية التي تحول الغاز الاصطناعي المعالج إلى طاقة كهربائية. ويشترك المجمع مع الوحدات المساندة القائمة في المصفاة، كوحدة معالجة المياه الملوثة، ووحدة فصل الهواء لإنتاج الأوكسجين اللازم لتفاعلات التغويز. يبين الشكل 3-4 مكونات مجمع تغويز مصفاة إلدورادو - كنساس.

الشكل 3-4: مكونات مجمع تغويز مصفاة إلدورادو - كنساس



المصدر: Rhodes, A. 2010

تتكون لقائم مجمع تغويز مصفاة إلدورادو من 150 ألف طن/اليوم من الفحم البترولي المنتج من وحدة التفحيم المؤجل المكون من 90% كربون، و4% هيدروجين، و4% كبريت، و1.5% نيتروجين، و0.5% أوكسجين، و0.5% رماد مكون من مجموعة



- معادن يعود مصدرها إلى النفط الخام المكرر. إضافة إلى مجموعة من المخلفات الأخرى المنتجة من عمليات التكرير تبلغ كميتها حوالي 15 ألف طن/اليوم ، وتتكون مما يلي:
- 0.1 طن/اليوم من الحمأة الناتجة من أحواض فصل الزيت API Separators في وحدة معالجة المياه الملوثة. وعلى الرغم من أنها تحتوي على نسبة 75% من الماء إلا أن الجزء الجاف منها يتكون من 60% رماد، و35% كربون، وكميات قليلة من الهيدروجين والنيتروجين والكبريت.
 - 4.5 طن/اليوم مواد قابلة للانحلال بالزيت، وهي بوليمرات ثقيلة تنتج من وحدة الألكلة HF Alkylation، حيث كانت تصدر سابقاً لاستخدامها كوقود في أفران صناعة الإسمنت.
 - 0.6 طن في اليوم حمأة زيتية من أحواض ترقيد المياه الزيتية في وحدة معالجة المياه الملوثة لفصل الرواسب الزيتية من المياه قبل دخولها إلى أحواض الفصل API، ورواسب زيتية ناتجة من تنظيف قاع خزانات النفط والمشتقات النفطية.
 - كمية قليلة من الرواسب الفينولية المنتجة من وحدة إنتاج الفينول.

نتائج تنفيذ المشروع

- صنف مشروع تغويز مصفاة الدورادو على أنه نموذجاً مثالياً لمشاريع تحويل المنتجات الثانوية لمصافي النفط إلى منتجات عالية القيمة، حيث أنه حقق العديد من المكاسب للمصفاة يمكن تلخيصها على النحو التالي:
- تلبية حاجة المصفاة من الطاقة الكهربائية وبخار الماء
 - توفير نفقات تصريف النفايات الزيتية التي كانت تنقل إلى أماكن بعيدة للتخلص منها بطريقة غير ضارة بالبيئة.
 - خفض معدل انبعاثات الكربون الناتجة عن منتجات المصفاة من خلال تغويز الفحم البترولي بدلاً من حرقه كوقود.



أما منتجات مجمع التغويز فتتكون من المواد التالية:

- حوالي 6 مليون قدم مكعب قياسي من الغاز الاصطناعي، يستخدم كوقود في عنفة غازية يبلغ إجمالي استهلاكها 9 مليون قدم مكعب قياسي، ويعوض الباقي من الغاز الطبيعي المستورد.
- 81.6 طن/الساعة بخار ماء منتج من الطاقة الفائضة عن تبريد الغاز الاصطناعي الخارج من المغوز.
- 35 ميغاوات طاقة كهربائية تنتج من العنفة البخارية.
- 200 طن/اليوم أوكسجين يستهلك في المغوز، و 800 طن/اليوم نيتروجين يحقن في العنفة الغازية لخفض انبعاثات أكاسيد النيتروجين، والباقي يستخدم في تلبية حاجة المصفاة لأغراض العزل وتنظيف الأوعية والخزانات.

3-3: مشروع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل -كنساس الأمريكية

يهدف مجمع تغويز مصفاة كوفيفيل Coffeyville في ولاية كنساس إلى تحويل الفحم البترولي إلى أمونيا، ويوريا نترات الأمونيوم Urea Ammonium Nitrate، وهو المجمع الوحيد في أمريكا الشمالية الذي يستخدم الفحم البترولي كلقيم لإنتاج الأسمدة. تبلغ الطاقة التصميمية للمجمع 1300 طن/اليوم. ويبلغ معدل إنتاجه السنوي 1225 طن/اليوم من الأمونيا التي تستخدم لإنتاج 3000 طن/اليوم من يوريا نترات الأمونيوم. كما ينتج المجمع 84 مليون متر مكعب قياسي في اليوم من الهيدروجين.

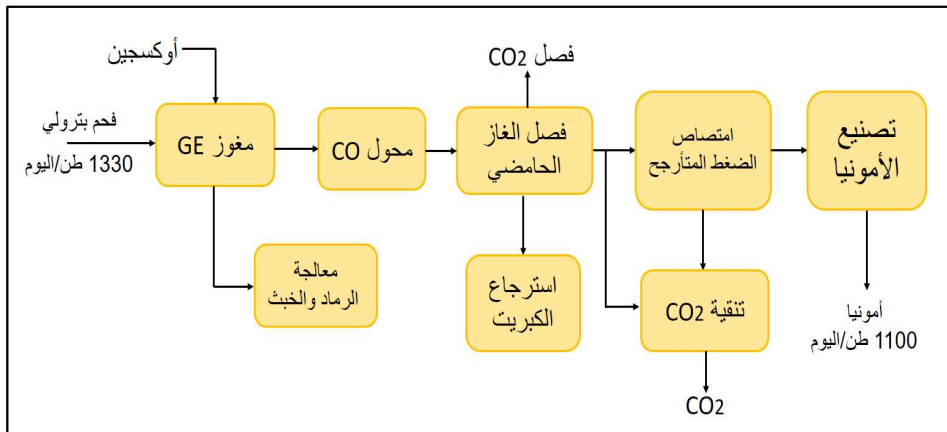
يتكون مجمع تغويز مصفاة كوفيفيل من الوحدات التالية: (GE, 2008)

- وحدة تحضير اللقيم على شكل مزيج فحم طيني Slurry Coke
- مغوز



- وحدة غسل ومعالجة الغاز الاصطناعي المنتج من المغوز في وحدة فصل الغازات الحامضية بطريقة سيليكسول، لفصل كبريت الهيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون.
 - وحدة فصل الهواء لتغذية المغوز بالأوكسجين اللازم لتفاعل التغويز، أما النيتروجين المنتج من وحدة فصل الهواء فيستخدم في وحدة إنتاج الأمونيا.
 - وحدة امتصاص بالضغط المتأرجح PSA لفصل الهيدروجين من الغاز الاصطناعي النظيف الذي يتفاعل مع النيتروجين في وحدة إنتاج الأمونيا، حيث تحول الأمونيا إلى وحدة إنتاج اليوريا نترات الأمونيوم.
 - منظومة فصل غاز ثاني أكسيد الكربون CO₂ بمعدل 850 ألف طن في السنة، حيث يضغط ليستخدم جزء منه في وحدة إنتاج اليوريا والباقي يصدر إلى حقول النفط في ولاية أوكلاهوما التي تبعد حوالي 70 كم لاستخدامه في عملية الاستخلاص البترولي المعزز EOR. (NETL, 2016).
- يبين الشكل 3-5 مخطط وحدات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل.

الشكل 3-5: مخطط وحدات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة كوفيفيل



المصدر: Tse, D., 2013



3-4: مشروع تغويز مصفاة موتيفا في ولاية ديلاور

صمم مجمع تغويز مصفاة "موتيفا" Valero لتحويل 2100 طن في اليوم من الفحم البترولي إلى غاز اصطناعي يستخدم كوقود في دورة التغويز المتكاملة المدمجة IGCC لتوليد الطاقة الكهربائية، بمعدل 250 ميغاوات/ ساعة، إضافة إلى بخار الماء.

يهدف المشروع تغويز إلى تحقيق الفوائد التالية: (Hawley, R. 2000)

- تصريف الفحم البترولي المنتج من وحدة التفحيم في المصفاة، والتخلص من النفقات التي كانت تدفع لنقله خارج المصفاة.
- توفير الكمية الكافية من بخار الماء اللازم لعمليات التكرير في المصفاة، والاستغناء عن المرجل البخاري القديم ذي الكفاءة المنخفضة.
- تحسين ربحية المصفاة من خلال الحصول على وقود غازي اصطناعي لتوليد الطاقة الكهربائية من لقيم رخيص الثمن.

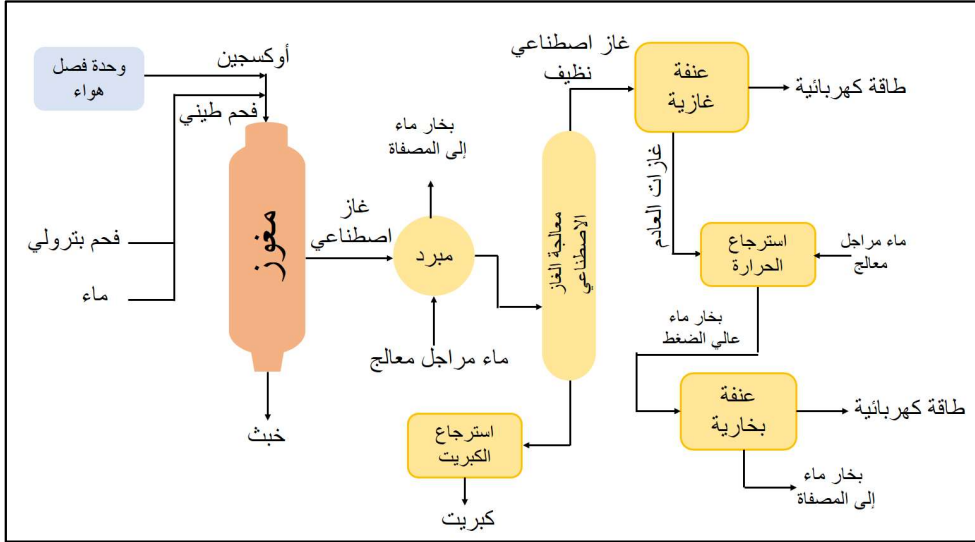
يتكون مجمع التغويز في مصفاة "موتيفا" من خطين إنتاجيين، يتكون كل خط من مغوزين وعنفتين غازيتين، تبلغ طاقة الأولى 90 ميغاوات ساعة تعمل على الغاز الاصطناعي المنتج من المغوز، والثانية 75 ميغاوات تعمل على زيت الغاز. وتنتج كل عنفة كمية من بخار الماء قدرها 136200 كغ/الساعة بضغط 83 بار، و68000 كغ/الساعة بضغط 12 بار. يبين الشكل 3-6 مكونات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة موتيفا. أما الوحدات المساندة فتتكون مما يلي:

- وحدة فصل هواء طاقتها 2500 طن/اليوم، تنتج الأوكسجين اللازم لتفاعلات التغويز، بنقاوة 99%، إضافة إلى النيتروجين والأرغون، حيث يحقن النيتروجين في منظومة معالجة غازات المدخنة في وحدة استرجاع الكبريت لخفض انبعاثات أكاسيد النيتروجين، أما الأرغون فيصدر للبيع خارج المصفاة.



- وحدة نزع الغاز الحامضي، لمعالجة الغاز الاصطناعي المنتج من المغوز، وخفض محتواه من الكبريت إلى أدنى من 350 ج.ف.م.

الشكل 3-6: مكونات مجمع تغويز الفحم البترولي في مصفاة موتيفا



المصدر: Valero, 2007

3-5: مشروع تغويز كاليفورنيا

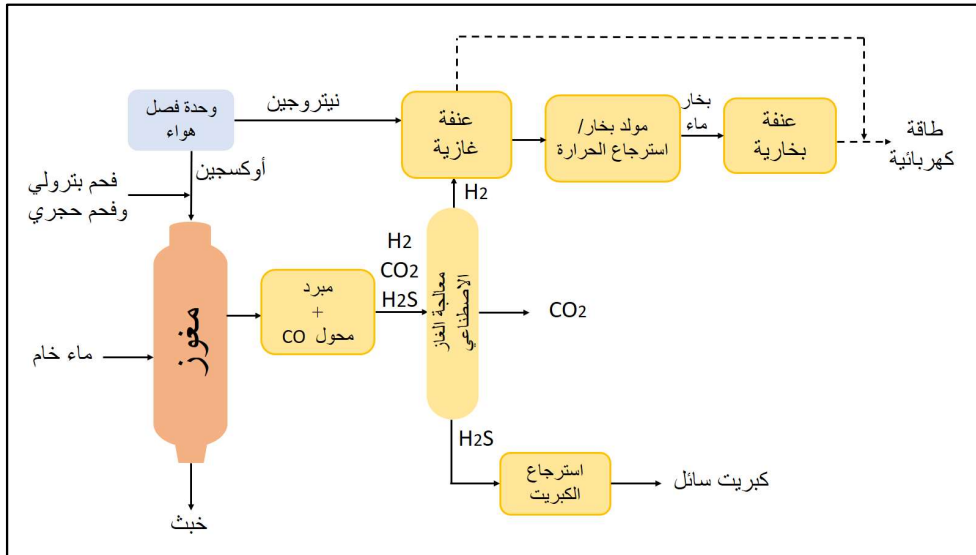
في عام 2007 تقدمت شركة "هيدروجين إنبرجي كاليفورنيا HECA بطلب موافقة على إنشاء مشروع مجمع تغويز في مصفاة كارسون القريبة من لوس أنجلوس، لتغويز حوالي 5-6 ألف طن في اليوم من الفحم البترولي باستخدام ثلاث مغوزات من تصميم شركة جنرال إلكتريك GE، بهدف إنتاج الهيدروجين، وغاز ثاني أكسيد الكربون لاستخدامه في عمليات الاستخلاص البترولي المعزز EOR، إضافة إلى إنتاج غاز اصطناعي يستخدم بدلاً عن الغاز الطبيعي في دورة تغويز متكاملة مدمجة IGCC لإنتاج حوالي 250 ميغاوات/ ساعة، وبخار ماء لتلبية حاجة المصفاة، باستخدام عنفة غازية. ونظراً لمرور خط غاز ثاني أكسيد الكربون عبر المناطق السكنية فقد تقرر نقل موقع المشروع إلى منطقة أخرى قريبة من مصادر المياه وآبار النفط الناضبة التي سيحقن فيها غاز ثاني أكسيد الكربون المنتج. (HECA, 2012)



صمم المشروع ليعمل بكامل طاقته على الفحم البترولي المنتج من مصافي نفط كاليفورنيا، بمحتوى كبريت يصل إلى 3.4% وزناً، مع مرونة ليعمل حتى 75% من الفحم البيتوميني المنتج من الولايات المجاورة لولاية كاليفورنيا، يحتوي على كبريت بمعدل 1% وزناً. كما يزود المشروع بأحدث نظم التحكم بالانبعاثات بحيث يلبي متطلبات قانون الهواء النظيف. ويحصل المشروع على المياه اللازمة من المياه الجوفية المالحة. ويتكون من الوحدات الرئيسية المبينة في الشكل 3-7 وهي كما يلي: (Marasigan, J., 2010)

- وحدة تحضير اللقيم المكون من مزيج الماء والفحم البترولي والفحم البيتوميني.
- ثلاث مغوزات من تصميم شركة جنرال إلكتريك.
- وحدة فصل هواء لإنتاج الأوكسجين بنقاوة 95%.
- مفاعلات تحويل غاز أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون .
- وحدة فصل الزئبق.
- وحدة نزع الغاز الحامضي (ريكتيسول) لفصل غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S وكبريتيد الكربونيل COS، ووحدة فصل غاز ثاني أكسيد الكربون من الغاز الاصطناعي.
- وحدة استرجاع الكبريت (كلاوس)، وتحتوي على وحدة معالجة بمحلول الأمين لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون من الغازات العادمة الخارجة من مفاعل كلاوس، وإرساله إلى وحدة ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون.
- وحدة تجفيف ورفع ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون.
- وحدة تسخين الغاز الاصطناعي، وخفض ضغطه في آلة تمدد Expander قبل دخوله إلى عنفة الاحتراق
- عنفة احتراق مزودة بألية حقن للنيتروجين.
- وحدة استرجاع الحرارة لإنتاج بخار الماء.
- عنفة بخارية.

الشكل 3-7: مخطط وحدات مجمع تغويز كاليفورنيا



المصدر: Mahasenan, N., 2010

يهدف المشروع إلى تحقيق ما يلي: (Marasigan, J., 2010)

- تعزيز الاعتماد على الموارد الطبيعية المحلية من خلال استغلال المنتجات الثانوية الرخيصة الثمن وتحويلها إلى غاز اصطناعي يستخدم كوقود بديل للغاز الطبيعي.
- تلبية الطلب المستقبلي على الطاقة الكهربائية بطريقة آمنة بيئياً، ومتوافقة مع متطلبات خفض انبعاثات غازات الدفيئة، من خلال التقاط غاز ثاني أكسيد الكربون، واستخدامه في تعزيز إنتاج آبار النفط الناضبة.
- تأمين أكثر من 200 فرصة عمل دائمة، وحوالي 1500 فرصة مؤقتة خلال فترة الإنشاء.

على الرغم من تعهد الشركة بالالتزام بكافة معايير وتشريعات حماية البيئة الصادرة عن هيئة المعايير البيئية في كاليفورنيا، لم يحصل المشروع على الموافقة النهائية حتى نهاية عام 2017 ولا تزال المشاورات قائمة. تعود معظم أسباب تأخر إصدار الموافقة على



ترخيص المشروع، والتي استغرق أكثر من عشر سنوات، إلى الأسباب التي وردت في تقرير هيئة النظر في ترخيص الإنشاء، وأهمها:

(Issod, A. Romanini, C., and Frantz, T., 2015)

- فشل الشركة المصممة للمشروع في تقديم ضمانات كافية تؤكد عدم وجود أثر سلبي على البيئة نتيجة استنزاف المياه الجوفية اللازمة للمشروع.
- عدم رد الشركة على العديد من ملاحظات الجمهور المتعلقة بالأثر المحتمل للمشروع على البيئة.

6-3: مشروع تغويز مصفاة جامناغار - الهند

تعود ملكية مشروع تغويز مصفاة جامناغار Jamnagar إلى شركة ريليانس إندستريز المحدودة (RIL) Reliance Industries Limited. تبلغ الطاقة التكريرية الإجمالية لمصفاة جامناغاز 1.3 مليون ب/ي، حيث تعتبر أحد أكبر مجمعات تكرير النفط في العالم . وتنتج حوالي 18500 طن/اليوم من الفحم البترولي.

تأخر إنجاز دراسة الجدوى الاقتصادية لمشروع تغويز مصفاة جامناغار لأكثر من خمس سنوات، حيث لم تكن النتائج مشجعة، وكانت المصفاة في تلك الفترة تباع المنتج من وحدة التفحيم إلى الأسواق العالمية. أما عندما ارتفعت أسعار الغاز الطبيعي المسال LNG وأصبح وجود الغاز الطبيعي يشكل تحدياً للمصفاة، أعيد النظر في دراسة جدوى مشروع التغويز، وتقييم أفضل الحلول الممكنة لاستغلال الفحم البترولي من بين الخيارات المحتملة التالية: (Scholz, M., & Payrhuber, K., 2009)

- استخدام الفحم كوقود مباشر في محطة حرارية Thermal power plant
- تغويز الفحم البترولي لإنتاج الهيدروجين اللازم لعمليات المعالجة الهيدروجينية في المصفاة.
- بيع الفحم البترولي المنتج إلى الأسواق العالمية.



صمم مشروع تغويز جامناغار لتحويل الفحم البترولي المنتج من مصفاتي نفط جامناغار إلى غاز طبيعي اصطناعي، وهيدروجين، وكيماويات، وذلك لتحقيق الأهداف التالية: (Mathew, T., 2016)

- تعزيز قدرة المصفاة على تصريف مخلفات التكرير الثقيلة الناتجة عن تكرير النفط الثقيل
- الاستفادة من فارق السعر بين الغاز الطبيعي والفحم البترولي
- تحسين ربحية المصفاة من خلال تأمين وقود غازي نظيف ورخيص لأفران المصفاة ومحطات توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء
- تعظيم الأداء التشغيلي للمصفاة من خلال استغلال الهيدروجين المنتج من مجمع التغويز لتلبية حاجة وحدات المعالجة الهيدروجينية في المصفاة
- الاستفادة من الإيثان والبروبان المفصول من الغاز الاصطناعي كقيم في صناعة البتروكيماويات.
- الاستفادة من غاز أول أكسيد الكربون المنتج من معالجة الغاز الاصطناعي في إنتاج كيماويات الأسيتيل Acetyl Chemicals
- تعزيز قدرة المصفاة على خفض انبعاثات غازات الدفيئة من خلال استغلال فرصة التقاط وخرن غاز ثاني أكسيد الكربون.

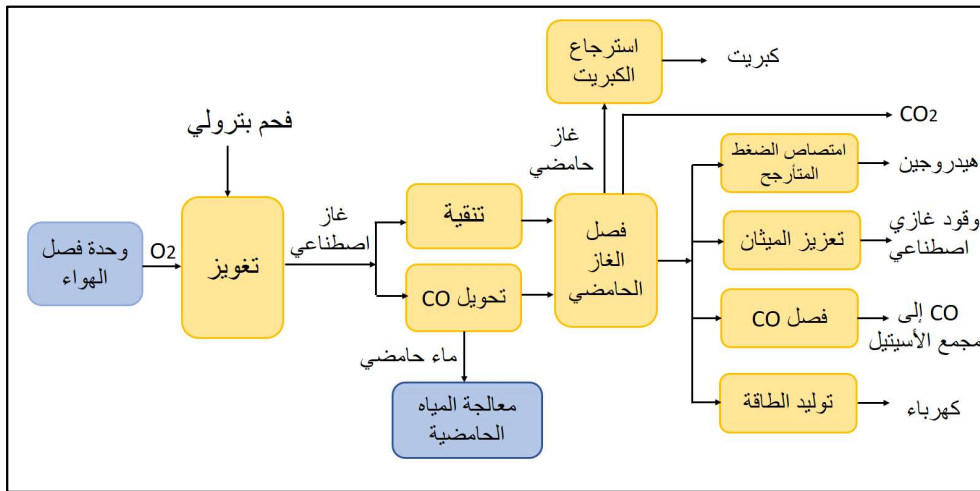
يتكون مشروع تغويز جامناغار من الوحدات الرئيسية المبينة في الشكل 3-8 على

النحو التالي:

- عشر مغوزات gasifiers من نوع E-Gas طاقة كل منها 2900 طن من الفحم لإنتاج 2.35 مليون قدم مكعب قياسي في اليوم من الغاز الاصطناعي، أو ما يعادل 272 ألف متر مكعب/الساعة. تمتلك الوحدة مرونة تغويز مزيج من الفحم البترولي 65% والفحم الحجري 35%.
- خمس وحدات فصل هواء لإنتاج 5250 طن/اليوم أو كسجين بنقاوة 99%.

- وحدة تحويل غاز أول أكسيد الكربون إلى هيدروجين Water Gas Shift
- وحدة معالجة الغاز الحامضي، تهدف إلى تخليص الغاز الاصطناعي من غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، وغاز كبريتيد الهيدروجين H_2S .
- وحدة الامتزاز بالضغط المتناوب PSA^1 لاسترجاع الهيدروجين من الغاز الاصطناعي المعالج.
- وحدة تحويل الغاز الاصطناعي إلى ميثان.
- وحدة تبريد الغاز الاصطناعي.
- وحدة استرجاع الكبريت لتحويل غاز كبريتيد الهيدروجين إلى كبريت حر.
- وحدة تحويل الكبريت الحر إلى حبيبات.
- وحدة معالجة المياه الحامضية لتخليصها من كبريتيد الهيدروجين H_2S ، وغاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، والأمونيا NH_3 .

الشكل 3-8: مكونات مجمع تغويز مصفاة جامناغاز



المصدر: Mathew, T., 2016

¹ Pressure Swing Adsorption



استخدامات الغاز الاصطناعي المنتج من مشروع تغويز جامناغار

يستخدم الغاز الاصطناعي المنتج من وحدات تغويز جامناغار في المجالات التالية:

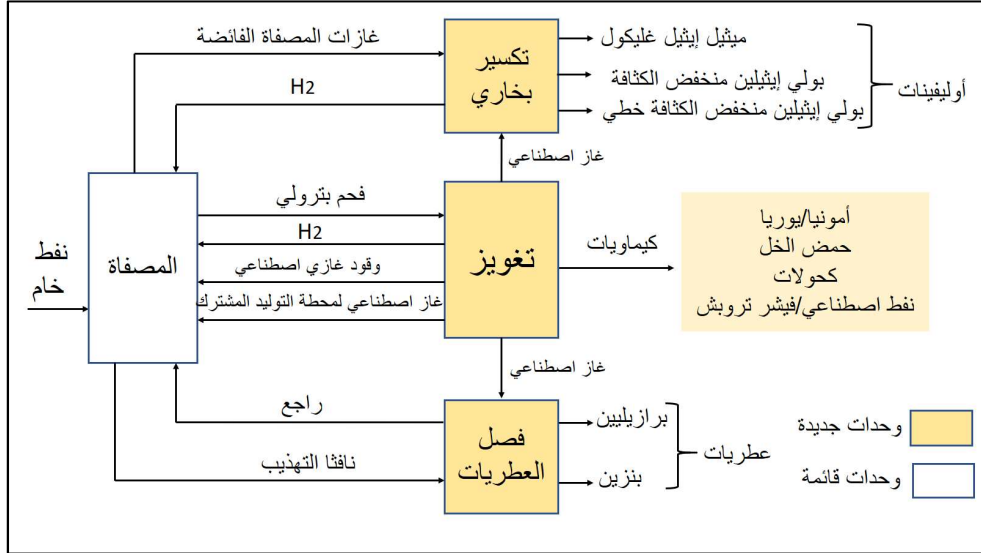
- 12 مليون متر مكعب مكافئ غاز طبيعي يحول إلى محطة توليد مشترك Co-generation لإنتاج الطاقة الكهربائية 1300 ميغاواط ساعي، و1700 طن/اليوم من بخار الماء.
- 5.4 مليون متر مكعب مكافئ غاز طبيعي لإنتاج الهيدروجين في وحدة تكسير بخاري بمعدل 1.160 طن/اليوم من الهيدروجين، أو ما يعادل 2-4 مليون متر مكعب في اليوم.
- 5.8 مليون متر مكعب مكافئ غاز طبيعي، على شكل غاز طبيعي اصطناعي لتغذية أفران المصفاة بالوقود.

يبين الجدول 3-4 توزيع مجالات استهلاك الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز مصفاة جامناغاز، كما يبين الشكل 3-9 مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات المصفاة. الجدول 3-4: توزيع مجالات استهلاك الغاز الاصطناعي المنتج من مجمع تغويز مصفاة جامناغاز

الغاز الاصطناعي	مليون متر مكعب/اليوم مكافئ غاز طبيعي	النسبة المئوية	مجال الاستهلاك
وقود لمحطة التوليد المشترك	12	52	طاقة كهربائية وبخار ماء
هيدروجين	5.4	23	وحدات المعالجة الهيدروجينية
غاز طبيعي اصطناعي	5.8	25	وقود أفران المصفاة
المجموع	23.2	100	

المصدر: Mathew, T. 2016

الشكل 3-9: مخطط تكامل مجمع التغويز مع عمليات مصفاة جامناغاز



المصدر: Mathew, T., 2016

7-3: مجمع تغويز مصفاة فوجيان

بدأ تشغيل مجمع تغويز مصفاة فوجيان في عام 2009، وذلك في إطار مشروع رفع الطاقة التكريرية للمصفاة من 80 إلى 240 ألف ب/ي، وتعزيز قدرة المصفاة على تكرير النفط الخام العربي الحامضي، وإنشاء وحدة تكسير بخاري لإنتاج الإيثيلين طاقتها 800 ألف طن/السنة، ووحدة بولي إيثيلين وبولي بروبيلين، ووحدة بارازايلين طاقتها 700 ألف طن/السنة. (Exxon Mobile, 2009)



يشارك في ملكية مشروع تطوير مصفاة فوجيان كل من شركة بتروكيماويات فوجيان¹ بحصة 50%، وشركة إكسون موبيل الصين² بحصة 25% وشركة أرامكو السعودية سينو³ بحصة 25%.

يهدف مجمع التغويز إلى الاستفادة من الأسفلت الفائض في إنتاج الهيدروجين اللازم لعمليات المعالجة الهيدروجينية في المصفاة، إضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء لتلبية حاجة المصفاة.

مكونات مشروع تغويز مصفاة فوجيان

يتكون مجمع تغويز مصفاة فوجيان من ثلاث مغوزات من تصميم شركة شل، طاقة كل منها 1200 طن من الأسفلت. اثنان في دارة العمل والثالث احتياط ساخن. جهاز كل مغوز بمبرد للغاز الاصطناعي يمكنه توليد بخار ماء عالي الضغط يصل إلى 120 بار. كما يحتوي المجمع على وحدتين لإنتاج الأوكسجين بنقاوة 99.8%، طاقة كل منهما 1200 طن/اليوم.

ينتج المجمع حوالي 4850 طن/اليوم غاز اصطناعي، تحول منه كمية 2630 طن/اليوم إلى وحدات معالجة وفصل لإنتاج الهيدروجين بمعدل 80 ألف متر مكعب قياسي في الساعة، أما بقية الغاز الاصطناعي الخام المنتج فترحل إلى وحدة معالجة ريكتيسول Rectisol لنزع الغاز الحامضي، ثم إلى وحدة توليد مشترك تتكون من ثلاث عنفات غازية، وعنفتين بخاريتين.

¹ Fujian Petrochemical Company

² Exxon-Mobil China

³ Saudi Aramco Sino Company

3-8: مجمع التغويز في مصفاة جازان - المملكة العربية السعودية

يجري حالياً إنشاء مصفاة في منطقة جازان الصناعية طاقتها التكريرية 400 ألف ب/ي، ويتوقع أن تبدأ الإنتاج في عام 2019. صممت المصفاة وفق أحدث المعايير التكنولوجية، وتحتوي على مجمع لتحويل مخلفات التقطير الثقيلة إلى غاز اصطناعي سيستخدم جزء منه في إنتاج الهيدروجين النقي اللازم لتلبية حاجة وحدات المصفاة، والباقي سيستهلك كوقود في وحدة دورة التغويز المتكاملة المدمجة لإنتاج طاقة كهربائية بمعدل 4000 ميغاوات/الساعة. وسيكون المجمع الأول في العالم من حيث حجم الطاقة الإنتاجية لمحطة توليد الطاقة الكهربائية اعتماداً على تقنية التغويز. (Arabian Gazette, 2013)

يهدف مجمع التغويز في مصفاة جازان إلى تحويل 90 ألف ب/ي من مخلفات التقطير الفراغي الثقيلة Vacuum residue لإنتاج حوالي 2.4 مليار قدم مكعب في اليوم من الغاز الاصطناعي، ويتكون من الأجزاء الرئيسية التالية:

- وحدة فصل هواء لإنتاج 75 ألف طن/ اليوم من الغازات الصناعية المكونة من 20 ألف طن/اليوم أو كسجين، و 55 ألف طن/اليوم نتروجين.
 - مغوز من تصميم شركة شل لتحويل مخلفات التقطير الفراغي إلى غاز اصطناعي.
 - وحدة معالجة الغاز الاصطناعي لتخليصه من المركبات الكبريتية.
 - وحدة استرجاع كبريت لتحويل المركبات الكبريتية المنتجة من وحدات معالجة الغاز الاصطناعي إلى كبريت حر.
 - عشر عنفات غازية مصممة لتعمل على الغاز الاصطناعي المنتج من وحدة التغويز، مع إمكانية العمل على زيت الديزل كوقود، وخمس عنفات بخارية، وعشر مولدات بخار لاسترجاع الحرارة الضائعة، وخمسة عشر مولد طاقة كهربائية.
- يعتبر مشروع تغويز مصفاة جازان أحد الخيارات الاستراتيجية لخفض استهلاك النفط الخام في محطات توليد الطاقة الكهربائية (Giglio, R., 2013)



الخلاصة والاستنتاجات

أدى تراجع جودة النفط الخام ، وازدياد الأنواع الثقيلة والحاوية على نسب عالية من الشوائب، وما رافقه من تنامي الطلب على المنتجات الخفيفة والعالية الجودة، إلى توجه معظم مصافي النفط في العالم بتوظيف استثمارات باهظة في مشاريع إنشاء عمليات تحويل المنتجات الثقيلة غير المرغوبة الناتجة عن تكرير النفوط الثقيلة إلى منتجات خفيفة تلبى متطلبات التشريعات الخاصة بحماية البيئة من التلوث.

كما أدى تنامي طاقة العمليات التحويلية في مصافي النفط إلى ظهور كميات فائضة من مخلفات التكرير المنخفضة القيمة كالفحم البترولي والقار، والتي أصبحت تشكل عبئاً على مصافي النفط نظراً لصعوبة تصريفها، علاوة على ظهور التشريعات التي تمنع استخدامها كوقود بسبب احتوائها على نسب عالية من الشوائب الملوثة للبيئة، مما دفع القائمين على صناعة التكرير إلى البحث عن سبل لتصريف هذه المخلفات بطرق آمنة.

حظيت فكرة تطبيق عملية تغويز الفحم البترولي والزيوت الثقيلة اهتماماً ملحوظاً كإحدى الوسائل الممكنة لتصريف مخلفات التكرير الثقيلة، وتحويلها إلى منتجات عالية القيمة.

ارتبط ازدهار صناعة تحويل الفحم إلى سوائل في العقود الماضية بتقلبات أسعار النفط والمنتجات النفطية في الأسواق العالمية. فعندما ترتفع أسعار النفط تزدهر فرص البحث عن مصادر أخرى للحصول على السوائل الهيدروكربونية، وتصبح الصناعات الأخرى كصناعة تحويل الفحم إلى سوائل مجدية اقتصادياً، بينما تصبح خاسرة عندما يتراجع سعر النفط الخام، وتراجع معه أسعار المنتجات النفطية.

يؤثر في ربحية عمليات تحويل الفحم إلى سوائل عوامل تقنية تتعلق بنوع اللقيم، ونوع المنتجات المطلوبة، وحجم المفاعل، ونوع المادة المؤكسدة.



على الرغم من التطورات المهمة التي شهدتها تقنية تغويز الفحم البترولي خلال العقود الماضية، إلا أنها لا تزال تعاني من بعض التحديات التقنية، والبيئية، والاقتصادية، وهذا يستوجب ضرورة تعزيز جهود البحث العلمي لتحسين الأداء التشغيلي للعمليات وتحسين مردودها الاقتصادي.



قائمة المراجع

- Abadie, L., & Chamorro, J., (2009) **“The Economics of Gasification: A Market-Based Approach”** Available at: www.mdpi.com/journal/energies
- Aghahosseini, S., Dincer, I., Naterer, G., (2011) **“Environmental Impact Assessment of Sustainable Hydrogen, Steam and Electricity Trigeration Through Integrated Gasification and Cu-Cl Cycle”** Proceeding of the Global Conference on Global Warming, 11-14 July, 2011, Lisbon, Portugal.
- Amick, P., (2000) **“Gasification of Petcoke Using the E-Gas Technology at Wabash River”** Global Energy Inc., Houston, Texas. Paper presented at 2000 Gasification Technology Conference.
- Amick , P., (2006) **“E-Gas Technology Coal & Petcoke Gasification”** Paper presented at the conference of Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate. Columbus, Ohio, November 1, 2006.
- Andrews, A., & Lattanzio, R., (2013) **“Petroleum Coke: Industry and Environmental Issues”** Congressional Research Service. Available at: www.crs.gov
- API, (2014) **“Guidance Document for the Storage and Handling of Petroleum Coke”** American Petroleum Institute.
- Arabian Gazette, (2013) **“Shell Licenses Gasification Technology to Jazan Power Project in Saudi Arabia”** <https://arabiangazette.com/shell-licenses-gasification-technology-jazan-power-project-saudi-arabia/>
- ASTM, (2011) **“D5003-06a Standard Test Method for Hardgrove Grindability Index (HGI) of Petroleum Coke”** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. Available at: www.astm.org
- Bajura, A., & Eyring, E., (2016) **“Coal and Liquid Fuels”** University of Utah, GCEP Advanced Coal Workshop, March 15-16, Provo, Utah. USA.
- Barnes, I., (2011) **“Next Generation Coal Gasification Technology”** IEA Clean Coal Centre.
- Bartis, J., et al., (2008) **“Producing Liquid Fuels from Coal- Prospects and Policy Issues”** Available at: www.rand.org
- Beeston S., (2015) **“Successful Start-Up of Delayed Coking Unit Petron RMP-2 Project”** Amec Foster Wheeler. Pre-Conference Workshop at ME-TECH 2015, Dubai, 16 February 2015.



- Beeston, S., (2014) “Solvent De- asphaltting Options, How SDA Can Increase Residue Upgrading Margins “ ,Foster Wheeler. Paper presented at Middle East Technology Conference, Februray,18-19, 2014. Dubai, UAE.
- Berg, R., 2015 “**Shell Coal Gasification Process- An Integrated Solution for Efficient Coal-to-Products Value Chains**” Shell Global Solutions International B.V. Paper presented at Freiberg Conference Inner Mongolia, June 7-11, 2015.
- Berg, R., Chen, Z., & Chua, S. 2015 “**The Shell Coal Gasification Process for Reliable Chemicals, Power, and Liquids Production**” Shell Global Solutions.
- Bezdek, R., (2015) “**A Coal-Based Strategy to Reduce Europe’s Dependence on Russian Energy Imports**” The Official Journal of the Coal Industry.
- Bowen, B., Irwin, M., & Canchi, D., (2008) “**Coal-To-Liquids (CTL) & Fischer-Tropsch Processing (FT)**” The Energy Center at Discovery Park, Purdue University. Available at: <http://www.purdue.edu/dp/energy/CCTR/>
- Bressan, L. ,et al., (2009) “**Integration Between Petcoke Gasification and CFB Combustion to Meet the Refinery Needs of Hydrogen and Electricity Power**” Foster Wheeler Energy. Paper presented at Bottom of the Barrel Technology Conference, Moscow 22nd & 23rd April 2009.
- Castaneda, L., Munoz, J., Ancheyta, J., (2013) “Current situation of emerging technologies for upgrading of heavy oils” Elsevier. Available at: www.elsevier.com/locate/cattod
- CBI, (2015) “**E-Gas Gasification Technology**” Chicago Bridge & Iron Company. Available at: www.CBI.com
- Chhoa, T., (2005) “**Shell Gasification business in action**” Shell Global Solutions International BV. Available at: <http://www.globalsyngas.org/uploads/eventLibrary/05CHHO.pdf>
- Chemik, T., 2010 “**Technical and Economic Conditions of new Technologies that Use Coal**” Institute for Chemical Processing of Coal, Zabrze.
- Denton, D., (2005) “**Eastman Gasification Overview**” APPA New Generation Workshop, February 17, 2005. Available at: <http://www.eastman.com/Pages/Home.aspx>
- Driscoll D., (2007) “**Coal to Liquids (CTL): An Overview**” National Energy Technology Laboratory, NETL. Brazil. Available at: www.netl.doe.gov
- DTI, (1999) “**Coal Liquification- Cleaner Technology Program**” Technology Status Report. Department of Trade and Industry. UK. Available at: www.dti.gov.uk/ent/coal
- Duddy, J., McLean, J., and Smith, T., 2007 “**Coal/Oil CO-Processing**” Hydrocarbon Research, Inc. UOP. Ltd.



- Elangovan, S., (2012) “**Modular Fischer Tropsh for Wyoming Coal to Liquid Fuels**” Final Executive Summary Report Submitted to: School of Energy Resources, University of Wyoming
- EPRI, (2010) “**Gasification Technology Status-December 2010**” Electric Power Research Institute, California, USA.
- ESCAP, (2014) “**Shaping the Future of Sustainable Energy in Asia and the Pacific. Prospects for Cleaner and More Efficient Coal Production and Utilization Technologies in North-East Asia**” The Economic and Social Commission for Asia and Pacific (ESCAP) . Available at: www.unescap.org
- Evenson, C., & Waters, D., (2011) “**High Temperature, Hydrogen Separation A Carbon Capture Process Technology**” Eltron Research & Development Inc.
- ExxonMobil, (2009) “**ExxonMobil Celebrates China’s Fujian Facility Completion**” Available at: <http://news.exxonmobil.com/press-release/exxonmobil-celebrates-chinas-fujian-facility-completion>
- ExxonMobil, (2014) “**Methanol to Gasoline (MTG) Production of Clean Gasoline from Coal**” ExxonMobil Research and Engineering, Virginia, USA. Available at: www.exxonmobil.com/refiningtechnologies
- Faegh, A., et al., (2015) “**Petcoke Gasification on the Upswing**” Hydrocarbon Engineering Magazine. February 2014.
- GE, (2008) “**Coffeyville Resources- Case study**” Available at: http://files.gecompany.com/gecom/de/summit/case_studies/Case%20Study_GE%20Energy_Coffeyville%20Resources.pdf
- Dan Gillis, D., VanWees, M., Zimmerman, M., (2009) “**Upgrading Residues to Maximize Distillate Yields**” UOP LLC, A Honeywell Company. Des Plaines, Illinois, U.S.A.
- Gibson, P., 2007 “**Coal To Liquids at Sasol**” Paper presented at Kentucky Energy Security Summit. CAER’s 30th Anniversary. October 11, 2007.
- Giglio, R., (2013) “**Petcoke to Power – A Strategic Energy Option for the Middle East**” Foster Wheeler. Paper Presented at Power-Gen Middle East 2013 4-6 February 2013, Qatar National Convention Centre. Doha, Qatar.
- Gillis, D., VanWees, D., Zimmerman, P., 2009 “**Upgrading Residues to Maximize Distillate Yields**” UOP LLC, A Honeywell Company Des Plaines, Illinois, U.S.A.
- Goldhammer, B., et al., (2008) “**Gasification/IGCC to Improve Refinery Operation**” Hydrocarbon Publishing Company. Available at: www.digitalrefining.com/article/1000647



- Gupta, S., et al., 2015 “**Value Addition through Coke Gasification: Case Study**” Knowledge Sharing Program, 18th Feb.15 TAKREER Research Centre, Abu Dhabi, UAE.
- Harris, D., and Roberts D. (2013) “**The Coal Handbook-Coal gasification and conversion**” Csiro Energy Technology, Australia. Woodhead Publishing Limited.
- Harris, D., Beath, A., and Roberts, D.(2015) “**Coal-to-Liquids in Australia, Overview of Drivers and Status of Developments**” Csiro Energy. Paper presented at 7th International Frelberg/Inner Mongolia Conference-Coal Conversion and Syngas 7-11 June 2015 Mongolia, China.
- Hawley, R. (2000) “**Motiva Enterprises LLC Delaware City Refinery-Repowering Project Overview and Project Status**” Paper presented at: 2000 Gasification Technologies Conference, San Francisco, California. October 9-11, 2000.
- HECA, (2012) “**Hydrogen Energy California Commercial Demonstration of Advanced IGCC With Full Carbon Capture**” Hydrogen Energy California Information Centre. Available at: <http://www.heca.com>
- Helton, T., & Hindman, M., 2014 “**Methanol To Gasoline Technology, An Alternative for Liquid Fuel Production**” ExxonMobil Research and Engineering Company. Paper presented at Morris Conference, Houston, Texas. USA. July 30-31 2014.
- Higman, C., (2016) “**State of the Gasification Industry: Worldwide Gasification and Syngas Databases, 2016 Update**” Higman Consulting gmbh. Paper presented at Gasification & Syngas Technologies Conference, Vancouver, 19th October, 2016.
- Higman, C., & Eppinger, M., (1994)“The Zero-residue Refinery” Paper presented at AICHEM, Frankfurt, 8th June 1994.
- Höök, M., Fantazzini, D., Angelantoni, A., Snowden, S. (2014) “**Hydrocarbon liquefaction: viability as a peak oil mitigation strategy**” Philosophical Transactions. Series A: Mathematical, physical, and engineering science. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0319>
- Höök, M., & Aleklett K., (2009) “**A Review on Coal-to-Liquid Fuels and its Coal Consumption**” International Journal of Energy Research. Published online in Wiley InterScience. Available at: www.interscience.wiley.com
- Hurd, D., Park, S., & Kan, J., (2014) “**Coal, to Syngas, to Methanol, to Olefins**” China Coal to Olefin Industry. Deutsche Bank Markets Research.
- Huskey, T., (2009) “**Gasification Solutions IGCC**” General Electric Energy.
- IEA, (2009) “**Review of Worldwide Coal To Liquids R, D&D Activities and the Need for Further Initiatives within Europe**” IEA Clean Coal Center.



- IEA, (2008) **“COAL–TO–LIQUIDS An Alternative Oil Supply?”** International Energy Agency Coal Industry Advisory Board - CIAB. Workshop Report, Paris Cedex. Available at: www.iea.org/ciab
- INL, (2013) **“Options for Kentucky’s Energy Future”** Idaho National Laboratory. Kentucky Energy and Environment Cabinet NGNP Industry Alliance Limited. Available at: <http://www.inl.gov>
- Issod, A. Romanini, C. and Frantz, T., (2015) **“Intervenors Motion to Terminate Application for Certification for the Hydrogen Energy California Project”** Energy Resources Conservation and Development Commission, California, USA. Available at: www.hydrogenenergycalifornia.com
- Jacobs, (2015) **“Technology Opportunities to Improve the Competitiveness of Alberta's Oil Sands for U.S. Refineries”** Jacobs Consultancy Canada Inc.
- Kerester, A., (2014) **“Gasification can Help Meet the World’s Growing Demand for Cleaner Energy and Products”** World Coal Association. Corner Stone, The Official Journal of World Coal Industry. Volume2, Issue 3. Available at: www.worldcaol.org
- Killmeyer, R., et al., (2003) **“Water-Gas Shift Membrane Reactor Studies”** National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA 15236
- Koppel, P., and Lorden, D., (2009) **“Gasification: Converting Low Value Feedstocks to High Value Products”** Fluor Canada Ltd. Presented at the 18th Symposium on Industrial Application of Gas Turbines (IAGT) Banff, Alberta, Canada - October 19-21, 2009.
- Khosravi, M., & Khadse, A., (2013) **“Review of Worldwide Coal to Liquids R, D & D Activities and the Need for Further Initiatives Within Europe”** Project carried out with a financial grant of the Research Program of the Research Fund for Coal and Steel. IEA Clean Coal Centre.
- Kong, Z., et al., (2015) **“EROI Analysis for Direct Coal Liquefaction without and with CCS: The Case of the Shenhua DCL Project in China”** Available at: www.mdpi.com/journal/energies
- Kozak, M., (2008) **“Can Synthetic Fuels Help Alleviate Europe’s Petroleum Dependence? An Overview of Coal-to-Liquids in Poland”** Prepared for ENERGY CHARTER SECRETARIAT , Brussels, Belgium
- Lee, S., Speight., & Loyalka, S. 2015 **“handbook of Alternative Fuel Technologies”** Taylor & Francis Group, LLC Available at: <http://www.taylorandfrancis.com>



- Mahasenani, N., 2010 “ **The Hydrogen Energy California (HECA) Project**” Paper presented at the International Advanced Coal Conference, Laramie, WY June 23, 2010.
- Mantripragadaa, H., & Rubina, E., (2009) “**CO₂ reduction potential of coal-to-liquids (CTL) plants**” Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA. Available at: www.elsevier.com/locate/procedia
- Marasigan, J., (2010) “**Hydrogen Energy California Preliminary Design Specification**” Electric Power Research Institute EPRI. USA
- Marano, J., (2003) “**Refinery Technology Profiles: Gasification and Supporting Technologies**” National Energy Technologies Laboratory, U.S. Department of Energy/Energy Information Administration, Washington, DC, June 2003.
- Mathew, T., (2016) “**Update on Jamnagar Gasification Project**” Reliance Industries Ltd. Paper presented at a conference on gasification in India, Held in February 11th – 12th, 2016. Delhi, India.
- Mathew, T., (2013) “**Coal/Petcoke Gasification and Reliance’s Jamnagar Gasification Project**” Reliance Industries Ltd.
- Middleton, D., (2014) “**The Future of Clean Coal**” U.S. Department of Energy. National Conference of State Legislatures. Office of Clean Coal & Carbon Management. Available at: <http://www.ncsl.org/documents/energy/Middleton.EPA.pdf>
- Miller, C., (2007) “**Coal Conversion – Pathway to Alternate Fuels**” Office of Fossil Energy U.S. Department of Energy. EIA Energy Outlook Modeling and Data Conference, Washington, DC, March 28, 2007.
- Minchener, A., (2011) “**Coal-to-oil, gas and chemicals in China**” IEA Clean Coal Centre. Available at: https://www.usea.org/sites/default/files/022011_Coal-to-oil,%20gas%20and%20chemicals%20in%20China_ccc181.pdf
- Moirit, F., & Kelly, J., (2014) “**Coal liquefaction**” Department of Chemical Engineering , Faculty of Diponegoro University Semarang.
- Murthy, B., et al., (2014) “**Petroleum Coke Gasification: A Review**. The Canadian Journal of Chemical Engineering. March 2014. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/262849791>
- Muda, N., & Boosroh, M., (2013) “**Gasification of Coal-Petcoke Blends in a Pilot Scale Gasification Plant**” International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. Available at: <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.8.2013.32.0120>
- Navarroa, C., Shang, Z., & Weib, H., (2005) “**Optimisation of Integrated Gasification Combined Cycles in Refineries**” Elsevier Science, B.V.



- NETL, (2016) “Coffeyville Resources Nitrogen Fertilizers Plant” National Energy Technology Laboratory. Available at: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/fertilizer-commercial-examples>
- NRDC, (2008) “Why Liquid Coal Is a Viable Option to Move America Beyond Oil” Natural Resources Defense Council- NRDC. Available at: www.nrdc.org/policy
- Orhan, O., et al., (2014) “gasification of Oil Refinery Waste for Power and Hydrogen Production” Proceeding of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Bali Indonesia, January 7-9, 2014.
- Orr, D., & Maxwell, D., (2000) “A Comparison of Gasification and Incineration of Hazardous Wastes” U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory (NETL) 3610 Collins Ferry Road Morgantown, West Virginia.
- Penrose, C., et al., (1999) “Enhancing Refinery Profitability by Gasification, Hydro processing & Power Generation” TEXACO Power & Gasification Texas.
- Radcliffe, A., et al., 2016 “Modeling and Optimization of High-Performance Polymer Membrane Reactor Systems for Water–Gas Shift Reaction Applications” MDPI Journal. Available at: www.mdpi.com/journal/processes
- Radom, (2008) “Synthetic Fuels as Substitutes to Conventional Fuels” Technical University of Radom Paper presented at conference on Ecology and Safety as a Driving Force in the Development of Vehicles. IP Radom, March , 2008.
- Ratafia-Brown, J., et al., (2002) “Major Environmental Aspects of Gasification-Based Power Generation Technology” Gasification Technologies Program at the National Energy Technology Laboratory (NETL), U.S. Department of Energy. Available at: www.netl.doe.gov
- Rhodes, A. 2010 “Kansas refinery starts up coke gasification unit” Oil and Gas Journal
- Roger Bezdek, R., (2015) “A Coal-Based Strategy to Reduce Europe’s Dependence on Russian Energy Imports” President, Management Information Services, Inc. The Official Journal of the Coal Industry.
- Santos, A. Jose da Silva, R., & Reino, M., (2015) “Analysis of Petroleum Coke Consumption in Some Industrial Sectors”
- Scholz, M., & Payrhuber, K., (2009) “Gas Turbine Fuel Flexibility for IGCC” Paper presented at the conference on “Sustainable Energy” Rome, Italy July 07, 2009.
- Sethi, N., Bakishi, V., Kumar, M., (2015) “Gasification & LNG Integration: Alternate feedstock Options & Value-addition Opportunities - Case study” Engineers India Limited, India.



- Shell, (2010) **“Gasification: Converting the Bottom of the Barrel into Valuable Products”** Shell Global Solutions. Available at: www.shell.com/globalsolutions
- Shilling, N., (2010) **“IGCC and Gasification, Cleaner Coal Solution”** General Electric Company.
- Simbeck, D., & Johnson, H., (2001) **“World Gasification Survey: Industrial Trends & Development.** Paper presented at the Gasification Technologies 2001 Conference, October 8, 2001, San Francisco, California.
- Sudero, M. et al., (2009) **“Synthetic Natural Gas (SNG) from Petcoke: Model Development and Simulation”** AIDIC Conference Series, Vol.9, 2009.
- Tennant, J., (2014) **“Overview of Coal and Coal-Biomass to Liquids (C & CBTL) Program”** National Energy Technology Laboratory. Available at: <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/fuels/coal-and-biomass-to-liquids/>
- The Economist, (2017) **“The Role of Coal in Europe’s Power Mix- Outlook for Coal-Fired Generation”** The Economist Intelligence. Unit Limited 2017. Available at: www.endcoal.org
- Tiefenbacher , J., (2010) **“The Environmental and Health Implications of Petcoke Energy Production”** Texas State University.
- Tse, D., (2013) **“GE’s Petcoke Gasification Technology Ready to Meet Today’s Feedstock Challenge”** General Electric Company.
- Yuzhuo, Z. (2014) **“Clean Coal Conversion: Road to Clean and Efficient Utilization of Coal Resources in China”** Cornerstone Magazine, The Official Journal of the Coal Industry. <http://cornerstonemag.net/>
- US. EPA, (2009) **“Coal-to-Liquids Products Industry Overview”** Proposed Rule for Mandatory Reporting of Greenhouse Gases. Office of Air and Radiation. U.S. Environmental Protection Agency.
- Valero, (2007) **“Delaware City Refinery Tour”** Valero Energy Corporation. Available at: www.valero.com
- Visagie, J. (2008) **“University of Pretoria Generic gasifier modelling: Evaluating model by gasifier type”** University of Pretoria
- Wallace, P.; Anderson, M.; Rodarte, A.; Preston, W., (1998) **“Heavy Oil Upgrading by the Separation and Gasification of Asphaltenes,”** 1998 Gasification Technologies Conference, San Francisco, CA. USA.



- Walter, S., (2014) “**Heavy Residue Gasification with Poly-generation Hydrogen Sourcing for Refineries**” Air Liquide Global E&C Solutions. Paper Presented at The 12th European Gasification Conference 10-13 March 2014, Rotterdam, The Netherlands.
- Winslow, J., & Schmetz, E., (2011) “**Direct Coal Liquefaction Overview**” National Energy Technology Laboratory.
- Zuideveld, P., Chen, Q., and Bosch, P., (2000) “**Integration of Gasification with Thermal Residue Conversion in Refineries**” Shell Global Solutions International B.V. Amsterdam, The Netherlands. Paper presented at Gasification Technologies Conference 8-11 October 2000, San Francisco, California.



ABSTRACT

COAL TO LIQUID TECHNOLOGY AND ITS IMPACTS ON PETROLEUM REFINING INDUSTRY

Refineries worldwide have been facing several challenges affect its margin resulted from the environmental legislation, decline in crude oil quality, and changing product demand patterns. To cope with these challenges, refiners have been forced to look for an efficient, economical, and environmentally safe utilization of low value by-products, such as petroleum coke, refinery wastes and heavy petroleum residue, that are peaking up as a result of the increase of processing heavy crude oils.

The **purpose of this study** is to explain the benefits of applying Coal To Liquid technology in refineries, as one of the attractive solutions to convert the refinery wastes and heavy residues to a variety of valuable products, include electricity, steam, hydrogen, chemicals and liquid fuels.

The **first chapter** describes principles, technical status, and performance of coal to liquid processes that are available for producing liquids from coal, the environmental issues associated with the technology and the challenges faced the early commercial experience.

The **second chapter** highlights the main features and benefits of integrating gasification technology with the petroleum refinery processes, such as the ability to produce a high-quality syngas product that can be used for energy production or as a building block for other chemical manufacturing processes and flexibility to use several types of feedstocks, such as petroleum coke, heavy refinery residuals, and secondary oil-bearing refinery materials.

The **third chapter** presents a series of successful case studies of applying gasification technology in petroleum refineries worldwide and in OAPEC member countries. A great emphasis is placed on the advantages and lessons learned from each case study.

The study **concludes** that, the use of gasification technology in petroleum refineries is expected to increase due to the significant benefits. Furthermore, there is a need for more continued technology advances on improving the economics and minimizing the environmental impacts of petroleum coke gasification technologies and processes.







منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)