منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول
أوابـك

احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه في صناعة البتروكيماويات: الإمكانات والتحديات

الكويت- نوفمبر/ تشرين الثاني 2021

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2021.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف: 24959000 (965+) - فاكسميلي: 24959755 (965+)

P.O Box 20501, Safat- Kuwait, 13066

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

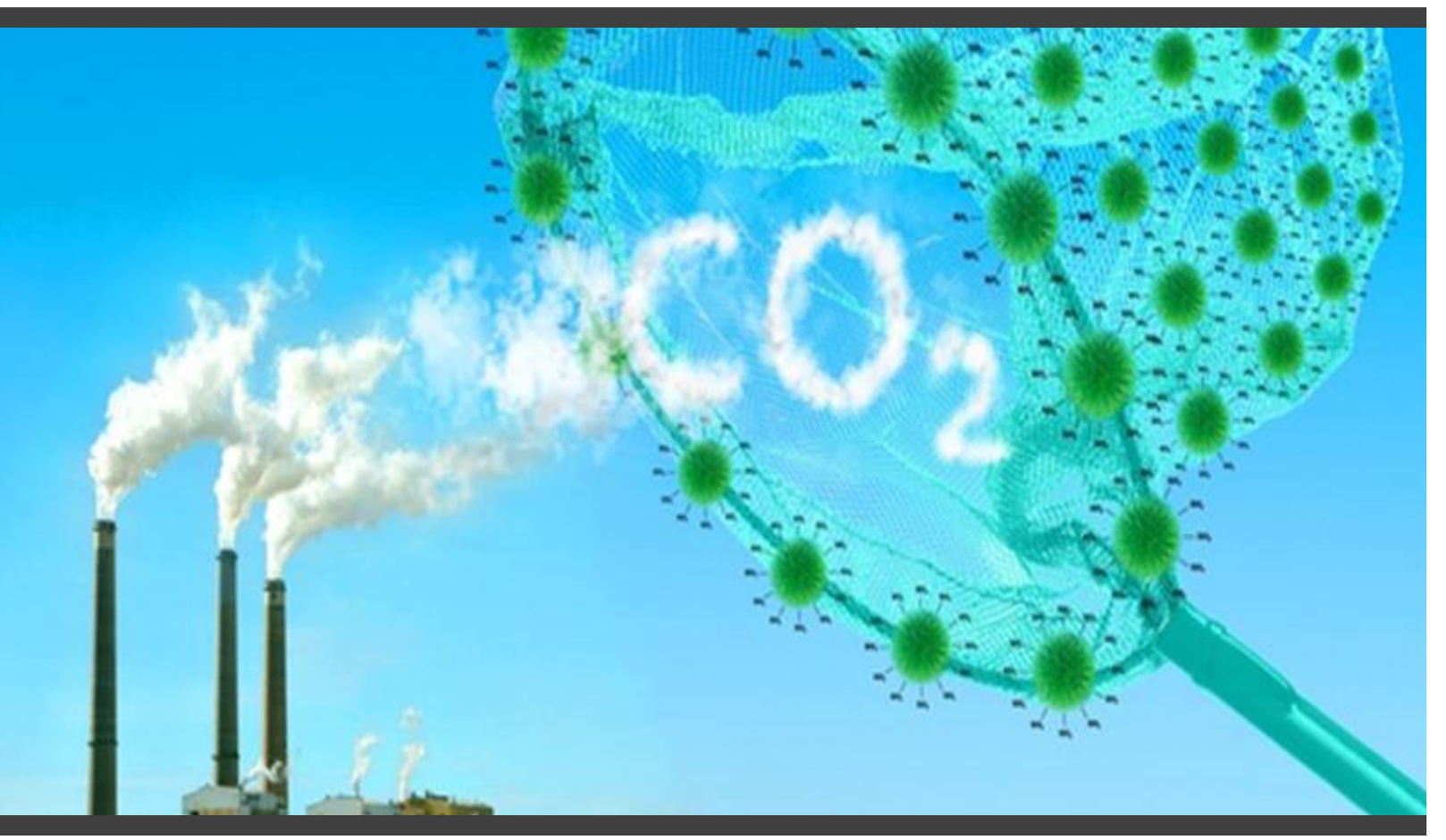
Website : www.oapecorg.org

Email : oapec@oapecorg.org

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

أوابـك

احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه في صناعة البتروكيماويات: الإمكانات والتحديات



إعداد

د. ياسر محمد بغدادي

خبير صناعات نفطية

إدارة الشؤون الفنية

احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه في صناعة البتروكيماويات: الإمكانات والتحديات

مقدمة

أدت زيادة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وخاصة غاز ثاني أكسيد الكربون منذ بداية الثورة الصناعية، إلى دفع العديد من الدول الصناعية الكبرى في أوروبا الغربية، وكندا، واليابان، والولايات المتحدة الأمريكية، إلى البحث عن تقنيات تسهم في التخفيف من تأثير التغير المناخي، وفي مقدمتها تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون.

ومع توقعات زيادة الطلب العالمي على استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في عدد من المجالات والتطبيقات الناشئة كإنتاج الوقود الاصطناعي، وبعض أنواع الكيماويات، بالإضافة إلى التوجهات الحديثة نحو إعادة تصميم مواد بناء جديدة من الآسمنت والخرسانة، والمواد المالئة والعازلة ذات أداء يفوق أداء مواد البناء التقليدية، وبتكلفة منخفضة، لجأت بعض الشركات ومراكز البحث العلمي العالمية إلى تطوير تقنيات احتجاز وفصل واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون، بهدف زيادة كفاءتها، وخفض تكلفتها بما يسهم في انتشارها. إلا أن هناك حاجة لبذل المزيد من الجهد في هذا المجال الحيوي والهام، وذلك من خلال دعم السياسات، وإقرار التشريعات، وزيادة الإعفاءات الضريبية، ومنح الحوافز التشجيعية وتوفير التمويل اللازم. كما أصبحت مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، ترتبط ارتباطا وثيقاً بمشروعات إنتاج الهيدروجين الأزرق المنخفض الكربون أو الخالي منه، وبما يسهم في تحقيق مستقبل الطاقة المستدامة، باعتباره أحد العناصر الأساسية في مزيج الطاقة بالتآزر مع الوقود الاحفوري.

تهدف الدراسة، إلى تسليط الضوء على أهمية تطبيق تقنيات احتجاز واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث من غازات عوادم مداخن الوحدات الإنتاجية، خاصة مجمعات إنتاج البتروكيماويات في الدول العربية، بهدف مواكبة التوجه العالمي نحو خفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، ولتعظيم الاستفادة منه باستخدامه في

تعزيز إنتاج بعض منتجات البتروكيماويات، وزيادة الربحية. مما يستلزم ضخ المزيد من الاستثمارات، خاصةً في مجال البنية التحتية، وإنشاء شبكات النقل والتوزيع.

وقد خلصت الدراسة إلى بعض الاستنتاجات والتوصيات، جاء في مقدمتها أن الدول العربية وخاصة الدول الأعضاء في منظمة أوابك، تمتلك العديد من المقومات التي تمكنها من التوسع في تنمية مشروعات احتجاز الكربون لتعزيز إنتاج البتروكيماويات، وإنتاج الهيدروجين الأزرق، وهو ما يمثل فرصة جيدة لصناعة النفط والغاز.

تأمل الأمانة العامة من خلال هذه الدراسة تسليط الضوء على أهمية تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون، وأن يجد فيها المختصون ما يسعون إليه من الفائدة والمعلومات التي تمكنهم من إعداد الخطط والاستراتيجيات التي من شأنها تعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون، وإنتاج الهيدروجين الأزرق في قطاع الصناعة البترولية بشكل عام، وفي صناعة البتروكيماويات بشكل خاص، وتعزيز جهود الدول الأعضاء الرامية إلى حماية البيئة من التلوث بالاسترشاد من نتائج التجارب الدولية الناجحة في هذا المجال.

والله الموفق ،،،،،

الأمين العام

علي سبت بن سبت

قائمـة المحتويات

الموضـوع	رقم الصفحة
مقدمة	1
قائمة المحتويات	3
قائمة الأشكال	6
قائمة الجداول	7
ملخص تنفيذي	8
الفصل الأول: تقنيات احتجاز ونقل، وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون	21
1. تمهيد	23
1.1. تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون	24
1.1.1. تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق	26
2.1.1. تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق	28
1.2.1.1. تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز قبل وبعد الاحتراق	29
1.1.2.1.1. الامتصاص Absorption	31
1.1.1.2.1.1. الامتصاص الكيميائي Chemical Absorption	31
2.1.1.2.1.1. الامتصاص الفيزيائي Physical Absorption	33
2.1.2.1.1. الفصل بالأغشية Gas Separation Membranes	34
3.1.2.1.1. الامتزاز Adsorption	37
4.1.2.1.1. التقطير بالتبريد Cryogenic Distillation	37
3.1.1. تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بالاحتراق بالأكسجين Oxy-combustion	39
4.1.1. تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بالعمليات الصناعية	39
2.1. نقل غاز ثاني أكسيد الكربون	39
1.2.1. النقل بواسطة خطوط الأنابيب	40
2.2.1. النقل بواسطة الناقلات البحرية	41
3.1. تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون	41
1.3.1. التخزين الجيولوجي " المكمني" Geological Storage	41
2.3.1. التخزين تحت الماء Under Water Storage	47
3.3.1. تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في الخزانات الطبيعية	47
1.3.3.1. التخزين في حقول النفط والغاز الطبيعي المستنفدة "الناضبة"	51
2.3.3.1. التخزين في طبقات المياه الملحية العميقة " التشكيلات الملحية"	51
3.3.3.1. التخزين المصاحب لعمليات الاستخلاص المعزز للنفط الخام والغاز الطبيعي	51
4.3.3.1. التخزين في طبقات الفحم غير المستغلة	53
4.1. نماذج مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم	53
1.4.1. مشروع " سليبنر" لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون CO2 Storage Project Sleipner	58

تابع <<<< قائمة المحتويات

الموضـوع	رقم الصفحة
2.4.1. مشروعات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز	63
1.2.4.1. مشروع واي بيرن (Weyburn) للإستخلاص المعزز للنفط	63
2.2.4.1. مشروع "عين صالح" للإستخلاص المعزز للغاز الطبيعي	67
5.1. الدروس المستفادة من مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون	69
6.1. دوافع تنمية مشروعات احتجاز ثاني أكسيد الكربون	69
1.6.1. ضريبة الكربون	70
2.6.1. التشريعات والحوافز التشجيعية	70
الفصل الثاني: استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج البتروكيماويات	**73**
2. تمهيد	75
1.2. مصادر انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة البتروكيماويات	76
2.2. استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج البتروكيماويات	78
1.2.2. إنتاج اليوريا	80
1.1.2.2. مرحلة التصنيع "Synthesis Stage"	81
2.1.2.2. مرحلة إعادة التدوير والتفكيك "Recycle and Decomposition"	82
3.1.2.2. مرحلة التبخير"Evaporation Stage"	82
4.1.2.2. مرحلة الامتزاز والتحلل المائي Desorption and Hydrolyzation Stage	82
5.1.2.2. مرحلة التحبيب "Granulation Stage"	83
2.2.2. إنتاج الميلامين	83
3.2.2. تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون الى الميثانول ومشتقاته	84
4.2.2. إنتاج البوليمرات المتصلدة بالحرارة Thermoset Plastic	89
5.2.2. إنتاج حمض الفورميك HCOOH	91
6.2.2. إنتاج غاز الميثان CH4	92
7.2.2. إنتاج الهيدروكربونات الأعلى Higher Hydrocarbon	92
8.2.2. إنتاج البلاستيك الحيوي من غاز ثاني أكسيد الكربون	92

تابع <<<< قائمة المحتويات

الموضـوع	رقم الصفحة
الفصل الثالث: الجهود العربية في مجال الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون	97
3. تمهيد	99
1.3. فرص تنمية مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية	100
2.3. إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية	101
3.3. جهود الدول العربية في تعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون	102
1.3.3. دولة الإمارات العربية المتحدة	102
2.3.3. مملكة البحرين	105
3.3.3. الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	109
4.3.3. المملكة العربية السعودية	109
5.3.3. دولة قطر	116
6.3.3. دولة الكويت	117
7.3.3. جمهورية مصر العربية	118
الاستنتاجات والتوصيات	122
بعض المصطلحات الواردة بالدراسة	125
المراجع	126
Abstract	131

قائمة الأشكال

	الشكل	رقم الصفحة
الشكل (1):	مخطط يوضح أنظمة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الاربعة	25
الشكل (2):	تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق	27
الشكل (3):	تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق	29
الشكل (4):	تقنيات فصل احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، بالمحتجز قبل و/ أو بعد الاحتراق	30
الشكل (5):	تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالأغشية	25
الشكل (6):	تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالتقطير بالتبريد	38
الشكل (7):	رسم توضيحي لتأثير زيادة الضغط على تغير الحالة لغاز ثاني أكسيد الكربون	43
الشكل (8):	آلية التخزين الهيكلي لغاز ثاني أكسيد الكربون	44
الشكل (9):	آلية التخزين الترسيبي لغاز ثاني أكسيد الكربون	45
الشكل (10):	آلية التخزين الانحلالي لغاز ثاني أكسيد الكربون	45
الشكل (11):	آلية التخزين المعدني لغاز ثاني أكسيد الكربون	46
الشكل (12):	تصنيف مناطق العالم حسب سعة الخزانات الطبيعية لغاز ثاني أكسيد الكربون	49
الشكل (13)	مخطط آلية الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون	52
الشكل (14)	تنوع مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وتوزعها حول العالم	54
الشكل (15):	مخطط نموذج لربط مصادر غاز ثاني أكسيد الكربون من الصناعات المختلفة، ونقله، وتخزينه، واستخدامه ضمن تجمعات مشروعات لاحتجاز الكربون	57
الشكل (16):	مخطط تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في قاع البحر لمشروع "سليبنر"	60
الشكل (17):	مقطع تكوين "أوتسيرا " والمستخدم في تخزين ثاني أكسيد الكربون في قاع بحر الشمال	61
الشكل (18):	موقع حقل واي بيرن النفطي، وخط الأنابيب المستخدم في نقل غاز ثاني أكسيد الكربون للاستخلاص المعزز للنفط	64
الشكل (19):	مخطط مشروع عين صالح لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون	68
الشكل (20):	بعض استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج بعض أنواع الوقود وإضافات الوقود	79
الشكل (21):	مخطط تعزيز إنتاج اليوريا باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون	81
الشكل (22)	مخطط تكامل صناعتي اليوريا والميلامين	84
الشكل (23):	مخطط إنتاج الميثانول الأخضر	87
الشكل (24):	بعض استخدامات الميثانول	88
الشكل (25):	مخطط إنتاج البلاستيك القابل للتحلل البيولوجي من غاز ثاني أكسيد الكربون	94
الشكل (26):	المصنع التجريبي لإنتاج البلاستيك القابل للتحلل البيولوجي من غاز ثاني أكسيد الكربون	95
الشكل (27):	مراحل عملية احتجاز ونقل واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع "ريادة" في أبو ظبي	103
الشكل (28):	وحدة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع" الريادة".	104
الشكل (29):	مصنع احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون التابع لشركة " جيبيك"	106
الشكل (30):	مخطط احتجاز وفصل غاز ثاني أكسيد الكربون بشركة "جيبيك"	107
الشكل (31):	استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج الميثانول في شركة "جيبيك"	107
الشكل (32):	استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج اليوريا في شركة "جيبيك"	108

تابع <<<< قائمـة الأشـكال

الشـكل		رقم الصفحة
الشكل (33):	مقدار التغير في نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون خلال الفترة 2017-2018 في دول مجموعة العشرين	110
الشكل (34):	بعض المصادر المختارة لرصد كميات انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في بعض الآنشطة الصناعية في المملكة العربية السعودية	111
الشكل (35):	مخطط تقنية كونفيرج بولى أول التابع لشركة أرامكو لتعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون	112
الشكل (36):	مخطط مراحل إنتاج الأمونيا الزرقاء في المملكة العربية السعودية	114
الشكل (37):	نسب مساهمة الأنشطة المختلفة داخل قطاع الطاقة، وقطاع العمليات الصناعية واستخدام المنتجات في جمهورية مصر العربية	120

قائمـة الجداول

الجـدول		رقم الصفحة
الجدول (1):	تصنيف بعض الدول من حيث سعات التخزين الجيولوجي المحتملة بها	50
الجدول (2):	نماذج بعض مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون القائمة	55
الجدول (3):	نماذج لبعض المنشآت التجارية لاحتجاز الكربون واستخدامه لإنتاج اليوريا	80
الجدول (4):	أمثلة بعض الشركات المنتجة للبوليمرات القائمة على ثاني أكسيد الكربون واستخداماتها الرئيسية	90
الجدول (5):	إجمالي انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري لقطاعات التنقيب والإنتاج والصناعات التحويلية لعام 2018، لشركة أرامكو	115
الجدول (6):	إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المكافئ للأنشطة المختلفة داخل قطاعي الطاقة، والعمليات الصناعية واستخدام المنتجات في جمهورية مصر العربية لعام 2015	119

ملخص تنفيذي

بدأ تزايد الانبعاثات الملوثة للبيئة مع انطلاق الثورة الصناعية في ستينيات القرن الثامن عشر، وتحديداً في عام 1850، وتزامن ذلك مع اكتشاف الآلة البخارية في بريطانيا، وازدهار عمليات استخراج الفحم الحجري، بالإضافة إلى التوسع في صناعات الغزل والنسيج، والحديد والصلب، وإنشاء الطرق، وبناء الجسور.

واكتسبت تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون أهميتها من كونها أحد الطرق الواعدة والفعالة لخفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المنطلقة إلى الغلاف الجوي، ومن المتوقع أن تسهم في خفض كميات انبعاثاته بحلول عام 2100 بنسب تتراوح ما بين 15-55%. كما ستعمل بشكل كبير على مساعدة الدول التي تمتلك احتياطيات ضخمة من الفحم الحجري الملوث للبيئة على الاستفادة منه بطرق آمنة ونظيفة [70،71]. وقد ساهمت عدة عوامل في تشجيع الشركات الكبرى حول العالم للاستثمار في مجال مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، ومنها إصدار التشريعات اللازمة، وفرض ضرائب الكربون، وإقرار الحوافز التشجيعية [73]. فنجد أن الولايات المتحدة الأمريكية على سبيل المثال نجحت في حث الشركات على التوسع في تنفيذ مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون من خلال زيادة الإعفاءات الضريبية والحوافز التشجيعية. وهو ما ساعد تلك الدول في تنفيذ تعهداتها نحو خفض نسب انبعاثاتها الكربونية.

ومن العوامل المساعدة على التوسع في تنمية مشروعات احتجاز الكربون تخصيص الاستثمارات المالية اللازمة، فنجد أن الاستثمارات العالمية في مجال الطاقة النظيفة خلال العشر سنوات الأخيرة بلغت حوالي 2.5 تريليون دولار أمريكي، منها حوالي 1.8 تريليون دولار أمريكي في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح والطاقة

الشمسية، وكان هذا النشاط الاستثماري مدفوعاً بدعم قوي ومستدام للسياسات. في حين بلغ إجمالي الاستثمارات في مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون خلال نفس الفترة الزمنية وفقاً لبيانات وكالة الطاقة الدولية، حوالي 20 مليار دولار أمريكي فقط. مما يشير إلى محدودية الفرص الحالية للاستثمار في مجال مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه. كما قد يعني أن السياسات والبرامج التي تم تنفيذها في مثل هذه المشروعات كانت محدودة أو لم تكن ناجحة، مقارنة بما تم تنفيذه في مشروعات إنتاج الطاقة النظيفة.

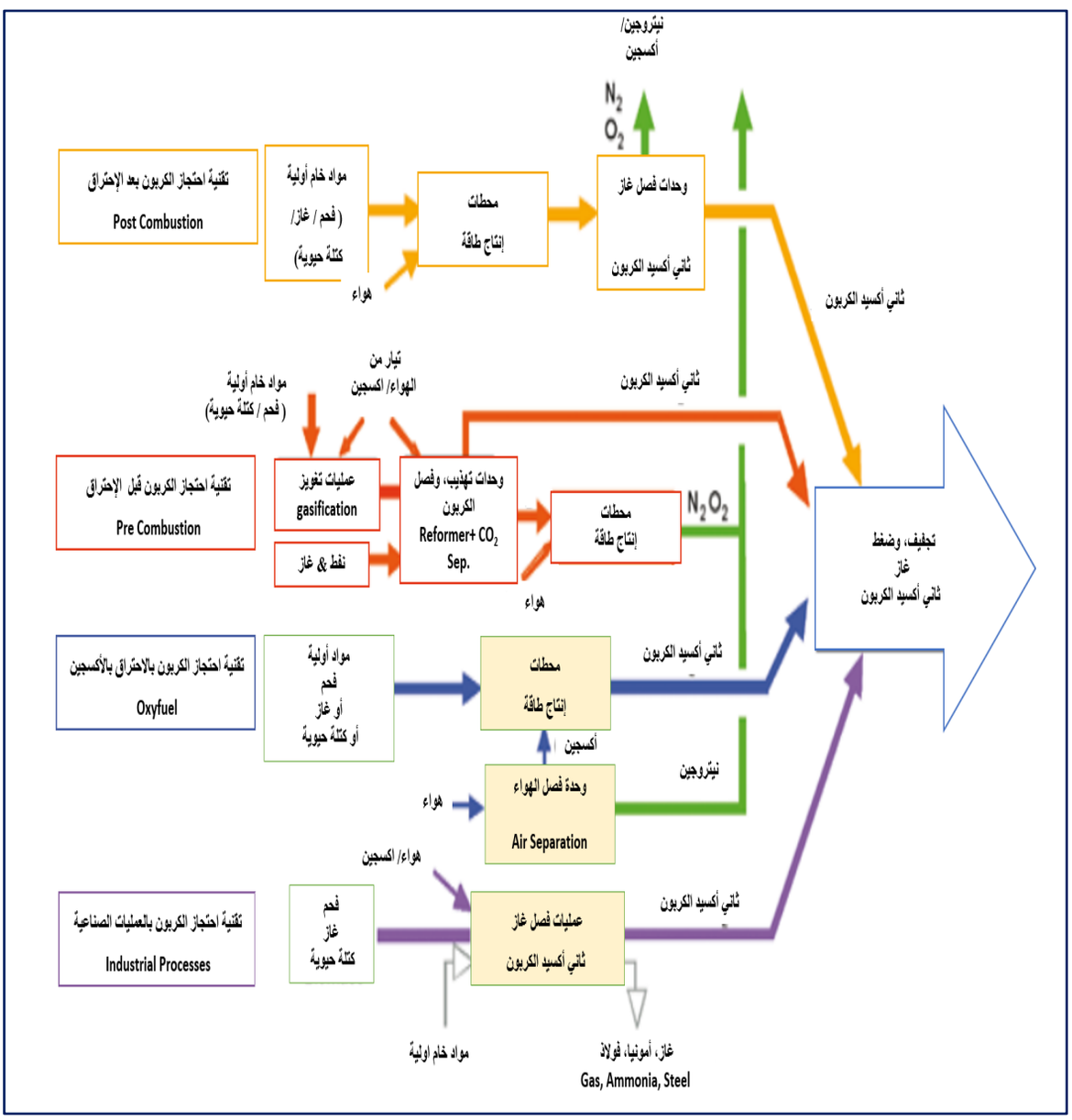
تقنيات احتجاز وفصل، ونقل، وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

تعد تقنيات احتجاز وتخزين واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون، تقنيات حديثة نسبياً، حيث بدأ تطويرها في ثمانينيات القرن الماضي، ومعظم المشروعات القائمة في الوقت الحالي مشروعات على مستوى النطاق التجريبي في بعض الأنشطة الصناعية، كإنتاج الغاز الاصطناعي، وإنتاج الهيدروجين، واستخدمت كذلك بشكل اقل نسبياً في مشروعات تعزيز إنتاج اليوريا، والميثانول، وفي بعض الصناعات الغذائية، والمشروبات الغازية، ومازال هناك العديد من التقنيات في نطاق التطوير المستمر. بينما تم تشغيل عدد محدود للغاية من المشروعات على النطاق التجاري [70]، خاصة في مجال تعزيز استخراج النفط والغاز الطبيعي.

من جانب آخر يلزم تلك المشروعات تحديد الطريقة المناسبة لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون، فهناك عدة طرق امنه لنقله سواءً كغاز عبر خطوط الأنابيب تحت الأرض أو فوقها، وقد تم بالفعل تشغيل عدد من الشبكات التجارية الكبيرة من خطوط الأنابيب لأكثر من 30 عام. كما يتم ايضاً نقل كميات صغيرة منه بواسطة الشاحنات أو السكك الحديدية، بينما تقوم بعض المشروعات بتسييله بالطرق المتبعة في نقل الغاز الطبيعي ونقله بواسطة الناقلات البحرية [72،74].

هناك أربع تقنيات رئيسية لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، يعتمد تصنيفها على المرحلة التي يتم فيها احتجازه، وهي تقنية احتجاز الكربون بعد الاحتراق "Post Combustion "، وتقنية احتجاز الكربون قبل الاحتراق "Pre-Combustion"، وتقنية الاحتراق بالأكسجين "Oxyfuel Combustion "، بالإضافة إلى تقنية الاحتجاز بالعمليات الصناعية "Industrial Processes"، كما هو مبين في الشكل (1) [70].

الشكل (1): تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الأربعة



المصدر: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage,

تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

تُعنى عمليات تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون بتوفير الأماكن الطبيعية كمستودعات ذات سعات تخزينية كبيرة، بصورة آمنة ومستدامة لألاف السنين. وتتنوع آليات التخزين فتشمل **التخزين الجيولوجي " المكمني"** Geological Storage، والذي يعتمد بشكل أساسي على وجود طبقات سميكة من الصخور الرسوبية، والتي يشار إليها باسم الأحواض، أو الخزانات "Basins". وتعد الأحواض ذات المستويات المنخفضة من النشاط الزلزالي الطبيعي هي الأنسب لعمليات التخزين، مقارنةً بالأحواض الموجودة في المناطق ذات النشاط الزلزلي العالي، والتي تحتاج إلى المزيد من الدراسات الفنية لتقييمها.

أما التخزين **تحت الماء Under Water Storage**، فيعتمد على تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون تحت سطح ماء البحار و/أو المحيطات على أعماق تزيد عن 1000م، لضمان ارتفاع كثافته عن كثافة المياه، وبما يضمن احتجازه تحت سطح الماء دون عودته مره أخرى إلى الغلاف الجوي [54].

كما يمكن تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في التكوينات **أو التشكيلات الملحية العميقة** Deep Saline Formations- DSF، التي تتميز بصخورها المسامية والنافذة، والممتلئة بالمياه المالحة، وكذلك حقول النفط والغاز المستنفدة أو الناضبة Depleting Oil and Gas Fields-DGOF، خاصة مع إمكانية توفر المعلومات الكافية عن المغلق منها والمهجور.

يمكن كذلك تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون بحقنة في **طبقات الفحم** غير المستغلة والتي توقف استخراج الهيدروكربونات منها بسبب استنفاد الاحتياطيات الاقتصادية كمستودعات طبيعية [81،48].

هناك خبرات دولية كبيرة مكتسبة، ودروس مستفادة من نتائج مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في المواقع التخزينية، والتي ترتبط بشكل مباشر بمصادر إنتاجه الثابتة كمحطات توليد الكهرباء، وصناعات الحديد والصلب، والاسمنت، والصناعات البترولية. وقد مهدت مثل هذه المشروعات الطريق إلى انتشارها والتوسع فيها، كما ساهمت في تطوير التكنولوجيات المستخدمة، وخفض التكاليف الرأسمالية، وساعدت كذلك على تطوير السياسات والتشريعات، والأطر التنظيمية [61]. ساهمت كذلك نتائج تلك المشروعات في دراسة سلوك غاز ثاني أكسيد الكربون داخل الخزانات الجوفية، وتقدير سعات التخزين النهائية لتلك الخزانات. وتنوعت الأغراض من تلك المشروعات ما بين التجريبي والبحثي والتجاري، ليصل عددها إلى أكثر من 154 مشروع [61]. ولعل مشروع "**سليبنر**"* والذي بدأ تشغيله في عام 1996 في النرويج أول مشروع على مستوى العالم لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون جيولوجياً على النطاق الصناعي.

ثم بدأت بعض الشركات العالمية الرائدة في الاستفادة من المفهوم الجديد والخاص باحتجاز الكربون واستخدامه "Carbon capture Utilization-**CCU**"، بعد تعديل المفهوم السابق والذي كان يُعنى فقط باحتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون "Carbon Capture and Storage - **CCS**". حيث عملت على تقسيم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون إلى فئتين رئيسيتين، شملت الأولى استخدامه مباشرة في عمليات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز الطبيعي دون تحويله، مما عزز عملية الإنتاج، وجعلها أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية. بينما شمل الاستخدام الثاني إجراء بعض العمليات التحويلية لغاز ثاني أكسيد الكربون، باختزاله بالهيدروجين لتعزيز إنتاج بعض المنتجات ذات قيمة إضافية مثل اليوريا، أو الكحولات، بالإضافة إلى إنتاج الميثانول، والوقود الاصطناعي. أو من خلال إضافة مجموعة الكربوكسيل لإنتاج الاحماض الكربوكسيلية.

* سيتم استعراض المشروع بالتفصيل في الفصل الثاني.

إلا ان بعض هذه المشاريع التحويلية غير ذات جدوى اقتصادية إلى حد ما في الوقت الحالي، نظراً للطبيعة الخاملة لغاز ثاني أكسيد الكربون، والتي يلزم لها استخدام طرق كثيفة الاستخدام للطاقة، بالإضافة إلى استخدام عوامل حفازة ذات نوعية فائقة الأداء لإتمام عملية التحويل. لذلك يجب أن تؤخذ في الحسبان تكلفة استخدام الطاقة عند النظر في الجدوى الاقتصادية للعملية الإنتاجية والمنتج النهائي. إلا أنه من المتوقع زيادة الاهتمام باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في مجال إنتاج الكيماويات والبوليمرات، خاصة مع استمرار التطوير لطرق التحويل الجديدة الأكثر فاعلية، ومع استمرار انخفاض تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة.

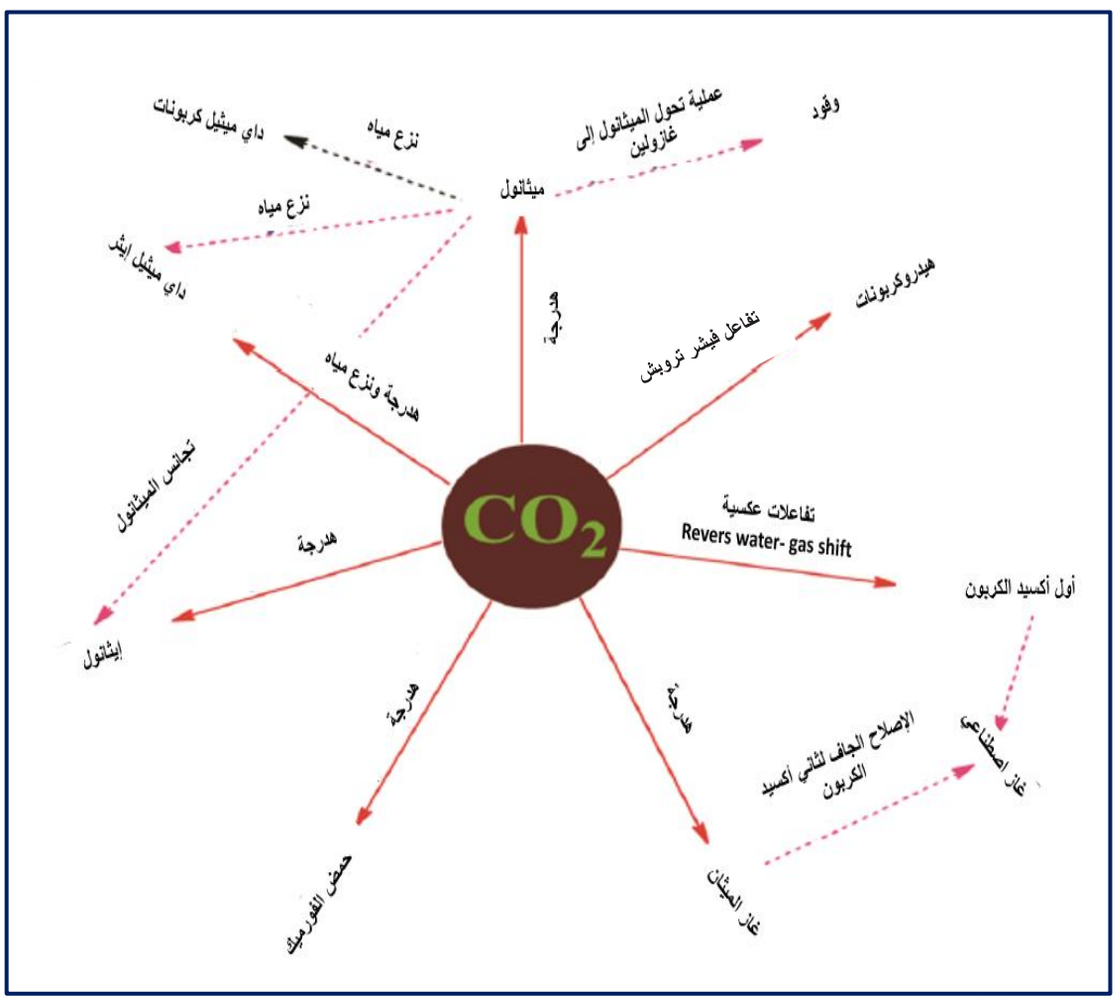
استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج البتروكيماويات

يأتي إنتاج الأمونيا، واليوريا في مقدمة الكيماويات والتي يمكن تعزيز إنتاجها باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون كمادة خام أولية، وهي طرق معروفة ومطبقه على النطاق الصناعي، وتم تسويقها بنجاح. حيث يمكن هدرجة غاز ثاني أكسيد الكربون لإنتاج الهيدروكربونات احادية الكربون C_1، ومنتجات ذات طول السلسلة الأعلى، ومنها يمكن إنتاج العديد من المنتجات كإنتاج الوقود الاصطناعي، والغاز الاصطناعي "Syngas" [90]، أو لإنتاج الميثانول (MeOH). كما يمكن إنتاج حمض النيتريك، وحمض السكسينك "Succinic Acid "، وحمض الأديبيك "Adipic Acid"، وحمض الساليسيليك "Salicylic Acid"، والكربونات الحلقية"Cyclic Carbonates"، والبولي كربونات، والكابرولاكتام "Caprolactam" المستخدم في إنتاج البلاستيك، والأسمدة، والألياف الاصطناعية [91،32].

تقدر كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المستخدمة كمادة خام أولية في عمليات التحويل الكيميائي "Chemical Conversion" لإنتاج منتجات ذات قيمة مضافة [90]،

بحوالي 130 مليون طن سنوياً، إلا أن هذه الكمية لا تمثل سوى اقل من 0.5% من إجمالي الانبعاثات السنوية العالمية من الانبعاثات الغازية [60]. يبين الشكل (2) بعض استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج بعض أنواع الوقود وإضافات الوقود.

الشكل (2): بعض استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج بعض أنواع الوقود وإضافات الوقود



المصدر [90] .

وفي إطار الأنشطة البحثية والتطوير، تمكنت مجموعة من الباحثين في جامعة كاليفورنيا من اكتشاف طريقة مبتكرة يتم فيها استخدام بعض أنواع من الكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً لتحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى وقود كحولي مثل الأيزوبيوتانول، و3-ميثيل 1- بيوتانول [90]. كما تمكنت بعض الشركات من تطوير عمليات تحفيز بيولوجية لتحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى هيدروكربونات مثل الميثان، والإيثان، والبروبان.

فرص تنمية مشروعات احتجاز الكربون في الدول العربية

تمتلك الدول العربية فرصاً جيدة لتنمية مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، حيث تعمل جميع محطات توليد الكهرباء بالوقود الأحفوري، بالإضافة إلى وجود عدد كبير من الصناعات الثقيلة بها كصناعات الحديد والصلب، والأسمنت، والتي تعد بمثابة مصادر ثابتة لإنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون. حيث يسهل التكامل فيما بين تلك المصادر التي تقع ضمن نفس النطاق الجغرافي الواحد عبر إنشاء شبكة أنابيب لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون. كما تتميز معظم الدول العربية بوجود التشكيلات الجيولوجية الملائمة والمتاحة على نطاق واسع كمواقع صالحة للتخزين المستدام الآمن لعدة عقود، كحقول النفط والغاز المستنفدة والمهجورة.

هذا ويقدر إجمالي كميات غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية المنطلقة إلى الغلاف الجوي بنحو 2,2 مليار طن من غاز ثاني أكسيد الكربون طبقاً لأحدث البيانات الصادرة عن البنك الدولي لعام 2019، وهو ما يمثل حوالي 6.3 % من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون العالمية. تتفاوت بدرجة كبيرة كميات انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية ما بين كميات كبيرة نسبياً، وكميات ضئيلة. يرجع هذا التفاوت الكبير إلى مدى التقدم الصناعي، والاجتماعي لسكانها، بالإضافة إلى زيادة النمو السكاني،

والذي ينتج عنه المزيد من حرق الوقود الأحفوري المستخدم في مختلف الأنشطة الحياتية.

وعلى الرغم من التحديات التي تواجه مشروعات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه، وأهمها ارتفاع التكلفة الاستثمارية وصعوبة الحصول على التمويل اللازم في الوقت المناسب، إلا أن مثل هذه المشروعات يمكن أن تلعب دوراً هاماً في تنويع اقتصادات الدول العربية المنتجة للنفط والغاز، إذا ما تم تنظيمها بشكل جيد، ونجحت الدول في وضع السياسات المناسبة والمشجعة لذلك.

الجهود العربية لتنمية مشروعات احتجاز واستخدام الكربون

حرصت عدد من الدول العربية على المشاركة في تنفيذ وتمويل أنشطة البحث العلمي والتطوير لخفض نسب انبعاثاتها من غاز ثاني أكسيد الكربون. حيث قدمت المملكة العربية السعودية مبلغ 300 مليون دولار لتمويل برامج بحثية حول مستقبل الطاقة والبيئة، كما خصصت كل من دولة قطر، ودولة الكويت، ودولة الإمارات العربية المتحدة مبلغ 150 مليون دولار لدعم أبحاث احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون.

كما عملت بعض الدول العربية على إنشاء المراكز والمعاهد البحثية الحكومية والخاصة، المعنية بمشروعات احتجاز واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون، فأنشأت المملكة العربية السعودية مركز الابتكار التكنولوجي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، ويختص المركز بأنشطة احتجاز الكربون وعزله، بينما لدى شركة "أرامكو" برنامج خاص بالبحث والتطوير في مجال احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. كما يعمل مركز الطاقة في معهد قطر للبحوث البيئية والطاقة، التابع لجامعة حمد بن خليفة، في مجال البحوث والتطوير والابتكار في تكنولوجيا احتجاز الكربون واستخداماته، ضمن

رؤية قطر 2030 لتنويع مصادر الاقتصاد بتعظيم الاستفادة من مختلف أنواع النفايات الصناعية.

تتركز مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في عدد من الدول العربية، تشمل كل من دولة الامارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، ودولة قطر، والمملكة العربية السعودية. كما أصبحت مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون ترتبط ارتباطا وثيقاً بمشروعات إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون. وسيحتاج العالم إلى كميات كبيرة منه مستقبلاً. وقد بدأ مؤخراً افتتاح عدد من المشروعات الخاصة بإنتاج الهيدروجين الأزرق الذي يعتمد إنتاجه على تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في عدد كبير من دول العالم، والدول العربية. حيث نجحت المملكة العربية السعودية في عام 2020، في إنتاج وتصدير أول شحنة في العالم من الأمونيا الزرقاء إلى اليابان، اعتمادا على إنتاج الهيدروجين الأزرق*.

يمكن أيضاً التوسع في مشروعات إنتاج الهيدروجين الأزرق بشكل أسرع من مشروعات إنتاج الهيدروجين الأخضر، خاصة مع انخفاض مخاطر توفره لوجود وفرة من أجهزة التهذيب البخاري Steam Reforming، ومفاعلات التكسير البخاري Steam Cracking في المصافي ومصانع البتروكيماويات الكافية لإنتاجه، بينما لا يوجد في الوقت الراهن ما يكفي من أجهزة التحليل المائي المطلوبة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، فضلاً عن ضرورة التوسع في تشييد مشروعات باهظة التكاليف لإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقات المتجددة، ويتم تخصيصها بالكامل لإنتاج الهيدروجين. مما يتسبب في رفع تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر بمقدار 4 مرات عن تكلفة إنتاج الهيدروجين الأزرق. وهو ما يمثل فرصة واعدة بالنسبة لصناعة النفط والغاز في الدول العربية، إلا أن ذلك سيتطلب مزيد من الاستثمارات المالية الضخمة مستقبلاً، خاصةً في مجال إنشاء البنية التحتية، وهنا

* الهيدروجين الأزرق هو الهيدروجين الذي ينتج من لقائم أحفورية، ويرتبط إنتاجه بتقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون.

تأتي أهمية إقرار السياسات الحكومية الداعمة والمشجعة لتحقيق ذلك. وهناك فرصاً جيدة خلال السنوات القليلة القادمة لانطلاقة غير مسبوقة لبرامج احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه في الدول العربية، نظراً لامتلاكها خبرات جيدة في هذا المجال، بالإضافة إلى توفر البنية التحتية المؤهلة واللازمة لنقل وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن توفر إمكانيات وسعات لتخزينه تحت الأرض، وتوفر الاستثمارات المالية اللازمة لتنمية مثل تلك المشروعات.

يمكن التوسع في تنمية مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في عدد من الدول العربية على النطاق الإقليمي عبر إقرار وتصميم وتنفيذ السياسات المناسبة وإيجاد التدابير اللازمة للتمويل، مما يؤهل الدول العربية، وخاصة منطقة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية لتصبح مركز عالمي لتجميع وتخزين وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون. مع ضرورة الاستفادة من الخبرات الدولية في تنفيذ مثل تلك المشروعات المشتركة بين الدول في النطاق الإقليمي الواحد.

وانتهت الدراسة بعدد من الاستنتاجات والتوصيات، ومن أهمها:

- أثبتت تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون Carbon Capture, Utilization, and Storage **CCUS**، جدواها الاقتصادية في عدد من التطبيقات، وانتشرت ببطء إلى حد ما، وتنوعت تلك المشاريع من حيث المستوى مابين التجاري والتجريبي، والبحثي.
- تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون ستكون أحد أهم التقنيات الواعدة التي سيتم تبنيها في العديد من القطاعات الاقتصادية مستقبلاً، خاصة في قطاع النفط والغاز، للمساهمة في جهود والتزامات الدول نحو خفض نسب انبعاثاتها، وتعظيم الإنتاجية والربحية للصناعة.

- زيادة التعاون والتنسيق بين الحكومات، والقطاع الاستثماري الخاص لتوفير التمويل اللازم لمشروعات احتجاز واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون، والمساهمة في اتخاذ القرارات النهائية للاستثمار.
- تحديد الفرص المتوافقة مع سياسات الدول العربية ومصالحها، لتشجيع الاستثمار الآمن والمشترك، وبما يتناسب مع خطط وإستراتيجيات الدول في تنويع اقتصاداتها، وتحقيق التزاماتها الدولية نحو خفض نسب انبعاثات غازات الدفيئة.
- زيادة الاستثمارات المالية في مجال إنشاء البنية التحتية، وإقرار السياسات الحكومية اللازمة والمحفزة لتحقيق ذلك.

الفصل الأول

تقنيات احتجاز ونقل، وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

الفصل الأول
تقنيات احتجاز ونقل، وتخزين
غاز ثاني أكسيد الكربون

1. تمهيد

يهيمن قطاعي إنتاج الطاقة، والصناعة على النسبة الأعلى من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وغازات الدفيئة بنسبة حوالي 78.4 %. وتقدر نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون العالمية الناتجة من قطاع الطاقة بحوالي 73.2%. **في حين** تقدر نسب الانبعاثات الناتجة من العمليات الصناعية كثيفة الاستخدام للطاقة حوالي 5.2 % منها. حيث تُنتج صناعة الأسمنت حوالي **3%** من غاز ثاني أكسيد الكربون كمنتج ثانوي من عملية التحويل الكيميائي المستخدمة في إنتاج "الكلنكر"، وهو أحد مكونات الأسمنت الرئيسية، وذلك نتيجة تحول الحجر الجيري ($CaCO_3$) إلى كلس (CaO)، لينتج غاز ثاني أكسيد الكربون كمنتج ثانوي [27]. أما في مجال صناعة الكيماويات والبتروكيماويات، فإن غاز ثاني أكسيد الكربون يُنتج بنسب تقدر بحوالي **2.2** %، كمنتج ثانوي من إنتاج بعض البتروكيماويات. أو ينتج ضمن مزيج غازات مداخن الأفران، نتيجة استخدام الوقود الأحفوري في إنتاج الطاقة اللازمة لتشغيل المعدات والأجهزة في العمليات الصناعية لإنتاج الكيماويات [27].

1.1. إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في دول العالم

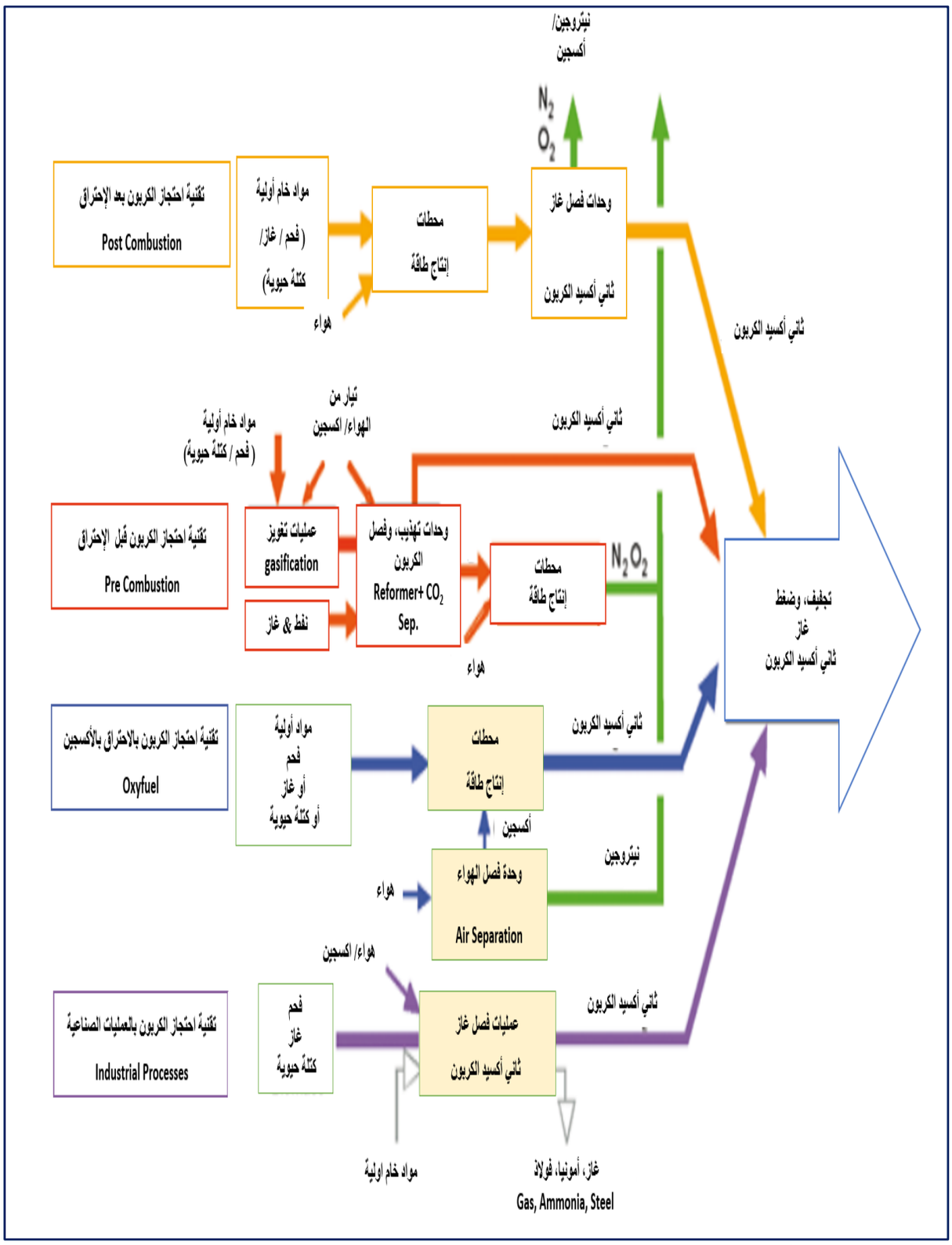
قُدر إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون العالمية وفقاً لأحدث البيانات الصادرة عن مشروع الكربون العالمي "Global Carbon Project" في عام 2019، بنحو 35.75 مليار طن ثاني أكسيد كربون مكافئ. تنتج دول العالم كميات مختلفة إلى حد كبير من غاز ثاني أكسيد الكربون، ويرتبط ذلك بالنمو المتسارع في كافة القطاعات. بشكل عام فإن الدول المتقدمة والدول ذات الاقتصادات الناشئة الكبرى هي الدول الأكثر إصداراً

لانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون. وجاء ترتيب الدول الخمس الأعلى إنتاجاً لانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون كما يلي: الصين، ثم الولايات المتحدة الامريكية، فالهند، وروسيا، ثم اليابان.

1.1. تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون

هناك أربع تقنيات رئيسية لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، تصنف حسب المرحلة التي يتم فيها احتجازه. فإذا تم احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غاز العادم " المداخن" الناتج عن احتراق الوقود الاحفوري المستخدم في إنتاج الطاقة، أو المستخدم كمواد أولية للإنتاج ، أطلق عليها تقنيات احتجاز الكربون بعد الاحتراق "Post Combustion "، أما إذا كانت عملية احتجاز الكربون تتم في مراحل سابقة، و لا يلزم حرقة، كعمليات فصله أثناء معالجة الغاز الطبيعي أو إنتاج الغاز الاصطناعي، أطلق عليها تقنية احتجاز الكربون قبل الاحتراق "Pre-Combustion"، أما تقنية الاحتراق بالأكسجين "Oxyfuel Combustion" فهي تقنية تعتمد على الحرق باستخدام غاز الأكسجين بدلاً من الهواء الجوي، واخيراً تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بالعمليات الصناعية " Industrial processes"، و فيها يتم فصل غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج من الغازات الأخرى بعدد من العمليات الصناعية ، وكما هو مبين في الشكل (1)[70].

الشكل (1): مخطط يوضح أنظمة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الأربعة



المصدر: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage

1.1.1. تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق

تستخدم هذه التقنية لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غازات مداخن المنشآت الصناعية "المصادر الثابتة" الناتج عن عمليات احتراق الوقود الأحفوري المستخدم، سواءً كان الفحم، أو السوائل النفطية الخفيفة، أو الغاز الطبيعي. وهي تقنيات مجربة ومطبقة على المستوى التجاري، ومجدية اقتصادياً.

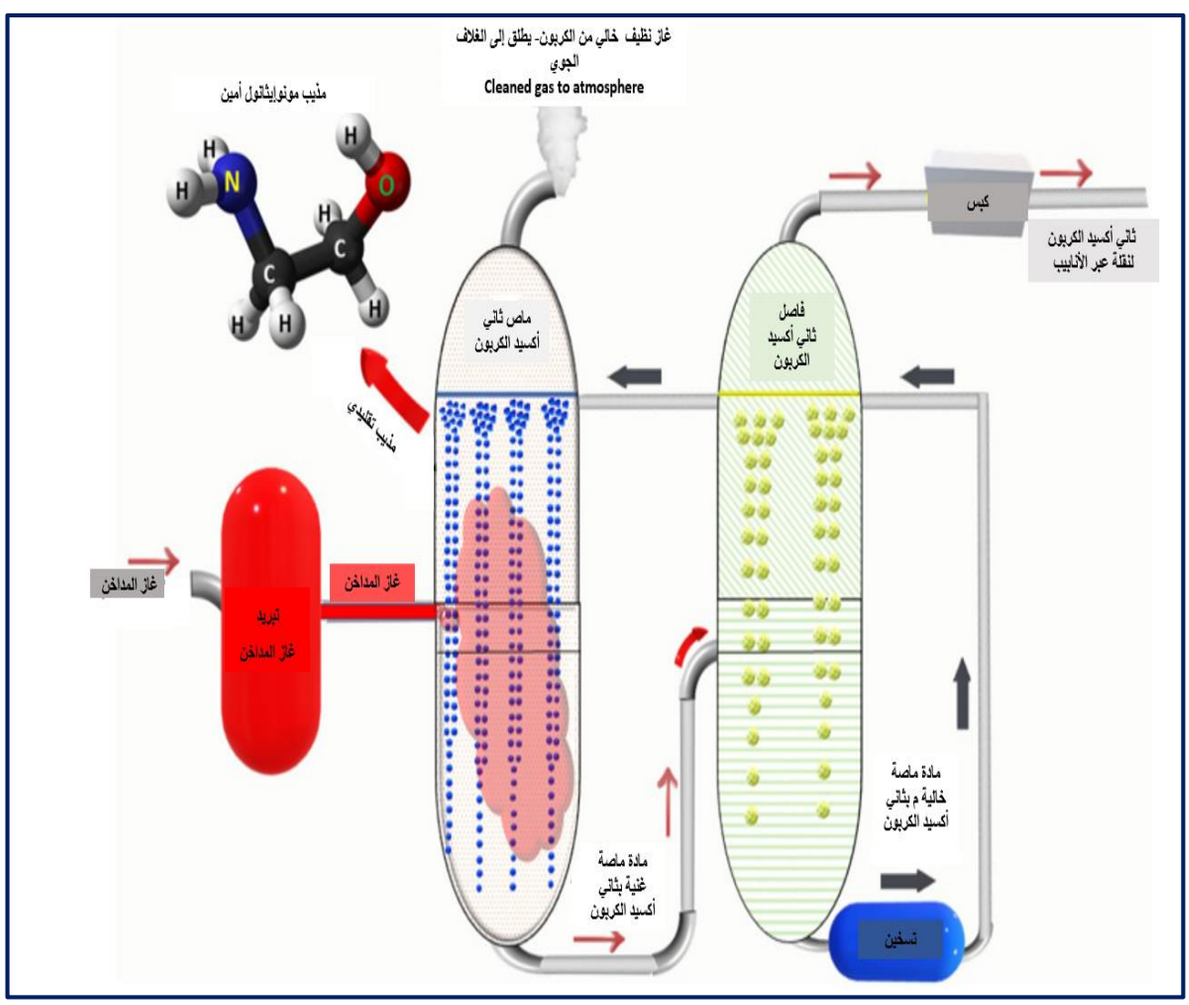
يختلف تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج في مزيج غاز عادم الإحتراق حسب النشاط الصناعي ونوع الوقود المستخدم. فتتراوح نسبته في مزيج غاز العادم الناتج من محطات إنتاج الطاقة الكهربائية التي تعمل بالفحم ما بين 12-20 %، بينما تتراوح نسبته في حال استخدام الغاز الطبيعي كوقود ما بين 3-4 %. اما في صناعة الأسمنت فتتراوح نسبته في مزيج غاز العادم ما بين 14-33%، وتصل إلى حوالي 20-44 % في صناعة الحديد والصلب [80].

تستخدم هذه التقنية بشكل كبير لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من محطات إنتاج الطاقة الكهربائية، وتساهم في خفض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون منها بنسب تتراوح ما بين 80-90%، لكن بشرط أن تعمل أنظمة احتجاز الكربون بنسب مرتفعة تتراوح ما بين 85-95%. إن تطبيق هذه الطريقة في محطات إنتاج الطاقة الكهربائية يرفع من تكلفة إنتاج الكهرباء، مقارنة بمحطات إنتاج الكهرباء التي لا تحتوي على مثل هذه الأنظمة لاحتجاز الكربون. حيث تزداد تكلفة إنتاج الميغا واط / ساعة من الكهرباء بمقدار 12-36 دولار أمريكيا، وهو ما يعادل حوالي 0.012-0.036 دولار لكل كيلوواط / ساعة [70].

قبل مرحلة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بهذه التقنية لابد من إجراء عدد من الخطوات، أولها تمرير مزيج غاز العادم عبر مفاعلات خاصة لنزع غاز النتروجين، وإزالة

الكبريت، والغبار. ثم تبدأ عملية التبريد لمنع تدهور خواص مذيبات الامتصاص المستخدمة في المراحل اللاحقة. ثم يضخ مزيج غاز المداخن المعالج إلى مفاعل أخر يحتوي على مذيب مناسب لامتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون. وبعد أن يتشبع المذيب المستخدم بغاز CO_2 ينشط بالحرارة لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون منه، لإعادة استخدامه مرة أخرى في مفاعل الامتصاص. ثم تتم عملية الضغط أو الكبس لتسهيل عمليات نقل غاز ثاني أكسيد الكربون بالوسائل المختلفة. يبين في الشكل (2) مخطط تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق.

الشكل (2): تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بعد الإحتراق



المصدر: Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a revie, Environmental Chemistry Letters (2021) 19:797–849, Published online: 22 November 2020.

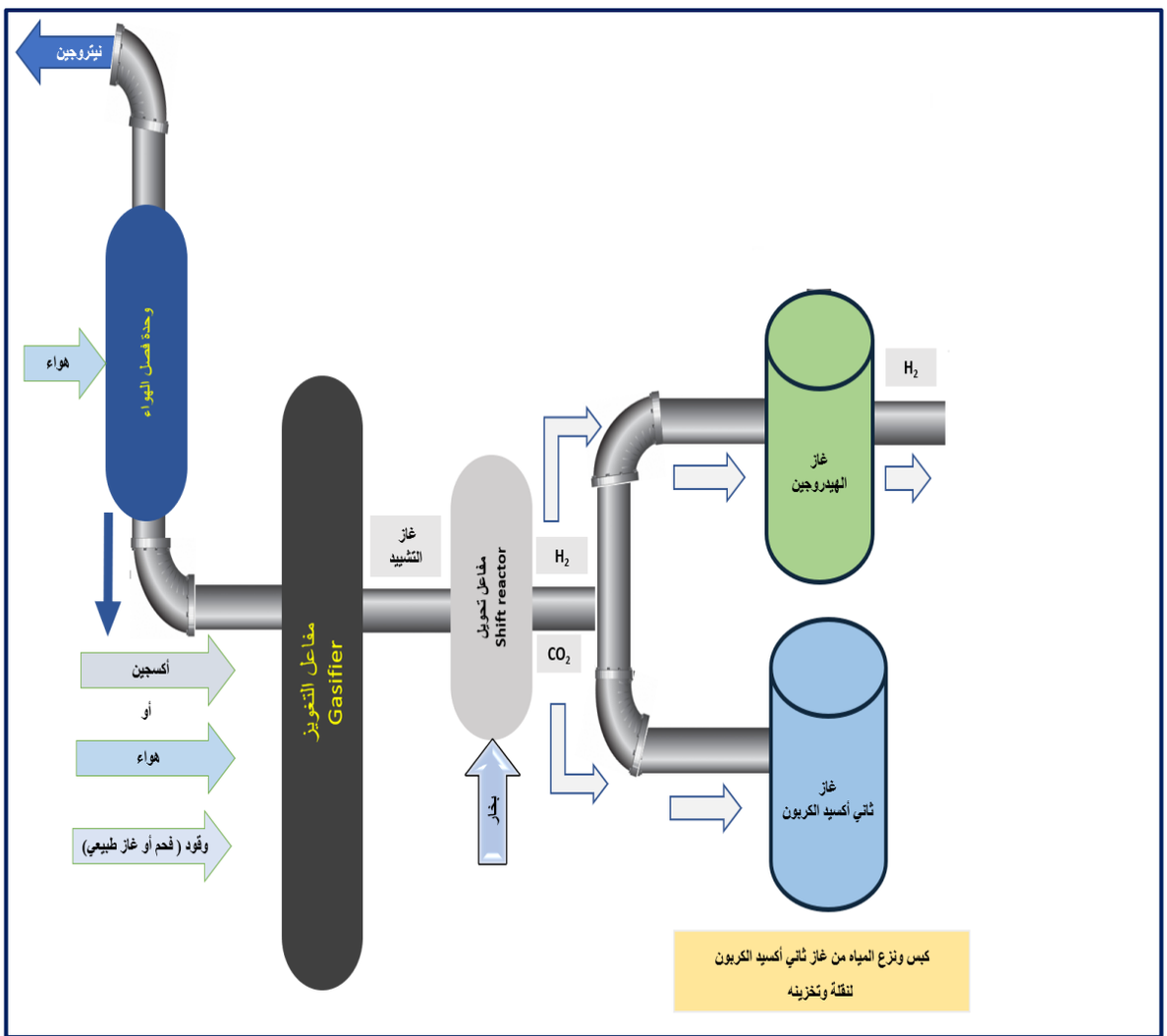
2.1.1. تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق

تعتمد تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق على تحويل الوقود "الصلب أو السائل أو الغازي" إلى الغاز الاصطناعي Syngas. ينتج الغاز الاصطناعي بعدة طرق، منها طريقة التغويز "Gasification" للفحم، أو بتقنية الإصلاح "التهذيب" Reforming، أو بالأكسدة الجزئية "Partial Oxidation" للغاز الطبيعي. ثم يبرد الغاز الاصطناعي، ويتم تنقيته من الشوائب*، لينقل بعد ذلك إلى مفاعل التحويل "Shift Reactor"، لرفع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون بتفاعله مع بخار الماء لنسب تتراوح ما بين 25-40%، حتى يسهل فصله في مرحلة لاحقة [71]. ثم بعد ذلك يتم ضغط أو تسييل غاز ثاني أكسيد الكربون لسهولة نقله بمختلف الطرق إلى مواقع الاستخدام.

تعد هذه التقنية لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من التقنيات الواعدة نظراً لارتباطها بإنتاج الهيدروجين الأزرق، مقارنةً بتقنية احتجاز الكربون بعد الاحتراق. وعلى الرغم من ذلك فهي بحاجة إلى المزيد من التطوير والتحسين، خاصة فيما يتعلق بخفض درجة حرارة تنشيط المذيب المستخدم لتجنب عمليات تراجع فعاليته، وانخفاض كمياته بالتبخير في درجات الحرارة المرتفعة. لذا فإنه يستخدم عدد من هذه السوائل الأيونية ذات خصائص الأداء المرتفعة في هذه التقنية. يوضح الشكل (3) تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق.

* تشمل كبريتيد الهيدروجين، وحمض الهيدروكلوريك، والزئبق، وكبريتيد الكربونيل.

الشكل (3): تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق



المصدر: Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a revie, Environmental Chemistry Letters (2021) 19:797–849, Published online: 22 November 2020.

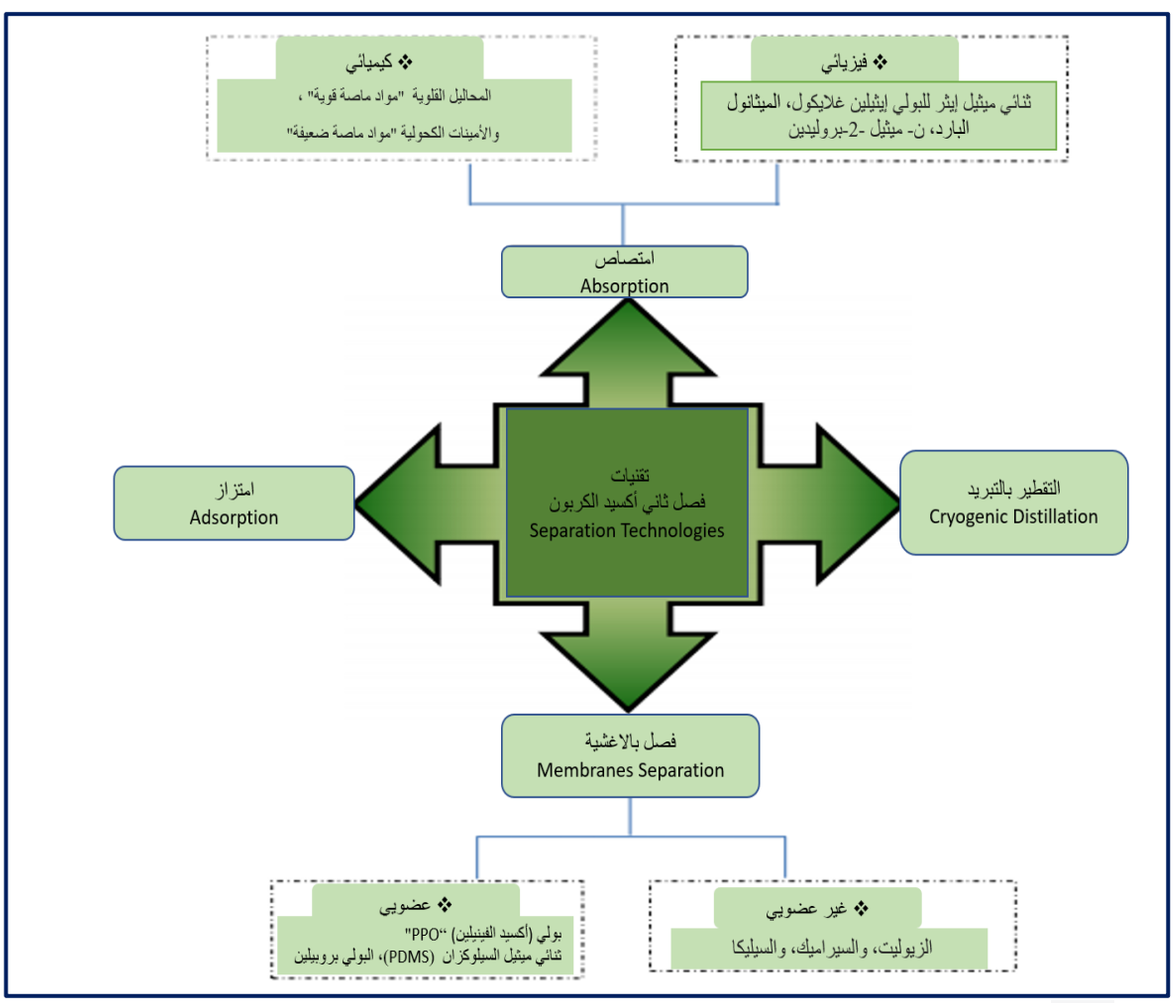
وقد استخدمت هذه التقنية منذ عقود لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون، وخفض نسبته في الغاز الطبيعي بهدف تحسين مواصفاته.

1.2.1.1. تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز قبل وبعد الاحتراق

تتعدد تقنيات أو طرق فصل غاز ثاني أكسيد الكربون سواءً بتقنيات الاحتجاز قبل الاحتراق أو بعد الاحتراق، منها ما هو مجرب ومُثبت مثل: تقنيات الامتصاص الفيزيائي أو الكيميائي. أو بعدد من التقنيات الأخرى التي لاتزال تحت التحديث والتطوير مثل

الامتزاز، أو التقطير بالتبريد، أو الفصل بالأغشية. وتتميز كل تقنية بعدد من المميزات، ويعترضها بعض القيود. يبين الشكل (4) تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز قبل و/ أو بعد الاحتراق.

الشكل (4): تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون، المحتجز قبل و/ أو بعد الاحتراق



المصدر: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges.

يعتمد اختيار تقنية الفصل المناسبة، على عدد من المحددات، ومنها على سبيل المثال نسب تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في المزيج، ودرجة الحرارة، وضغط تيارات مزيج الغاز الحاوي له، سواءً كان غاز المداخن أو الغاز الطبيعي.

1.1.2.1.1. الامتصاص Absorption

هناك نوعان من تقنيات الفصل بالامتصاص، وهما الامتصاص الكيميائي، والامتصاص الفيزيائي:

1.1.1.2.1.1. الامتصاص الكيميائي Chemical Absorption

تستخدم تقنية الامتصاص الكيميائي، لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون الموجود بنسب منخفضة، في الغاز الاصطناعي الناتج من عمليات تغويز الفحم بتقنيات الاحتجاز بعد الحرق، أو من الناتج عن عمليات معالجة الغاز الطبيعي بتقنيات الاحتجاز قبل الحرق.

يعتمد الامتصاص الكيميائي بشكل رئيسي على مبدأ "التحييد" Neutralization. حيث تتفاعل المادة الكيميائية الممتصة " المذيب" مع غاز ثاني أكسيد الكربون، مكونةً مركب وسطي ضعيف "Intermediate Compound"، يسهل تفكيكية بالتسخين لمكوناته الأصلية. ويشترط في مزيج غاز المداخن في هذه الحالة، أن يكون خالياً تماماً من أكاسيد الكبريت Sox، والنيتروجين NOx، لما يتسبب وجودهما في تكوين أملاح مع المذيبات المستخدمة، وهو ما يشكل صعوبة في عمليات التشغيل. كما يتسبب وجود الجزيئات الدقيقة "Particles" في تكوين الرغوة Foam، مسببةً تدهور خواص المذيب المستخدم وفقدانه.

تتميز مذيبات الامتصاص الكيميائي، المستخدمة في هذه الطريقة، بالفاعلية المرتفعة "High Reactivity"، مما يسهل من تفاعلها مع غاز ثاني أكسيد الكربون. كما

تتميز بالثبات الحراري لتقليل تدهورها مع ارتفاع درجة الحرارة، بالإضافة إلى تميزها بالوفرة، وانخفاض كلفتها، ورخص ثمنها [69].

تستخدم بعض المحاليل القلوية مثل هيدروكسيد الصوديوم، وهيدروكسيد البوتاسيوم، كمذيبات ماصة قلوية قوية. وتستخدم أيضاً بعض المحاليل القلوية الضعيفة كالأمونيا المائية (NH_3H_2O)، والأمينات الكحولية مثل أحادي الإيثانول أمين MEA، وثنائي الإيثانول أمين DEA، وثلاثي الإيثانول أمين TEA، وميثيل ثنائي الإيثانول امين MDEA. وتعد محاليل الأمين، وخاصة أحادي الإيثانول أمين، من المذيبات الأكثر استخداما على النطاق التجاري، نظراً لقدرتها الانتقائية الفائقة على امتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون، وتكوين مركب كيميائي، كما في المعادلة التالية:

$$C_2H_4OHNH_2 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow C2H_4OHNH_3 + + HCO_3^-$$

يعيب طريقة الفصل بالامتصاص الكيميائي، استخدامها لفصل النسب المنخفضة من غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج عادم المداخن، مما يحتم التعامل مع كميات كبيرة من غاز عادم المداخن، وهو ما يعني استخدام معدات كثيرة ومتنوعة ذات تكاليف رأسمالية كبيرة. بالإضافة إلى استهلاك كميات كبيرة من المذيبات الماصة الكيميائية، واستخدام كميات كبيرة من الطاقة اللازمة لإعادة تنشيط المذيب بالتسخين لفصل وتحرير غاز ثاني أكسيد الكربون من المذيب.

وقد يؤدي استخدام بعض من المذيبات الأمينية، إلى حدوث مشكلات تآكل "Corrosivity" لمعادن الأجهزة والمعدات المستخدمة، بالإضافة إلى إمكانية تدهور المذيب، وفقدانه بالتبخر، مما يسهم في ارتفاع تكاليف التشغيل، وهو ما أدى إلى إغلاق بعض المشروعات القائمة على هذه التقنيات [71].

طورت شركة "شل" طريقة جديدة أطلق عليها اسم (Shell CansolvTM)، تعتمد على استخدام خليط من المذيبات الأمينية لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون، ومن مزايا الطريقة المطورة، أن الطاقة اللازمة لإعادة تنشيط المذيب المستخدم تتراوح ما بين 2.5 -2.9 غيغا جول لكل طن ثاني أكسيد كربون، وهي طاقة أقل بكثير من الطاقة المستخدمة مع المذيبات التقليدية الأخرى، والأكثر استخداماً مثل " أحادي إيثانول أمين "، والذي يستهلك حوالي 3.5 غيغا جول لكل طن ثاني أكسيد كربون. وتناسب الطريقة الجديدة عدد من الصناعات المختلفة مثل التكرير، وتوليد الكهرباء، والتعدين، وصناعة البتروكيماويات.

2.1.1.2.1.1. الامتصاص الفيزيائي Physical Absorption

تصلح هذه التقنية لفصل التركيزات المرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز بعمليات الاحتجاز قبل الاحتراق، وتستخدم على نطاق تجاري لامتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من إنتاج الغاز الاصطناعي "syngas" بطرق تغويز الفحم، أو لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من معالجة الغاز الطبيعي في حالة ارتفاع نسبته عن 4 %.

تعتمد تقنية الفصل الفيزيائي على قانون هنري Henry's Law "الذي ينص على أن كمية الغاز الذائب في السائل تزداد بزيادة الضغط، وانخفاض درجة الحرارة"، حيث تنتشر جزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون بين جزيئات المذيب المستخدم. وتستخدم مجموعة متنوعة من المذيبات لهذا الغرض والتي تتميز بالانتقائية المرتفعة، مثل: "كربونات الغلايكول"، وكربونات البروبيلين، و "ن- ميثيل -2- بيروليدون" N-methyl-2-Pyrrolidone. ومن الطرق المتاحة على النطاق التجاري، كل من: طريقة "سيليكسول"Selexol Process، وفيها يستخدم مذيب "ثنائي ميثيل إيثر بولي

إيثيلين غلايكول" DMPEG، في حين يستخدم الميثانول البارد كمذيب في طريقة "ريكتيسول" Rectisol [69].

يعيب تقنية الفصل بالامتصاص الفيزيائي استخدام وحدات فصل ذات أحجام كبيرة لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يصعب من إمكانية تركيبها في المنشآت ذات المساحات الضيقة، كالمنصات البحرية لمعالجة الغاز الطبيعي في الحقول البحرية [54،69]. لذا فإنه يتم تطويرها بشكل مستمر لتطبيقها في المنشآت القائمة قدر الإمكان، وبهدف خفض تكلفة رأس المال، وكثافة الطاقة المستخدمة.

هناك عدد أخر من تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون، والتي مازالت في طور البحث أو التجريب، والتي لم يثبت جدواها الاقتصادية لتعمم على النطاق التجاري، وتحتاج إلى مزيد من البحث والتطوير، ومنها تقنيات الفصل بالأغشية، والفصل بالتقطير بالتبريد [72].

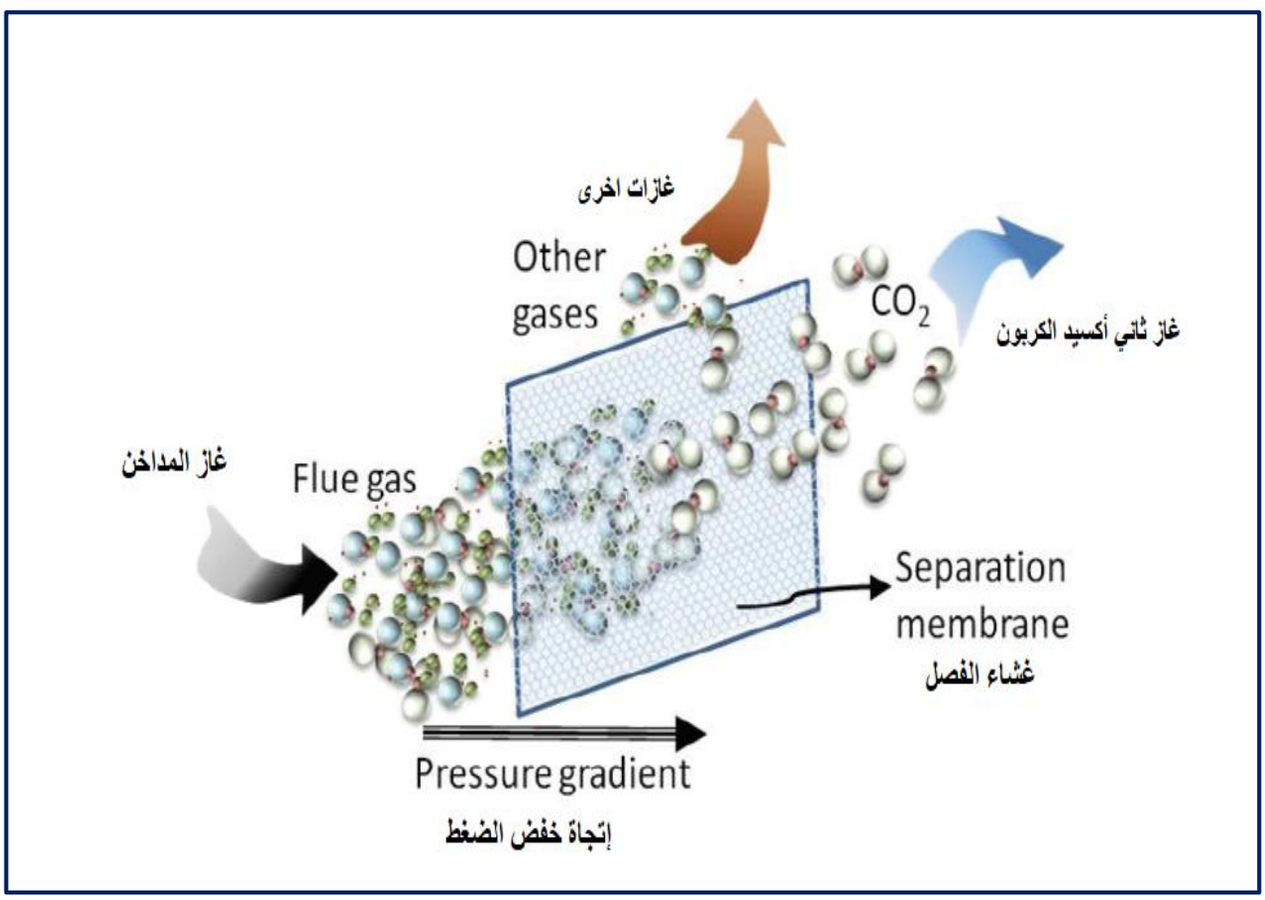
2.1.2.1.1. الفصل بالأغشية Gas Separation Membranes

استخدمت تقنية الفصل بالأغشية على نطاق واسع لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون عن الهيدروجين CO_2 / H_2 في تقنيات الاحتجاز قبل الاحتراق، واستخدمت كذلك لفصله عن النيتروجين CO_2 / N_2 في تقنيات الاحتجاز بعد الاحتراق، بينما استخدمت في تقنيات الاحتراق بالأكسجين لفصل الأكسجين عن النيتروجين O_2 / N_2 [83].

والأغشية عبارة عن مواد مسامية / شبه منفذة صغيرة الحجم، ذات فتحات جانبية تعمل كمرشحات، يمكن استخدامها لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون بشكل انتقائي عن مكونات مزيج غاز المداخن الآخرى، خاصة في حالة انخفاض نسبته [69،71]. حيث تعتمد عملية **فصل الغاز بالأغشية**، على جذب السائل لجزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون من جانب الغشاء، الذي يكون فيه الضغط أعلى، إلى الجانب الأقل في الضغط.

ويعمل الغشاء في هذه الحالة كحاجز فاصل لمنع الاختلاط، والسماح فقط لجزئيات غاز ثاني أكسيد الكربون بالمرور دون باقي المكونات الأخرى من مزيج غاز المداخن. يبين الشكل (5) تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالأغشية [79].

الشكل (5): تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالأغشية



المصدر: Physical, Chemical, and Biological Carbon Capture and Storage Methods, Published by the American Society of Civil Engineers,2015

تتميز تقنيات الفصل بالأغشية بانخفاض التكلفة الرأسمالية نسبياً، لتميزها بانخفاض تكاليف استبدال الغشاء لوحدة الفصل الرئيسية، مقارنة بطرق الفصل التقليدية والتي يتم فيها استهلاك كميات كبيرة من المذيب المستخدم كمادة ماصة. كما تتميز باستهلاك كميات أقل من الطاقة، وانخفاض البصمة الكربونية، وسهولة إجراء التعديلات، والتوسعات اللازمة في المحطات المشيدة لإنتاج الطاقة.

تستخدم أنواع متعددة من الأغشية في وحدات الفصل ولكل منها ما يميزها، وما يعيبها. حيث تستخدم الاغشية المعدنية والأغشية الكربونية لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون عن الهيدروجين في تقنيات قبل الاحتراق، والتي تتميز بالانتقائية العالية، ولكن يعيبها ارتفاع التكلفة. بينما تتميز أغشية "الألومينا" بانخفاض التكلفة، وارتفاع الثبات الكيميائي والفيزيائي، ويعيبها الانتقائية المنخفضة. وتتميز أغشية "السيليكا" بارتفاع الثبات الحراري، وانخفاض التكلفة، ولكن يعيبها انخفاض الثبات الحراري المائي "Hydrothermal Stability" [83]. بينما تستخدم الأغشية البوليمرية في تقنيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق لفصله عن النيتروجين، وتتميز بالانتقائية المرتفعة، وانخفاض التكلفة. ويعيبها انخفاض الثبات الكيميائي والفيزيائي، بالإضافة إلى سمكها الكبير نسبياً [83].

كما تستخدم أغشية الزيوليت Zeolite Membrane، وأغشية الأطر المعدنية العضوية Metal–organic frameworks (MOFs) في تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في مراحل قبل، وبعد الاحتراق، [83،78]. اما للفصل بين كل من غازي الأكسجين والنيتروجين بتقنيات الاحتراق بالأكسجين، فتستخدم أغشية الفلوريت Fluorite، وأغشية البيروفسكايت Perovskite [83]. وعلى الرغم من مميزات تقنيات الفصل بالأغشية، إلا انها تواجه عدد من التحديات، أبرزها: إمكانية حدوث تكثيف للمياه على الغشاء، مما يؤثر سلباً على الخواص الانتقائية والنفاذية لها. كما أن بعض أنظمة الأغشية المستخدمة تعاني من صعوبة ضبط درجات الحرارة، بالإضافة إلى إمكانية حدوث تغيير جذري في خصائص الغشاء الفاصل بسبب التذبذب في نسب الرطوبة، كما يمكن أن تمر بعض الانبعاثات الخاصة بأكاسيد النيتروجين، وأكسيد الكبريت عبر الغشاء بعد عمليات التشغيل [71].

3.1.2.1.1. الامتزاز Adsorption

تستخدم هذه التقنية بكفاءة لفصل النسب المنخفضة من غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غاز المداخن، وهي من الطرق الواعدة. ويتطلب تطبيقها في المنشآت القائمة قدر بسيط من التعديلات، إلا انها مازالت على مستوى النطاق التجريبي، وتحت التطوير المستمر. تتميز المواد الممتزة الجديدة المستخدمة في هذه الطريقة بالثبات الحراري، والانتقائية العالية، والقدرة المرتفعة على امتزاز غاز ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى القوة الميكانيكية الكافية لتحمل عمليات التدوير المتكرر [85]. تتم عمليات الفصل بالامتزاز بالطرق الكيميائية، أو الفيزيائية [69]، من خلال تمرير غاز ثاني أكسيد الكربون على المادة الصلبة الممتزة "Solid bed" حتى تتشبع. ثم يتم تنشيط المادة الممتزة بتخفيض الضغط، ورفع درجة الحرارة "بالتسخين"، والغسيل بالسوائل لإعادة نزع وتحرير غاز ثاني أكسيد الكربون منها [54].

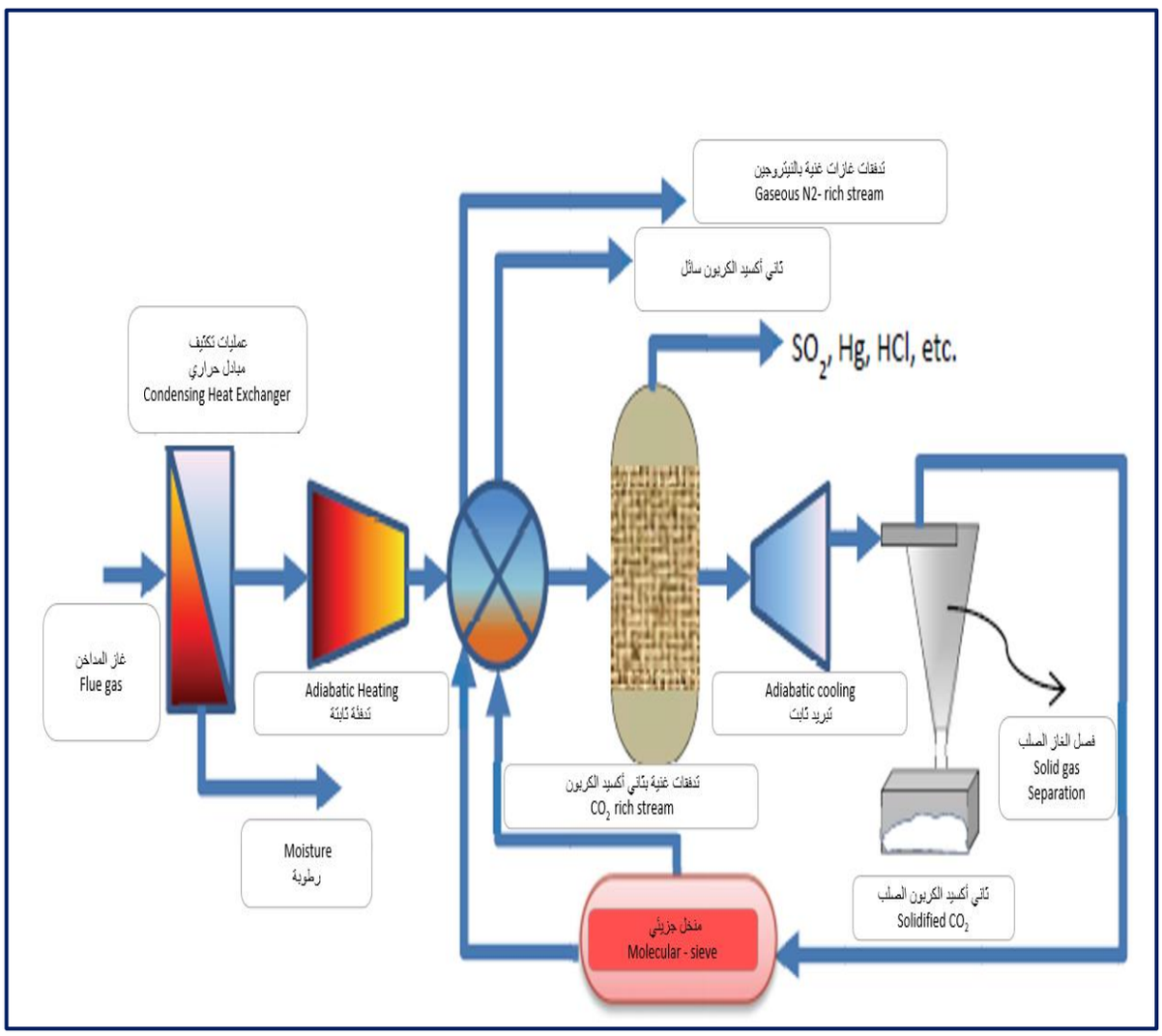
ويستخدم لهذا الغرض عدد كبير ومتنوع من المواد الممتزة، مثل ألياف الكربون المتجانسة "Carbon Fiber Monolithic Adsorbents"، ومركبات راتنج الالياف الفينولية للكربون النشط "Activated Carbon Fiber-Phenolic Resin Composites"، وممتزات الميلامين- فورمالدهايد عالية المسامية، وممتزات الأمين، والأنثراسيت المنشط بالبخار، والكربون المنشط، وزركون الليثيوم "Lithium Zirconate"، وسيليكات الليثيوم، والألومينا، والأكاسيد المعدنية، والزيوليت [69].

4.1.2.1.1. التقطير بالتبريد Cryogenic Distillation

تستخدم هذه التقنية لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون الذي تصل نسبته لنحو 90 % من خليط غاز عادم المداخن [69]. وتعتمد هذه العملية على تكثيف غاز ثاني أكسيد الكربون، وتحويله إلى سائل عند درجات منخفضة جداً (أقل من -73.3° م)، ليسهل

فصله عن باقي مكونات المزيج التي تكون في الحالة الغازية [69]. وتتميز هذه الطريقة بإمكانية فصل نسب مرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غاز المداخن. بينما يعيبها استهلاك كميات كبيرة من الطاقة اللازمة لعمليات التبريد، وضرورة استخدام ضغوط مرتفعة لإتمام عمليات التسييل. يبين الشكل (6) تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالتقطير بالتبريد.

الشكل (6): تقنية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالتقطير بالتبريد



المصدر: Physical, Chemical, and Biological Carbon Capture and Storage Methods, Published by the American Society of Civil Engineers,2015

3.1.1. تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بالاحتراق بالأكسجين Oxy-combustion

يختلف عمل هذه التقنية عن تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد الاحتراق، في استخدام الأكسجين في عمليات الحرق بدلاً من الهواء الجوي، ويكون غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن هذه التقنية ذو درجة نقاوة عالية، وبتركيزات مرتفعة. حيث يسهم استخدام الأكسجين عالي النقاوة في التخلص من غاز النيتروجين من مزيج غاز المداخن، ويتيح فصل 100% من غاز ثاني أكسيد الكربون. وهو ما يعني استخدام معدات اقل حجماً، وأصغر عدداً، مما يسهم بشكل كبير في خفض التكلفة الرأسمالية للمشروع. إلا أنه على النقيض فإن إضافة وحدات لفصل الأكسجين من الهواء الجوي اللازم لعمليات الاحتراق" ذات التكلفة الرأسمالية المرتفعة"، يؤدي إلى زيادة تكاليف التشغيل لهذه التقنية [54]. هذا ومازالت التقنية على النطاق التجريبي، وتحت التطوير المستمر [70].

4.1.1. تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بالعمليات الصناعية

استخدمت تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بالعمليات الصناعية منذ أكثر من 80 عام، وكان يتم إطلاق معظمه في الهواء الجوي، نظراً لعدم وجود اية حوافز تشجيعية، او شروط لتخزينه. وتستخدم هذه التقنية في مشروعات استخلاص غاز ثاني أكسيد الكربون من الغاز الطبيعي، وإنتاج الغاز الاصطناعي لإنتاج الامونيا، والكحوليات، والوقود الاصطناعي [70].

2.1. نقل غاز ثاني أكسيد الكربون

بمجرد الانتهاء من عمليات احتجاز وفصل غاز ثاني أكسيد الكربون، يتم نقله مباشرة للتخزين في الموقع المناسب، أو للاستخدام في الأغراض الصناعية. وفي واقع الأمر فإنه يتم نقل غاز ثاني أكسيد الكربون في مناطق كثيرة من العالم، ومن غير المتوقع أن

تكون عمليات النقل عائقاً أمام انتشار مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه تخزينه حول العالم.

يحدد كل مشروع لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون طريقة النقل الأنسب له، طبقاً للغرض النهائي من احتجازه. فهناك عدة طرق آمنة لنقله سواءً كغاز عبر خطوط الأنابيب تحت الأرض أو فوقها، وقد تم بالفعل تشغيل عدد كبير من شبكات خطوط الأنابيب التجارية لأكثر من 30 عام، كما يمكن أيضاً نقل كميات صغيرة منه بواسطة الشاحنات أو السكك الحديدية، بينما تقوم بعض المشروعات بتسييله ونقله بواسطة الناقلات البحرية[74،72].

1.2.1. النقل بواسطة خطوط الأنابيب

تعد خطوط الأنابيب ذات الضغط العالي هي الطريقة المفضلة لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون بين مواقع الاحتجاز والتخزين، نظراً لكونها الوسيلة الأقل كلفة، والأكثر اماناً لمعظم المشاريع العاملة في هذا المجال. فضلاً عن أن التقنيات المستخدمة في نقل غاز ثاني أكسيد الكربون عبر خطوط الأنابيب هي نفسها المستخدمة على نطاق واسع لنقل الغاز الطبيعي، والنفط، والسوائل الأخرى حول العالم. يبلغ طول شبكة الانابيب لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم حوالي 6500 كم، تقع معظمها في الولايات المتحدة الأمريكية، التي يوجد بها حوالي 50 خط، تنقل حوالي 68 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون سنوياً، يستخدم معظمها في عمليات الاستخلاص المعزز للنفط.

يتم ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون ليتحول من الطور الغازي "Gas Phase" إلى الطور الكثيف "Dense Phase "، حتى يسهل نقله عبر شبكات الأنابيب، وفيها تكون صفاته من حيث الكثافة كالسائل، ولكن لزوجته كالغاز، وهي الحالة الأكثر كفاءة للنقل

عبر خطوط الأنابيب. وتهدف عملية الضغط هذه إلى خفض حجم غاز ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير، مما يسمح باستخدام أنابيب ذات أقطار أصغر [74].

عندما يخضع بناء خطوط أنابيب نقل غاز ثاني أكسيد الكربون في بعض الدول مثل ألمانيا، لقوانين شديدة التقييد يتم اللجوء إلى طريقة النقل بواسطة الناقلات البحرية، ويعد هو الخيار الأكثر مرونة في مثل تلك الحالات [74].

2.2.1. النقل بواسطة الناقلات البحرية

ينقل غاز ثاني أكسيد الكربون بعد تسييله بواسطة الناقلات البحرية منذ أكثر من 20 عام، ويتم بالفعل شحنه على نطاق ضيق في أوروبا، حيث تنقل السفن حوالي 1000 طن من غاز ثاني أكسيد الكربون عالي الجودة من مصادر إنتاجه إلى نقاط التوزيع الساحلية لاستخدامه في بعض الصناعات الغذائية.

تبلغ السعة القصوى الحالية للناقلات البحرية المخصصة لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون المسال حوالي 3600 م^3، وهو ما يعادل حوالي 1770 طن. ومع التطورات المتلاحقة لمفهوم احتجاز ونقل واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون فإن قدرة النقل البحري تحتاج إلى زيادة كبيرة، كما تتطلب مزيد من الابتكار في تصميم الخزانات وأنظمة المناولة [76].

3.1. تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

يقصد بتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون توفير أماكن طبيعية كمستودعات ذات سعات كبيرة لتخزينه بصورة آمنة ومستدامة يمكن أن تصل لآلاف السنين.

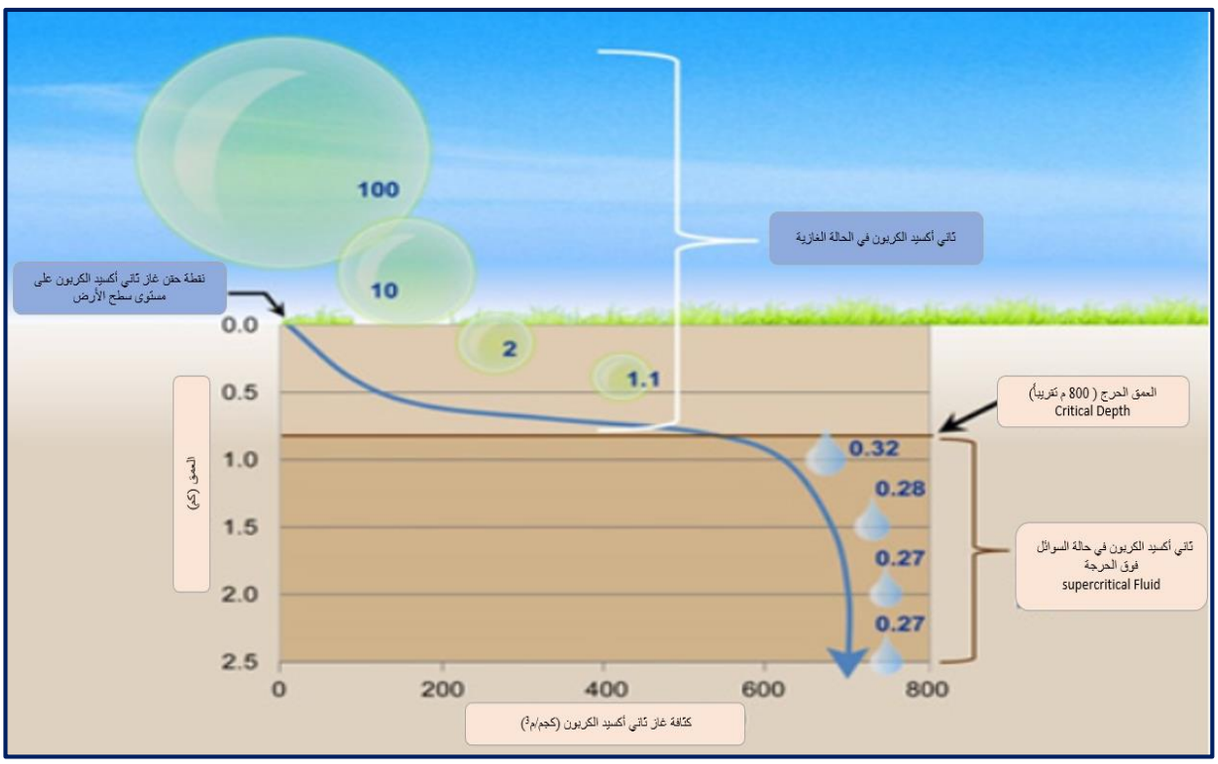
1.3.1. التخزين الجيولوجي " المكمني" Geological Storage

يتطلب بشكل أساسي التخزين الجيولوجي لغاز ثاني أكسيد الكربون وجود سلاسل سميكة من الصخور الرسوبية، ويشار إليها باسم الأحواض، أو الخزانات "Basins".

ويجب أن تتوفر صفات خاصة بتلك الاحواض من حيث العمق، لتمتد لأكثر من 1000م تحت سطح الارض، حتى تكون مؤهلة من حيث السعات التخزينية المناسبة. ويشترط كذلك أن يشتمل التسلسل الرسوبي للخزان على طبقات تحتوي على مكمن مناسب [48]. كما يجب أن تتوفر بعض الشروط الضرورية والهامة الأخرى لضمان عمليات التخزين الأمن والمستدام، ومنها: ألا تكون درجات الحرارة تحت مستوى الأرض أعلى من 35°م/كم، وعدم وجود تصدعات أو تشققات في الأحواض أو في المناطق المحيطة بها، لتجنب مخاطر التسرب المحتمل لغاز ثاني أكسيد الكربون، مع ضرورة مراعاة الضغوط، حيث أن الضغط الزائد الناتج عن التخزين قد يسبب مشاكل تسرب أو تشقق للطبقات المحيطة بالخزان [48].

تعتمد آلية التخزين الجيولوجي على حقن غاز ثاني أكسيد الكربون في التكوينات الجيولوجية المسامية، التي تقع على بعد كيلومترات تحت سطح الأرض، تحت ضغط عالي ودرجات حرارة مرتفعة، بحيث يكون فيها غاز ثاني أكسيد الكربون في الحالة السائلة أو فوق الحرجة، وهي الحالة التي يكون فيها الغاز ذو خصائص متوسطة بين الحالتين الغازية والسائلة. ويقل حجم غاز ثاني أكسيد الكربون بزيادة حقنة على أعماق تحت سطح الأرض، ويحول من الحالة الغازية إلى ما قبل السائلة، كما هو مبين في الشكل (7).

الشكل (7): رسم توضيحي لتأثير زيادة الضغط على تغير الحالة لغاز ثاني أكسيد الكربون

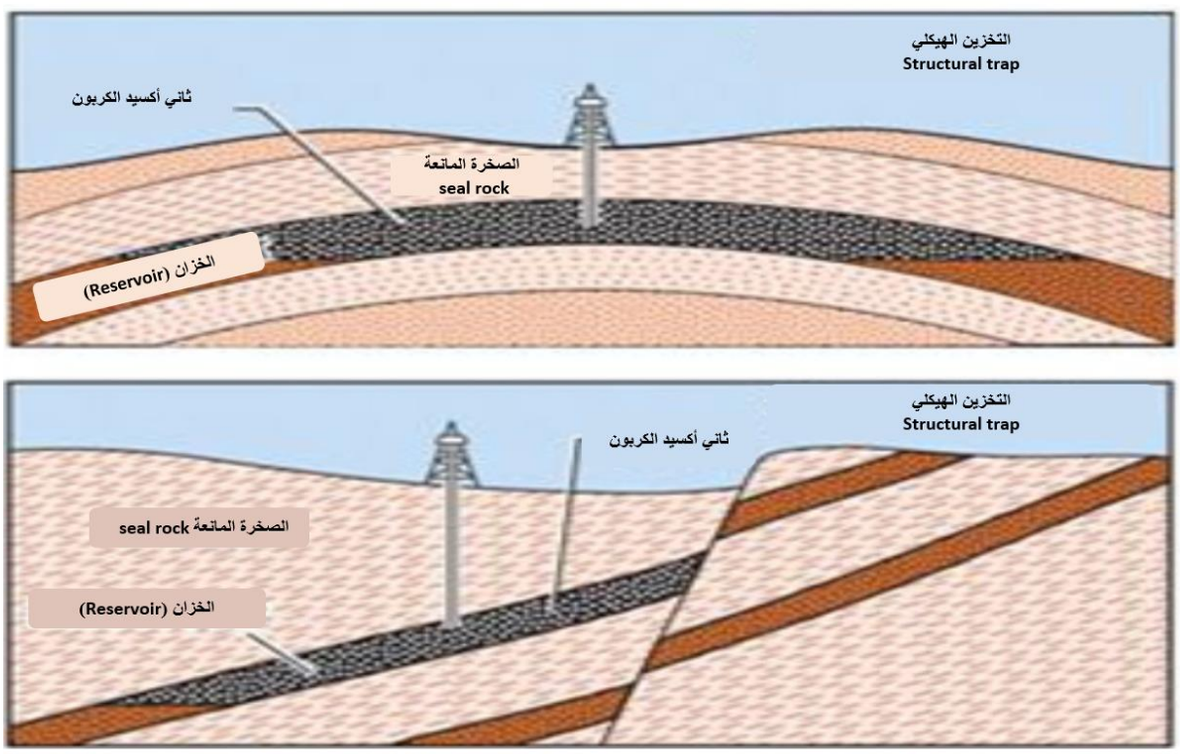


* **توضح الأرقام الزرقاء، حجم ثاني أكسيد الكربون عند كل عمق مقارنة بحجم 100 على السطح.**
المصدر:https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs

تعد الأحواض الموجودة في المناطق ذات المستويات المنخفضة من النشاط الزلزالي مواتية لعمليات التخزين، بينما تتطلب الأحواض الموجودة في المناطق الزلزالية عالية النشاط مزيد من الدراسات. بمجرد حقن غاز ثاني أكسيد الكربون يتحرك إلى أعلى حتى يصل إلى طبقة من الصخور غير النفاذة، يطلق عليها اسم "صخرة الغطاء" Cap Rock، تغطي موقع التخزين، وتعمل على احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في التكوين الجيولوجي، ولا يمكن للغاز أن يخترقها. تعرف هذه الآلية للتخزين باسم **التخزين الهيكلي** Structural Storage، وهي نفس الآلية التي سمحت بتخزين وبقاء الوقود الأحفوري من النفط أو الغاز الطبيعي تحت الأرض لملايين السنين بشكل آمن، مما يعطي

الثقة بإمكانية تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون بأمان، ولفترات زمنية طويلة. يبين الشكل(8) آلية التخزين الهيكلي لغاز ثاني أكسيد الكربون.

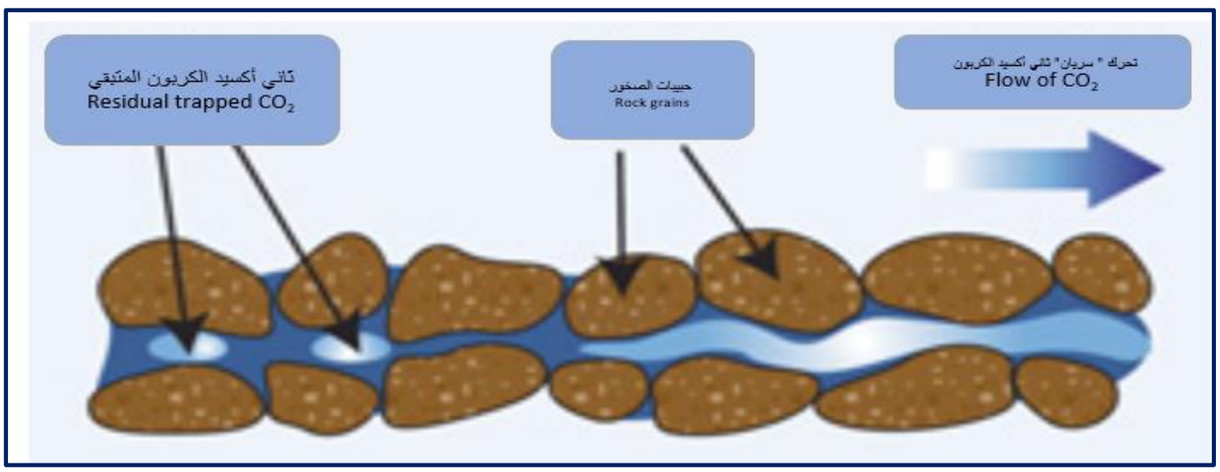
شكل (8): آلية التخزين الهيكلي لغاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر:https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs

في حال تحرك غاز ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى باتجاه صخرة الغطاء بعد حقنه داخل موقع التخزين الجيولوجي، يتبقى منه جزء في مسام أو حبيبات طبقة من الصخور المجهرية، ويكون محاصراً بإحكام في مسامها، وهو ما يعرف بآلية **التخزين الترسيبي** Residual Storage [81]، كما هو مبين في الشكل (9).

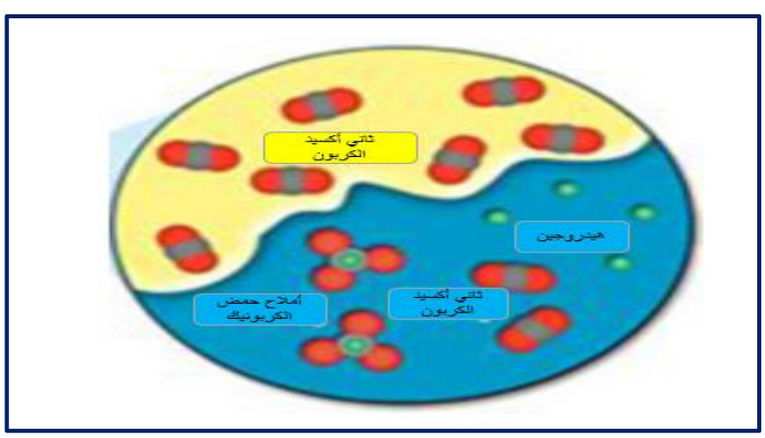
الشكل (9): آلية التخزين الترسيبي لغاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs

بمرور الوقت يبدأ غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز في التكوينات الملحية العميقة في الذوبان في الماء المالح المحيط به، لتتحد كميات ضئيلة من غاز ثاني أكسيد الكربون الذائب مع ذرات الهيدروجين لتكون أملاح حمض الكربونيك HCO_3^-، مما يؤدي إلى زيادة كثافته، ليبدأ بعدها في الهبوط إلى أسفل طبقة التخزين وتُعرف هذه الآلية باسم **التخزين الانحلالي** Dissolution Storage. يبين الشكل (10) آلية التخزين الانحلالي لغاز ثاني أكسيد الكربون.

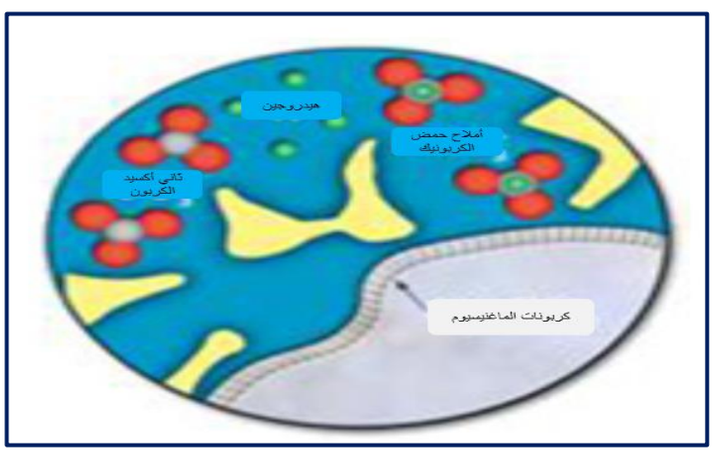
الشكل (10): آلية التخزين الانحلالي لغاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs

أما آلية **التخزين المعدني** Menial Storage، فهي آلية ترتبط فيها جزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون كيميائياً بمعادن الصخور المحيطة به، لتكون أملاح معدنية جديدة تعمل على تغطية مسام الصخور وتسهم في احتجازه. يبين الشكل (11) آلية التخزين المعدني لغاز ثاني أكسيد الكربون.

الشكل (11): آلية التخزين المعدني لغاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs

تقل مخاطر حدوث تسريب لغاز ثاني أكسيد الكربون، مع مرور الوقت وكلما طالت مدة التخزين الجيولوجي، حيث تتغير آليات التخزين بطول المدة، لتتحول من التخزين الهيكلي إلى التخزين الترسيبي، فالتخزين الانحلالي ثم التخزين المعدني، وعندها يصبح غاز ثاني أكسيد الكربون أقل حركة ونشاطاً.

تعد معدلات تسرب غاز ثاني أكسيد الكربون المخزن في الخزانات الجيولوجية في جميع الأحوال مقاربة لمعدلات التسرب الناتجة عن عمليات الاستخلاص المعزز للنفط، أو لتلك الناتجة أثناء مراحل إنتاج وتخزين الغاز الطبيعي. وتشير دلائل نتائج دراسات المراقبة لعمود غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز في التكوينات الجيولوجية لعدد من مشروعات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز القائمة، إلى نجاح عمليات احتجازه بشكل

كامل وآمن لأكثر من 30 عام، خاصةً إذا ما تمت دراسات اختيار مواقع التخزين بصورة جيدة منذ البداية، وتطبيق برامج المراقبة لرصد أي انبعاثات أو تسريبات. يترافق ذلك مع استخدام النظم والوسائل الوقائية لوقف أي انبعاثات أو التحكم بها حال حدوثها [55].

2.3.1. التخزين تحت الماء Under Water Storage

يمكن تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون على أعماق تزيد عن 1000 م تحت سطح الماء في البحار والمحيطات، لضمان ارتفاع كثافته عن كثافة المياه، وبما يضمن بقائه تحت سطح الماء دون عودته مره أخرى إلى الغلاف الجوي [54].

3.3.1. تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في الخزانات الطبيعية

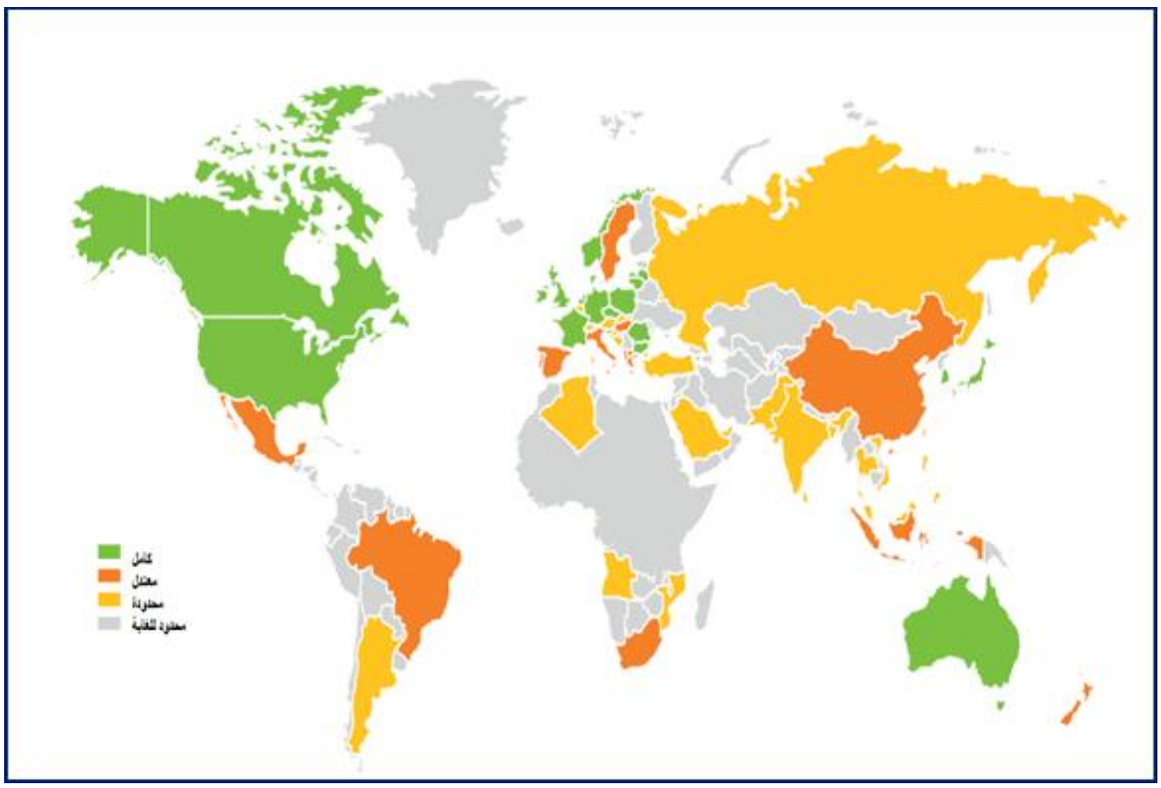
هناك عدد كبير من الخزانات أو الأحواض، أو المستودعات الطبيعية والتي تعد فرصاً محتملة لحقن غاز ثاني أكسيد الكربون لأغراض التخزين المستدام، ومنها: التكوينات الملحية العميقة Deep Saline Formations- DSF، التي تتميز بصخورها المسامية والنافذة، والممتلئة بالمياه المالحة، وحقول النفط والغاز المستنفدة أو الناضبة Depleted/Depleting Oil and Gas Fields-DGOF، والتي توقف استخراج الهيدروكربونات منها بسبب استنفاد الاحتياطيات الاقتصادية، خاصة مع إمكانية توفر المعلومات الكافية عن المغلق منها والمهجور. بالإضافة إلى إمكانية التخزين في طبقات الفحم غير المستغلة [48،81].

اكدت دراسة حديثة أعدها معهد احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون العالمي "Global CCS Institute" في عام 2016، وجود أحواض تخزين جيولوجية كبيرة في معظم دول العالم. ولكن من الضروري عدم مقارنة السعات التخزينية التقريبية لكل حوض تخزين محتمل بالأحواض الأخرى على مستوى الدول، لأن المعلومات، والظروف الجيولوجية تحت السطحية، وطرق الحسابات، وجودة البيانات، ومستوى التفاصيل

المستخدمة في التقييم تختلف من مكان لآخر، مما يؤثر على تقديرات الكميات الاجمالية من غاز ثاني أكسيد الكربون التي يمكن حقنها وتخزينها [48]. هذا وقد تم تصنيف السعات التخزينية التقديرية المتاحة في الدول المختلفة من العالم حسب دقة البيانات المتاحة بكل دولة، وصنفت كالتالي: كامل، أو معتدل، أو محدود، أو محدود للغاية، حسب المعطيات التالية:

1. **كامل "Full":** تتضمن تقييمات شاملة (بما في ذلك الأطالس المنشورة)، وتغطي معظم أو كل احتمالات أحواض التخزين المتاحة، مصحوبة ببيانات حسابات التخزين المحتملة والمتاحة.
2. **معتدل "Moderate ":** تتضمن دراسات محلية، وأطالس منشورة دون حسابات فعالة أو تقييمات تفصيلية لخزانات التخزين المتاحة.
3. **محدودة "Limited ":** تتضمن دراسات أكثر تقييداً، وتتكون من بحث ذي صلة لأحواض أو مواقع مختارة.
4. **محدود للغاية "Very limited":** تتضمن أبحاث ضئيلة منشورة أو معدومة فيما يتعلق بإمكانيات التخزين. كما هو مبين في الشكل (12) [48]. بينما يبين الجدول (1) تصنيف بعض الدول من حيث سعات التخزين الجيولوجي المحتملة بها.

الشكل (12): تصنيف مناطق العالم حسب سعة الخزانات الطبيعية لغاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: The Global Storage Portfolio report was prepared by the Global CCS Institute,2016.

الجدول (1): تصنيف بعض الدول من حيث سعات التخزين الجيولوجي المحتملة بها

الدولة	تصنيف Assessment Status	السعة التخزينية لموارد التخزين (غيغا طن) Estimated Resource (Gtco2)
آسيا والمحيط الهادئ	كامل	702-227
أستراليا	محدود	20
الصين	كامل	1573
الهند	معتدل	143-47
إندونيسيا	معتدل	2-1.4
اليابان	كامل	146
كوريا	كامل	100
ماليزيا	معتدل	28
نيوزيلاند	معتدل	16
باكستان	معتدل	32
الفلبين	محدود	23
سيريلانكا	محدود	6
تايلاند	محدود	10
فيتنام	محدود	12
الأمريكتين		
البرازيل	معتدل	2030
كندا	كامل	671-198
المكسيك	معتدل	100
الولايات المتحدة الأمريكية	كامل	21200-2367
الشرق الأوسط		
الأردن	محدود	9
السعودية	محدود للغاية	30-5
الإمارات	محدود للغاية	25-5
دول الإتحاد الأوروبي وروسيا		
دول الاتحاد الأوروبي " دون المملكة المتحدة"	كامل	72
النرويج	كامل	86
روسيا	محدود للغاية	6.8
المملكة المتحدة	كامل	78
أفريقيا		
الجزائر	محدود للغاية	10
المغرب	محدود	0.6
موزمبيق	معتدل	229-2.7
جنوب أفريقيا	معتدل	162

المصدر: The Global Storage Portfolio report was prepared by the Global CCS Institute,2016.

1.3.3.1. التخزين في حقول النفط والغاز الطبيعي المستنفدة "الناضبة"

تستخدم العديد من مشاريع احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون حقول النفط والغاز الناضبة لتخزينه، لأنها أثبتت بالفعل قدرتها على احتجاز السوائل والغازات الهيدروكربونية لملايين السنين، نظراً لاحتواء مثل هذه الحقول على طبقات من الصخور المسامية، المغطاة بصخور غير نافذة، والتي يمكن استخدامها كمستودعات طبيعية لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون بآليات التخزين الهيكلي [82].

2.3.3.1. التخزين في طبقات المياه الملحية العميقة " التشكيلات الملحية"

التشكيلات الملحية هي عبارة عن طبقات عميقة من الصخور الرسوبية المسامية الممتلئة بالماء المالح. يمكن تخزين الاف المليارات من الأطنان من غاز ثاني أكسيد الكربون فيها، اعتمادا على آليات التخزين الانحلالي أو التخزين المعدني، مقارنة بمئات المليارات من الأطنان التي يمكن تخزينها في حقول النفط والغاز الناضبة. ويعد مشروع "سليبنر"* أحد الأمثلة القائمة على استخدام التشكيلات الملحية لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون [82].

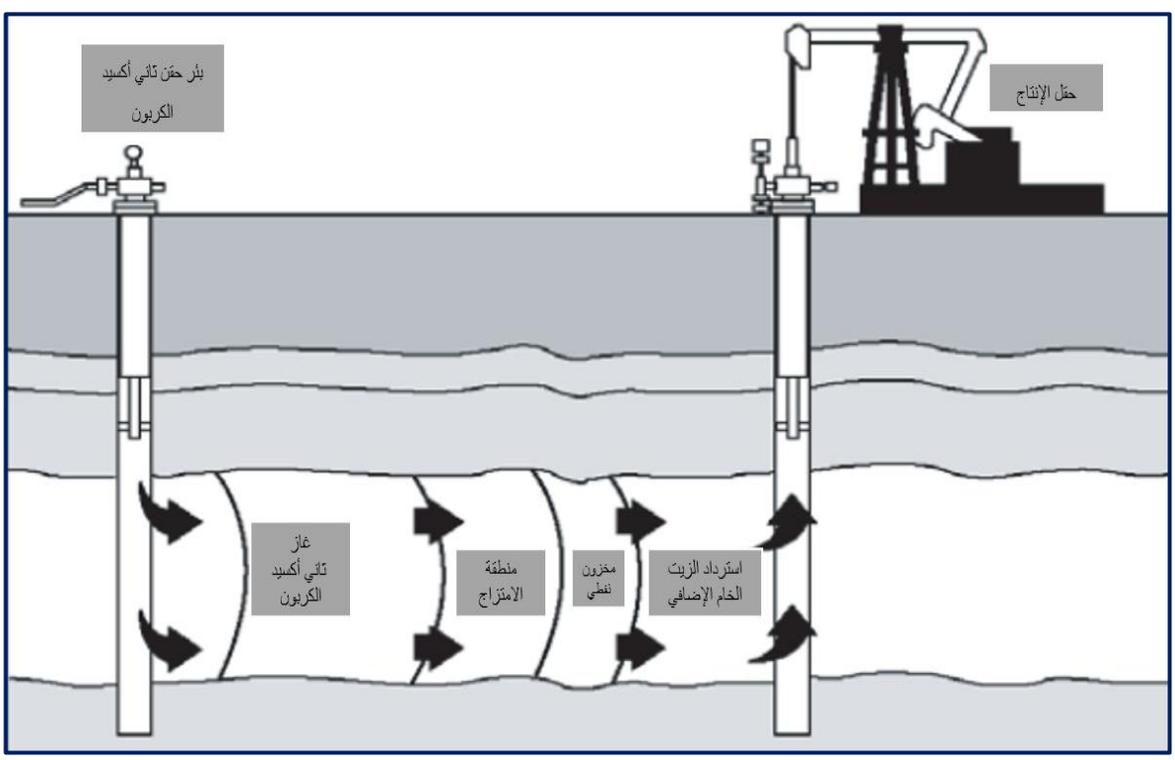
3.3.3.1. التخزين المصاحب لعمليات الاستخلاص المعزز للنفط الخام والغاز الطبيعي

ارتبطت مؤخراً عمليات الاستخلاص المعزز للنفط EOR، والاستخلاص المعزز للغاز EGR، بشكل كبير مع تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وتخزينه جيولوجياً، وهو ما ساهم في زيادة إنتاجية الآبار، وكذلك مثل هذا النوع من التخزين أحد الحلول للحد من انبعاثاته. حيث يعمل حقن ثاني أكسيد الكربون في مكمن النفط على زيادة ضغط الخزان وخفض لزوجة الزيت الخام "زيادة سيولته"، وزيادة حجمه، ورفع معدلات

* سيتم استعراض المشروع بالتفصيل في الفقرة 1.4.2.

إنتاجه، مما يتيح هروب الزيت من بين مسام صخور التكوين النفطي الحامل للنفط، وتدفقه بسهولة نحو آبار الإنتاج. يبين الشكل (13) مخطط آلية الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون.

الشكل (13): مخطط آلية الاستخلاص المعزز للنفط باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: The IEA Weyburn CO2 Monitoring and Storage Project

يستخدم كذلك غاز ثاني أكسيد الكربون للاستخلاص المعزز للغاز الطبيعي، بحقنه أسفل مكمن الغاز المستنفد، فيعمل على "تعويم" الغاز الطبيعي المتبقي فوقه، ليدفع الغاز الطبيعي نحو آبار الإنتاج، ويزيد من العمر الافتراضي لإنتاجية البئر [81].

4.3.3.1. التخزين في طبقات الفحم غير المستغلة

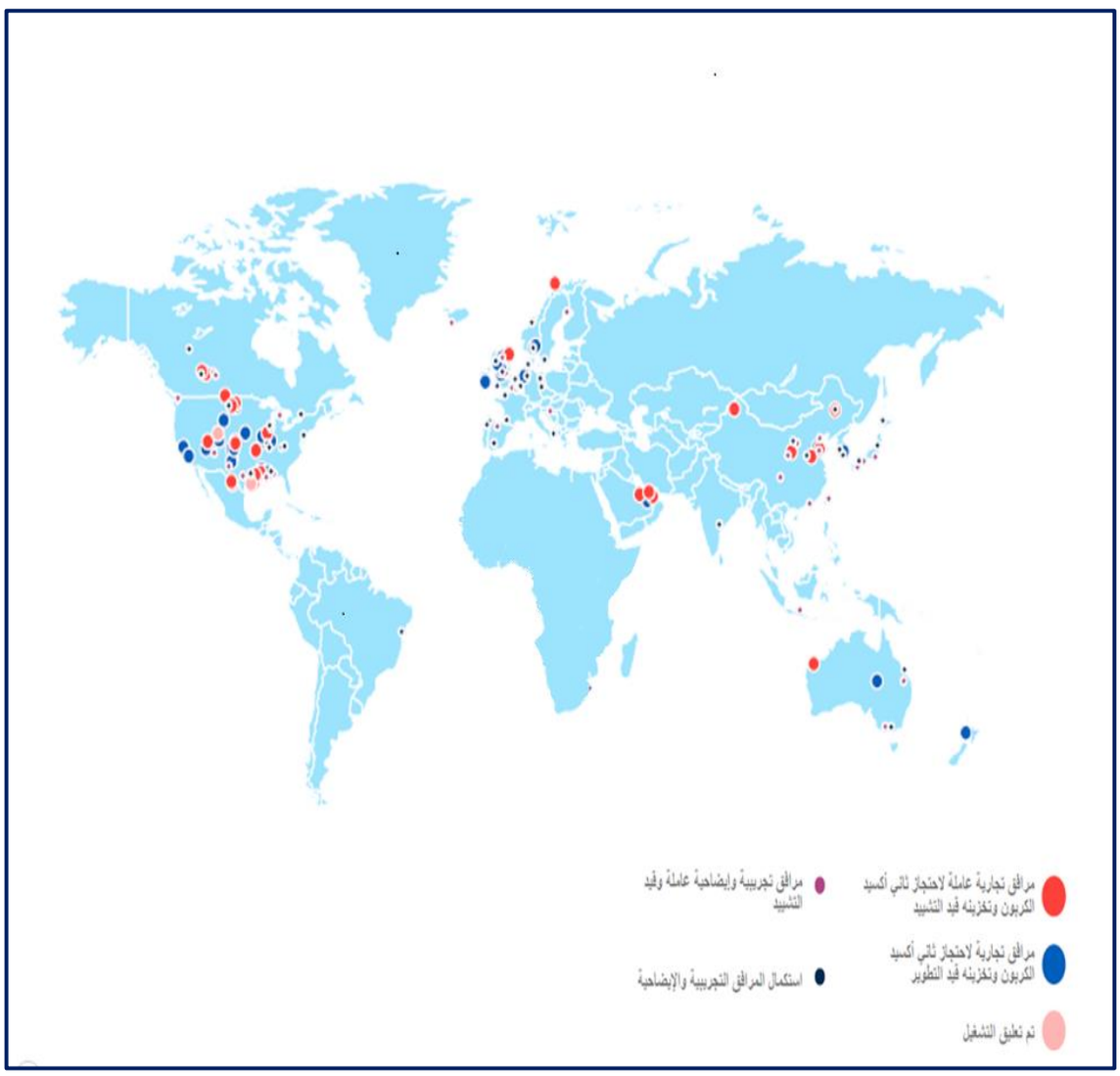
تقبع طبقات الفحم غير المستغلة في الأعماق الأرضية السحيقة، والتي من غير المجدي اقتصاديا استخراجها. ينتج عن حقن غاز ثاني أكسيد الكربون في هذه الطبقات تعزيز عملية استخلاص غاز الميثان من الفحم Enhanced Coal Bed Methane Recovery (ECBM)، ليستخدم كمصدر للطاقة، مماثل للغاز الطبيعي [82].

4.1. نماذج مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم

استخدمت تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع في أوائل السبعينيات من القرن الماضي، عندما قررت مجموعة من الشركات العاملة في مجال إنتاج النفط والغاز في جنوب الولايات المتحدة الأمريكية نقل غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من معالجة الغاز الطبيعي في مشروع "**فال فيردي**" Val Verde في جنوب ولاية تكساس، لمسافة 220 ميل عبر أول خط أنابيب مخصص لنقل ثاني أكسيد الكربون، وحقنة لتخزينه في حقل **كيلي سنايدر** "Kelly Snyder"، النفطي غرب ولاية تكساس، بهدف تحسين إنتاجيته، ليتطور هذا النشاط لاحقاً إلى ما يُعرف باسم الاستخلاص المعزز للنفط "CO_2-EOR" [61].

انتشرت بعد ذلك مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وحقنه وتخزينه في مواقع تخزين تم اختيارها بعناية، لترتبط مع مصادر إنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون الثابتة مباشرة، كمحطات توليد الكهرباء، وصناعات الحديد والصلب والاسمنت، والصناعات البترولية. وتنوعت هذه المشروعات ما بين مشروعات للأغراض التجريبية والبحثية، والأغراض التجارية لتصل إلى أكثر من 154 مشروع [61]، كما هو مبين في الشكل (14). ويبين الجدول (2) نماذج لبعض مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون القائمة.

الشكل (14): تنوع مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وتوزعها حول العالم



المصدر: الوضع العالمي لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون 2020

الجدول (2): نماذج بعض مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون القائمة

اسم المشروع	الدولة	تاريخ التشغيل	مصدر ثاني أكسيد الكربون	سعة احتجاز الكربون (مليون طن سنوياً)	استخداماته
*مصانع فال فيردي للغاز الطبيعي Val Verde Natural Gas Plants	أمريكا	1972	معالجة الغاز الطبيعي	1.3	استخلاص النفط المعزز
*مشروع " إينيد " للأسمدة Enid Fertilizer CO2-EOR Project	أمريكا	1982	إنتاج الاسمدة	0.7	استخلاص النفط المعزز
*مشروع شوت كريك لمعالجة الغاز Facility Shute Creek Gas Processing	أمريكا	1986	معالجة الغاز الطبيعي	7.0	الاستخلاص النفط المعزز
*مشروع سليبنر لتخزين ثاني أكسيد الكربون Sleipner CO2 Storage Project	النرويج	1996	معالجة الغاز الطبيعي	0.9	تخزين جيولوجي للكربون
*مصنع غريت بلينز سينفيلز " Great Plains Synfuels" *مشروع واي بيرن (Weyburn) الاستخلاص النفط المعزز	كندا	2000	إنتاج الغاز الاصطناعي	3.0	استخلاص النفط المعزز
مشروع عين صالح لتخزين ثاني أكسيد الكربون	الجزائر	2004	معالجة الغاز الطبيعي	1.0	استخلاص الغاز المعزز
*مشروع سنوهفيت لتخزين ثاني أكيد الكربون Snøhvit CO2 Storage Project	النرويج	2008	معالجة الغاز الطبيعي	0.7	
مصنع " سنتشري" Century Plant	أمريكا	2010	معالجة الغاز الطبيعي	8.4	استخلاص النفط المعزز
*مشروع إصلاح الميثان- والاستخلاص المعزز للنفط Air Products Steam Methane Reformer EOR Project	أمريكا	2013	إنتاج الهيدروجين	1.0	استخلاص النفط المعزز
*مشروع "كوفيفيل" لتغويز الفحم Coffeyville Gasification Plant	أمريكا	2013	إنتاج الاسمدة	1.0	استخلاص النفط المعزز
*معمل " لوست كابن" لمعالجة الغاز Lost Cabin Gas Plant	أمريكا	2013	معالجة الغاز الطبيعي	0.9	استخلاص النفط المعزز
*مشروع حقل "بتروبراس لولا" النفطي لتخزين ثاني أكسيد الكربون Petrobras Lula Oil Field CCS Project	البرازيل	2013	معالجة الغاز الطبيعي	0.7	استخلاص النفط المعزز
*مشروع " بوندري دام" لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون Boundary Dam Carbon Capture and Storage Project	كندا	2014	توليد الطاقة	1.0	استخلاص النفط المعزز
*مشروع " كويست" Quest	كندا	2015	إنتاج الهيدروجين	1.0	تخزين جيولوجي للكربون
*مشروع " العثمانية" التجريبي للاستخلاص المعزز للنفط Uthmaniyah CO2 EOR, Demonstration Project	السعودية	2015	معالجة الغاز الطبيعي	0.8	استخلاص النفط المعزز
مشروع أبو ظبي لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون Abu Dhabi CCS Project	الإمارات	2016	إنتاج الحديد والصلب	0.8	استخلاص النفط المعزز

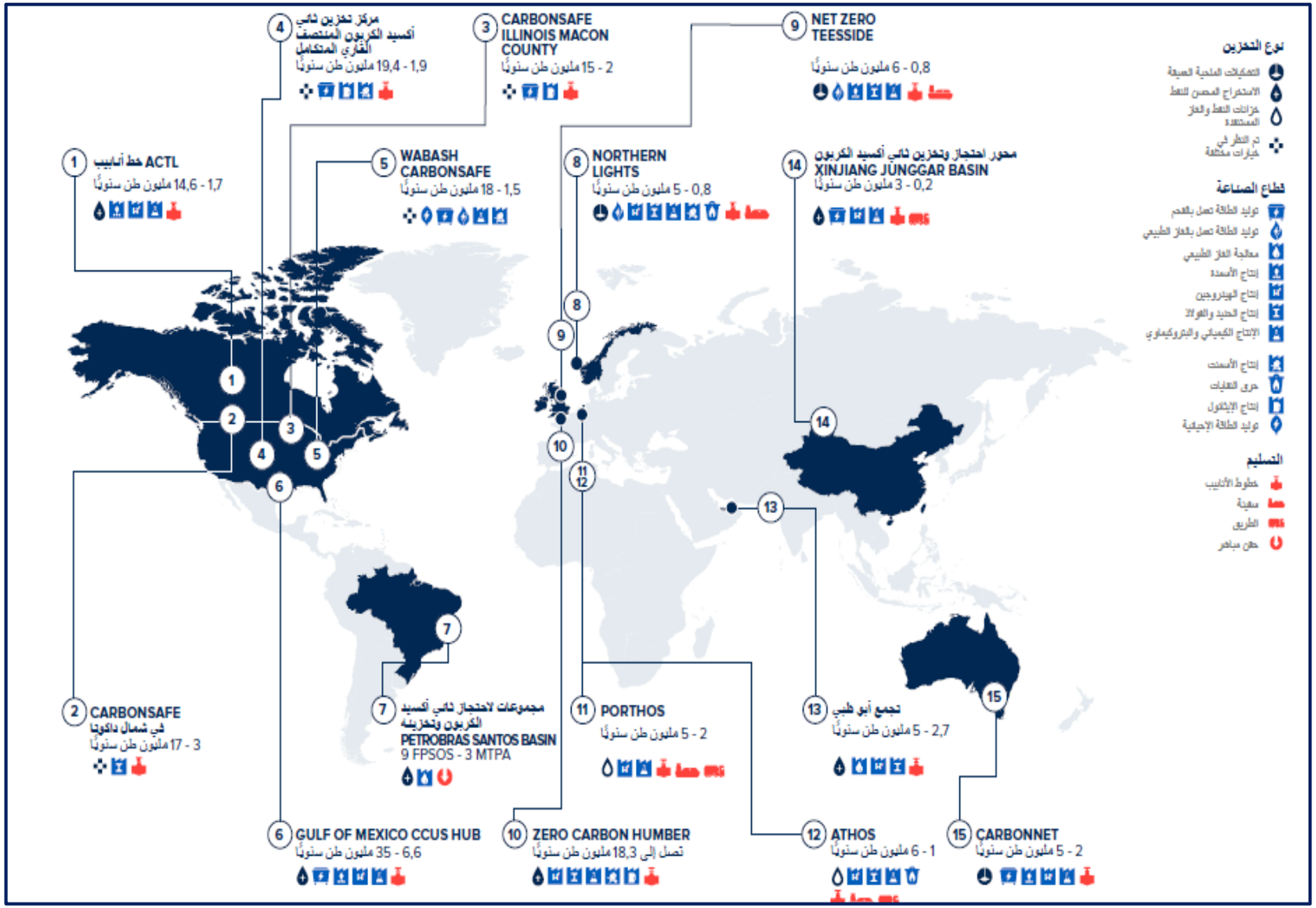
تابع الجدول (2): أمثلة لبعض مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون القائمة

اسم المشروع	الدولة	تاريخ التشغيل	مصدر ثاني أكسيد الكربون	سعة احتجاز الكربون (مليون طن سنوياً)	استخداماته
مشروع " إلينوي" الصناعي لاحتجاز والتخزين الكربون Illinois Industrial Carbon Capture and Storage Project	أمريكا	2017	إنتاج كيماويات	1.0	تخزين جيولوجي للكربون
*مشروع " كيمبر كونتري" لتوليد الطاقة Kemper County Energy Facility	أمريكا	2016	توليد طاقة	3.0	استخلاص النفط المعزز
*مشروع " بترا نوفا" لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون Petra Nova Carbon Capture Project	أمريكا	2016	توليد طاقة	1.4	استخلاص النفط المعزز
*مشروع "ألبرتا / أجريم" Alberta Carbon Trunk Line (ACTIL) with Agrium CO2 stream	كندا	2017	إنتاج اسمدة	0.6-0.3	استخلاص النفط المعزز
مشروع " أكتيل" ومصفاة "ستورجين" ACTIL with North West Sturgeon Refinery CO2 stream	كندا	2017	صناعات تكرير	1.4-1.2	استخلاص النفط المعزز
*مشروع " جورجيون" لحقن ثاني أكسيد الكربون Gorgon Carbon Dioxide Injection Project	استراليا	2017	معالجة الغاز الطبيعي	3.4	تخزين جيولوجي للكربون

المصدر: The Global Storage Portfolio report was prepared by the Global CCS Institute,2016.

من جانب آخر حرصت بعض المشروعات حول العالم على ربط مصادر غاز ثاني أكسيد الكربون من مختلف الصناعات، كإنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام وقود الفحم، أو الغاز الطبيعي، أو من نواتج عمليات معالجة الغاز الطبيعي، وإنتاج الأسمدة، والحديد والصلب، والاسمنت، وغيرها من الصناعات، ونقلها عبر شبكة خطوط الانابيب، أو بوسائل نقل أخرى مناسبة، لتخزينها طبقاً لأليات التخزين المتاحة، سواءً في التشكيلات الملحية العميقة، أو في خزانات النفط والغاز المستنفدة، أو في الاستخلاص المعزز للنفط والغاز، كما هو مبين في الشكل (15) [82].

الشكل (15): مخطط نموذج لربط مصادر غاز ثاني أكسيد الكربون من الصناعات المختلفة، ونقله، وتخزينه، واستخدامه ضمن تجمعات مشروعات لاحتجاز الكربون



المصدر: الوضع العالمي لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون

في عامي 2019 و2020 تم التخطيط لإنشاء وتشغيل، أكثر من 60 منشأة متنوعة الأغراض لاحتجاز وتخزين كميات تصل إلى حوالي 40 مليون طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون. حيث بلغ عدد المنشآت التجريبية والاسترشادية العاملة حوالي 22 منشأة، يعمل معظمها في منشآت إنتاج الكهرباء. وتتساوى المشروعات التي تعمل بتقنيات احتجاز الكربون بعد الاحتراق وتبلغ 10 مشاريع تقريباً مع المشروعات التي تعمل بنظام الاحتجاز قبل الاحتراق وتبلغ 9 مشاريع. بينما يبلغ عدد المشروعات التجريبية التي تعتمد على نظام احتجاز ثاني أكسيد الكربون بنظام الاحتراق بالأكسجين 3 مشاريع فقط. كما يوجد منشأتان قيد الإنشاء، و13 منشأة في مرحلة التصميم الهندسي للواجهة الأمامية (FEED). بالإضافة إلى 21 منشأة في بدايات مراحل التطوير، بالإضافة إلى عدد 8 مراكز لاختبار وتطوير تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون [82]. هذا وتأتي الولايات المتحدة الأمريكية في صدارة الدول الرائدة في مجال الاستثمار في المشروعات التجريبية بعدد 7 مشاريع، ثم تأتي بعدها الصين في المرتبة الثانية [71].

1.4.1. مشروع " سليبنر" لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

Sleipner CO_2 Storage Project

يعد مشروع **"سليبنر"** في النرويج أول مشروع على مستوى العالم على النطاق التجاري لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في العالم، وتتمثل أهميته في كونة المشروع الأول الذي قدم حلول دائمة لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع في قاع البحر، بدلاً من إطلاقة في الهواء الجوي، مما ساهم في مساعدة المجتمع الدولي على تحقيق أهدافه نحو خفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون.

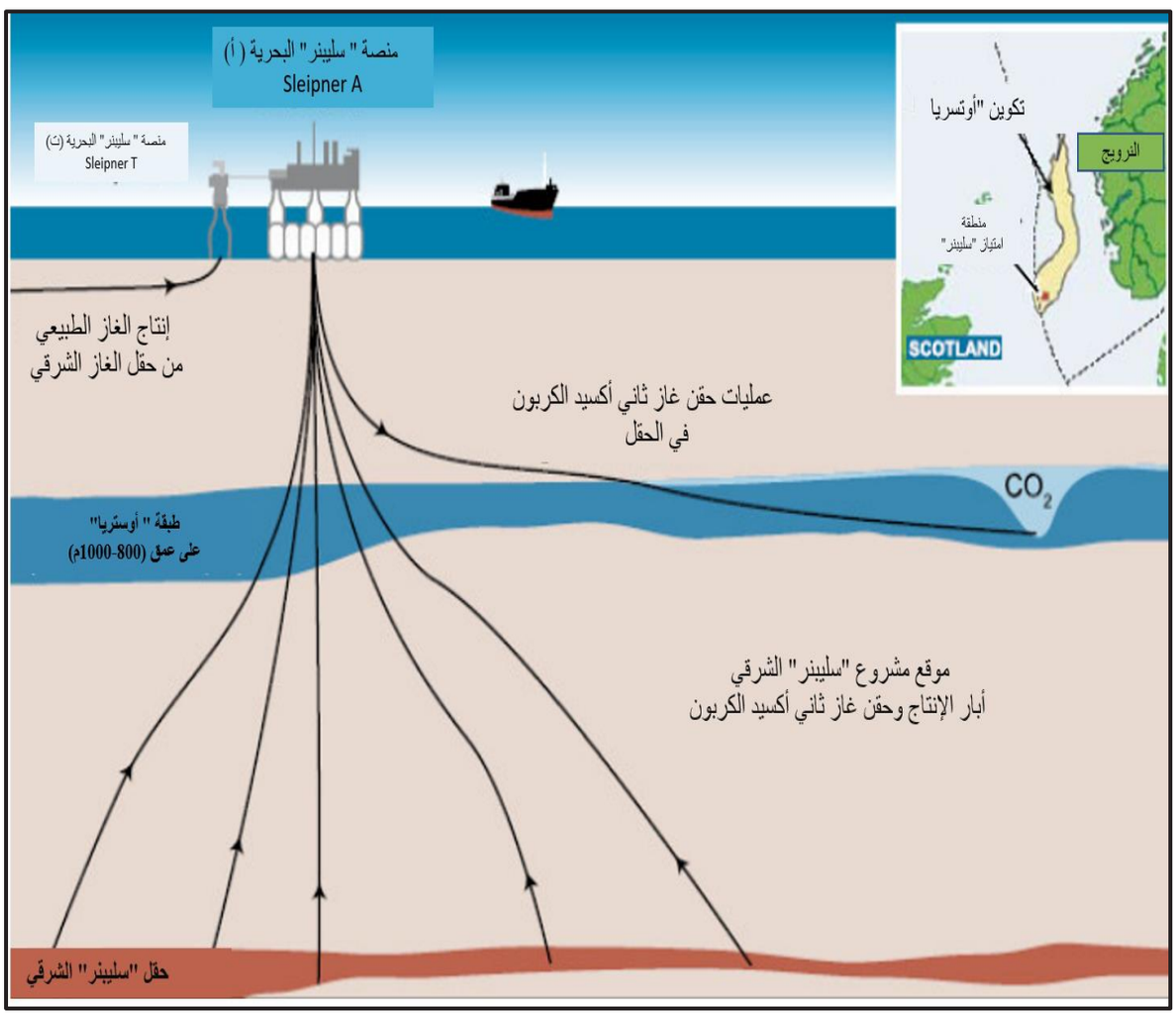
أنشأت الشركة هذا المشروع في عام 1991 لتفادي قيمة الغرامات التي تكبدتها بعد أن فرضت عليها حكومة النرويج ضرائب كربونية بلغت قيمتها 210 كرونة نرويجية

لكل طن من ثاني أكسيد الكربون يطلق في الهواء الجوي، ثم زادت قيمة الضريبة في عام 1995 لتصل إلى 410 كرونة نرويجية (حوالي 65 دولار/الطن) [49-51].

يعتمد المشروع على احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون المستخلص من عمليات معالجة الغاز الطبيعي الذي تنتجه شركة ستات أويل" Statoil من حقل سليبنر البحري، لخفض نسبته من حوالي 9%، إلى النسب المطلوبة طبقاً لمواصفات التصدير. ثم يضخ غاز ثاني أكسيد الكربون المستخلص بعد ذلك عبر شبكة من خطوط الأنابيب الأرضية، لحقنه وتخزينه في تكوين خزان ملحي يتواجد في طبقة الأوتسيرا Utsira Reservoir، المكون من حجر رملي ضخم ذو سعات تخزينية كبيرة، ومحكم بإحكام بواسطة صخرة الغطاء. يتراوح سمك الخزان ما بين 200-250 م، ويقع على مسافات تتراوح ما بين 800-1000 م تحت قاع البحر.

قامت الشركة بتخزين أكثر من 20 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون بشكل آمن ومستدام منذ بدء تشغيل المشروع. ويكلف حقن غاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه في مشروع سليبنر حوالي 17 دولار / طن ثاني أكسيد الكربون [49،50]. يبين الشكل (16) مخطط تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في قاع البحر لمشروع "سليبنر"

الشكل (16): مخطط تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في قاع البحر لمشروع "سليبنر"

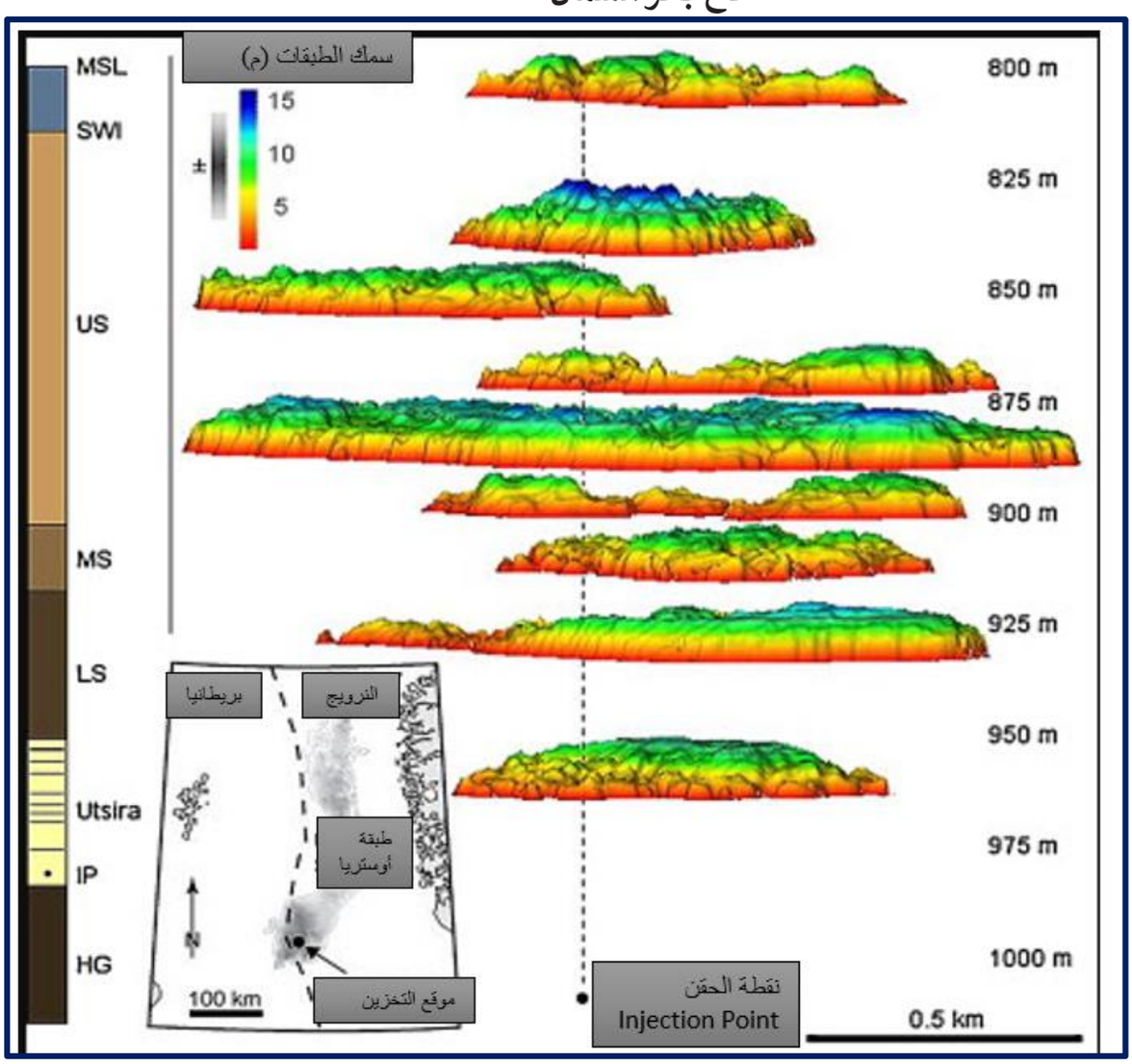


المصدر: ttps://bellona.org/assets/sites/3/Case_Study_on_the_Sleipner_Gas_Field_in_Norway.pd

كان التحدي الرئيسي للمشروع هو كيفية مراقبة عمود غاز ثاني أكسيد الكربون أثناء تجمعه في الخزان مع مرور الوقت، لإثبات بقائه داخل الخزان دون تسربه. لذا فقد أجريت بعض الدراسات في عام 1999، شملت مسوحات رصد زلزالية "الانعكاس الزلزلي" على فترات منتظمة لمنطقة التخزين، وذلك بعد حقن حوالي 5 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون.

أثبتت نتائج تلك الدراسات أن تشكيل "أوتسيرا" يتكون من 9 طبقات، وتواجه عملية صعود غاز ثاني أكسيد الكربون اختراق 8 حواجز" طبقات" داخل موقع التخزين. هذه الطبقات عبارة عن 7 طبقات صخرية رقيقة يتراوح سمكها ما بين 1-2 م، وطبقة ثامنة سفلية يتراوح سمكها ما بين 6-7 م. ويسمح هذا التكوين بتجميع غاز ثاني أكسيد الكربون على شكل طبقات بسمك 10-20 م، وتكديسها عمودياً، لتمتد بشكل جانبي لمئات الأمتار داخل تكوين " أوتسيرا" [53]. يبين الشكل (17) مقطع تكوين "أوتسيرا " والمستخدم في تخزين ثاني أكسيد الكربون في قاع بحر الشمال.

الشكل (17): مقطع تكوين "أوتسيرا " والمستخدم في تخزين ثاني أكسيد الكربون في قاع بحر الشمال



المصدر: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583613004192#fig0015

أظهرت النتائج أن حوالي 81 % من غاز ثاني أكسيد الكربون اختزنت طبقاً لآليات التخزين الهيكلي، وفيه يصعد غاز ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى على شكل فقاعات تتجمع تحت الطبقة الصخرية غير المسامية، بحوالي 200 م من نقطة الحقن (Injection Point)، وأن عمود غاز ثاني أكسيد الكربون ظل داخل التكوين الصخري، ويزداد حجمه مع زيادة حقن كميات غاز ثاني أكسيد الكربون [49،50].

وان حوالي 18 % من كميات غاز ثاني أكسيد الكربون اختزنت طبقاً لآليات التخزين الانحلالي، حيث ستهبط هذه الكمية إلى أسفل الطبقة المائية الملحية، خلال فترة عمر المشروع. بينما الكميات المتبقية والتي تصل إلى حوالي 1% من المتوقع أن تذوب خلال 5 آلاف عام، وتحتجز طبقاً لآليات التخزين المعدني بشكل كامل داخل التكوين دون رجوعها مرة أخرى إلى الغلاف الجوي [53،54]. وتشير التقديرات إلى أن المشروع له القدرة على تخزين حوالي 600 مليار طن من غاز ثاني أكسيد الكربون، وتعادل هذه الكميات، كل كميات غاز ثاني أكسيد الكربون التي يمكن أن تنتجها محطات توليد الكهرباء في دول الإتحاد الأوروبي لمدة 600 عام.

ظهرت أهمية المشروع بشكل كبير في عام 2005، بعد الاعتراف الدولي بأن مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من شأنها أن تحد من الزيادات المستقبلية المحتملة لرفع درجات الحرارة [49،50].

أعلنت النرويج مؤخراً عن استكمال دراسات الجدوى لمشروع جديد لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه على نطاق واسع، حيث سيتم احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من المنشآت الصناعية "البرية"، ونقله بواسطة الناقلات البحرية لتخزينه في طبقات المياه الجوفية المالحة في بحر الشمال. سيعتمد المشروع الجديد بشكل كبير على الدروس المستفادة والخبرات المكتسبة من تجربة مشروع "سليبنر الأول"، مع العمل

على خفض التكاليف، واستخدام تقنيات جديدة ومبتكرة لتشغيل ومراقبة تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون.

2.4.1. مشروعات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز

تعد مشاريع احتجاز وتخزين غاز ثاني اكسيد الكربون في عملية الاستخلاص المعزز للنفط، أو الغاز الطبيعي أكثر عدداً من مشاريع التخزين الجيولوجي، نظراً للمردود الاقتصادي المرتفع لهذه المشاريع وللأهداف المزدوجة التي تحققها وتتمثل في خفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن زيادة إنتاجية الآبار وزيادة عمرها الافتراضي.

1.2.4.1. مشروع واي بيرن (Weyburn) للإستخلاص المعزز للنفط

من عوامل نجاح مشروعات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز والتوسع فيها، وجود شراكة قوية بين القطاعين الخاص والحكومي. وهو ما تمثل في مشروع "**واي بيرن**" للاستخلاص المعزز للنفط في كندا، والذي يمثل معلماً بارزاً وسط المشاريع المماثلة.

يعد مشروع " **واي بيرن**" في كندا جزء من برنامج وكالة الطاقة الدولية للبحث والتطوير، وهو من المشاريع الهامة التي يتم فيها نقل غاز ثاني أكسيد الكربون من مواقع إنتاجه إلى بعض الآبار الناضبة للاستخلاص المعزز للنفط خلال شبكة خطوط أنابيب أرضية. بلغت التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 85 مليون دولار.

ويقدم المشروع نظرة تنبؤية بمستقبل التنمية الصناعية منخفضة الكربون، تكون فيه الحكومة هي الضامن الرئيسي للمشروع، وتُعنى بإقرار التنظيمات والتشريعات اللازمة، مع تقديم حزم من الحوافز التشجيعية والدعم المالي لضمان أسعار عادلة ومشجعة لغاز ثاني أكسيد الكربون، بينما يقوم القطاع الخاص، وكما هو الحال في هذا المشروع بالمشاركة

من خلال تشييد خط الأنابيب، والذي أطلق عليه مشروع " ACTL, Alberta carbon Trunk Line" لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون [61].

يعتمد المشروع على قيام مصنع غريت بلينز سينفيلز "Great Plains Synfuels "، باحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات تغويز الفحم، ونقله عبر خط انابيب يبلغ طوله حوالي 330 كم" من منطقة "بيولا"، داكوتا الشمالية في الولايات المتحدة الأمريكية، إلى حقلي "واي بيرن "، و "ميدال" في مقاطعة "ساسكاتشوان" في كندا، كما هو مبين في الشكل (18).

الشكل (18): موقع حقل واي بيرن النفطي، وخط الأنابيب المستخدم في نقل غاز ثاني أكسيد الكربون للاستخلاص المعزز للنفط

المصدر: https://ieaghg.org/docs/general_publications/weyburn.pdf

أطلقت حكومة كندا، بالتعاون مع حكومة ساسكاتشوان، وشركتي سينوفوس Cenovus، وأباتشي للطاقة Apache Energy الأمريكتين المرحلة الأولى من المشروع في عام 2000، وشملت دراسة الخصائص الجيولوجية لموقع التخزين المختار، واكتملت هذه المرحلة في عام 2004.

ثم بدأت المرحلة الثانية في عام 2005، وشملت دراسة نتائج الجوانب الفنية، بما في ذلك توصيف الموقع، والرصد والتحقق، وسلامة حفر الآبار وتقييم الأداء. وأوضحت النتائج أن البيئة الجيولوجية الطبيعية مناسبة للغاية لتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون على المدى الطويل، وانتهت هذه المرحلة في عام 2011.

تعد النتائج التي تم الوصول إليها، هي الأكثر شمولاً ويمكن الاستفادة منها للمقارنة مع المواقع الجيولوجية الشبيهة على مستوى العالم. حيث تمثلت أهمية المشروع بشكل عام في دراسة قدرة خزان نفط ما على تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون (جيولوجياً) بشكل آمن واقتصادي على مدى عمر المشروع والممتد لأكثر من 20 عام [56].

كما دلت النتائج على إمكانية احتجاز حوالي 40 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون على مدى عمر المشروع. وخُصص حوالي 30 مليون طن منها لصالح حقل "واي بيرن" النفطي، و10 مليون طن لصالح حقل "ميدال"، وهو ما سيسهم في زيادة معدلات إنتاج حقل واي بيرن من 10 إلى 30 ألف برميل يومياً (حوالي 155 مليون برميل من الزيت الخام) على مدى فترة عمر المشروع [56-57].

أما حقل نفط "ميدال" المجاور، فقد بدأت شركة " أباتشي" في عام 2005 في حقن غاز ثاني أكسيد الكربون، وهو ما سيسهم في زيادة عمر الحقل الافتراضي لفترات تتراوح ما بين 30 -40 عام، مع توقعات بزيادة في الإنتاج بواقع 60 مليون برميل على مدى فترة عمر المشروع [58].

قدم أيضاً المشروع في عام 2011 مجموعة من البيانات الشاملة بعد شكوك من تسرب غاز ثاني أكسيد الكربون المخزن من حقل "واي بيرن"، حيث قامت شركة "سينوفوس" بالتعاون مع المركز الدولي لتقييم الأداء للتخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون (IPAC-CO_2) بإجراء عدد من الدراسات للتحقيق من ذلك. واسفرت نتائج الدراسات أن تسرب غاز ثاني أكسيد الكربون لم يكن ناتج عن تسرب غاز ثاني أكسيد الكربون المحقون، بل نتيجة عن بعض العمليات البيولوجية في التربة، ولم يُكشف عن أي مسارات محتملة لتسربات لغاز ثاني أكسيد الكربون من خطوط الأنابيب أو البنية التحتية الأخرى [56-57].

كما أوضحت التجارب الحديثة الارتباط الوثيق بين ربحية الصناعات النفطية، وخاصة مشروعات الاستخلاص المعزز للنفط، بتكاليف حقن غاز ثاني أكسيد الكربون في الآبار، حيث يصل متوسط تكلفة حقن ثاني أكسيد الكربون للاستخلاص المعزز للنفط 30 دولاراً للطن"*، وظهر ذلك جلياً خلال جائحة فيروس كورونا، حيث لم تكن مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون بمنأى عن التأثر بتداعيات الجائحة خلال عام 2020. إذ شهد القطاع النفطي انخفاضاً سريعاً غير معتاد على معدلات الطلب والأسعار. فعلى سبيل المثال تضررت بشدة منشأة بيرتا نوفا Petra Nova، في ولاية تكساس في الولايات المتحدة وهي الأكبر في العالم، والتي تمتلك وحدة لاحتجاز الكربون بعد الاحتراق [86]. وبسبب الانخفاض الحاد في أسعار النفط، توقفت الوحدة مؤقتًا في مارس/آذار 2020، وأشارت الشركة إلى أنها ستعاود التشغيل عندما تتحسن الظروف الاقتصادية مع عودة معدلات الأسعار الطبيعية العادلة للنفط.

كانت الشركة ومنذ بدأ تشغيلها في بداية عام 2017 قد نجحت في احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن محطة توليد الكهرباء التابعة لشركة "إن أر جي" NRG،

* Potential of CO_2-EOR for Near-Term Decarbonization, 2019 | https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00005

والتي تعتمد على الفحم كوقود أحفوري، واستخدامه في الاستخلاص المعزز للنفط في بئر "ويست رانش" West Ranch، بهدف رفع إنتاجية البئر من 300 برميل يومياً، لأكثر من 150 ألف برميل يومياً [86].

2.2.4.1. مشروع "عين صالح" للاستخلاص المعزز للغاز الطبيعي

يعد مشروع "عين صالح" في الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية لإنتاج الغاز الطبيعي من حقل "كريشبة" Kerchaba في وسط الصحراء من المشروعات الهامة في منطقة شمال أفريقيا، وهو مشروع مشترك بين شركة النفط الجزائرية العامة "سوناطراك"، وشركتي "بريتيش بتروليوم"، و "ستاتويل".

يتكون الحقل من 7 آبار إنتاجية للغاز الطبيعي، ويتميز الغاز المنتج منه باحتوائه على نسب مرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون تتراوح ما بين 5-10 %، ولتلبية متطلبات المستهلكين، يلزم خفض هذه النسبة لتصل إلى حوالي 0.3%، واعتمد المشروع في ذلك على طرق الامتصاص الكيميائي باستخدام مذيب "أحادي الإيثيلين غلايكول".

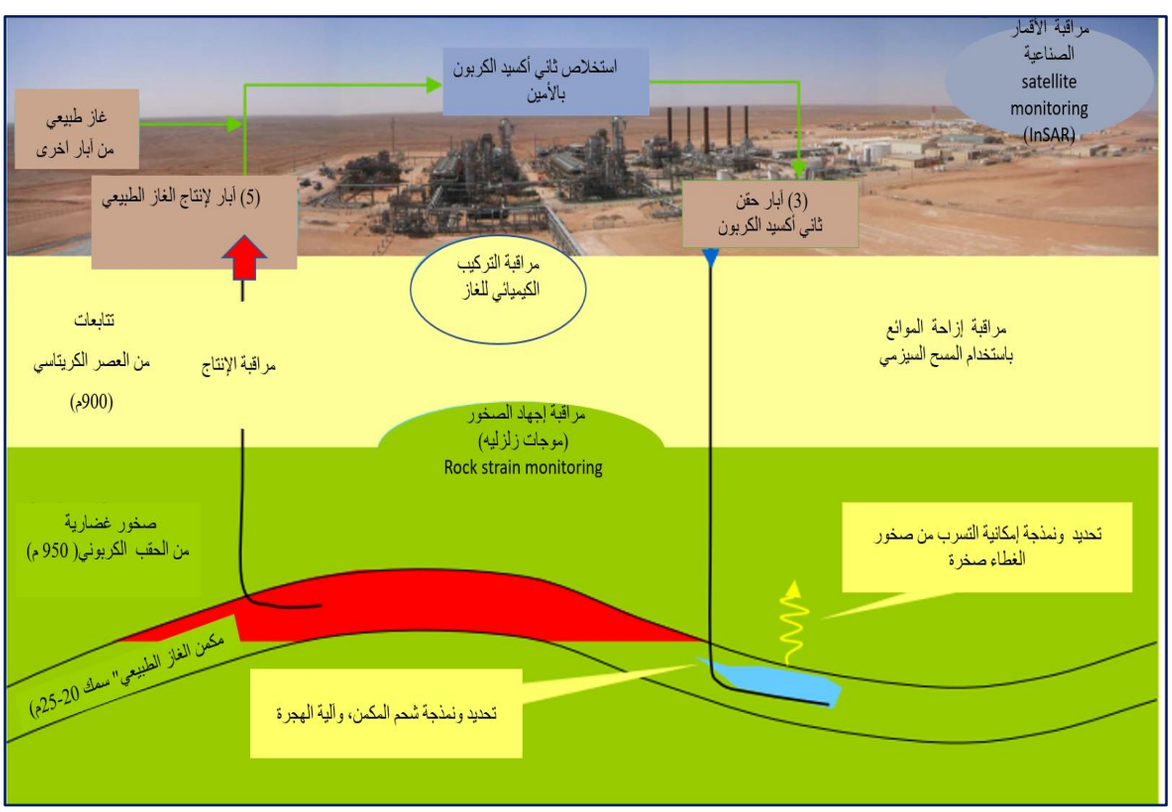
يعد المشروع من أضخم المشروعات البحثية النموذجية على مستوى العالم على النطاق التجاري، ولا يهدف المشروع إلى جني أي فوائد تجارية، وإنما تم تنفيذه كأساس لتقييم تكنولوجيا التخزين الجيولوجي لغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدمة، والتحقق من فاعلية عمليات التخزين الآمن له، والتأكيد على أن التوسع في مشروعات تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون على النطاق الصناعي، هو أحد الخيارات الهامة لزيادة الإنتاجية، والربحية، ومساعدة الدول في خفض نسب انبعاثاتها من الغازات الملوثة للبيئة.

بدأت عمليات الحقن الأولية لغاز ثاني أكسيد الكربون في عام 2004، ومن المتوقع تخزين نحو 17 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون خلال فترة عمر المشروع (25 عام)، بمعدل مليون طن سنوياً، وتعتمد آلية التخزين على ضخ غاز ثاني أكسيد الكربون

عبر خطوط أنابيب أرضية إلى 3 آبار لإنتاج الغاز الطبيعي، يوجد أسفلها طبقات من المياه المالحة [38،37]. وأظهرت نتائج الدراسات الجيولوجية أن غاز ثاني أكسيد الكربون سيظل محتجز في طبقة المياه الملحية الموجودة أسفل الغاز الطبيعي طوال فترة عمر المشروع، وانه سيحل محل طبقة الغاز الطبيعي بعد استنفاد الحقل تماما.

تتم أعمال مراقبة موقع التخزين باستخدام مجموعة متنوعة من التقنيات الجيوكيميائية، والجيوفيزيائية، بما في ذلك التصوير بالأقمار الصناعية، ومراقبة الآبار، والرصد الزلزالي الدقيق لمراقبة أي تسرب محتمل لغاز ثاني أكسيد الكربون على مدى فترة عمر المشروع. تبلغ التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 100 مليون دولار، بالإضافة إلى نحو 30 مليون دولار لإعمال مراقبة التخزين. يبين الشكل (19) مخطط مشروع عين صالح لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون [37].

الشكل (19): مخطط مشروع عين صالح لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: https://www.marefa.org

5.1. الدروس المستفادة من مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون

تمت الاستفادة بشكل مباشر من مخرجات نتائج مشروعات احتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون سواءً على النطاق البحثي والتجريبي، او على المستوى التجاري. حيث تمكن المهندسون من تطوير تكنولوجيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، التي تنوعت طبقاً لمستويات تركيزه في مزيج غاز المداخن، أو كمكون رئيسي ضمن مكونات الغاز الطبيعي أو في الغاز الاصطناعي.

كما ساهمت في تطوير تقنيات الحقن، ودراسة سلوك غاز ثاني أكسيد الكربون في الخزانات الجوفية، وتقدير معدلات التخزين النهائية، وساعدت المنتجون على رفع إنتاجية المكامن، وتعظيم اقتصاديات الحقول الناضبة سواءً للنفط، أو الغاز، فضلاً عن دورها الهام في مساعدة بعض الحكومات على فرض الضرائب الكربونية من المنبع أو تقديم الحوافز الحكومية. كما حدث في مشروعي "سليبنر"، و "سنوهفيت" في النرويج. أو كما حدث في كندا عندما قامت بإقرار عدد من اللوائح والنظم التشريعية الخاصة الهادفة إلى حث المنشآت على تركيب وحدات لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وخاصة محطات إنتاج الكهرباء التي تستخدم الفحم كوقود لإنتاج الكهرباء، وهو ما ساهم في قيام مشروع " بوندري دام" Boundary Dam، لإنتاج الكهرباء في تركيب وحدة لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج عادم غاز المداخن [61].

6.1. دوافع تنمية مشروعات احتجاز ثاني أكسيد الكربون

يمكن أن تسهم تقنيات احتجاز ثاني أكسيد الكربون في خفض كميات انبعاثاته المنطلقة إلى الغلاف الجوي بحلول عام 2100 بنسب تتراوح ما بين 15-55%. كما يمكن أن تساعد بشكل كبير عدد من الدول على التوسع في استخدام الفحم والذي تمتلك كميات ضخمة منه [70،71] في تنفيذ خططها التنموية، خاصة وأن الفحم هو الخيار الأرخص

لتوليد الطاقة لتلك الدول في ظل انخفاض قيمة ضريبة الكربون. وبالتالي، فإن فرض وتحصيل ضرائب الكربون، يعد أحد أكثر الطرق فعالية لتشجيع نشر تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه، وإنتاج الطاقة النظيفة. ولكي تصبح تقنيات احتجاز الكربون مجدية اقتصادياً، فإن الحصول على تسعير مناسب للكربون أمر بالغ الأهمية سواء كان ذلك ضمن ضريبة الكربون أو على هيئة حوافز "بدلات الكربون" Carbon Allowances [71].

وفيما يلي أهم العوامل المحفزة لانتشار تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون:

1.6.1. ضريبة الكربون

يسهم فرض ضرائب الكربون بشكل فعال في حث المنشآت المسببة للتلوث البيئي على مراجعة سياساتها الإنتاجية وتطويرها من خلال استخدام التقنيات الصديقة للبيئة، وهو ما يترافق بشكل مباشر في خفض استخدام المنتجات الملوثة للبيئة، نظراً لارتفاع أسعار تكلفتها المتوقع بعد فرض الضرائب عليها، وبالتالي العمل على خفض كميات إنتاجها.

2.6.1. التشريعات والحوافز التشجيعية

كان لإصدار التشريعات وإقرار الحوافز التشجيعية من قبل بعض الدول دوراً في تنمية مشروعات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون، فنجد على سبيل المثال أن الولايات المتحدة الأمريكية تعمل على حث الشركات على التوسع في مشروعات تخزين واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون من خلال زيادة الإعفاءات الضريبية وتقديم الحوافز التشجيعية. كما تدرس في الوقت الحالي إصدار تشريع جديد يهدف إلى رفع قيمة الإعفاء الضريبي للشركات العاملة في هذا المجال من 22 دولار إلى 50 دولار بحلول عام 2026 عن كل طن محتجز من غاز ثاني أكسيد الكربون. علماً بأن تكلفة احتجاز طن واحد من غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من بعض الوحدات التابعة لعمليات إنتاج الأمونيا تبلغ

حوالي 25 دولار. وتشير التقديرات إلى أن هذه المبادرة سترفع كميات ثاني أكسيد الكربون المحتجزة في الولايات المتحدة بكميات تتراوح ما بين 10 -30 مليون طن على مدى الأربع سنوات القادمة. يذكر أن معظم كميات غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجزة في الولايات المتحدة الأمريكية تستخدم في تحسين اقتصادات استخراج النفط.

ومن جانب آخر تباينت مواقف بعض دول الإتحاد الأوروبي حول دعم مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، فقد حظرت ألمانيا تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع، من خلال التوقيع على "قانون تخزين ثاني أكسيد الكربون" في عام 2012، مما يقيد من إجمالي الكميات المخزنة سنوياً إلى نحو 24 مليون طن فقط. وعلى النقيض من ذلك، تمتلك هولندا خططاً طموحة لتخزين نحو 18 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون من مختلف المصادر الصناعية سنوياً بحلول عام 2030، وهو ما يعادل حوالي 30% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الصناعية المستهدفة في هولندا.

الفصل الثاني

استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة البتروكيماويات

الفصل الثاني

استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج البتروكيماويات

2.تمهيد

ليس من الضرورة بمكان أن ترتبط مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بمشروعات التخزين، حيث يمكن تعظيم الاستفادة منه، من خلال استخدامه كمادة خام أولية في بعض الصناعات الغذائية، أو الكيميائية كصناعة اليوريا، وبعض منتجات الكيمياويات الأخرى. وقد بدأت بعض الشركات العالمية الرائدة في الاستفادة من المفهوم الجديد والخاص باحتجاز الكربون واستخدامه "CCU"، وعملت على تقسيم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون إلى فئتين رئيسيتين، شملت الأولى استخدامه مباشرة دون تحويله في عمليات الاستخلاص المعزز للنفط والغاز، مما جعل عملية الإنتاج أكثر جدوى من الناحية التجارية. بينما شمل الاستخدام الثاني إجراء بعض العمليات التحويلية مثل: إضافة مجموعة الكربوكسيل لإنتاج الاحماض الكربوكسيلية، أو بالاختزال لإنتاج منتجات كيماوية ذات قيمة إضافية أعلى مثل الأمونيا، واليوريا، والكحولات، والميثانول، والوقود الاصطناعي. ومازال هناك العديد من التقنيات في نطاق التطوير المستمر.

في حقيقة الأمر تعد بعض من المشاريع التحويلية غير ذات جدوى اقتصادية إلى حد ما في الوقت الحالي، نظراً للطبيعة الخاملة لغاز ثاني أكسيد الكربون، والتي يلزم معها استخدام طرق كثيفة الاستخدام للطاقة، بالإضافة إلى استخدام عوامل حفازة فائقة الأداء لإتمام عملية التحويل. لذلك يجب أن يؤخذ في الاعتبار تكلفة استخدام الطاقة عند النظر في الجدوى الاقتصادية للعملية الإنتاجية والمنتج النهائي. إلا أنه من المتوقع زيادة الاهتمام باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في مجال إنتاج المواد الكيميائية والبوليمرات، خاصة مع استمرار تطوير طرق تحويل جديدة أكثر فاعلية، وأيضاً تطوير العوامل الحفازة المناسبة، ومع استمرار انخفاض تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة.

إلا أن هناك عدد من التحديات التي تواجه مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون، وأهمها ارتفاع التكلفة الاستثمارية وصعوبة الحصول على التمويل اللازم في الوقت المناسب. فنجد أن الاستثمارات العالمية في مجال الطاقة النظيفة خلال العشر سنوات الأخيرة بلغت حوالي 2.5 تريليون دولار أمريكي، منها حوالي 1.8 تريليون دولار أمريكي تم استثمارها في تقنيات طاقة الرياح والطاقة الشمسية، وكان هذا النشاط الاستثماري مدفوعاً بدعم قوي ومستدام للسياسات. في حين بلغ إجمالي الاستثمار في احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه خلال نفس الفترة الزمنية، حوالي 20مليار دولار أمريكي، وذلك وفقًا لبيانات وكالة الطاقة الدولية. مما يشير إلى محدودية الفرص الحالية للاستثمار التجاري في مشروعات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، أو قد يعني ذلك أن السياسات والبرامج التي تم تنفيذها في مثل هذه المشروعات، كانت محدودة أو لم تكن ناجحة مقارنة بما تم تطبيقه في مشروعات إنتاج الطاقة النظيفة.

1.2. مصادر انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة البتروكيماويات

تستهلك القطاعات الصناعية حوالي 50 % من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة كمواد خام أولية أو كوقود للعمليات الصناعية، والإنتاج. وتنتج غاز ثاني أكسيد الكربون، وغازات أخرى. ويقدر حجم استهلاك صناعة الكيماويات والبتروكيماويات من إجمالي استهلاك قطاع الصناعة العالمي من الطاقة حوالي 30%، في حين تنتج نحو 16 % من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن القطاع الصناعي [1].

تحتوي مجمعات إنتاج البتروكيماويات الصناعية الكبرى، على عدد من المصادر الرئيسية للانبعاثات "مداخن الأفران" المتفرقة والمنتشرة داخل وحداتها الإنتاجية المختلفة، وعادة لا تنتج من مصدر واحد فقط، وهو ما يمثل تحدياً تقنياً إضافياً فيما يتعلق بدمج أنظمة تجميع الغازات في مجمع صناعي مزدحم بالفعل بمختلف المعدات

الصناعية، مما يسهم في زيادة تكاليف إضافة وحدات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون [27].

وتنتج انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في قطاع البتروكيماويات من مصدرين رئيسيين، أولهما نتيجة حرق الوقود لتوليد الحرارة، سواء بشكل مباشر، أو لإنتاج البخار في الموقع، ويتسبب ذلك في إطلاق نحو 1.3 غيغا طن ثاني أكسيد الكربون، ما يعادل 85% [65]. أما المصدر الثاني فينتج من بعض العمليات الصناعية لتعديل نسبة الكربون في المنتج النهائي (إنتاج الأمونيا على سبيل المثال)، وتقدر كمياته بنحو 0.2 غيغا طن غاز ثاني أكسيد الكربون، أو ما يعادل 15 %.

هذا وتمثل نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن إنتاج المواد الكيميائية الأولية (الأمونيا، والبتروكيماويات عالية القيمة*، والميثانول) حوالي 60% من إجمالي الانبعاثات من إنتاج البتروكيماويات [64]. وتعد الأمونيا أكبر مصدر منفرد من بين المنتجات الكيميائية الأولية لإنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم، حيث تسهم بنسبة 49% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، ويعزى هذا الارتفاع نتيجة اختلاف نسبة المحتوى الكربوني بين المادة الخام الأولية المستخدمة ونسبته في المنتج النهائي، فنجد ان إنتاج طن من الأمونيا (والذي يمثل فيه محتوى الكربون صفر %) يحتاج إلى استخدام حوالي 0.4 طن من المادة الخام الأولية المستخدمة من غاز الميثان (والذي يمثل فيه محتوى الكربون 75%) ، ما يعني أن كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن إنتاج طن واحد من الأمونيا تبلغ حوالي 1.1 طن . ثم تأتي البتروكيماويات عالية القيمة في المرتبة الثانية من حيث إنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة حوالي 27%، ثم إنتاج الميثانول يأتي في المرتبة الثالثة بنسبة تبلغ حوالي 24% [64].

* الإيثيلين، والبروبيلين، والبنزين العطري، والزايليين، وخليط الزايليين.

وتعتمد كذلك كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون على نوع المادة الخام الأولية المستخدمة في العمليات الصناعية، فنجد مثلاً ان كمية الانبعاثات الناتجة عن استخدام الفحم كمادة خام أولية لإنتاج الأمونيا، والميثانول أعلى بنحو مرتين ونصف، وخمس مرات تقريباً على التوالي، مقارنة بإنتاجهما من الغاز الطبيعي.

كما تعتمد كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون على الطاقات الإنتاجية الإجمالية لمنتجات الكيماويات، فنجد أن دول منطقة آسيا والمحيط الهادئ هي الأعلى، خاصة الصين، والتي تستخدم الفحم كمادة خام أولية بشكل كبير في الإنتاج. بينما نجد دول منطقة الشرق الأوسط، وخاصة منطقة دول الخليج العربي تظهر نسب أقل من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون لكونها تستخدم مواد أولية أخف كالغاز الطبيعي، والمشتقات البترولية السائلة الخفيفة.

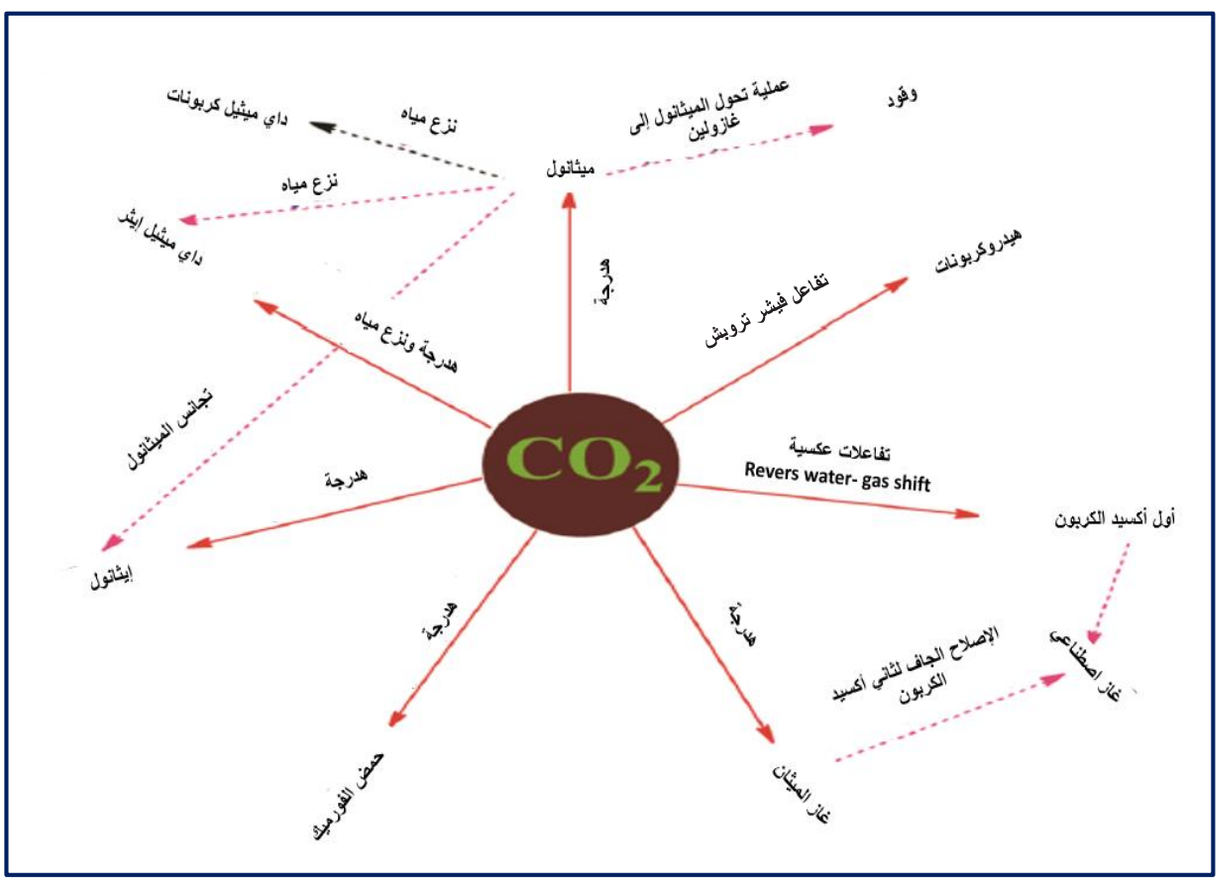
2.2. استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج البتروكيماويات

يهيمن إنتاج بعض الكيماويات على استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون كمادة خام أولية خاصة في إنتاج كل من الأمونيا، واليوريا، وهي طرق معروفة جيداً ومطبقه تجارياً، وتم تسويقها بنجاح. بالإضافة إلى إنتاج الإيثيلين بمختلف درجاته، وأكسيد الإيثيلين، وحمض النيتريك، وحمض السكسينك "Succinic Acid "، وحمض الأديبيك " Adipic Acid"، وحمض الساليسيليك "Salicylic Acid"، والكربونات الحلقية " Cyclic Carbonates"، والبولي كربونات، والكابرولاكتام "Caprolactam" المستخدم في إنتاج البلاستيك، والأسمدة، والألياف الاصطناعية [91،32].

يمكن هدرجة غاز ثاني أكسيد الكربون لإنتاج منتجات مختلفة من الهيدروكربونات احادية الكربون C_1، ومنتجات ذات السلاسل الهيدروكربونية الأطول، اعتماداً على ظروف التفاعل المطبقة. وتعتبر الهدرجة من بين الطرق المستخدمة لإنتاج الوقود

الاصطناعي، والغاز الاصطناعي "Syngas"، وإنتاج الميثانول (MeOH) [90]. يبين الشكل (20) بعض استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج بعض أنواع الوقود وإضافات الوقود.

الشكل (20): بعض استخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في إنتاج بعض أنواع الوقود وإضافات الوقود



المصدر [90].

وفي الآونة الأخيرة، تمكنت مجموعة من الباحثين في جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس من اكتشاف طريقة جديدة يتم فيها استخدام بعض أنواع من الكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً لتحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى وقود "الأيزوبيوتانول، و3-ميثيل 1- بيوتانول" [90]. كما تمكنت بعض الشركات من تطوير عمليات تحفيز بيولوجية

لتحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى هيدروكربونات مثل غاز الميثان، وغاز الإيثان، وغاز البروبان.

1.2.2. إنتاج اليوريا

تعد تقنية إنتاج اليوريا من التقنيات الراسخة والقابلة للتطبيق، وهي من أكبر المسارات المستخدمة على النطاق التجاري في الوقت الحالي لاستغلال غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة البتروكيماويات [60]. يبين الجدول (3) نماذج لبعض المنشآت التجارية لاحتجاز الكربون واستخدامه لإنتاج اليوريا. [62].

الجدول (3): نماذج لبعض المنشآت التجارية لاحتجاز الكربون واستخدامه لإنتاج اليوريا

تاريخ التشغيل	الدولة	الكمية المحتجزة (ثاني أكسيد الكربون طن/يوم)
1999	ماليزيا	210
2006	الهند	450
2006	الهند	450
2009	الهند	450
2009	البحرين	450
2010	الإمارات	400
2010	فيتنام	240
2011	باكستان	340
2012	الهند	450
2013	إيران	132

المصدر: CO2 Utilization via Integration of an Industrial Post-Combustion Capture Process with a Urea Plant: Process Modelling and Sensitivity Analysis,2020

يتم إنتاج اليوريا باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون عن طريق تفاعل كيميائي يتم على مرحلتين: يتم في المرحلة الأولي تفاعل التكثيف "Condensation Reaction"، بين كل من غاز الأمونيا (النشادر)، وغاز ثاني أكسيد الكربون لتكوين مادة الأمونيوم كربامات Ammonium Carbamate، وهو تفاعل ناشر للحرارة طبقاً للمعادلة التالية:

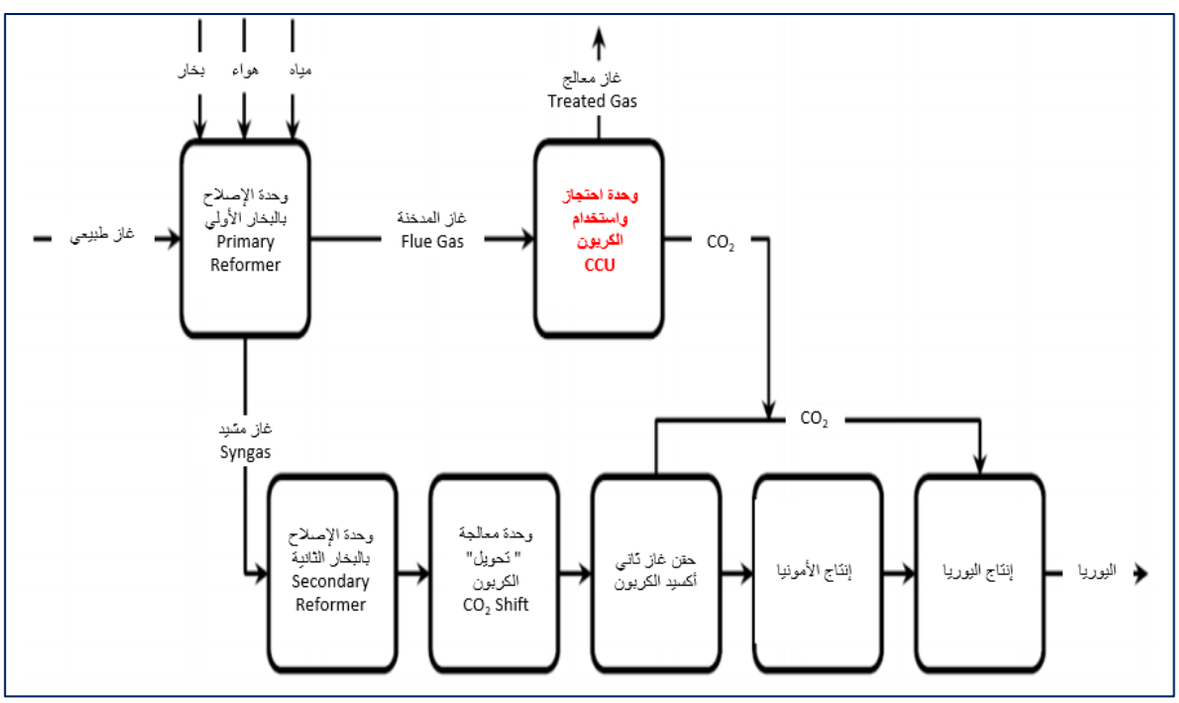
$$2NH_3 + CO_2 \leftrightarrows NH_2COONH_4$$ (أمونيوم كربامات)

ثم يتم في المرحلة الثانية، نزع للمياه Dehydration Reaction، وفيها يفقد جزئ الكربامات جزئ ماء ليتحول إلى جزئ يوريا، وهو تفاعل ماص للحرارة طبقاً للمعادلة التالية:

$$NH_2COONH_4 \leftrightarrows NH_2CONH_2 \text{ (يوريا)} + H_2O$$

تتم عملية إنتاج اليوريا تفصيلياً بهذه الطريقة من خلال خمس خطوات إنتاجية مختلفة، كما هو مبين في الشكل (21) [62].

الشكل (21): مخطط تعزيز إنتاج اليوريا باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: CO_2 Utilization via Integration of an Industrial Post-Combustion Capture Process with a Urea Plant: Process Modelling and Sensitivity Analysis,2020.

1.1.2.2. مرحلة التصنيع "Synthesis Stage"

يتم فيها التفاعل بين غازي الأمونيا وثاني أكسيد الكربون لتكوين مركب أمونيوم كربامات، وهو تفاعل ناشر للحرارة. ولكي يستمر التفاعل يتم سحب الحرارة من التفاعل عن طريق انتاج بخار منخفض، كما يستخدم مفاعل "Reactor"، رأسي أسطواني الشكل يحتوي على عدد من الصواني المثقبة "Perforated plates "، لتسمح بمرور الغازات من

خلال هذه الثقوب، ومرور السائل من خلال الجدار والصينية. يبدأ التفاعل لإنتاج اليوريا، ثم تخرج اليوريا من المفاعل بتركيز 35 %، لتتوجه إلى النازع Stripper، لرفع تركيز اليوريا إلى 57%.

2.1.2.2. مرحلة إعادة التدوير والتفكيك "Recycle and Decomposition"

بعد خروج محلول اليوريا من جهاز النازع "Stripper" بتركيز 57% يتم ضخه إلى جهاز عمود التصحيح "Rectifying Column" لرفع تركيز محلول اليوريا الي 72%. بينما يتم إعادة توجيه الغازات المنفصلة الي مكثف ذو ضغط منخفض"L.P.C.C" لإعادة تكثيفها وتحويلها الي " الأمونيوم كربامات المخففة".

3.1.2.2. مرحلة التبخير"Evaporation Stage"

يتم في هذه المرحلة رفع تركيز محلول اليوريا من حوالي 72% إلى 96%.

4.1.2.2. مرحلة الامتزاز والتحلل المائي Desorption and Hydrolyzation Stage

يتم في هذه المرحلة فصل غاز الأمونيا بالامتزاز Desorption من محلول الماء المحتوي على تركيزات منخفضة من الأمونيا تصل إلى حوالي 5%، باستخدام البخار ذو الضغط المنخفض. وتتم هذه العملية في أجهزة الامتزاز " أو ما يطلق عليها " Desorber، وتتكون من عمودين منفصلين يحتوي كل عمود على عدد من الصواني المثقبة. ثم يلي ذلك دفعها إلى جهاز المكثف الراجع "Reflex Condenser " لتكثيفها وإدخالها في عمليات التشغيل مرة آخري. تعمل أجهزة التحلل المائي "Hydrolyzer "، بنفس فكرة عمل المفاعل ولكنها عكسية حيث يتم فيه عملية تحلل لليوريا بواسطة المياه إلى مكوناتها الأولية من غاز أمونيا، وثاني أكسيد الكربون وتخرج هذه الغازات إلى المكثف الراجع للاستفادة منها مرة أخرى.

5.1.2.2. مرحلة التحبيب "Granulation Stage"

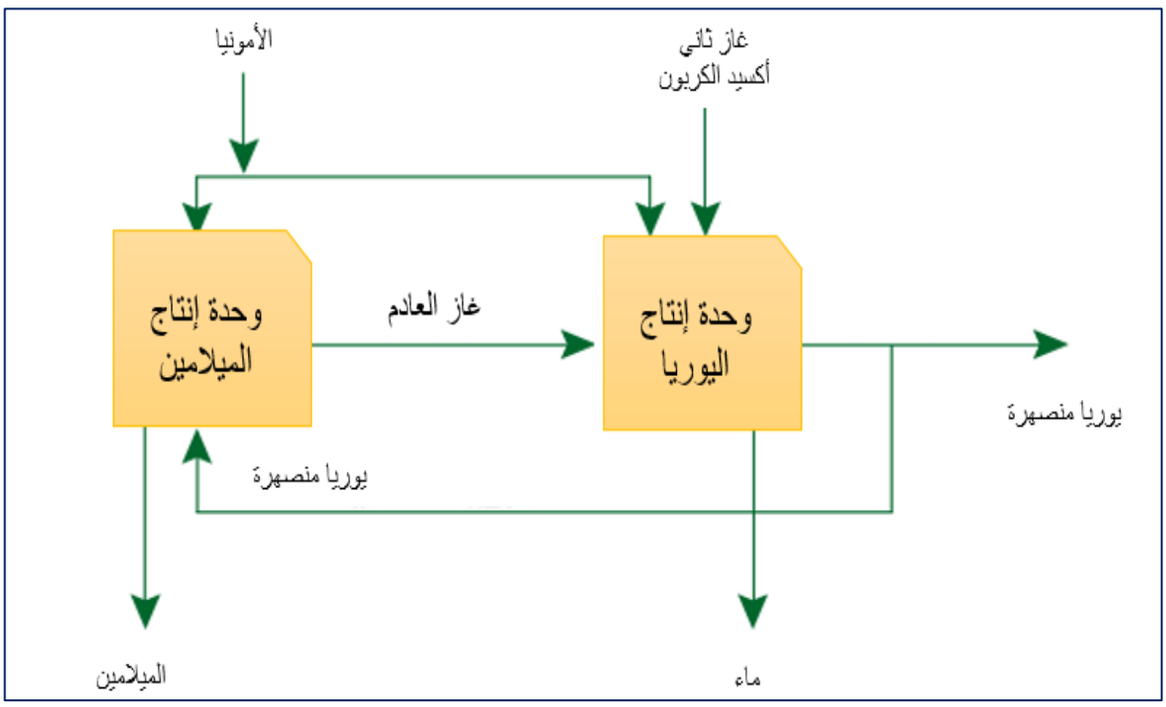
يتم فيها حقن محلول اليوريا السائل بتركيز 96% إلى أجهزة التحبيب "Granulator" حيث يتم تكوين حبيبة اليوريا بالحجم المطلوب، ثم تضاف اليوريا فورمالدهيد "Urea Formaldehyde"، والتي تعطي خاصية عدم التحجر للأسمدة. ومنها إلى وحدة التعبئة والتخزين.

تعد شركة كرمانشاه "Kermanshah" للصناعات البتروكيماوية في إيران، أحد أمثلة الشركات المنتجة للأسمدة والكيماويات الزراعية، والتي لجأت إلى تركيب وحدة لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من وحدة الإصلاح الأولى في وحدة الأمونيا، بسعة 132 طن يومياً. بدأ تشغيل المشروع في بداية عام 2013، وقد مكنت هذه التقنية الشركة من خفض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بكميات بلغت أكثر من 40 ألف طن سنوياً، وقُدر الوفر في استهلاك الغاز الطبيعي المستخدم في الإنتاج بحوالي 21.1 مليون م^3 سنوياً [(62)]، مما أدى إلى تعزيز الطاقة الإنتاجية لليوريا بنسبة 5% سنوياً، دون أي استثمارات إضافية، ماعدا الاستثمارات الرأسمالية التي استخدمت في إضافة وحدة احتجاز الكربون.

2.2.2. إنتاج الميلامين

يمكن تعزيز إنتاج الملامين، وذلك بالتكامل مع وحدات إنتاج كل من الأمونيا واليوريا (المنتجة من غاز ثاني أكسيد الكربون)، والتي تعد من المواد الخام الأولية الأساسية لإنتاجه، خاصة وأن أبخرة العادم الناتجة عن وحدات إنتاج الميلامين تحتوي على كميات من الأمونيا، وثاني أكسيد الكربون، والماء. والتي يمكن استرجاعها مرة أخرى ليتم استخدامها في إنتاج اليوريا والميلامين من خلال حلقة مغلقة، كما هو مبين في الشكل(22).

الشكل (22): مخطط تكامل صناعتي اليوريا والميلامين



المصدر: -https://www.saipem.com/sites/default/files/2019

3.2.2. تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون الى الميثانول ومشتقاته

وُصف الميثانول في كثير من المراجع منذ أواخر الثمانينيات، بأنه "وقود المستقبل" الصديق للبيئة لكن استخداماته في قطاع النقل لا يزال محدودًا. وينتج الميثانول عادةً بالطرق التقليدية من الغاز الاصطناعي (خليط الهيدروجين H_2، أول أكسيد الكربون CO، وثاني أكسيد الكربون (CO_2 المنتج من مصادر أحفورية، ومحفزات قائمة على النحاس وأكسيد الزنك Cu / ZnO.

هذا وقد أجريت عدة محاولات أولية سابقة في عشرينيات القرن الماضي لإنتاج الميثانول باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من عمليات التخمر، وكانت المحفزات المستخدمة في ذلك الوقت مماثلة لتلك التي يتم تسويقها حالياً لإنتاج الميثانول من الغاز

الاصطناعي*. وقد أثارت الاهتمام مؤخراً إمكانية إنتاجه من غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز [94]. حيث يمكن إنتاج الميثانول من غاز ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين، طبقاً للمعادلة التالية:

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

وبهذه الطريقة المبتكرة يمكن تحويل نحو 79% من غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز إلى ميثانول، ويكون الميثانول المنتج في البداية ممتزجاً بنسبة من المياه، والتي يمكن فصلها بسهولة من خلال عمليات التقطير التقليدية [89].

إن عمليات إنتاج الميثانول من غاز ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين، تحتاج إلى استخدام محفزات ذات أداء أكثر فعالية من حيث النشاط والاستقرار والانتقائية. ويعد تحقيق ميزة الانتقائية العالية للعوامل الحفازة أمراً صعباً، نظراً لإمكانية تكوين منتجات ثانوية أخرى غير الميثانول، مثل الهيدروكربونات، والكحولات الأعلى، بالإضافة إلى تفاعلات التحول العكسية للماء المتكون والغاز Reverse Water-Gas Shift Reaction، طبقاً للمعادلة التالية [93].

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$$

ويُعد إيجاد محفز متجانس، أحد العوامل الأساسية اللازمة لتسريع التفاعلات الكيميائية وزيادة سرعتها في تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى ميثانول. ولكن أحد أهم تحديات هذه الطريقة، هو أن هذه التفاعلات تتطلب درجات حرارة مرتفعة (حوالي 1500°م)، مما يتسبب في زيادة معدلات تحلل العوامل الحفازة المستخدمة. على الرغم

* ينتج الميثانول التقليدي بشكل مباشر من الغاز الاصطناعي، وباستخدام مجموعة متنوعة من محفزات الأكسيد، وخاصة أكاسيد الزنك، والكروميوم Cr_2O_3-ZnO، طبقاً للمعادلة التالية: $CO_2+2H_2 \leftrightarrow CH_3OH$

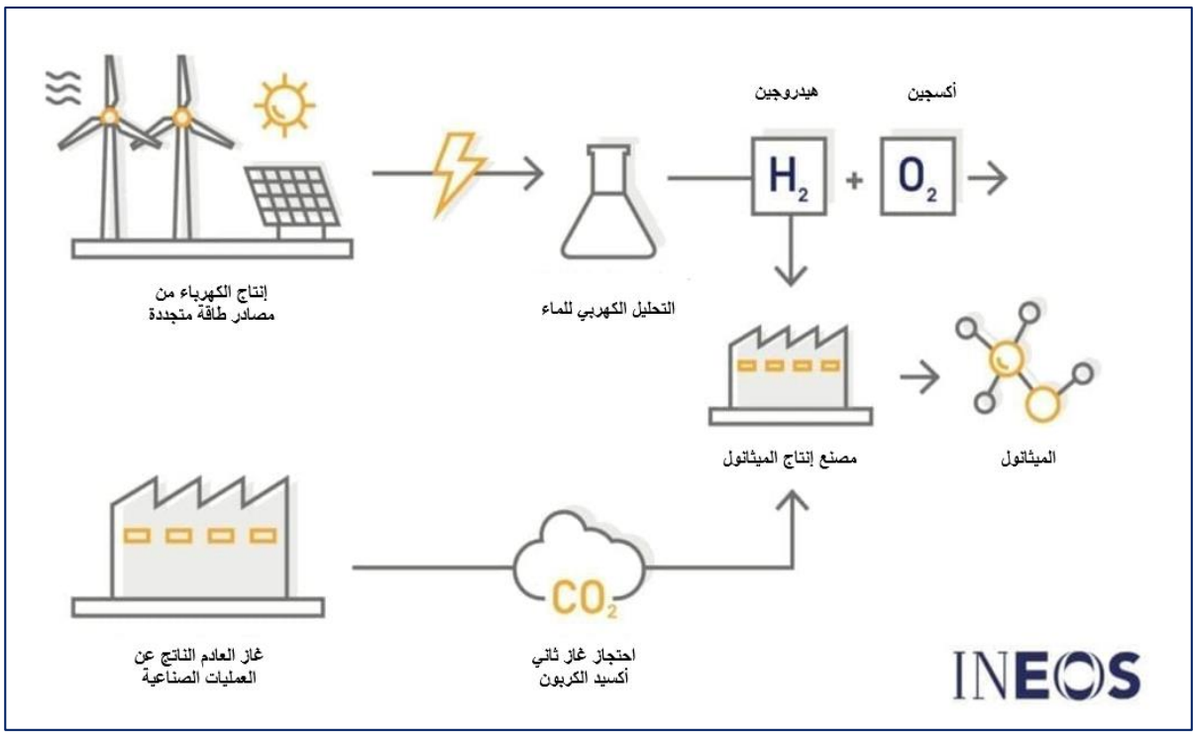
من أن هناك مجموعة كبيرة من المحفزات ذات الأساس المعدني يمكن استخدامها في الهدرجة الحفزية لثاني أكسيد الكربون لإنتاج الميثانول، إلا أن المحفزات القائمة على معدن النحاس تعد الأكثر كفاءة، وعلى وجه الخصوص محفزات النحاس وأكسيد الزنك Cu / ZnO.

ومن جانب آخر تمت دراسة إضافة مكونات أخرى لتطوير إنتاج محفزات جديدة، متعددة المكونات، وعالية الأداء، تعتمد على مركبات واكاسيد معادن النحاس، والزنك، والألومينيوم، والزركونيوم Cu / ZnO / ZrO_2 / $Al2O_3$، ويتم تحضيرها عن طريق الترسيب باستخدام نترات المعادن، وكربونات الصوديوم. وقد أظهر العامل الحفاز المصنع من مركب أكسيد الزنك ZnO سلوكاً حرارياً متميزاً، كما تميز بانخفاض التسمم بشوائب غاز التغذية مثل الكبريتيدات والكلوريدات مقارنة بمعدن النحاس [93].

تمكن كذلك عدد من الباحثين من تطوير عامل حفاز جديد بالاعتماد على فلز الروثينيوم (Ru)، والذي يتميز بالاستقرار الحراري في درجات الحرارة المرتفعة، كما يتميز بإمكانية إعادة استخدامه عدة مرات للإنتاج المستمر للميثانول.

كما أعلنت مجموعة من الشركاء من القطاعين العام والخاص في بلجيكا عن أول مشروع تجريبي، أطلق عليه اسم North-C-Methanol، لإنتاج حوالي 44 ألف طن سنوياً من الميثانول الأخضر، وباستثمارات بلغت حوالي 140 مليون يورو. يتضمن المشروع مصنعين تجريبيين، المصنع الأول وهو قيد الإنشاء يحتوي على محلل كهربائي بقدرة 65 ميجاوات، لتحليل الماء إلى هيدروجين اخضر، وأكسجين أخضر باستخدام طاقة الرياح. بالإضافة إلى وحدة لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من الشركات الصناعية الكبرى الواقعة في شبه جزيرة رودنهويز "Rodenhuize peninsula"، ضمن مفهوم الاقتصاد الدائري. بينما المصنع الثاني يُعنى بإنتاج الميثانول من الهيدروجين الأخضر، وغاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز [96]. يبين الشكل (23) مخطط إنتاج الميثانول الأخضر.

الشكل (23): مخطط إنتاج الميثانول الأخضر



المصدر: https://www.chemengonline.com/new-power-to-methanol-project-announced-by-inovyn/?printmode=1

بلغت الطاقة الإنتاجية العالمية للميثانول حوالي 150 مليون طن في عام 2020، ووصل الطلب العالمي على الميثانول في نفس العام إلى ما يقرب من 98 مليون طن سنوياً [95]. وللميثانول جاذبيةٌ خاصةٌ نظراً لتعدد استخداماته، يبين الشكل (24) بعض استخدامات الميثانول

الشكل (24): بعض استخدامات الميثانول

المصدر: https://www.gpic.com/Ar/products/Methanol /

هناك زيادة في تطبيقات الميثانول في عدد من الدول، بمزجه مع الوقود (الغازولين، أو/والديزل)، بنسب محددة أو استخدمه كبديل للغازولين، وبشكل خاص في سيارات الأجرة والنقل العام مثل الحافلات، وأيضاً للسيارات الخاصة، وإن كان على نحو اقل. كما يعد الميثانول بديل واعد للوقود البحري للسفن من المصادر الأحفورية. ويمكن أن يساعد القطاع البحري على تلبية متطلبات التشريعات الخاصة بخفض الانبعاثات المستقبلية دون الحاجة إلى استثمارات ضخمة من قبل مالكي السفن، خاصة مع قيام المنظمة البحرية الدولية بوضع هدف لخفض الانبعاثات بنسبة 50٪ لعام 2050، مقارنة بعام 2008 [(94)]. ويعد وقود نظيف منخفض التكلفة ويسهم بشكل كبير في خفض انبعاثات أكاسيد الكبريت، وأكاسيد النيتروجين، والجسيمات الدقيقة، والكربون.

يستخدم الميثانول كذلك لإنتاج بعض الإضافات الخاصة بالوقود، والمستخدمة لتحسين خواص ورفع رقم الأوكتان للغازولين مثل: ميثيل ثلاثي البيوتيل إيثر (MTBE)، وميثيل ثلاثي الأميل إيثر (TAME).

كما يستخدم في إنتاج غاز ثنائي الميثيل إيثر (DME) عن طريق تجفيف الميثانول، طبقاً للمعادلة التالية [93].

$$CH_3OH \rightarrow CH_3OCH_3 + H_2O$$

وهو غاز يشبه غاز البترول المسال (LPG)، ليتم خلطة مع غاز البترول المسال بنسب محددة لتوليد الطاقة [87]. أو استخدامه كوقود للمحركات، أو من المتوقع أن يكون بديلاً للتطبيق في خلايا الوقود.

4.2.2. إنتاج البوليمرات المتصلدة بالحرارة Thermoset Plastic

يمكن إنتاج مجموعة متنوعة من البوليمرات المتصلدة بالحرارة، مثل راتنجات اليوريا فورمالدهيد (UF) وراتنجات الميلامين فورمالدهيد (MF)، والتي يعتمد إنتاجها على كل من اليوريا التي تم إنتاجها مباشرة من تفاعل غاز ثاني أكسيد الكربون مع الأمونيا، وأيضاً على الفورمالدهيد، الذي تم الحصول عليه من الميثانول المشتق من ثاني أكسيد الكربون. وبالمثل، فإن مكونات راتنجات الميلامين فورمالدهيد "MF" هي الميلامين، التي يمكن الحصول عليها من اليوريا، والفورمالدهيد [68].

بالإضافة إلى إمكانية إنتاج بعض اللدائن الهندسية، مثل البولي (أوكسي ميثيلين) Polyoxymethylene (POM)، أو البولي (ميثيل ميثاإكريلات) Poly Methyl Methacrylate (PMMA)، والتي تنتج من غاز ثاني أكسيد الكربون عبر حمض الفورميك، وكذلك من البولي ميثيل ميثاإكريلات المنتج من الميثيل إكريلات الذي تم الحصول عليه

من الميثانول المستمد من غاز ثاني أكسيد الكربون. يبين الجدول (4) أمثلة بعض الشركات المنتجة للبوليمرات القائمة على ثاني أكسيد الكربون واستخداماتها الرئيسية [68].

الجدول (4): أمثلة بعض الشركات المنتجة للبوليمرات القائمة على ثاني أكسيد الكربون واستخداماتها الرئيسية

الشركة	نوع البوليمر	الاستخدامات
أساهي كاسي أدفانس كوربوشن Asahi Kasei Advance Corporation	• بولي كربونات	تصنيع اغطية الإضاءة. حاويات الهواتف الجوالة. إنارة السيارات
كارديا بيو بلاستيك Cardia bioplastics	• مزيج البولي (كربونات البروبيلين) مع النشا. Poly (propylene carbonate) blend with starch	الحقائب المحمولة
كوفيسترو إيه جي Covestro AG	• متعدد مجموعات الهيدروكسيل لرغوة البولي يورثان. Polyols for poly(urethane) foam	صناعة الأثاث. المراتب
شركة إمباور ماتيريالز Empower Materials Inc	• بولي (كربونات الإيثيلين)، • بولي (كربونات البروبيلين)، • بولي (كربونات البروبيلين / سيكلوهكسين)، • بولي (كربونات سيكلوهكسين)	مواد رابطة "Binder"
شركة جيانغسو تشونغكي - جينلونج كاس كيمكيال Jiangsu Zhongke Jinlong-cas Chemical Co., Ltd	• بولي (كربونات البروبيلين) المستخدمة لإنتاج اللدائن الحرارية لمنتجات البولي يوريتان	التعبئة والتغليف الصناعي. المواد اللاصقة. اللدائن الهندسية
شركة نوفومر / أرامكو السعودية Novomer Inc. /Saudi Aramco Materials	• متعدد الكحوليات للبولي يورثان Polyols for poly(urethane)	الطلاءات. المواد اللاصقة. مانعات التسرب. المواد الرابطة
إس كي إنوفاشن SK Innovation Co., Ltd	• بوليولات (لإنتاج البولي يوريثان) Polyols for poly(urethane)	مواد لاصقة عبوات أحبار دهانات مواد عازلة مواد ممتصة للصدمات.

المصدر: Carbon dioxide-based polymers: Turning carbon emissions into plastic

5.2.2. إنتاج حمض الفورميك HCOOH

ينتج حمض الفورميك بهدرجة غاز ثاني أكسيد الكربون، ويعتبر حمض الفورميك منتجاً قيماً، وله العديد من التطبيقات. حيث يستخدم حمض الفورميك كمادة لتخزين الهيدروجين، ومناسبة لتطبيقات خلايا الوقود. ومن جانب آخر ينتج عن تحلل حمض الفورميك كل من الهيدروجين، وغاز ثاني أكسيد الكربون فقط، ولا ينتج عنه أول أكسيد الكربون. لذا فسيكون من السهل إعادة تدوير غاز ثاني أكسيد الكربون المنتج عن طريق الهدرجة.

تعد طرق الهدرجة المعتمدة على الديناميكا الحرارية "Thermodynamically" غير مستحبة، لكون التفاعل ناشر للحرارة [93]* كما هو مبين في المعادلة الكيميائية التالية:

$$CO_2 + H_2 \rightarrow HCOOH$$

ولذا يفضل إتمام عمليات الهدرجة في الوسط المائي "Aqueous Medium"، في ظروف من الضغوط المرتفعة لغاز ثاني أكسيد الكربون، والهيدروجين باستخدام مواد حفازة معدنية عضوية، تعتمد على معدن الروديوم "Rhodium"، والروثينيوم "Ruthenium"، والإيريديوم "Iridium"، حيث تم بنجاح الحصول على معدلات هدرجة مرتفعة.

$$CO_2 + H_2 + NH3(aq) \rightarrow HCOO^-(aq) + NH^+(aq)$$

* Challenges in the Greener Production of Formates/Formic Acid, Methanol, and DME by Heterogeneously Catalyzed CO_2 Hydrogenation Processes

6.2.2. إنتاج غاز الميثان CH_4

ينتج غاز الميثان بالهدرجة الحفزية لغاز ثاني أكسيد الكربون، ويعد هذا التفاعل من التفاعلات المفضلة في سلسلة تفاعلات هدرجة غاز ثاني أكسيد الكربون التي تنتج الهيدروكربونات والكحول. وهو تفاعل ناشر للحرارة، كما هو مبين في المعادلة الكيميائية التالية:

$$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O, \quad \Delta H_{298} = -252.9 \text{ kJ mol}^{-1}$$

تعتبر عملية إزالة الحرارة من التفاعل مسألة مهمة لإتمام عملة الإنتاج. ويلزم كذلك استخدام عوامل حفازة عالية الأداء ذات خواص انتقائية، وتعد المحفزات المعتمدة على معدن النيكل هي الأكثر انتشارا لإنتاج غاز الميثان من غاز ثاني أكسيد الكربون [92].

7.2.2. إنتاج الهيدروكربونات الاعلى Higher Hydrocarbon

تستخدم بعض الطرق غير المباشرة لإنتاج الهيدروكربونات الأعلى، مثل طريقة "فيشر تروبش" Fischer-Tropsch (FT)، لإنتاج الميثانول، والذي يستخدم كمادة خام أولية لإنتاج الهيدروكربونات الأعلى (الغازولين).

8.2.2. إنتاج البلاستيك الحيوي من غاز ثاني أكسيد الكربون

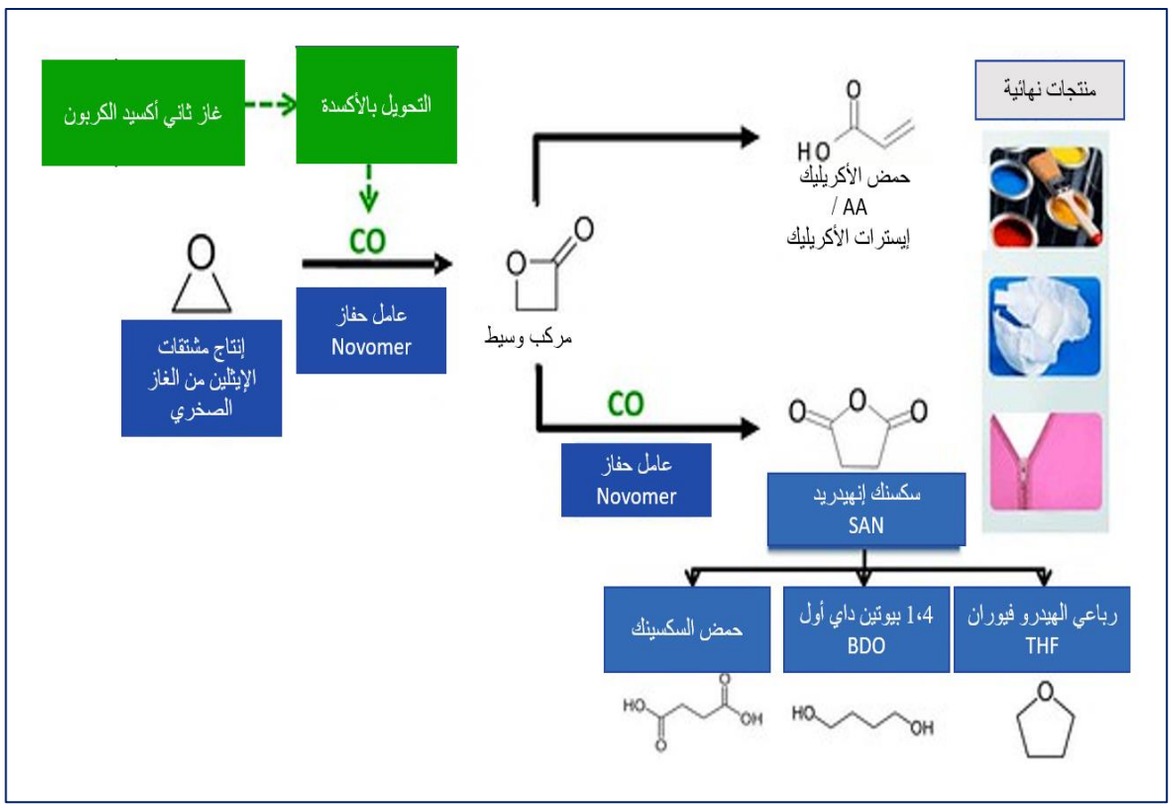
يقوم الباحثون في "مركز تحفيز تفاعلات ثاني أكسيد الكربون" التابع لجامعة ميونخ التقنية بدراسة إمكانية إنتاج البولي بروبيلين الحيوي من غاز ثاني أكسيد الكربون، واكتشف الباحثون العامل الحفاز المساعد على تسريع التفاعلات الكيميائية، والتي يمكن من خلالها التحكم في جزيئات غاز ثاني أكسيد الكربون، والتحكم في خواص مادة البولي بروبيلين الجديدة، وتغيرها حسب المواصفات المطلوبة لتكون شفافة، أو داكنة، أو مرنة، أو صلبة، وتتميز بقابليتها للتحلل. ويأمل العلماء خلال السنوات القليلة القادمة من

التمكن من إستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة أعلى من 50 % كمادة خام أولية لتعزيز إنتاج البولي بروبيلين، واستخدامه في كافة التطبيقات التقليدية للبولي بروبيلين.

وفي هذا الصدد نجحت شركة نوفومير "Novomer"، في عام 2021، في الولايات المتحدة في إنتاج حوالي 14 كيلو جرام من متراكبات* "Composite" البلاستيك الحيوي على النطاق التجريبي، أطلق علية اسم "رينوفو" Rinnivo، اعتمادا على احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وتحويلة إلى أول أكسيد الكربون ليتفاعل مع أكسيد الإيثلين باستخدام تكنولوجيا تعتمد على عوامل حفازة خاصة ، لها قدرة على الانتقائية العالية، لإنتاج اللاكتونات " وهي عبارة عن مركبات حلقية غير متجانسة، واستخدامها في إنتاج مواد كيميائية استهلاكية مثل حمض السكسينك، وكحولات البيوتان داي أول"Butanediol "، والتتراهيدروفيوران "THF "، كما هو مبين في الشكل (25).

* يُقصد بالمتراكبات أو المواد المتراكبة تلك الفئة من المواد الهندسية التي يتم إنتاجها عن طريق إضافة نسب وزنية أو حجمية معينة من مادة أو أكثر، تعرف بالمواد الداعمةReinforcement Materials ، إلى مادة الأساس المعروفة باسم مادة القالب .Matrix.

الشكل (25): مخطط إنتاج البلاستيك القابل للتحلل البيولوجي من غاز ثاني أكسيد الكربون



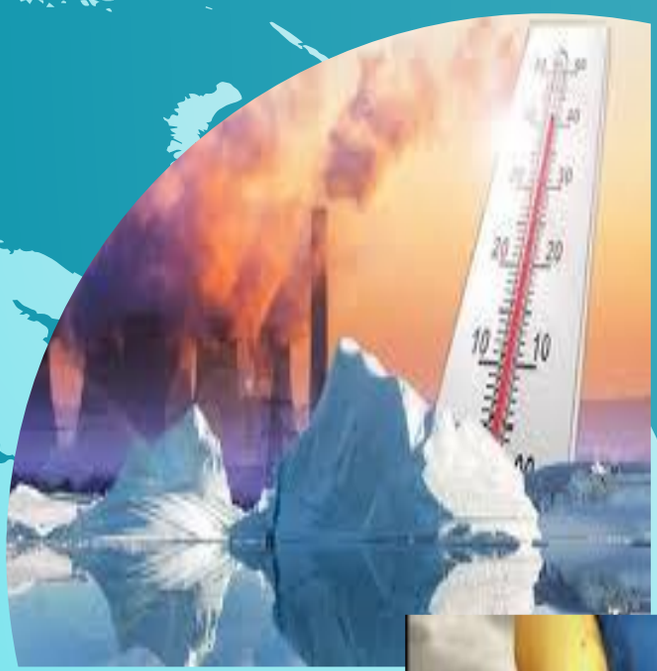
كما نجحت التكنولوجيا الجديدة في إنتاج بعض أنواع من البلاستيك الحيوي الشفاف من البولي ستيرين، والبولي كربونات المستخدم في إنتاج الأقراص المدمجة وزجاج النظارات. وساهمت التكنولوجيا في خفض نسب استخدام المواد الخام الأولية من المصادر الأحفورية بنسبة 50%. وتهدف الشركة إلى تشجيع الشركات المصنعة الكبرى على إنتاج البوليمرات باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون. يبين الشكل (26) المصنع التجريبي لإنتاج البلاستيك القابل للتحلل البيولوجي من غاز ثاني أكسيد الكربون. وتخطط الشركة لبناء منشأة تبلغ طاقتها الإنتاجية 80 ألف طن سنوياً بحلول عام 2022 [67].

الشكل (26): المصنع التجريبي لإنتاج البلاستيك القابل للتحلل البيولوجي من غاز ثاني أكسيد الكربون

المصدر: Novomer Achieves Breakthrough in Development of Low-Cost Compostable Polymers

من جانب آخر نجحت عدد من الأبحاث الحديثة في تطوير وتصميم أجهزة لها القدرة على امتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، حيث يمرر الهواء عبر ألواح ماصة، يتم معالجتها كيميائياً في مراحل لاحقة لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون منها وتحويله إلى الحالة السائلة، يمكن استخدامها كمادة خام أولية لإنتاج الغاز الاصطناعي اللازم لإنتاج المواد البلاستيكية، ووقود السيارات بأنواعه المختلفة.(66)

الفصل الثالث



الجهود العربية في مجال الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون

الفصل الثالث

الجهود العربية في مجال الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون

3. تمهيد

على الرغم من أن الدول العربية لا تتحمل سوى قدر بسيط من المسؤولية التاريخية تجاه ظاهرة التغير المناخي، إلا أنها تسعى لاتخاذ كل ما يمكن من الإجراءات، والتدابير التي يمكن أن تساعدها على خفض نسب انبعاثاتها من غازات الدفيئة، وخاصة غاز ثاني أكسيد الكربون، ومنها تحسين كفاءة إنتاج واستخدام الطاقة بجميع أشكالها، واستخدام تقنيات الدورة المركبة لزيادة كفاءة إنتاج الطاقة الكهربائية، وزيادة الاعتماد على إنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة، والتحول نحو زيادة الاعتماد على استخدام الغاز الطبيعي كوقود بديلاً عن زيت الوقود الثقيل.

كما قامت الدول العربية بإنشاء العديد من المراكز والمعاهد البحثية الحكومية والخاصة، التي تشارك في عدد من المشروعات الخاصة باحتجاز واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون. فأنشأت المملكة العربية السعودية مركز الابتكار التكنولوجي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذي يختص بأنشطة احتجاز الكربون. بينما تمتلك شركة "أرامكو" برنامجاً خاصاً للبحث والتطوير في مجال احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. ويعمل مركز الطاقة في معهد قطر للبحوث البيئية والطاقة في مجال البحوث والتطوير والابتكار في تكنولوجيا احتجاز الكربون واستخداماته، ضمن رؤية دولة قطر لعام 2030 لتعظيم الاستفادة من مختلف أنواع النفايات الصناعية، وتسهم في تنويع مصادر الاقتصاد القومي للدولة.

كما حرصت عدد من الدول العربية على المشاركة في تنفيذ وتمويل أنشطة البحث العلمي والتطوير الدولية لمكافحة تغير المناخ، ولاسيما خفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون. حيث قدمت المملكة العربية السعودية منح بقيمة 300 مليون دولار

لتمويل عدد من البرامج في هذا المجال. كما خصصت كل من دولة قطر ودولة الكويت، ودولة الإمارات العربية المتحدة دعماً مالياً لأبحاث احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون وصلت لنحو 150 مليون دولار.

تتمتع بعض الدول العربية بالخبرات الفنية المناسبة في مجال تعزيز إنتاج للنفط (EOR). فنجد ان مملكة البحرين حقنت حقل "المودود" بالغاز المصاحب في عام 1938، كما قامت دولة الكويت بحقن الغاز في عدد من المكامن في ثلاث حقول نفطية في مطلع الثمانينيات من القرن الماضي. لذلك فيمكن للدول العربية تعزيز استخلاص النفط بالاستفادة من حقن غاز ثاني أكسيد الكربون في الآبار بديلاً عن الغاز المصاحب أو استعمالهما بالتوازي، وذلك بالإسترشاد بالتجارب الحديثة الناجحة في كل من المملكة العربية السعودية، والإمارات العربية المتحدة [44]. ويمكن أيضاً تعميم الاستفادة من تلك التقنيات من خلال تعزيز فرص التعاون المشترك بين الدول العربية [97].

1.3. فرص تنمية مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية

تتعدد فرص تنمية مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية، نظراً لوجود المصادر الثابتة اللازمة لإنتاج غاز المداخن، المحتوي على غاز ثاني أكسيد الكربون، في محطات توليد الكهرباء التي تعمل بشكل رئيسي بالوقود الأحفوري، بالإضافة إلى وجود عدد من الصناعات الثقيلة كصناعات الحديد والصلب، والأسمنت المنتجة للكربون. وأصبحت كذلك تتميز عدد من الدول العربية بإمكانية إنتاج الهيدروجين الأزرق والذي يتجه العالم إلى زيادة الاعتماد عليه مستقبلاً كوقود نظيف، حيث أن إنتاجه أصبح يرتبط ارتباطاً وثيقاً بمشروعات احتجاز الكربون.

وفي هذا الصدد أُفتتحت في عدد من دول العالم، وبعض الدول العربية مشاريع لإنتاج الهيدروجين الأزرق، ونجحت المملكة العربية السعودية في إنتاج وتصدير أول

شحنة في العالم من الأمونيا الزرقاء في عام 2020 إلى اليابان، اعتماداً على الهيدروجين الأزرق، وهناك عدد من المشروعات الأخرى المخطط لها في هذا المجال في عدد من الدول العربية.

كما تتميز معظم الدول العربية بوجود تشكيلات جيولوجية متاحة على نطاق واسع، بالإضافة إلى حقول النفط والغاز المستنفدة والمهجورة والتي تعد بمثابة مستودعات طبيعية ملائمة كمواقع للتخزين الآمن والمستدام لعدة عقود. كما تتواجد في بعض الدول العربية النواة اللازمة لتطوير البنية التحتية، وشبكات خطوط الأنابيب لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون، والتي يمكن تنميتها وتطويرها بين المواقع المختلفة ضمن النطاق الجغرافي الواحد.

2.3. إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية

لعل من المفيد تحديد مصادر غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية، وهو ما ينعكس إيجاباً في تنمية وتطوير مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون [43].

يقدر إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الدول العربية بنحو 2,2 مليار طن مكافئ من غاز ثاني أكسيد الكربون، طبقاً لأحدث بيانات البنك الدولي لعام 2019، وهو ما يمثل حوالي 6.3 % من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون العالمية. وتتفاوت بشكل كبير نسب انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكربون في الدول العربية ما بين كميات كبيرة نسبياً، وكميات ضئيلة، ويرجع ذلك إلى مستوى التقدم الصناعي والاجتماعي، والذي ينعكس بدورة على كميات حرق الوقود الأحفوري المستخدم في مختلف النشاطات الحياتية.

3.3. جهود الدول العربية في تعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون

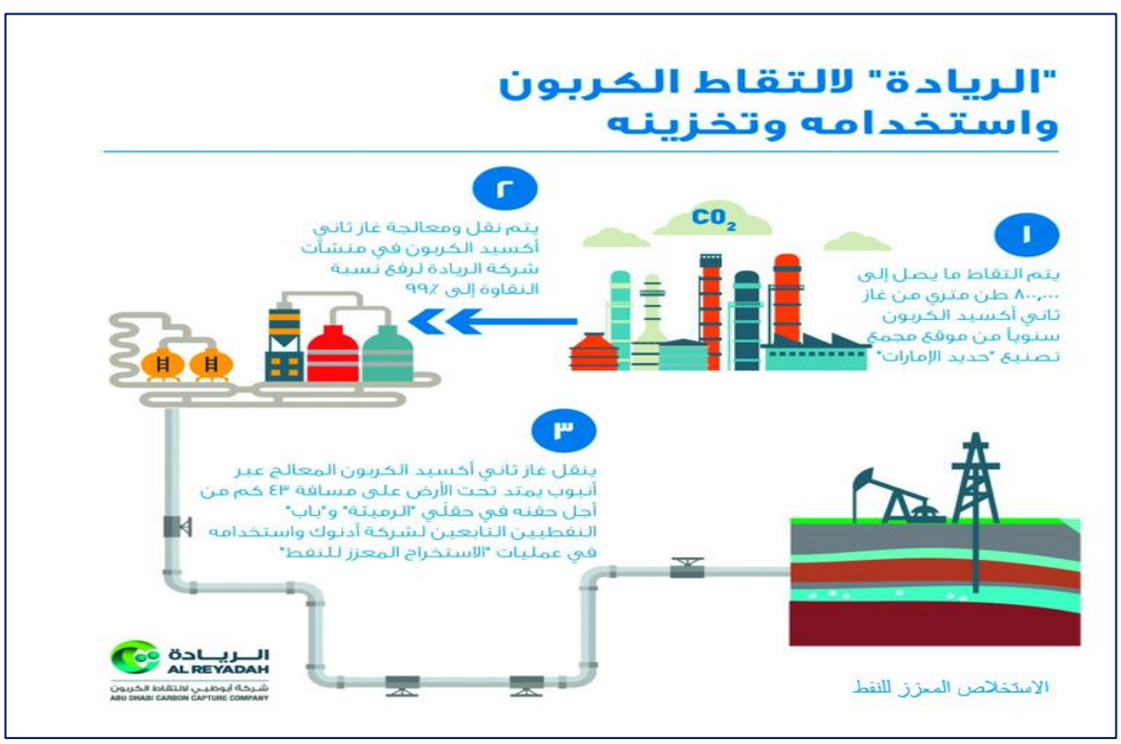
يمكن أن تلعب مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه دوراً هاماً في تنويع اقتصادات الدول العربية المنتجة للنفط والغاز، إذا ما تم تنظيمها بشكل جيد، ونجحت هذه الدول في وضع السياسات المناسبة والمشجعة لذلك. وقد تشهد السنوات القليلة القادمة انطلاقة غير مسبوقة لبرامج احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه في عدد من الدول العربية، نظراً لامتلاكها خبرات في هذا المجال، خاصةً في الدول التي تتركز بها هذه المشروعات، مثل دولة الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، ودولة قطر، والمملكة العربية السعودية. بالإضافة إلى توفر البنية التحتية المؤهلة واللازمة لنقل وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون، ووجود إمكانيات وسعات تخزينيه هائلة تحت الأرض، فضلاً عن توفر الاستثمارات المالية اللازمة الحكومية والخاصة. وإمكانية زيادة التعاون فيما بين الدول العربية في مجال تنمية مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون، بالاستفادة من الخبرات الدولية، والتعاون الإقليمي داخل المنطقة، مع دراسة تسهيل الإجراءات من خلال إقرار وتنفيذ السياسات المناسبة وإيجاد التدابير اللازمة للتمويل بمشاركة القطاع الخاص. مما يؤهل الدول العربية، وخاصةً دول منطقة دول مجلس التعاون الخليجي العربي لتصبح مركز عالمي لتجميع وتخزين وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون.

1.3.3. دولة الإمارات العربية المتحدة

تمتلك دولة الإمارات العربية المتحدة برنامج طموح على عدة مراحل لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، شملت المرحلة الأولى منه إنشاء وتشغيل مشروع شركة أبو ظبي لالتقاط الكربون "الريادة"، في عام 2016، بطاقة حوالي 0.8 مليون طن سنوياً من مزيج غازات عوادم عمليات تصنيع الحديد المختزل من مصنع "حديد الإمارات". ليتم

ضغطه وتجفيفه، ونقلة عبر أنبوب يمتد على مسافة 43 كم تحت الأرض، ومن ثم حقنه في حقلَي "الرميثة" و"باب" النفطيين التابعين لشركة أدنوك. تكلف المشروع نحو 450 مليون درهم، وهو مشروع مشترك بين كل من شركة بترول أبو ظبي الوطنية (أدنوك)، وشركة أبو ظبي لطاقة المستقبل (مصدر). يبين الشكل (27) مراحل عملية احتجاز ونقل واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع "ريادة" في أبو ظبي. بينما يبين الشكل (28) وحدة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع" الريادة".

الشكل (27): مراحل عملية احتجاز ونقل واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع "ريادة" في أبو ظبي



المصدر:https://www.abwmonline.com/archives/12660

الشكل (28): وحدة احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون في مشروع " الريادة"

المصدر: https://arabic.arabianbusiness.com/business/energy/2016/nov/6/425462

كما تخطط الشركة لتنفيذ المرحلة الثانية من البرنامج بحلول عام 2025، لاحتجاز كميات إضافية أخرى تتراوح ما بين 1.9 -2.3 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون، الناتج من عمليات معالجة الغاز الطبيعي. ومن المخطط أن يتم تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز من كلا المرحلتين في نفس المكمن لتعزيز اقتصاديات استخلاص النفط [37،36]. وأعلنت كذلك "أدنوك" في مايو/ آيار 2021، عن مشروع جديد، ما زال في مراحل التصميم الأولية لإنتاج الأمونيا "الزرقاء" في مجمع الرويس، وذلك في إطار خطتها للتوسع في تنمية مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون لتصل طاقتها إلى 5 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويا بحلول عام 2030 [37،36]. حيث تم إسناد عقود التصميم للأعمال الهندسية والتصاميم الأولية للمشروع إلى شركة "وود" Wood [98].

2.3.3. مملكة البحرين

يقدر حجم انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في مملكة البحرين بنحو 35 مليون طن سنوياً، وقد عملت المملكة مبكراً على الاستفادة من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وكانت من الدول الرائدة على مستوى دول منطقة الشرق الأوسط في هذا المجال. حيث اعتمدت الهيئة الوطنية للنفط والغاز (NOGA) منهجية الاقتصاد الدائري الكربوني (CCE) كحل لمعالجة مشكلة انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وتعتمد هذه المنهجية على ست محاور رئيسية، منها محوران معنيان بالتقاط غاز ثاني أكسيد الكربون، واستخدامه في إنتاج تعزيز إنتاج الكيماويات.

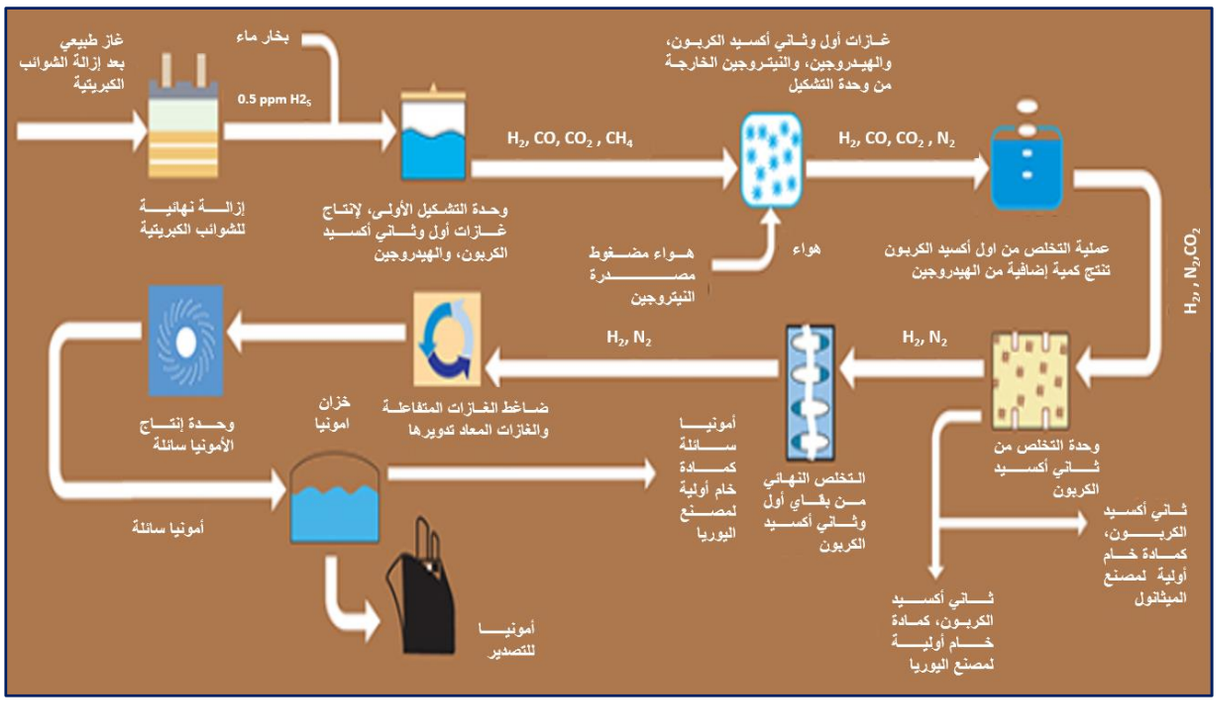
بينما يقدر إجمالي كميات غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يقوم قطاع النفط والغاز في مملكة البحرين باحتجازه بواسطة شركة الخليج لصناعة الكيماويات" جيبيك" بحوالي 0.68 مليون طن سنوياً. حيث قامت الشركة في عام 2010 بإنشاء أول مصنع لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بطاقة 0.64 مليون طن سنوياً، وهو ما يمثل أكثر من 40٪ من انبعاثاتها، تستخدم الشركة حوالي 0.52 مليون طن سنويًا من غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج الأمونيا، واليوريا، مما ساهم في زيادة إنتاج اليوريا بنسبة 50 %. بينما تستخدم نحو 0.12 مليون طن سنوياً لتعزيز إنتاج الميثانول، وهو ما ساهم في تعزيز الإنتاج بكميات بلغت حوالي 26 ألف طن سنوياً. وبلغت التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 52 مليون دولار. يبين الشكل (29) مصنع احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون التابع لشركة "جيبيك".

الشكل (29): مصنع احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون التابع لشركة " جيبيك"

المصدر: https://www.gpic.com

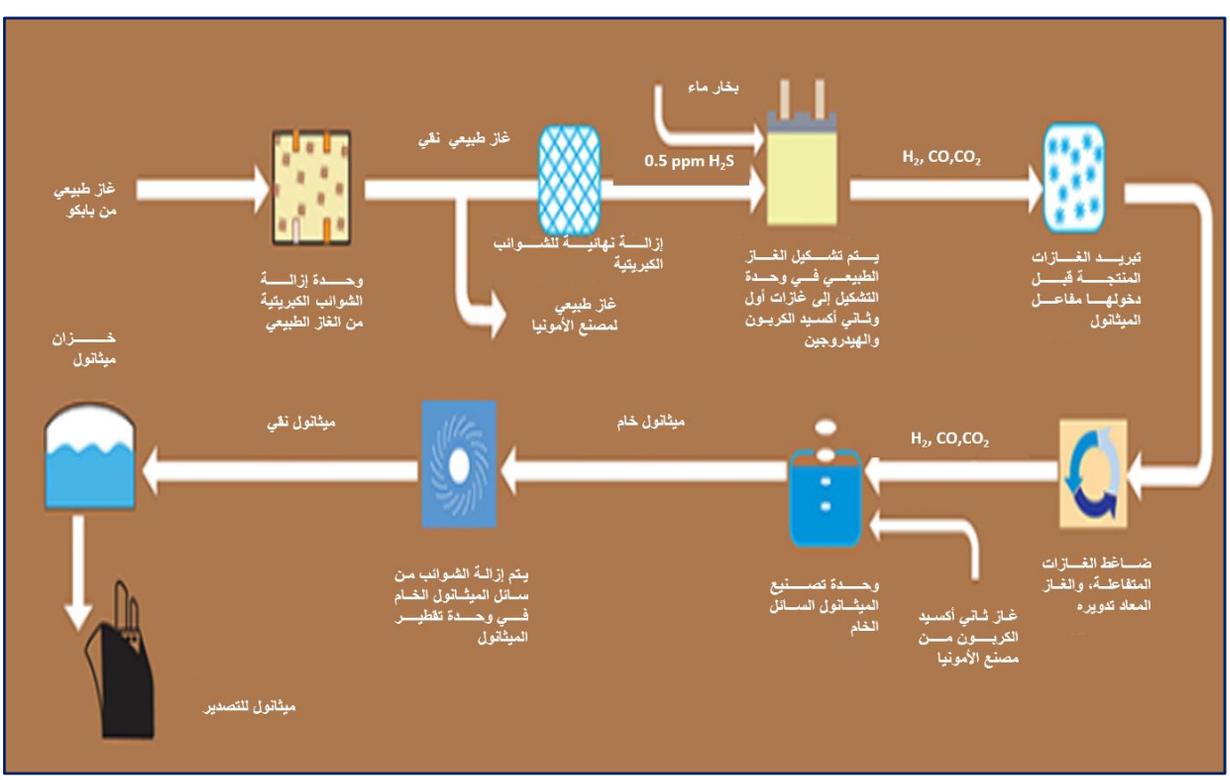
يتميز تشغيل مصنع احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بالمرونة، حيث يمكن فصله كلما لزم الأمر دون التأثير على سير العمليات الإنتاجية في المصانع الأخرى. تبين الأشكال (32،31،30) مخططات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، واستخداماته لتعزيز إنتاج الأمونيا، واليوريا، والميثانول في شركة "جيبيك".

الشكل (30): مخطط احتجاز وفصل غاز ثاني أكسيد الكربون بشركة "جيبيك"



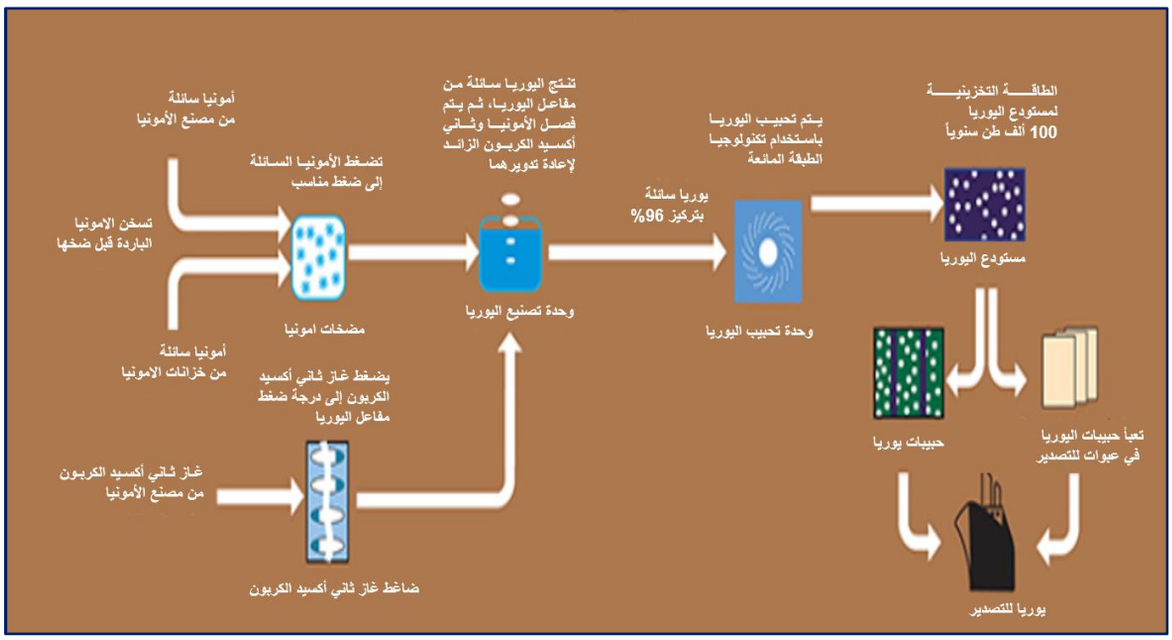
المصدر: https://www.gpic.com

الشكل (31): استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج الميثانول في شركة "جيبيك"



المصدر: https://www.gpic.com

الشكل (32): استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز إنتاج اليوريا في شركة "جيبيك"



المصدر: https://www.gpic.com

ومن جانب آخر قُدرت الكميات التي قامت شركة "بناجاس" Banaga باحتجازها في عام 2019 بنحو 110 ألف طن سنوياً، واستخدمتها الشركة في تعزيز استخلاص النفط في حقل "البحرين". وتمتلك الشركة خططاً مستقبلية طموحة لاحتجاز كميات إضافية من غاز ثاني أكسيد الكربون لتصل إلى نحو 0.5 مليون طن لتعزيز اقتصاديات استخلاص النفط في المملكة.

3.3.3. الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

يعتبر مشروع "عين صالح" في الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية أحد أكبر مشروعين لاحتجاز وتخزين الكربون في العالم، بعد مشروع حقل "سليبنر" للغاز في النرويج. ويهدف المشروع إلى نقل الخبرات المكتسبة، والدروس المستفادة من المشروع لدول أخرى مثل كل من الصين، والهند وبعض الدول الأوروبية، والتي تتميز بوجود نفس التكوينات والرسوبيات الجيولوجية المستخدمة لتخزين ثاني أكسيد الكربون. هذا وقد تم استعراض المشروع بالتفصيل في الفصل الثاني من الدراسة.

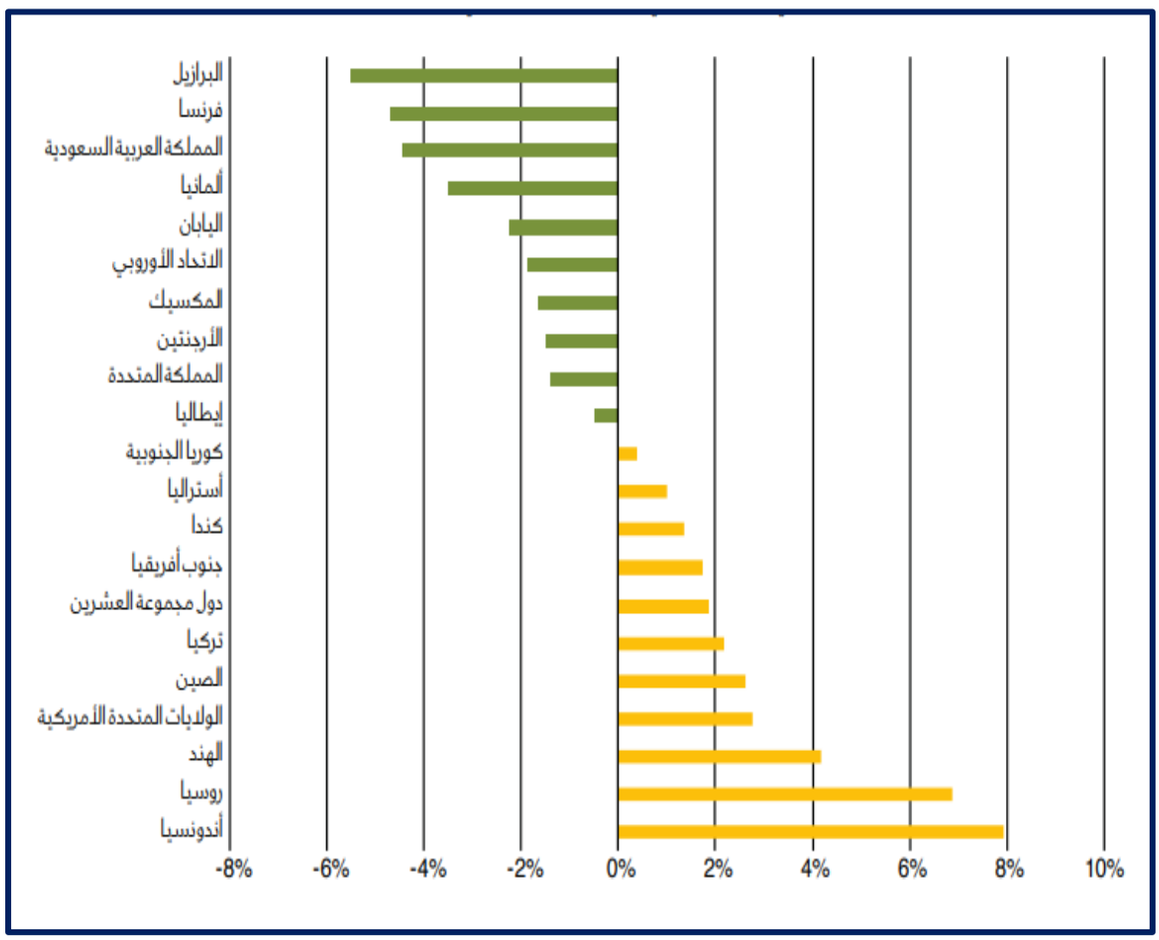
4.3.3. المملكة العربية السعودية

أشار تقرير صادر عن مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية "كابسارك" في يناير/كانون الثاني 2020، أن المملكة العربية السعودية شهدت انخفاضاً في إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال عامي 2017-2018 بما يعادل حوالي 4.4 %، وهو ما جعلها في المركز الثالث من بين دول مجموعة العشرين* [47]، من حيث الدول الأسرع في خفض نسب غازات الدفيئة بعد كل من البرازيل، وفرنسا [47]. كما هو مبين في الشكل (33) [47].

* تمثل انبعاثاتها ما نسبته 80 % من إجمالي الانبعاثات العالمية من غازات الاحتباس الحراري

الشكل (33): مقدار التغير في نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون

خلال الفترة 2017-2018 في دول مجموعة العشرين



المصدر: تحليل كابسارك اعتمادا على قاعدة بيانات Enerdata والوكالة الدولية للطاقة" EIA"

* تعتمد مقارنة مجموعة العشرين على الانبعاثات الناتجة عن استهلاك الوقود الأحفوري، حيث أن إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون غير متاح لكافة الدول.

تتركز غالبية مصادر انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الثابتة في المملكة العربية السعودية حول مناطق ينبع، وجدة، والجبيل، والدمام على طول البحر الأحمر والمناطق الساحلية للخليج العربي، كما يبين الشكل (34)، والذي يوضح 99 مصدر مختار تتراوح كميات الانبعاثات الصادرة منها ما بين 100 ألف طن إلى حوالي 8 مليون طن سنوياً. اختيرت تلك المصادر للمساهمة في تقدير ورصد كميات انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون

في بعض الأنشطة الصناعية في المملكة. وتقدر كمية الانبعاثات الصادرة منها بنحو 113 مليون طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. تصل نسب الانبعاثات الصادرة من المصادر الواقعة على طول الساحل الغربي نحو 36%، وتمثل المصادر الواقعة في نطاق الساحل الشرقي نحو 43%، بينما تمثل انبعاثات مصادر المنطقة الوسطى نحو 21% [46].

الشكل (34): بعض المصادر المختارة لرصد كميات انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في بعض الأنشطة الصناعية في المملكة العربية السعودية

المصدر: The role of CO2 capture and storage in Saudi Arabia's energy future

يبين كذلك الشكل (36) الفرص الواعدة، والمحتملة لربط مصادر انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في المواقع المختلفة ضمن نفس النطاق الجغرافي، والتي يمكن ربطها عبر شبكة خطوط أنابيب برية، وبما يسهم في تطوير عمليات نقل غاز ثاني أكسيد الكربون وتعظيم الاستفادة من استخداماته وتخزينه [46].

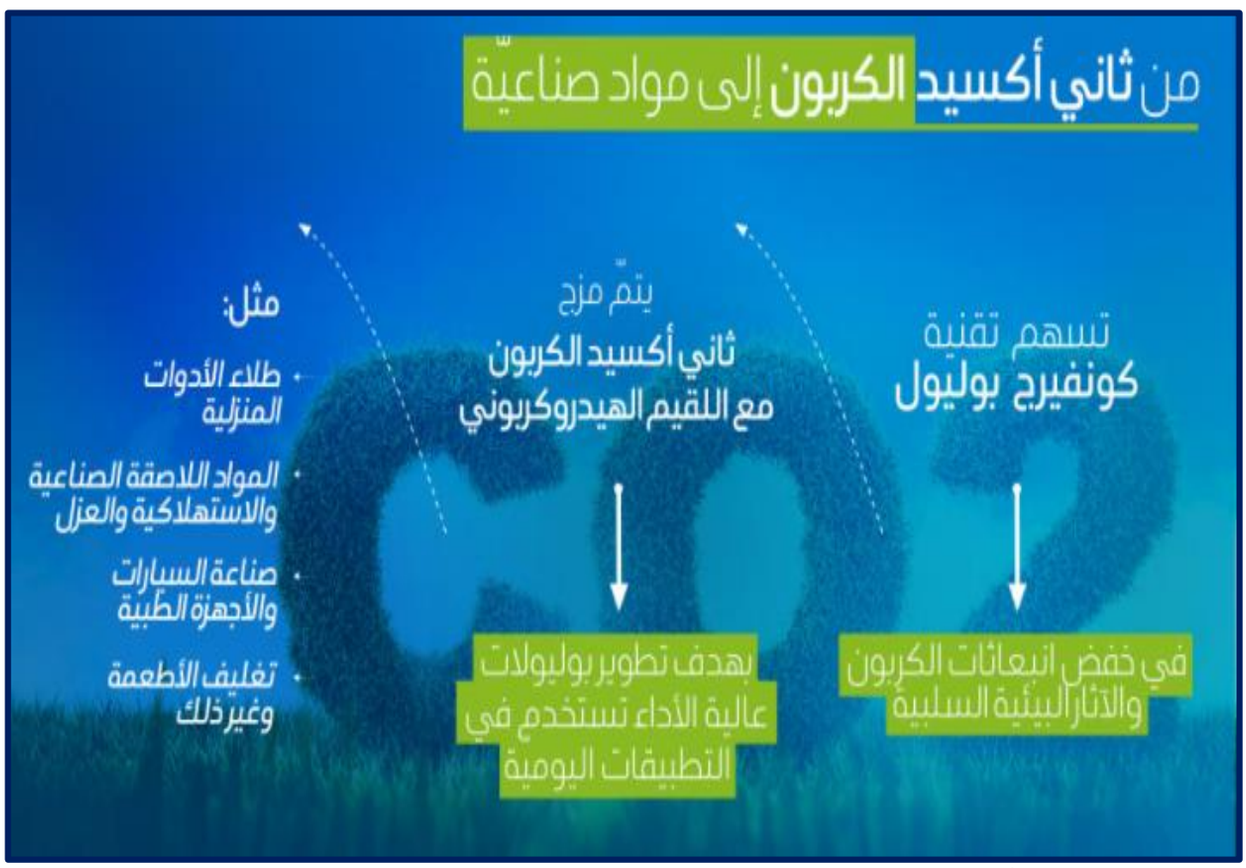
وفي إطار الجهود والمبادرات التي تبذلها الشركات النفطية الكبرى في المملكة للحد من انبعاثاتها من غاز ثاني أكسيد الكربون، وتعظيم القيمة المضافة له، فقد نفذت شركة " أرامكو" عدد من المبادرات، شملت مبادرة تشغيل أول مشروع تجريبي في عام 2015 لاحتجاز حوالي 0.8 مليون طن سنوياً من غاز ثاني أكسيد الكربون من مصنع "الحوية لسوائل الغاز الطبيعي". يعتمد المشروع على نقل غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز عبر خط أنابيب يبلغ طوله 85 كم إلى حقل النفط في العثمانية، وحقنه في مكمن نفطي بالمغمورة تحت ضغط عالي، مما ساهم في مضاعفة الإنتاج في أربعة آبار نفطية. واعتمد تنفيذ المشروع على تطبيق تقنيات "الثورة الصناعية الرابعة"*، وشملت المبادرة إجراء عدد من الدراسات لتحفيز المكامن بهدف زيادة الإنتاج، وخفض تكاليف التشغيل، باستخدام برنامج "الحقل الذكي" الذي يتيح التحكم في تشغيل وإغلاق الآبار عن بعد، وكذلك تطبيق برنامج المراقبة الشاملة.

كما نجحت الشركة في تعزيز القيمة المضافة لغاز ثاني أكسيد الكربون، وإنتاج منتجات متخصصة، حيث استحوذت في عام 2016 على حصة ملكية شركة "نوفومر" الأمريكية، والمالكة لخط إنتاج مواد "كونفيرج بولي أول" والتقنيات المبتكرة، بقيمة 100 مليون دولار. تتيح التقنية الجديدة إمكانية تحويل غاز ثاني أكسيد الكربون إلى منتجات نهائية ذات قيمة وكفاءة أداء عالية، وبتكلفة أقل نسبيا، خاصة عند دمجها مع مركبات " البولي يورثان"، لإنتاج المواد اللاصقة، ومواد العزل للمباني، ومواد تغليف الأغذية، ومانعات التسرب، والمطاط الصناعي عالي القوة والمقاومة للكشط، وطلاءات المنازل الخارجية المقاومة للعوامل الجوية، والمواد ذات القدرة العالية على تحمل الأحمال،

*تشمل عدة مجالات: منها مجال الذكاء الاصطناعي، والروبوتات، وإنترنت الأشياء، والمركبات ذاتية القيادة، والطباعة ثلاثية الأبعاد، وتكنولوجيا النانو، والتكنولوجيا الحيوية، وعلم المواد، والحوسبة.

ومقاومة الاحتراق [42]. يبين الشكل (35) مخطط تقنية كونفيرج بولي أول التابع لشركة أرامكو لتعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون.

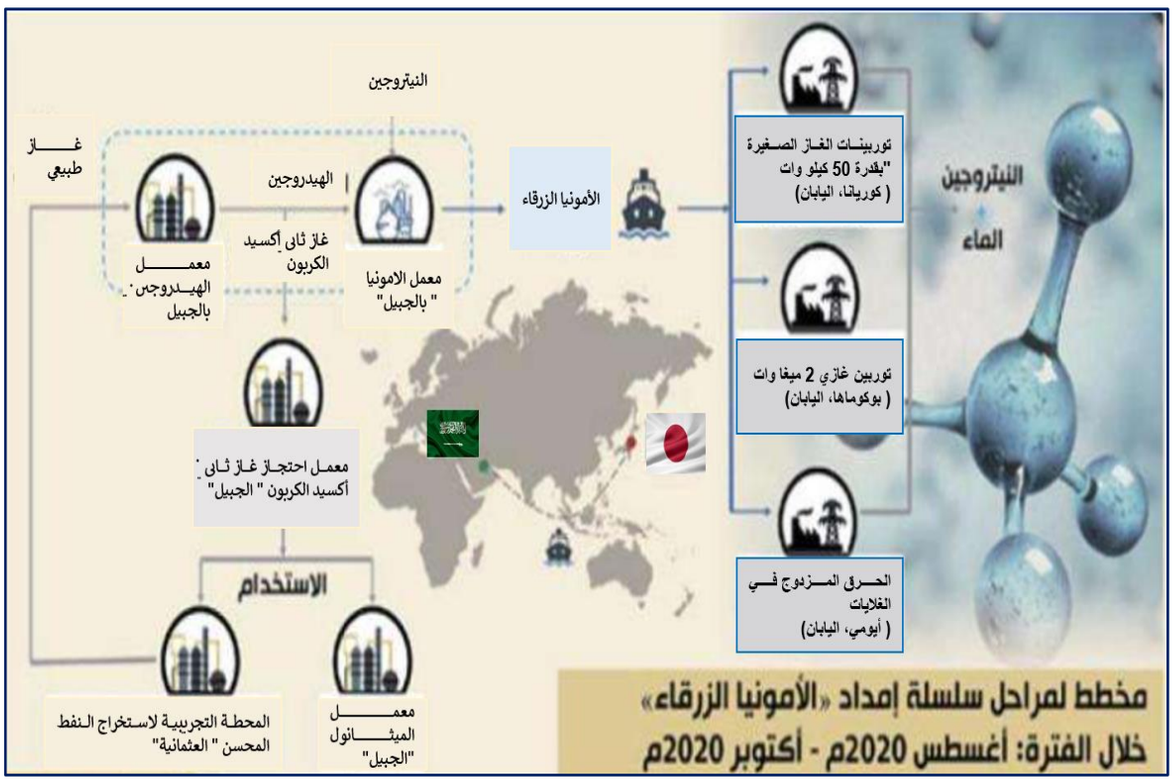
الشكل (35): مخطط تقنية كونفيرج بولي أول التابع لشركة أرامكو لتعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون



المصدر: شركة أرامكو

وواصلت الشركة جهود أنشطة البحث والتطوير بالتعاون مع شركة "سابك"، وبمشاركة معهد اقتصاديات الطاقة الياباني "The Institute of Energy Economics - IEEJ" في عام 2020، من تنفيذ مشروع تجريبي اعتمادا على مفهوم اقتصاد الكربون الدائري، لإنتاج أول شحنة في العالم من الأمونيا الزرقاء تبلغ كميتها 40 طن، وتصديرها إلى اليابان. يبين الشكل (36) مخطط مراحل إنتاج الأمونيا الزرقاء في المملكة العربية السعودية.

الشكل (36): مخطط مراحل إنتاج الأمونيا الزرقاء في المملكة العربية السعودية



كما أنشأت "إدارة حماية البيئة "التابعة لشركة "**أرامكو**" في عام 2018 برنامج لإدارة انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري. يهدف البرنامج إلى تقدير حجم الانبعاثات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري الناجمة عن أنشطة الشركة المختلفة، ووضع الإستراتيجيات اللازمة لمواجهتها من خلال عدد من المبادرات والبرامج، شملت: مبادرة إعادة تدوير غاز الشعلة، ومبادرات استخدام برامج لترشيد استهلاك الطاقة، وبرامج للكشف عن حالات التسرب لانبعاثات غاز الميثان الناتج عن العمليات الصناعية على مستوى الشركة ومعالجتها، بالإضافة على إجراء عدد من دراسات الجدوى لتعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون في عدد من التطبيقات مثل عمليات تحسين اقتصادات الاستخلاص المعزز للنفط.

أسفرت مخرجات تلك المبادرات والدراسات، عن تمكن الشركة من حصر إجمالي كميات ومصادر الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة المسببة للاحتباس الحراري، والصادرة من منشآتها في كل من نطاق (1) ويشمل قطاع التنقيب والإنتاج، ونطاق (2) ويشمل قطاع الصناعات التكميلية " صناعات التكرير والمعالجة والتسويق". وقدرت كميات تلك الانبعاثات بنحو 61,3 مليون طن مكافئ من غاز ثاني أكسيد الكربون سنوياً، كما هو مبين في الجدول (5) [40].

الجدول (5): إجمالي انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري لقطاعات التنقيب والإنتاج والصناعات التحويلية لعام 2018، لشركة أرامكو

المصدر	ثاني أكسيد الكربون (مليون طن)	غاز الميثان (ألف طن)	مكافئ ثاني أكسيد الكربون (الميثان) (مليون طن)	أكسيد النيتروز (ألف طن)	مكافئ ثاني أكسيد الكربون (أكسيد النيتروز) (مليون طن)	إجمالي مكافئ ثاني أكسيد الكربون (مليون طن)
نطاق 1	45,12	48,48	1,21	0,78	0,23	46,56
نطاق 2	14,64	0,34	0,01	0,25	0,07	14,72
الإجمالي	59,76	48,82	1,22	1,03	0,31	61,28

المصدر: شركة أرامكو

وفي إطار الجهود التي تبذلها شركة "**سابك**" ضمن إستراتيجيتها لعام 2025، قامت الشركة بالتخطيط لتنفيذ مشروع ضخم لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون بطاقة حوالي 0.5 مليون طن سنوياً، والناتج من وحدات إنتاج الإيثيلين غلايكول من مصانعها في شركة "المتحدة"، تصل التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 650 مليون ريال. كما تخطط الشركة للسماح للمنشآت الصناعية القريبة منها، من المشاركة في تشييد شبكة أنابيب برية لنقل غاز ثاني أكسيد الكربون من مصادره المختلفة، واستخدامه في تصنيع منتجات متنوعة ذات قيمة مضافة مثل اليوريا، والميثانول، الهكسانول [41].

5.3.3. دولة قطر

يقدر حجم انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في دولة قطر بحوالي 109 مليون طن سنوياً. وتهدف قطر إلى خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، ضمن رؤيتها لعام 2030، من خلال إدارة البيئة بأسلوب يتسم بالاتزان ما بين متطلبات التنمية المستدامة، والمتطلبات الدولية لحماية البيئة، وأصدر مركز معالجة الغاز بجامعة قطر (GPC) في عام 2012، خارطة طريق لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون وإدارته، ويجري المركز عدد من المشروعات البحثية والتي تهدف إلى تقييم أداء مجموعة متنوعة من المذيبات الكيميائية، لاختيار أنسبها وتطبيقها في تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غاز المداخن الخاصة بمحطات إنتاج الكهرباء التي تستخدم الغاز الطبيعي [97].

تبنت دولة قطر كذلك عدد من المبادرات التي تهدف إلى حماية البيئة، منها مبادرات لخفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وتقليل عمليات حرق غاز الشعلة في الحقول، من خلال عدد من المراكز البحثية، مثل مركز قطر لبحوث الكربونات وتخزين الكربون (QCCSRC)، والذي أنشئ بالتعاون مع جامعة لندن، وشركة قطر للبترول (QP)، وشركة شل. وتعمل كذلك واحة العلوم والتكنولوجيا في مجال الأبحاث الجديدة في علوم الأرض لدراسة الخصائص الجيولوجية للمكامن النفطية، والغازية بشكل أفضل، والعمل على نشر تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون [97].

كما قامت الشركة الوطنية للإضافات البترولية المحدودة (QAFAC)، في عام 2014، بتشغيل مصنع لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، واستخدامه في تعزيز إنتاج الميثانول، وهو ما ساهم في زيادة إنتاج الميثانول بمقدار 250 طن / يوم، وخفض كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بمقدار 500 طن / يوم [96].

وفي عام 2019 قامت دولة قطر بتدشين مشروع ضخم، بمنطقة "راس لفان" لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن معالجة الغاز الطبيعي" من حقل الشمال"بطاقة 2.1 مليون طن سنوياً، وتخزينه بشكل دائم. ويستهدف المشروع تخزين حوالي 5 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2025، مما سيحقق خفض في انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة حوالي بنسبة 2 % من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الدولة [36].

وفي إطار زيادة الجهود والأنشطة البحثية، فقد بدأ مركز التنمية المستدامة بجامعة قطر في عام 2019، في إجراء عدد من البحوث المشتركة مع شركة " توتال"، لدراسة إمكانية إنتاج الوقود الحيوي من الطحالب، التي تتغذى على غاز ثاني أكسيد الكربون، كأحد الحلول المبتكرة لاستخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون.

6.3.3. دولة الكويت

يقدر حجم الانبعاثات السنوية من غاز ثاني أكسيد الكربون في دولة الكويت بحوالي 107.5 مليون طن. وتسعى دولة الكويت مع الشركاء الدوليين أصحاب الخبرات المتميزة إلى دراسة فرص تطبيق واستخدام تقنيات احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في المكامن النفطية المستنفذة، واستخدامه في تعزيز إنتاج النفط. وفي هذا الإطار عقدت "مؤسسة البترول الوطنية"، في عام 2019، ورشة عمل لاستعراض آخر التطورات، وأحدث التقنيات لاحتجاز وتخزين، واستخدام الكربون، ومناقشة بعض التجارب التي قامت بها كبرى شركات الطاقة العالمية في هذا المجال، بمشاركة عدد من الخبراء، والأكاديميين من المملكة المتحدة، وشركة نفط الكويت، وشركة شل العالمية، وجامعة الكويت [44].

7.3.3. جمهورية مصر العربية

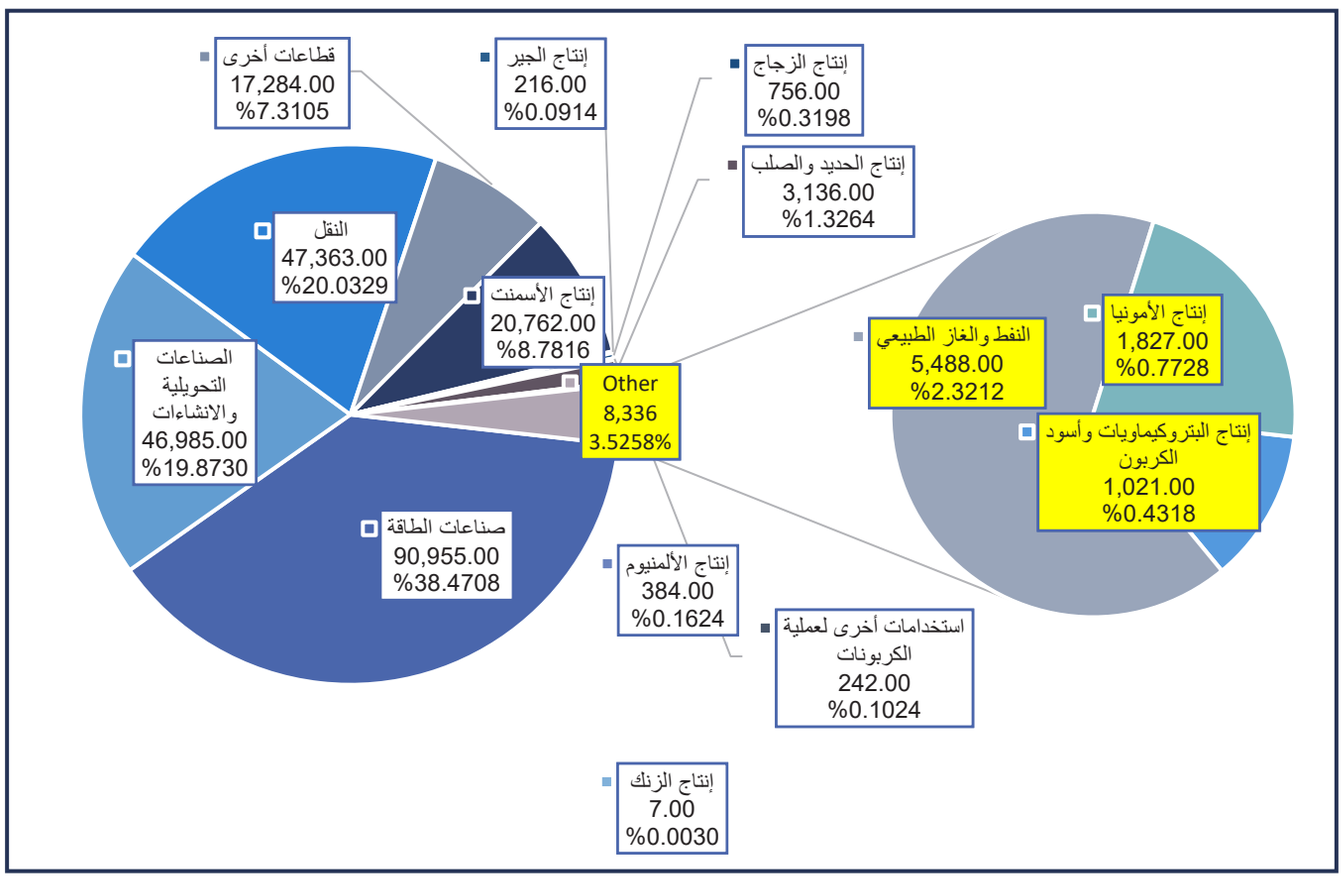
قدر إجمالي حجم انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في جمهورية مصر العربية لعام 2019 بنحو 246.6 مليون طن سنوياً*. وتوزعت تلك الكميات بين مختلف الأنشطة في الدولة، حيث قدرت كمية الانبعاثات الناتجة من قطاع الطاقة بحوالي 208,075 مليون طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون، فيما قدرت كمية الانبعاثات الناتجة عن العمليات الصناعية واستخدام المنتجات بحوالي 28,355 مليون طن مكافئ من ثاني أكسيد الكربون [51]. وتوزعت باقي كميات غاز ثاني أكسيد الكربون بين الأنشطة الحياتية المختلفة في الدولة. يبين الجدول (6) كميات انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المكافئ لمختلف الأنشطة في جمهورية مصر العربية لعام 2015. بينما يبين الشكل (37) نسب مساهمة كل نشاط من إجمالي الانبعاثات في جمهورية مصر العربية.

* Outworld in Data

الجدول (6): إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المكافئ للأنشطة المختلفة داخل قطاعي الطاقة، والعمليات الصناعية واستخدام المنتجات في جمهورية مصر العربية لعام 2015

المصدر	ثاني أكسيد الكربون المكافئ (مليون طن/ سنة)
1. قطاع الطاقة	208,075
1.1. أنشطة احتراق الوقود	202,587
1.1.1 صناعات الطاقة	90,955
2.1.1. الصناعات التحويلية والانشاءات	46,985
3.1.1. النقل	47,363
4.1.1. قطاعات أخرى	17,284
2.1. انبعاثات المتسربة من الوقود	5,488
1.2.1. النفط والغاز الطبيعي	5,488
2.2.1. نقل ثاني أكسيد الكربون وتخزينه	غير محدد
2. قطاع العمليات الصناعية واستخدام المنتجات	28,355
1.2. الصناعات المعدنية	21,975
1.1.2 إنتاج الأسمنت	20,762
2.1.2. إنتاج الجير	216
3.1.2. إنتاج الزجاج	756
4.1.2. استخدامات أخرى لعملية الكربونات	242
2.2. الصناعات الكيماوية	2,848
1.2.2. إنتاج الأمونيا	1,827
2.2.2. إنتاج البتروكيماويات وأسود الكربون	1,021
3.2. الصناعات المعدنية	3,531
1.3.2. إنتاج الحديد والصلب	3,136
2.3.2. إنتاج الألمنيوم	384
3.3.2. إنتاج الزنك	7
الإجمالي	236,426.00

الشكل (37): نسب مساهمة الأنشطة المختلفة داخل قطاع الطاقة، وقطاع العمليات الصناعية واستخدام المنتجات في جمهورية مصر العربية



يبين كل من الجدول، والشكل أن إجمالي كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن أنشطة إنتاج النفط والغاز الطبيعي قدرت بنحو 5,844 مليون طن سنوياً مكافئ من ثاني أكسيد الكربون وبلغت نسبته 2.3%، فيما قدرت كمية الانبعاثات من قطاع الكيماويات حوالي 2,848 مليون طن ثاني أكسيد الكربون مكافئ، شكل منها إنتاج الأمونيا ما نسبته حوالي 0.78 % من إجمالي الانبعاثات، شكل إنتاج البتروكيماويات* واسود الكربون، ما نسبته حوالي 0.43 % [51].

* تم استخراج البيانات الخاصة بإنتاج الصناعات البتروكيماوية بما يشمل الميثانول والإيثيلين، والأسمدة التي تخضع لإشراف الشركة المصرية للبتروكيماويات من التقارير السنوية المنشورة للشركة.

وفي إطار الجهود التي تبذلها الدولة لخفض نسب انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وتعظيم الاستفادة منه، فقد أعلنت شركة أبو قير للأسمدة في أغسطس /آب 2021، عن البدء في إجراء دراسة إنشاء مشروع لاستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون لتعزيز إنتاج اليوريا لتصل إلى نحو 2.3 ألف طن يومياً بدلاً من 1.9 ألف طن يومياً، ومن المتوقع أن يستغرق تنفيذ المشروع 28 شهر. تبلغ التكلفة الاستثمارية للمشروع حوالي 100 مليون دولار. من المتوقع أن يساهم جهاز شئون البيئة بقرض تبلغ قيمته حوالي 25 مليون دولار، نظراً لإدراج المشروع ضمن المشروعات الهادفة إلى الحفاظ على البيئة. وهو ما يدل على أهمية دور الدولة في تشجيع الاستثمارات في المشروعات الهادفة إلى الحفاظ على البيئة وتعظيم الاستفادة من غاز ثاني أكسيد الكربون في تعزيز الإنتاجية وزيادة الربحية.

ومن جانب آخر وقعت كل من الشركة المصرية القابضة للبتروكيماويات "إيكم" والشركة المصرية القابضة للغاز الطبيعي " إيجاس" في سبتمبر / أيلول من عام 2021، مذكرة تفاهم مع شركة "تويوتا تسوشو اليابانية" Toyota Tsusho، لإجراء دراسة جدوى فنية تهدف إلى البحث عن أفضل الفرص المتاحة في قطاع البترول لتنفيذ مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وإنتاج الأمونيا الزرقاء، اعتمادا على أحدث التكنولوجيات اليابانية في هذا المجال. على أن تنتهي الدراسة خلال ستة أشهر.

الاستنتاجات والتوصيات

يمكن أن تلعب مشروعات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه دوراً هاماً في تنويع اقتصادات الدول العربية المنتجة للنفط والغاز، إذا ما تم تنظيمها بشكل جيد، ونجحت في وضع السياسات المناسبة والمشجعة لذلك. وقد تشهد السنوات القليلة القادمة انطلاقة غير مسبوقة لبرامج احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون واستخدامه وتخزينه في عدد من الدول العربية، نظراً لامتلاكها خبرات في هذا المجال، خاصةً في كل من المملكة العربية السعودية، ودولة الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، ودولة قطر. بالإضافة إلى توفر البنية التحتية المؤهلة واللازمة لنقل وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون، ووجود إمكانيات وسعات تخزينه هائلة تحت الأرض، فضلاً عن توفر الاستثمارات المالية اللازمة الحكومية والخاصة. مما يؤهل الدول العربية، وخاصةً دول منطقة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربي لتصبح مركز عالمي لتجميع وتخزين وتداول غاز ثاني أكسيد الكربون. كما توصلت الدراسة إلى الاستنتاجات التالية:

- تعد تقنيات احتجاز وتخزين واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون Carbon Capture, Utilization, and Storage **CCUS** من التقنيات المثبتة، وهي تقنيات تعمل بشكل آمن وتجاري لأكثر من أربعة عقود.
- يعتمد اختيار تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون المناسبة على خصائص مزيج غاز المداخن، وبشكل أساسي تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون.
- أثبتت تقنيات احتجاز وتخزين واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون، جدواها الاقتصادية في عدد من التطبيقات، وانتشرت ببطء إلى حد ما، وتنوعت تلك المشاريع ما بين المستوى التجاري، والتجريبي، والبحثي.

- يعتمد زيادة نمو وانتشار مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون مستقبلاً، على كثافة الاستثمار في الوقت الحالي في إنشاء وتهيئة البنية التحتية.
- تقنيات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون ستكون أحد أهم التقنيات الواعدة التي سيتم تبنيها في العديد من القطاعات الاقتصادية مستقبلاً، خاصة في قطاع النفط والغاز، للمساهمة في جهود والتزامات الدول نحو خفض نسب انبعاثاتها، وتعظيم الإنتاجية والربحية للصناعة.
- تتعدد الخيارات المحتملة لاستخدامات غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة البتروكيماويات، والتي تهدف في نهايتها إلى تعزيز إنتاجها.
- تعد طرق هدرجة غاز ثاني أكسيد الكربون من الطرق الواعدة لإنتاج البتروكيماويات، ولكنها تحتاج لمزيد من البحث والتطوير.
- بعض تطبيقات إعادة تدوير، واستخدام ثاني أكسيد الكربون في إنتاج الأوليفينات، والميثانول، واليوريا، غير مجدية اقتصاديا، مقارنة بالطرق التقليدية، ولكن نجحت بعض الدول في جذب العديد من الاستثمارات من خلال الدعم الحكومي، وجعل بعض تلك التقنيات على النطاق التجاري.
- ترتبط مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون ارتباطا وثيقاً بمشروعات إنتاج الهيدروجين الأزرق منخفض الكربون، وهو ما يعتبر فرصة للدول الأعضاء نظراً لامتلاكها المقومات اللازمة.
- يمكن أن تسهم تقنيات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون في تحقيق مستقبل الطاقة المستدامة، جنباً إلى جنب مع استمرار الوقود الأحفوري في لعب دوره الرئيسي في تلبية الطلب العالمي على الطاقة النظيفة.

- توجد فرص متميزة في دول المنطقة العربية، وخاصة الدول الأعضاء في منظمة أوابك للتوسع في مشروعات احتجاز الكربون، وجذب المزيد من الاستثمارات بمشاركة القطاع الخاص لتطوير وتشغيل تلك المشروعات على نطاق واسع.

التوصيات

- العمل على إقرار السياسات والحوافز التشجيعية، وضرائب، وتسعير الكربون لتحفيز الاستثمار في مشروعات احتجاز واستخدام وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون.
- زيادة التعاون والتنسيق بين القطاع الحكومي، والاستثماري الخاص لتوفير التمويل اللازم، والمساهمة في اتخاذ القرارات النهائية للاستثمار في مشروعات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون.
- تحديد الفرص المتوافقة مع جهود الدول العربية ومصالحها، لتشجيع الاستثمار المشترك، وبما يتناسب مع خطط وإستراتيجيات الدول في تحقيق التزاماتها الدولية نحو خفض نسب انبعاثات غازات الدفيئة.
- توسيع التعاون بين المراكز والمعاهد والمنظمات البحثية العربية، والإقليمية، والدولية، والعمل على نقل وتوطين تكنولوجيا إنتاج الكيماويات من غاز ثاني أكسيد الكربون المحتجز، وخاصة تلك التي وصلت إلى مراحل متقدمة على النطاق التجريبي.
- التوسع في تشييد المشروعات المرتبطة باحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، كإنتاج الهيدروجين الأزرق، وتنمية الصناعات القائمة عليه، ضمن الجهود الدولية للحد من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وتعزيز الإنتاجية، وزيادة الربحية.

بعض المصطلحات الواردة في الدراسة

غازات الاحتباس الحراري (GHGs)	تعرف بغازات الدفيئة التي تتكون من غاز ثاني أكسيد الكربون، وغاز أكسيد النيتروز، وغاز الميثان، وغازات ثانويه أخرى.
تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 Storage	تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون هو عمليات تهدف إلى توفير الأماكن الطبيعية كمستودعات ذات سعات تخزينية كبيرة، بصورة آمنة ومستدامة لألاف السنين.
التخزين الجيولوجي " المكمني Geological Storage	يعتمد بشكل أساسي على وجود طبقات سميكة من الصخور الرسوبية، والتي يشار إليها باسم الأحواض، أو الخزانات "Basins".
التخزين تحت الماء Under Water Storage	تعتمد على تخزين غاز ثاني أكسيد الكربون تحت سطح ماء البحار و/أو المحيطات على أعماق تزيد عن 1000 م.
التكوينات أو التشكيلات الملحية العميقة Deep Saline Formations- DSF	تتميز بصخورها المسامية والنافذة، والممتلئة بالمياه المالحة، وكذلك حقول النفط والغاز المستنفدة أو الناضبة Depleting Oil and Gas Fields-DGOF
احتجاز وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون Carbon Capture and Storage, (CCS)	تقنيات لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، وتخزينه بطرق مستدامة، تخزيناً جيولوجياً.
احتجاز الكربون واستخدامه Carbon capture and Utilization, (CCU)	تقنيات لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون، واستخدامه بطرق مباشرة لتعزيز إنتاج النفط والغاز، او بتحويلة على مواد أولية لتعزيز إنتاج الكيماويات.
تقنية احتجاز الكربون بعد الاحتراق " Post Combustion"	تستخدم هذه التقنية لاحتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون من مزيج غازات مداخن المنشآت الصناعية "المصادر الثابتة" الناتج عن عمليات احتراق الوقود الأحفوري المستخدم، سواءً كان الفحم، أو المشتقات النفطية، أو الغاز الطبيعي.
تقنية احتجاز الكربون قبل الاحتراق "Pre-Combustion"	تعتمد تقنية احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق على تحويل الوقود "الصلب أو السائل أو الغازي" إلى غاز اصطناعي Syngas.
تقنية الاحتراق بالأكسجين "Oxyfuel Combustion"	يختلف عمل هذه التقنية عن تقنية احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد الإحتراق، في استخدام الأكسجين في عمليات الحرق بدلاً من الهواء الجوي
تقنية الاحتجاز بالعمليات الصناعية " Industrial processes"	تقنيات فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بالعمليات الصناعية. تستخدم هذه التقنية في مشروعات استخلاص غاز ثاني أكسيد الكربون من الغاز الطبيعي، وإنتاج الغاز الاصطناعي لإنتاج الامونيا، والكحوليات، والوقود الاصطناعي

المراجع

1. Maryam Takht Ravanchi, Saeed Sahebdelfar,2014, Appl Petrochem Res (2014) 4:63–77., “Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges”.
2. Overview: Weather, Global Warming and Climate Chang, “https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/.
3. United nations, https://news.un.org/ar/story/2018/01/376132.
4. The World Meteorological Organization (WMO), https://public.wmo.int/en/media/press-release/carbon-dioxide-levels-continue-record-levels-despite-covid-19-lockdown.
5. “Global worming”, https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/ar/tssts-3-1-2.html.
6. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (Aggi), https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html.
7. Global Atmosphere watch. Library.wmo.int, Non. 2018.
8. The World Meteorological Organization (WMO), https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-track-be-one-of-three-warmest-years-record.
9. المنظمة العالمية للأرصاد الجوية "نشرة غازات الاحتباس الحراري" تشرين الثاني/ نوفمبر 2018.
10. الأمم المتحدة: "عام 2020 كان الأشد حرارة في العالم عبر التاريخ مكررا مستوى عام 2016".
11. ‘Termites recycle their methane — scientists want us to copy them” https://ara.jubdev.com/termites-recycle-their-methane-scientists-want-us-copy-them-916194
12. CDP, https://www.unenvironment.org/ar/emissions-gap-report-2020.
13. 2021 City-wide Emissions, https://www.swissinfo.ch/ara.
14. Climate Change Loss and Damage: 3rd deliberative dialogue report, 2021. https://www.un.org/ar/climatechange/paris-agreement.
15. Improving Climate Information, IN COLLABORATION WITH THE CMCC, Lecce, April, 28-30, 2014, http://www.climasouth.eu/ar/node/48.
16. https://www.diplomatie.gouv.fr/ar/politique-etrangere-de-la-france/climat/paris-climat-2015-cop21/cop21-l-accord-de-paris-en-4-points-cles/
17. United Nations Framework Convention on Climate Change, United nation,1992.https://unfccc.int/sites/default/files/convarabic.pdf.
18. The World Meteorological Organization (WMO), https://public.wmo.int/ar.
19. Overview of greenhouse gases, EPA, united states environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases.
20. UN Perspective series, United Nations Association of Greater Boston, https://www.un.org/ar/sections/issues-depth/climate-change.
21. F- gas Portal & HFC Licensing System: Quota allocation, authorization and reporting, Europa commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas_en.
22. Climate Change Primer, Worm Heart, World Wide
23. https://www.globalchange.gov/browse/indicators/annual-greenhouse-gas-index.

24. About Montreal Protocol, United nation Environment Program,

https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol.

25. Climate Change and Energy Efficiency, UNFCC.
https://www.gov.il/BlobFolder/guide/unfccc/ar/climate_change_and_energy_efficiency_unfccc_agreement_ar.pdf.

26. UNFCCC milestones
http://www.climasouth.eu/ar/node/41

27. Greenhouse Emission by Sector, our World in data.
https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector.

28. John Gale, John Bradshaw, Zhenlin Chen, etal, IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage,2018, "Sources of CO2".

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter2-1.pdf

29. CO_2 and other Greenhouse gas Emissions, our World in data.
https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions

30. Greenhouse Gas Emission by Country and Sectors.
https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector.

31. China's Global Disruption: myths and reality,2019.
https://www.usatoday.com/story/money/2019/07/14/china-us-countries-that-produce-the-most-co-2-emissions/39548763/.

32. Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges, Appl Petrochem Res (2014) 4:63–77.

33. Putting CO2 to Use, Creating value from emissions, IEA Publications, September 2019.

34. Report on Carbon Capture Utilization and Storage Challenges and Opportunities for the Arab Region, UN, 2017.

35. مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية" كابسارك "، سياسات وآليات احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بعد اتفاقية باريس.

36. Global CCs institute Facilities data,
https://co2re.co/FacilityData.

37. أبو ظبي تشغل " الريادة" أول منشأة لالتقاط الكربون إقليمياً

https://arabic.arabianbusiness.com/business/energy/2016/nov/6/425462.

38. Global data report: carbon Capture and Storage Integral to Meeting Climate Objectives.
https://www.refiningandpetrochemicalsme.com/products-services/30188-globaldata-report-carbon-capture-and-storage-integral-to-meeting-climate-objectives.

39. Carbon capture Utilization and Storage, Aramco.

https://www.aramco.com/ar/making-a-difference/planet/carbon-capture-utilization-and-storage.

40. Report on Carbon Capture Utilization and Storage Challenges and Opportunities for the Arab Region,2017, https://www.unescwa.org.

41. الأمم المتحدة: اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا، 2009، تغير المناخ وتقنيات اقتناص واحتجاز الكربون وتخزينه.

42. https://www.kpc.com.kw/ar.

43. Berenice Garcia Tellez, Tarek Atallah, Murad Barghouty, Hengwei Liu, King Abdullah Petroleum Studies and Research Center, Riyadh, Saudi Arabia, 2012, "The role of CO2 capture and storage in Saudi Arabia's energy future".

44. Our world in Data, CO2 Country Profile. https://ourworldindata.org/co2/country.

45. مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية" كابسارك "، انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المملكة العربية السعودية لعام 2018م، بوتيرة أسرع من المتوقع.

46. Global CCS Institute,2016 "The Global Storage Portfolio report".

47. Robin mills, Li Chen Sim, International Political Economy series, 2020, "Low Carbon Energy in the Middle East and north Africa", https://pdf.sciencedirectassets.com.

48. Energy factor Ueorop, ExxonMobil, "Sleipner, Pioneering Carbon Storage Under Sea. https://energyfactor.exxonmobil.eu/science-technology/carbon-storage-sleipner.

49. وزارة البيئة المصرية، 2018، " التقرير المحدث، كل سنتين " الأول لجمهورية مصر العربية"، المقدم إلى اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية لتغير المناخ.

50. Carbon Capture and Sequestration Technologies, Sleipner fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project. https://sequestration.mit.edu/tools/projects/sleipner.html

51. "*Sustainable future and technology development", Journal of Applied Sciences and Technology,* https://www.sciencedirect.com/science/article.

52. وسام الشالجي، 2008، "اصطياد غاز ثاني أوكسيد الكربون وأثره على تغيرات المناخ".

53. Weyburn -Midale CO2 project, http://www.zeroco2.no/projects/weyburn-midale-co2-project.

54. The IEA Weyburn CO_2 Monitoring and Storage Project, Final report of the European research team2005. https://ptrc.ca/projects/past-projects/weyburn-midale, Final report of the European research team,2005.

55. Cameron Hepburn, Ella Adlen, John Beddington, Nature Journal2019, "The technological and economic prospects for CO 2 utilization and removal".

56. The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2016, "20 Years of Carbon Capture and Storage Accelerating Future Deployment".

57. Reza Shirmohammadi , etal, 2020, MDPI Journal, "CO_2 Utilization via Integration of an Industrial Post-Combustion Capture Process with a Urea Plant: Process Modelling and Sensitivity Analysis.

58. دور البحث العلمي في تطوير صناعة البتروكيماويات، منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، 2021.

59. Global CCS Institute, 2020, "CCS Vital to Achieve Net Zero". http://www.global-carbon-capture-and-storage-status-report-2020%20(1).pdf.

60. Lilli Manolis Sherman, Plastic Technology, biopolymers 2021, Novomer Achieves Breakthrough in Development of Low-Cost Compostable Polymers.

61. Carbon dioxide-based polymers: Turning carbon emissions into plastic, https://www.prescouter.com.

62. Maryam Takht Ravanchi, Saeed Sahebdelfar, Appl Petrochem Res (2014) 4:63–77," Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenges".

63. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change,2005.

64. Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a revie, Environmental Chemistry Letters (2021) 19:797–849, Published online: 22 November 2020.

65. Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use_. https://www.imf.org/external/arabic/pubs/ft/fandd/2019/06/pdf/basics.pdf

66. Carbon capture from stationary power generation sources: A review of the current status of the technologies, Korean J. Chem. Eng., 30(8), 1497-1526 (2013).

67. Report on Carbon Capture Utilization and Storage Challenges and Opportunities for the Arab Region,2017.

68. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Transporting-CO2-1.pdf.

69. https://fathom.world/new-designs-for-co2-carrier-tank-and-cargo-handling-to-help-with-ccs/.

70. An Assessment of Carbon Capture Technology and Research Opportunities, GCEP Energy Assessment Analysis Spring, 2005.

71. Carbon Capture and Storage Physical, Chemical, and Biological Methods, Published by the American Society of Civil Engineers,2015.

72. Carbon dioxide separation from gases. A technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emission. https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/828131/.

73. الوضع العالمي لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون 2020. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/02/SR-2020

74. Membrane Separation Technology in Carbon Capture, By Guozhao Ji and Ming Zhao, Submitted: April 26th 2016Reviewed: September 12th 2016Published: March 2017.

75. https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs.

76. Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review, Applied Energy, Volume 161, 1 January 2016, Pages 225-255.

77. News & Technology for the Global Energy Industry, World's largest post-commission carbon capture project completed.

https://www.powermag.com/worlds-largest-post-combustion-carbon-capture-project-completed/.

80. Methanol-Gasoline Blends, Alternative Fuel for Today's Automobiles and Cleaner Burning Octane for Today's Oil Refinery.
https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Methanol-Safe-Handling-Manual-Arabic.pdf.
81. Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base. https://www.researchgate.net/figure/a-World-methanol-production-capacity-of-110-million-metric-tons-by-region-in-in-2018_fig1_329936018.
82. https://haydarhaydar.blogspot.com/2016/12/blog-post_24.html.
83. Carbon dioxide – A potential raw material for the production of fuel, fuel additives and bio-derived chemicals, Indian Journal of Chemistry Vol. 51A, Sept-Oct 2012, pp. 1252-1262.
84. Conversion of Carbon Dioxide into Hydrocarbons, Vol. 2 Technology,2020.
85. New and Future Developments in Catalysis, Activation of Carbon Dioxide, Elsevier,2013.
86. https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/projects/success-stories/all/converting-co2-methanol-steel-production-power-marine-transport.
87. https://www.kapsom.com/avada_portfolio/methanol-plant/?gclid=CjwKCAjw95yJBhAgEiwAmRrutHQYOkxRO_WYtJNeidFVUr6B5j0uJvynSYSo2ezoV-q4bzyuN-6R6xoCRrQQAvD_BwE.
88. https://www.chemengonline.com/major-green-methanol-complex-to-be-built-in-belgium/.
89. Report on Carbon Capture Utilization and Storage, Challenges and Opportunities for the Arab Region, Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA)2017.
90. https://www.adnoc.ae/ar/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-to-build-world-scale-blue-ammonia-project.
91. انبعاثات الكربون في مصر، ومساهمة كل قطاع، https://enterprise.press/ar/hardhats/.
92. اقتصاديات الطاقة المتجددة في المانيا، ومصر والعراق، هيثم عبد الله سلمان، المركز لعربي للأبحاث ودراسة السياسات، 2016.
93. Carbon Pricing Leadership Report 2019/20, www. carbon pricing leadership.org.

Carbon Dioxide Capture, and Utilization in the Petrochemical Industry: Potential and Challenges

Abstract

Utilization of CO_2 has quite a different character than storage options. The latter technologies target reducing CO_2's atmospheric loading by trapping it into remote environments or by fixing it in long-living (hundred years). The previous concept of carbon dioxide capture and storage (CCS) was modified to the concept of carbon capture and use (CCU), with which a number of leading international companies began to take advantage of such business opportunities.

The uses of carbon dioxide gas were divided into two main categories. The first includes its direct use without diversion, especially in enhanced oil recovery operations, which made the production process more commercially feasible. While the other use includes the conversion of carbon dioxide gas by adding a carboxyl group or the so-called "Carboxylation" process to produce carboxylic acids, or through reduction processes to produce chemicals such as urea, or polycarbonate polyols, used in the production of polyurethane, in addition to the production of methanol, and fuels.

This study aims to highlight the main technologies of producing chemicals such as urea, methanol and others products, from captured carbon dioxide. Also, the study will cover the attempts made globally and in Arab counties, especially OAPEC members.

The study concluded that the Arab countries possess many factors that enable them to enhance the production of the petrochemicals by using captured CO2, in addition to the ability to develop blue hydrogen production projects, that are directly linked to carbon capture technologies, which represents good opportunity for the oil and gas sectors.

Furthermore, it is necessary for Arab countries to invest in building necessary infrastructure, and transportation networks in addition to issuing the regulations and legislations that support and encourage developing carbon capture, storage and usage projects.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

أوابـك