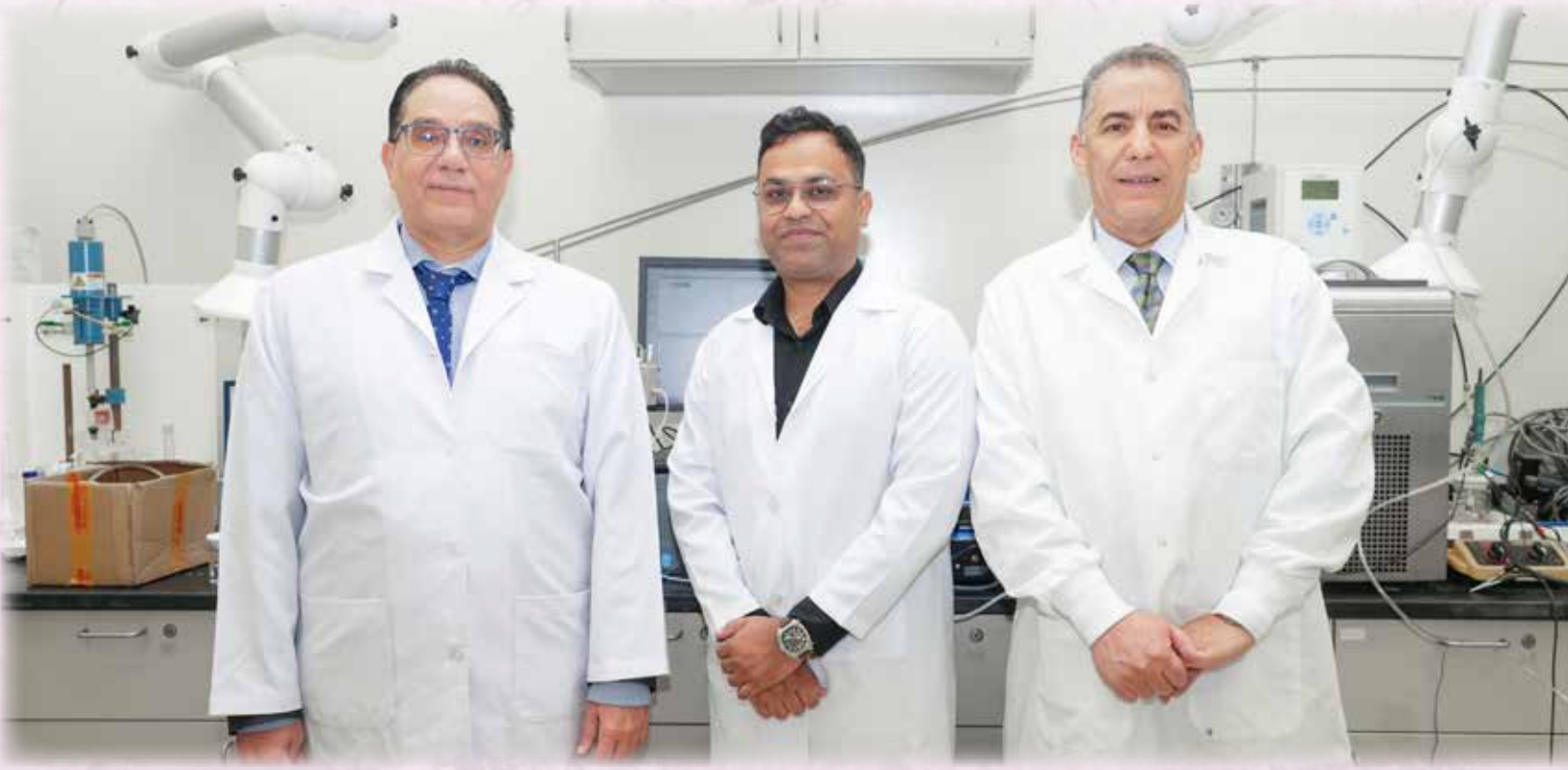
# تحويل الكربون إلى فرصة

# ابتكارات رائدة في احتجاز ثاني أكسيد الكربون والتحويل الكهروكيميائي



**د. عبد الحكيم أنور،**
باحث ما بعد الدكتوراه، مركز معالجة الغاز، كلية الهندسة - جامعة قطر
**أ.د. عبد الباقي بن عمر،**
أستاذ باحث، قسم الهندسة الكيميائية ومركز أبحاث الغاز، كلية الهندسة - جامعة قطر
**أ.د. مازن خالد،**
رئيس قسم الكيمياء وعلوم الأرض بالإنابة، كلية الآداب والعلوم - جامعة قطر

**يُعد تغيُّر المناخ أحد أبرز التحديات التي تواجه العالم في عصرنا الحالي. ويُعتبر ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$)، وهو الغاز الدفيء الرئيس الناتج عن احتراق الوقود الأحفوري، مسؤولاً عن نحو ما يقارب ثلاثة أرباع الانبعاثات العالمية للغازات الدفيئة. وبينما كان يُنظر إليه تقليديًا باعتباره ملوثًا وناتجًا غير مرغوب فيه للأنشطة الصناعية، يتجه العلماء اليوم بصورة متزايدة إلى استكشاف سُبل تحويل ثاني أكسيد الكربون من ملوث بيئي إلى مورد ذي قيمة اقتصادية.**

ويقود الأستاذ الدكتور عبد الباقي بن عمر، من مركز أبحاث الغاز، وفريقه البحثي، بالتعاون مع الأستاذ الدكتور مازن خالد، من كلية الآداب والعلوم، مشروعًا بحثيًا مبتكرًا يهدف إلى تطوير نظام كهروكيميائي متكامل جديد للاستفادة من ثاني أكسيد الكربون. ويتميز هذا النظام بقدرته على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتحويله إلى منتجات ذات قيمة مضافة، مثل الغاز الصناعي (Syngas)، وهو مزيج من الهيدروجين ($H_2$) وأول أكسيد الكربون (CO) والذي يُستخدم على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية وقطاع الطاقة. ويمثل هذا المشروع البحثي خطوة مهمة نحو بناء اقتصاد دائري للكربون، تُعاد فيه الاستفادة من الانبعاثات الصناعية بدلاً من إطلاقها في الغلاف الجوي.

## من غاز مهدور إلى مورد قيِّم

تنبعث كميات هائلة من ثاني أكسيد الكربون من محطات توليد الطاقة، ومرافق معالجة الغاز الطبيعي، وغيرها من المنشآت الصناعية، إذ تُقدَّر الانبعاثات العالمية بنحو 44 مليار طن سنويًا، من بينها نحو 56 مليون طن تُطلق سنويًا في دولة قطر.

وتعتمد تقنيات احتجاز الكربون التقليدية على امتصاص ثاني أكسيد الكربون باستخدام مذيبات كيميائية (مواد أمينية ماصّة)، ثم تحريره لاحقًا عبر عملية إعادة تدوير المذيبات، وهي عملية تتطلب استهلاكًا مرتفعًا للطاقة.

أما النهج المبتكر الذي طوَّره الباحثون في جامعة قطر، فيجمع بين عمليتين – كانتا تُنفذان تقليديًا بصورة منفصلة – هما احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتحويله ضمن نظام كهروكيميائي واحد، كما هو موضح في الشكل (1). فبدلاً من إطلاق ثاني أكسيد الكربون المحتجز من خلال التسخين، يقوم النظام بتحويله مباشرة إلى منتجات كيميائية مفيدة داخل الوسط المذيب نفسه.

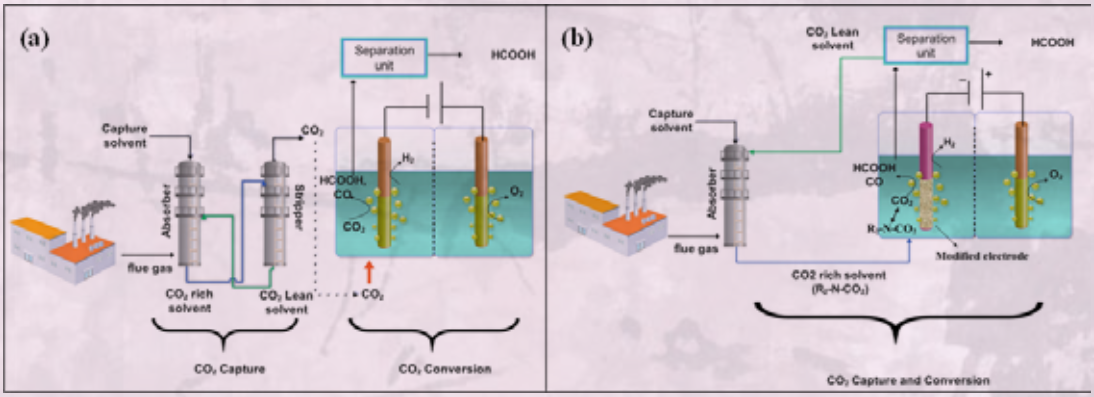
### ويقدم هذا التكامل عدة مزايا، منها:

- خفض استهلاك الطاقة من خلال الاستغناء عن مرحلة إزالة الامتصاص (Desorption).
- تقليل التكاليف التشغيلية لأنظمة احتجاز الكربون.
- الإنتاج المباشر لمواد كيميائية ذات قيمة من الكربون المحتجز.

ومن شأن هذه التطورات أن تعزز الجدوى الاقتصادية لتقنيات احتجاز الكربون على المستوى العالمي.

## كيف يعمل النظام المتكامل؟

يقترح المشروع البحثي نظامًا يبدأ بامتصاص ثاني أكسيد الكربون في مذيب كيميائي، غالبًا ما يكون محلولاً أمينيًا مستخدمًا على نطاق واسع في عمليات معالجة الغازات الصناعية. وبعد الامتصاص، يُنقل ثاني أكسيد الكربون إلى مفاعل كهروكيميائي، حيث تقوم محفزات مصممة خصيصًا بتحفيز تحويله إلى منتجات ذات قيمة.




**الشكل (1):** تمثيل تخطيطي لنهجين مختلفين لتقنيات احتجاز الكربون والاستفادة منه (CCU): (أ) نهج تقليدي تُنفذ فيه عمليتا الاحتجاز والتحويل بشكلٍ منفصل، و(ب) النهج المتكامل المقترح الذي يدمج العمليتين في نظام واحد. وفي النظام المتكامل، يشير الرمز ($R_2$–N–$CO_2$) إلى ثاني أكسيد الكربون المحتجز داخل محلول أميني في صورة أنواع كيميائية مثل البيكربونات أو الكربامات.

**وتتكون العملية من ثلاث مراحل رئيسة:**

**1. امتصاص ثاني أكسيد الكربون**

يذوب ثاني أكسيد الكربون القادم من المصادر الصناعية في مذيب قائم على الأمينات، مكوِّنًا أنواعًا كيميائية وسيطة مثل الكربامات والبيكربونات.

**2. التحويل الكهروكيميائي**

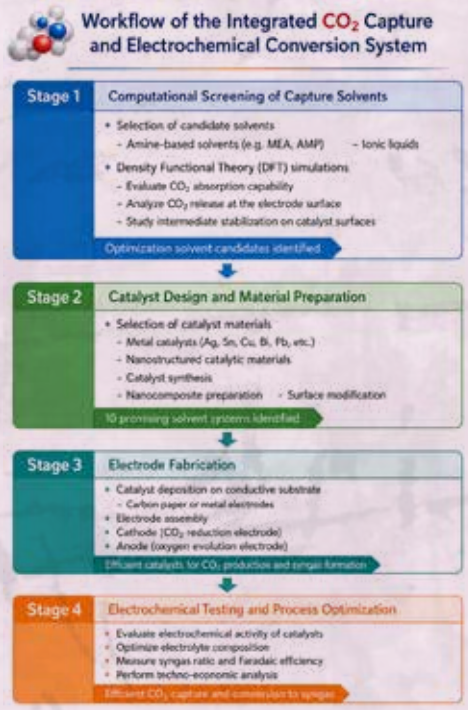
داخل المفاعل الكهروكيميائي، تعمل المحفزات على تسهيل التفاعلات التي تحول ثاني أكسيد الكربون إلى أول أكسيد الكربون (CO) والهيدروجين ($H_2$).

**3. تكوين الغاز الصناعي (Syngas)**

يشكل مزيج أول أكسيد الكربون والهيدروجين الغاز الصناعي **(Syngas)**، وهو مادة أولية أساسية تُستخدم في إنتاج الوقود والمواد الكيميائية والهيدروكربونات الاصطناعية.

ويتيح هذا النهج إجراء عمليتي احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتحويله بصورة مستمرة داخل النظام نفسه.

## المنهجية البحثية للنظام المتكامل




**الشكل (2):** المخطط التخطيطي لاستراتيجية البحث الشاملة.

يوضح الشكل (2) استراتيجية البحث المعتمدة، والتي تبدأ بالفحص الحاسوبي للمذيبات باستخدام نظرية الكثافة الوظيفية (DFT)، يليها تصميم المحفزات، وتصنيع الأقطاب الكهربائية، وإجراء الاختبارات الكهروكيميائية بهدف تحسين كفاءة تحويل ثاني أكسيد الكربون وتعزيز إنتاج الغاز الصناعي.

## تصميم محفزات المستقبل

يكمن جوهر هذه التقنية في المحفزات الكهروكيميائية المتقدمة التي طوَّرها الفريق البحثي، وهي مواد قادرة على تسريع التفاعلات الكيميائية مع الحفاظ على انتقائيتها تجاه المنتجات المطلوبة.

**ويركز البحث على تطوير عدة أنواع مبتكرة من المواد المحفزة، من بينها:**

- محفزات النيكل أحادية الذرة المدعومة بأكسيد الغرافين.
- محفزات أكاسيد المعادن القائمة على النحاس ذات البُنية المسامية المتوسطة.
- محفزات هجينة مصممة لتعزيز النشاط والانتقائية.

**وقد صُممت هذه المواد لتحقيق ما يلي:**

- نشاط تحفيزي مرتفع.
- كفاءة فارادية (Faradaic efficiency) عالية لإنتاج الغاز الصناعي.
- استقرار تشغيلي طويل الأمد.

وتشمل عمليات التقييم التجريبي استخدام تقنيات متقدمة، مثل حيود الأشعة السينية (XRD)، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، والتحليل الطيفي الإلكتروني بالأشعة السينية (XPS)، إضافة إلى الاختبارات الكهروكيميائية، لضمان احتفاظ المحفزات بأدائها في ظروف التشغيل الفعلية.

## الدمج بين التجارب والمحاكاة المتقدمة

تتمثل إحدى أبرز نقاط القوة في هذا المشروع في الجمع بين النمذجة الحاسوبية والبحث التجريبي. فقبل اختبار المذيبات والمحفزات في المختبر، يُجري الباحثون محاكاة كمية باستخدام نظرية الكثافة الوظيفية (DFT) لفحص المواد والإلكتروليتات المرشحة.

**وتساعد هذه المحاكاة في تحديد:**

- أكثر المذيبات الواعدة لاحتجاز ثاني أكسيد الكربون.
- أفضل التفاعلات بين المحفزات والمذيبات.
- مسارات التفاعل والحواجز الطاقية المرتبطة بها.

ويُسهم هذا النهج المتكامل في تسريع وتيرة الاكتشاف وتقليص الزمن اللازم لتطوير أنظمة أكثر كفاءة.

## التجارب المخبرية والنتائج

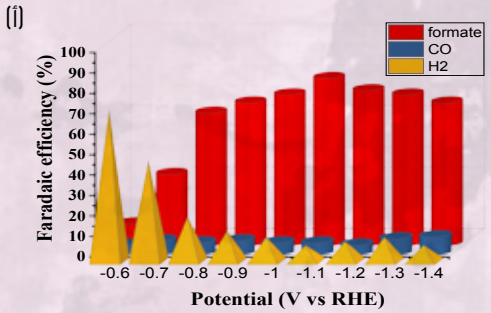
أظهرت الدراسات المخبرية الحديثة تقدمًا واعدًا في التحويل الكهروكيميائي لثاني أكسيد الكربون إلى مواد كيميائية ذات قيمة. فقد أظهر قطب ثنائي المعدن ذي البُنية المتشعبة، جرى تصنيعه عبر الترسيب الكهربائي المتحكَّم به، أداءً متميزًا في تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى الفورمات، محققًا كفاءة فارادية بلغت 86.5% وكثافة تيار جزئية قدرها 27.3– ملي أمبير لكل سنتيمتر مربع عند جهد قدره 1.1– فولت مقارنة بقطب الهيدروجين العكسي (RHE).

ويُعزى هذا الأداء اللافت إلى بنيته النانوية المتشعبة الفريدة والواجهة المحسَّنة بين الرصاص والقصدير (PbSn)، والتي تعزز انتقال الإلكترونات وتثبت النواتج الوسيطة الرئيسة للتفاعل، مع الحد من تفاعل تطوُّر الهيدروجين المنافس، كما هو موضح في الشكل (3أ).

وفي دراسات موازية، أظهرت محفزات تيتانات السترونشيوم المطعَّمة بالنيكل (Ni-doped $SrTiO_3$) نشاطًا واعدًا في إنتاج أول أكسيد الكربون ضمن محاليل أحادي إيثانول أمين (MEA) المشبعة بثاني أكسيد الكربون، محققة كثافة تيار تقارب 46– ملي أمبير لكل سنتيمتر مربع عند جهد 1.0– فولت، مع كفاءة فارادية مرتفعة ومقاومة منخفضة لانتقال الشحنة.

وتؤكد هذه النتائج الدور المحوري لتطوير المحفزات وتحسين الإلكتروليتات في تعزيز أداء الاختزال الكهروكيميائي لثاني أكسيد الكربون، كما هو موضح في الشكل (3ب).

واستنادًا إلى هذه النتائج، تواصل الأبحاث الحالية العمل على تحسين بُنية المحفزات وظروف التفاعل للوصول إلى مستويات أعلى من الكفاءة والانتقائية تجاه منتجات ذات قيمة، مثل الفورمات والغاز الصناعي، اللذين يمثلان مواد أولية مهمة لإنتاج الوقود المستدام والمواد الكيميائية الصناعية.




## نحو الجيل القادم من تقنيات الكربون

إلى جانب التجارب المخبرية، يعمل الفريق البحثي أيضًا على تقييم الجدوى الاقتصادية للنظام المقترح.

ومن خلال نمذجة العمليات والتحليل التقني – الاقتصادي، يسعى الباحثون إلى تحديد:

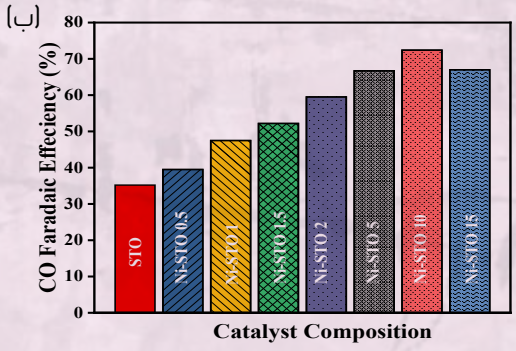
- التكاليف الرأسمالية والتشغيلية.
- كفاءة استخدام الطاقة.
- قابلية التوسع للتطبيق الصناعي.

ومن المتوقع أن تُسهم هذه الدراسات في رفع جاهزية التقنية إلى المستوى الخامس من مستويات الجاهزية التقنية (TRL5) بما يقربها من مرحلة التطبيق العملي.

## نظرة إلى المستقبل

يمثل العمل الذي يقوده الأستاذ الدكتور عبد الباقي بن عمر خطوة واعدة نحو تحويل ثاني أكسيد الكربون من تحدٍ بيئي إلى مورد ذي قيمة. ومن خلال دمج تقنيات الاحتجاز والتحويل ضمن عملية واحدة، قد يفتح هذا المشروع آفاقًا جديدة للإنتاج الكيميائي المستدام وإدارة الكربون بكفاءة أكبر.

ومع تصاعد الجهود العالمية للحد من الانبعاثات، تؤكد مثل هذه الابتكارات كيف يمكن للعلوم والهندسة المتقدمة أن تحوِّل التحديات البيئية إلى فرص حقيقية للابتكار والنمو الاقتصادي.




**الشكل (3):** الكفاءة الفارادية في إلكتروليت مشبع بثاني أكسيد الكربون: (أ) محفزات ثنائية المعدن من الرصاص/القصدير (Pb/Sn)، و(ب) محفزات تيتانات السترونشيوم المطعَّمة بالنيكل (Ni-doped $SrTiO_3$) عند نسب وزنية مختلفة.