منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)

تقنيات نزع الكربون في صناعة تكرير النفط

TECHNOLOGICAL PATHWAYS FOR DECARBONIZING PETROLEUM REFINING

دولة الكويت - يونيو / حزيران 2023
إدارة الشؤون الفنية

OAPEC Oapec Oapec
@OAPEC1 OAPEC1 OAPEC ORG

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2023.

****

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

إدارة الشؤون الفنية

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف 24959000 (965)– فاكسميلي 24959755 (965)

P.O. Box 20501 Safat Kuwait 13066

9597554200 – Fax.: (965) 249590Tel.: (965)

Website: www.oapecorg.org

Email: oapec@oapecorg.org

Email : oapec@oapec.fasttelco.com

****

مقدمة

تؤكد العديد من مراكز الأبحاث والدراسات الاستشرافية على أن النفط سيبقى المصدر المهيمن على كافة مصادر الطاقة الأخرى ولعقود عديدة قادمة، على الرغم من توقعات تراجع الطلب على الوقود النفطي المستخدم في وسائل النقل نتيجة التطورات التي أدخلت على السيارات الكهربائية، وتحسين كفاءة استخدام الوقود في المحركات، وبالتالي فإن هذا يشير إلى أن العالم سيبقى بحاجة إلى مصافي تكرير النفط إلى ما بعد عام 2050، إلا أن التوجه العالمي نحو التحول إلى الطاقة الخالية من الكربون بحلول عام 2050 سيساهم في إضافة ضغوط وتحديات متزايدة إلى صناعة تكرير النفط تدفعها للبحث عن حلول وتقنيات يمكن من خلالها تلبية متطلبات تشريعات خفض الانبعاثات الكربونية بأقل التكاليف الممكنة، مع المحافظة على موقعها التنافسي في أسواق الطاقة.

ولمواجهة تلك التحديات شهدت مصافي تكرير النفط في العالم تطورات مهمة. فمنها ما أعلن عن خطط لخفض انبعاثات الكربون، ومنها ما تم تحويلها إلى مصاف لإنتاج الوقود الحيوي، ومنها ما تم إغلاقها بشكل دائم أو تحويلها إلى محطات تخزين للمنتجات النفطية. وقد تركزت هذه التطورات بشكل رئيسي في مصافي أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية.

أما في الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك" فتشهد مصافي تكرير النفط سعياً حثيثاً نحو إعداد خطط استراتيجية لمشاريع خفض انبعاثات الكربون، وذلك من خلال تنفيذ إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها، وتطبيق تقنيات احتجاز ونقل وتخزين واستخدام غاز ثاني أوكسيد الكربون، وتعديل هيكل المنتجات النفطية بما يتوافق مع التوقعات المستقبلية لتغير الطلب على أنواع الوقود في الأسواق العالمية، إضافة إلى تعظيم إنتاج الوقود المنخفض الكربون، واستخدام الهيدروجين الأخضر والأزرق في عمليات المعالجة الهيدروجينية.

من جهة أخرى لم تدخر الدول الأعضاء في منظمة أوابك جهداً في سعيها للانضمام إلى التوجه العالمي نحو خفض الانبعاثات الكربونية. وقد كان لمصافي تكرير النفط نصيباً من هذا الاهتمام، حيث خُصصت الاستثمارات اللازمة لتنفيذ مشاريع تطوير المصافي القائمة وإنشاء مصافٍ جديدة متطورة يمكنها تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بخفض الانبعاثات الملوثة للبيئة. تركزت معظم هذه

المشاريع في دولة الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والمملكة العربية السعودية، وجمهورية العراق، ودولة الكويت، وجمهورية مصر العربية.

تتناول هذه الدراسة أهم الفرص والتقنيات الممكن تطبيقها لنزع الكربون في مصافي تكرير النفط، والتي يمكن تصنيفها ضمن مجموعات رئيسية، هي تركيب منظومة احتجاز وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون، واستبدال الوقود الأحفوري بوقود خالٍ من الكربون، واستبدال النفط الخام المكرر بمواد متجددة لإنتاج وقود منخفض الكربون، وترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها.

كما تستعرض الدراسة أهم التطورات التي شهدتها صناعة تكرير النفط في العالم والمشاريع الجاري إنجازها أو المخطط تنفيذها، وبعض الأمثلة العملية والتجارب السابقة لتطبيق تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في مناطق مختلفة من العالم، مع الإشارة إلى النتائج التي أمكن تحقيقها والصعوبات التي واجهت عملية التطبيق، وأهم الدروس المستفادة من هذه التجارب.

خلصت الدراسة إلى عدد من الاستنتاجات والتوصيات، من أهمها أن قياس مدى نجاح صناعة التكرير في المستقبل لم يعد يتوقف على الربحية أو مدى الالتزام بتشريعات الصحة والسلامة المهنية، بل أصبح يعتمد أيضاً على قياس نسبة الانبعاثات الكربونية الناتجة عن عمليات التكرير، والقدرة على إنتاج مشتقات نفطية منخفضة الكربون. وهذا يستوجب تعاون الدول الأعضاء في أوابك لمواجهة التحديات والنهوض بصناعة التكرير والمحافظة على موقعها التنافسي في الأسواق العالمية.

تأمل الأمانة العامة أن يجد المختصون في هذه الدراسة بعض الأفكار التي تساعدهم على اختيار الحلول المناسبة لمواجهة التحديات التي تواجههم عند تطبيق مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط.

والله ولي التوفيق

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

قائمة المحتويات

مقدمة 3
قائمة المحتويات 5
قائمة الأشكال 7
قائمة الجداول 9
المصطلحات والمختصرات 10
ملخص تنفيذي 11
الفصل الأول: نزع الكربون في مصافي تكرير النفط، الدوافع والإجراءات 14
مقدمة 14
1-1: مصادر انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط 14
1-1-1: انبعاثات المصادر الثابتة 15
2-1-1: انبعاثات عملية التكسير بالعامل الحفاز المائع 17
3-1-1: انبعاثات وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان 18
4-1-1: مصادر أخرى 21
2-1: العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات CO_2 في مصافي تكرير النفط 21
1-2-1: نوع الوقود المستخدم في عمليات التسخين 21
2-2-1: نوع النفط الخام المكرر في المصفاة 22
3-2-1: مواصفات المنتجات النهائية 23
4-2-1: التعقيد التكنولوجي لعمليات التكرير Refinery Configuration & Complexity 23
3-1: خطة نزع الكربون في مصافي تكرير النفط 28
الفصل الثاني: تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط 30
مقدمة 30
1-2: احتجاز وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون CCUS 31
1-1-2: منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق Post- combustion 33
2-1-2: طريقة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق Pre-combustion Capture 34
3-1-2: تركيب منظومة احتجاز الكربون في أفران العمليات 36
4-1-2: احتجاز الكربون في وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع 38
5-1-2: تطبيق تقنية احتجاز CO_2 في إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان 39
6-1-2: تقنيات استعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 41
7-1-2: عوامل نجاح تطبيق تقنية احتجاز وتخزين واستعمال CO_2 42
2-2: استبدال الوقود الأحفوري بوقود منخفض الكربون 44
1-2-2: استخدام الهيدروجين كوقود 44
2-2-2: التسخين الكهربائي 45
3-2-2: التحويل إلى وقود منخفض الكربون 47
3-2: تكرير مواد خام متجددة 50

2-4: إنتاج وقود منخفض الكربون 52
2-4-1: إنتاج وقود الطيران المستدام 53
2-4-2: تقنية تحويل الهواء إلى وقود Air to Fuel 56
2-5: ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها 57
2-5-1: إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بدون تكاليف أو بتكاليف بسيطة 57
2-5-2: إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بتكاليف متوسطة 62
2-6: تطبيق مفهوم المصفاة نصف الدائرية Semi-circular refinery 67
الفصل الثالث: تطورات مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في العالم 70
مقدمة 70
3-1: مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في أوروبا الغربية 70
3-2: مشاريع نزع الكربون في أمريكا الشمالية 75
3-3: مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في آسيا الباسيفيك 80
3-4: مشاريع نزع الكربون في الدول الأعضاء في أوابك 81
3-5: أمثلة عملية لمشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط 84
3-5-1: مشروع نزع الكربون في مصفاة -جنوب شرق آسيا. 84
3-5-2: مشروع إعداد خطة خفض انبعاثات الكربون في مصفاة أوروبية 88
3-5-3: مشروع نزع الكربون في مصفاة Pernis- هولندا 94
3-5-4: دراسة حالة: خطة مصفاة Tupras للحياد الكربوني بحلول 2050 97
أهداف خطة نزع الكربون في مصفاة Tupras 98
الاستنتاجات والتوصيات 99
Abstract 101
قائمة المراجع 102
المراجع الإنجليزية 102
المراجع العربية 104

قائمة الأشكال

الشكل (1-1): توزع نسب انبعاثات الكربون في مصفاة تكرير النفط حسب المصدر 15

الشكل (1-2): مخطط سير عمليات التكرير في المصفاة والوحدات التي تحتاج إلى أفران للتسخين 16

الشكل (1-3): الأجزاء الرئيسية لفرن العمليات 17

الشكل (1-4): تطور استهلاك الهيدروجين في العالم حسب القطاعات الرئيسية في الفترة 2019-2021 والتوقعات في عام 2030 19

الشكل (1-5): تصنيف أنواع الهيدروجين حسب طريقة الإنتاج 20

الشكل (1-6): مخطط سير عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان 21

الشكل (1-7): مراحل خطة نزع الكربون في مصفاة تكرير النفط 29

الشكل (2-1): احتجاز وتخزين CO_2 في آبار النفط والغاز الناضبة والطبقات الجوفية المالحة 32

الشكل (2-2): نسب تطبيق طرق احتجاز الكربون في العالم 32

الشكل (2-3): منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق 33

الشكل (2-4): مخطط منظومة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق 35

الشكل (2-5): مراحل عملية تجفيف وضغط CO_2 الخارج من وحدة احتجاز الكربون 36

الشكل (2-6): مقارنة بين تقنيتي احتجاز CO_2 قبل وبعد الاحتراق 36

الشكل (2-7): مخطط عملية احتجاز CO_2 من غازات مداخن أفران وحدة الإيثيلين 37

الشكل (2-8): خيارات احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR 40

الشكل (2-9): تقنيات استعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون 42

الشكل (2-10): مبادل حراري لتوليد بخار الماء بالتسخين الكهربائي 46

الشكل (2-11): تسخين مفاعل التهذيب البخاري للميثان بالتسخين الكهربائي والميكروويف 47

الشكل (2-12): كمية انبعاثات الكربون حسب نوع الوقود وقيمة الوزن الجزيئي لغازات المصفاة 50

الشكل (2-13): خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط 51

الشكل (2-14): العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط 52

الشكل (2-15): مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام 53

الشكل (2-16): نموذج إنتاج الوقود المنخفض الكربون في مصفاة تكرير النفط 54

الشكل (2-17): مخطط مبسط لمبدأ تقنية تحويل الهواء إلى وقود 56

الشكل (2-18): انسداد أنابيب المبادلات الحرارية المسببة لهدر الطاقة 58

الشكل (2-19): تغير معدل استهلاك الوقود الغازي في الفرن قبل وبعد عملية تنظيف المبادلات الحرارية الأولية ... 59

الشكل (2-20): مقارنة لهب حراقات الفرن قبل وبعد التنظيف..... 61
الشكل (2-21): العلاقة بين كفاءة حرق الوقود ونسبة انبعاثات NOX، وCO_2 63
الشكل (2-22): مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة لغازات الاحتراق في توليد بخار الماء..... 64
الشكل (2-23): مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة في توليد الطاقة الكهربائية..... 64
الشكل (2-24): خيارات الاستفادة من غازات المصفاة الفائضة..... 67
الشكل (2-25): مصفاة المستقبل نصف الدائرية وخيارات خفض الانبعاثات الكربونية 68
الشكل (3-1) مقدار تخفيض CO_2 الناتج عن الإجراءات المتخذة في أفران المصفاة 87
الشكل (3-2): مسارات احتجاز CO_2 في خطة نزع الكربون في المصفاة 89
الشكل (3-3): الجدول الزمني لتنفيذ إجراءات خفض انبعاثات الكربون في خطة المصفاة..... 93
الشكل (3-4): مخطط تكاليف تنفيذ إجراءات خفض الكربون المزمع تطبيقها..... 93
الشكل (3-5): مخطط لقائم ومنتجات مصفاة PERNIS..... 94
الشكل (3-6): مسارات نزع الكربون في مصفاة PERNIS..... 95
الشكل (3-7): مخطط سير عملية SHELL لإنتاج وقود منخفض الكربون..... 96
الشكل (3-8): مجمع PORTHOS لتخزين CO_2 في ميناء روتردام 97

قائمة الجداول

الجدول (1-1): كمية CO_2 المنبعثة من أفران عمليات تكرير النفط 16

الجدول (1-2): كمية CO_2 المنبعثة من أفران ومراجل مصفاة تكرير النفط حسب نوع الوقود 22

الجدول (1-3): كمية CO_2 المنبعثة من المصفاة حسب مستوى التعقيد التكنولوجي 24

الجدول (1-4): متغيرات النموذج والحالات المختارة لكل متغير 25

الجدول (1-5): استهلاك الطاقة وكمية انبعاثات CO_2 في المصفاة في الحالات المختارة 27

الجدول (2-1): تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط 30

الجدول (2-2): تكلفة منظومة الاحتجاز بعد الاحتراق حسب تركيز CO_2 في غازات المدخنة 34

الجدول (2-3): تركيز CO_2 في غازات مداخن وحدات مصفاة تكرير النفط 38

الجدول (2-4): خصائص ومصادر احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR 39

الجدول (2-5): مقارنة انبعاثات الكربون وتكاليف الإنشاء والتشغيل لتقنيات إنتاج الهيدروجين 41

الجدول (2-6): أنواع الوقود المستخدمة في فرن المصفاة 48

الجدول (2-7): قيم ظروف تشغيل الفرن 49

الجدول (2-8): نسبة الهيدروجين في الغازات الفائضة من وحدات المصفاة 66

الجدول (2-9): خصائص طرق استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة 66

الجدول (3-1): بيانات ظروف التشغيل الأساسية لأفران المصفاة 85

الجدول (3-2): بيانات عملية استبدال زيت الوقود بالوقود الغازي في أفران المصفاة 86

الجدول (3-3): نتائج دراسة استخدام وقود يحتوي على 60% حجماً هيدروجين 87

الجدول (3-4): مقارنة معايير أداء الفرن قبل وبعد التعديل 88

الجدول (3-5): انبعاثات CO_2 في مصفاة طاقتها التكريرية 240 ألف ب/ي 88

الجدول (3-6): كمية تخفيض CO2 وتكاليف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة واستبدال نوع الوقود 90

الجدول (3-7): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات استبدال النفط الخام بمواد متجددة 91

الجدول (3-8): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات احتجاز الكربون (تسعير أوروبا الغربية 2019) 91

الجدول (3-9): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات التخلص منه (تسعير أوروبا الغربية 2019) 91

الجدول (3-10): خيارات استخدام CO_2 وتكاليفها (بدون تكاليف الاحتجاز) 92

المصطلحات والمختصرات

الرمز	الانجليزية	العربية
bbl	Barrel of Oil	برميل نفط
Bbl/d	Barrels of oil per day	برميل نفط في اليوم (ب/ي)
CAPEX	Capital Expenditure	تكاليف استثمارية
CCS	Carbon Capture and Storage	احتجاز وتخزين الكربون
CI	Carbon Intensity	كثافة الكربون
CHP	Combined Heat and Power Generation	توليد مشترك للكهرباء وبخار الماء
CO_2	Carbon Dioxide	ثاني أوكسيد الكربون
CO	Mono Carbon Oxide	أول أوكسيد الكربون
EOR	Enhanced Oil Recovery	الاستخلاص البترولي المعزز
FCC	Fluidized Catalytic Cracking	تكسير بالعامل الحفاز المائع
GHG	Green House Gases	غازات الدفيئة
H_2	Hydrogen	هيدروجين
HCC	Hydro catalytic Cracking	تكسير هيدروجيني حفزي
HEFA	Hydroprocessed esters and fatty acids	هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية
HFO	Heavy Fuel Oil	زيت وقود ثقيل
KPIs	Key Performance Indicators	مؤشرات الأداء الرئيسية
LFO	Light Fuel Oil	زيت وقود خفيف
MDEA	Methyl De Ethanol Amine	ميثيل ثنائي إيثانول أمين
MEA	Mono Ethanol Amine	أحادي إيثانول أمين
NCR	Naphtha Catalytic Reforming	تهذيب النافثا بالعامل الحفاز
NGL	Natural Gas Liquids	سوائل الغاز الطبيعي
NOx	Nitrogen Oxides	أكاسيد النتروجين
LPG	Liquified Petroleum Gases	غاز البترول المسال
PPM	Part Per Million	جزء في المليون (ج.ف.م)
PSA	Pressure Swing Absorption	الامتصاص بالضغط المتأرجح
SAF	Sustainable Aviation Fuel	وقود طيران مستدام
SDA	Solvent De-Asphalting	نزع الأسفلتينات بالمذيب
SCR	Selective Catalytic Reduction	الاختزال الانتقائي الحفزي
SMR	Steam Methane Reforming	التهذيب البخاري للميثان
SOx	Sulfur Oxides	أكاسيد الكبريت

ملخص تنفيذي

مسارات خفض الكربون في مصافي تكرير النفط

تصنف مصافي تكرير النفط على أنها أحد المصادر الرئيسية لانبعاثات الكربون، على الرغم من أن النسبة العظمى للانبعاثات تنطلق في مرحلة الاستهلاك للمنتجات النفطية، حيث تشكل 85-90% من إجمالي الانبعاثات الناتجة خلال مراحل دورة حياة الوقود النفطي.

مصادر انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط

تقسم مصادر انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط إلى أربع مجموعات رئيسية، تتكون المجموعة الأولى من مصادر الاحتراق الثابتة، مثل أفران الوحدات الإنتاجية، ومحطات توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء، وتمثل هذه الانبعاثات ما نسبته 63% من إجمالي انبعاثات المصفاة. أما المجموعة الثانية فتتضمن عمليات تنشيط العامل الحفاز في وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع (FCC) وتمثل 22% من إجمالي انبعاثات المصفاة. وتتضمن المجموعة الثالثة عملية التهذيب البخاري للميثان لإنتاج الهيدروجين، وتمثل 9% من إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة، بينما تتضمن المجموعة الرابعة المصادر الأخرى مثل حرق الغازات الفائضة في منظومة الشعلة، وانبعاثات وحدات استرجاع الكبريت، وتشكل ما نسبته 6%.

تعتبر أفران العمليات أحد أهم مصادر انبعاثات CO_2 في المصفاة، وتستخدم منتجات المصفاة غالباً كوقود في هذه الأفران، مثل زيت الوقود أو الوقود الغازي، وتقدر كمية غازات المدخنة الناتجة عن حرق كل كغ من هذه المواد بحوالي 18-20 كغ، والتي تحتوي على حوالي 3-3.5 كغ CO_2 لكل كغ زيت وقود، وحوالي 2.5-2.7 كغ لكل كغ من الوقود الغازي.

العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات CO_2 في مصافي تكرير النفط

تتمتع كل مصفاة بخصائص تميزها عن غيرها من المصافي، مما يجعل عملية تقييم العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات الكربون أمراً في غاية الصعوبة، نظراً لكثرة هذه العوامل من أهمها:

- نوع الوقود المستخدم في عمليات التسخين، حيث أن نسبة ثاني أوكسيد الكربون في غازات مداخن الأفران تتغير بتغير نوع الوقود، ومحتواه من ذرات الكربون.
- نوع ومصدر النفط الخام المكرر في المصفاة، فالنفط الثقيل يحتاج إلى وحدات تحويلية لتحويل البواقي الثقيلة إلى منتجات خفيفة ينتج عنها انبعاثات.
- مواصفات المنتجات النهائية، حيث أن تخفيض كل كيلوغرام كبريت من المشتقات البترولية ينتج عنه انبعاث 10 كغ من غاز CO_2.
- التعقيد التكنولوجي لعمليات التكرير الذي يعبر عن عدد عمليات المعالجة وعمليات تحويل البواقي الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة، التي تؤدي إلى زيادة كمية انبعاثات المصفاة.

خطة نزع الكربون في مصافي تكرير النفط

تهدف خطة نزع الكربون في مصافي تكرير النفط إلى خفض انبعاثات الكربون خلال فترة زمنية محددة، وذلك من خلال ثلاث مراحل رئيسية، هي إعداد الأهداف، والتقييم، ثم التنفيذ.

قبل البدء بتنفيذ عملية نزع الكربون في مصفاة تكرير النفط يجب إعداد خطة لتقييم الفرص والإجراءات الممكنة والجدوى الاقتصادية لكل إجراء من الإجراءات المختارة، والجدول الزمني للتنفيذ.

تقنيات خفض انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط

تصنف تقنيات خفض انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط ضمن مجموعات رئيسية، هي احتجاز وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون، واستبدال الوقود الأحفوري المستخدم للتسخين وتوليد الطاقة الكهربائية بوقود خال من الكربون، واستبدال النفط الخام المكرر بمواد متجددة لإنتاج وقود منخفض الكربون، وترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها.

تضمنت الدراسة عرضاً لأهم المشاريع التي نفذت، أو الجاري تنفيذها أو المخطط إنشاؤها في مناطق العالم، وخصوصاً في كل من أمريكا الشمالية وأوروبا الغربية، وآسيا الباسيفيك. كما استعرضت أهم المشاريع التي نفذت في الدول الأعضاء في أوابك، مع الإشارة إلى أهم النتائج التي أمكن تحقيقها أو المتوقع الحصول عليها مستقبلاً.

الفصل الأول

نزع الكربون في مصافي تكرير النفط، الدوافع والإجراءات

مقدمة

يعتبر غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 من المركبات الضرورية للحياة البيولوجية، وعند المستويات الطبيعية ليس له أية آثار سلبية على صحة الإنسان أو البيئة، إلا أنه حسب اتفاقية كيوتو لتغير المناخ يصنف بأنه أحد غازات الدفيئة المسببة لارتفاع حرارة الأرض عندما يزيد مستواه عن الحدود الطبيعية.

تصنف مصافي تكرير النفط على أنها أحد المصادر الرئيسية لانبعاثات الكربون، على الرغم من أن النسبة العظمى للانبعاثات تنطلق في مرحلة استهلاك المنتجات النفطية، حيث تشكل 85-90% من إجمالي الانبعاثات الناتجة عبر مراحل دورة حياة الوقود النفطي. (Singh, R. B., 2022)

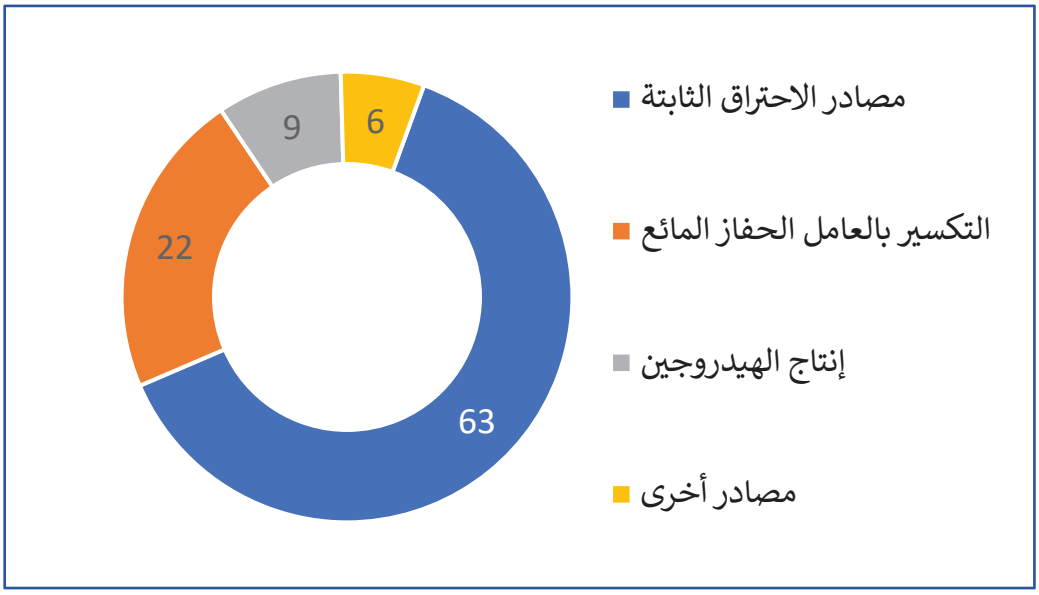
يتناول هذا الفصل مصادر غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة من مصافي تكرير النفط، والعوامل المؤثرة في كميتها، مثل جودة النفط الخام، ونوع عمليات التكرير ودرجة تعقيدها التكنولوجي، ومصدر حصولها على الطاقة الكهربائية وغيرها.

1-1: مصادر انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط

يمكن تقسيم مصادر انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط إلى أربع مجموعات رئيسية، تتكون المجموعة الأولى من مصادر الاحتراق الثابتة، مثل أفران الوحدات الإنتاجية، ومحطات توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء، وتمثل هذه الانبعاثات ما نسبته 63% من إجمالي انبعاثات المصفاة. أما المجموعة الثانية فتتضمن عمليات تنشيط العامل الحفاز في وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع (FCC) وتمثل 22% من إجمالي انبعاثات المصفاة. وتتضمن المجموعة الثالثة عملية التهذيب البخاري للميثان لإنتاج الهيدروجين، وتمثل 9% من إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة، بينما تتضمن المجموعة

الرابعة المصادر الأخرى مثل حرق الغازات الفائضة في منظومة الشعلة، وانبعاثات وحدات استرجاع الكبريت، وتشكل ما نسبته 6%. يبين الشكل (1-1) توزع نسب انبعاثات الكربون في مصفاة تكرير النفط حسب المصدر.

الشكل (1-1): توزع نسب انبعاثات الكربون في مصفاة تكرير النفط حسب المصدر



المصدر: (EPA, 2018)

1-1-1: انبعاثات المصادر الثابتة

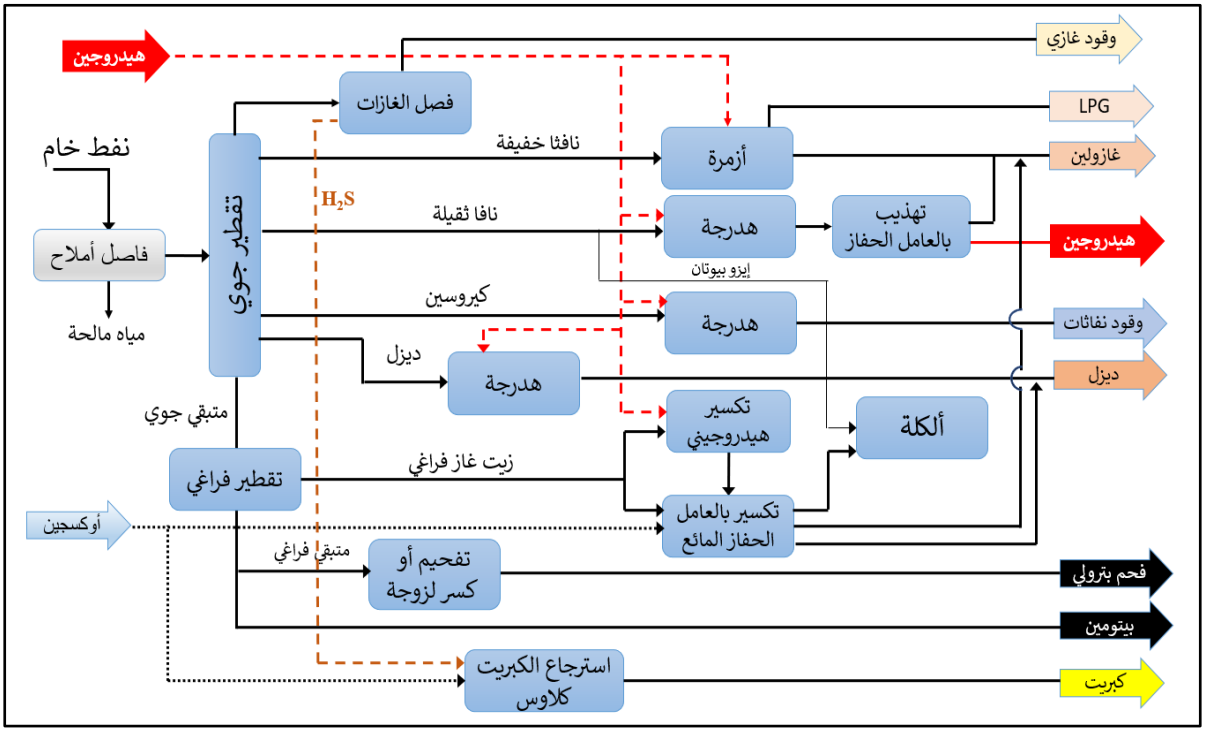
تأتي انبعاثات المصادر الثابتة من حرق الوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء، وأفران التسخين باللهب المفتوح لتوليد الحرارة اللازمة لعمليات التكرير، مثل وحدات تقطير النفط، ووحدات المعالجة الهيدروجينية، والتهذيب بالعامل الحفاز، وعمليات تحويل البواقي الثقيلة إلى منتجات خفيفة مثل وحدات كسر اللزوجة والتفحيم، وغيرها. وتشكل هذه الانبعاثات النسبة الأكبر في مصافي تكرير النفط، حيث تصل إلى 63% من إجمالي انبعاثات المصفاة. يبين الجدول (1-1) كمية CO_2 المنبعثة من أفران عمليات تكرير النفط لمصفاة طاقتها التكريرية 100 ألف ب/ي، عالية التعقيد وتحتوي على وحدة تفحيم مؤجل. كما يبين الشكل (1-2) مخطط سير عمليات التكرير في المصفاة والوحدات التي تحتاج إلى أفران للتسخين.

الجدول (1-1): كمية CO_2 المنبعثة من أفران عمليات تكرير النفط

الوحدات	طاقة الفرن، ميغاوات	CO_2 طن/اليوم
التقطير الجوي	73	370
التقطير الفراغي	32	160
هدرجة النافثا	11	60
تهذيب النافثا بالعامل الحفاز	22	110
هدرجة الكيروسين	12	60
هدرجة الديزل	18	90
تكسير هيدروجيني لزيت الغاز	31	160
هدرجة منتجات التكسير بالعامل الحفاز المائع	20	100
التفحيم	97	500
هدرجة نافثا التفحيم	23	120

المصدر: (Singh, R. B., , 2022)

الشكل (1-2): مخطط سير عمليات التكرير في المصفاة والوحدات التي تحتاج إلى أفران للتسخين

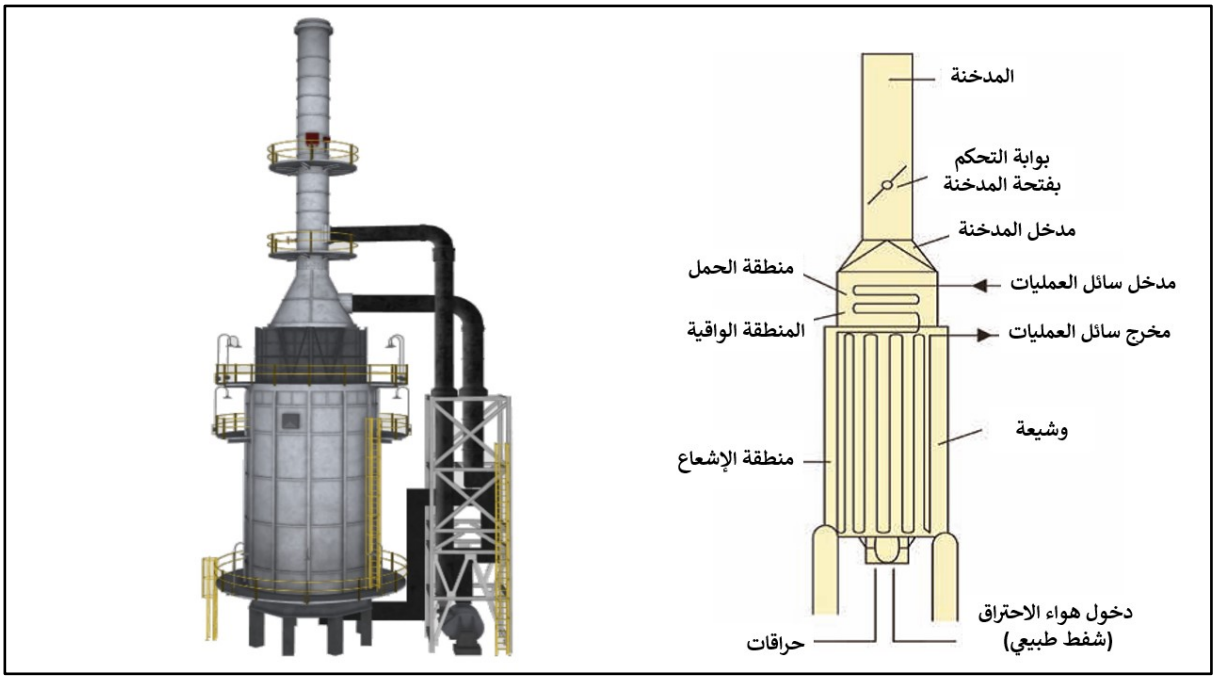


المصدر: (أوابك 2017)

تصمم أفران العمليات على عدة أشكال منها الأفقي ومنها العمودي، ويتكون الفرن من ثلاثة أجزاء رئيسية:، غرفة الاحتراق Combustion Chamber، ومنطقة الحمل Convection section والمدخنة Stack. تدخل المواد المراد تسخينها عبر أنابيب إلى منطقة الحمل للاستفادة من حرارة غازات

الاحتراق قبل دخولها إلى المدخنة، حيث يكون كل من غازات الاحتراق والمواد المراد تسخينها في أدنى مستوى. تمرر المواد بعد ذلك عبر غرفة الاشعاع Radiation chamber، التي تقع تحت منطقة الحمل، ثم إلى غرفة الاحتراق ومنها إلى خارج الفرن. تتوزع الحراقات في أرضية الفرن. يبين الشكل (1-3) الأجزاء الرئيسية لفرن العمليات.

الشكل (1-3): الأجزاء الرئيسية لفرن العمليات



المصدر: (Martin, M., 2021)

تعتبر أفران العمليات أحد أهم مصادر انبعاثات CO_2 في المصفاة، وتستخدم منتجات المصفاة غالباً كوقود في هذه الأفران، مثل زيت الوقود أو الوقود الغازي، وتقدر كمية غازات المدخنة الناتجة عن حرق كل كغ من هذه المواد بحوالي 18-20 كغ، والتي تحتوي على حوالي 3-3.5 كغ CO_2 لكل كغ زيت وقود، وحوالي 2.5-2.7 كغ لكل كغ من الوقود الغازي.(Singh, S; Mukherjee, R., 2022)

1-1-2: انبعاثات عملية التكسير بالعامل الحفاز المائع

تتشكل في بعض عمليات التكرير انبعاثات ناتجة عن التفاعلات الكيميائية لتحويل بعض أنواع الهيدروكربونات إلى أشكال أخرى ذات قيمة أعلى، وتختلف كمية الانبعاثات من عملية لأخرى، وتأتي

عملية التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC في مقدمة هذه العمليات، حيث تمثل 22% من إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة.

تهدف عملية التكسير بالعامل الحفاز المائع إلى تحويل المخلفات البترولية الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية القيمة مثل الغازولين والبروبان والبيوتان وزيت الوقود، وذلك من خلال تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة إلى سلاسل أقصر باستخدام الحرارة وعامل حفاز مصنوع من الزيوليت.

أثناء عملية التكسير تتجمع الجزيئات الكربونية داخل تجاويف حبيبات العامل الحفاز وتغلفها على شكل طبقة من فحم الكوك، وهذا يضعف من فعالية العامل الحفاز، مما يستدعي ضرورة حرق هذه الطبقة في وعاء التنشيط ليعاد استعماله في الوحدة. (BYRUM, Z., et al., 2021)

تحتوي غازات المدخنة الناتجة عن تنشيط العامل الحفاز على حوالي 10-20% وزناً من CO_2، كما تبلغ كمية CO_2 المنبعثة من وحدة تكسير بالعامل الحفاز المائع طاقتها الإنتاجية 25 ألف ب/ي حوالي 630 طن/اليوم (200 ألف طن/السنة) (Singh, R. B., 2022)

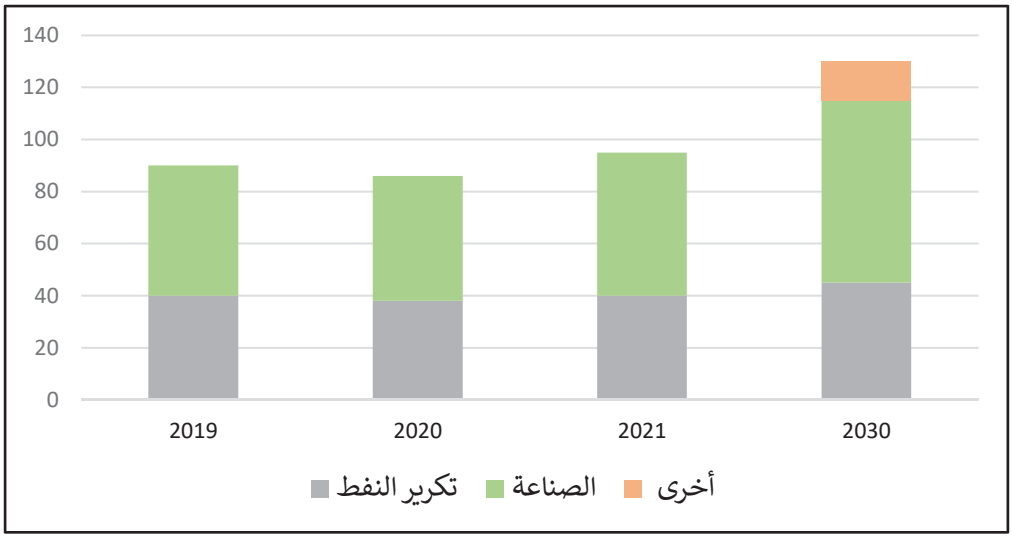
3-1-1: انبعاثات وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان

يستخدم الهيدروجين في مصافي تكرير النفط لمعالجة المنتجات البترولية وتخليصها من الكبريت والشوائب الأخرى بعملية تسمى المعالجة الهيدروجينية، ولتحسين خصائص بعض البواقي الثقيلة وتحويلها إلى منتجات خفيفة عالية القيمة من خلال تكسير السلاسل الكربونية الطويلة ورفع نسبة الهيدروجين إلى الكربون في المنتجات بعملية تسمى التكسير الهيدروجيني. (أوابك، 2017)

تحصل مصافي تكرير النفط على حوالي نصف حاجتها من الهيدروجين كمنتج ثانوي من وحدة تهذيب النافثا بالعامل الحفاز Naphtha Catalytic Reforming، أو من وحدات البتروكيماويات في حالة المصافي المتكاملة مع مجمع لإنتاج البتروكيماويات، ويتم تعويض النقص من وحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان Steam Methane Reforming, SMR باستخدام الهيدروكربونات الخفيفة كلقيم، مثل النافثا أو الغاز الناتج من عمليات التكرير في المصفاة، أو/ والغاز الطبيعي المستورد من حقول الإنتاج، أو من عمليات تغويز النفط أو الفحم.

تأتي صناعة تكرير النفط في مقدمة المنشآت الصناعية المستهلكة للهيدروجين، تتبعها عمليات إنتاج الأمونيا. يبين الشكل (1-4) تطور استهلاك الهيدروجين في العالم حسب القطاعات الرئيسية خلال الفترة 2019-2021 والتوقعات في عام 2030.

الشكل (1-4): تطور استهلاك الهيدروجين في العالم حسب القطاعات الرئيسية في الفترة 2019-2021 والتوقعات في عام 2030

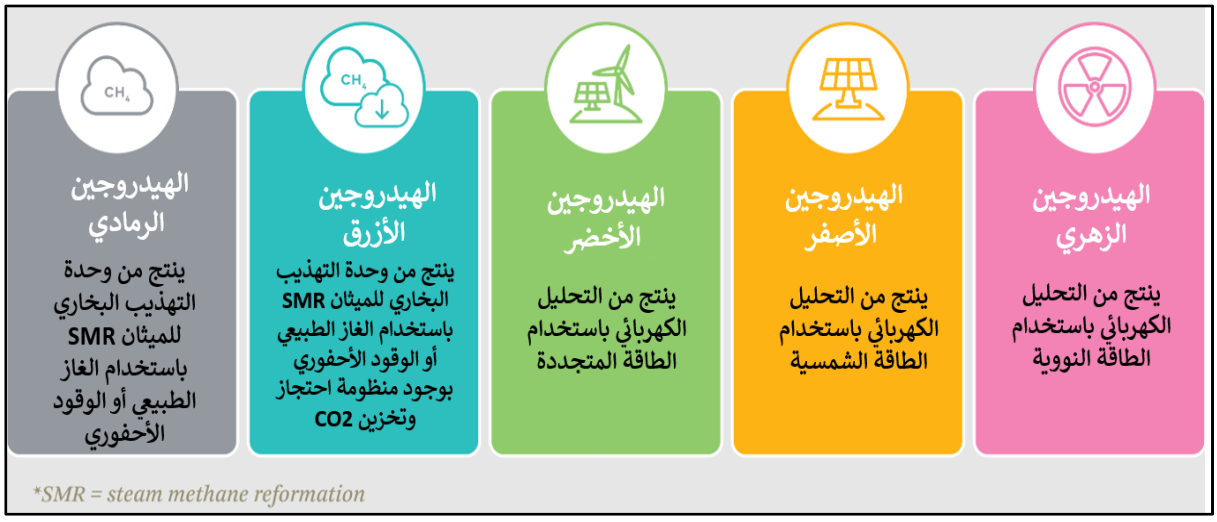


المصدر: (IEA, 2022)

تقدر كمية CO_2 المنبعثة من عملية إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري في العالم بنحو 800 مليون طن/السنة، أو ما يعادل 2% من إجمالي انبعاثات CO_2. (Carter & Hickman, 2021)

تصنف أنواع الهيدروجين تبعاً لطريقة إنتاجه، وللتمييز بينها يرمز لكل نوع بلون. فهو إما رمادي، أو أزرق، أو أخضر، أو أصفر، أو الزهري. فالهيدروجين المنتج من وحدة التهذيب البخاري للميثان SMR يرمز له الرمادي. وعندما تضاف منظومة احتجاز CO_2 ونقله وتخزينه واستخدامه إلى وحدة التهذيب البخاري للميثان فيرمز له بالهيدروجين الأزرق. أما الهيدروجين الأخضر فينتج بواسطة تحليل الماء بمحللات كهربائية Electrolyzer تعمل بطاقة كهربائية مولدة من مصادر متجددة، حيث يتم فصل الماء إلى جزيئات الهيدروجين والأوكسجين. وعندما يكون مصدر توليد الكهرباء اللازمة لتحليل الماء من الطاقة الشمسية فيسمى بالهيدروجين الأصفر. أما عندما يكون مصدر توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية فيطلق عليه اسم الهيدروجين الزهري. يبين الشكل (1-5) تصنيف أنواع الهيدروجين حسب طريقة الإنتاج.

الشكل (1-5): تصنيف أنواع الهيدروجين حسب طريقة الإنتاج

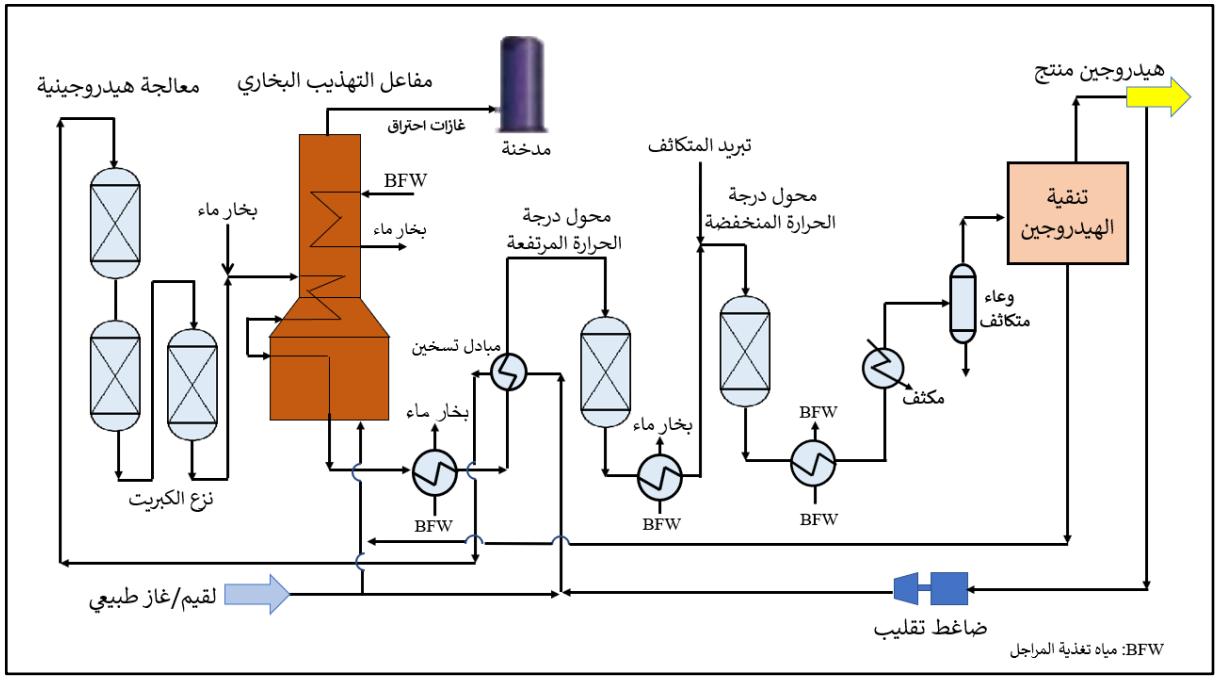


المصدر: (GORET-RANA, M., Keeley, C., 2022)

تمثل انبعاثات CO_2 الناتجة عن عملية إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR، حوالي 9% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون في المصفاة.

تتكون مراحل عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري من أربع مراحل رئيسية، يتم في المرحلة الأولى معالجة هيدروجينية أولية للقيم لتخليصه من المركبات الكبريتية، بعد ذلك يمزج الخارج من هذه المرحلة مع بخار الماء ليدخل إلى مفاعل التهذيب البخاري للميثان Steam Methane Reformer الذي يحتوي على عامل حفاز ضمن أنابيب داخل فرن للتسخين، لتعويض الحرارة اللازمة للتفاعل، حيث أن التفاعل ماص للحرارة Endothermal Reaction، وتؤخذ نواتج التفاعل التي تتكون من الهيدروجين وأكاسيد الكربون إلى وعاء لتحويل غاز أول أوكسيد الكربون CO إلى ثاني أوكسيد الكربون CO_2 مفاعل التحويل Shift reactor أما المرحلة الرابعة فهي مرحلة التنقية والتي تتكون من مفاعلات امتصاص لنزع أكاسيد الكربون المتبقية، تتبعها مرحلة تحويل الجزء المتبقي من أول وثاني أوكسيد الكربون إلى ميثان Methanation، وتصل فيها نقاوة الهيدروجين إلى 94-97%. وفي عقد الثمانينات من القرن الماضي ظهرت طريقة جديدة للتنقية باستخدام الادمصاص بأوعية الضغط المتأرجح Pressure Swing Adsorber-PSA، حيث تصل فيها نقاوة الهيدروجين المنتج إلى 99.9%. (Chlapik, et al., 2022) يبين الشكل (1-6) مخططاً مبسطاً لعملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان.

الشكل (1-6): مخطط سير عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان



المصدر: (Wagner Da SILVA, M., 2022)

1-1-4: مصادر أخرى

تمثل المصادر الأخرى حوالي 6% فقط من إجمالي انبعاثات المصفاة، وهي الانبعاثات الناتجة عن حرق الغازات في الشعلة، ووحدات استرجاع الكبريت، وتسرب الهيدروكربونات من المعدات والأنابيب.

1-2: العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات CO_2 في مصافي تكرير النفط

تتمتع كل مصفاة بخصائص تميزها عن غيرها من المصافي، مما يجعل عملية تقييم العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات الكربون أمراً في غاية الصعوبة. وفيما يلي أهم العوامل المؤثرة في كمية انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون في مصافي تكرير النفط.

1-2-1: نوع الوقود المستخدم في عمليات التسخين

ينبعث غاز CO_2 نتيجة حرق المواد الهيدروكربونية التي تتكون بشكل رئيسي من الكربون والهيدروجين، وبالتالي تتغير نسبة ثاني أوكسيد الكربون في غازات مداخن الأفران بتغير نوع الوقود،

ومحتواه من ذرات الكربون. يبين الجدول (1-2) كمية CO_2 المنبعثة من أفران ومراجل مصفاة تكرير النفط حسب نوع الوقود.

الجدول (1-2): كمية CO_2 المنبعثة من أفران ومراجل مصفاة تكرير النفط حسب نوع الوقود

نوع الوقود	المكونات	كغCO_2/كغ وقود	كغCO_2/جيجا جول
غاز المصفاة	30% هيدروجين 35% ميثان C1 35% إيثان C2	1.99	43
الغاز الطبيعي	100% ميثانC1	2.75	56
غاز بترول مسال LPG	50% بروبان C3 50% بيوتانC4	3.02	64
مقطرات وسطى	60% بارافينات 10% أوليفينات 30% عطريات	3.22	74
زيت الوقود	50% بارافينات 50% عطريات	3.26	79
فحم	90% كربون 10% هيدروجين	3.63	117

المصدر: (DNV, 2010)

1-2-2: نوع النفط الخام المكرر في المصفاة

تختلف كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة من عمليات إنتاج الوقود باختلاف نوع ومصدر النفط. فعلى سبيل المثال، تبلغ كمية الانبعاثات الناتجة عن إنتاج النفط في الولايات المتحدة الأمريكية 30 كغ مكافئ CO_2 لكل برميل من النفط، أو ما يعادل 5 غ CO_2 مكافئ لكل ميغا جول، بينما تصل الكمية المنبعثة من عمليات إنتاج النفط من الرمال الزيتية في كندا إلى 200 كيلو غرام لكل برميل نفط، أو ما يعادل 33 غ مكافئ CO_2 لكل ميغا جول.

1-2-3: مواصفات المنتجات النهائية

ساهمت التغيرات التي طرأت على متطلبات التشريعات البيئية لإنتاج مشتقات بترولية نظيفة وخالية من الشوائب في رفع كمية CO_2 المنبعثة من عمليات مصافي تكرير النفط، نتيجة لإضافة وحدات إنتاجية جديدة تستطيع من خلالها تلبية تلك المتطلبات، حيث تحتاج هذه الوحدات إلى كميات إضافية من الوقود. وقد أشارت نتائج إحدى الدراسات إلى أن تخفيض كل كيلوغرام كبريت من المشتقات البترولية ينتج عنه انبعاث 10 كغ من غاز CO_2. (أوابك، 2018)

عند تقييم كمية الانبعاثات الناتجة عن المنتجات النفطية يجب الأخذ بالاعتبار كامل الانبعاثات التي تنتج عنها خلال دورة حياة المنتج انطلاقاً من البئر وحتى الاستهلاك. فعلى سبيل المثال تبلغ كثافة الكربون الإجمالية للغازولين حوالي 89 غرام مكافئ ثاني أوكسيد الكربون لكل ميغا جول خلال الإنتاج والتكرير و1.5 غرام/ميغا جول أثناء المزج مع مكونات أخرى، وأقل من 1 غرام/ميغا جول خلال عملية النقل إلى محطة التعبئة، وحوالي 71 غرام أثناء احتراقه. (BYRUM, Z., et al., 2021)

1-2-4: التعقيد التكنولوجي لعمليات التكرير Refinery Configuration & Complexity

تقاس درجة التعقيد التكنولوجي لمصافي تكرير النفط بنوع وعدد عمليات التكرير، ونسبة طاقة العمليات التحويلية التي تحول بواقي التقطير الثقيلة إلى منتجات خفيفة عالية الجودة إلى طاقة تقطير النفط الخام. وتصنف المصافي حسب مستوى التعقيد التكنولوجي ضمن ثلاثة أنواع: تقطير، ومعالجة هيدروجينية، وتحويلية. يحتوي كل نوع من هذه الأنواع على عمليات التكرير التالية:

- **مصافي التقطير Topping**: تتكون من وحدات لتجزئة النفط الخام إلى مشتقات نفطية غير معالجة.
- **مصافي المعالجة الهيدروجينية Hydroskimming**: إضافة إلى عملية التقطير، تحتوي مصافي المعالجة الهيدروجينية على عمليات معالجة هيدروجينية، ووحدات تهذيب للنافثا لرفع الرقم الأوكتاني للغازولين.
- **المصافي التحويلية Conversion:** تحتوي على وحدات تقطير، ومعالجة هيدروجينية، وعمليات تكسير المخلفات الثقيلة لتحويلها إلى مشتقات خفيفة (تكسير حراري، تكسير

هيدروجيني، ...) كما تصنف المصافي التحويلية إلى متوسطة التحويل Medium Conversion Refinery، وتتكون عمليات التكرير فيها من وحدة تقطير نفط خام جوي وأخرى فراغي، ووحدة معالجة هيدروجينية للنافثا، ووحدة أزمرة، ووحدة تهذيب للنافثا بالعامل الحفاز Naphtha Catalytic Reformer، ووحدة معالجة هيدروجينية للكيروسين والديزل، ووحدة تكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدة تكسير هيدروجيني لزيت الغاز Gasoil Hydrocracker، وإلى مصفاة عالية التحويل Deep Conversion، وتحتوي على وحدة تفحيم مؤجل Delayed Coking، أو وحدة تكسير هيدروجيني للبواقي الثقيلة Residue Hydrocracking إضافة إلى الوحدات السابقة الذكر. (أوابك، 2017) يبين الجدول (1-3) كمية CO_2 المنبعثة من المصفاة حسب مستوى التعقيد التكنولوجي.

الجدول (1-3): كمية CO_2 المنبعثة من المصفاة حسب مستوى التعقيد التكنولوجي

نوع المصفاة	طن CO_2/ طن نفط خام
مصفاة بسيطة (معالجة هيدروجينية)	0.15 - 0.08
تكسير بالعامل الحفاز المائع + كسر اللزوجة	~ 0.2
مصفاة تكسير هيدروجيني + تفحيم	0.35 – 0.2
معالجة هيدروجينية للمتبقي الثقيل + تكسير بالعامل الحفاز للمتبقي الثقيل	0.4 – 0.3

المصدر: (DNV, 2010)

يرتبط مدى صعوبة تحويل المصفاة إلى مصفاة خالية من الانبعاثات الكربونية بمستوى التعقيد التكنولوجي للمصفاة، وكلما ارتفعت درجة التعقيد كلما كانت عملية التحويل أسهل، حيث أن المصفاة البسيطة تحتاج إلى استثمارات باهظة لتحقيق الأهداف المنشودة.

لدراسة تأثير بعض المتغيرات على نسبة انبعاثات المصفاة طورت جامعة Calgary الكندية نموذجاً يعتمد على طرق النمذجة الخطية Linear modelling، وأطلق على هذا النموذج إسم Petroleum Refinery Life-cycle Evaluation Model (PRELIM) ، وأهم المتغيرات التي تناولتها الدراسة هي هيكل عمليات التكرير في المصافي، ونوع النفط الخام المكرر، ومصادر الطاقة الكهربائية، ونوع عمليات التكرير، وغيرها. يبين الجدول (1-4) متغيرات النموذج والحالات المختارة لكل متغير.

الجدول (1-4): متغيرات النموذج والحالات المختارة لكل متغير

المتغيرات	الحالات المختارة
نوع النفط	حامضي خفيف، حامضي متوسط، ثقيل
مستوى التعقيد التكنولوجي (التحويل)	تحويل متوسط، تحويل عميق (تفحيم)، تحويل عميق (تكسير هيدروجيني)
تهذيب النافثا	نافثا تقطير، نافثا تقطير + نافثا ثقيلة
تنقية الهيدروجين في وحدة SMR	PSA
المعالجة الهيدروجينية في FCC	بعد FCC
مصدر الكهرباء	حرق الفحم، حرق الغاز الطبيعي، وقود منخفض الكربون
التوليد المشترك	الدورة المشتركة بالغاز الطبيعي، بدون توليد مشترك
الغاز الفائض	LPG
انبعاثات المنبع*	متضمن، غير متضمن

المصدر: (Singh, R. B.,, 2022)

تم اختيار نوعين من المصافي في النموذج، الأول متوسطة التحويل Medium Conversion Refinery، وتتكون عمليات التكرير فيه من وحدة تقطير نفط خام جوي وأخرى فراغي، ووحدة معالجة هيدروجينية للنافثا، ووحدة أزمرة، ووحدة تهذيب للنافثا بالعامل الحفاز Naphtha Catalytic Reformer، ووحدة معالجة هيدروجينية للكيروسين والديزل، ووحدة تكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدة تكسير هيدروجيني لزيت الغاز Gasoil Hydrocracker. أما النوع الثاني فهو مصفاة عالية التحويل Deep Conversion، وتحتوي على وحدة تفحيم مؤجل Delayed Coking، أو وحدة تكسير هيدروجيني للبواقي الثقيلة Residue Hydrocracking إضافة إلى الوحدات السابقة الذكر، إلا أن النموذج لم يتضمن وحدات إنتاج البتروكيماويات، واقتصر على إنتاج أنواع الوقود النفطي.

تم توزيع معايير القياس المذكورة في الجدول (1-4)، ومستوى التحويل بحيث تمثل أحد عشر حالة، وتغطي أكثر أنواع المصافي العاملة في العالم. يبين الجدول (1-5) استهلاك الطاقة وكمية انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في المصفاة في الحالات المختارة. (Singh, R. B., 2022)

* انبعاثات المنبع: Upstream Emissions كمية CO_2 المنبعثة أثناء مراحل إنتاج ومعالجة ونقل النفط الخام إلى حدود مصفاة التكرير.

مناقشة نتائج النمذجة:

يلاحظ من الجدول (1-5) أن كمية انبعاثات CO_2 في الحالات الأحد عشر تتراوح ضمن المجال 30-90 كغ CO_2/برميل نفط مكرر، وفيما يلي أهم الاستنتاجات التي يمكن استخلاصها من الجدول:

- ترتفع كمية انبعاثات CO_2 عند التحول من المصفاة المتوسطة التعقيد إلى عالية التعقيد بمعدل 40%، على الرغم من تكرير نفس النفط الخام، كما تزداد بمعدل 20% أخرى بإضافة وحدة تكسير هيدروجيني للبواقي الثقيلة. **(الحالات 2-4)**
- بالنسبة للمصافي المتماثلة العالية التحويل التي تحتوي على وحدة تفحيم مؤجل، تزداد كمية انبعاثات CO_2 بمعدل 25% عند تكرير نفط خام أثقل. **(الحالتان 3، و5)**
- في المصافي العالية التحويل، في حال وجود وحدة تكسير هيدروجيني للبواقي الثقيلة مع وحدة التفحيم تزداد كمية CO_2 المنبعثة بمعدل 50% مقارنة بالمصافي التي تحتوي على وحدة تفحيم مؤجل فقط. **(الحالتان 5، و6)**
- بالنسبة للمصافي المتماثلة من حيث نوع النفط الخام وهيكل عمليات التكرير تنخفض كمية انبعاثات CO_2 بمعدل 8% عند استبدال محطة توليد الطاقة الكهربائية بالدورة المشتركة العاملة على الغاز الطبيعي NGCC* أو محطة توليد مشترك Co-generation تعمل على الغاز الطبيعي بمصدر طاقة كهربائية منخفض الكربون Low-carbon power source **(الحالات 5، و7، و8)**
- بالنسبة للمصافي المتماثلة من حيث نوع النفط الخام وهيكل عمليات التكرير تنخفض كمية انبعاثات CO_2 بمعدل 14% عند استبدال محطة توليد الطاقة الكهربائية العاملة على الفحم إلى مصدر طاقة كهربائية منخفض الكربون Low-carbon power source. **(الحالتان 9، و11)**
- تشكل انبعاثات CO_2 الناتجة عن عملية إنتاج ومعالجة ونقل الغاز الطبيعي المستورد حوالي 10% من إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة.

* Natural Gas Combined Cycle

الجدول (1-5): استهلاك الطاقة وكمية انبعاثات CO_2 في المصفاة في الحالات المختارة

المتغيرات	الوحدة	حالة 1	حالة 2	حالة 3	حالة 4	حالة 5	حالة 6	حالة 7	حالة 8	حالة 9	حالة 10	حالة 11
نوع النفط		خفيف حامض	متوسط حامض	متوسط حامض	متوسط حامض	ثقيل	ثقيل	ثقيل	ثقيل	ثقيل	ثقيل	ثقيل
الكثافة API		40	28.5	28.5	28.5	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
الكبريت في النفط	%	0.88	2.4	2.4	2.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
مستوى التحويل		متوسط	متوسط	عميق (تفحيم)	عميق (تكسير هيدروجيني)	عميق (تفحيم)	عميق (تكسير هيدروجيني)	عميق (تفحيم)	عميق (تفحيم)	عميق (تكسير هيدروجيني)	عميق (تكسير هيدروجيني)	عميق (تكسير هيدروجيني)
انبعاثات المنبع		متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	متضمن	غير متضمن	متضمن
مصدر الكهرباء		NGCC [1]	NGCC	NGCC	NGCC	NGCC	NGCC	NGCC	منخفض الكربون	منخفض الكربون	NGCC	حرق الفحم
التوليد المشترك		CHP [2]	CHP	CHP	CHP	CHP	CHP	لا	لا	لا	CHP	لا
الغازولين	% وزناً	40.5	28.8	40.1	37.4	40.6	34	40.6	40.6	34	34	34
وقود الطيران	% وزناً	22.4	18.6	19		18.9	6.2	6.1	6.2	6.1	6.1	6.1
ديزل منخفض الكبريت	% وزناً	19.8	18.2	24	30.4	25.1	36.5	25.1	25.1	36.5	36.5	36.5
فحم	% وزناً	0	0	9.8	0	17.5	0	17.5	17.5	0	0	0
تكسير هيدروجيني متبقي التقطير	% وزناً	0	0	0	7.6	0	15.5	0	0	15.5	15.5	15.5
سائل متبقي ثقيل	% وزناً	15.4	32.6	3.1	2.6	4.1	2.8	4.1	4.1	2.8	2.8	2.8
كبريت	% وزناً	0.4	0.8	1.5	1.6	3.1	3.4	3.1	3.1	3.4	3.4	3.4
غاز البترول المسال	% وزناً	1.4	0.9	2.5	1.5	3.4	1.6	3.4	3.4	1.6	1.6	1.6
استهلاك الطاقة: كهرباء	ميغا جول/برميل	3.2	2.8	3.6	3.4	5.3	5	26.2	26.2	33.1	5	33.1
استهلاك الطاقة: غاز المصفاة	ميغا جول/برميل	99.3	24.8	176.4	199.3	258	329	258	258	340.2	329	366.6
استهلاك الطاقة: غاز طبيعي	ميغا جول/برميل	241	209.1	225.2	188.8	190.4	104.2	152.9	152.9	42.7	104.2	42.7
استهلاك الطاقة: هيدروجين SMR	ميغا جول/برميل	67	83.3	139.4	311.6	221.6	675.9	220.2	2020.2	671.3	675.9	671.7
استهلاك الطاقة: هيدروجين CNR	ميغا جول/برميل	67.4	41.4	43.5	42.1	13.5	12.8	135	135	12.8	12.8	12.8
إجمالي استهلاك الطاقة: العمليات	ميغا جول/برميل	503.1	437.8	626.3	777.5	744.6	1155.8	726.9	726.9	1165.6	1139.6	1239.6
CO_2 الكهرباء	كغ/برميل	0.5	0.4	0.6	0.5	0.8	0.8	4	0.2	0.3	0	10.9
CO_2 تسخين العمليات	كغ/برميل	21.2	17.9	25	24.2	27.9	27.3	23.9	23.9	21.9	26.2	21.9
CO_2 توليد البخار	كغ/برميل	1.5	1.1	1.2	0.8	0.7	0.7-	2.1	2.1	1.1	0.7-	1.2
CO_2 إنتاج الهيدروجين SMR	كغ/برميل	4.6	5.8	9.6	21.4	15.2	46.5	15.3	15	45.9	39.2	47.5
CO_2 حرق الفحم في FCC	كغ/برميل	3	3.1	4.5	3.8	6.6	4.6	6.6	6.6	4.6	4.6	4.6
إجمالي عمليات المصفاة	كغ/برميل	31.7	29.3	41.8	51.8	52.8	80.2	53.5	49.4	75.5	71.0	87.8

(1): NGCC محطة توليد الطاقة الكهربائية بالدورة المشتركة العاملة على الغاز الطبيعي

(2):CHP : محطة التوليد المشترك للكهرباء وبخار الماء.

المصدر: (Singh, R. B., 2022)

- تشكل انبعاثات CO_2 الناتجة عن وحدات إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR ما نسبته 15-60% من إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة، وهي نسبة أعلى من المصافي التي تحتوي على وحدة تكسير هيدروجيني للبواقي الثقيلة.
- تشكل انبعاثات CO_2 المنطلقة من وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC نسبة 6-12% من إجمالي انبعاثات المصفاة، وتعتبر ثاني أكبر مصدر لانبعاثات الكربون في مصفاة تكرير النفط بعد أفران تسخين العمليات.

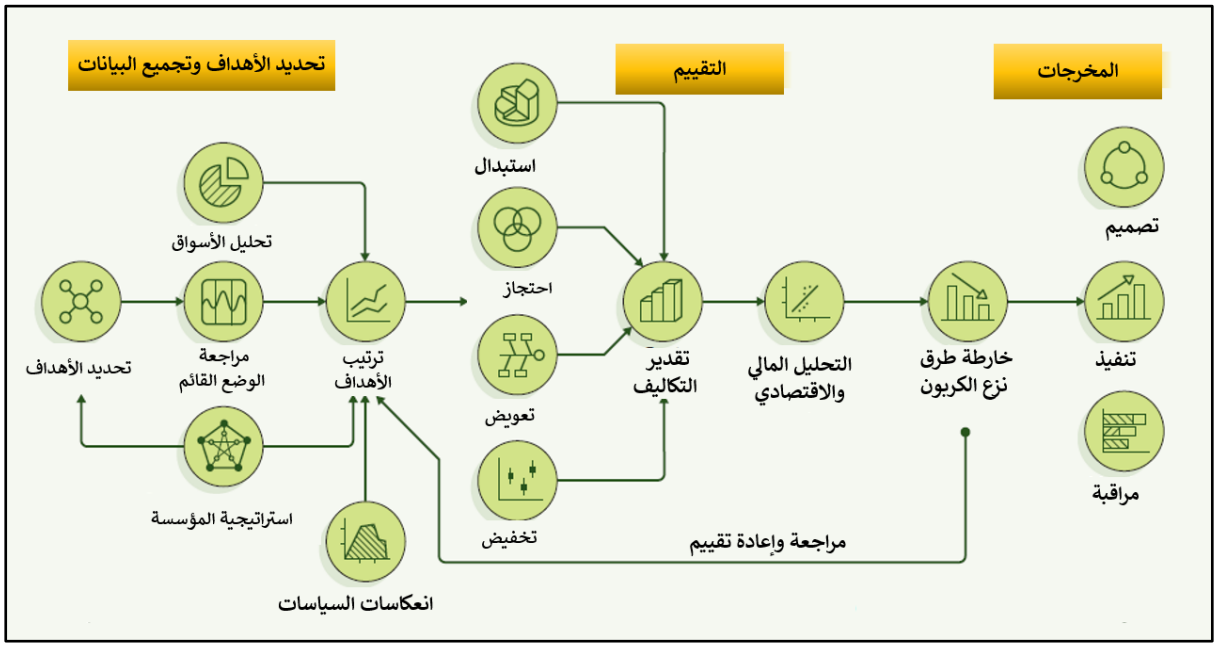
3-1: خطة نزع الكربون في مصافي تكرير النفط

تهدف خطة نزع الكربون في مصافي تكرير النفط إلى خفض انبعاثات الكربون إلى الصفر بحلول عام 2050، وذلك من خلال ثلاث مراحل رئيسية، هي إعداد الأهداف، والتقييم، ثم التنفيذ. يبين الشكل (7-1) مراحل خطة نزع الكربون في مصفاة تكرير النفط.

قبل البدء بتنفيذ عملية نزع الكربون في مصفاة تكرير النفط يجب تقييم الفرص والإجراءات الممكنة والجدوى الاقتصادية لكل إجراء من الإجراءات المختارة، والجدول الزمني المطلوب للتنفيذ، وذلك من خلال الخطوات التالية: (Baars & Parvez, 2023)

- تقييم الوضع الحالي للمصفاة، من حيث نوع المواد المتجددة المراد تكريرها كبديل عن النفط الخام، وطرق تأمينها وعمليات المعالجة اللازمة لها قبل إدخالها إلى وحدات المصفاة.
- إعداد جداول تظهر إجراءات نزع CO_2 الممكن تطبيقها في المصفاة، والتكاليف المتوقعة لكل إجراء، مع الأخذ بالاعتبار النتائج المتوقعة من دمج أكثر من إجراء في الموقع الواحد.
- إعداد جدول زمني يوضح مراحل تنفيذ الإجراءات والزمن اللازم لكل خطوة والفترة الزمنية المتوقعة لكل إجراء من إجراءات الخطة.
- إعداد دراسة اقتصادية لخارطة الطريق، تتضمن كمية CO_2 المتوقع تخفيضها، وتحليل التكاليف الاجمالية والعوائد المحتملة والضرائب المترتبة.
- إعداد قائمة بالخيارات الأخرى الممكن تنفيذها كبديل لكل خيار من الخيارات، والتكاليف المحتملة من كل خيار.

الشكل (1-7): مراحل خطة نزع الكربون في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Carter, D., 2021)

الفصل الثاني

تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط

مقدمة

تصنف تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط ضمن مجموعات رئيسية، هي احتجاز وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون، واستبدال الوقود الأحفوري المستخدم للتسخين وتوليد الطاقة الكهربائية بوقود خال من الكربون، واستبدال النفط الخام المكرر بمواد متجددة لإنتاج وقود منخفض الكربون، وترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها. (Gosse, A., 2021) يلخص الجدول (2-1) تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط.

الجدول (2-1): تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط

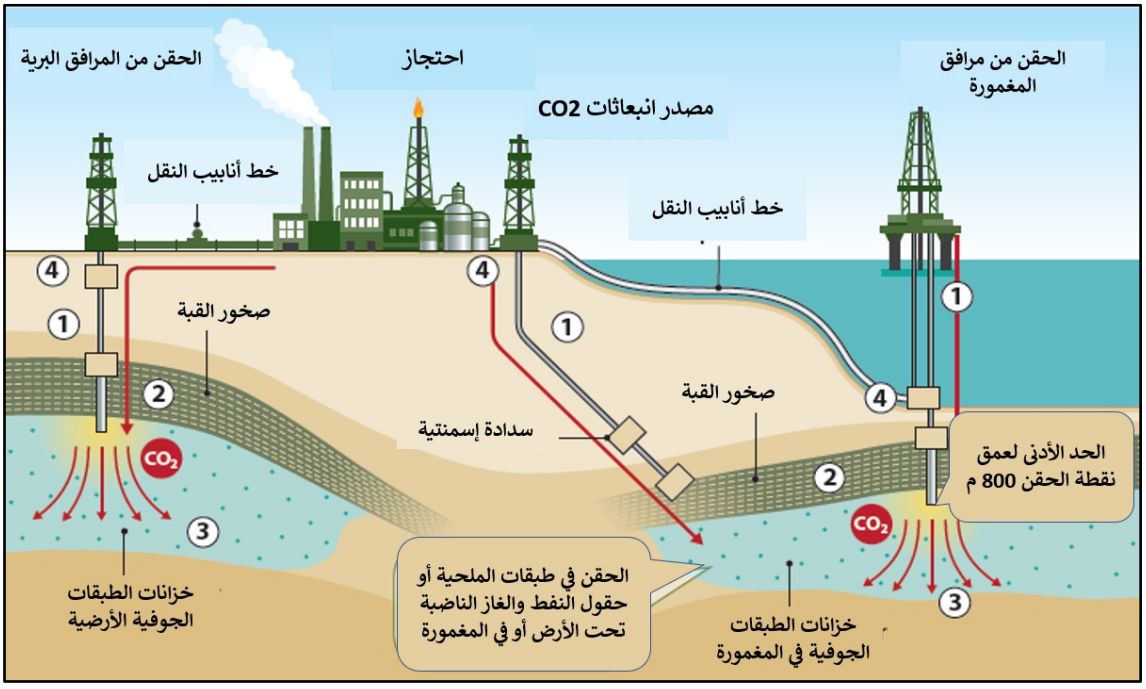
المجموعات	التقنيات	أماكن التطبيق
احتجاز الكربون	احتجاز وتخزين الكربون	• أفران العمليات • وحدات إنتاج الهيدروجين • التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC • التغويز
استبدال الوقود الأحفوري	التسخين الكهربائي	• أفران العمليات الكهربائية • مراجل توليد البخار الكهربائية
	الهيدروجين الأزرق والأخضر	
استبدال النفط الخام بمواد متجددة	تكرير زيوت التحلل الحراري الحيوية	• وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع • وحدات المعالجة الهيدروجينية • وحدات تقطير النفط الخام
	الهيدروجين الأخضر والأزرق كلقيم	• وحدات المعالجة الهيدروجينية • وحدات التكسير الهيدروجيني
إنتاج وقود منخفض الكربون	وحدة مستقلة لإنتاج الوقود الحيوي من زيوت التحلل الحراري	• وحدات المعالجة الهيدروجينية • وحدات التكسير الهيدروجيني
	تغويز الكتلة الحيوية وفيشر- تروبش	• وحدة تغويز لإنتاج الوقود الحيوي
ترشيد استهلاك الطاقة	ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها	• عمليات التكرير والوحدات المساندة
	استخدام الطاقة العادمة	

المصدر: Oliveira, C., & Schure, K., 2020

1-2: احتجاز وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون CCUS

تعتبر تقنية احتجاز وتخزين واستعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون CCUS من الحلول الناجعة لخفض الانبعاثات الناتجة عن مصافي تكرير النفط، حيث ينقل CO_2 المحتجز إلى أماكن مناسبة لحقنه في طبقات آبار النفط والغاز الناضبة أو طبقات المياه الجوفية المالحة. يبين الشكل (2-1) احتجاز وتخزين CO_2 في آبار النفط والغاز الناضبة والطبقات الجوفية المالحة.

الشكل (2-1): احتجاز وتخزين CO_2 في آبار النفط والغاز الناضبة والطبقات الجوفية المالحة



(1): الحقن: ضخ CO_2 المضغوط إلى الطبقات الجوفية عبر البئر.

(2) الاحتواء: القبة الصخرية الكتيمة تمنع تسرب CO_2 إلى الجو.

(3) الانحباس: يتحرك CO_2 داخل الطبقات الخازنة وينحل في المياه المالحة، أو يمتص في المسامات الصخرية الدقيقة.

(4) السدادة: بعد انتهاء عملية الحقن يتم سد فوهة البئر بسدادة إسمنتية لمنع التسرب.

المصدر: (Hemsley, M., 2022)

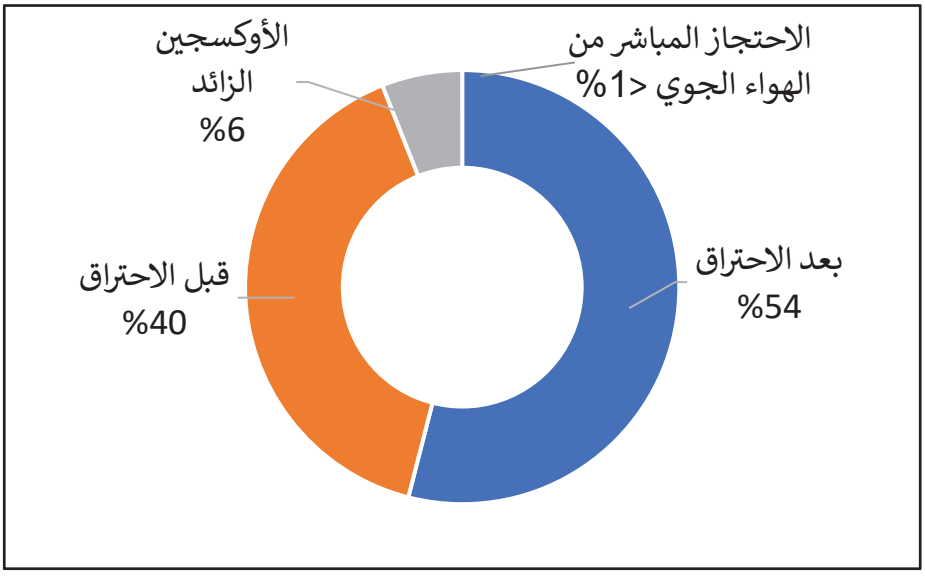
يتركز تطبيق تقنية احتجاز CO_2 بشكل رئيسي في أفران عمليات التكرير، ومحطات توليد بخار الماء والطاقة الكهربائية، ووحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات إنتاج الهيدروجين. (Oliveira, C., & Schure, K., 2020)

تصنف طرق احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 في مصافي تكرير النفط ضمن ثلاث أنواع على النحو التالي:(Jha, A., et al., 2021p. 31-37)

- طريقة احتجاز CO_2 بعد الاحتراق Post-combustion، التي تتضمن فصل CO_2 من غازات احتراق الوقود الخارجة من مدخنة الفرن.
- طريقة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق Pre-combustion، التي تعتمد على تحويل الوقود الثقيل إلى وقود غازي يمكن فصل CO_2 منه بالامتصاص قبل استخدامه كوقود في الأفران.
- طريقة حرق الوقود باستخدام الأوكسجين النقي بدلاً من الهواء الجوي Oxyfuel process وتسمى أيضاً بطريقة الأكسدة الجزئية Partial Oxidation، وذلك بهدف الحصول على غازات احتراق الوقود على شكل غاز CO_2 نقي.

توجد تقنية أخرى حديثة تعتمد على احتجاز CO_2 من الهواء الجوي تسمى الاحتجاز المباشر من الهواء الجوي Direct Air Capture، إلا أن تطبيقها لا يزال محدوداً مقارنة بطرق الاحتجاز الأخرى، حيث لم تتجاوز 1% من إجمالي طرق الاحتجاز حتى عام 2020، بينما وصلت نسبة طريقة الاحتجاز بعد الاحتراق إلى 54% وطريقة الاحتجاز قبل الاحتراق إلى 40% وطريقة الحرق بالأوكسجين الزائد 6% فقط. يبين الشكل (2-2) نسب تطبيق طرق احتجاز الكربون في العالم.

الشكل (2-2): نسب تطبيق طرق احتجاز الكربون في العالم



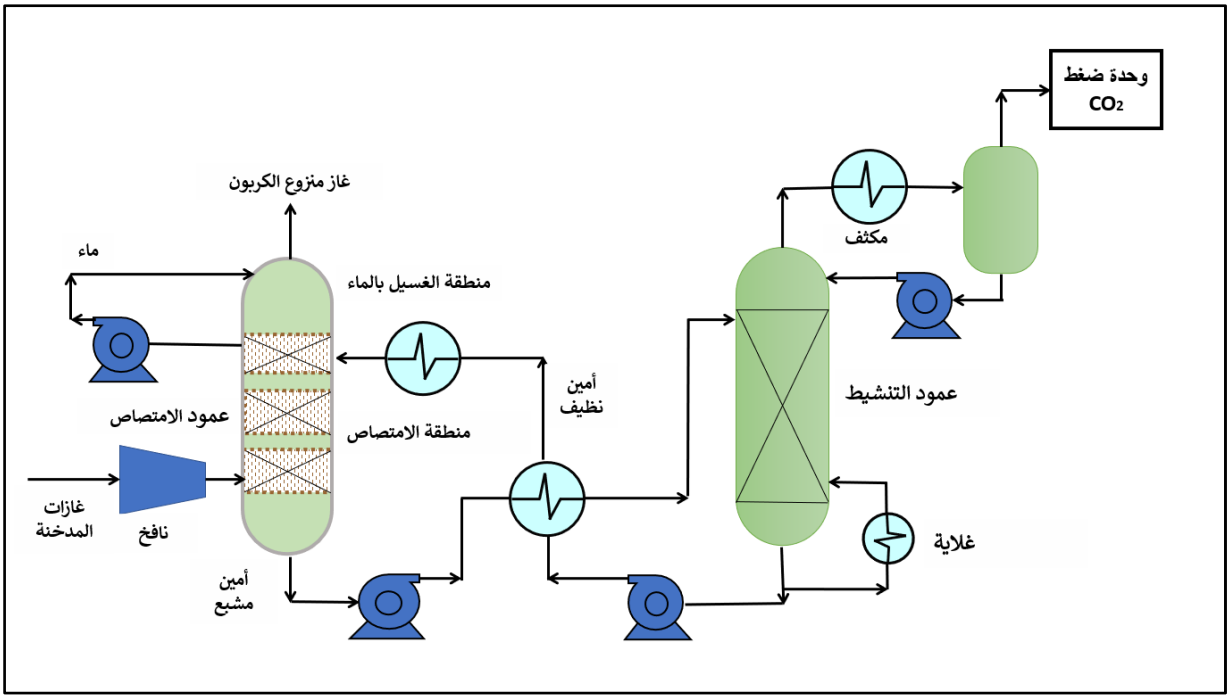
المصدر: (Pigeaux, et al., 2022)

1-1-2: منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق Post- combustion

يعتمد مبدأ عمل تقنية احتجاز CO_2 بعد الاحتراق على معالجة الغازات الخارجة من مدخنة الفرن، حيث تبرد هذه الغازات وتضغط لتحول إلى عمود الامتصاص بالمذيب Solvent Absorption. بعد ذلك يسخن المذيب المشبع لنزع غاز CO_2 منه في عمود النزع Stripper ثم يعاد المذيب المنشط إلى عمود الامتصاص.

يستخدم محلول أحادي إيثانول أمين Mono Ethanol Amine لامتصاص CO_2 من غازات المدخنة. يبين الشكل (2-3) منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق.(Liu, N., 2021)

الشكل (2-3): منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق



المصدر: Schenk, M., & Middleton, J., 2021

تتميز طريقة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق بالمرونة بحيث يمكن تطبيقها في أي وحدة قائمة في المصفاة تستخدم الوقود في الأفران، إلا أن لهذه الطريقة بعض السلبيات، من أهمها:(Jha, A., et al., 2021)

- ضعف الجدوى الاقتصادية عندما يكون تركيز CO_2 في غازات المدخنة أدنى من 10% حجماً. وتقدر تكلفة هذه الطريقة بحوالي 31-47 يورو لكل طن CO_2، حيث تتباين قيمة تركيز CO_2 في

غازات مداخن عمليات المصفاة. يبين الجدول (2-2) تكلفة منظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بعد الاحتراق حسب تركيز CO_2 في غازات المدخنة.

الجدول (2-2): تكلفة منظومة الاحتجاز بعد الاحتراق حسب تركيز CO_2 في غازات المدخنة

	تركيز CO_2 منخفض (5% حجماً)	تركيز CO_2 متوسط (10-8% حجماً)	تركيز CO_2 عالي (18-10 % حجماً)
تكاليف استثمارية يورو 2017/طن CO_2 محتجز	[1] 45	[2]-[3] 31 39	[4]-[5]28 31
تكاليف تشغيل ثابتة [6] يورو 2017/طن CO_2 محتجز/السنة	[1] 19	[2]-[3]15 18	[4]-[5]14 15
استهلاك بخار الماء جيجا جول/طن CO_2 محتجز	2.5	2.5	2.5
استهلاك الكهرباء كيلووات ساعة/طن CO_2 محتجز	183	185-149	166-162
CO_2 موفر/CO_2 محتجز [7]	0.65	0.67	0.67

(1) الطاقة الإسمية للاحتجاز 750 ألف طن CO_2/السنة

(2) الطاقة الإسمية للاحتجاز 697 ألف طن CO_2/السنة

(3) الطاقة الإسمية للاحتجاز 765 ألف طن CO_2/السنة

(4) الطاقة الإسمية للاحتجاز 2777 ألف طن CO_2/السنة

(5) الطاقة الإسمية للاحتجاز 1681 ألف طن CO_2/السنة

(6) بدون تكاليف الكهرباء والوقود

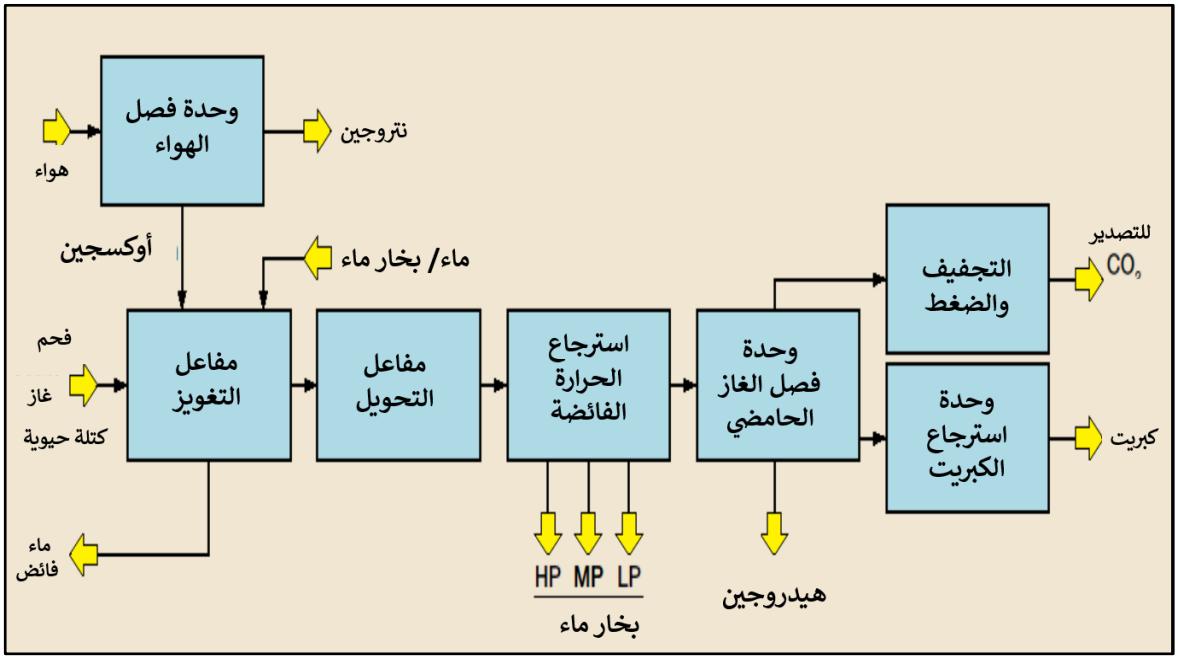
(7) باعتبار معامل الانبعاث 0.183 كغ CO_2/كيلووات ساعة للكهرباء، و56.6 كغ CO_2/جيجا جول للغاز الطبيعي.

2-1-2: طريقة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق Pre-combustion Capture

يعتمد مبدأ طريقة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق على تغيير خصائص الوقود المستخدم في الأفران، من خلال تحويله إلى غاز غني بالهيدروجين، أو ما يسمى بتقنية التحويل إلى غاز (التغويز Gasification)، حيث يتم تحويل الوقود الثقيل، كالفحم أو المخلفات الثقيلة لعمليات التقطير، إلى غاز اصطناعي (تخليقي) Syngas يتكون من CO+H، ثم يحول غاز أول أوكسيد الكربون CO إلى ثاني أوكسيد الكربون CO_2 الذي يتم فصله للحصول على وقود غني بالهيدروجين.

يفصل غاز CO_2 من المزيج الغازي بطريقة الامتصاص بالمذيب الذي يتم تنشيطه لإعادة استخدامه، بينما يسحب CO_2 المفصول إلى وحدة التجفيف لسحب الرطوبة منه ثم يضغط وينقل إلى مستودعات التخزين. كما يستفاد من الحرارة الفائضة من عملية التغويز في توليد بخار الماء للاستفادة منه في توليد الطاقة الكهربائية أو للتسخين في عمليات المصفاة المختلفة. يبين الشكل (2-4) مخطط منظومة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق. كما يبين الشكل (2-5) مراحل عملية تجفيف وضغط CO_2 الخارج من وحدة احتجاز الكربون.

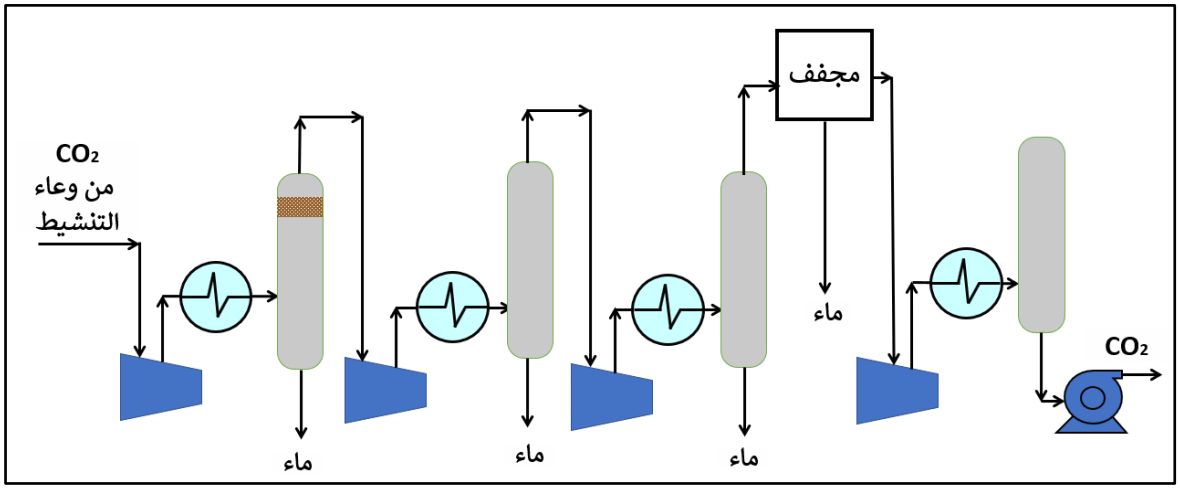
الشكل (2-4): مخطط منظومة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق



المصدر: (Pigeaux, et al., 2022)

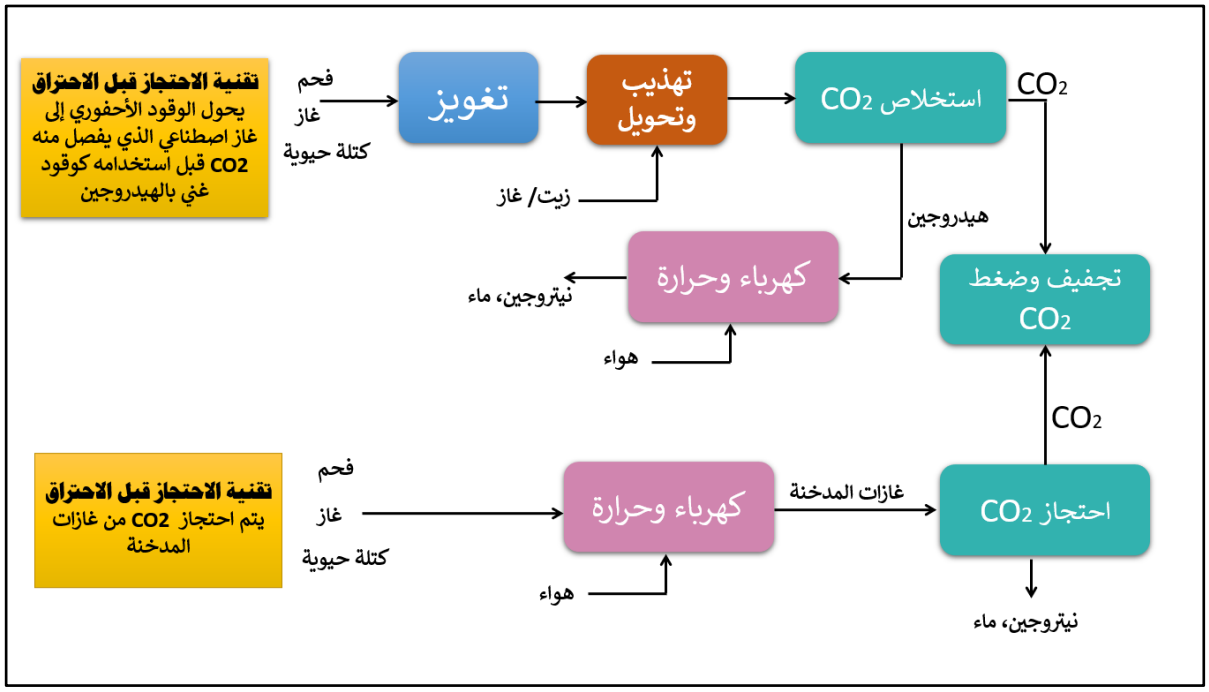
تتميز طريقة احتجاز CO_2 قبل الاحتراق بسهولة تطبيقها، حيث يمكن تشييدها في أي مكان ضمن موقع المصفاة، ولا تحتاج إلى تركيب معدات قريبة من الأفران، ويمكن وصل الغاز المنتج إلى شبكة الوقود الغازي الموزعة في كافة وحدات المصفاة. يبين الشكل (2-6) مقارنة بين تقنيتي احتجاز CO_2 قبل وبعد الاحتراق.

الشكل (2-5): مراحل عملية تجفيف وضغط CO_2 الخارج من وحدة احتجاز الكربون



المصدر: (Singh, R. B., 2022)

الشكل (2-6): مقارنة بين تقنيتي احتجاز CO_2 قبل وبعد الاحتراق



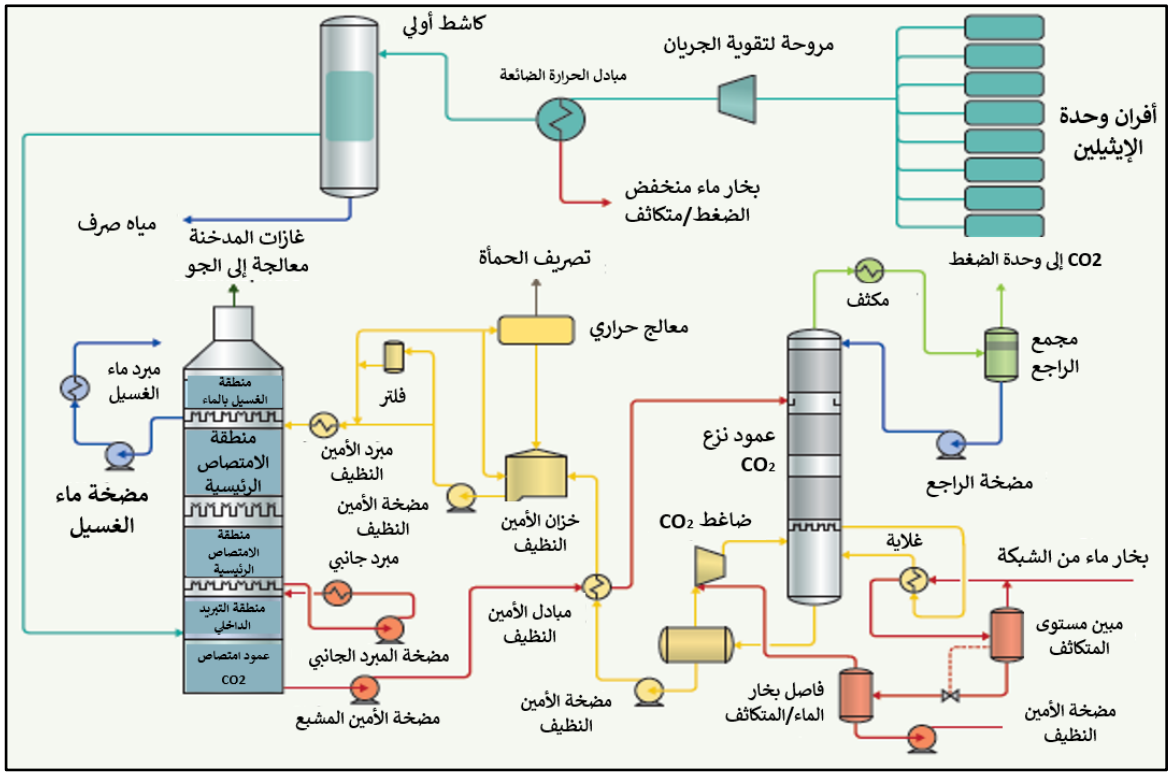
المصدر: (Pigeaux, M., et al., 2022)

2-1-3: تركيب منظومة احتجاز الكربون في أفران العمليات

تتكون منظومة احتجاز CO_2 التي تركب على مداخن أفران عمليات التكرير من مجاري للغاز، ومبردات، وعمود امتصاص، ومنشط، وضاغط لغاز CO_2، ومجفف. ولتفادي التكاليف الباهظة لتركيب

مجاري غازات المدخنة يسعى المصممون إلى أن يكون موقع منظومة الاحتجاز قريباً من المدخنة، إلا أن ذلك لا يكون متاحاً دائماً، نظراً لحاجة المنظومة إلى مساحة كبيرة قد لا تتوفر في المصافي القائمة. يبين الشكل (2-7) مخطط عملية احتجاز CO_2 من غازات مداخن أفران وحدة الإيثيلين.

الشكل (2-7): مخطط عملية احتجاز CO_2 من غازات مداخن أفران وحدة الإيثيلين



المصدر: (Martin, M., 2021)

تتميز غازات مداخن أفران عمليات التكرير في المصفاة بمعدل تدفق حجمي مرتفع عند الضغط الجوي. وعلى الرغم من أن لغاز CO_2 ضغط جزئي منخفض، إلا أن التجربة العملية أثبتت إمكانية الحصول على مستويات عالية من احتجاز غاز CO_2 باستخدام محاليل الأمين، مثل أحادي إيثانول أمين Mono Ethanol Amine MEA نظراً لما تمتلكه هذه المذيبات من خصائص حركية سريعة، وتفاعلية كيميائية نشيطة.

عند تطبيق تقنية احتجاز وتخزين واستعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون CCUS في أفران العمليات يواجه المشغلون صعوبة تجميع مصادر الانبعاثات نظراً لتوزعها في مساحة واسعة ووحدات متفرقة في

المصفاة، فضلاً عن كثرة عدد هذه المصادر وتباين تركيز غاز CO_2 فيها. يبين الجدول (2-3) تركيز CO_2 في غازات مداخن وحدات مصفاة تكرير النفط.

الجدول (2-3): تركيز CO_2 في غازات مداخن وحدات مصفاة تكرير النفط

العملية	تركيز CO_2 في غازات المدخنة (% حجماً)
تقطير جوي	11.3
تقطير فراغي	11.3
كسر اللزوجة/تكسير حراري	8.1
تهذيب	8.1
معالجة هيدروجينية	8.1
تكسير بالعامل الحفاز المائع	16.6
إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR	24.2
تفحيم مؤجل	8.1
تكسير هيدروجيني	8.1
نزع الأسفلتينات بالمذيب SDA	8.1
عنفات غازية	3,2
مراجل بخارية	8.1

المصدر: (Singh, R. B., 2022)

2-1-4: احتجاز الكربون في وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع

يوجد طريقتان لاحتجاز CO_2 المنبعث من وحدة FCC بعد الاحتراق، الأولى طريقة الاحتجاز بامتصاص CO_2 بالمذيب، والثانية طريقة الاحتراق بوجود الأوكسجين Oxy-combustion. أما طريقة الامتصاص بالمذيب فهي مماثلة من حيث المبدأ للمنظومة المستخدمة في أفران عمليات التكرير، ووحدة التهذيب البخاري للنافثا. الفرق الرئيسي بينهما هو الحاجة إلى معالجة غازات المدخنة قبل إدخالها إلى منظومة الامتصاص بالمذيب نظراً لاحتوائها على نسب من المركبات الأخرى التي تفوق الحد المسموح للتعامل مع محاليل الأمين، مثل الجسيمات الصلبة Particulates، وأكاسيد الكبريت SOx، وأكاسيد النتروجين NOx.

تبلغ تكلفة احتجاز CO_2 في وحدة التكسير بالعامل الحفاز بطريقة الامتصاص بالمذيب حوالي 50 دولار أمريكي للطن، بينما تصل تكلفة احتجاز الطن الواحد من CO_2 مع عمليات الضغط والنقل والتخزين إلى حوالي 70-120 دولار أمريكي. (BYRUM, Z., et al., 2021)

كما تعتبر طريقة الحرق بوجود الأوكسجين أكثر تفضيلاً نظراً لسهولة تركيبها في الوحدات القائمة، ولا تحتاج إلى مساحات واسعة كتلك التي تحتاجها طريقة الامتصاص بمحاليل الأمين التي تتطلب معالجة غازات الاحتراق لخفض المركبات الأخرى إلى الحدود المقبولة قبل إدخالها إلى منظومة الامتصاص. (Singh, R. B., 2022)

2-1-5: تطبيق تقنية احتجاز CO_2 في إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان

ينتج CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان من ثلاثة مصادر هي: غازات مدخنة مفاعل التهذيب، والغاز العادم من وحدة التنقية بطريقة الادمصاص تحت الضغط المتأرجح، ومن عملية تحويل الغاز الاصطناعي Shifted syngas (Ko & SIVASUBRAMANIAN, 2022)

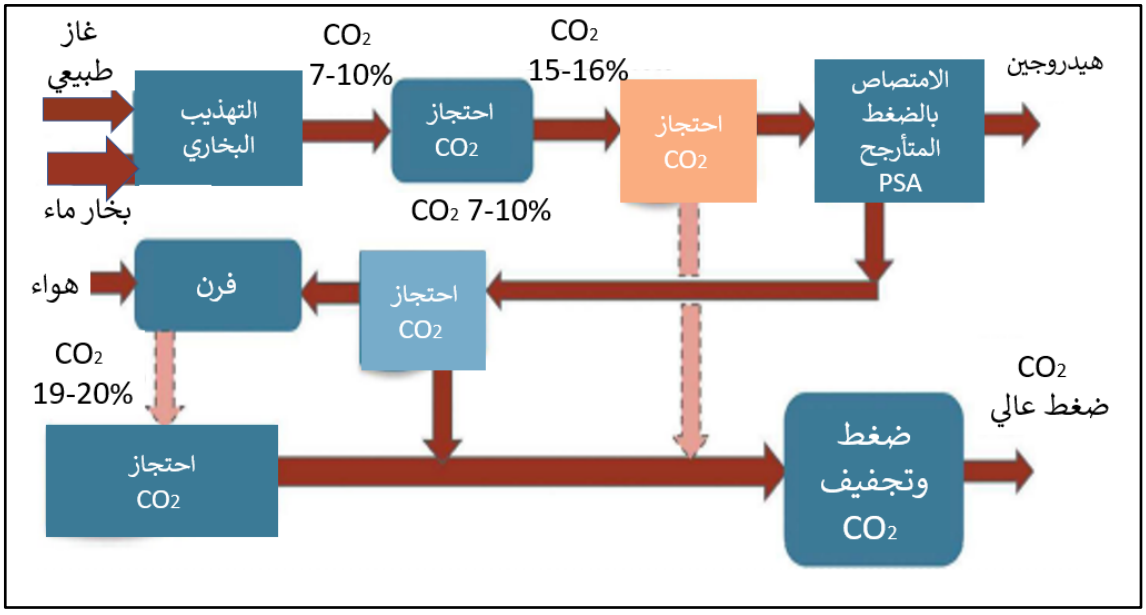
يبين الجدول (2-4) خصائص ومصادر احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR طاقتها 70 ألف $م^3$ قياسي/الساعة. كما يبين الشكل (2-8) خيارات احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR.

الجدول (2-4): خصائص ومصادر احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR

المصدر	الضغط، بار	درجة الحرارة، °م	CO_2، مول%	CO_2، طن/اليوم
مدخل التنقية PSA	26	35	16	870
الغاز العادم من PSA	1.3	30	50	870
غاز المدخنة	0	130	20	1450

المصدر: (Singh, R. B.,2022)

الشكل (2-8): خيارات احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR



المصدر: (Singh, R. B.,, 2022)

كما يمكن خفض انبعاثات CO_2 الناتجة عن استخدام الهيدروجين في مصفاة تكرير النفط من خلال تطبيق التقنيات التالية: (Carter & Hickman, 2021)

- إنتاج الهيدروجين الأزرق وذلك بتطبيق تقنية احتجاز وخزن CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين الرمادي بطريقة التهذيب البخاري (تبلغ كمية CO_2 المحتجزة نحو 1.2-1.5 كغ مكافئ لكل كغ هيدروجين منتج، بكفاءة احتجاز ضمن المجال 90-98%).
- استخدام لقائم حيوية لإنتاج الهيدروجين، حيث تبلغ كمية الانبعاثات (1-3.3 كغ مكافئ CO_2/كلغ H_2)
- التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء من مصادر متجددة أو ما يسمى بتقنية إنتاج الهيدروجين الأخضر، وتبلغ كمية الانبعاثات (0.3-1 كغ مكافئ CO_2/ كلغ H_2)

كافة الخيارات المذكورة ينتج عنها انبعاثات CO_2 أقل من إنتاج الهيدروجين الرمادي التي تصل إلى 9-11 كغ CO_2 مكافئ لكل كغ هيدروجين. يبين الجدول (2-5) مقارنة بين انبعاثات الكربون وتكاليف الإنشاء والتشغيل لتقنيات إنتاج أنواع الهيدروجين.

الجدول (2-5): مقارنة بين انبعاثات الكربون وتكاليف الإنشاء والتشغيل لتقنيات إنتاج الهيدروجين

الطريقة	انبعاثات CO_2 كلغ/كلغ H_2	تكاليف الإنشاء	تكاليف التشغيل [1]
الهيدروجين الأزرق	1.5-1.2	145-90 يورو/طن CO2 محتجز	15-10 يورو/طن CO2 محتجز
الهيدروجين الأخضر	1-0.3	3193 يورو/طن H_2	159 يورو/طن H_2
إنتاج الهيدروجين الأخضر من الكتلة الحيوية	3.3-1	3344 يورو/طن H_2	17 يورو/طن H_2
الهيدروجين الرمادي	11-9	500-1300 يورو/طن H_2	40-20 يورو/الطن H_2

(1): تكاليف التشغيل تتضمن اليد العاملة والصيانة بدون تكاليف اللقيم والطاقة.

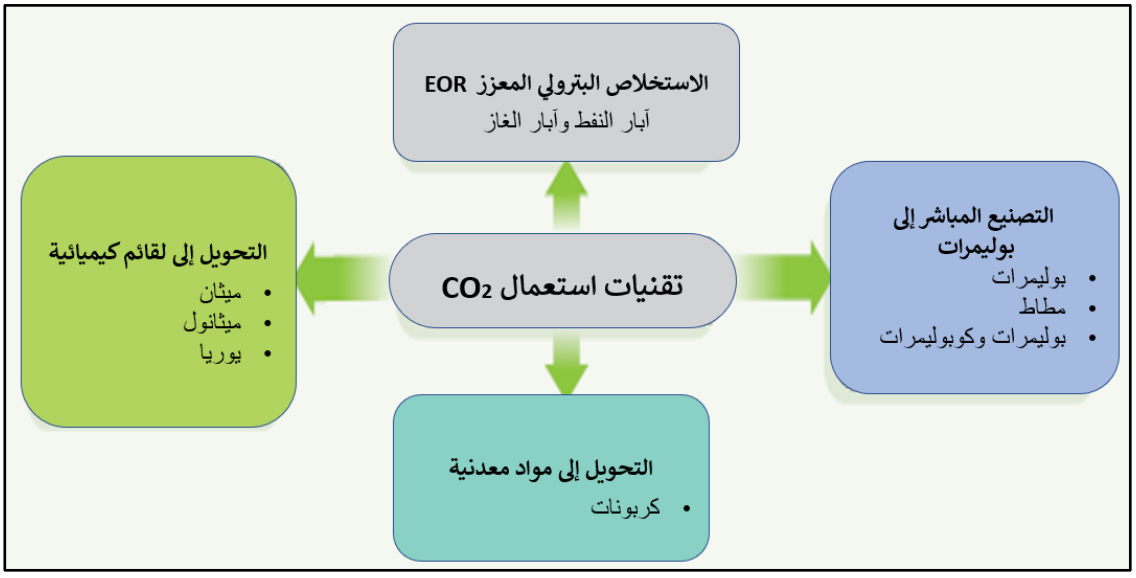
المصدر: (Carter & Hickman, 2021)

2-1-6: تقنيات استعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2

إن لغاز ثاني أوكسيد الكربون استعمالات عديدة، الصناعية منها والزراعية، وحتى الغذائية. ويتوقف نوع الاستعمال على درجة نقاوة الغاز وكميته. إلا أن أكثر التقنيات الحالية التي يستعمل فيها غاز ثاني أوكسيد الكربون انتشاراً، وخصوصاً في مجال نزع الكربون، هي التالية: الشكل (2-9)

- **الاستخلاص البترولي المعزز EOR** وهي عملية حقن الغاز في آبار النفط والغاز لتعزيز إنتاجها.
- **التحويل إلى لقائم كيميائية**، وهي تقنية تحويل الغاز إلى ميثان، أو ميثانول أو يوريا عبر الأمونيا.
- **التصنيع المباشر إلى بوليمرات**، مثل المطاط، والبوليمرات، والكوبوليمرات.
- التحويل إلى مواد معدنية، مثل الكربونات.

الشكل (2-9): تقنيات استعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون



المصدر: (Singh, H., 2022)

2-1-7: عوامل نجاح تطبيق تقنية احتجاز وتخزين واستعمال CO_2

لضمان نجاح مشروع إنشاء منظومة احتجاز وتخزين واستعمال ثاني أوكسيد الكربون CCSU، يجب الأخذ بالاعتبار مجموعة من العوامل التي يمكن أن تساهم في نجاح المشروع وتحقيق أهدافه، وفيما يلي أهم هذه العوامل: (Shah, G., 2022)

2-1-7-1: دراسة المشروع بشكل متكامل

قد يقع المصممون في الخطأ نتيجة الرغبة في الإسراع بإنجاز المشروع، فلا يؤخذ بالاعتبار عمليات نقل CO_2 المحتجز، أو مكان تخزينه، أو إمكانية استخدامه. فعلى سبيل المثال، قد تحتاج البنية التحتية لعملية نقل CO_2 إلى مستودعات التخزين الطويلة الأمد استثمارات باهظة، تعتمد قيمتها على موقع المشروع، علاوة على المخاطر البيئية والمالية التي يمكن أن تترتب عن مد خطوط أنابيب نقل CO_2، ودراسة إجراءات وقايتها من التآكل، وتركيب أجهزة المراقبة والاختبار، إضافة إلى بحث إمكانية استخدام الغاز في عملية الاستخلاص المعزز للنفط EOR* .

* Enhanced Oil Recovery، طريقة لحقن غاز CO_2 في آبار النفط لتنشيط الإنتاج.

2-7-1-2: اختيار التكنولوجيا المناسبة

إن الاختيار الخاطئ للتكنولوجيا التي تضمن سلامة التشغيل وصحة الاشتراطات البيئية قد يؤدي إلى خسارة استثمارات المشروع وفقدان الشركة لسمعتها، وموقعها التجاري في السوق. لهذا يجب على المصممين اختيار التكنولوجيا التي أثبتت التجارب العملية صلاحيتها، مع ضرورة التأكيد على حساب حجم معدات امتصاص CO_2، ومعدلات استهلاك بخار الماء والكهرباء، والنتروجين، وطرق التخلص من النفايات والمنتجات الثانوية المحتمل تشكلها، والخدمات الأخرى التي تؤثر على تقييم الجدوى الاقتصادية للمشروع وتكاليف تشغيله.

2-7-1-3: خفض كمية CO_2 المنبعثة من الوحدات القائمة

قبل البدء بتصميم وحدة احتجاز الكربون يجب مراجعة ظروف تشغيل الوحدات التي تطلق CO_2 لبحث إمكانية تخفيضها إلى الحد الأدنى من خلال تحسين الأداء واختيار القيم التشغيلية المناسبة. فعلى سبيل المثال، عند زيادة نسبة هواء الاحتراق الداخل إلى فرن العمليات أو مرجل توليد بخار الماء تزداد كمية CO_2 المنبعثة مما يؤدي إلى زيادة الحمل على وحدة احتجاز CO_2 وتخفيض كفاءتها. كما أن استبدال نوع الوقود الثقيل المستخدم بوقود خفيف يطلق كمية أقل من CO_2 يمكن أن يساهم في خفض حجم معدات وحدة الاحتجاز، وبالتالي تخفيض تكاليفها الاستثمارية.

2-7-1-4: تقييم العوامل المؤثرة على حياة المشروع

يقدر العمر الافتراضي لمشروع احتجاز CO_2 عادة بحوالي 25-30 سنة، وهذا يستوجب الأخذ بالاعتبار العديد من القضايا، من أهمها:

- ضمان العمر الافتراضي للوحدات المنتجة ل CO_2 بما يتناسب مع العمر الافتراضي للمشروع.
- استقرار شراء وتسعير CO_2 في الأسواق المحتملة.
- التعاقد مع مقاول تصريف النفايات الناتجة عن المشروع خلال فترة حياة المشروع.

2-7-1-5: دراسة التشريعات والقوانين المتعلقة بالمشروع

تختلف متطلبات التشريعات والقوانين المحلية المتعلقة بخفض انبعاثات الكربون من دولة لأخرى، وإن أي انحراف عن هذه المتطلبات قد يؤدي إلى فشل المشروع.

2-1-7-6: تطبيق التقنيات الرقمية

يساهم تطبيق التقنيات الرقمية في تحسين كفاءة الطاقة في عمليات ومعدات المشروع، من خلال خفض معدل الأعطال الطارئة والتوقفات غير المبرمجة.

2-2: استبدال الوقود الأحفوري بوقود منخفض الكربون

تختلف كمية CO_2 المنبعثة من حرق الوقود في الأفران ومراجل توليد بخار الماء تبعاً للتركيب الكيميائي للوقود ومحتواه من الكربون والهيدروجين. كما أن استبدال نوع الوقود الثقيل المستخدم بوقود خفيف يساهم في خفض كمية CO_2 المنبعثة.

كما يمكن استخدام أنواع أخرى من الوقود مثل الهيدروجين الذي يتميز بأن حرقه ينتج عنه بخار ماء بدلاً من غاز ثاني أوكسيد الكربون، أو تطبيق طريقة التسخين الكهربائي بدلاً من حرق الوقود.

2-2-1: استخدام الهيدروجين كوقود

يساهم حرق وقود خال من الكربون، مثل الهيدروجين والأمونيا في تخفيض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون في غازات الاحتراق. ويحظى الهيدروجين بالاهتمام الأكبر نظراً لسهولة استخدامه كوقود مقارنة بالأمونيا التي ينتج عن حرقها كمية كبيرة من أكاسيد النيتروجين.

يعتبر الهيدروجين أحد الحلول الناجعة لخفض انبعاثات الكربون في المنشآت الصناعية، وخصوصاً بالنسبة لمصافي تكرير النفط نظراً لتوافر وحدات إنتاج الهيدروجين والخدمات اللازمة لها. كما يمثل إنتاج الهيدروجين فرصة واعدة لمصافي تكرير النفط لتصبح مركزاً لإنتاج وتوزيع الهيدروجين بأسعار منافسة إلى المنشآت الصناعية المجاورة. (Martin, M,.2021)

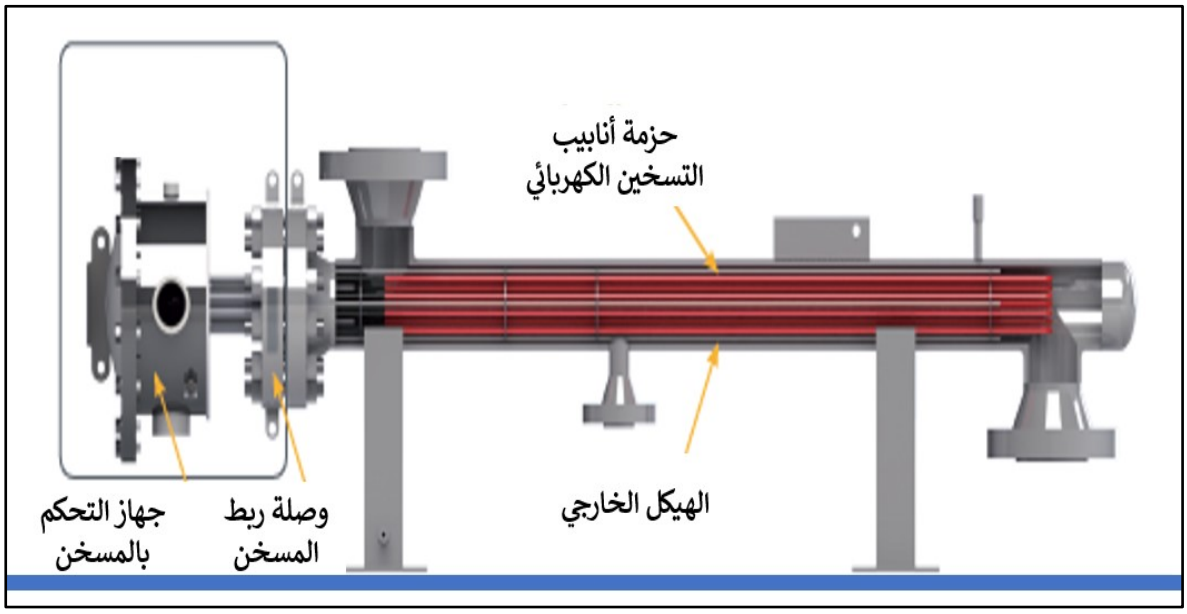
يمكن أن تعتمد المصفاة على الهيدروجين في عمليات التسخين إلى درجات الحرارة المرتفعة التي لا يمكن الوصول إليها باستخدام التسخين الكهربائي. والجدير بالذكر أن استخدام وقود يحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين يرافقه بعض الصعوبات التي يجب أخذها بعين الاعتبار، من أهمها:

- ضرورة إعادة تصميم الحراقات Burners بما يتناسب مع نسبة الهيدروجين في الوقود، وتعديل الحراقات إلى النموذج المنخفض أكاسيد النيتروجين Low NO_x Burner، لتفادي مشكلة ارتفاع نسبة أكاسيد النيتروجين الناتجة عن حرق الهيدروجين.
- الحراقات التي تعمل على نسبة 100% هيدروجين لا يمكن استعمالها لحرق الوقود الغازي في حال انقطاع الهيدروجين عن الشبكة. وهذا يؤدي إلى توقف الفرن.
- الحاجة إلى تعديل الحراقات لتفادي صعوبة التحكم بكمية الهواء المنخفضة اللازمة لحرق الهيدروجين.
- زيادة سرعة انتشار اللهب الناتج عن حرق الهيدروجين تؤدي إلى تلف أجزاء الحراقات والفرن.
- انخفاض كمية غازات الاحتراق العابرة لمنطقة الاشعاع Radiation section يؤدي إلى انخفاض كفاءة التبادل الحراري وعدم انتظام توزع الحرارة في هذه المنطقة. وهذا يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة معدن الأنابيب إلى مستوى أعلى من الحدود المسموحة.

2-2-2: التسخين الكهربائي

تتميز طريقة التسخين الكهربائي بأنها أكثر كفاءة، من طرق التسخين بالوقود، وبالتالي يمكن تجنب الفقد الذي يحصل أثناء حرق الوقود التقليدي، وتوفير حوالي 50% من كمية الوقود المستهلك. إلا أن عملية التسخين الكهربائي لم تطبق في صناعة التكرير إلا ضمن مجالات محدودة على الرغم من تطبيقها في العديد من الاستخدامات الصناعية. وقد سجلت بعض حالات استخدام طريقة التسخين الكهربائي بدلاً من الوقود في توليد بخار الماء اللازم للاستهلاك في عمليات مصافي تكرير النفط يمكنها الوصول بدرجة حرارة بخار الماء إلى 350 °م. يبين الشكل (2-10) مبادل حراري لتوليد بخار الماء بالتسخين الكهربائي.

الشكل (2-10): مبادل حراري لتوليد بخار الماء بالتسخين الكهربائي

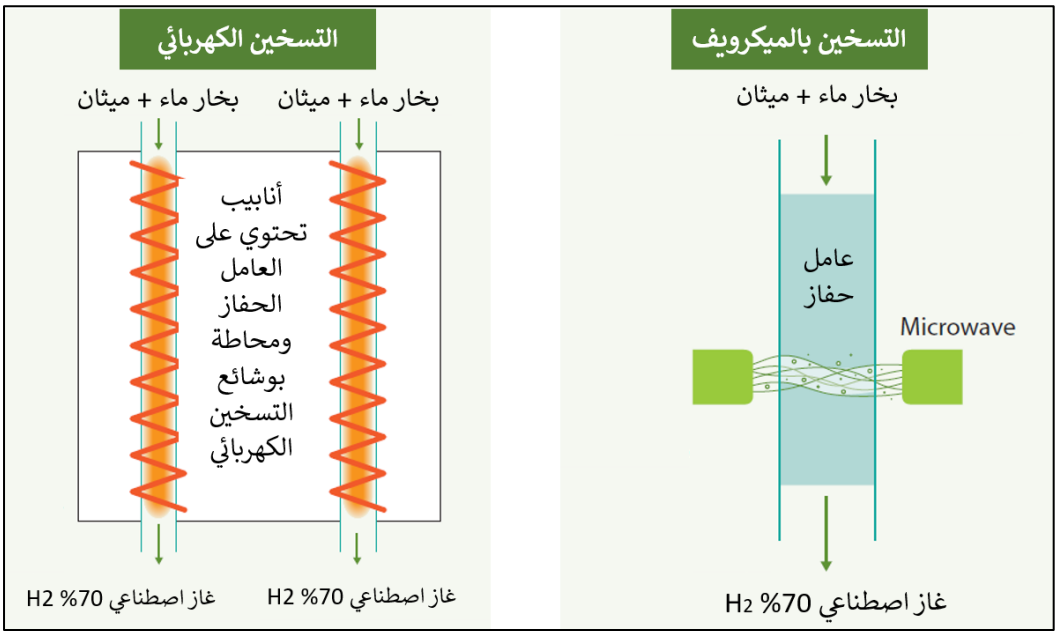


المصدر: (Long, D., 2022)

تواجه عملية استخدام التسخين الكهربائي بعض الصعوبات، أولها أن فرص تطبيق التسخين الكهربائي في مصافي تكرير النفط محدودة لا تتجاوز 10% من كمية الطاقة المستهلكة في المصفاة، ثانيها أن الكهرباء يتم توليدها داخلياً لتلبية حاجة المصفاة، وعندما لا تتوفر كمية فائضة لتطبيق عمليات التسخين قد يكون من الصعب استيراد الكهرباء النظيفة المنتجة من مصادر متجددة. لذلك قد يكون الخيار الأنسب هو توليد الطاقة الكهربائية داخل المصفاة بواسطة عنفة غازية أو CHP مزودة بمنظومة احتجاز CO_2، أو استخدام طاقة كهربائية تم توليدها باستخدام الطاقة المتجددة.

ومن الحالات المحتملة لاستخدام التسخين بدلاً من الوقود الأحفوري حالة استخدام التسخين بالميكروويف Microwave، أو طريقة التسخين الكهربائي في وحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان، حيث يمكن تخفيض نحو 25-30% من كمية الغاز الطبيعي المستهلك في الوحدة ومثلها من انبعاثات الكربون. (Harrison, 2021) يبين الشكل (2-11) طريقتي تسخين مفاعل التهذيب البخاري للميثان بالتسخين الكهربائي والميكروويف.

الشكل (2-11): تسخين مفاعل التهذيب البخاري للميثان بالتسخين الكهربائي والميكروويف



المصدر: (Harrison, 2021)

2-2-3: التحويل إلى وقود منخفض الكربون

بما أن كمية انبعاثات CO_2 الناتجة عن حرق الوقود في مداخن أفران العمليات ومراجل توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء تختلف حسب نوع الوقود، فيمكن أن يساهم التحويل إلى وقود منخفض محتوى الكربون في خفض انبعاثات المصفاة. فعلى سبيل المثال، تقدر كمية CO_2 المنبعثة من حرق الغاز الطبيعي بنحو 40-50% من الكمية المنبعثة من حرق زيت الوقود الثقيل.

يبين المثال التالي دراسة مقارنة بين أربعة أنواع من الوقود في فرن طاقته 46.5 جيجا كالوري في الساعة في مصفاة طاقتها التكريرية 180 ألف ب/ي. يبين الجدول (2-6) أنواع الوقود المستخدمة في فرن المصفاة.

الجدول (2-6): أنواع الوقود المستخدمة في فرن المصفاة

	زيت وقود نوع 6	زيت وقود خفيف	غاز المصفاة		غاز طبيعي مسال
			الوزن الجزيئي الأدنى =14	الوزن الجزيئي الأقصى 22	
القيمة الحرارية الدنيا LHV كيلو كالوري/كغ	9680	10250	12100	10960	11700
محتوى الكبريت	1% وزناً كبريت	0.5 % وزناً كبريت	150 ج.ف.م H_2S	150 ج.ف.م H_2S	صفر H_2S
المكونات	كثافة نوعية: 1.01 نسبة C/H: 8.20 API: 8.6	كثافة نوعية: 0.83 نسبة C/H: 6.5 API: 39	مول % H_2: 20.84 C_1: 74.33 C_2: 2.31 C_3: 0.57 C_4: 0.19 C_5+: 1.09 C2=: 0.07 C3=: - أخرى: الباقي	مول % H_2: 17.48 C_1: 32.01 C_2: 13.57 C_3: 1.2 C_4: 0.72 C_5+: 1.5 C2=: 22.2 C3=: 6.50 أخرى: الباقي	مول % H_2: - C_1: 93 C_2: 4.61 C_3: 1.08 C_4: 0.4 C_5+: 0.15 C2=: - C3=: - أخرى الباقي

المصدر: (Saini, et al., 2021)

الفرن مزود بمنظومة لتسخين الهواء الداخل إلى الحراقات بالتبادل مع حرارة الغازات الخارجة من المدخنة، ويتم تنظيم درجة حرارة غازات المدخنة الخارجة من منظومة تسخين الهواء الداخل إلى الحراقات عند قيمة 150 °م. وتبلغ نسبة الهواء الزائدة المعتمدة عند استخدام زيت الوقود الثقيل HFO أو زيت الوقود الخفيف LFO نحو 20%. أما عند استخدام غازات المصفاة RFG أو الغاز الطبيعي المسال LNG فتبلغ 15%. يبين الجدول (2-7) قيم ظروف تشغيل الفرن.

الجدول (2-7): قيم ظروف تشغيل الفرن

	زيت وقود نوع 6	زيت وقود خفيف	غاز المصفاة		غاز طبيعي مسال
			الوزن الجزيئي الأدنى =14	الوزن الجزيئي الأقصى 22	
كمية الحرارة الممتصة جيجا كالوري /الساعة	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
استهلاك الوقود كغ/الساعة	5260	4950	4200	4625	4340
غاز المدخنة كغ/الساعة	92400	91935	87625	85050	88780
نسبة CO_2 في غاز المدخنة %وزناً	18.29	16.95	12.58	15.09	13.44
CO_2 المنبعثة، طن/اليوم	406	374	264	309	286
نقطة تكاثف الحمض، °م	137	132	113	110	60 (نقطة تكاثف الماء)
انبعاثات SOx كغ/الساعة	52.29	21.42	1.74	1.70	-

المصدر: (Saini, et al., 2021)

ولتقييم أثر تغيير نوع الوقود على انبعاثات الكربون تم افتراض الحالتين التاليتين:

الحالة الأولى: التحويل من زيت الوقود إلى الغاز الطبيعي المسال

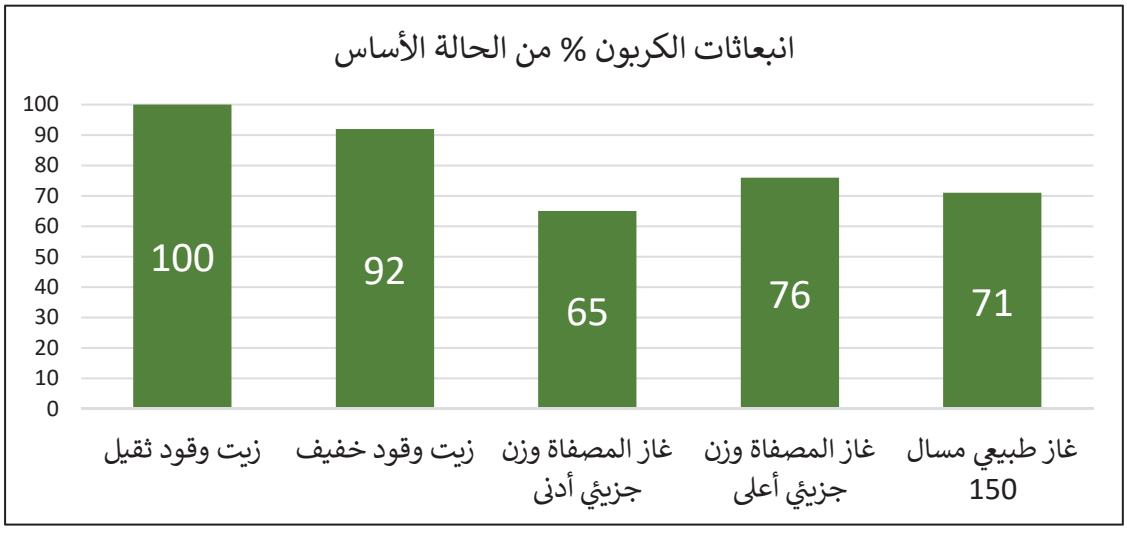
يشير الجدول (2-7) إلى أن كمية انبعاثات الكربون في حالة استخدام زيت الوقود الثقيل أعلى من حالة استخدام زيت الوقود الخفيف.

يمكن خفض 29% من انبعاثات الكربون عند التحويل من زيت الوقود الثقيل إلى الغاز الطبيعي المسال. وللتأكد من عدم حدوث انعكاسات سلبية على ظروف عمل الفرن نتيجة تغيير نوع الوقود يقوم المشغل بمراقبة قيم مؤشرات الأداء، مثل درجة حرارة الجسور، ودرجة حرارة سطح أنابيب الفرن، وذلك نظراً لتحول الحمل الحراري من منطقة الإشعاع Radiation section إلى منطقة الحمل Convection Section أو العكس.

الحالة الثانية: التحويل من غازات المصفاة إلى الغاز الطبيعي المسال

يلاحظ في هذه الحالة أن التغير في نسبة انبعاثات الكربون بسيطة، وتتوقف على مكونات غاز المصفاة، فإذا كان الوزن الجزيئي للغازات أدنى من الوزن الجزيئي للغاز الطبيعي المسال فإن التحويل إلى حرق الغاز المسال سيؤدي إلى زيادة انبعاثات الكربون. يبين الشكل (2-12) كمية انبعاثات الكربون حسب نوع الوقود وقيمة الوزن الجزيئي لغازات المصفاة. (Saini, et al., 2021)

الشكل (2-12): كمية انبعاثات الكربون حسب نوع الوقود وقيمة الوزن الجزيئي لغازات المصفاة



المصدر: (Saini, et al., 2021)

2-3: تكرير مواد خام متجددة

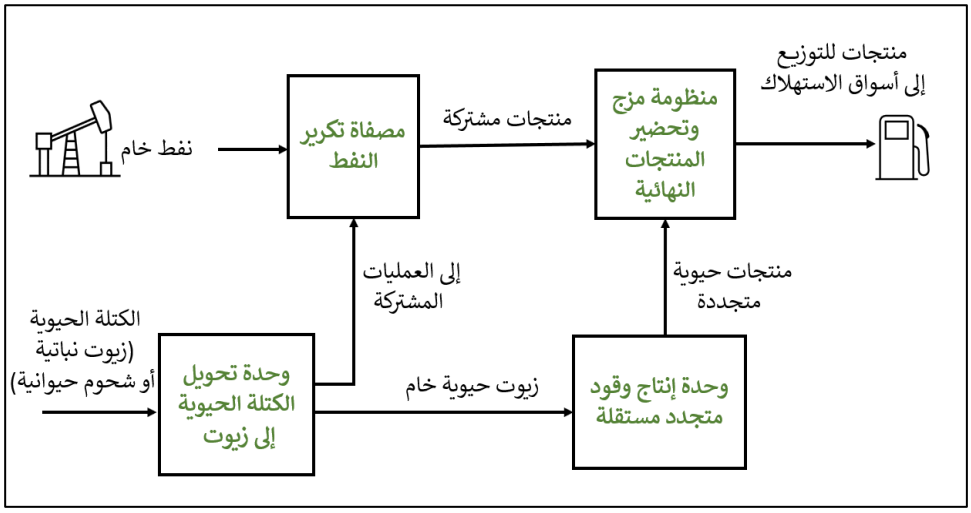
تكتسب عملية تكرير الزيوت المشتقة من الكتلة الحيوية في مصافي تكرير النفط اهتماماً متنامياً ضمن جهود السعي لتلبية متطلبات التشريعات البيئية الخاصة بخفض الانبعاثات الكربونية الناتجة عن المنتجات النفطية في كافة مراحل دورة حياتها، بدءاً من عمليات الإنتاج وحتى الاستهلاك.

يمكن لمصافي تكرير النفط إنتاج وقود منخفض الكربون من خلال تكرير مواد خام متجددة مثل الزيوت النباتية المستعملة، والدهون والشحوم الحيوانية ومعالجتها في وحدات الهدرجة أو وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع، أو مزجها مع النفط الخام.(BYRUM, Z., et al., 2021)

يوجد خياران لتكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط الخام. يعتمد **الخيار الأول** على إنشاء وحدة معالجة هيدروجينية منفصلة في مصفاة تكرير النفط لمعالجة الزيوت الحيوية، ثم يتم مزج

منتجات هذه الوحدة مع المنتجات النهائية للمصفاة، وقد تلجأ المصافي إلى تعديل وحدات المعالجة الهيدروجينية القائمة لتعمل على معالجة الزيوت الحيوية وتحويلها إلى وقود متجدد، وذلك عندما تتوفر طاقة فائضة من هذه الوحدات. أما **الخيار الثاني** فيعتمد على العمليات المشتركة، حيث تحقن الزيوت الحيوية الوسطية مع لقائم بعض العمليات القائمة في المصفاة. يبين الشكل (2-13) خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط.

الشكل (2-13): خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط

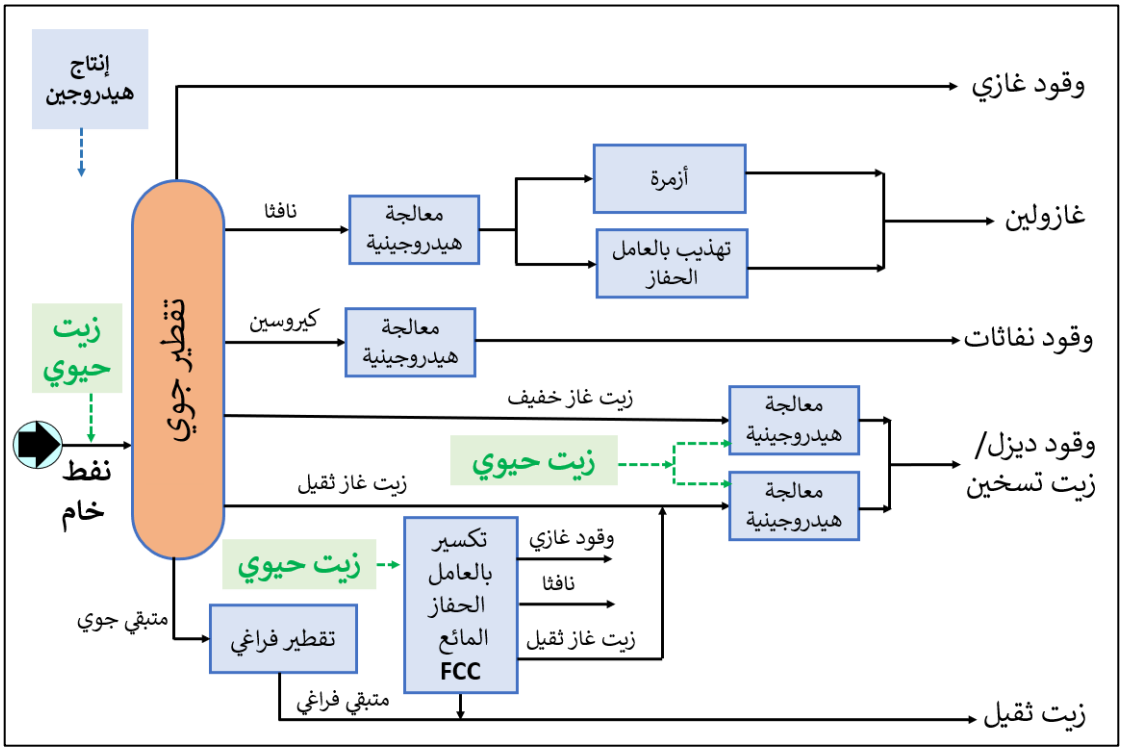


المصدر: (Sayles, S & Ohmes, R., 2021)

يعتمد قرار اختيار الحل الأمثل لمسار تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط على عدة عوامل، مثل توفر طاقة فائضة في وحدات المعالجة الهيدروجينية، وإمكانية تأمين الزيوت الخام الحيوية وخصائصها. فعلى سبيل المثال، يتميز مسار إنشاء وحدة معالجة هيدروجينية منفصلة بالاستفادة من الخدمات المتوفرة في المصفاة مثل الخزانات والأنابيب ووحدات إنتاج الهيدروجين ووحدات توليد بخار الماء والكهرباء، ووحدات معالجة المياه والشعلة وغيرها.

أما في مسار العمليات المشتركة فتتم معالجة المواد المشتقة من المصادر الحيوية إلى جانب المواد النفطية في بعض وحدات المصفاة، مثل وحدات تقطير النفط الخام، وعملية التكسير الحراري، وعملية التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، وعمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني. (Avery M., and Strohm, J., 2021) يبين الشكل (2-14) العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-14): العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط



المصدر:(Wagner DA SILVA, M., 2022)

شهدت عمليات معالجة الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط اهتماماً ملحوظاً في العقدين الماضيين مدفوعة بعوامل عديدة، يأتي في مقدمتها توجه دول العالم نحو تشجيع إنتاج واستهلاك الوقود المتجدد في إطار خطط خفض انبعاثات الكربون، والعمل على تحسين اقتصاديات إنتاج الوقود الحيوي، من خلال معالجة الزيوت الحيوية الوسطية في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود متجدد بمواصفات مماثلة للوقود النفطي، باستخدام استراتيجية المعالجة المشتركة، وفي نفس الوقت تحسين ربحية صناعة تكرير النفط وتمكينها من تلبية متطلبات التشريعات البيئية التي تفرض على المصافي تخفيض الانبعاثات الكربونية. (Nurdiawati, A., & Urban, F., 2021)

2-4: إنتاج وقود منخفض الكربون

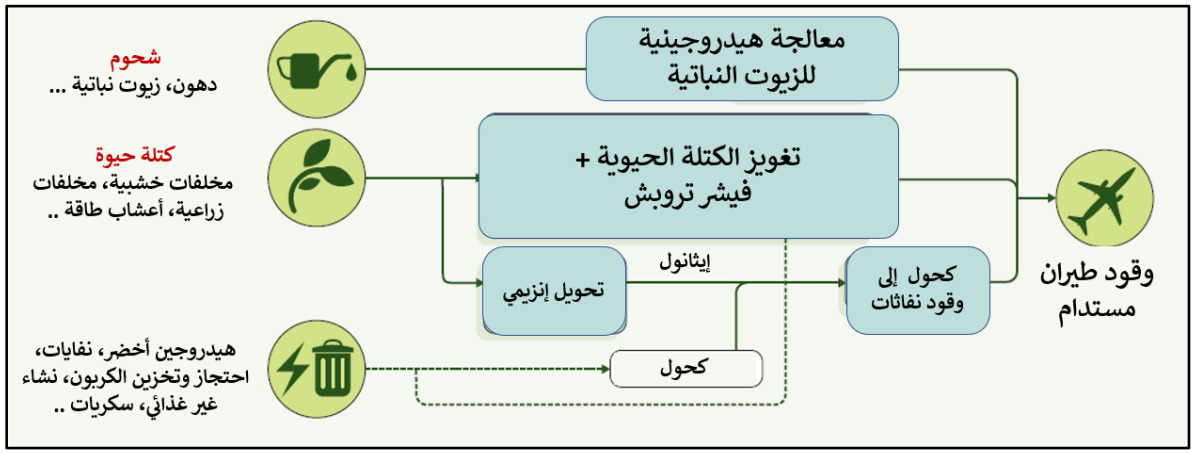
تتجه بعض مصافي تكرير النفط في العالم إلى تحويل منتجاتها إلى أنواع منخفضة الكربون، من خلال تطبيق تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام أو تفاعل الهيدروجين مع غاز ثاني أوكسيد الكربون لإنتاج مواد ذات خصائص مماثلة للوقود النفطي أو ما يسمى بالوقود الكهربائي Electrofuel.

2-4-1: إنتاج وقود الطيران المستدام

من أكثر عمليات إنتاج الوقود المنخفض الكربون اهتماماً والتي دخلت حيز التطبيق العملي في العديد من مناطق العالم وخاصة في أوروبا الغربية والولايات المتحدة الأمريكية هي تقنية إنتاج وقود الطيران المستدام Sustainable Aviation Fuel (SAF).

تم اعتماد سبع مسارات لعمليات إنتاج وقود الطيران المستدام القابل للمزج مع وقود النفاثات Jet A1 المنتج من مصافي تكرير النفط من قبل الجمعية الأمريكية لاختبار المواد ASTM، إلا أن من أهمها وأكثرها استخداماً هي تقنية فيشر تروبش التي اعتمدت في عام 2009، تلتها تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية Hydroprocessed Esters and Fatty Acids في 2011، وتقنية تحويل الكحول إلى وقود طيران ATJ التي اعتمدت في عام 2018. كافة هذه التقنيات تساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عبر دورة حياة وقود الطيران بنسب عالية تصل إلى 90% مقارنة بوقود الطيران البترولي (Bernard, Y., et al., 2022) يبين الشكل (2-15) مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (2-15): مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام

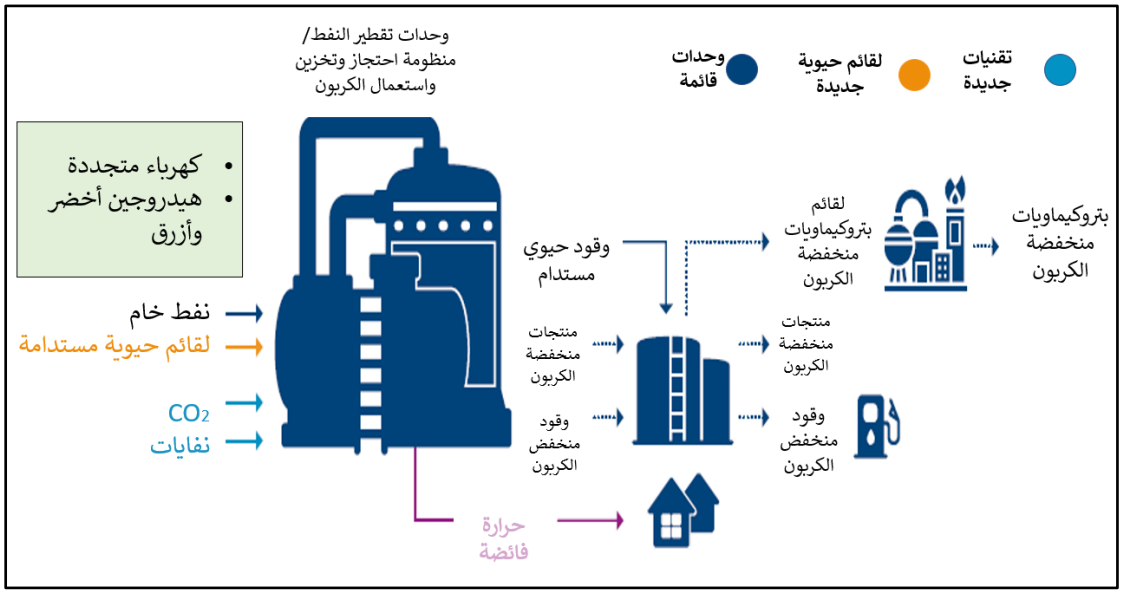


المصدر: (Bernard, Y., et al., 2022)

يعتمد مبدأ مسار فيشر تروبش على تحويل الغاز الاصطناعي Synthesis Gas، (الهيدروجين وثاني أوكسيد الكربون) المنتجان من مصادر عضوية أو من منظومة احتجاز وتخزين الكربون، إلى أنواع عديدة من الوقود السائل بما فيها وقود الطيران المستدام (SAF)، وذلك من خلال المراحل التالية:

- **مرحلة تنقية الغاز الاصطناعي**، وتهدف هذه المرحلة إلى التأكد من أن الغاز الاصطناعي خال من الشوائب الضارة بالعامل الحفاز المستخدم في عملية فيشر تروبش، مثل الغازات الحامضية.
- **مرحلة تفاعلات فيشر تروبش**، وتتم في مفاعل يحتوي على عامل حفاز لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل هيدروكربونية طويلة السلسلة.
- **مرحلة تحسين خصائص منتجات فيشر تروبش**، حيث يتم تثبيت السوائل الخام، وهدرجة الأوليفينات والأوكسجينات، ثم تكسيرها بوجود الهيدروجين، وأزمرتها. بعد ذلك يتم فصل السوائل الناتجة إلى أشكال مختلفة من الإنتاج، مثل حالة إنتاج أقصى نسبة من الكيروسين، أو أقصى نسبة من المقطرات الوسطى أو الديزل مع نسبة قليلة من النافثا. يبين الشكل (2-16) نموذج إنتاج الوقود المنخفض الكربون في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-16): نموذج إنتاج الوقود المنخفض الكربون في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Rutz, *et al.*, 2020)

يتميز مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية بمرونة استخدام أنواع عديدة من الزيوت النباتية والدهون الحيوانية المتجددة كلقيم لتحويلها إلى وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي، ويعتبر هذا المسار من الحلول الفعالة التي تساعد مصافي تكرير النفط على إنتاج وقود منخفض الكربون عالي الجودة ويمكن مزجه بسهولة مع المنتجات النفطية، فضلاً عن دورها في تمكين المصفاة من تلبية متطلبات التشريعات البيئية الخاصة بخفض انبعاثات الكربون، وذلك من خلال إدخال بعض التعديلات البسيطة

على إحدى وحدات المعالجة الهيدروجينية القائمة في المصفاة لإنتاج وقود الطيران المستدام أو الديزل الحيوي. (Jenkins.S., 2022)

تتكون عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية من المرحلتين التاليتين:

- **مرحلة المعالجة الهيدروجينية** لتخليص الزيوت النباتية والشحوم من الأوكسجينات والشوائب بوجود الهيدروجين لإنتاج البارافينات الخطية.
- **مرحلة الأزمرة بوجود الهيدروجين Hydroisomerization** لتحويل البارافينات الخطية التي أنتجت في المرحلة الأولى إلى مقطرات وسطية حيوية قابلة للمزج مع المنتجات النفطية. ويمكن تعديل ظروف تشغيل هذه المرحلة بحيث تنتج وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي وبنسبة تتراوح من الصفر إلى المائة.

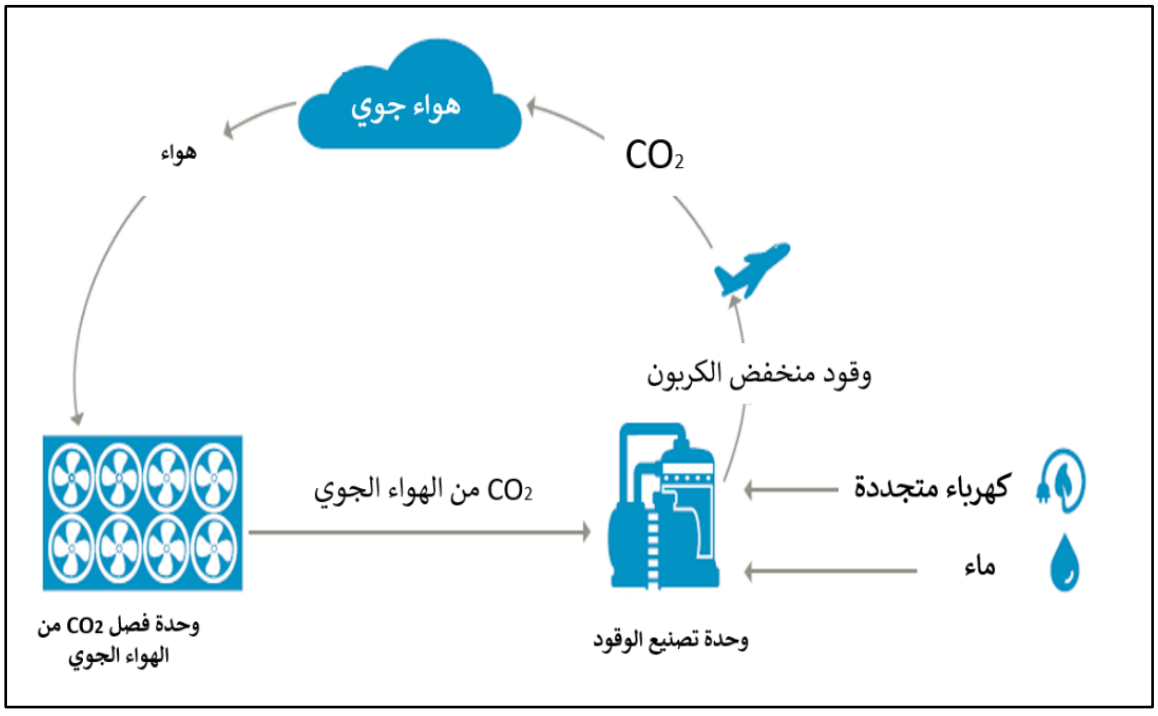
أما مسار التغويز فيعتمد على إنتاج وقود الطيران المستدام والوقود الحيوي المتقدم من تغويز المخلفات الزراعية ونفايات صناعة الخشب، ومخلفات الغابات، والزيوت النباتية المستعملة، وتتكون من المراحل التالية:

- **مرحلة المعالجة الأولية للكتلة الحيوية** كالتجفيف وتحسين تجانسها وجودة خصائصها.
- **مرحلة التغويز**، وهي عملية أكسدة جزئية في درجات حرارة وضغوط مرتفعة لتحويل المواد الكربونية إلى غاز اصطناعي خال من القار.
- **مرحلة تعديل خصائص الغاز الاصطناعي** ليتناسب مع المواصفات المطلوبة لعملية فيشر تروبش.
- **مرحلة تحسين خصائص منتجات فيشر تروبش**، وهي نفس الخطوات المبينة في مسار فيشر تروبش أعلاه.

2-4-2: تقنية تحويل الهواء إلى وقود Air to Fuel

قد تلجأ المصافي إلى تطبيق تقنية تحويل الهواء إلى وقود Air to Fuel التي طبقت للمرة الأولى من قبل شركة Carbon Engineering، وتعتمد على مبدأ إنتاج الوقود من الهيدروجين الأخضر وثاني أوكسيد الكربون المحتجز مباشرة من الهواء الجوي DAC. يدخل ثاني أوكسيد الكربون المحتجز من الهواء الجوي إلى مفاعل تصنيع الوقود المنخفض الكربون. يبين الشكل (2-17) مخطط مبسط لمبدأ تقنية الهواء إلى وقود.

الشكل (2-17): مخطط مبسط لمبدأ تقنية تحويل الهواء إلى وقود



المصدر: (Repsol, 2022)

تتميز هذه التقنية بخصائص عديدة تجعلها من التقنيات الواعدة لإنتاج الوقود المنخفض الكربون، وأهم هذه الخصائص:

- سهولة نقل وتخزين المنتجات مقارنة بالهيدروجين.
- قابلية التكامل مع البنية التحتية لمرافق نقل الغاز الطبيعي وأنابيب نقل المنتجات النفطية.

- قابلية مزجها مع العديد من المنتجات النفطية مثل، وقود الطيران والنقل البحري، ووقود تدفئة المباني السكنية، ولقائم صناعة البتروكيماويات.

تجدر الإشارة إلى أن الوقود الكهربائي لم ينتج حتى الآن على مستوى تجاري نظراً لارتفاع تكاليف إنتاجه. كما انه يحتاج إلى خمس أضعاف كمية الطاقة الكهربائية التي تحتاجها السيارة الكهربائية.

2-5: ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها

تعتبر إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة من أفضل الوسائل الممكنة لتخفيض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 المنبعثة من حرق الوقود، فضلاً عن توفير التكاليف الباهظة نتيجة تخفيض كمية الوقود المستهلك. فعلى سبيل المثال تستهلك وحدة إنتاج إيثلين طاقتها 500 ألف طن/السنة نحو 30 ميغاوات ساعي من الطاقة الكهربائية في السنة، فلو أمكن خفض استهلاك الطاقة في أفران الوحدة بحدود 1% فإن ذلك يؤدي إلى خفض ملايين الأطنان من الانبعاثات إلى الهواء الجوي، أو ما يعادل توفير 5 مليون دولار سنوياً. (Kumar, A. 2021)

تمثل تكاليف استهلاك الطاقة ما يزيد عن 50% من إجمالي تكاليف التكرير، لهذا فإن الحرص على استقرار ظروف تشغيل عمليات التكرير في المصفاة يعتبر من أهم العوامل المساهمة في خفض التوقفات الطارئة التي تؤدي إلى هدر كميات كبيرة من الطاقة، ولتحقيق هذا الاستقرار تلجأ مصافي تكرير النفط إلى تطبيق التقنيات التي تساهم في تحسين الكفاءة التشغيلية ورصد الأعطال وتصحيحها قبل تفاقمها. (Carugo, M., 2022)

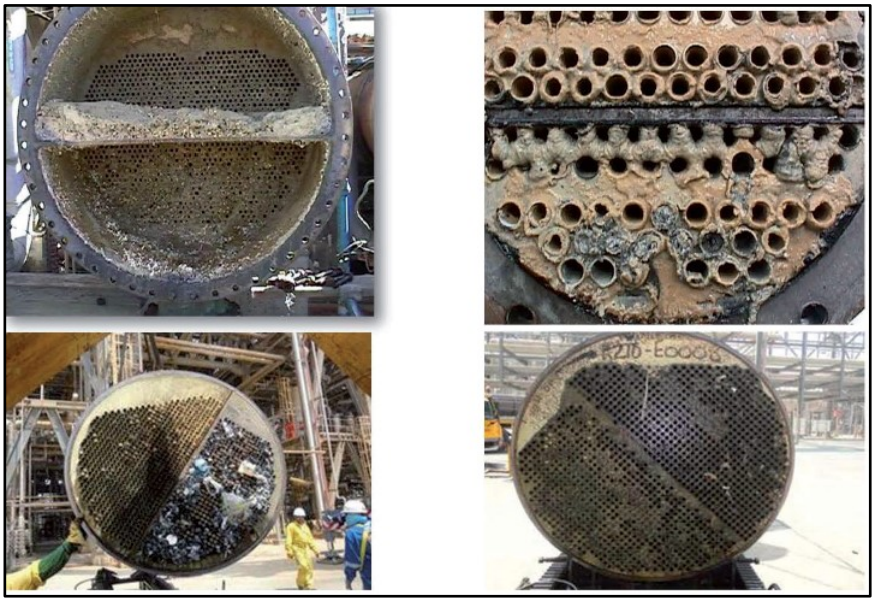
تقسم إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة التي تساهم في خفض انبعاثات الكربون في مصافي تكرير النفط إلى إجراءات بدون تكاليف أو بتكاليف بسيطة، وإجراءات متوسطة أو مرتفعة التكاليف.

2-5-1: إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بدون تكاليف أو بتكاليف بسيطة

يمكن ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في وحدات المصفاة من خلال تطبيق بعد الإجراءات التي لا تحتاج إلى تكاليف أو بتكاليف بسيطة، من أهمها:

- **تنظيم ظروف تشغيل العمليات،** وذلك بهدف خفض استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى مع المحافظة على كفاءة العملية، مثل تخفيض نسبة الراجع إلى أبراج الفصل إلى الحد الأدنى.
- **تحسين عمليات الصيانة الدورية للمعدات** لتفادي الأعطال والتوقفات الطارئة التي ينتج عنها مخلفات ومنتجات خارجة عن المواصفات تحتاج إلى عمليات إعادة تكرير تستهلك طاقة إضافية.
- **تكرير نفط خام بمواصفات عالية الجودة** ذات كثافة خفيفة وغير حامضية وتحتوي على نسب منخفضة من الشوائب، حيث أن الأنواع الجيدة لا تحتاج إلى معالجة عميقة لنزع الشوائب منها وبالتالي يكون استهلاكها للطاقة أقل.
- **المحافظة على نظافة المبادلات الحرارية** وإزالة الرواسب المتراكمة على سطوح الأنابيب التي تمنع انتقال الحرارة وتسبب زيادة استهلاك الوقود في الفرن، أو ما تسمى بظاهرة الاتساخ، Fouling. ويمكن معالجة هذه المشكلة باتباع نظام مراقبة، أو حقن مواد مانعة للترسب، أو إجراء عملية تنظيف للأنابيب أثناء وجود الوحدة في دارة العمل. (Ferrara, M., 2022) يبين الشكل (2-18) انسداد أنابيب المبادلات الحرارية المسببة لهدر الطاقة.

الشكل (2-18): انسداد أنابيب المبادلات الحرارية المسببة لهدر الطاقة



المصدر: (Ferrara, M., 2022)

على سبيل المثال، انخفضت درجة حرارة اللقيم الداخل إلى فرن وحدة تقطير فراغي من 247 °م إلى 219 °م بسبب تراكم الأسفلتينات على السطح الداخلي لأنابيب سلسلة المبادلات الحرارية

الأولية، مما أدى إلى انخفاض الطاقة الإنتاجية للوحدة، فضلاً عن زيادة استهلاك الوقود الغازي بمعدل 1.67 متر مكعب قياسي/الساعة /الطن، أو ما يعادل 5.9 مليون متر مكعب في السنة، على أساس الطاقة الإنتاجية للوحدة 400 طن/الساعة، وبالتالي أدى ذلك إلى ارتفاع كمية انبعاثات الكربون من الفرن بمعدل 30 ألف طن CO_2 في السنة. وبإجراء عملية التنظيف أثناء وجود الوحدة في العمل أمكن استعادة ظروف الوحدة إلى وضعها الطبيعي خلال مدة لا تزيد عن 48 ساعة. يبين الشكل (2-19) تغير معدل استهلاك الوقود الغازي في الفرن قبل وبعد عملية تنظيف المبادلات الحرارية الأولية.

الشكل (2-19): تغير معدل استهلاك الوقود الغازي في الفرن قبل وبعد عملية تنظيف المبادلات الحرارية الأولية

المصدر: (FERRARA, M., 2022)

- **تحسين التكامل الحراري بين الوحدات**

يساهم التكامل الحراري بين الوحدات في تفادي التبريد المرحلي بين العمليات المتتالية، فعلى سبيل المثال، عندما تحول المنتجات الوسطية الخارجة من وحدة التقطير الجوي إلى وحدات المعالجة الهيدروجينية مباشرة يمكن المحافظة على درجة حرارتها المرتفعة والاستفادة منها في توفير كمية الوقود اللازم لتسخينها إلى درجة الحرارة المناسبة لتفاعل الهدرجة، وبذلك يمكن توفير الطاقة اللازمة لتبرير المنتجات الوسطية عند تحويلها إلى الخزانات.

صيانة مصائد البخار

عندما تتعطل المصيدة تسرب بخار الماء الساخن بدلاً من المياه المتكاثفة، مما يؤدي إلى هدر كبير في الطاقة وزيادة الحمل على مراجل توليد بخار الماء في المصفاة. لذلك يجب التأكد من سلامة عملها بشكل دوري وإجراء الإصلاحات اللازمة.

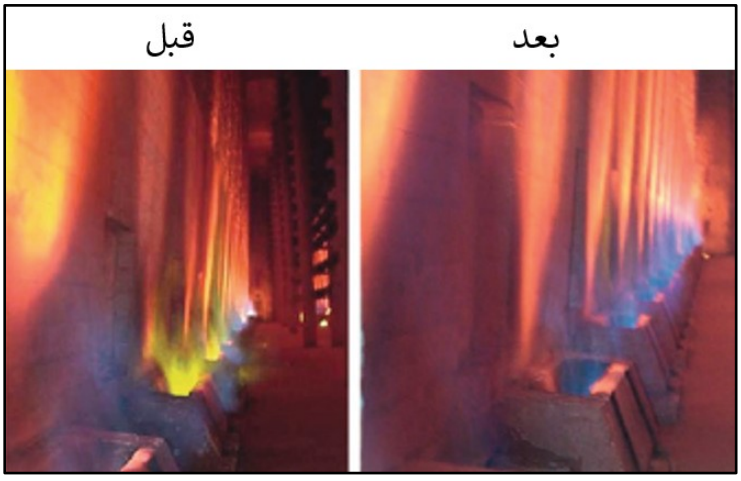
- **تحسين كفاءة حرق الوقود**

يعتمد مبدأ تحسين كفاءة الوقود **على** خفض معدل استهلاك الوقود إلى الحد الأدنى مع المحافظة على درجة الحرارة المطلوب الوصول إليها في المواد المراد تسخينها، وبدون حدوث أضرار أو آثار جانبية، وذلك من خلال ضبط نسبة الهواء الداخل إلى الحراقات، أو ما يطلق عليه بنسبة الهواء إلى الوقود، وبالتالي خفض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة. فعلى سبيل المثال، تم تخفيض نسبة الهواء الزائد من 3% إلى 1% في مدخنة أحد مراجل توليد البخار يعمل على الغاز الطبيعي، طاقته 10 مليون وحدة حرارية بريطانية/الساعة، ودرجة حرارة غازات المدخنة 600 ف°، فانخفضت كمية الوقود المستهلك في الفرن بمقدار 1.5%، وهذا بالتالي أدى إلى انخفاض انبعاثات CO_2 بنسبة 1.5%. (Tallon, 2021)

ولضبط نسبة الهواء إلى الوقود عند القيمة المثالية تقاس نسبة الأوكسجين والمواد القابلة للاشتعال في غازات المدخنة والتي تشير إلى نقص الاشتعال مثل الهيدروجين H_2، وأول أوكسيد الكربون CO باستخدام أجهزة قياس خاصة لمساعدة المشغل على ضبط نسبة الأوكسجين الزائد ضمن المجال 1-3%، ونسبة المواد القابلة للاشتعال 100 جزء بالميون كحد أقصى.

ومن الإجراءات الأخرى لتحسين كفاءة حرق الوقود في الأفران تنظيف فوهات الحراقات من الرواسب التي يؤدي إلى انحراف لهب الحراق وبالتالي زيادة الانبعاثات نتيجة عدم اكتمال اشتعال الوقود. يبين الشكل (2-20) مقارنة لهب حراقات الفرن قبل وبعد التنظيف.

الشكل (2-20): مقارنة لهب حراقات الفرن قبل وبعد التنظيف



المصدر:(Tallon, 2021)

- **تطبيق نظام إدارة معلومات الطاقة (EMIS)**

تفرض هيئات حماية البيئة على مصافي تكرير النفط وجود نظام مراقبة وقياس للغازات الملوثة للبيئة، المنبعثة من الأفران ومراجل توليد بخار الماء، مثل ثاني أوكسيد الكبريت، وأكاسيد النتروجين، وثاني أوكسيد الكربون، وأول أوكسيد الكربون، والأمونيا، وغيرها. إلا أن هذا النظام يعتبر مكلفاً نظراً لما يتطلبه من إجراءات صيانة ومعايرة مستمرة، وخصوصاً بالنسبة للأفران التي يتغير فيها نوع الوقود المستخدم. ولتفادي أية تكاليف زائدة تلجأ المصافي إلى تطبيق نظام إدارة معلومات الطاقة.

تبدأ الخطوة الأولى لتطبيق نظام Energy Management Information System EMIS بإجراء قياس لكافة نقاط استهلاك الطاقة، وتعتبر هذه الخطوة من أهم خطوات إدارة الطاقة، وذلك لدورها في تحديد مواطن الهدر والعمل على معالجتها. وهذا يتطلب وجود أجهزة قياس دقيقة ومتطورة ترصد التغيرات في النقاط المستهلكة للوقود وتبرزها على لوحة مراقبة بشكل فوري. أما الخطوة الثانية فتعتمد على مقارنة القراءات مع القيمة المحددة في مؤشرات قياس الأداء KPIs، ثم يتم بعد ذلك تحديد أسباب الانحراف واتخاذ الإجراءات التصحيحية المناسبة.

تفيد التجارب العملية أن تطبيق هذه التقنيات في مصافي تكرير النفط في مناطق عديدة من العالم قد ساهم في تخفيض إجمالي تكاليف التشغيل في المصفاة بمعدل 2-3% فضلاً عن تحسين التزام المصفاة بمتطلبات التشريعات الخاصة بخفض الانبعاثات الملوثة للبيئة.

2-5-2: إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بتكاليف متوسطة

بعض إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة يحتاج إلى تركيب معدات جديدة أو تغيير المعدات القائمة بأخرى ذات كفاءة أعلى، أو ذات خصائص تساعد على تخفيض كمية الطاقة المستهلكة، من أهمها:

- **تطوير الأجزاء الداخلية لأبراج التقطير والفصل**

تحتوي أبراج التقطير القديم أنواعاً من الأجزاء الداخلية ذات كفاءة منخفضة، يمكن استبدالها بصواني متطورة تساهم في تخفيض كمية الوقود المستهلكة في تسخين المادة الداخلة إلى البرج أو كمية الطاقة اللازمة لتبريد الراجع إلى البرج.

- **استبدال المبادلات الحرارية بأنواع ذات كفاءة أعلى**

تتوفر بعض أنواع المبادلات الحرارية الحديثة مصنوعة من معادن ذات خصائص تمكنها من نقل الحرارة بكفاءة أعلى بمساحة أصغر، بحيث يمكن استبدال المبادلات الحرارية القائمة بأخرى ذات كفاءة أعلى دون الحاجة إلى مساحة أكبر، وبالتالي تخفيض كمية الطاقة اللازمة للتسخين في الوحدات.

- **استخدام عوامل حفازة متطورة**

تتسابق الشركات المصنعة في إنتاج عوامل حفازة متطورة يمكنها الوصول إلى التفاعلات المطلوبة في المفاعل بدرجات حرارة وضغوط أخفض، وبالتالي يتم خفض كمية الطاقة اللازمة لتسخين المادة الداخلة إلى المفاعل.

- **الاستفادة من الحرارة الضائعة من غازات المدخنة**

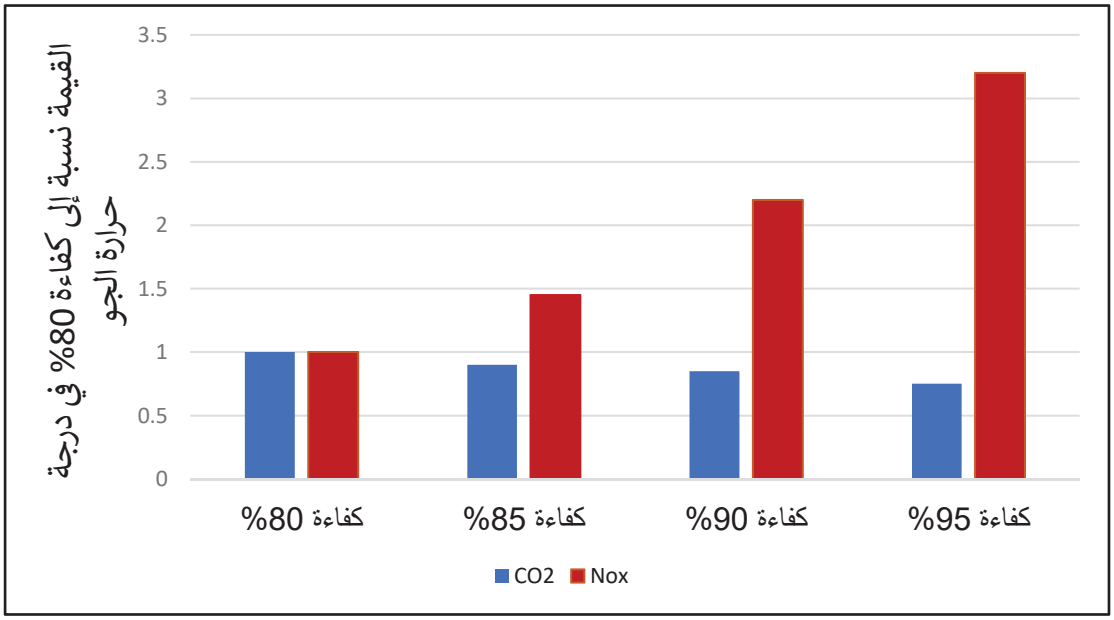
يمكن خفض تركيز CO_2 في غازات الاحتراق في أفران العمليات ومراجل توليد بخار الماء وتحسين كفاءة الوقود المستخدم من خلال الاستفادة من الحرارة الضائعة في عدة مجالات، كتسخين هواء الاحتراق الداخل إلى الحراقات، أو توليد بخار الماء، أو لتسخين الغازات الفائضة الداخلة إلى فرن الاتلاف لتوفير الوقود المستهلك.

يساهم رفع درجة حرارة الهواء الداخل إلى الحراقات في تخفيض معدل استهلاك الوقود في الفرن وبالتالي تنخفض نسبة CO_2 المنبعثة، فعلى سبيل المثال بفرض أن تركيب منظومة للاستفادة

من حرارة غازات المدخنة واستخدامها في تسخين الهواء الداخل إلى حراقات الفرن المذكور في المثال السابق قد أدى إلى خفض درجة حرارة غازات الاحتراق الخارجة من المدخنة من 600 إلى 400 ف فإن ذلك يؤدي إلى خفض نحو 5.8% من كمية الوقود المستهلك، وبالتالي خفض نحو 5.8% من انبعاثات CO_2. (Jouhara, H., et al., 2018)

تجدر الإشارة إلى أن ارتفاع حرارة الهواء الداخل إلى الحراقات يؤدي إلى زيادة تركيز أكاسيد النيتروجين NOx الذي يسبب تشكل الدخان الضبابي Smog والمطر الحامضي الضار بالبيئة. ويمكن خفض انبعاثات أكاسيد النيتروجين باستخدام معدات الاختزال الانتقائي الحفزي Selective Catalytic Reduction التي تعتمد على مبدأ امتصاص أكاسيد النيتروجين بالأمونيا، إلا أن من عيوب هذه المعدات ارتفاع تكاليف إنشائها وتشغيلها. يبين الشكل (2-21) العلاقة بين كفاءة حرق الوقود ونسبة انبعاثات أكاسيد النيتروجين وثاني أوكسيد الكربون.

الشكل (2-21): العلاقة بين كفاءة حرق الوقود ونسبة انبعاثات NOx، وCO_2

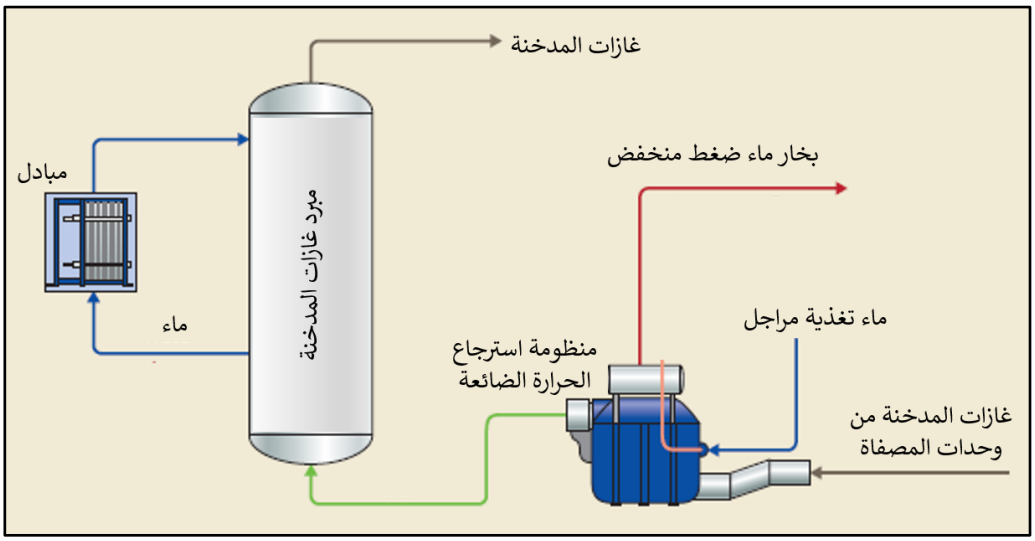


المصدر: (Tallon, 2021)

كما يمكن الاستفادة من الحرارة الضائعة من غازات المدخنة في توليد بخار الماء أو توليد الطاقة الكهربائية، وبالتالي تخفيض كمية الوقود المستهلكة في مراجل توليد بخار الماء اللازم لعمليات المصفاة. يبين الشكل (2-22) مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة لغازات الاحتراق في توليد بخار الماء منخفض الضغط، وفي نفس الوقت خفض تكاليف إنشاء مبرد الغازات الداخلة إلى

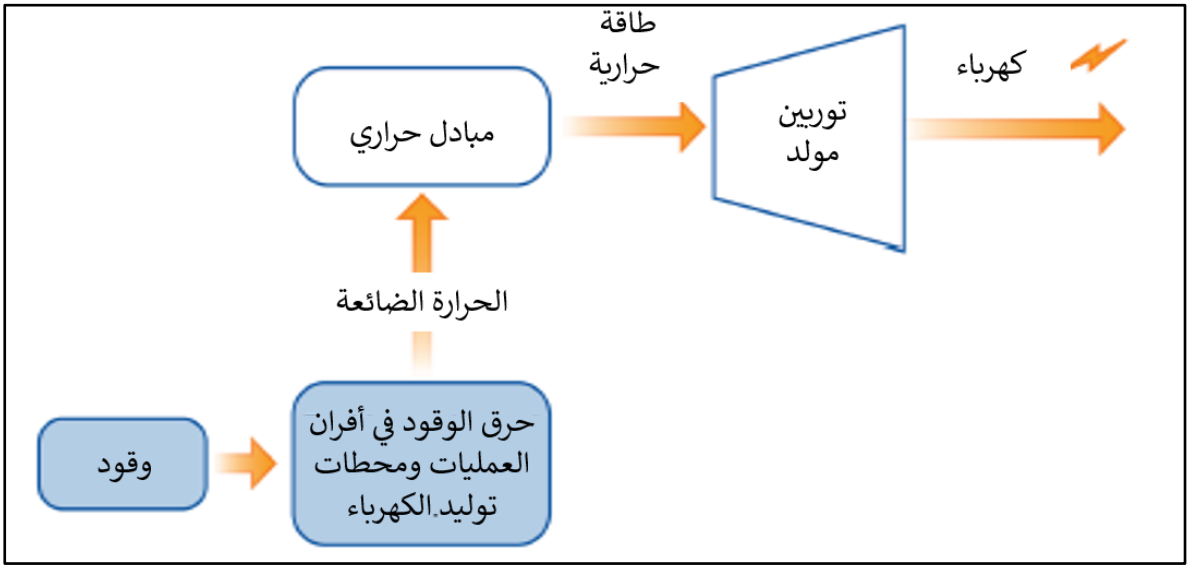
منظومة احتجاز CO_2 من المرجل (Jouhara, et al., 2018). كما يبين الشكل (2-23) مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة في توليد الطاقة الكهربائية. (THALLAM, A., et al., 2021)

الشكل (2-22): مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة لغازات الاحتراق في توليد بخار الماء



المصدر: (THALLAM, A., ALANIS, F., 2021)

الشكل (2-23): مخطط الاستفادة من الحرارة الضائعة في توليد الطاقة الكهربائية



المصدر: (EPA, 2022)

وللتأكد من الجدوى الاقتصادية لمشروع استرداد الحرارة الضائعة يجب الأخذ بالاعتبار العوامل التالية قبل البدء بالمشروع:(Houdek, et al., 2023)

- نوع المادة الحاملة للحرارة الضائعة، هل هي سائلة أم غازية.
- استمرارية المصدر، فيما إذا كان مستمراً أم أنه متقطع أو دوري، وهل عدد ساعات التشغيل تبرر التكاليف اللازمة لتنفيذ المشروع؟
- قيمة الضغط التشغيلي، ومعدل جريان، ودرجة حرارة المادة الحاملة للحرارة الضائعة فيما إذا كانت ثابتة أو أنها متغيرة على مدار السنة.
- نسبة الشوائب الموجودة في المادة الحاملة للحرارة وتأثيرها التآكلي على معادن معدات منظومة استرداد الحرارة.

- **استرجاع الهيدروجين من خطوط غاز المصفاة**

تلعب غازات المصفاة دوراً مهماً في عملية التحول إلى نظام المصفاة المنخفضة الكربون، حيث أنها تعتبر من المخلفات التي لا يمكن تفادي إنتاجها، وفي حال عدم استهلاكها محلياً سيتم حرقها في الشعلة.

تنتج بعض عمليات التكرير في مصافي النفط كمية من الغازات الهيدروكربونية كمنتج ثانوي، يحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين، مما يجعلها قابلة للاستخدام كمصدر من مصادر الهيدروجين اللازم لوحدات المعالجة الهيدروجينية، ويحول الفائض عن حاجة هذه الوحدات إلى شبكة الوقود الغازي ليستخدم كوقود في أفران العمليات، أو كلقيم لوحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري. أو أنها تحرق في الشعلة. أحد الخيارات الممكنة لاستغلال غازات المصفاة هو معالجتها ورفع ضغطها ثم إدخالها إلى عنفة غازية Gas Turbine لتوليد الطاقة الكهربائية بحيث تزود بمنظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون. الخيار الآخر هو استغلال غازات المصفاة في إنتاج الهيدروجين في وحدة التهذيب البخاري، وهذا الخيار يساهم في تأمين حاجة المصفاة من الهيدروجين النظيف، ويخفف أعباء تكاليف استيراد الهيدروجين من الخارج. (Jha, A., et al., 2021) يبين الجدول (2-8) نسبة الهيدروجين في الغازات الفائضة من وحدات المصفاة.

الجدول (2-8): نسبة الهيدروجين في الغازات الفائضة من وحدات المصفاة

الوحدة	الضغط، بار	H_2 % حجماً
التفحيم المؤجلDelayed Coker	10 ~	30-15
التكسير الهيدروجيني	125-40	85-60
نزع الألكلة بالهيدروجين Hydrodealkylation	28-25	75-50
التهذيب بالعامل الحفاز Catalytic Reforming	30-20	88-68
التكسير بالعامل الحفاز	20 ~	18 ~
المعالجة الهيدروجينية	50-20	80-60

المصدر: (Tagliabue, M., 2022)

يتشابه التركيب الكيميائي لغازات المصفاة مع الغاز الطبيعي في أن لهما كثافة كربون متقاربة، ويغلب على مكوناتهما غاز الميثان. إلا أن كمية الحرارة التي تنتج عن حرق غازات المصفاة أعلى من الغاز الطبيعي حيث تبلغ 1.38 ألف وحدة حرارية بريطانية لكل متر مكعب مقارنة ب 1.027 ألف وحدة حرارية بريطانية لكل متر مكعب غاز طبيعي. من جهة أخرى يأتي الغاز الطبيعي إلى المصفاة خالياً من الشوائب بينما غازات المصفاة تحتاج إلى معالجة قبل استخدامها كوقود في الأفران.

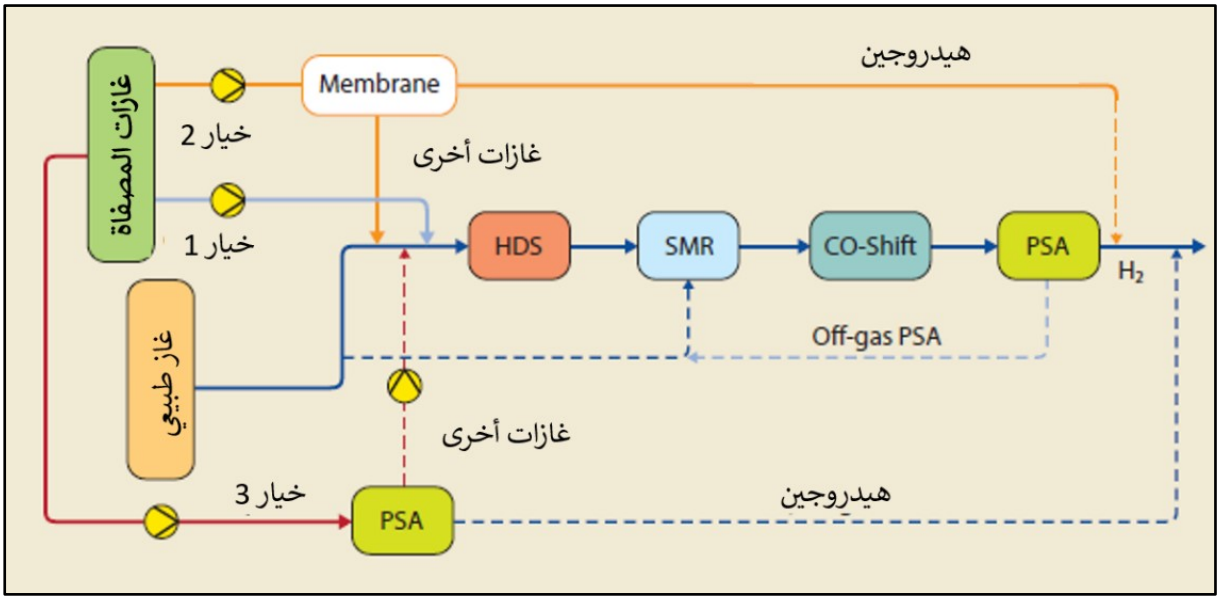
يمكن استرجاع الهيدروجين والهيدروكربونات من غازات المصفاة الفائضة بتطبيق تقنيات عديدة، من أهمها: تقنية الامتصاص بالضغط المتأرجح PSA، وتقنية الفصل بالأغشية Membrane، والتبريد العميق Cryogenic (Liu, N., 2021). يبين الشكل (2-24) خيارات الاستفادة من غازات المصفاة الفائضة. ويبين الجدول (2-9) خصائص طرق استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة.

الجدول (2-9): خصائص طرق استرجاع الهيدروجين من غازات المصفاة

الخصائص	أوعية الضغط المتأرجح PSA	الأغشية Membrane	التبريد Cryogenic
الحد الأدنى للهيدروجين في اللقيم %	50 ~	15	15
السعة، ألف متر مكعب قياسي H2	100-0.1	70-0.5	1000-5
ضغط اللقيم، بار	65-10	120-15	80-10
ضغط الهيدروجين المنتج، بار	قريب من ضغط اللقيم	3/1 من ضغط اللقيم	قريب من ضغط اللقيم
معالجة أولية للقيم	لا	نعم	نعم
نقاوة الهيدروجين %حجماً	99.999 ~	98	97
نسبة استرجاع الهيدروجين، %	90 ~	95	98
سهولة التوسع	+ +	+ + +	+
اقتصاد الحجم	معتدل	صغير	كبير

المصدر: (Tagliabue, M., 2020)

الشكل (2-24): خيارات الاستفادة من غازات المصفاة الفائضة



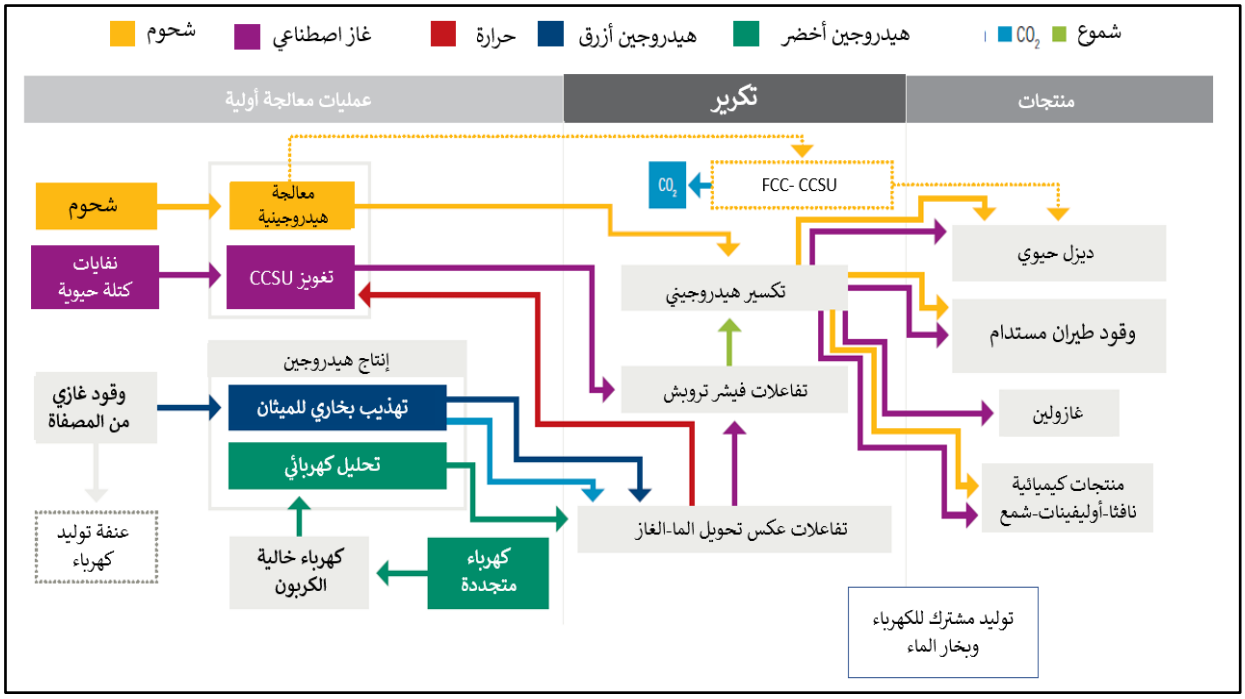
المصدر: (Tagliabue, M., 2022)

2-6: تطبيق مفهوم المصفاة نصف الدائرية Semi-circular refinery

يعتمد مبدأ مصفاة تكرير النفط نصف الدائرية، أو ما يسمى بمصفاة المستقبل، على إعادة استخدام النفايات وتحويلها إلى منتجات ذات قيمة ضمن وحدات المصفاة بدلاً من ترحيلها أو حرقها في الشعلة. يبين الشكل (2-25) مخططاً لرؤية مصفاة المستقبل نصف الدائرية والتي تطبق فيها خيارات خفض الانبعاثات الكربونية، وأهمها:

- تدوير غازات المصفاة لاستخدامها كلقيم في وحدة إنتاج الهيدروجين أو كوقود في محطة توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لعمليات التسخين بدلاً من حرقها في الشعلة.
- تدوير غاز ثاني أوكسيد الكربون المحتجز لاستعماله في وحدة فيشر- تروبش لإنتاج وقود منخفض الكربون
- تغويز الكتلة الحيوية لإنتاج غاز اصطناعي يمكن فصله إلى هيدروجين وغازات أخرى يمكن تحويلها إلى وقود منخفض الكربون بعملية فيشر- تروبش.
- تكرير زيوت حيوية في وحدات المصفاة لإنتاج وقود منخفض الكربون.
- استخدام الكهرباء المتجددة، والهيدروجين الأخضر.

الشكل (2-25): مصفاة المستقبل نصف الدائرية وخيارات خفض الانبعاثات الكربونية



المصدر:(Sharma., B., et al., 2021)

يهدف نظام مصفاة تكرير النفط نصف الدائري إلى إزاحة أو الحد من استعمال بعض المواد المستخدمة في مصفاة تكرير النفط التقليدية. فعلى سبيل المثال، يمكن خفض كمية النفط الخام المكرر باستبداله بوحدة تغويز مخلفات الكتلة الحيوية لإنتاج غاز اصطناعي يتكون من هيدروجين يستخدم في عمليات المعالجة الهيدروجينية في المصفاة، وغازات أخرى يمكن تحويلها إلى وقود منخفض الكربون بعملية فيشر تروبش.

يعتمد نظام مصفاة تكرير النفط نصف الدائري بشكل كبير على عمليات فيشر- تروبش، والتكسير الهيدروجيني، حيث يتركز الهدف من عملية فيشر- تروبش في تحويل الغاز الاصطناعي إلى هيدروكربونات قابلة للحرق. أما الغاز الاصطناعي فيتم إنتاجه بطريقتين، الأولى من تغويز الكتلة الحيوية لتكوين هيدروجين، وأول أوكسيد الكربون CO، وثاني أوكسيد الكربون CO_2، حيث يتم تحويل كل من الهيدروجين وأول أوكسيد الكربون إلى غاز اصطناعي، بينما يتم احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون أو تخزينه أو استعماله في المصفاة. الطريقة الثانية هي عملية التهذيب البخاري للميثان SMR، أو التحليل الكهربائي، يتبع ذلك عملية تحويل ثاني أوكسيد الكربون إلى أول أوكسيد الكربون ودمجه مع الهيدروجين.

تتميز عملية التهذيب البخاري للميثان في أنها تحصل على CO_2 اللازم ذاتياً، بينما تحصل عملية التحلل الحراري على CO_2 من خارج الوحدة أو خارج المصفاة.

في عملية التكسير الهيدروجيني يتم تكسير الدهون المكررة والشموع الناتجة عن عملية فيشر-تروبش إلى منتجات متنوعة مثل الديزل الحيوي أو وقود النفاثات الحيوي، والغازولين، والكيماويات الحيوية.

الفصل الثالث

تطورات مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في العالم

مقدمة

تشهد صناعة تكرير النفط في العالم تحديات ناتجة عن التوجه نحو التحول إلى الطاقة المنخفضة الكربون، مما دفع العديد من المصافي إلى إعداد خطط وتنفيذ مشاريع لتحويل عملياتها بما يتوافق مع هذا التوجه. وتركزت معظم هذه المشاريع في كل من أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية. (أوابك، 2023)

يتناول هذا الفصل أهم المشاريع التي نفذت، أو الجاري تنفيذها أو المخطط إنشاؤها في بعض مناطق العالم. كما يستعرض بعض الأمثلة العملية لمشاريع وخطط نزع الكربون في مصافي تكرير النفط حول العالم، مع الإشارة إلى أهم النتائج التي أمكن تحقيقها أو المتوقع الحصول عليها مستقبلاً.

3-1: مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في أوروبا الغربية

في إسبانيا، وقعت شركة Repsol SA الإسبانية، عقداً مع شركة Axens الفرنسية للحصول على ترخيص التكنولوجيا لوحدة إنتاج وقود حيوي في مصفاة Cartagena طاقتها التكريرية 220 ألف ب/ي. يتكون المشروع من وحدة إنتاج هيدروجين أخضر طاقتها 100 ميغاواط، ووحدة هدرجة الشحوم لإنتاج حوالي 250 ألف طن/السنة من الوقود المتجدد الخالي من الكبريت، والمكون من الديزل، ووقود نفاثات، والنافثا، والبروبان. تبلغ كلفة المشروع 188 مليون يورو، ويأتي في إطار التزام الشركة بخطة تحول الطاقة وتحقيق هدف خفض الانبعاثات إلى الصفر بحلول عام 2050، وفقاً لمتطلبات اتفاقية باريس لتغير المناخ. كما أعلنت الشركة عن خطتها لمضاعفة معدل إنتاج الوقود الحيوي العالي الجودة من الزيوت النباتية لتصل إلى 600 ألف طن/السنة بحلول عام 2030 وعلى مرحلتين، بحيث يتم إنجاز نصف الطاقة الإنتاجية باستخدام الزيوت النباتية المستعملة بحلول عام 2025. كما تتضمن خطة الشركة تنفيذ مشروع لنزع الكربون في مصفاة Bilbao طاقتها التكريرية 220 ألف ب/ي، في مدينة Muskiz

شمال إسبانيا، يتضمن إنشاء وحدة إنتاج هيدروجين أخضر طاقتها 2.5 ميغاواط، بكلفة 8.9 مليون يورو لتزويد المصفاة والمصافي الأخرى المجاورة بالهيدروجين. كما يتضمن المشروع إنشاء وحدتي إنتاج هيدروجين أخضر، الأولى طاقتها 10 ميغاواط في ميناء Bilbao لتزويد الهيدروجين إلى وحدة إنتاج وقود اصطناعي، ستقوم بإنشائها شركة Petronor، ويشترك في ملكيتها كل من شركة Petronor و Repsol وأرامكو السعودية، و EVE، وEnagas. ويتوقع بدء تشغيل المشروع في عام 2024. أما الوحدة الثانية فتبلغ طاقتها 100 ميغاواط والتي ستزود الهيدروجين الأخضر إلى المصافي التابعة لشركة Petronor، ويتوقع إنجاز الوحدة في عام 2025.

من جهة أخرى تخطط شركة Repsol لإنشاء وحدتين لإنتاج الوقود الاصطناعي المتجدد، أو ما يسمى بالوقود الكهربائي (E-fuel) من غاز ثاني أوكسيد الكربون والهيدروجين الأخضر طاقتها 50 ألف ب/ي، بكلفة 60 مليون يورو، ويتوقع بدء تشغيل الوحدة بحلول عام 2024، أما الوحدة الثانية فتعتمد على تحويل 10 آلاف طن/السنة من النفايات البلدية إلى وقود يستخدم في أفران عمليات التكرير في المصفاة بدلاً من الوقود الأحفوري. كما أكدت شركة Repsol أنها تمكنت من تصدير أول شحنة من وقود النفاثات الحيوي المنتج من الوحدة الجديدة التي أنشأتها في مصفاة Puertollano طاقتها التكريرية 150 ألف ب/ي.

في ألمانيا، أعلنت شركة Royal Dutch Shell عن خطة لتحويل مصفاة تكرير النفط Shell Rheinland طاقتها التكريرية 150 ألف ب/ي في مدينة Wesseling الألمانية إلى مصفاة لإنتاج الوقود المتجدد مثل وقود النفاثات الحيوي والغاز الحيوي المسال، وذلك في إطار خططها لخفض الانبعاثات الكربونية إلى الصفر بحلول عام 2050. يذكر أن الشركة قد أعلنت عن بدء تشغيل وحدة تحليل كهربائي لإنتاج الهيدروجين الأخضر طاقتها 10 ميغاواط أطلق عليها اسم Refhyne في مدينة Wesseling، كما تم اتخاذ قرار رفع الطاقة الإنتاجية لهذه الوحدة إلى 100 ميغاواط.

كما يجري العمل في المشروع المشترك الذي أعلنت عنه كل من شركة Bp البريطانية وشركة Orsted الدنماركية لإنشاء وحدة إنتاج هيدروجين أخضر طاقتها الإنتاجية 9,000 طن/السنة في مصفاة Lingen طاقتها التكريرية 100 ألف ب/ي التي تمتلكها شركة Bp في منطقة Emsland شمال غرب ألمانيا. يهدف المشروع إلى استبدال حوالي 20% من إجمالي حاجة المصفاة من الهيدروجين المنتج من الوقود الأحفوري بالهيدروجين الأخضر، وخفض حوالي 80 ألف طن/السنة من انبعاثات غاز ثاني أوكسيد

الكربون في مرحلته الأولية التي ستعزز خطة الشركة في استكمال المرحلة النهائية التي يتوقع أن تساهم في تحويل إجمالي الهيدروجين المستهلك في المصفاة إلى الهيدروجين الأخضر. يعتمد مبدأ عمل هذه الوحدة على إنتاج الهيدروجين الأخضر من عملية التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المولدة من طاقة الرياح. ويتوقع بدء الإنتاج في عام 2024.

في إيطاليا، أعلنت شركة ENI SPA عن بدء إنتاج وقود النفاثات الحيوي في مصفاة تكرير النفط Taranto التي تملكها في إيطاليا طاقتها التكريرية 110 ألف ب/ي. جاء هذا المشروع في إطار خطة الشركة لرفع طاقتها الإنتاجية من الوقود الحيوي في مجمعاتها القائمة إلى 1.1 مليون طن/السنة.

في السويد، وقعت شركة Preem السويدية عقداً مع شركة Honeywell UOP LLC، لاختبار تطبيق تكنولوجيا إنتاج الوقود المتجدد باستخدام تكنولوجيا العمليات المشتركة لتكرير الزيوت المنتجة من التحلل الحراري لنفايات معامل الخشب في السويد في مصفاة Lysekil تبلغ طاقتها التكريرية 220 ألف ب/ي. وفي يونيو/حزيران 2021 أعلنت الشركة عن انجاز المرحلة الأولى والتي تم خلالها تكرير 300 طن في وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، والبدء بالمرحلة الثانية التي تتضمن تكرير 50 ألف طن من زيوت التحلل الحراري خلال السنتين القادمتين.

يذكر أن شركة Preem كانت قد أعلنت عن البدء بمشروع إنشاء وحدة جديدة لإنتاج الوقود الحيوي اعتماداً على زيت الصنوبر كلقيم طاقتها الإنتاجية 16 ألف ب/ي، في مصفاة Gothenburg السويدية طاقتها التكريرية 125 ألف ب/ي، إضافة إلى إنشاء وحدة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون لخفض انبعاثات الكربون، ويتوقع إنجازها في عام 2025. يأتي إنجاز هذه المشاريع في إطار خطة الشركة لخفض انبعاثات الكربون ورفع إنتاج الوقود الحيوي إلى 100 ألف ب/ي بحلول عام 2030.

في فرنسا، وقعت شركة Total Energies عقد تنفيذ التصاميم الهندسية الأولية لوحدة إنتاج وقود حيوي من خلال تحويل 400 ألف طن/السنة من الشحوم الحيوانية مع جزء من الزيوت النباتية المستعملة كلقيم، كجزء من مشروع تحويل موقع مصفاة Grandpuits شمال فرنسا التي تم توقيفها في عام 2015، طاقتها التكريرية 100 ألف ب/ي إلى مجمع لإنتاج الوقود الحيوي بكلفة استثمارية قدرها 500 مليون يورو. ستنتج الوحدة عند تشغيلها حوالي 170 ألف طن/السنة ديزل حيوي، و120 ألف طن/السنة وقود نفاثات حيوي، و50 ألف طن/السنة نافثا متجددة لاستخدامها في إنتاج البلاستيك الحيوي. ويتوقع بدء التشغيل التجاري بحلول عام 2024. يأتي هذا المشروع في إطار خطة فرنسا لرفع

معدل إنتاجها من الوقود المتجدد إلى 5 مليون طن/السنة بحلول عام 2030، وذلك لتحقيق أهدافها التي ترمي إلى التحول إلى الطاقة المنخفضة الكربون بحلول عام 2040.

يذكر أن شركة Total Energies سبق أن نفذت مشروع تحويل مصفاة La Mede المتوقفة طاقتها التكريرية 153 ألف ب/ي، إلى مصفاة لإنتاج زيت الديزل الحيوي ووقود النفاثات الحيوي طاقتها الإنتاجية 500 ألف طن/السنة، وكلفة 310 مليون دولار أمريكي، وبدأ تشغيلها في عام 2019.

في النرويج، وقعت شركة Orbit Orgio AS المتفرعة عن شركة Biojet AS عقداً مع شركة KBR لتقديم التصاميم الهندسية الأولية وأعمال البناء لمشروع إنشاء وحدة لتحويل مخلفات الغابات إلى وقود متجدد في منطقة Ringerike النرويجية. ويتوقع إنجاز المشروع في عام 2026.

في المملكة المتحدة، أعلنت مجموعة INIOS Group عن خطة لاستثمار مليار جنيه استرليني لتنفيذ مشروع خفض انبعاثات غازات الدفيئة في مجمع التكرير والبتروكيماويات الذي تملكه في Grangemouth في اسكتلاندا، الذي يحتوي على مصفاة طاقتها التكريرية 210 ألف ب/ي. يتضمن المشروع إنشاء وحدة إنتاج هيدروجين مزودة بمنظومة احتجاز وتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون، تبلغ طاقتها مليون طن في السنة من غاز CO_2، إضافة إلى تركيب منظومة جديدة لاحتجاز وتخزين ثاني أوكسيد الكربون من وحدة الهيدروجين القائمة في المصفاة. كما تتضمن الخطة إجراءات أخرى لخفض انبعاثات الغازات الدفيئة تعتمد على ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في وحدات المصفاة، إضافة إلى تعزيز عمليات التسخين الكهربائي بدلاً من الطرق الحرارية. يأتي المشروع في إطار خطة شاملة لخفض انبعاثات الكربون في المصفاة إلى أدنى من 2 مليون طن/السنة، أو ما يعادل 60% أدنى من مستوى عام 2005 بحلول عام 2030، ثم إلى الصفر بحلول عام 2045.

من جهة أخرى، أعلنت شركة Phillips 66 في عام 2022 عن إنجاز مشروع رفع طاقة إنتاج الوقود الحيوي من 1,000 ب/ي إلى 3,000 ب/ي في مصفاة Humber طاقتها التكريرية 221 ألف ب/ي، كما تخطط لرفع طاقة إنتاج الوقود الحيوي في المصفاة إلى 5,000 ب/ي بحلول عام 2024.

في هنغاريا، أعلنت مجموعة MOL في مارس/آذار 2021عن بدء الإنتاج في وحدة الديزل المتجدد في مصفاة Duna، في بودابيست طاقتها الإنتاجية 8.1 مليون طن/السنة، وذلك اعتماداً على تقنية

العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية المكونة من الزيوت النباتية المستعملة والدهون الحيوانية مع النفط الخام.

في هولندا، أعلنت مؤسسة .Neste Corp عن توقيع عقد مع شركة Technip Energies لتقديم خدمات إدارة أعمال التصاميم الهندسية والتوريد والإنشاء لمشروع توسيع طاقة إنتاج الوقود المتجدد في مصفاة روتردام لرفع معدل إنتاجها من وقود النفاثات المتجدد إلى 500 ألف طن/السنة بحلول عام 2025. كما أعلنت .Neste Corp عن توقيع عقد مماثل مع الشركة لمشروع إنشاء وحدة لإنتاج وقود نفاثات متجدد منفصلة في روتردام طاقتها الإنتاجية 450 ألف طن/السنة بكلفة 190 مليون يورو، ويتوقع بدء تشغيلها في عام 2023. وفي نوفمبر/تشرين الثاني 2021 أعلنت الشركة عن البدء بتنفيذ مشروع إنتاج هيدروجين متجدد بطريقة التحليل الكهربائي Electrolysers، ومنظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون في مصفاة تكرير النفط Porvoo التي تملكها في فنلندا طاقتها التكريرية 206 ألف ب/ي. يأتي هذا المشروع في إطار خطة .Neste Corp لتحويل إنتاجها من وقود خال من الكربون بحلول عام 2035.

كما أعلنت شركة Royal Dutch Shell عن قرار الاستثمار النهائي لمشروع إنشاء وحدة إنتاج وقود حيوي طاقتها الإنتاجية 820 ألف طن/السنة في مصفاة Pernis بمجمع Shell للطاقة والكيماويات في روتردام، ويتوقع البدء بتشغيل الوحدة في عام 2024، وستكون أكبر وحدة تعتمد على إنتاج الوقود المتجدد من النفايات، مثل الزيوت النباتية المستعملة والدهون الحيوانية والمخلفات الزراعية والصناعية الأخرى في أوروبا. ستنتج الوحدة كمية من الديزل المتجدد تساهم في خفض حوالي 2.8 مليون طن/السنة من انبعاثات CO_2، أو ما يعادل إزالة أكثر من مليون سيارة من طرقات أوروبا. يأتي هذا المشروع في إطار خطة شركة شل لتطوير مصافي النفط التي تملكها بحيث يمكنها تحويل 55% من منتجاتها النفطية إلى وقود متجدد بحلول عام 2030، كما سيساهم المشروع في مساعدة هولندا على تحقيق خطة خفض الانبعاثات إلى الصفر بحلول عام 2050.

من جهة أخرى، أعلنت شركة مصفاة Dutch Refiner Zeeland NV، وهي شركة مشتركة بين Total Energies، وLukoil عن توقيع عقد مع شركة Air Liquid SA لتقديم ترخيص التكنولوجيا لوحدة احتجاز وتسييل غاز ثاني أوكسيد الكربون من غازات المدخنة في وحدة إنتاج الهيدروجين في مصفاة تكرير النفط Vlissingen التي تملكها الشركة، طاقتها التكريرية 148 ألف ب/ي. تهدف الوحدة

الجديدة إلى احتجاز وتسييل حوالي 2400 طن/اليوم من غاز CO_2 والتي تمثل 90% من انبعاثات وحدة إنتاج الهيدروجين. يأتي هذه المشروع في إطار خطة بعيدة الأمد لخفض انبعاثات الكربون في المصفاة بمقدار 800 ألف طن/السنة.

2-3: مشاريع نزع الكربون في أمريكا الشمالية

في ولاية **ألاباما**، أعلنت شركة Vertex Energy Inc. عن تنفيذ مشروع تحويل وحدة التكسير الهيدروجيني القائمة إلى وحدة إنتاج الديزل المتجدد في مجمع موبيل للتكرير والبتروكيماويات الذي تملكه في ولاية ألاباما طاقته التكريرية 75 ألف ب/ي بطاقة إنتاجية قدرها 14 ألف ب/ي، وكلفة 90-100 مليون دولار أمريكي.

كما وقعت شركة CVR Energy عقداً مع شركة Haldor Topsoe لتقديم ترخيص تكنولوجيا العملية والتصاميم الهندسية الأساسية وتوريد المعدات والعامل الحفاز لمشروع تحويل وحدة تكسير هيدروجيني طاقتها 19 ألف ب/ي إلى وحدة إنتاج ديزل متجدد في مصفاة Wynnewood بولاية أوكلاهوما طاقتها التكريرية 74,5 ألف ب/ي. ستنتج الوحدة حوالي 100 مليون غالون/ السنة من الديزل المتجدد باستخدام زيت بذور الصويا كلقيم، وتبلغ كلفة المشروع 110 مليون دولار أمريكي، ويتوقع بدء الإنتاج في مطلع عام 2022. تجدر الإشارة إلى أن شركة CVR Energy تنفذ مشروعاً مماثلاً في مصفاة Coffeyville بولاية كنساس طاقتها التكريرية 132 ألف ب/ي.

في ولاية **تكساس**، أعلنت شركة BioEnergy LLC. عن انطلاق أعمال الإنشاء في مشروع مصفاة حيوية لإنتاج وقود النفاثات المستدام، والديزل المتجدد والنافثا المتجددة من مخلفات الغابات في مدينة Bon Wier بولاية تكساس، طاقتها الإنتاجية 34 مليون غالون/السنة، بكلفة 1.7 مليار دولار أمريكي، مزودة بمنظومة احتجاز وخزن غاز ثاني أوكسيد الكربون. ومن المتوقع بدء تشغيلها في عام 2025. وتعتبر هذه المصفاة المرحلة الأولى من خطة إنشاء 12 مصفاة مماثلة.

كما أعلنت شركة Prairie Energy Partners LLC أن مدينة فيكتوريا بولاية تكساس أو لينكولن بولاية أوكلاهوما هي الخيارات المحتملة لموقع مشروع إنشاء مصفاة خالية الكربون وكاملة التحويل لتكرير النفط الخام الأمريكي الخفيف، والنفوط الصخرية Shale Crudes، لإنتاج وقود منخفض الكربون مكون من الغازولين ووقود النفاثات والديزل، بكلفة قدرها 5.56 مليار دولار أمريكي طاقتها

التكريرية 250 ألف ب/ي. سوف تزود المصفاة بأحدث التقنيات التي تساهم في خفض كمية غازات الدفيئة المنبعثة بمقدار 95%، إضافة إلى خفض معدل استهلاك وإنتاج المياه بمقدار 90% من خلال إعادة استخدام 80% من المياه المنتجة من المصفاة.

إضافة إلى إنشاء منظومة احتجاز وخزن غاز ثاني أوكسيد الكربون في وحدات إنتاج الهيدروجين، ستستخدم المصفاة الهيدروجين الأزرق والأخضر كوقود في أفران العمليات بدلاً من الغاز الطبيعي. كما ستعتمد على استهلاك الطاقة الكهربائية المولدة من مصادر متجددة كالطاقة الشمسية أو طاقة الحرارة الجوفية، أو الناتجة عن منظومة الاستفادة من الحرارة العادمة. ويتوقع بدء التشغيل التجاري للمصفاة في عام 2025.

أما مؤسسة Chevron فقد أعلنت عن خطة لرفع الطاقة التكريرية لمصفاة Pasadena التي تملكها في ولاية تكساس من 110 إلى 125 ألف ب/ي بكلفة 400 مليون دولار. كما يتضمن المشروع تحسين مرونة المصفاة لتكرير أنواع من النفط الخام المنتجة محلياً، علاوة على إنتاج وقود النفاثات وتحسين شروط السلامة في المصفاة، وخفض الانبعاثات. ويتوقع إنجاز المشروع في عام 2024.

كما أعلنت مؤسسة Chevron عن اكتمال عملية شراء مصفاة Geismar بمبلغ 3.15 مليار دولار من مجموعة Renewable Energy Group والبدء بمشروع رفع الطاقة الإنتاجية لوحدة إنتاج الديزل الحيوي من 90 إلى 250 مليون غالون في السنة بكلفة 950 مليون دولار. ويتوقع أن يساهم المشروع في تخفيض 2.8 مليون طن من انبعاثات CO_2 في المصفاة سنوياً،

في ولاية **لويزيانا**، أعلنت شركة Air products عن خطة لإنشاء مجمع للطاقة النظيفة بكلفة استثمارية قدرها 4.5 مليار دولار أمريكي، يتكون من وحدة إنتاج هيدروجين أزرق طاقتها 750 مليون قدم مكعب قياسي في اليوم مزودة بمنظومة احتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون، ستكون الأكبر في العالم. ويتوقع أن يبدأ المشروع بالإنتاج في عام 2026، وسيتم تسويق الهيدروجين المنتج إلى مصافي تكرير النفط ومصانع البتروكيماويات في المنطقة.

كما أعلنت شركة PBF Energy عن توقيع عقد مع شركة Honeywell UOP لتقديم ترخيص تكنولوجيا عملية Ecofining لتحويل وحدة تكسير هيدروجيني متوقفة عن العمل منذ عام 2010 في مصفاة Chalmette في ولاية لويزيانا طاقتها التكريرية 180 ألف ب/ي إلى وحدة إنتاج ديزل حيوي

بطاقة إنتاجية قدرها 20 ألف ب/ي، وتكلفة استثمارية قدرها 550 مليون دولار أمريكي باستخدام زيوت بذور الصويا والذرة والدهون الحيوانية.

من جهة أخرى أعلنت شركة Strategic Biofuels LLC عن مشروع إنشاء مصفاة وقود حيوي جديدة في ميناء كولومبيا طاقتها الإنتاجية 32 مليون غالون/السنة باستخدام نفايات الخشب كلقيم. كما ستحتوي الوحدة على منظومة احتجاز ثاني أوكسيد الكربون، مما يعني أنها ستساهم في إزالة الكربون من البيئة بمعدل أعلى من كمية إنتاجها. تبلغ التكلفة الاستثمارية للمشروع 700 مليون دولار أمريكي، ويتوقع أن يبدأ الإنتاج في نهاية عام 2024.

كما أعلنت شركة "دياموند للديزل الأخضر القابضة" Diamond Green Diesel Holding، وهي شركة مشتركة بين مؤسسة Valero Energy Corp.، ومؤسسة Darling Ingredients بنسبة 50:50% عن توقيع عقد مع شركة Honeywell-UOP للحصول على ترخيص تكنولوجيا العمليات لوحدة إنتاج الديزل الحيوي باستخدام زيوت الطهي المستعملة والزيوت النباتية غير الغذائية، طاقتها الإنتاجية 30 ألف ب/ي في مصفاة Norco لتكرير النفط التي تمتلكها في ولاية "لويزيانا". يذكر أن الشركة كانت قد أعلنت أن هذه الوحدة هي الثانية في مصفاة Norco، وأن عمليات التشغيل التجريبي للوحدة الأولى ستبدأ بطاقة إنتاجية قدرها 30 ألف ب/ي. تجدر الإشارة إلى أن هذه الشركة تقوم حالياً بتنفيذ مشروع إنشاء وقود ديزل حيوي طاقتها 470 مليون غالون في السنة بكلفة 1.1 مليار دولار في مصفاة "فاليرو"، وستكون المصفاة الأكبر لوقود الديزل الحيوي في العالم، ويتوقع أن تبدأ الإنتاج في مطلع عام 2024.

أما مجموعة Renewable Energy Group فقد أعلنت عن توقيع عقد مع John Wood Group PLC لتقديم خدمات إدارة أعمال الهندسة بدء أعمال الإنشاء في مشروع رفع الطاقة الإنتاجية لوحدة إنتاج الديزل الحيوي من 90 مليون غالون في السنة إلى 250 مليون غالون في السنة في مصفاة Geismar بولاية لويزيانا بكلفة 825 مليون دولار أمريكي، ويتوقع أن يساهم المشروع في تخفيض 2.8 مليون طن من انبعاثات CO_2 في المصفاة سنوياً وأن يدخل مرحلة الإنتاج في عام 2024.

وفي ولاية **مونتانا**، أعلنت شركة Calumet Specialty Products LP عن توقيع عقد مع شركة Burns & McDonnel لتقديم أعمال الهندسة والتوريد والإنشاء لمشروع تحويل وحدة التكسير الهيدروجيني القائمة في مصفاة Great Falls، طاقتها التكريرية 30 ألف ب/ي، إلى وحدة إنتاج ديزل

متجدد طاقتها الإنتاجية 5000 ب/ي، باستخدام الدهون الحيوانية، وبذور الصويا كلقيم، إضافة إلى إنشاء وحدة توليد هيدروجين أخضر جديدة. كما يتضمن المشروع رفع الطاقة الإنتاجية لوحدة إنتاج الديزل المتجدد إلى 18 ألف ب/ي بحلول عام 2024.

أما في ولاية **كاليفورنيا** فقد أعلنت شركة Phillips 66 في نهاية عام 2022 عن بدء الإنتاج في مشروع تحويل وحدة المعالجة الهيدروجينية للديزل في مصفاة سان فرانسيسكو لتعمل على إنتاج الوقود المتجدد باستخدام زيوت الطهي المستعملة، والدهون الحيوانية والزيوت النباتية.

كما أنجزت مؤسسة Marathon Petroleum Corp. مشروع تحويل مصفاة Martinez طاقتها التكريرية 161 ألف ب/ي، المتوقفة عن العمل إلى وحدة لإنتاج الوقود المتجدد على مرحلتين، حيث بدأت المرحلة الأولى بإنتاج 17 ألف ب/ي في النصف الأول من عام 2022، ثم ارتفعت في المرحلة الثانية إلى 47 ألف ب/ي بحلول عام 2023.

من جهة أخرى، أعلنت شركة Phillips 66 عن البدء بتشغيل مشروع تحويل وحدة التكسير الهيدروجيني إلى وحدة إنتاج ديزل متجدد طاقتها 8000 ب/ي والذي يشكل المرحل الأولى من مشروع تحويل مصفاة Rodeo التي تملكها في ولاية كاليفورنيا طاقتها التكريرية 120 ألف ب/ي إلى وحدة لإنتاج الوقود الحيوي طاقتها الإنتاجية 50 ألف ب/ي باستخدام لقائم مكونة من الزيوت النباتية المستعملة، والشحوم الحيوانية، وزيوت الصويا، بكلفة استثمارية قدرها 750 إلى 800 مليون دولار أمريكي.

وفي ولاية **واشنطن**، أعلنت شركة BP عن سلسلة من المشاريع الجديدة لتحسين الكفاءة وتقليل الانبعاثات وتوسيع طاقة إنتاج الديزل المتجدد في مصفاة Cherry Point التي تبلغ طاقتها الإنتاجية 238 ألف ب/ي في Blaine، بكلفة استثمارية قدرها 270 مليون دولار، وذلك في إطار خفض الانبعاثات الكربونية الناتجة عن عملياتها إلى الصفر، وتقليل كثافة الكربون للمنتجات التي تبيعها بحلول عام 2050. يهدف المشروع الأول إلى تحسين كفاءة المصفاة من خلال خفض عدد أيام التوقف لإجراء عمليات الصيانة الدورية التي يصاحبها حرق كميات كبيرة من المواد الهيدروكربونية على الشعلة.

تتكون الخطة من مشروع تحسين كفاءة وحدة التكسير الهيدروجيني بكلفة 169 مليون دولار أمريكي الذي سيساهم في خفض استهلاك الوحدة من الهيدروجين الذي تنتجه المصفاة بعملية ينتج عنها إطلاق كمية كبيرة من CO_2، علاوة على خفض معدل استهلاك الوقود في أفران عمليات التكرير.

كما خصصت الشركة مبلغ 55 مليون دولار لمشروع تحسين كفاءة منظومة أبراج مياه التبريد، والذي يهدف إلى خفض إنتاج الغازات الخفيفة مثل الإيثان والميثان التي تحرق كوقود في أفران وحدات المصفاة ومراجل توليد بخار الماء، وبالتالي خفض انبعاثات CO_2. تقدر كمية CO_2 المتوقع تخفيضها من المشروعين بحوالي 165 ألف طن في السنة، والتي تعادل إزاحة 32 ألف سيارة من الطرق سنوياً.

أما المشروع الثالث فيتضمن رفع الطاقة الإنتاجية لوحدة الديزل المتجدد التي بدأ تشغيلها في المصفاة عام 2018، إلى 2.6 مليون برميل في السنة، بكلفة 45 مليون دولار، والذي سيؤدي إلى خفض انبعاثات CO_2 الناتجة عن استهلاك الديزل الذي تسوقه المصفاة بحوالي 400-600 ألف طن /السنة.

في ولاية **نورث داكوتا**، أعلنت مؤسسة Marathon Petroleum Corp. عن إنجاز تجارب اختبار تشغيل وحدة إنتاج الديزل المتجدد الجديدة طاقتها الإنتاجية 12 ألف ب/ي في مصفاة Dickinson التقليدية التي تملكها الشركة باستخدام زيت الصويا وزيت الذرة كلقيم.

وفي ولاية **وايمينغ** Wyoming يجري تحويل مصفاة Cheyenne طاقتها التكريرية 32 ألف ب/ي التي تملكها شركة HollyFronier إلى وحدة إنتاج ديزل حيوي طاقتها الإنتاجية 15 ألف ب/ي، بكلفة استثمارية تقدر بحوالي 750 مليون دولار.

وفي ولاية **كنتاكي**، أعلنت شركة Hemisphere Ltd. عن خطة لتحويل مصفاة تكرير النفط في Somerset طاقتها التكريرية 5,500 ب/ي إلى وحدة لإنتاج حوالي 5 مليون غالون من الديزل الحيوي سنوياً باستخدام زيت الصويا كلقيم، إضافة إلى منتجات ثانوية أخرى، بكلفة قدرها 25 مليون دولار.

في كندا، أعلنت مؤسسة Parkland Fuel Corp. عن خطة لرفع الطاقة الإنتاجية لوحدة إنتاج الوقود الحيوي بمعدل 125%، والتي تستخدم الكانولا والشحوم الحيوانية إلى جانب النفط الخام في مصفاة التكرير المملوكة لشركة Parkland Refining Ltd. المنبثقة عن مؤسسة Parkland Fuel Corp.، طاقتها التكريرية 55 ألف ب/ي. يأتي المشروع في إطار خطة الحكومة الكندية لخفض انبعاثات الكربون الناتجة عن وقود وسائل النقل.

كما أعلنت شركة Covenant Energy Ltd. عن توقيع عقد مع شركة Haldor Topsoe وشركة Gas Liquids Engineering Ltd. لمشروع إنشاء مصفاة جديدة لإنتاج الديزل وكيروسين النفاثات المتجدد جنوب Saskatchewan، والتي تعتبر المصفاة الأولى من نوعها في كندا المخصصة لإنتاج

الوقود المتجدد فقط، بطاقة إنتاجية قدرها 6,500 ب/ي وستعتمد على الزيوت النباتية بشكل كامل ومن بينها زيت الكانولا التي تزرع في كندا. كما ستتضمن المصفاة وحدة إنتاج هيدروجين متجدد تعتمد على تقنية HydroFlex العائدة لشركة Haldor Topsoe باستخدام لقيم من النافثا أو غاز البترول المسال من مصادر متجددة بدلاً من المصادر الأحفورية. ويتوقع بدء تشغيل المصفاة في عام 2024.

كما وقعت شركة Tidewater عقداً مع شركة Haldor Topsoe لتقديم ترخيص تكنولوجيا العمليات لمشروع إنشاء وحدة إنتاج ديزل متجدد، تعتمد على تقنية HydroFlex في مصفاة Prince George طاقتها التكريرية 12 ألف ب/ي إضافة إلى وحدة إنتاج هيدروجين. وتبلغ الطاقة الإنتاجية للوحدة 3,000 ب/ي من الديزل المتجدد.

تأتي مشاريع إنتاج الوقود المتجدد في إطار خطة الحكومة الكندية لتلبية متطلبات التشريعات التي أصدرتها لتخفيض انبعاثات الكربون الناتجة عن الوقود المنتج في كندا بمعدل 13% عن مستواه في عام 2016 وذلك بحلول عام 2030.

3-3: مشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط في آسيا الباسيفيك

في أستراليا، أعلنت شركة Sherdar Australia Bio Refinery Pty. Ltd. عن خطة لإنشاء أول مصفاة لإنتاج الوقود المتجدد في أستراليا طاقتها الإنتاجية 500 ألف طن/السنة، تعتمد على تكنولوجيا شركة Shell لإنتاج الزيت النباتي المهدرج HVO، بكلفة 600 مليون دولار أمريكي.

كما وقعت شركة "بريتش بتروليوم" BP عقداً مع شركة Honeywell UOP للحصول على ترخيص تكنولوجيا عملية Ecofining المطورة من قبل شركتي Honeywell UOP وEni لمشروع تطوير وحدة المعالجة الهيدروجينية المتوقفة في ميناء Kwinana وتحويلها إلى وحدة لإنتاج الديزل المتجدد ووقود النفاثات المستدام طاقتها الإنتاجية 10 آلاف ب/ي. يأتي المشروع في إطار خطة شركة Bp لتحويل ميناء Kwinana إلى مركز لتوزيع وتصدير الطاقة النظيفة، والتي أعلن عنها بعد صدور قرار إغلاق مصفاة Kwinana التي تملكها في أستراليا طاقتها التكريرية 140 ألف ب/ي في عام 2020، وتحويلها إلى محطة لتخزين واستيراد المنتجات النفطية.

وفي الصين، أعلنت كل من شركة Honeywell الأمريكية وشركة Oriental Energy المحدودة الصينية عن خطة لإنشاء مشروع مشترك لإنتاج وقود نفاثات مستدام SAF، في مدينة Maoming بمقاطعة Guangdong طاقتها الإنتاجية 1 مليون طن/السنة، باستخدام زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية كلقيم. تهدف الوحدة التي تعتمد على تقنية Ecofining إلى دعم خطة الصين لخفض انبعاثات أوكسيد الكربون وتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2060، حيث سيساهم المشروع في خفض نحو 2.6 مليون طن/السنة من انبعاثات الكربون.

في ماليزيا، أعلنت كل من شركة Eni الإيطالية، وشركة Euglena اليابانية، وشركة Petronas الماليزية عن إنشاء مشروع مشترك لبناء مصفاة حيوية جديدة في مجمع تكرير وبتروكيماويات Pengerang المتكامل، طاقتها 650 ألف طن/السنة لإنتاج 12.5 ألف ب/ي من الوقود الحيوي. ويتوقع بدء تشغيل المصفاة في عام 2025.

في سنغافورة، يجري حالياً تنفيذ مشروع توسيع الطاقة الإنتاجية لوحدة إنتاج الديزل المتجدد التي تملكها مؤسسة Neste Corp. في سنغافورة طاقتها الإنتاجية 1.3 مليون طن/السنة بكلفة 1.4 مليار يورو. يهدف المشروع إلى تمكين الوحدة من رفع طاقة الوحدة الإنتاجية من وقود النفاثات المتجدد بحوالي 1 مليون طن/السنة، وبذلك سيرتفع معدل إنتاج مؤسسة Neste Corp. الإجمالي من الوقود المتجدد إلى 4.5 مليون طن/السنة. يأتي ذلك في إطار خطة المؤسسة لتحقيق الحياد الكربوني في عملياتها الإنتاجية بحلول عام 2035، وتخفيض انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن استهلاك منتجاتها بحوالي 20 مليون طن/السنة على الأقل بحلول عام 2030.

3-4: مشاريع نزع الكربون في الدول الأعضاء في أوابك

شهدت صناعة تكرير النفط في الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك" في العقد المنصرم تنفيذ مشاريع رائدة تهدف إلى إنتاج مشتقات عالية الجودة بمواصفات متوافقة مع أحدث المعايير الدولية، من خلال إنشاء مصافٍ متطورة مثل مصفاة "جازان" في المملكة العربية السعودية طاقتها التكريرية 400 ألف برميل/اليوم، ومصفاة "كربلاء" في جمهورية العراق طاقتها التكريرية 140 ألف ب/ي، ومشروع الوقود النظيف في دولة الكويت الذي يتكون من تطوير مصفاتي "ميناء الأحمدي" و"ميناء عبد الله" القائمتين وإنشاء مصفاة الزور الجديدة طاقتها 615 ألف ب/ي،

بدلاً من مصفاة "ميناء الشعيبة" التي تم توقيفها نظراً لقدمها، فضلاً عن مشاريع تطوير وتوسيع المصافي القائمة في العديد من الدول الأعضاء، بهدف تحسين مرونتها لتكرير أنواع ثقيلة ومتنوعة من النفط الخام، وتعديل هيكل منتجاتها بما يتوافق مع التوقعات المستقبلية لتغير الطلب على أنواع الوقود في الأسواق العالمية، مثل مشروع تطوير مصفاة "الرويس" في دولة الإمارات العربية المتحدة، ومصفاة "سترة" في مملكة البحرين، ومصفاة الشرق الأوسط "ميدور" في جمهورية مصر العربية. (أوابك، 2023)

جاءت هذه التطورات جنباً إلى جنب مع الإعلان عن الخطط الاستراتيجية الوطنية لخفض انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون بما يتوافق مع التوجه العالمي نحو نزع الكربون والتحول إلى استخدام الطاقة النظيفة. وتأتي في مقدمة هذه المبادرات المبادرتان اللتان أطلقتهما المملكة العربية السعودية في أكتوبر 2021، **وهما "مبادرة السعودية الخضراء"، و"مبادرة الشرق الأوسط الأخضر"**، لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر بحلول عام 2060، باستثمارات تبلغ حوالي 187 مليار دولار أمريكي، وذلك بهدف رفع نسبة الطاقة الكهربائية المتولدة من مصادر متجددة في المملكة من 1% إلى 30% والتوسع في إنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق والأمونيا الزرقاء، وإنشاء وحدات اصطياد وتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون.

كما أولت بعض الدول الأعضاء اهتماماً باستخدام وقود الطيران المستدام، حيث أجرت دولة الإمارات العربية المتحدة تجارب لاستخدامه في إحدى طائراتها، والتزمت شركة البترول الكويتية العالمية بتوفير منتجات مستدامة لعملائها بجانب الوقود التقليدي، وخلال عام 2021 بدأت الشركة بتزويد مطار غاتويك البريطاني بأول شحنة من الوقود النظيف، وفي سبتمبر/أيلول 2022، وقّعت الشركة اتفاقية مع شركة "إيزي جيت" لتزويدها بوقود الطيران المستدام. وسبق أن أعلنت شركة الفنار السعودية، خلال شهر مارس/آذار 2022، خططها لإنتاج الوقود المستدام وتطويره في شمال شرق بريطانيا بدعم من الحكومة البريطانية.

فيما يلي أهم مشاريع نزع الكربون المنفذة أو الجاري تنفيذها أو المخطط لتنفيذها في الدول الأعضاء في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك" والتي تركزت في صناعة التكرير والبتروكيماويات ومعالجة الغاز الطبيعي.

في دولة الإمارات العربية المتحدة، أعلنت شركة بترول أبو ظبي الوطنية "أدنوك" عن تنفيذ مشروع استرجاع للطاقة المهدرة من التوربينات الغازية القائمة في مصافي النفط التابعة للشركة، لإنتاج

الطاقة الكهربائية بنحو 230 ميغاوات ونحو 62.4 ألف متر مكعب في اليوم من المياه المقطرة بكلفة 600 مليون دولار. يأتي هذا المشروع في إطار جهود ترشيد استهلاك الطاقة ضمن خطة خفض انبعاثات الكربون في المنشآت الصناعية.

كما تجدر الإشارة إلى إعلان دولة الإمارات العربية المتحدة عن استثمار مليارات الدولارات لمشاريع زيادة إنتاج الطاقة من المصادر المتجددة، وتعزيز إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في كافة القطاعات المستهلكة للطاقة، ومنها مصافي تكرير النفط، إضافة إلى التوسع في إنتاج الهيدروجين الأخضر الذي يعتبر مصدراً للطاقة المنخفضة الكربون، وتطبيق تقنية اصطياد وتخزين ثاني أوكسيد الكربون.

في مملكة البحرين، أنشأت شركة الخليج لصناعة الكيماويات" جيبيك" في عام 2010 أول منظومة لاحتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون بطاقة 0.64 مليون طن/السنة، وهو ما يمثل أكثر من 40% من انبعاثاتها. تستخدم كمية CO_2 المحتجزة، والمقدرة بحوالي 0.52 مليون طن/السنة في تعزيز إنتاج الشركة من الأمونيا، واليوريا، بينما تستخدم نحو 0.12 مليون طن/السنة لتعزيز إنتاج الميثانول بحوالي 26 ألف طن/السنة. وبلغت التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 52 مليون دولار.

كما قامت شركة غاز البحرين الوطنية BANAGAS في عام 2019 باحتجاز نحو 110 ألف طن/السنة من غاز ثاني أوكسيد الكربون، واستخدمتها في تعزيز إنتاج النفط في حقل "البحرين". وتمتلك الشركة خططاً مستقبلية طموحة لاحتجاز كميات إضافية من غاز ثاني أوكسيد الكربون لتصل إلى نحو 0.5 مليون طن.

في المملكة العربية السعودية، أعلنت شركة أرامكو السعودية عن توقيع اتفاقية مع شركة Gulf Cryo لإنشاء منظومة احتجاز وتخزين واستخدام غاز ثاني أوكسيد الكربون في وحدة إنتاج المونوإيثيلين غليكول التي تبلغ طاقتها الإنتاجية 600 ألف طن/السنة في مجمع تكرير وبتروكيماويات بترورابغ. تهدف المنظومة إلى خفض انبعاثات الكربون من المجمع وإنتاج نحو 300 ألف طن من غاز ثاني أوكسيد الكربون النقي المستخدم في صناعة المواد الغذائية، والباقي سيوزع على شكل سائل إلى الوحدات المجاورة لاستخدامات صناعية. يأتي هذا المشروع، المتوقع بدء تشغيله في عام 2023، ضمن جهود المملكة لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر بحلول عام 2060.

تخطط الشركة السعودية للصناعات الأساسية "**سابك**" ضمن إستراتيجيتها لعام 2025، لتنفيذ مشروع ضخم لاحتجاز 0.5 مليون طن/السنة من غاز ثاني أوكسيد الكربون الناتج من وحدات إنتاج الإيثيلين غلايكول من مصانعها في شركة "المتحدة". تصل التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 650 مليون ريال سعودي. كما تخطط الشركة للسماح للمنشآت الصناعية القريبة منها، من المشاركة في تشييد شبكة أنابيب برية لنقل غاز ثاني أوكسيد الكربون من مصادره المختلفة، واستخدامه في تصنيع منتجات متنوعة ذات قيمة مضافة مثل اليوريا، والميثانول، الهكسانول.

في دولة قطر، قامت الشركة الوطنية للإضافات البترولية المحدودة (QAFAC)، في عام 2014، بتشغيل مصنع لاحتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون، واستخدامه في تعزيز إنتاج الميثانول، وهو ما ساهم في زيادة إنتاج الميثانول بمقدار 250 طن/ اليوم، وخفض كمية انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون بمقدار 500 طن/ اليوم.

وفي عام 2019 تم تدشين مشروع لاحتجاز غاز ثاني أوكسيد الكربون الناتج عن معالجة الغاز الطبيعي" من حقل الشمال" بمنطقة "راس لفان" بطاقة 2.1 مليون طن سنوياً، وتخزينه بشكل دائم، ويتوقع أن يرتفع إلى حوالي 5 مليون طن/السنة بحلول عام 2025، مما سيحقق خفض في انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 2 % من إجمالي انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في الدولة.

3-5: أمثلة عملية لمشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط

شهدت صناعة تكرير النفط خلال السنوات الخمس الماضية تطوراً ملحوظاً في تنفيذ إجراءات نزع الكربون، تركز معظمها في دول أوروبا الغربية وأمريكا الشمالية، وفيما يلي بعض الأمثلة العملية لمشاريع نزع الكربون في مصافي تكرير النفط حول العالم.

3-5-1: مشروع نزع الكربون في مصفاة -جنوب شرق آسيا

تركزت إجراءات خفض انبعاثات CO_2 في مصفاة جنوب شرق آسيا على تطبيق خيارين، هما تحسين كفاءة استخدام الطاقة، وتغيير نوع الوقود المستخدم في الأفران، بينما استبعد خيار تركيب منظومة احتجاز CO_2 نظراً لتوزع أماكن الأفران وصعوبة تجميع غازات الاحتراق. ولتنفيذ الخيارين المذكورين تم اعتماد تطبيق الإجراءات التالية:

- تعظيم ظروف التشغيل وإزالة الثغرات المسببة لضعف كفاءة استخدام الوقود.
- تركيب منظومة الاستفادة من حرارة غازات المداخن في تسخين هواء الاحتراق الداخل إلى الفرن.
- استبدل الوقود المستخدم في الأفران من زيت الوقود إلى الوقود الغازي.

قبل البدء بتطبيق الإجراءات المذكورة تم تقييم ظروف التشغيل الحالية للأفران، حسب المبين في الجدول (3-1)، بهدف الوقوف على مواطن الضعف التي تسبب انخفاض كفاءة استخدام الوقود. وقد أشارت نتائج تحليل البيانات إلى أن الأفران تعمل بكفاءة لا تزيد عن 75%، بسبب ارتفاع نسبة هواء الاحتراق الزائد إلى 38%، وعدم وجود مسخن لهواء الاحتراق أو منظومة استرجاع الحرارة الضائعة من غازات المدخنة.

الجدول (3-1): بيانات ظروف التشغيل الأساسية لأفران المصفاة

المعايير	القيم
طاقة الحرارة الممتصة في الفرن	23 مليون كيلو كالوري/الساعة
كمية الوقود المستهلك	3128 كغ/الساعة
نسبة الأوكسجين عند القوس	6% حجماً (جاف)
مواصفات الوقود	• الكثافة النوعية1.01 (زيت وقود نوع 6) • نسبة C /H = 8.196 • محتوى الكبريت 0.5% وزناً حد أقصى
درجة حرارة غازات الاحتراق عند مخرج المدخنة	400 °م
إجمالي كمية غازات الاحتراق	1512 طن متري/اليوم
كمية CO_2 المنبعثة	242 طن متري/اليوم

المصدر: (Singh, S., Mukherjee, R., 2021)

ولمعالجة الثغرات المسببة لانخفاض كفاءة الأفران تم تنفيذ الخطوات التالية:

- خفض مستوى هواء الاحتراق الزائد من 38% إلى 25% حجماً، وذلك حسب معيار معهد البترول الأمريكي API، وذلك بهدف خفض استهلاك الوقود.
- تركيب منظومة تسخين الهواء الداخل إلى الحراقات.
- دراسة إمكانية استبدال زيت الوقود المستخدم بالوقود الغازي المنتج في وحدات المصفاة، حسب البيانات المبينة في الجدول (3-2). وقد تم تأجيل عملية الاستبدال لأنها ستؤدي إلى

وجود فائض في زيت الوقود، مما يستوجب إنشاء وحدة لتحويل زيت الوقود إلى منتجات خفيفة مثل وحدة التفحيم المؤجل.

الجدول (3-2): بيانات عملية استبدال زيت الوقود بالوقود الغازي المنتج في المصفاة

المعايير	مرحلة 1 تنظيم نسبة الأوكسجين	مرحلة 2 تركيب منظومة تسخين هواء الاحتراق	مرحلة 3 التحويل إلى الوقود الغازي	مرحلة 4 تنظيم ظروف تشغيل الفرن على حرق الغاز
طاقة الحرارة الممتصة في الفرن	23 مليون كيلو كالوري/الساعة	23 مليون كيلو كالوري/الساعة	23 مليون كيلو كالوري/الساعة	23 مليون كيلو كالوري/الساعة
كمية الوقود المستهلك	3028 كغ/الساعة	2636 كغ/الساعة	2366 كغ/الساعة	2304 كغ/الساعة
نسبة الأوكسجين عند القوس	4.3% حجماً (جاف)	3.6% حجماً (جاف) 20% أوكسجين زائد	3% حجماً (جاف)	2.9% حجماً (جاف)
مواصفات الوقود	• الكثافة النوعية 1.01 (زيت وقود نوع 6) • نسبة C /H = 8.196 • محتوى الكبريت 0.5% وزناً حد أقصى	• H_2: 25% • N_2: 6.5 • CH_4: 36% • C_2H_6: 16% • C_2H_4: 11.8%		
حرارة غازات الاحتراق الخارجة من منطقة الحمل	390 °م	370 °م	363 °م	360 °م
نقطة تكاثف حمض غازات المدخنة	131 °م	131 °م	111 °م	111 °م
درجة حرارة غازات المدخنة الخارجة من المسخن الأولي	390 °م (لا يوجد مسخن)	155 °م	155 °م	135 °م
إجمالي كمية غازات الاحتراق	1333 طن متري/اليوم	1116 طن متري/اليوم	1040 طن متري/اليوم	1012 طن متري/اليوم
كمية CO_2 المنبعثة	234 طن متري/اليوم	204 طن متري/اليوم	144 طن متري/اليوم	140 طن متري/اليوم

- اختبار حالة استخدام وقود غازي يحتوي على نسبة 60% حجماً من الهيدروجين، وأشارت النتائج إلى خفض كمية CO_2 المنبعثة من 242 إلى 92 طن متري في اليوم. يبين الجدول (3-3) نتائج دراسة استخدام وقود يحتوي على 60% حجماً هيدروجين. وللتأكد من انعكاسات عملية التحويل على سلامة الفرن تم إجراء مقارنة بين حرارة أنابيب ومعادن الفرن والمعادن الأخرى، حيث أشارت نتائج تحليل البيانات أن زيادة الإشعاع الحراري وارتفاع درجة حرارة الأنابيب

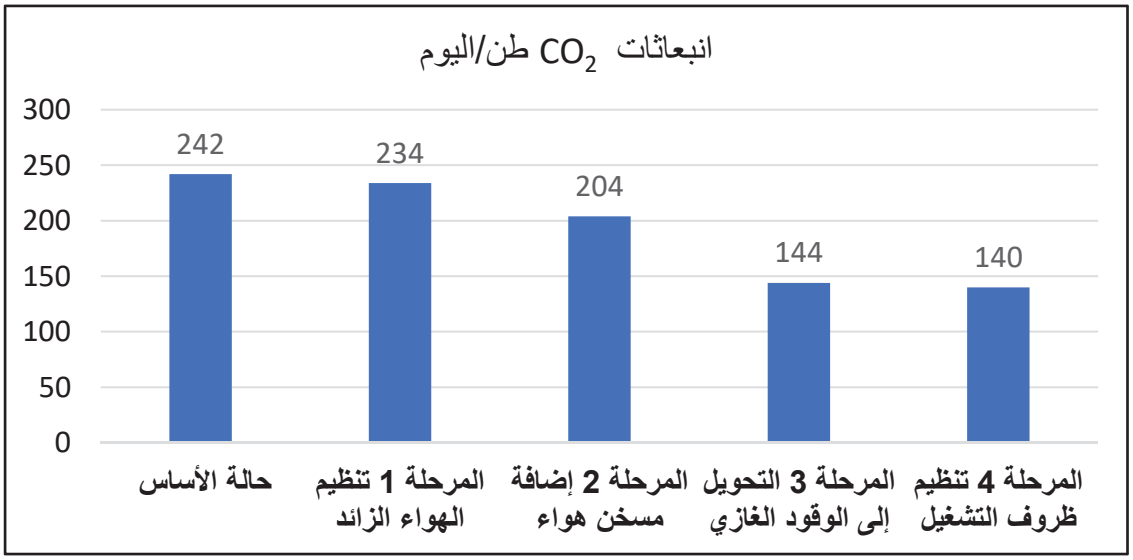
والمعادن، والجسور الحاملة للأنابيب تقع ضمن المجال المسموح في القيم التصميمية للفرن، ولنوعية المعادن المستخدمة في الأفران.

الجدول (3-3): نتائج دراسة استخدام وقود يحتوي على 60% حجماً هيدروجين

المعايير	القيم
طاقة الحرارة الممتصة في الفرن	23 مليون كيلو كالوري/الساعة
كمية الوقود المستهلك	1705 كغ/الساعة
نسبة الأوكسجين عند القوس	2.4% حجماً (جاف)
مواصفات الوقود	H_2: 60% حجماً، CH_4: 40% حجماً
درجة حرارة غازات الاحتراق الخارجة من منطقة الحمل	~ 350 °م
درجة حرارة غازات الاحتراق الخارجة من مسخن الهواء	135 °م
إجمالي كمية غازات الاحتراق	987 طن متري/اليوم
كمية CO_2 المنبعثة	92 طن متري/اليوم

أظهرت نتائج تطبيق الإجراءات التي طبقت أن إجمالي كمية CO_2 التي تم تخفيضها تقدر بنحو 102 طن/اليوم. يبين الشكل (3-1) مقدار تخفيض CO_2 الناتج عن الإجراءات المتخذة في أفران المصفاة. كما يبين الجدول (3-4) مقارنة معايير أداء الفرن قبل وبعد التعديل.

الشكل (3-1): مقدار تخفيض CO_2 الناتج عن الإجراءات المتخذة في أفران المصفاة



المصدر: (Singh, S; Mukherjee, R;, 2022)

الجدول (3-4): مقارنة معايير أداء الفرن قبل وبعد التعديل

المعايير	قبل	بعد
طاقة حرارة الإشعاع، مليون كيلو كالوري/الساعة	15.42	17.1
طاقة حرارة الحمل، مليون كيلو كالوري/الساعة	7.52	5.94
كمية حرارة الإشعاع، كيلو كالوري/الساعة. م^2	33478	36938
درجة الحرارة القصوى لمعدن الأنابيب (حسابياً)، °م	584	592
درجة حرارة جدار الجسور، °م	820	838
درجة حرارة غازات الاحتراق الخارجة من منطقة الحمل، °م	400	360

المصدر: (Singh, S; Mukherjee, R;, 2022)

3-5-2: مشروع إعداد خطة خفض انبعاثات الكربون في مصفاة أوروبية

قامت إحدى مصافي تكرير النفط الأوروبية بإعداد خطة لخفض انبعاثات الكربون من 33966 ألف طن/السنة إلى 15300 ألف طن/السنة بحلول عام 2030. (Baars & Parvez, 2023)

تبلغ الطاقة التكريرية للمصفاة 240 ألف ب/ي، وتحتوي على وحدات تحويلية أهمها، وحدة تفحيم مؤجل ووحدة تكسير هيدروجيني، كما يبلغ إجمالي كمية CO_2 المنبعثة من المصفاة نحو 33966 ألف طن/السنة، تم توزيع هذه الانبعاثات ضمن ثلاث مجالات على النحو المبين في الجدول (3-5).

الجدول (3-5): انبعاثات CO_2 في مصفاة طاقتها التكريرية 240 ألف ب/ي

	المجال الأول	المجال الثاني	المجال الثالث	الإجمالي
ألف طن/السنة CO_2	1868	271	31827	33966
%	6	1	92	

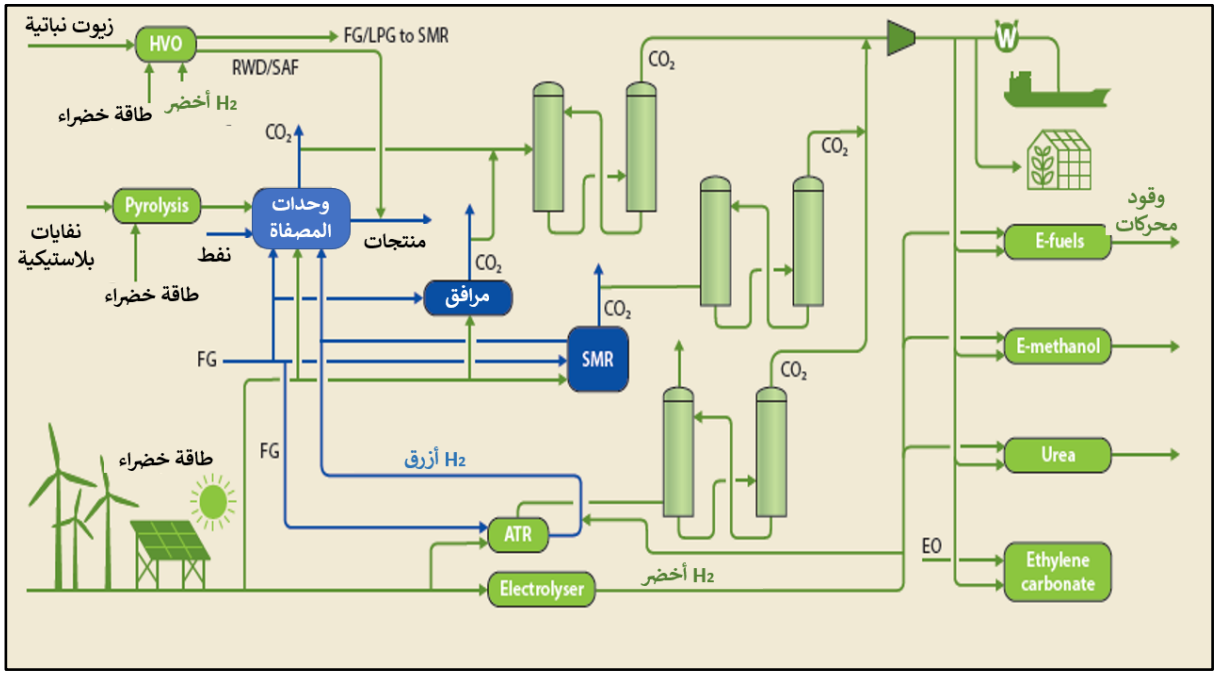
يعتمد المجال الثاني على الانبعاثات الناتجة عن توليد الطاقة الكهربائية بكفاءة 50% باستخدام الغاز الطبيعي كوقود. أما المجال الثالث فيعتمد على الانبعاثات الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري في الأفران مثل غاز البترول المسال والنافثا والكيروسين والديزل وزيت الوقود والفحم التي لها متوسط محتوى كربون 85%.

لتنفيذ خطة خفض انبعاثات CO_2 في المصفاة تم اعتماد المسارات الرئيسية التالية:

- تحسين كفاءة الطاقة.

- تغيير نوع الوقود المستخدم، كاستخدام الهيدروجين الأزرق أو الأخضر كوقود أو استخدام التسخين الكهربائي في الأفران بدلاً من زيت الوقود الثقيل.
- استبدال النفط الخام بمواد متجددة، مثل النفايات البلاستيكية، والزيوت النباتية.
- احتجاز CO_2. يبين الشكل (3-2) مسارات احتجاز CO_2 في خطة نزع الكربون في المصفاة، والتي تتكون من فرص ما بعد الاحتراق وفرص ما قبل الاحتراق. كما تتضمن الخطة خيارات استخدام الغاز المحتجز، سواء من خلال الحقن في آبار النفط لتعزيز الإنتاج، أو استخدام حوالي 400 ألف طن/السنة في المشاريع الزراعية لتنمية النباتات في موقع المصفاة لتفادي تكاليف التسييل والنقل بواسطة السفن إلى موقع آبار النفط، أو تحويله إلى وقود محركات باستخدام الهيدروجين الأخضر أو بدونه، أو في إنتاج اليوريا، أو في تصنيع مواد البناء، أو تصنيع كربونات الإيثيلين.

الشكل (3-2): مسارات احتجاز CO_2 في خطة نزع الكربون في المصفاة



المصدر: (Baars & Parvez, 2023)

بعد تحديد فرص تحسين كفاءة الطاقة في الأفران تم إعداد دراسة شاملة لمعرفة التكلفة المحتملة، وكمية CO_2 الممكن تخفيضها، من كل فرصة. وذلك على النحو المبين في الجداول (3-6)، (3-7)، (3-8)، (3-9)، (3-10).

الجدول (3-6): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات تحسين كفاءة الطاقة واستبدال نوع الوقود
(تسعير أوروبا الغربية 2019)

البند	تخفيض CO_2 (ألف طن/السنة)	تكاليف استثمارية (مليون يورو)	التوفير (يورو/طن CO_2)	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر مرافق أعلى ب 30%
كفاءة الطاقة				
استبدال/تعديل الفرن	74	97	4-	44-
استبدال نوع الوقود				
تحويل محركات بخارية إلى كهربائية خضراء [1]	18	3	299	384
كهرباء من مصادر متجددة [2]	271	0	52	67
استعمال الهيدروجين الأزرق كوقود	273	[3] 381	[4] 238	261
استعمال الهيدروجين الأخضر كوقود [5]	370	514	996	1273
تسخين كهربائي [6]	370	121	457	584

(1): عدد التوربينات البخارية 10 طاقة كل منها تتراوح بين 40-2000 كيلووات
(2): تستورد المصفاة 82 ميغاوات تم تحويلها إلى كهرباء خضراء.
(3): فرن عدد اثنان طاقة كل منهما 100 ميغاوات، وحدة إنتاج هيدروجين أزرق جديدة.
(4): بدون تكاليف التخلص من CO_2
(5): تكلفة المحلل الكهربائي الواحد 650 يورو/كيلووات.
(6): فرن عدد اثنان طاقة كل منهما 100 ميغاوات.

الجدول (3-7): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات استبدال النفط الخام بمواد متجددة

(تسعير أوروبا الغربية 2019)

البند	لقيم (ألف طن/السنة)	لقيم متجدد % نفط	تخفيض CO_2 (ألف طن/السنة)	تكاليف استثمارية (مليون يورو)	التوفير (يورو/طن CO_2)	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر مرافق أعلى ب 30%	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر النفايات البلاستيكية والزيت النباتي أعلى ب 30%
نفايات بلاستيكية	67	0.7	195	45	58- (1)	54-	38-
زيت نباتي	1300	15	3878	763	13- (2)	8-	28

(1): بفرض المنتجات الناتجة عن النفايات البلاستيكية خضراء وتزيد قيمتها 100 يورو للطن عن الوقود الأحفوري. تكلفة النفايات البلاستيكية 200 يورو/الطن.

(2): بفرض المنتجات الناتجة عن الزيوت النباتية تزيد قيمتها 100 يورو للطن عن الوقود الأحفوري، تبلغ تكلفة الزيوت النباتية 400 يورو/الطن بدون تكلفة التخلص من CO_2.

الجدول (3-8): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات احتجاز الكربون **(تسعير أوروبا الغربية 2019)**

البند	تخفيض CO_2 (ألف طن/السنة)	تكاليف استثمارية (مليون يورو)	التوفير (يورو/طن CO_2) (2)	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر مرافق أعلى ب 30%
احتجاز قبل الاحتراق	378	128	33	35
احتجاز بعد الاحتراق	1172 (1)	294	93	112

(1): تقريبي

(2): بدون تكاليف التخلص من CO_2

الجدول (3-9): كمية تخفيض CO_2 وتكاليف إجراءات التخلص منه **(تسعير أوروبا الغربية 2019)**

البند	تخفيض CO_2 (ألف طن/السنة)	تكاليف استثمارية (مليون يورو)	التوفير (يورو/طن CO_2)	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر مرافق أعلى ب 30%
التخلص من CO_2				
نقل، إسالة، تخزين (1)	1172	152	80	85
نقل إلى الدفيئات (خط أنابيب جديد)	436	33	8	8

(1): النقل عبر خط أنابيب أرضي بطول 10 كم، ثم نقل بواسطة السفن لمسافة 1000 كم إلى موقع التخزين

الجدول (3-10): خيارات استخدام CO_2 وتكاليفها (بدون تكاليف الاحتجاز) (تسعير أوروبا الغربية 2019)

البند	استخدام CO_2 (ألف طن/السنة)	تكاليف استثمارية (مليون يورو)	التوفير (يورو/طن CO_2) [1]	التوفير (يورو/طن CO_2) عند سعر مرافق أعلى ب 30%
ميثانول متجدد	100	207	[2] 613	792
وقود متجدد	100	285	[2] 473	612
يوريا	100	456	[2] 374	459
كربونات الإيثيلين	100	66	[3] 66-	78-

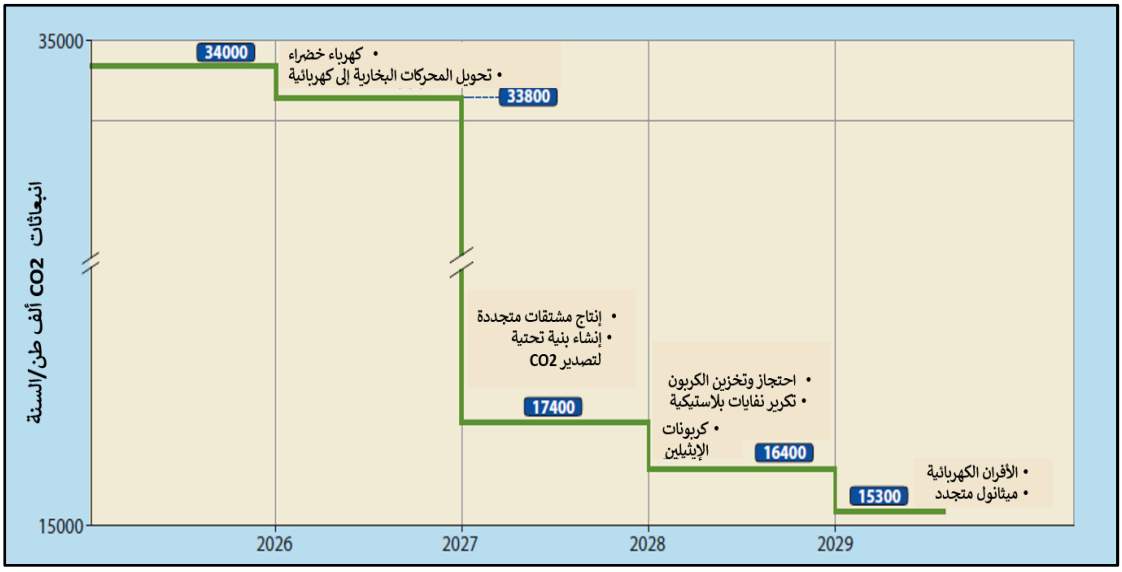
(1): مع الأخذ بالاعتبار توفير تكاليف التشغيل وخفض انبعاثات CO_2 من عمليات الإنتاج من الوقود الأحفوري.
(2): اعتماداً على زيادة سعر المنتجات بنحو 100 يورو/الطن مقارنة بالمنتجات الأحفورية.
(3): سعر كربونات الإيثيلين = 0.55 X سعر أوكسيد الإيثيلين.

كما قام فريق المشروع بإعداد جدول زمني لتنفيذ الإجراءات التي تمكن المصفاة من تحقيق هدف تخفيض انبعاثات CO_2 بمعدل 55% من القيمة الأساس أي ما قبل عام 1990، وبافتراض أن تكلفة الكهرباء تبلغ 30 يورو/ ميغاوات ساعة بحلول عام 2030 على النحو المبين في الشكل (3-3). وهذه الإجراءات تشمل ما يلي:

- معالجة 5.25 مليون طن متري من الزيوت النباتية، وذلك في الوحدات الجديدة لهدرجة الزيوت النباتية HVO، ومن خلال عمليات المعالجة المشتركة في كل من وحدات المعالجة الهيدروجينية القائمة للديزل (DHT) ووحدات التكسير الهيدروجيني (HCUs).
- تخفيض ما نسبته 40% في معدل تكرير النفط الخام.
- إنشاء عدة خطوط تدوير للنفايات البلاستكية بطاقة إجمالية قدرها 150 ألف طن/السنة.
- استبدال الأفران التي تعمل على الوقود بأخرى تعمل بالتسخين الكهربائي.
- توليد 700 ميغاوات من الكهرباء الخضراء لاستخدامها في مجالات متعددة.
- إنتاج ميثانول كهربائي بطاقة إنتاجية قدرها 190 ألف طن/السنة.

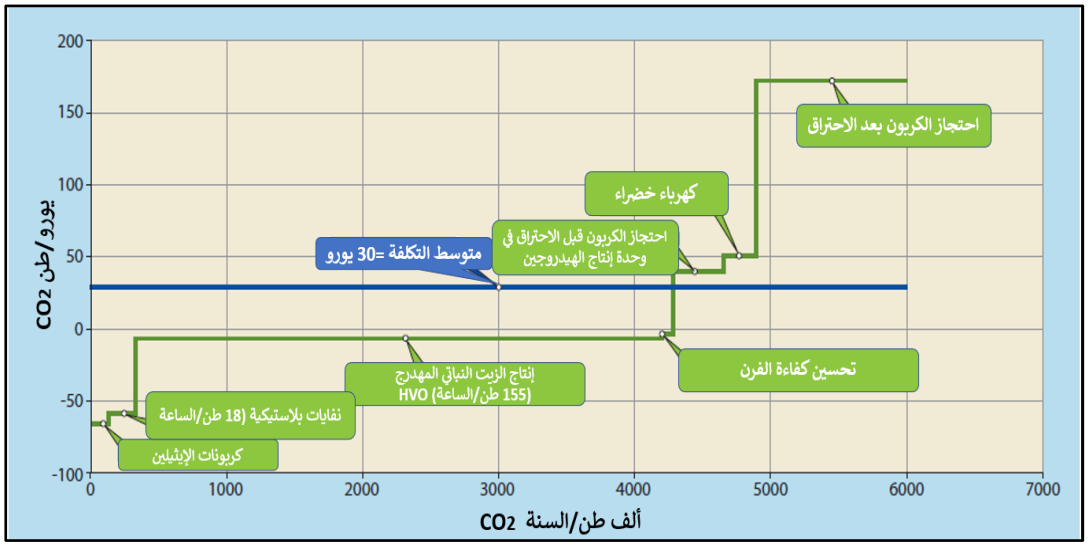
تتوقف إمكانية تنفيذ خارطة طريق خفض انبعاثات الكربون في مصافي النفط على عدة عوامل، من أهمها تكلفة الطاقة الكهربائية وأسعار الكتلة الحيوية وغيرها. ولتقييم تكاليف إجراءات خفض الكربون المزمع تطبيقها تم إعداد مخطط تكاليف تنفيذ الإجراءات على النحو المبين في الشكل (3-4).

الشكل (3-3): الجدول الزمني لتنفيذ إجراءات خفض انبعاثات الكربون في خطة المصفاة



المصدر: (Baars & Parvez, 2023)

الشكل (3-4): مخطط تكاليف تنفيذ إجراءات خفض الكربون المزمع تطبيقها



المصدر: (Baars & Parvez, 2023)

نستنتج من هذا المثال أن إمكانية تحقيق خطة خفض الانبعاثات الكربونية في المصفاة بنسبة 55% بحلول عام 2030 ممكنة على الرغم من التحديات العديدة التي تعترضها. أما خطة خفض الانبعاثات الكربونية إلى الصفر بحلول عام 2050 فتحقيقها أصعب بكثير ولا يمكن الوصل إليها إلا من خلال زيادة تكرير المواد المتجددة أو تحويل كافة منتجات المصفاة إلى لقيم في وحدات صناعة البتروكيماويات.

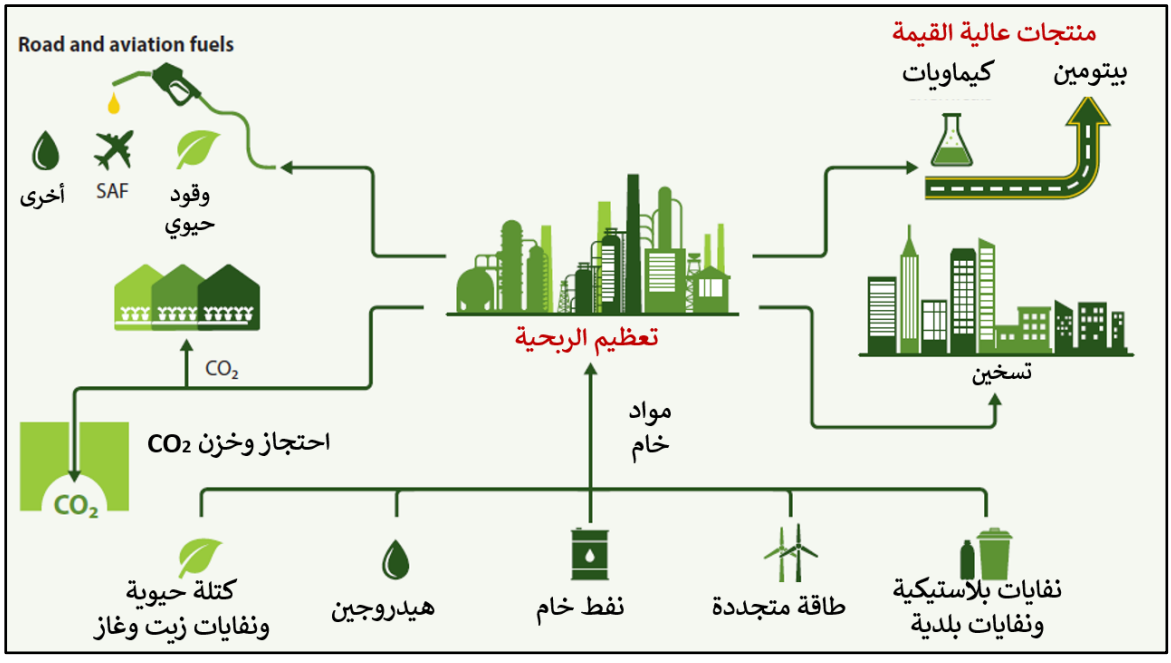
3-5-3: مشروع نزع الكربون في مصفاة Pernis – هولندا

أعلنت شركة SHEL عن خطة طموحة لخفض انبعاثات CO_2 في مصفاة برنيس -هولندا التي تعتبر إحدى أكبر مصافي تكرير النفط في أوروبا، طاقتها التكريرية 400 ألف ب/ي، وتتمتع بمرونة عالية لتكرير أنواع مختلفة من النفط، إضافة إلى تكاملها مع وحدات لإنتاج البتروكيماويات. (Gosse, A., 2021)

أهداف خطة نزع الكربون في مصفاة Pernis

تهدف الخطة إلى تمكين المصفاة من إنتاج مشتقات منخفضة الكربون، من خلال تكرير لقائم أخرى إضافة إلى النفط الخام، مثل الكتلة الحيوية، ونفايات الزيت والغاز، والهيدروجين، والنفايات البلاستيك، والنفايات البلدية الصلبة، فضلاً عن تركيب منظومات احتجاز وخزن واستخدام CO_2. يبين الشكل (3-5) مخطط لقائم ومنتجات مصفاة Pernis. (Gosse, A., 2021)

الشكل (3-5): مخطط لقائم ومنتجات مصفاة Pernis



المصدر: (Gosse, A., 2021)

تتكون الخطة من الإجراءات التالية:

- إنشاء وحدة إنتاج هيدروجين أخضر في روتردام بطاقة 60 ألف كغ في اليوم باستخدام محللات كهربائية تعمل على كهرباء منتجة من مزارع طاقة الرياح القريبة من روتردام. إضافة إلى تمكين

المصفاة من تخفيض انبعاثات الكربون، سيساهم المشروع في تحويل وسائل النقل الثقيلة لتعمل على الهيدروجين، وبالتالي خفض الانبعاثات الناتجة عن منتجات المصفاة المستعملة كوقود للمركبات الثقيلة.

- تطبيق تقنية المعالجة المشتركة في المصفاة، وذلك من خلال إدخال لقائم حيوية لوحدات التكسير الهيدروجيني والمعالجة الهيدروجينية بنسبة تصل إلى 10% من الطاقة الإنتاجية لهذه الوحدات، دون الحاجة إلى إجراء أي تعديلات على معدات الوحدة القائمة.
- تكرير النفايات البلاستيكية والنفايات البلدية الصلبة.
- إنشاء منظومة احتجاز غاز CO_2 الناتج عن وحدة التغويز.

مسارات نزع الكربون في مصفاة Pernis

تتكون مسارات نزع الكربون في مصفاة برنيس من ثلاث اتجاهات، وهي تحسين كفاءة الطاقة، وإنتاج مشتقات منخفضة الكربون، واحتجاز وخزن ثاني أوكسيد الكربون. يبين الشكل (3-6) مسارات نزع الكربون في مصفاة Pernis

الشكل (3-6): مسارات نزع الكربون في مصفاة Pernis

المصدر: (Gosse, A., 2021)

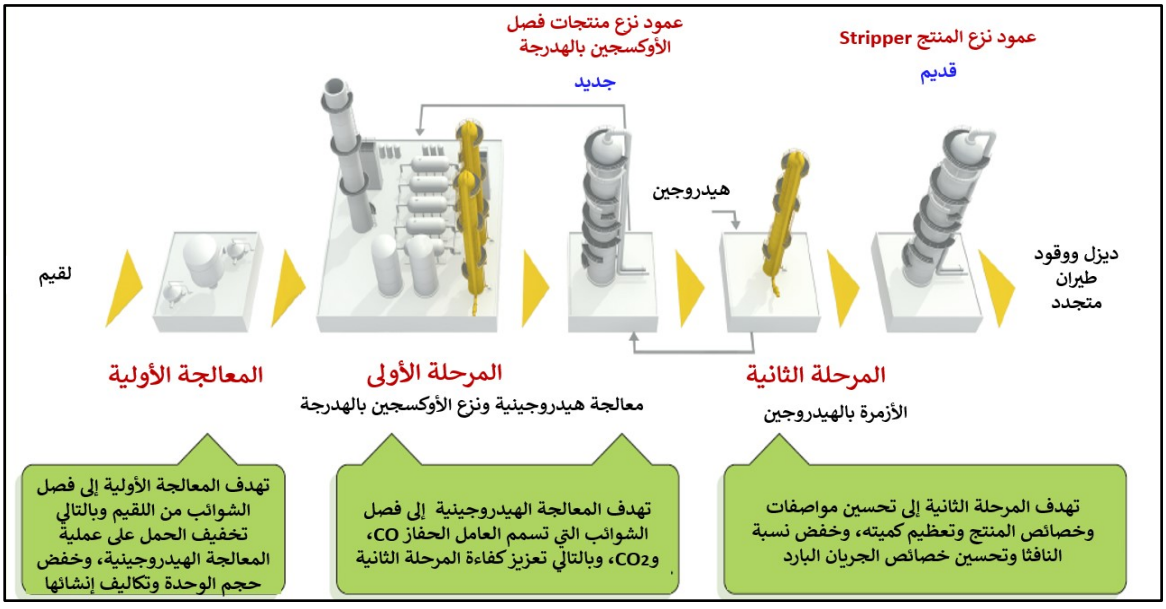
- **تحسين كفاءة الطاقة**

قام الفريق الفني بتطبيق برنامج ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في معدات المصفاة نتج عنه خفض انبعاثات ما يعادل خروج 50 ألف سيارة سنوياً من الطرقات.

- **إنتاج مشتقات منخفضة الكربون**

لتنفيذ هذا المسار قام فريق المشروع بإنشاء وحدة لإنتاج وقود منخفض الكربون بطاقة إنتاجية قدرها 820 ألف طن/السنة تعتمد على مبدأ المعالجة الهيدروجينية للزيوت المنخفضة الكربون والدهون الحيوانية والزيوت النباتية المستعملة والنفايات الزراعية الأخرى إلى وقود مركبات وطائرات نفاثة. كما تستخدم هذه الوحدة الهيدروجين الأخضر المنتج من كهرباء مولدة من طاقة الرياح. وتساهم هذه الوحدة في خفض ما يعادل 2.8 مليون طن/السنة من انبعاثات CO_2 التي تطلقها المصفاة وتعادل هذه الكمية خروج مليون سيارة سنوياً من الطرقات. يبين الشكل (3-7) مخطط سير عملية Shell لإنتاج وقود منخفض الكربون.

الشكل (3-7): مخطط سير عملية Shell لإنتاج وقود منخفض الكربون



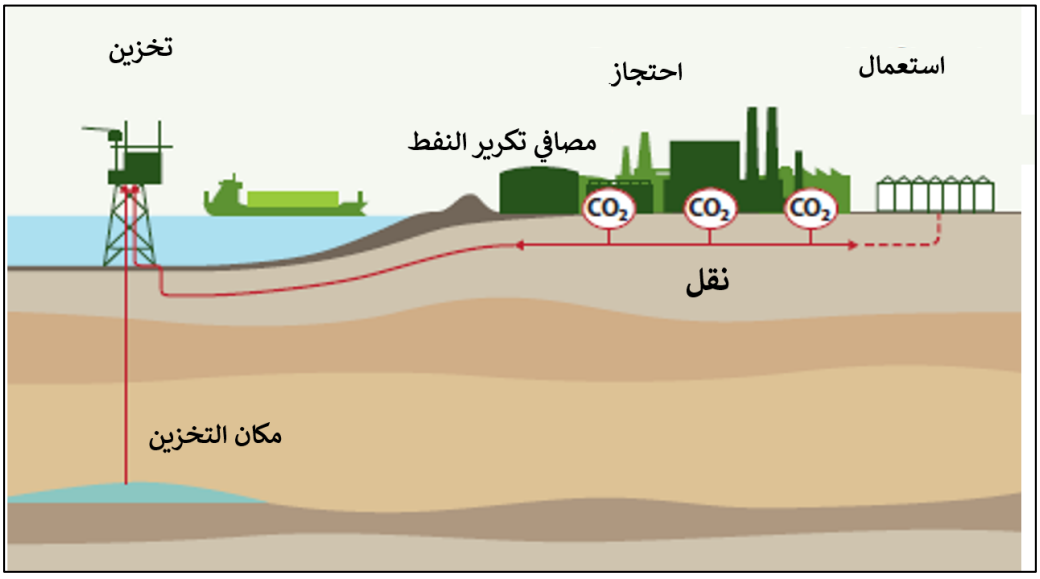
المصدر: (Gosse, A., 2021)

- **احتجاز وتخزين CO_2**

يتكون هذا المسار من عمليات احتجاز CO_2 المنتج من مداخن الأفران ووحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، حيث يتم ضغط الغاز ونقله مسافة 20 كم إلى مشروع Porthos لتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون في المغمورة بالقرب من ميناء روتردام، وهو المجمع الأول في هولندا لتخزين

CO_2 وتعتبر شركة Shell خامس شركة تستخدم هذا المجمع. يبين الشكل (3-8) مجمع Porthos تخزين CO_2 في ميناء روتردام.

الشكل (3-8): مجمع Porthos لتخزين CO_2 في ميناء روتردام



المصدر: (Gosse, A., 2021)

3-5-4: دراسة حالة: خطة مصفاة Tupras للحياد الكربوني بحلول 2050

أعلنت مصفاة Tupras التركية عن خطتها الاستراتيجية للتحول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2050، وعلى مرحلتين. يتم في المرحلة الأولى تخفيض انبعاثات الكربون بنحو 27% من مستواها في عام 2017 بحلول عام 2030، ثم إلى 30% بحلول 2030، وفي المرحلة الثانية يتم تخفيضها إلى الصفر بحلول عام 2050، وذلك من خلال تطبيق التقنيات التالية:(DİNÇER, A., 2021)

- تعزيز إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في كافة وحدات المصفاة.
- التركيز على إنتاج وقود الطيران المستدام.
- استخدام التسخين الكهربائي.
- إنتاج واستهلاك الهيدروجين الأخضر.

أهداف خطة نزع الكربون في مصفاة Tupras

تهدف الخطة إلى تعزيز إنتاج المصفاة من وقود المستقبل الخالي من الكربون بأنواعه، وأن تصبح المصفاة إحدى مصادر إنتاج الوقود المتجدد الرئيسية، والأولى في الجمهورية التركية في هذا المجال، جنباً إلى جنب مع خفض انبعاثات الكربون من عمليات المصفاة، مع المحافظة على هامش ربحية مرتفع.

تقدر الاستثمارات المخصصة للمشروع بنحو 350 مليون دولار سنوياً، أو ما يعادل 5 مليار دولار أمريكي حتى عام 2035، و10 مليار دولار حتى عام 2050.

الاستنتاجات والتوصيات

- تواجه مصافي تكرير النفط في العقود القادمة مشكلة تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بخفض انبعاثات الكربون وفي نفس الوقت المحافظة على إنتاج وقود منخفض الكربون من مصادر متجددة، وتعظيم إنتاج البواقي الخفيفة المستخدمة كلقائم لصناعة البتروكيماويات لمواجهة الطلب المتنامي على المنتجات البتروكيماوية.
- على الرغم من الغموض الذي يكتنف العديد من قضايا التحول إلى نظام الطاقة المنخفضة الكربون، كتلك المتعلقة بتطور الطلب المستقبلي على المنتجات النفطية، والأطر التشريعية التي ستصدرها الحكومات، إلا أن الأمر الوحيد المؤكد هو أن هذا التحول سيكون تدريجياً، ما يستوجب على مصافي تكرير النفط إعادة النظر في هيكل منتجاتها بما يتوافق مع التوقعات المستقبلية لتغير الطلب على أنواع الوقود في الأسواق العالمية، والعمل على تطبيق إجراءات خفض انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن عمليات التكرير.
- يمكن لقطاع التكرير تخفيض الانبعاثات الناتجة عن عمليات التسخين من خلال استبدال الوقود الأحفوري بالوقود المنخفض الكربون مثل الهيدروجين، أو استخدام تقنيات التسخين الكهربائي، وتقنية احتجاز وتخزين واستعمال غاز ثاني أوكسيد الكربون.
- تتوفر حالياً العديد من تقنيات نزع الكربون بمستويات مختلفة من التطور، وتحتاج إلى المزيد من البحث والابتكار لتطويرها.
- تتطلب عملية نزع الكربون من مصافي تكرير النفط اتخاذ قرارات سريعة ومرنة للمحافظة على الربحية في إطار توقعات انخفاض الطلب على وقود وسائل النقل وارتفاعه على البتروكيماويات.
- تساهم تقنيات المعالجة المشتركة للمواد المتجددة، التي تسمح بتكرير المواد الزيوت المتجددة مع النفط الخام، في تخفيض الأثر البيئي لصناعة تكرير النفط والبتروكيماويات، علاوة على تحسين العائد على الاستثمار.
- يمكن لمصافي تكرير النفط تحويل CO_2 والهيدروجين إلى مشتقات منخفضة الكربون من خلال تطبيق التقنيات المتوفرة حالياً مثل تقنية فيشر-تروبش.

- إن تطبيق عملية نزع الكربون في مصافي تكرير النفط يساهم في تخفيض كثافة الكربون في منتجاتها، وبالتالي تخفيض تأثير قطاع النقل على البيئة، وتحسين جودة الهواء الجوي.
- على الرغم من التوقعات الأخيرة التي تشير إلى تراجع الطلب على المنتجات النفطية المستخدمة كوقود في وسائل النقل، وتنامي الطلب على البتروكيماويات، وتزايد نسبة الوقود المتجدد في مزيج الطاقة، إلا أن معظم دراسات مراكز الأبحاث تؤكد أنه من الصعب الاستغناء عن الوقود الأحفوري لعقود عديدة قادمة، وخصوصاً في الدول النامية. وهذا يؤكد فكرة الحاجة إلى تطبيق تقنيات نزع الكربون في كافة مراحل إنتاج وتكرير وتسويق النفط الخام.
- إن أول خطوة في عملية نزع الكربون في صناعة تكرير النفط والبتروكيماويات هي معرفة ماهية ومواقع الانبعاثات التي تصدرها المنشأة، وكميات كل مصدر من هذه المصادر.
- إن تطبيق عملية استخلاص الهيدروجين من غازات المصفاة وإضافتها إلى شبكة الهيدروجين يساهم في تخفيض طاقة وحدات إنتاج الهيدروجين، وبالتالي خفض إجمالي انبعاثات CO_2 في المصفاة.

Abstract

Technological Pathways for Decarbonizing Petroleum Refineries

Despite the challenges facing the petroleum refining sector, due to the call for reducing its carbon footprint, it could play an important role in supporting low carbon transitions worldwide, since much of the current processing and distribution infrastructure can be repurposed for this approach.

If the refining sector wants to remain a part of the overall energy transition, it will have to start thinking on how to comply with the regulations and how to remain relevant in the market through applying different decarbonization technologies.

This study assesses several technological pathways for decarbonizing petroleum refining. At the top of the list are the application of fuel switching onsite heat generation and applying carbon capture to the major process units and possibly gas turbines where necessary. Carbon capture, use, and storage (CCUS) technologies are an effective tool for mitigating process emissions because these flue streams come from large, single-point sources rather than varied and dispersed exhaust systems. Fuel switching and electrification, on the other hand, can be applied to dispersed combustion systems, providing clean heat if the electricity or fuel is low or zero carbon.

The study concluded that today's success of the refining industry is no longer just measured on safe and profitable operations, but also the delivery of low carbon products and commitment to low carbon emissions. These situations call for strong collaboration between OAPEC members, working together to implement sustainable solutions for the refining industry to remain competitive.

قائمة المراجع

المراجع الإنجليزية

- Avery M., and Strohm, J., 2021 **"FCC Pathways to Co-processing"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2023. pp.35-45. www.digitalrefining.com
- Baars, F., and Parvez, S., 2023 "**Achieving Fit for 55 Emission Reduction Targets by 2030"** PTQ Magazine Q1, 2023. pp.16-23. www.digitalrefining.com
- Bernard, Y., et al., 2022 "**All Roads Leading to Sustainable Aviation Fuel"** Decarbonization Technology Magazine. May 2022. P.p. 35-41.
- BYRUM, Z., et al., 2021 "**Technological Pathways for Decarbonizing Petroleum Refining"** Working Paper, World Resources Institute. Washington, USA.
- Carter, E., & Hickman A., **2021 "Ready-now Blue Hydrogen Leads The Way to Decarbonization"** H_2 Tech Magazine, Setember 2021. pp.23-29.
- Carter, D., 2022 **"What is your Decarbonisation SCORE?** Decarbonization Technology Magazine. May 2022, pp.7-13.
- Carugo, M., , 2022. **"Sustainability Through Efficiency: A plan for the Refining Industry"**. Hydrocarbon Processing Magazine, January, pp. 17-20.
- Chlapik, K., Winch, D. & Dierking, D., 2022. **"Achieving 95% Direct CO_2 Reduction for Hydrogen Plants"**. Digital Refining, Q2, pp. 20-26.
- DİNÇER, A., 2021 **"CO_2 Emissions Reduction Via A Pinch Study in A Vacuum Distillation Unit"** Hydrocarbon Processing Magazine, October, pp. 31-36.
- DNV, 2018 **"Global Technology Roadmap for CCS In Industry, Sectorial Assessment: Refineries"** Research Report for UNIDO. Det Norske Veritas.
- EPA, 2022 **"Waste Heat to Power System",** USA: CHP Combined Heat and Power Partnership. Available at: www.epa.gov
- Ferrara, M., 2022 **"Optimizing Processes and Operations for CO_2 Emissions Reduction"** PTQ Magazine Q1, 2022. pp.80-83. www.digitalrefining.com
- GORET-RANA, M; Keeley, C;, 2022. **"Transition to Net Zero: Steps to Decarbonise"** Digital Refining", pp. 23-26.
- Gosse A., 2022 **Decarbonization Transformation of Shell's Pernis Refinery"** Decarbonization Technology Magazine May 2022. pp.21-24.
- Graca, M., 2022 **"Why Blue Hydrogen Provides a de-risked Decarbonization Lever"** Decarbonization Technology Magazine November 2022. pp.15-21.
- Hemsley, M., 2022 **"Carbon capture, utilization and Storage in the Energy Transition"** Decarbonization Technology Magazine. November 2022. pp.23-31.

- Houdek, et al., 2023 **"Reduce emissions and improve refinery profitability"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2023. p.p.51-56. www.digitalrefining.com
- IEA, 2022 **"Global Hydrogen Review 2022"** INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Available at: www.iea.org/t&c/
- IRENA, 2019 **"Hydrogen: A renewable Energy Perspective"** Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan. Available at: www.irena.org/publications
- Jenkins. S., 2022 **"SAF Production Expands for a Low-Carbon Future" Chemical Engineering Magazine May 2022. Available at:** WWW.CHEMENGONLINE.COM
- Jha, A., et al., 2021 **"A critical Analysis of CO_2 Capture Technologies"** Hydrocarbon Processing Magazine. June 2021 pp. 59-65
- Jouhara, H., et al., 2018 "**Waste Hea Recovery Technologies and Applications"**. Thermal Science and Engineering Progress, April 2018.
- Ko, K., and Sivasubramanian, G., 2022 **"Hydrogen production with lower carbon Emissions"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2023. pp.55-63. Available at: www.digitalrefining.com
- Kumar, A., 2021 **"Improve Energy Efficiency While Reducing CO_2 Emissions Sustainably"** Decarbonization Technology Magazine. pp.77-80.
- Liu, N., 2021. Increasing blue hydrogen production affordability. Hydrocarbon Processing, June, Issue June 2021, pp. 70-76.
- Long, D., 2022 **"Electric Process Heaters Help Decarbonize Petrochemical Refining"** Watlow, White paper.
- Martin, M., 2021 **"Reducing CO2 and NOx while Increasing Efficiency from Fired Heaters without Selective Catalytic Reduction"** XRG Technologies.
- Nurdiawati, A., & Urban, F., 2022 **"Decarbonising the Refinery Sector A socio-technical Analysis of Advanced Biofuel, Green Hydrogen and Carbon Capture Development In Sweden"** Department of Industrial Economics and Management, KTH Royal Institute of Technology, Sweden. Energy Research & Social Sience, Elsevier. Available at: www.elsevies.com/locate/erss
- Oliveira, C., & Schure, K., 2020 **"Decarbonization Options for the Dutch Refinery Sector"** Manufacturing Industry Decarbonization Data Exchange Network. Available at: www.pbl.nl/en
- Pawlewitz, J. & Doyle, A., 2020. "**Managing Dark Data and Visualizing Your Digital Twin"** Hydrocarbon Processing, 11 February.
- Pigeaux, et al., 2022 **"Carbon Capture and Storage, a necessary tool to fight climate change. Solution for hard-to-abate emissions"** Axens. White paper.
- Repsol, 2021 **"Refining Transformation Strategic pathways"** Repsol. Spain.
- Rutz, et al., 2020 "Technical Options for Retrofitting Industries with Bioenergy"" BIOFIT, Handbook prepared for the European Union**.**

- Saini, et al., 2021 **"Fuel Oil to Liquefied Natural Gas"** Decarbonization Technology Magazine. pp.73-76.
- Sayles, S & Ohmes, R., 2021 **"Conversion to a green refinery. Assessing the Options, Risks, and Viability of the Biofuels Refinery of the future"** BECHT**,** Decarbonization Technology Magazine. pp.57-65.
- Schenk, M., & Middleton, J., 2021 **"Carbon capture application to ethylene plants"** Decarbonization Technology Magazine. May 2022, p.p. 67-71.
- Shah, G.,, 2022. **"Tips to Avoid Pitfalls in CO_2 Capture Projects"** Hydrocarbon Processing, January, pp. 42-45.
- Sharma, B., et al., 2021 **"Clean Hydrogen Energy from Repurposed Gasification Plant"** Decarbonization Technology Magazine. August 2021, p.p. 21-23
- Singh, H., 2022 "**CCUS: Status and Priorities for Research and Development**" Decarbonization Technology Magazine. February 2022. pp. 72-79.
- Singh, R. B.,, 2022. "**Evaluate Options for Decarbonizing Petroleum Refineries"** Hydrocarbon Processing, Issue August 2022, pp. 29-34.
- SINGH, S., and R. MUKHERJEE, R., **2021 "Are Furnace Emissions Proving to be your Achilles Heel?"** Hydrocarbon Processing Magazine. October 2021. pp.39-42.
- Tagliabue, M., 2022 **"Refinery off-gas in hydrogen production" Air Liquide"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2022. p.p.25-30. Available at: www.digitalrefining.com
- Tagliabue, M., 2020 "Recovering hydrogen and LPG from off-gases" Petroleum Technology Quarterly Magazine Q4, 2020. p.p.75-82. Available at: www.digitalrefining.com
- Tallon, T., 2021 **"Strategies for decarbonising combustion processes"** Decarbonization Technology Magazine. August 2021. p.p. 33-36.
- THALLAM, A., ALANIS, F., 2021 **"Carbon Capture with Least Opex and Capex"** Petroleum Technology Quarterly Magazine, Q4 2021, pp.23-33. www.digitalrefining.com
- Wagner DA SILVA, M., 2022 **"The role of biofuels in the energy transition"** Petroleum Technology Quarterly Magazine, Q1 2022, p.p.91-94. www.digitalrefining.com

المراجع العربية

- أوابك ، 2023 ، تقرير الأمين العام السنوي متوفر على موقع المنظمة www.oapecorg.org
- أوابك، 2018. انبعاثات مصافي النفط، مصادرها وطرق معالجتها. مجلة النفط والتعاون العربي العدد 165.
- أوابك، 2017 .ملتقى أساسيات صناعة النفط والغاز .الكويت. أوابك.
- أوابك 2016 .تحسين الأداء والربحية في صناعة تكرير النفط .مجلة النفط والتعاون العربي.