منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون:
التحديات والفرص

SUSTAINABLE AND LOW CARBON AVIATION FUEL:
CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

دولة الكويت - 2024
إدارة الشؤون الفنية

OAPEC Oapec Oapec
@OAPEC1 OAPEC1 OAPEC ORG

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2024.

****

****

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

إدارة الشؤون الفنية

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف 24959000 (965) فاكسميلي 24959755 (965)

P.O. Box 20501 SAFAT, KUWAIT 13066

WEBSITE: WWW.OAPECORG.ORG

E-MAIL: oapec@oapecorg.org

****

****

مقدمة

يسعى قطاع الطيران إلى تشجيع استخدام وقود الطيران البديل بقيادة المنظمة الطيران المدني الدولي ICAO، عبر مبادرتها التي أطلقت عليها اسم خطة تعويض وخفض الكربون للطيران الدولي CORSIA*. التي تهدف إلى الحد من الانبعاثات الكربونية الناتجة عن استخدام وقود الطيران النفطي. من بين أنواع الوقود البديل المطروح في هذه المبادرة وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF†، وهو وقود من مصدر أحفوري نسبة الانبعاثات الناتجة عنه خلال كافة مراحل دورة حياته أقل بمعدل 10% على الأقل، مقارنة بالوقود النفطي التقليدي.

تهدف هذه الدراسة إلى التعريف بتقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون وتكاليف إنتاجه مقارنة بوقود الطيران النفطي، وذلك من خلال تقنيات خفض كثافة الكربون التي يمكن تطبيقها في كافة مراحل دورة حياة المنتج انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في حقول الإنتاج، مروراً بعمليات التكرير، وعمليات النقل، إلى مراكز التوزيع، وحتى الاستهلاك.

كما تتناول الدراسة الفرق بين وقود الطيران المنخفض الكربون المنتج من النفط ووقود الطيران المستدام SAF‡ المنتج من مصادر متجددة، مع الإشارة إلى الصعوبات التي تواجه إنتاج هذه الأنواع وانتشارها في الأسواق العالمية، وأهم الحلول الممكنة لتذليل هذه الصعوبات.

جاءت الدراسة في خمسة فصول رئيسية، يتناول الفصل الأول التعريف بأنواع وقود الطيران المنخفض الكربون والمستدام، وأهمية عملية خفض الانبعاثات في قطاع الطيران. ويناقش الفصل الثاني التكنولوجيا المتاحة ومسارات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون. أما الفصل الثالث فيستعرض أهم التحديات التي تواجه إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، وفرص تعزيز انتشاره وتشجيع إنتاجه واستهلاكه العالم. ويقدم الفصل الرابع لمحة عامة عن تطورات وقود الطيران المستدام في مناطق العالم وفي الدول العربية. ويلخص الفصل الخامس الاستنتاجات والتوصيات التي خلصت إليها الدراسة، من أهمها:

* Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
† Lower Carbon Aviation Fuels.
‡ Sustainable Aviation Fuels

- إن العائق الرئيسي أمام إنتاج وقود الطيران المستدام هو التكلفة، حيث يتراوح السعر من نحو ضعفين إلى ثمانية أضعاف سعر وقود الطيران التقليدي.
- إن الاستثمار في وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون يدعم تحول الصناعة نحو الاستدامة ويدفع التقدم في التقنيات الخضراء الأخرى.
- إن تحفيز إنتاج وقود الطيران المستدام يتطلب حوافز سياسية كبيرة لسد الفجوة السعرية بين وقود الطيران التقليدي والوقود الحيوي.
- لتقليل مخاطر الاستثمار في مشاريع الوقود المستدام، لابد من تعزيز التعاون بين القطاعين العام والخاص، وقطاع الطيران، ومنتجي الوقود، والجامعات، ومراكز البحث العلمي.
- أثبتت المعالجة المشتركة أنها مسار فعال لتعزيز إنتاج وقود الطيران منخفض الكربون.
- للوصول إلى هدف الانبعاثات الصفرية الصافية، يجب الاستفادة من جميع المسارات المتاحة لإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.
- يعد تمويل ودعم مؤسسات البحث والتطوير أمراً بالغ الأهمية لإيجاد تقنيات تحسين إنتاج وقود الطيران منخفض الكربون بأسعار مقبولة.
- نظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون فإن خيار استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF).
- على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن العديد من هذه الدول تقود الطريق لتنويع مزيج الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون ولديها فرصاً ثمينة لأن تكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا، وغيرها من النباتات التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة.

تأمل الأمانة العامة أن يجد المختصون في هذه الدراسة بعض الأفكار التي تساعدهم على اختيار الحلول المناسبة لتلبية التوجهات العالمية نحو إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.

والله ولي التوفيق

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

قائمة المحتويات

1 .....
مقدمة 3
قائمة المحتويات 5
قائمة الأشكال 7
قائمة الجداول 7
المصطلحات والمختصرات 8
ملخص تنفيذي 9
الفصل الأول: وقود الطيران ودوره في خطة تحول الطاقة 15
1-1: تصنيف أنواع وقود الطيران 16
1-1-1: وقود الطيران التقليدي (النفطي) 19
2-1-1: وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون LCAF 19
3-1-1: وقود الطيران المستدام SAF 20
2-1: فوائد وقود الطيران المستدام 21
1-2-1: تخفيض انبعاثات الغازات الدفيئة 21
2-2-1: تحسين جودة الهواء الجوي 21
3-2-1: تعزيز أمن الطاقة 21
4-2-1: دعم الاقتصاد الوطني 22
5-2-1: تعظيم الاستفادة من البنية التحتية القائمة 22
6-2-1: تحسين الالتزام بمتطلبات تشريعات خفض انبعاثات الكربون 22
الفصل الثاني: تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون 23
1-2: مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية HEFA 25
2-21: مسار تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبش 26
3-2: مسار تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام 27
4-2: مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي 27
5-2: مسار الإسالة المائية الحرارية HTL 28
6-2: مسار التحلل الحراري 28
7-2: مسار الوقود الكهربائي Electro-fuel 30
8-2: مسار المعالجة المشتركة 30
9-2: تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون 33
1-9-2: تقنيات خفض كثافة الكربون في مرحلة إنتاج النفط 34
2-9-2: تقنيات تخفيض كثافة الكربون في مرحلة تكرير النفط 35
الفصل الثالث: تحديات إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام 44
1-3: ارتفاع تكاليف الإنتاج 45
2-3: انخفاض كفاءة عملية الإنتاج 46
3-3: غياب التوافق حول متطلبات الاستدامة 46

3-4: اختلاف السياسات بين الدول المتجاورة وتعقيد الإجراءات 46
3-5: صعوبة تأمين المواد الأولية اللازمة لإنتاج الوقود المستدام 47
3-6: الآثار البيئية السلبية لإنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام 47
3-6-1: انبعاثات غازات الدفيئة 49
3-6-2: الاستخدام المباشر وغير المباشر للأراضي الزراعية 49
3-6-3: تسرب العناصر الغذائية 50
3-6-4: أضرار المبيدات الحشرية 50
3-6-5: التأثير على التنوع البيولوجي 50
3-6-6: استخدام المياه 51
3-7: تدابير تسهيل انتشار وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون 51
الفصل الرابع: مبادرات الحد من انبعاثات الكربون في قطاع الطيران 53
4-1: إجراءات تغيير نوع الوقود 54
4-1-1: استخدام الهيدروجين كوقود 54
4-1-2: استخدام الأمونيا كوقود 55
4-1-3: استخدام وقود الطيران الحيوي Bio-Jet 55
4-2: تطورات تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام 55
4-2-1: تطور وقود الطيران المستدام في الولايات المتحدة الأمريكية 55
4-2-2: تطور وقود الطيران المستدام في الاتحاد الأوروبي 56
3-2-5: تطورات وقود الطيران المستدام في آسيا 59
4-3: مبادرات هيئات الطيران الدولية 61
4-3-1: مبادرة منظمة الطيران المدني الدولي 61
4-3-2: مبادرة مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام 62
4-4: تطورات إنتاج وقود الطيران المستدام في الدول العربية 63
4-4-1: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الإمارات العربية المتحدة 65
2-4-5: تطورات وقود الطيران المستدام في مملكة البحرين 67
4-4-3: تطورات وقود الطيران المستدام في المملكة العربية السعودية 67
3-4-4: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة قطر 68
4-4-4: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الكويت 68
4-4-5: تطورات وقود الطيران المستدام في جمهورية مصر العربية 69
4-4-6: تطورات وقود الطيران المستدام في سلطنة عمان 69
الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات 70
Abstract 73
قائمة المراجع 75
المراجع العربية 75
المراجع الإنجليزية 75

قائمة الأشكال

الشكل (1-1): تصنيف أنواع وقود الطيران حسب منظمة الطيران المدني الدولي ICAO 17
الشكل (1-2): كثافة الكربون خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي 17
الشكل (1-3): مقارنة كثافة الكربون لأنواع وقود الطيران النفطي والمتجدد 18
الشكل (2-1): تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام 24
الشكل (2-2): مراحل عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية 25
الشكل (2-3): مسار تقنية فيشر- تروبش لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود طيران مستدام 26
الشكل (2-4): مخطط تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام 27
الشكل (2-5): مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي 28
الشكل (2-6): مسار الإسالة المائية الحرارية لإنتاج وقود الطيران المستدام 29
الشكل (2-7): مراحل مسار التحلل الحراري لإنتاج وقود الطيران المستدام 29
الشكل (2-8): مسار إنتاج وقود الطيران الكهربائي 30
الشكل (2-9): خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط 31
الشكل (2-10): العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط 32
الشكل (2-11): مخطط عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي 33
الشكل (2-12): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصفاة تكرير النفط 37
الجدول (2-13): مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب 39
الشكل (2-14): خيارات التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR 39
الشكل (2-15): التكلفة الإضافية لاختيار أنواع مختلفة من النفط الخام تبعاً لكثافة الكربون مقارنة بمتوسط سعر خامات الاتحاد الأوروبي 43
الشكل (3-1): توقعات الطلب على وقود الطيران المستدام لتحقيق صفر انبعاثات في عام 2050 ... 44
الشكل (3-2): نسبة تخفيض الانبعاثات لأهم تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام 48
الشكل (3-3): انعكاسات استخدام النفايات كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام 48
الشكل (3-4): مسارات تسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون 52
الشكل (4-1): التخفيض المتوقع لانبعاثات CO_2 في قطاع الطيران بتطبيق تقنيات التخفيض 53
الشكل (4-2): تطور الحد الأدنى لمزج وقود الطيران الحيوي والكهربائي في قرار الاتحاد الأوروبي للوقود المتجدد ReFuelEU 58
الشكل (4-3): دور مجالات تنفيذ استراتيجية خفض انبعاثات الكربون في قطاع الطيران 62

قائمة الجداول

الجدول (2-1): نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM 24
الجدول (2- 2): تكاليف تقنيات خفض كثافة الكربون في حقول إنتاج النفط 35
الجدول (2-3): خصائص ومصادر احتجاز CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR 39
الجدول (2-4): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وتكاليفها 41

المصطلحات والمختصرات

الرمز	الانجليزية	العربية
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING & MATERIALS	الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد
ATR	AUTOTHERMAL REFORMING	تهذيب ذاتي الحرارة
BBL	BARREL OF OIL	برميل نفط
BBL/D	BARRELS OF OIL PER DAY	برميل نفط في اليوم (ب/ي)
CAPEX	CAPITAL EXPENDITURE	تكاليف استثمارية
CCUS	CARBON CAPTURE, USE AND STORAGE	اصطياد وتخزين واستعمال الكربون
CHP	Combined Heat and Power Generation	توليد مشترك للكهرباء وبخار الماء
CI	Carbon Intensity	كثافة الكربون
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation	خطة تعويض وخفض الكربون للطيران الدولي
CO_2	Carbon Dioxide	ثاني أوكسيد الكربون
CO2e	carbon dioxide equivalent	مكافئ ثاني أوكسيد الكربون
CO	Mono Carbon Oxide	أول أوكسيد الكربون
DAC	Direct Air Capture	التقاط مباشر للكربون من الهواء
EASA	European Union Aviation Safety Agency	وكالة سلامة الطيران للاتحاد الأوروبي
EOR	Enhanced Oil Recovery	الاستخلاص البترولي المعزز
ETS	Emissions Trading System	منظومة تجارة الانبعاثات
FCC	Fluidized Catalytic Cracking	تكسير بالعامل الحفاز المائع
FT	Fischer-Tropsch	فيشر-تروبش
GHG	Green House Gases	غازات الدفيئة
H_2	Hydrogen	هيدروجين
HCC	Hydro catalytic Cracking	تكسير هيدروجيني حفزي
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids	الإستيرات والأحماض الدهنية المهدرجة
HFO	Heavy Fuel Oil	زيت وقود ثقيل
KPIs	Key Performance Indicators	مؤشرات الأداء الرئيسية
ICAO	International Civil Aviation Organization	منظمة الطيران المدني الدولي
ISCC	International Sustainability Carbon Certification	منظومة منح شهادات استدامة الكربون الدولية
LFO	Light Fuel Oil	زيت وقود خفيف
MDEA	Methyl De Ethanol Amine	ميثيل ثنائي إيثانول أمين
NOx	Nitrogen Oxides	أكاسيد النتروجين
LCAF	Low Carbon Aviation Fuel	وقود طيران منخفض الكربون
LPG	Liquified Petroleum Gases	غاز البترول المسال
PPM	Part Per Million	جزء في المليون (ج.ف.م)
PtL	Power to Liquid	طاقة كهربائية إلى سوائل
SAF	Sustainable Aviation Fuel	وقود طيران مستدام
SMR	Steam Methane Reforming	التهذيب البخاري للميثان
SOx	Sulfur Oxides	أكاسيد الكبريت
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene	كيروسين بارافيني مستدام
SAFUG	Sustainable Aviation Fuel User Group	مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام
TRL	Technology Reediness Level	مستوى جاهزية التكنولوجيا

ملخص تنفيذي

يعتبر قطاع الطيران أحد القطاعات الرئيسية المستهلكة للوقود الأحفوري، وتواجه عملية نزع الكربون إلى الصفر في هذا القطاع بحلول عام 2050 تحديات عديدة من أهمها أن الجزء الأكبر من أسطول الطائرات الحالية سيبقى قيد التشغيل إلى ما بعد 2040-2050 مما يجعل تعديل محركات الطائرات غير ممكن خلال هذه الفترة، وبالتالي صعوبة تغيير نوع الوقود. (Royal Society, 2023)

تصنيف أنواع وقود الطيران

تصنف منظمة الطيران المدني الدولي ICAO أنواع وقود الطيران حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA إلى مجموعتين، الأولى مجموعة وقود الطيران التقليدي CAF ذي الأساس الأحفوري، وتتضمن الوقود المنتج من تكرير النفط، مثل الكيروسين وغازولين الطائرات، والثانية مجموعة وقود الطيران البديل ويتكون من وقود الطيران المستدام SAF، ووقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، والهيدروجين، والغاز الطبيعي المسال.

ينتج وقود الطيران النفطي من عملية تكرير النفط الخام في المصفاة ويسمى كيروسين الطيران وله أنواع عديدة حسب مجال الاستخدام والنوع الأكثر استخداماً هو وقود النفاثات Jet-A1.

يختلف وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF عن وقود الطيران المستدام SAF في أن الأول يساهم في خفض انبعاثات الكربون الناتجة عن عملية تصنيع الوقود، بينما الثاني يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن الحرق والاستهلاك.

يطلق على وقود الطيران المستدام عدة تسميات تحمل نفس المعنى، مثل وقود الطيران الحيوي Biojet، ووقود الطيران المتجدد Renewable Aviation Fuel، ووقود الطائرات النفاثة المتجدد Renewable Jet Fuel، ووقود الطيران البديل Alternative Aviation Fuel. (ATAG, 2017)

فوائد وقود الطيران المستدام

يتميز الوقود المستدام بأنه يطلق غازات دفيئة بنسبة أدنى بكثير من الوقود التقليدي، كما يمكن أن تنخفض انبعاثات CO_2 بنسبة 80% على أساس دورة حياة المنتج، وتحسين جودة الهواء الجوي، وبالتالي تحسين الالتزام بمتطلبات تشريعات خفض انبعاثات الكربون، وتعزيز أمن الطاقة من خلال تأمين مصدر إضافي لوقود الطائرات من المصادر المتجددة والبديلة، وخصوصاً بالنسبة للدول التي لا تمتلك

موارد بترولية حيث يساعدها على تخفيض اعتمادها على النفط والحصول على وقود من مواد خام مستدامة كزيوت الطهي المستعملة، والنفايات الزراعية، وهذا يساهم في دعم الاقتصاد الوطني، وتعظيم الاستفادة من البنية التحتية القائمة لإنتاج وتخزين وقود الطيران التقليدي.

تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

تصنف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام ضمن ثلاث مجموعات رئيسية، الأولى تعتمد على مبدأ تقنية فيشر- تروبش التي اعتمدت في عام 2009، تليها تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية Hydroprocessed Esters and Fatty Acids التي اعتمدت في عام 2011، وهي الأكثر انتشاراً في العالم، وتقنية تحويل الكحول إلى وقود طائرات ATJ التي اعتمدت في عام 2018. كافة هذه التقنيات تساهم في خفض الانبعاثات الممكن انطلاقها عبر دورة حياة وقود الطيران بنسب عالية تصل إلى 90% مقارنة بوقود الطيران النفطي. يبين الجدول التالي نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM. (Royal Society, 2023)

نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM

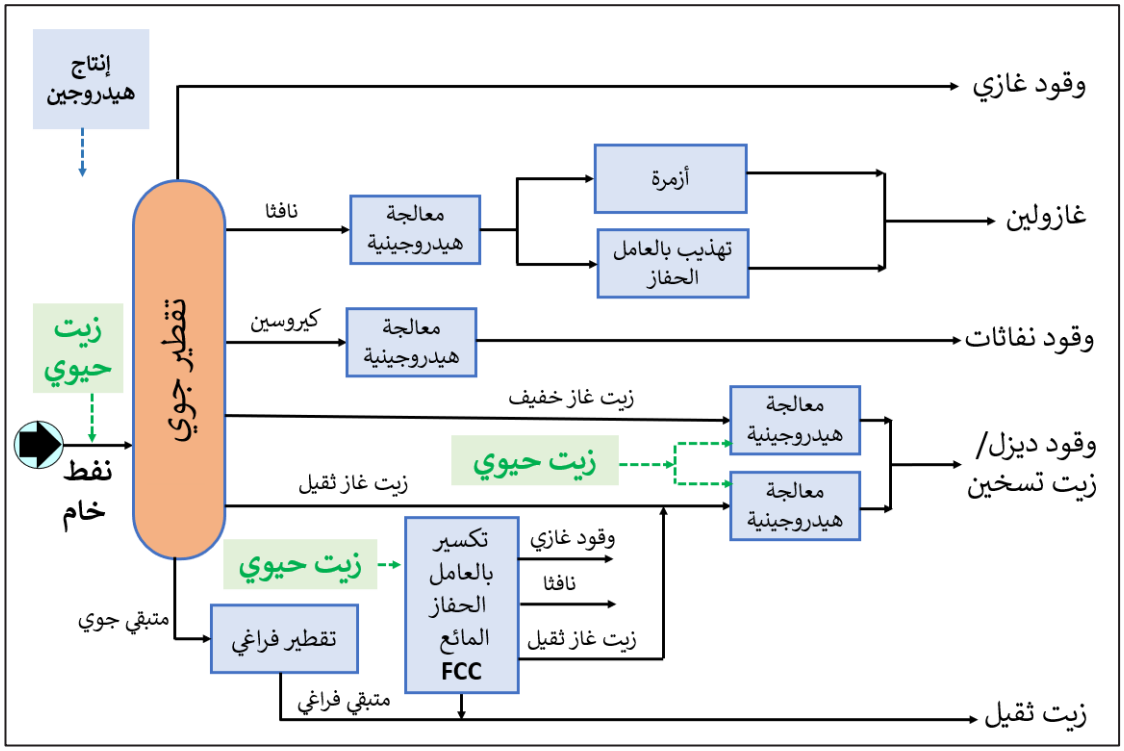
اسم العملية	خيارات اللقيم	الوصف	نسبة المزج %	مستوى نضوج التقنية
هدرجة الأحماض الدهنية واستيرات الأحماض الدهنية HEFA- KSP	أحماض دهنية وإستيرات الأحماض الدهنية، وبشكل عام الدهون المشتقة من النبات والحيوان، مثل زيت الطهي المستعمل، والشحوم الحيوانية.	معالجة هيدروجينية للأحماض والإستيرات الدهنية لإنتاج كيروسين بارافيني اصطناعي PSK	50	8
تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبشFT-SPK	الكتلة الحيوية (مخلفات الغابات- النفايات البلدية الصلبة)	تحويل الغاز الاصطناعي المنتج بطريقة FT إلى كيروسين بارافيني اصطناعي	50	6-5
إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي HFS-SIP	سكريات مستخرجة مباشرة من النباتات السكرية (الشمندر - وقصب السكر،..) أو من مصادر غير مباشرة (سكريات C5 و C6 مستخلصة من السيليلوز	معالجة هيدروجينية للسكريات الناتجة عن التخمر لتحويلها إلى إيزو- بارافينات اصطناعية.	10	8-7) السكريات العادية) 5) السكريات السليلوزية)
تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام ATJ-SPK	المخلفات الزراعية، مخلفات الغابات، نباتات الطاقة، حبوب الذرة	تحويل الكحولات (إيزو - بوتانول أو إيثانول) إلى كيروسين بارافيني.	50	6-5

المصدر: (Royal Society, 2023)

يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات

التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية، أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد خام متجددة فقط أو إنشاء مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها. وبالتالي يمكن خفض تكاليف الاستثمار لإنتاج الوقود الحيوي وكذلك تقليل المخاطر. وهناك تجارب عديدة ناجحة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

ونظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF). يبين الشكل التالي العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.



المصدر: (Wagner DA SILVA, M., 2022)

تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون

يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير،

ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع وحتى مرحلة الاستهلاك. ففي مرحلة حقول إنتاج النفط هي، (1) استخدام الطاقة المتجددة، (2) إدارة الحرق على الشعلة والحد من تسرب الغازات الهيدروكربونية الطيارة، و (3) واصطياد الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

وفي مرحلة تكرير النفط، يمكن اعتماد العديد من التقنيات، أهمها: (1) اصطياد الكربون واستعماله وتخزينه (CCUS)، (2) إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر، و (3) استخدام الحرارة والطاقة من مصادر الطاقة المتجددة في المصفاة، و (4) ترشيد استهلاك الطاقة تحسين كفاءة استخدامها، و(5) تكرير لقائم حيوية مستدامة، و(6) تكرير نفط خام منخفض الكربون.

تحديات إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تواجه عمليات إنتاج وقود الطيران المستدام صعوبات وتحديات عديدة، فعلى الرغم من الدعم الكبير الذي تقدمه الحكومات في العديد من دول العالم لم تتجاوز كمية إنتاج وقود الطيران المستدام 600 مليون ليتر أو ما يعادل 0.2% من إجمالي الطلب العالمي على وقود الطيران في عام 2023.

يمثل ارتفاع تكاليف الإنتاج العائق الأكبر لانتشار وقود الطيران المستدام، حيث تصل إلى 2.5-5 أضعاف تكلفة وقود الطيران التقليدي Jet A-1 (Barbara, L., & Galea, C., 2024)، إلا أنه من المتوقع أن تضيق الفجوة بين تكلفة النوعين بشكل تدريجي في المستقبل، وخصوصاً بعد تطبيق نظام تجارة الانبعاثات ETS. (Soone, J., 2020)

كما أن بعض التقنيات تتميز بارتفاع التكاليف الاستثمارية التي تمثل 50 إلى 70% من إجمالي تكاليف الإنتاج، مثل تقنية فيشر- تروبش، بينما تشكل تكاليف المواد الأولية ما نسبته 10- 35%. ويمكن تخفيض تكاليف الإنتاج في تقنية فيشر- تروبش من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم، إلا أن تشغيل هذه التقنية بطاقة إنتاجية عالية ينشأ عنه صعوبات تتعلق بنقل وتأمين المواد الأولية الكافية للمشروع.

من جهة أخرى يحتاج الوقود المتجدد إلى بنية تحتية باهظة التكاليف، إضافة إلى ارتفاع معدل استهلاك الطاقة، وصعوبة التخلص من النفايات الناتجة عن العملية. كما يتطلب إنتاج وقود الطيران المستدام عملية عالية الكفاءة لتحويل المواد الخام إلى وقود قابل للاستخدام، فضلاً عن أن عدم وجود إجماع عالمي حول معايير موحدة لمتطلبات الاستدامة يؤدي إلى تردد منتجي الوقود المستدام وعدم القدرة على اختيار تكنولوجيا التصنيع المناسبة، واختلاف الإطار العام لسياسة وخطط الاستدامة من

دولة لأخرى، كما تختلف فيما بينها من حيث طريقة ونسبة الحوافز التي تقدمها مما يؤدي إلى تراجع المستثمرين عن المغامرة في إنتاج وقود الطيران المستدام.

من التحديات الأخرى التي تواجه إنتاج وقود الطيران المستدام اضطراب أسعار المواد الخام اللازمة لتصنيع الوقود المستدام نتيجة المنافسة على شرائها، فضلاً عن الآثار البيئية التي تترافق مع استخدام الأراضي الزراعية التي كانت تستخدم لإنتاج الغذاء، وأضرار استخدام المبيدات الحشرية، وما يتبعها من تأثير على التنوع البيولوجي، وبالتالي ابتعاد المستثمرين عن الدخول في مشاريع غير مستقرة.

لتسهيل انتشار الوقود المستدام والمنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية، وتحفيز الطلب، وتمكين الربط بين العرض والطلب.

تتركز إجراءات خفض انبعاثات الكربون المتعلقة بتغيير نوع الوقود في أربعة مسارات، هي الهيدروجين والأمونيا والوقود الحيوي والوقود الكهربائي e-fuel.(Sustainable Aviation, 2022)

تطورات تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام في العالم والدول العربية

شهدت السنوات القليلة الماضية توجه العديد من الدول نحو تسريع إجراءات تطوير التشريعات والمعايير الخاصة بوقود الطيران المستدام بعد المطالبات التي صدرت من الهيئات المهتمة بشؤون البيئة لزيادة الاهتمام بوقود الطيران المستدام مقارنة بأنواع الوقود المتجدد الأخرى المستخدمة في وسائل النقل البري. وقد طورت صناعة الطيران عدة مبادرات خاصة بمكافحة تغير المناخ، بالتعاون والتنسيق مع منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO). يقود هذه المبادرات الاتحاد الدولي للنقل الجوي (IATA) ومجموعة عمل النقل الجوي (ATAG).

اعتمدت منظمة الطيران المدني الدولي ICAO خطة تتضمن عدة إجراءات لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر في قطاع الطيران بحلول عام 2050، أهمها تحسين تقنيات الطائرات، وتطوير عمليات التشغيل، واستخدام الوقود المستدام والمنخفض الكربون، إضافة إلى إجراءات تجارة الكربون. كما أصدر الاتحاد الأوروبي مجموعة من الإجراءات، ويعمل على إعداد العديد من التشريعات المتعلقة بنزع الكربون في قطاع الطيران. أما الولايات المتحدة فقد أعلنت عن إمكانية خفض انبعاثات الكربون بنسبة 20% بحلول عام 2030، وإلى الصفر بحلول عام 2050، من خلال نزع الكربون من الهواء الجوي في أماكن أخرى بالكميات الموازية للكميات الناتجة عن وقود الطيران. (Royal Society, 2023)

على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن لديها فرصاً ثمينة لتكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، والساليكورنيا Salicornia التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة. وقد شهدت بعض الدول العربية تطورات ملحوظة في مجال تشجيع إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام وعقدت شراكات واتفاقيات مع بعض الشركات العالمية المتخصصة. تتركز هذه التطورات في دولة الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، والمملكة العربية السعودية، ودولة قطر، ودولة الكويت، وجمهورية مصر العربية، وسلطنة عمان.

ولتعظيم طاقة إنتاج الوقود المستدام والمنخفض الكربون تحتاج الدول العربية إلى تنفيذ بعض الإجراءات، من أهمها: تعزيز التعاون بين صناعة الطاقة وقطاع الطيران، وإصدار التشريعات والسياسات الداعمة، وتحسين الأداء التشغيلي لمصافي تكرير النفط لتمكينها من تطبيق تقنية المعالجة المشتركة التي تعتمد على تكرير مواد خام متجددة إلى جانب النفط الخام بهدف تخفيض البصمة الكربونية لمنتجات المصفاة وإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، حيث أن المعالجة المشتركة تعتبر حلاً فعالاً من حيث التكلفة وقريب الأمد لتوسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام في المنطقة. كما تمتلك الدول العربية فرصة واعدة لإنتاج الوقود الكهربائي وتصديره إلى الأسواق العالمية بأسعار منافسة نظراً لما تتمتع به من قدرة على إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة بتكاليف منخفضة، حيث تتوفر فترات طويلة من السطوع الشمسي والأراضي الواسعة، ما يمكنها من إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الكهربائية المولدة من مزارع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.

تجدر الإشارة إلى أن المنظمة العربية للطيران المدني ACAO قد أعلنت في عام 2024 عن سعيها لتبني مبادرة عربية لتشجيع تطوير وإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون ومصادر الطاقة الأخرى النظيفة لأغراض الطيران. تقوم هذه المبادرة على دراسة إنشاء فريق إقليمي عربي مشترك مع منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، لإعداد دراسات الجدوى الفنية حول إمكانات الدول العربية لتطوير وإنتاج أنواع وقود الطيران المستدام. (ACAO, 2024).

الفصل الأول

وقود الطيران ودوره في خطة تحول الطاقة

تقدر نسبة الانبعاثات الناتجة عن قطاع النقل الجوي بنحو 2-3% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون في العالم ومن المتوقع أن يرتفع الطلب على وقود الطيران بمعدل 50% بحلول عام 2050 مقارنة بمستوى عام 2019. (Barbarà, L., & Galea, C., 2024)

كما تحتوي انبعاثات قطاع الطيران غازات أخرى غير CO_2 هي أكاسيد النتروجين NOx، وبخار الماء، والجسيمات الدقيقة، وأول أوكسيد الكربون CO، وهيدروكربونات غير محترقة، وأكاسيد الكبريت. ولهذه الغازات تأثير في تغير المناخ يعادل 2-3 أضعاف تأثير غاز CO_2.

تشير الإحصاءات إلى أن عدد الطائرات في العالم قد بلغ في عام 2020 حوالي 28 ألف طائرة ويتوقع أن يصل العدد إلى 38 ألف بحلول عام 2032. كما بلغ معدل استهلاك وقود الطيران نحو 6.7 مليون برميل/اليوم، وتتوقع منظمة الطيران المدني الدولي ارتفاع معدل استهلاك وقود الطيران النفطي بمعدل 2.2 إلى 3.1 ضعف بحلول عام 2045 مقارنة بسنة الأساس 2015.* (Jing, L., et al., 2022)

على الرغم من عدم إدراج قطاع الطيران بشكل مباشر في اتفاقية باريس لتغير المناخ إلا أن القطاع قد وضع خطط لخفض الانبعاثات. فقد أعلن في عام 2009 عن ثلاثة أهداف لخفض غازات الدفيئة، الأول تحسين كفاءة الوقود بمعدل سنوي قدره 1.5 %، والثاني البدء بتطبيق نظام الحياد الكربوني اعتباراً من عام 2020، أما الثالث فهو خفض مستوى الانبعاثات إلى النصف بحلول عام 2050 مقارنة بمستوى عام 2005.

في أكتوبر عام 2022 أعلنت منظمة الطيران المدني الدولي "ICAO" عن مبادرة لخفض انبعاثات قطاع الطيران إلى الصفر بحلول عام 2050، وهي انعكاس لما أعلنته رابطة النقل الجوي الدولية IATA

* الإيكاو هي إحدى الوكالات المتخصصة التابعة للأمم المتحدة أنشئت عام 1944 تهتم بسلامة وكفاءة الطيران وحماية البيئة، وتوفر فرصاً للمشورة من خلال الشبكة العالمية التي أقامتها التي تتكون من مجموعات تابعة لقطاع الطيران والمنظمات غير الحكومية التابعة للمجتمع المدني وغيرها من الجهات المعنية بالنقل الجوي المعترف بها رسمياً.

في عام 2021. ولتحقيق هذا الهدف لابد من اتخاذ إجراءات تشمل تحسين كفاءة المطارات واختصار مسافات مسار الطائرات، وتطوير تقنيات محركات الطائرات، واستخدام الوقود المستدام والمنخفض الكربون، وتطبيق الإجراءات التجارية مثل تسعير وتجارة الكربون. (ICAO, 2023)

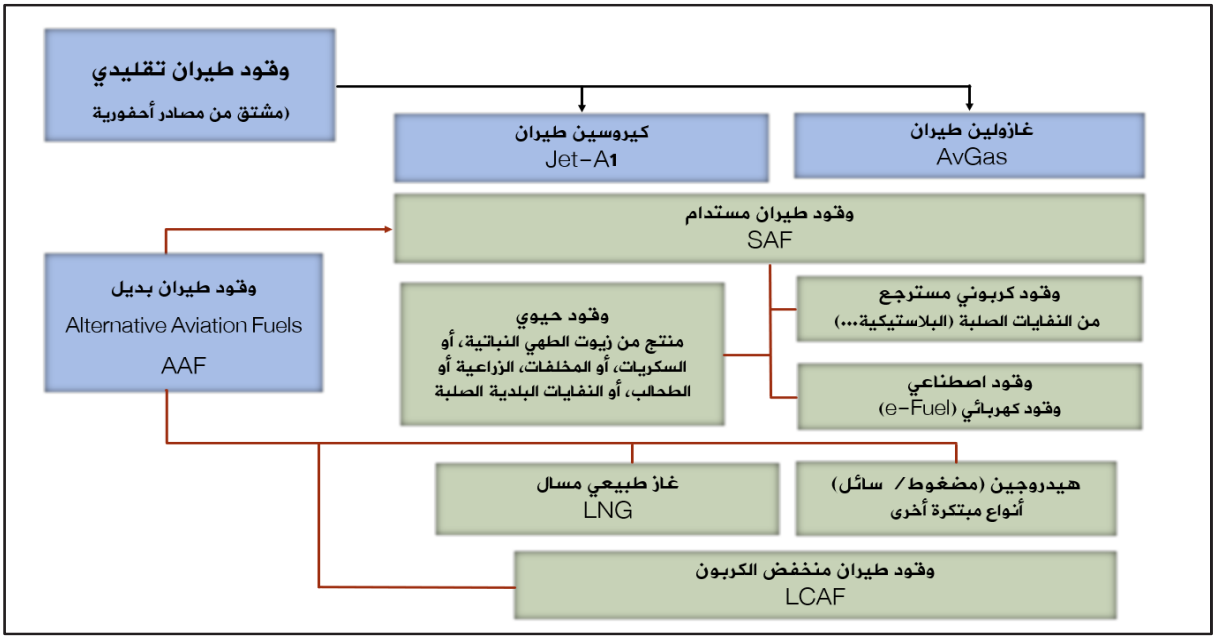
1-1: تصنيف أنواع وقود الطيران

تصنف منظمة الطيران المدني الدولي أنواع وقود الطيران حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA إلى مجموعتين، الأولى مجموعة وقود الطيران التقليدي CAF ذي الأساس الأحفوري، والثانية مجموعة وقود الطيران المعتمدة لخفض انبعاثات الكربون أو الوقود البديل، وذلك على النحو التالي: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- مجموعة وقود الطيران التقليدي Conventional Aviation Fuel- CAF، وهو الوقود المنتج من تكرير النفط، ويتكون من كيروسين الطائرات وغازولين الطائرات.
- مجموعة وقود الطيران البديل ويتكون من الأنواع التالية:
  - وقود الطيران المستدام SAF
  - وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF
  - الهيدروجين
  - الغاز الطبيعي المسال

يبين الشكل (1-1) تصنيف أنواع وقود الطيران حسب منظمة الطيران المدني الدولي ICAO في خطة تعويض وخفض الكربون للطيران الدولي CORSIA .

الشكل (1-1): تصنيف أنواع وقود الطيران حسب منظمة الطيران المدني الدولي ICAO

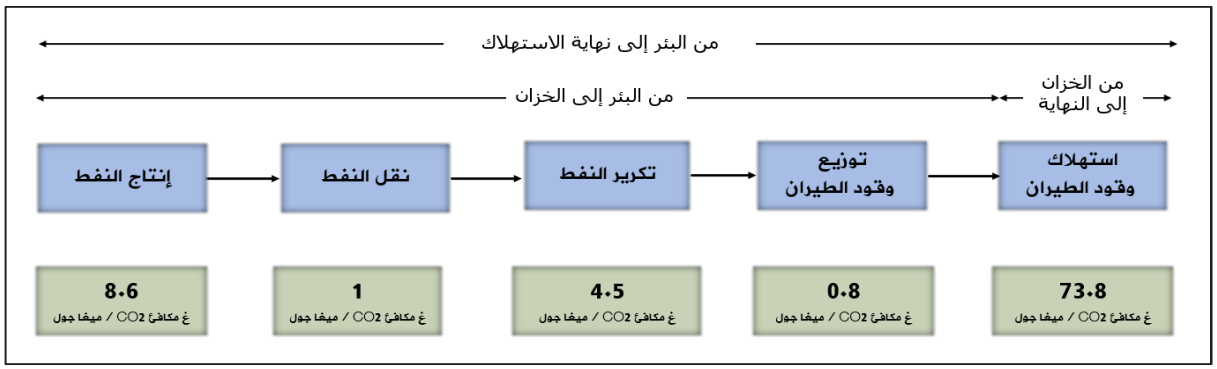


المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

كما ابتكرت منظمة الطيران المدني الدولي طريقة في تصنيفها لوقود الطيران وفقاً لكمية الانبعاثات التي تنتج عن الوقود خلال دورة حياته، ومقارنته مع كمية الانبعاثات التي يطلقها الوقود النفطي التقليدي والتي يطلق عليها اصطلاح "كثافة الكربون".

تعبر كثافة الكربون لوقود الطيران الأحفوري عن إجمالي كمية غازات الدفيئة المنبعثة خلال دورة حياة الوقود التي تقسم إلى عدة مراحل هي: إنتاج النفط ونقله إلى بوابة المصفاة Well to Refinery، ثم مرحلة التكرير ونقل وقود الطيران إلى مراكز الاستهلاك Refinery to Tank، وأخيراً مرحلة الاستهلاك في الطائرات Combustion. يبين الشكل (1-2) كثافة الكربون خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي.

الشكل (1-2): كثافة الكربون خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي

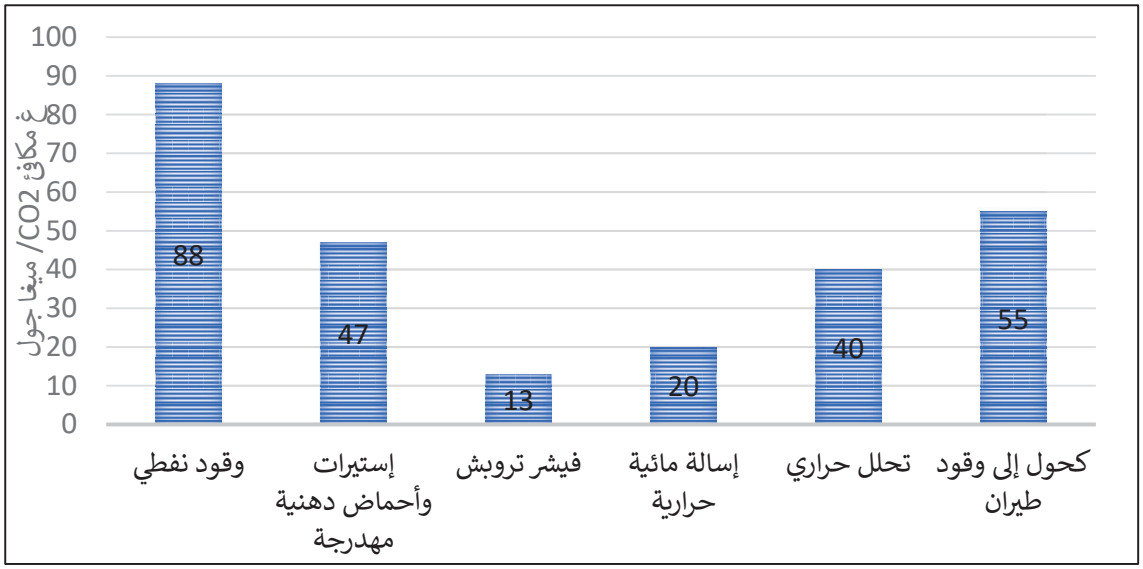


المصدر: (ICAO, 2023)

تختلف كثافة الكربون لكيروسين الطيران النفطي من منطقة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة، فعلى سبيل المثال، تتراوح كثافة الكربون الناتجة عن عملية نقل وتوزيع وقود الطيران من المصفاة إلى مركز الاستهلاك ضمن المجال 0.1 إلى 5.2 غ مكافئ CO_2 على مستوى الدول، بينما يبلغ المتوسط العالمي 0.8 غ مكافئ CO_2، وذلك حسب المسافة الفاصلة بين المصفاة وموقع المطارات في الدولة، حيث تصل إلى 2 غ مكافئ CO_2 في أستراليا وكندا والمكسيك بسبب بعد المسافة بين المصافي والمطارات بينما لا تتجاوز 1 غ مكافئ CO_2 في الدول التي يمكن نقل الوقود فيها عبر الأنابيب أو عندما تكون المسافة بينهما قريبة. وتزداد هذه القيمة عندما تستورد الدولة الوقود من الخارج. كما لنوع النفط الخام المكرر دور في خفض كثافة كربون وقود الطيران المنتج، حيث أن بعض أنواع النفط تتميز بانخفاض كثافة الكربون مقارنة بأنواع أخرى. (Jing, L., et al., 2022)

تتراوح كثافة الكربون لوقود الطيران حسب نوعه وعملية إنتاجه، فالوقود النفطي تتراوح كثافة الكربون فيه ضمن المجال من 81.1 إلى 94.8 غ مكافئ CO_2/ ميغا جول، بمتوسط قدره 88.7 غ مكافئ CO_2/ ميغا جول، حيث تتغير القيمة تبعاً لعوامل عديدة كنوع النفط الخام المكرر، وإجراءات خفض الكربون في مرحلة التكرير والنقل وغيرها، بينما تنخفض في الوقود المنتج بعملية فيشر- تروبش إلى نحو 13 غ مكافئ CO2/ ميغا جول. يبين الشكل (1-3) مقارنة كثافة الكربون لأنواع وقود الطيران النفطي والمتجدد.

الشكل (1-3): مقارنة كثافة الكربون لأنواع وقود الطيران النفطي والمتجدد



المصدر: (Jing, L., et al., 2022)

1-1-1: وقود الطيران التقليدي (النفطي)

ينتج وقود الطيران النفطي من عملية تكرير النفط الخام في المصفاة ويسمى كيروسين الطيران وله أنواع عديدة حسب مجال الاستخدام، والنوع الأكثر استخداماً هو وقود النفاثات Jet-A1.

إضافة إلى غاز CO_2 ينتج عن استخدام وقود الطيران النفطي انبعاثات لها تأثير على تغير المناخ منها: أكاسيد النتروجين NO_x التي تساهم في زيادة تركيز غازات الدفيئة، والأوزون والميثان في الغلاف الجوي، علاوة على بخار الماء وهباب الكربون SOOT التي تسبب تشكل الغيوم الضبابية خلف عادم محركات الطائرة. (Royal Society, 2023)

معظم انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون الناتجة خلال دورة حياة وقود الطيران النفطي تنطلق في مرحلة الحرق في المحرك وتصل النسبة إلى 84% من إجمالي الانبعاثات، بينما تنتج النسبة الباقية 16% من مرحلة الإنتاج التي تبدأ من بئر النفط إلى خزان توزيع وقود الطيران.

1-1-2: وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون LCAF

يعرف وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون بأنه وقود منتج من النفط الخام في مصافي تكرير النفط مع تطبيق تقنيات اصطياد ثاني أوكسيد الكربون واستخدام الهيدروجين الأخضر في عمليات التكرير، ومصادر الطاقة المتجددة في إنتاج الكهرباء وعمليات التسخين، ومن التقنيات الأخرى الممكنة لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون في وحدات مصافي تكرير النفط باستخدام الزيوت النباتية. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

كما تعرف منظمة الطيران المدني الدولي وقود الطيران المنخفض الكربون، حسب ما جاء في خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي CORSIA بأنه وقود ذو أساس أحفوري ينتج عنه انبعاثات كربونية منخفضة مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي، ويتوافق مع متطلبات الاستدامة المحددة في خطة تعويض وتخفيض انبعاثات الكربون للطيران الدولي.* كما تحدد قانون الطاقة المتجددة الأوروبي الثاني RED II شرط اعتبار وقود الطيران منخفض الكربون بأن يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن كامل دورة حياته بنسبة 65 % كحد أدنى من معدل انبعاثات غازات الدفيئة المنبعثة من الوقود التقليدي

* خطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي أعدتها منظمة الطيران المدني الدولي ICAO عام 2016 تهدف إلى معالجة وتخفيف انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن قطاع الطيران الدولي بمعدل 85% من مستوى عام 2019 وذلك خلال الفترة 2024 ولغاية 2035. (ICAO, 2-23)

والمقدر بحوالي (89 غ مكافئ CO_2 لكل ميغا جول) وهي القيمة التي ترمز إلى كثافة كربون الوقود Carbon Intensity CI. (POST, 2020)

كما تعتبر منظمة الطيران المدني الدولي ICAO أن وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون هو النوع الذي يمكن الاعتماد عليه في لعب دور أساسي في برنامج خفض انبعاثات قطاع النقل الجوي. وهذا يتوافق مع ما تم اعتماده خلال الاجتماع الثاني عشر للجنة حماية البيئة للطيران CAEP12 في فبراير 2022، حيث اعتبر وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون أحد الإجراءات المكملة لدور وقود الطيران المستدام في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن قطاع الطيران. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

يختلف وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF عن وقود الطيران المستدام SAF في أن الأول يساهم في خفض انبعاثات الكربون الناتجة عن عملية تصنيع الوقود، بينما الثاني يساهم في خفض الانبعاثات الناتجة عن الحرق والاستهلاك. فعلى سبيل المثال تساهم كمية خمس مليارات لتر من وقود الطيران ذي كثافة كربون 80 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول بخفض كمية من انبعاثات غازات الدفيئة تعادل كمية مليار لتر فقط من الوقود المستدام ذي كثافة كربون 45 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول. كما يتميز وقود الطيران النفطي المنخفض الكربون بسرعة دخوله إلى الأسواق وإمكانية تطويره نظراً لتوفر البنية التحتية لإنتاجه وتخزينه وتوزيعه.(Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

بما أن الوقود التقليدي يتم إنتاجه من تكرير النفط الخام، فإن تكوينه يختلف حسب نوع النفط المكرر، حيث يتكون من البارافينات والأيزوبارافينات والنافثينات والعطريات بنسب متقاربة نوعاً ما. أما الوقود الحيوي فيتم إنتاجه من مجموعة متنوعة من المواد الأولية، وبالتالي فإن التركيب والخصائص مختلفة، مما يجعل تلبية معايير ASTM عملية مكلفة.

1-1-3: وقود الطيران المستدام SAF

وقود الطيران المستدام هو الوقود المنتج من مصادر متجددة مثل الكتلة الحيوية، أو المصادر المشتقة من النفايات مثل الزيوت النباتية المستعملة، والمخلفات الزراعية، أو من تحويل الطاقة إلى سوائل، مثل الوقود الاصطناعي المنخفض الكربون الذي ينتج من غاز ثاني أوكسيد الكربون والهيدروجين الأخضر. ويشترط في هذه الأنواع أن تحقق الحد الأدنى من شروط الاستدامة التي وضعتها كورسيا CORSIA، ويمكن استخدامها مباشرة في الطائرات دون الحاجة إلى تغيير أو تعديل في محرك الطائرة، كما

يشترط ألا يكون مصدر المواد الحيوية المصنع منها الوقود منتجة في أراض ذات مخزون عال من الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

يطلق على وقود الطيران المستدام عدة تسميات تحمل نفس المعنى، مثل وقود الطيران الحيوي Biojet، ووقود الطيران المتجدد Renewable Aviation Fuel، ووقود الطائرات النفاثة المتجدد Renewable Jet fuel، ووقود الطيران البديل Alternative Aviation Fuel. (ATAG, 2017)

1-2: فوائد وقود الطيران المستدام

على الرغم من الصعوبات التي تواجه تصنيع وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، إلا أنه يتميز بفوائد عديدة مقارنة بالوقود التقليدي، من أهمها:

1-2-1: تخفيض انبعاثات الغازات الدفيئة

يتميز الوقود المستدام والمنخفض الكربون بأنه يطلق غازات دفيئة بنسبة أدنى بكثير من الوقود التقليدي، كما يمكن أن تنخفض انبعاثات CO_2 بنسبة 80% على أساس دورة حياة المنتج. وهذا يساهم في الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، وتمكين الدول من تحقيق الأهداف العالمية لخفض الانبعاثات المسببة لتغير المناخ.

1-2-2: تحسين جودة الهواء الجوي

ينتج عن استهلاك وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون انطلاق كمية أقل من الجسيمات الدقيقة مقارنة بالوقود التقليدي، وهذا يساهم في تحسين جودة الهواء في المناطق المجاورة للمطارات، وبالتالي تخفيض المخاطر الصحية الناتجة عن تلوث الهواء.

1-2-3: تعزيز أمن الطاقة

يساهم وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون في تأمين مصدر إضافي لوقود الطائرات من المصادر المتجددة والبديلة، وخصوصاً بالنسبة للدول التي لا تمتلك موارد بترولية حيث يساعدها على تخفيض اعتمادها على النفط والحصول على وقود من مواد خام مستدامة كزيوت الطهي المستعملة، والنفايات الزراعية، أو محاصيل الطاقة. وهذا بالتالي يعزز من أمن الطاقة واستقرار أسعار الوقود في الأسواق العالمية.

1-2-4: دعم الاقتصاد الوطني

يمكن لإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون أن يساهم في تعزيز الاقتصاد من خلال تطوير صناعات جديدة تفتح المجال لخلق فرص عمل جديدة، وذلك من خلال زراعة وتصنيع وتوزيع المواد الخام المستدامة، فضلاً عن إنشاء وتشغيل منشآت تصنيع الوقود المستدام. كما يمكن أن يدعم نمو الاقتصاد الأخضر وجذب الاستثمار في تقنيات وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.

1-2-5: تعظيم الاستفادة من البنية التحتية القائمة

إن قابلية مزج وقود الطيران المستدام مع الوقود التقليدي وإمكانية استخدام المزيج في محركات الطائرات دون الحاجة إلى أية تعديلات يساهم في تعزيز تكامل الوقود المستدام مع البنية التحتية لوقود الطائرات التقليدي وتعظيم كفاءة استخدامها ورفع معدل العائد على الاستثمار لهذه المعدات.

1-2-6: تحسين الالتزام بمتطلبات تشريعات خفض انبعاثات الكربون

إن تضافر جهود منشآت إنتاج الوقود ومحطات التوزيع والمطارات وخطوط الطيران في مجال تشجيع الوقود المستدام يظهر مدى اهتمام هذه الهيئات بخفض بصمتها الكربونية ويحسن صورتها لدى المجتمع وهيئات المحافظة على البيئة.

الفصل الثاني

تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

تتكون عملية إنتاج وقود الطيران المستدام المنتج من مصادر متجددة من ثلاث مراحل رئيسية، الأولى مرحلة المعالجة الأولية للمواد الخام المتجددة، ثم مرحلة التحويل والتصنيع، وأخيراً مرحلة التكرير. (Wormslev, E., et al., 2016)

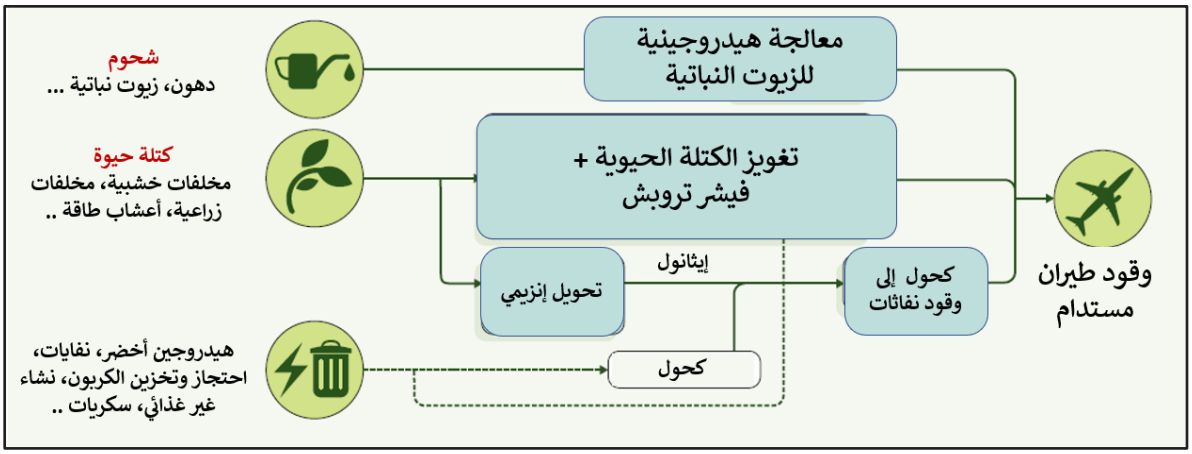
في **مرحلة المعالجة الأولية** يتم تحضير المواد الخام المتجددة لتصبح ملائمة لعملية تصنيع الوقود المستدام، وذلك من خلال عمليات التجفيف والتقطيع، أو أية إجراءات أخرى حسب نوع المواد ومصادرها، مثل كبس البذور النباتية لاستخراج الزيوت الدهنية منها. وقد تشتمل المعالجة الأولية على عملية التغويز إذا كان المطلوب تحويل المواد الخام المتجددة إلى الحالة الغازية.

في **المرحلة الثانية** يتم تحويل المواد الوسطية (مثل السكريات، والشحوم، والغازات) إلى هيدروكربونات. وقد تكون عملية التحويل من خلال التخمير لتحويل السكريات إلى كحولات، أو الهدرجة لتحسين خصائص الشحوم، أو تحويل الغازات إلى سوائل.

في **المرحلة الثالثة** يتم تكرير الهيدروكربونات الناتجة من المرحلة الثانية لفصل وقود الطيران المستدام عن المنتجات الأخرى الثانوية. كما يتم في هذه المرحلة فصل الشوائب عن الهيدروكربونات، إضافة إلى عملية تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة إلى سلاسل بالطول المناسب لإنتاج وقود الطيران المستدام.

يمكن تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام ضمن ثلاث مجموعات رئيسية، الأولى تعتمد على مبدأ تقنية فيشر- تروبش التي اعتمدت في عام 2009، تليها تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية Hydroprocessed Esters and Fatty Acids HEFA التي اعتمدت في عام 2011، وهي الأكثر انتشاراً في العالم، وتقنية تحويل الكحول إلى وقود طائرات ATJ التي اعتمدت في عام 2018. كافة هذه التقنيات تساهم في خفض الانبعاثات الممكن انطلاقها عبر دورة حياة وقود الطيران بنسب عالية تصل إلى 90% مقارنة بوقود الطيران النفط. يبين الشكل (2-1) تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (2-1): تصنيف مسارات إنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Bernard, Y., et al., 2023)

تتوفر حالياً عدة مسارات لإنتاج وقود الطيران المستدام معتمدة من الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM). يبين الجدول (2-1) نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM. (Royal Society, 2023)

الجدول (2-1): نماذج لمسارات إنتاج وقود الطيران المستدام المعتمدة من ASTM

اسم العملية	خيارات اللقيم	الوصف	نسبة المزج %	مستوى نضوج التقنية
هدرجة الأحماض الدهنية وإستيرات الأحماض الدهنية HEFA- KSP	أحماض دهنية و إستيرات الأحماض الدهنية، وبشكل عام الدهون المشتقة من النبات والحيوان، مثل زيت الطهي المستعمل، والشحوم الحيوانية.	معالجة هيدروجينية للأحماض والإستيرات الدهنية لإنتاج كيروسين بارافيني اصطناعي PSK	50	8
تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبشFT-SPK	الكتلة الحيوية (مخلفات الغابات- النفايات البلدية الصلبة)	تحويل الغاز الاصطناعي المنتج بطريقة FT إلى كيروسين بارافيني اصطناعي	50	6-5
إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي HFS-SIP	سكريات مستخرجة مباشرة من النباتات السكرية (الشمندر - وقصب السكر،..) أو من مصادر غير مباشرة (سكريات C5 و C6 مستخلصة من السيليلوز	معالجة هيدروجينية للسكريات الناتجة عن التخمر لتحويلها إلى إيزو- بارافينات اصطناعية.	10	8-7) السكريات العادية) 5) السكريات السليلوزية)
تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام ATJ-SPK	المخلفات الزراعية، مخلفات الغابات، نباتات الطاقة، حبوب الذرة	تحويل الكحولات (إيزو - بوتانول أو إيثانول) إلى كيروسين بارافيني.	50	6-5

المصدر: (Royal Society, 2023)

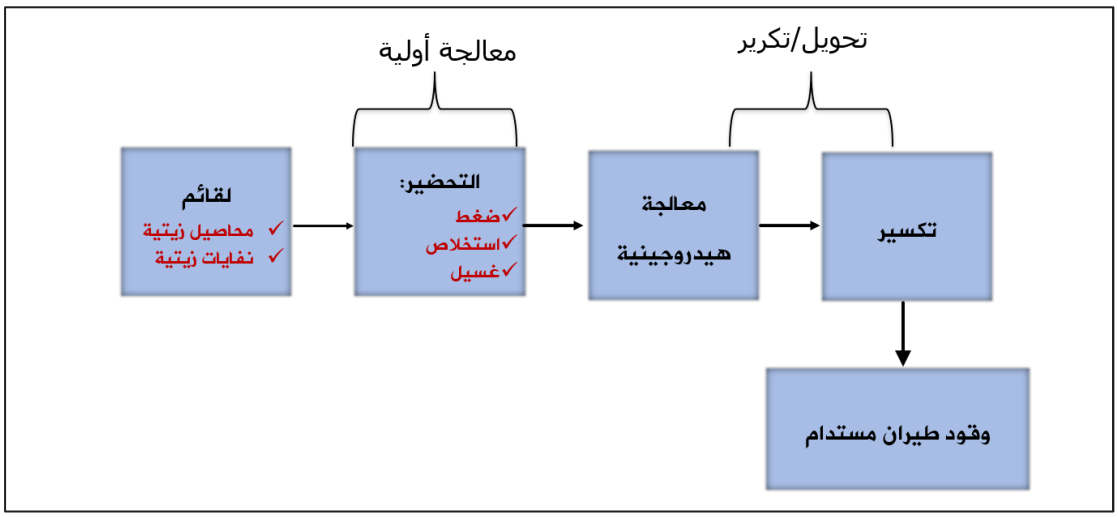
2-1: مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية HEFA

ينتج وقود الطيران الحيوي من التفاعل الكيميائي للغليسيريدات الموجودة في الزيوت النباتية، حيث يتم نزع الأوكسجين منها بالمعالجة الهيدروجينية بوجود عامل حفاز. لكن قبل إدخال الغليسيريدات إلى عملية المعالجة الهيدروجينية تخضع لمعالجة أولية لتخليصها من الشوائب التي تؤدي إلى تخريب فعالية العامل الحفاز. كما أن منتجات عملية المعالجة الهيدروجينية تحتاج إلى معالجة لتصبح جاهزة للاستعمال كوقود للطائرات. (Royal Society, 2023)

يتميز مسار هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية بمرونة استخدام أنواع عديدة من المحاصيل الزيتية أو مخلفات الدهون الحيوانية كلقيم لتحويلها إلى وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي، وذلك من خلال المراحل الرئيسية التالية: (Starck, L., et al. 2016)

- **مرحلة المعالجة الأولية:** وتتكون من كبس المحاصيل الزيتية لاستخلاص الزيت، أو غسيل الشحوم الحيوانية لتخليصها من الشوائب بحيث تصبح صالحة لمرحلة الهدرجة.
- **مرحلة المعالجة الهيدروجينية** لتخليص الزيوت النباتية والشحوم من الأوكسجينات والشوائب بوجود الهيدروجين لإنتاج البارافينات الخطية. كما تتضمن هذه المرحلة عملية تكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة، إضافة إلى عملية الأزمرة بوجود الهيدروجين Hydroisomerization لتحويل البارافينات الخطية إلى مقطرات وسطية حيوية قابلة للمزج مع المنتجات النفطية. ويمكن تعديل ظروف تشغيل هذه المرحلة بحيث تنتج وقود طيران مستدام أو ديزل حيوي وبنسبة تتراوح من الصفر إلى المائة. يبين الشكل (2-2) مراحل عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية.

الشكل (2-2): مراحل عملية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية



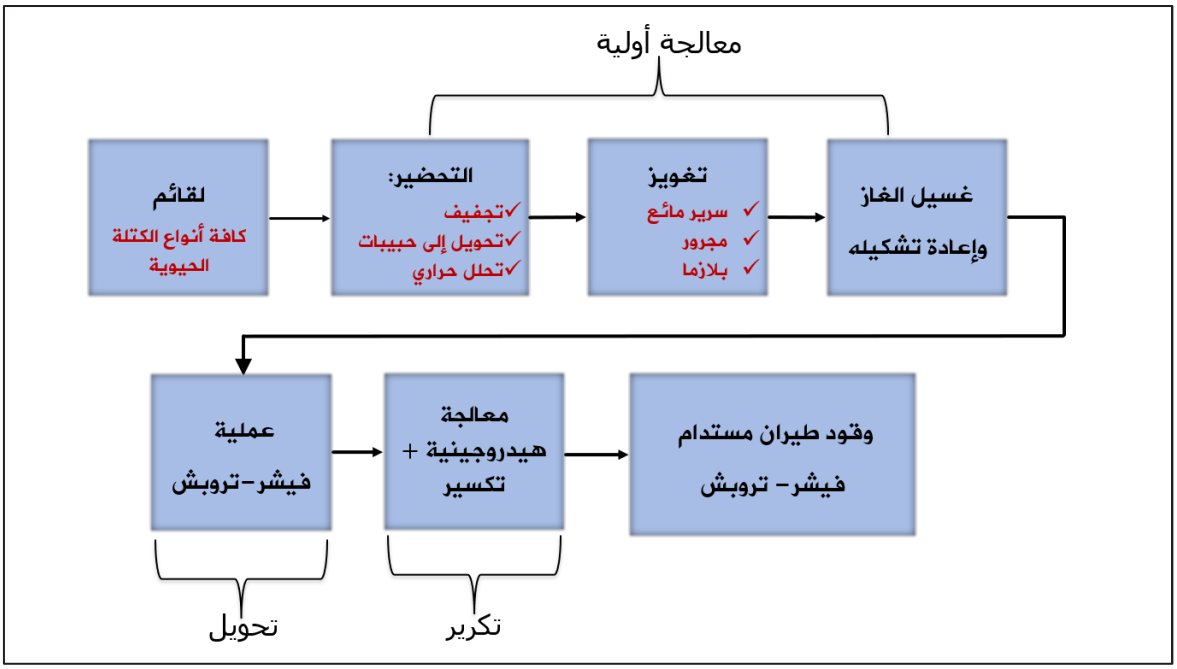
المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-2: مسار تغويز الكتلة الحيوية فيشر - تروبش

يعتمد مبدأ مسار فيشر- تروبش على تحويل الغاز الاصطناعي Synthesis Gas الناتج من عملية تغويز طيف واسع من المواد الحيوية، ويتكون بشكل رئيسي من الهيدروجين وأول أوكسيد الكربون، ثم يحول الغاز إلى سوائل هيدروكربونية طويلة السلسلة، يمكن فصلها إلى أنواع مختلفة من الوقود السائل بما فيها وقود الطيران المستدام. وذلك حسب المراحل التالية:

- **مرحلة تنقية الغاز الاصطناعي**، وتهدف هذه المرحلة إلى التأكد من أن الغاز الاصطناعي خال من الشوائب الضارة بالعامل الحفاز المستخدم في عملية فيشر- تروبش، مثل الغازات الحامضية.
- **مرحلة تفاعلات فيشر- تروبش**، وتتم في مفاعل يحتوي على عامل حفاز لتحويل الغاز الاصطناعي إلى سوائل هيدروكربونية طويلة السلسلة.
- **مرحلة المعالجة الهيدروجينية لتحسين خصائص منتجات فيشر- تروبش**، حيث يتم تثبيت السوائل الخام، وهدرجة الأوليفينات والأوكسجينات، ثم تكسيرها بوجود الهيدروجين، ثم أزمرتها. بعد ذلك يتم فصل السوائل الناتجة إلى أشكال مختلفة من الإنتاج، مثل حالة إنتاج أقصى نسبة من الكيروسين البارافيني المستدام، أو أقصى نسبة من المقطرات الوسطى أو الديزل مع نسبة قليلة من النافثا.

الشكل (2-3): مسار تقنية فيشر- تروبش لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود طيران مستدام

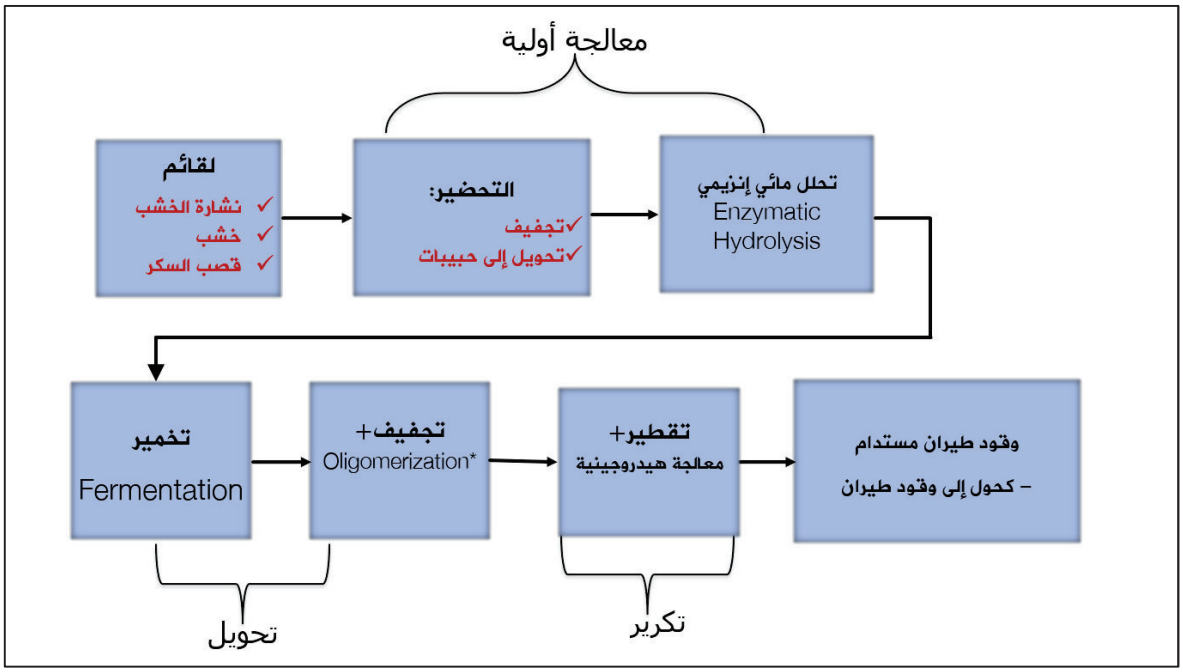


المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-3: مسار تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام

في هذا المسار يتم تحويل الكحول الحيوي المنتج من السكريات/النشاء، والمحاصيل السيليلوزية إلى هيدروكربونات. من أكثر الكحولات المستخدمة في هذه العملية هي الإيثانول الحيوي والبيوتانول الحيوي (بشكليه البيوتانول النظامي N-butanol والأيزو بوتانول Iso-butanol). تتكون عملية تحويل الكحول إلى وقود طائرات من عدة مراحل أولها مرحلة نزع الماء Dehydration بوجود عامل حفاز بدرجة حرارة ضمن المجال 300-500°م. بعد ذلك تمرر الهيدروكربونات الناتجة إلى عمليات التجفيف وتحويل المونوميرات إلى مركبات ذات جزيئات دقيقة Oligomerization، ثم التقطير لفصل وقود الطيران المستدام عن المنتجات الأخرى الثانوية. يبين الشكل (2-4) مخطط تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام.

الشكل (2-4): مخطط تحويل الكحول إلى وقود طيران مستدام



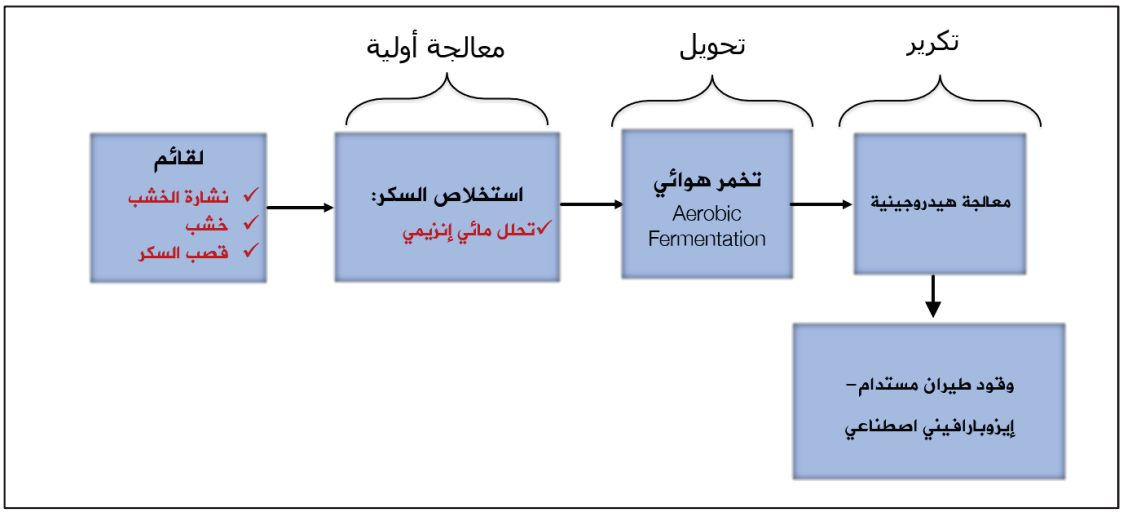
المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-4: مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي

يعرف مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي بمسار التحويل المباشر للسكر إلى هيدروكربونات، والذي اعتمد من قبل ASTM في عام 2014 بنسبة مزج مع الوقود التقليدي قدرها 10% كحد أقصى. يتوافق هذا المسار مع مسار تحويل الكحول إلى وقود طائرات من حيث عمليات المعالجة الأولية للسكر/النشاء مع وجود عملية تحلل مائي إنزيمي Enzymatic Hydrolysis

لاستخلاص جزيئات السكر. الفرق بين المسارين يكمن في أن السكريات تتحول بشكل مباشر إلى هيدروكربونات دون المرور في مرحلة وسطية للتحول إلى كحول. من أهم ميزات هذا المسار إمكانية التعديل الوراثي للإنزيمات لإنتاج وقود بمواصفات خاصة. أما مساوئ هذا المسار فتكمن في الحاجة إلى استمرار ضخ الأوكسجين باعتبار أن التفاعل هوائي مما يرفع من تكاليف الإنتاج. يبين الشكل (2-5) مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي

الشكل (2-5): مسار إنتاج وقود الطيران الأيزوبارافيني الاصطناعي



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-5: مسار الإسالة المائية الحرارية HTL

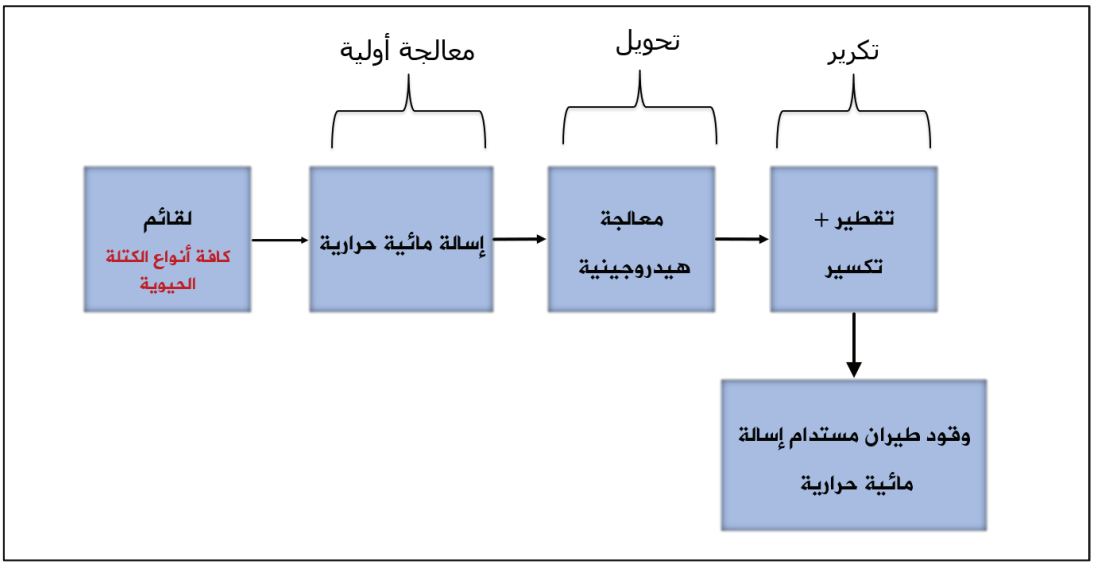
تعتمد طريقة الإسالة المائية الحرارية على تسخين الكتلة الحيوية الرطبة إلى درجة حرارة معتدلة، وتفاعل كيميائي حراري تحت ضغط مرتفع لإنتاج خام حيوي ذي محتوى منخفض من الأوكسجين مقارنة بالخام الحيوي المنتج بطريقة التحلل الحراري Pyrolysis، ومع ذلك يحتاج إلى عمليات معالجة لاحقة كالهدرجة والتقطير لإنتاج وقود الطيران. على عكس مسارات التحلل الحراري، يتميز مسار الإسالة المائية الحرارية بإمكانية استعمال طيف واسع من اللقائم بما في ذلك المحاصيل الليغنوسللوزية، والطحالب وبعض النفايات مثل روث الحيوانات وحمأة الصرف الصحي. يبين الشكل (2-6) مسار الإسالة المائية الحرارية لإنتاج وقود الطيران المستدام.

2-6: مسار التحلل الحراري

يعتمد مبدأ مسار التحلل الحراري على تحويل المحاصيل الليغنوسللوزية إلى فحم خشبي حيوي صلب وزيت حيوي سائل، وذلك على ثلاثة أنواع وبدرجات حرارة مختلفة. يسمى النوع الأول بالتحلل

الحراري السريع Fast pyrolysis ويتم في درجة حرارة 500 °م، لإنتاج أكبر كمية ممكنة من الزيت الذي يعالج لنزع الأوكسجين منه بوجود عامل حفاز حتى يصبح جاهز للاستهلاك والمزج مع الوقود النفطي.

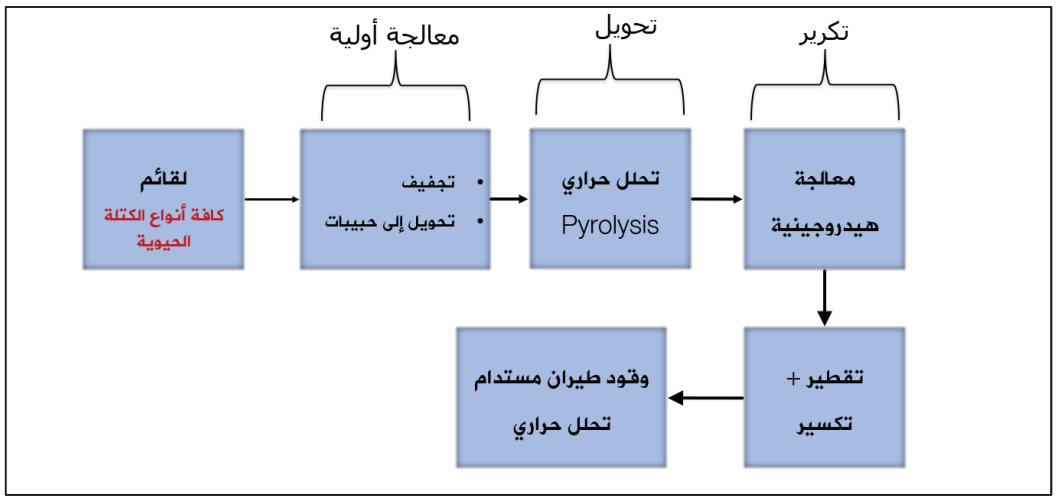
الشكل (2-6): مسار الإسالة المائية الحرارية لإنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

تتم عملية نزع الأوكسجين إما بإضافة الهيدروجين فقط أو مع تفاعلات التكسير. بعد ذلك يتم تقطير الزيت المعالج لإنتاج أنواع متعددة من الوقود الحيوي بما في ذلك وقود الطيران المستدام. يمكن دمج مرحلتي التحلل الحراري وتحسين خصائص الزيت بالمعالجة الهيدروجينية في عملية واحدة، إلا أن هذه التقنية مازالت في مرحلة التطوير. يبين الشكل (2-7) مسار التحلل الحراري لإنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (2-7): مراحل مسار التحلل الحراري لإنتاج وقود الطيران المستدام

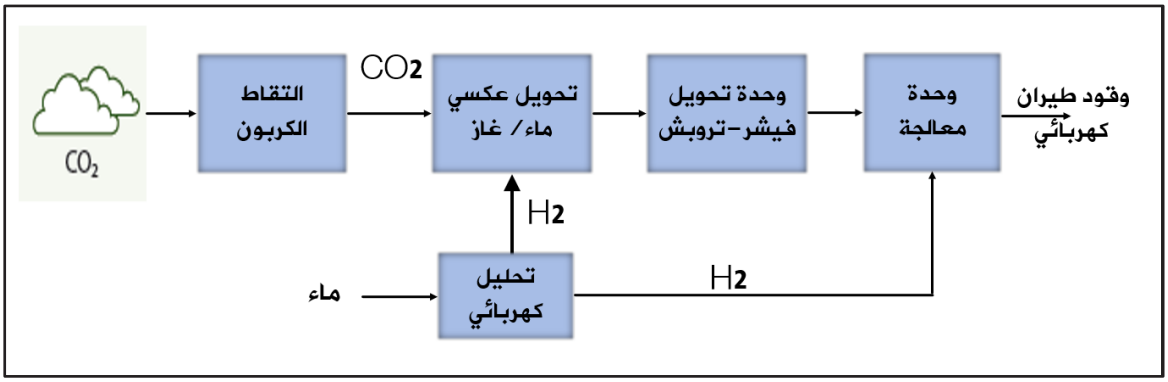


المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

2-7: مسار الوقود الكهربائي Electro-fuel

ينتج الوقود الكهربائي من تفاعل الهيدروجين وغاز ثاني أوكسيد الكربون الذي ينتج عنه أول أوكسيد الكربون وماء. وعندما يندمج أول أوكسيد الكربون بالهيدروجين يتكون غاز اصطناعي يعالج بتقنية فيشر- تروبش لتحويله إلى وقود يسمى الوقود الكهربائي e-Fuel. يبين الشكل (2-8) مسار إنتاج وقود الطيران الكهربائي.

الشكل (2-8): مسار إنتاج وقود الطيران الكهربائي



المصدر: (Bernard, Y., 2023)

من سلبيات عملية إنتاج وقود الطيران الكهربائي أنها تحتاج إلى كمية كبيرة من CO_2، وحيث أن عملية التقاطه من مداخن حرق الوقود مثل محطات إنتاج الطاقة الكهربائية أو من أفران مصافي تكرير النفط لا تتضمن التقاط غازات الدفيئة مما يؤدي إلى ارتفاع تركيزها في الهواء الجوي، لهذا يفضل أن يتم تأمين هذه الكمية من عملية التقاط غاز الكربون من الجو مباشرة Direct Air Capture، بحيث يمكن تعويض الزيادة في كمية CO_2 التي تنطلق من عملية أخرى يصعب التحكم بها مثل عمليات نقل المواد الزراعية واستخدام الأسمدة وغيرها. ومن المساوئ الأخرى لعملية إنتاج الوقود الكهربائي ارتفاع تكاليف إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون اللازم لإنتاج الوقود الكهربائي. (Fantuzzi, A., et al., 2023)

2-8: مسار المعالجة المشتركة

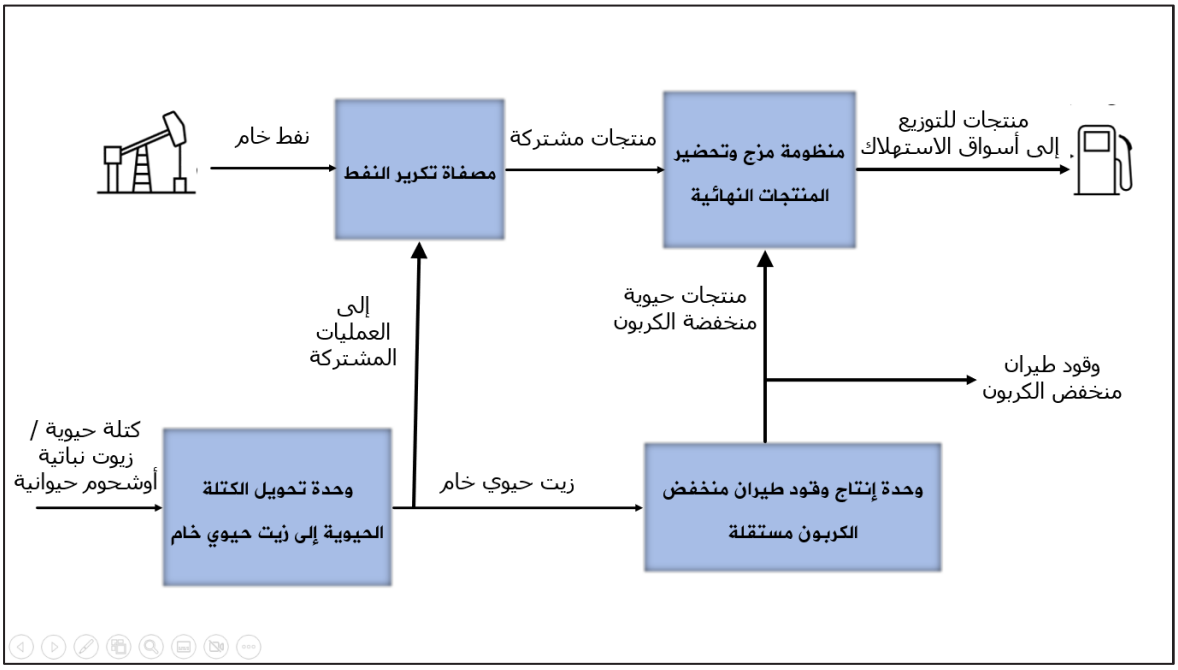
يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد خام متجددة فقط أو إنشاء

مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها. وبالتالي يمكن خفض تكاليف الاستثمار لإنتاج الوقود الحيوي وكذلك تقليل المخاطر. وهناك تجارب عديدة ناجحة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

أظهرت نتائج العديد من الدراسات أن وقود الطيران المستدام SAF هو النوع الأكثر قابلية للاستخدام على المدى القريب والمتوسط في إطار التوجه نحو نزع الكربون، ومع ذلك فإنه لايزال هناك العديد من التحديات التي تواجه إنتاج هذا النوع من الوقود، يأتي في مقدمتها ارتفاع تكاليف الإنتاج مقارنة بالكيروسين المنتج من النفط في مصافي التكرير، والثاني صعوبة الحصول على المواد الخام اللازمة لإنتاج الوقود المستدام.

ونظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون وإعلان العديد من شركات النفط الكبرى عن استراتيجياتها للحد من البصمة الكربونية لعملياتها ومنتجاتها بحلول عامي 2030 و2050 فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF). يبين الشكل (2-9) خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط.

الشكل (2-9): خيارات تكرير الزيوت الحيوية في مصافي تكرير النفط



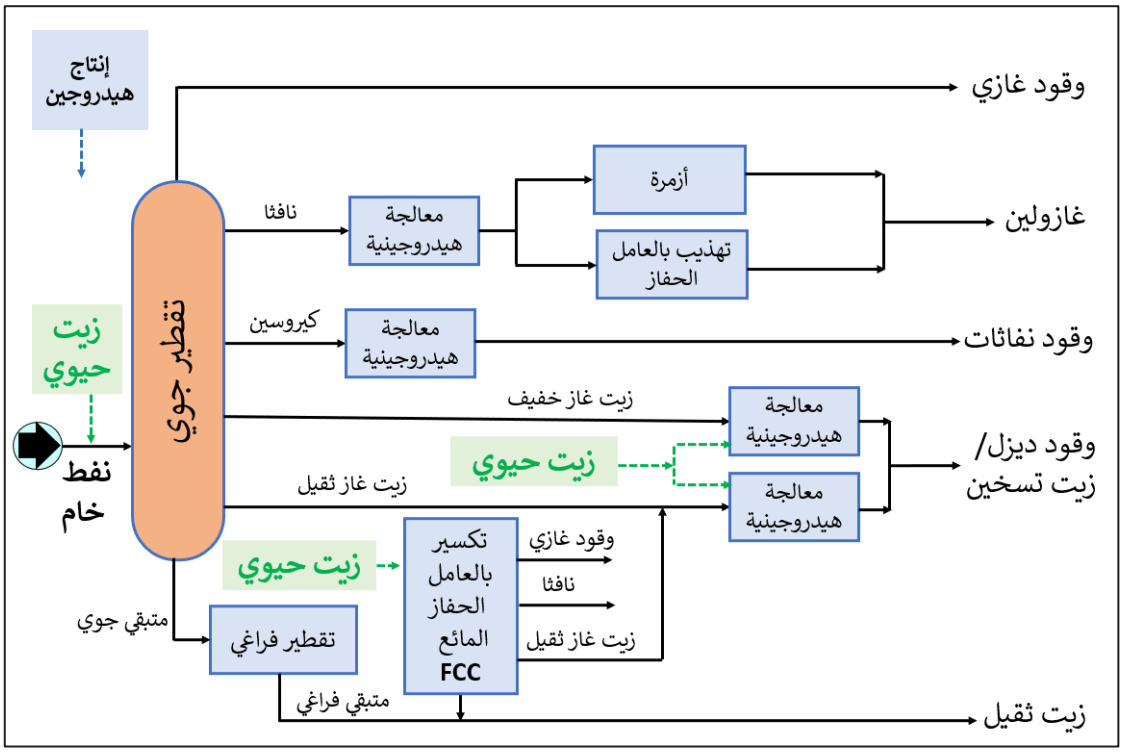
المصدر: (Sayles, S & Ohmes, R., 2021)

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

يمكن أن تتم العمليات المشتركة لتكرير المواد المشتقة من المصادر الحيوية إلى جانب المواد النفطية في بعض وحدات المصفاة، مثل وحدات تقطير النفط الخام، وعملية التكسير الحراري، وعملية التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، وعمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني.

(Avery M., and Strohm, J., 2021) يبين الشكل (2-10) العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-10): العمليات المشتركة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Wagner DA SILVA, M., 2022)

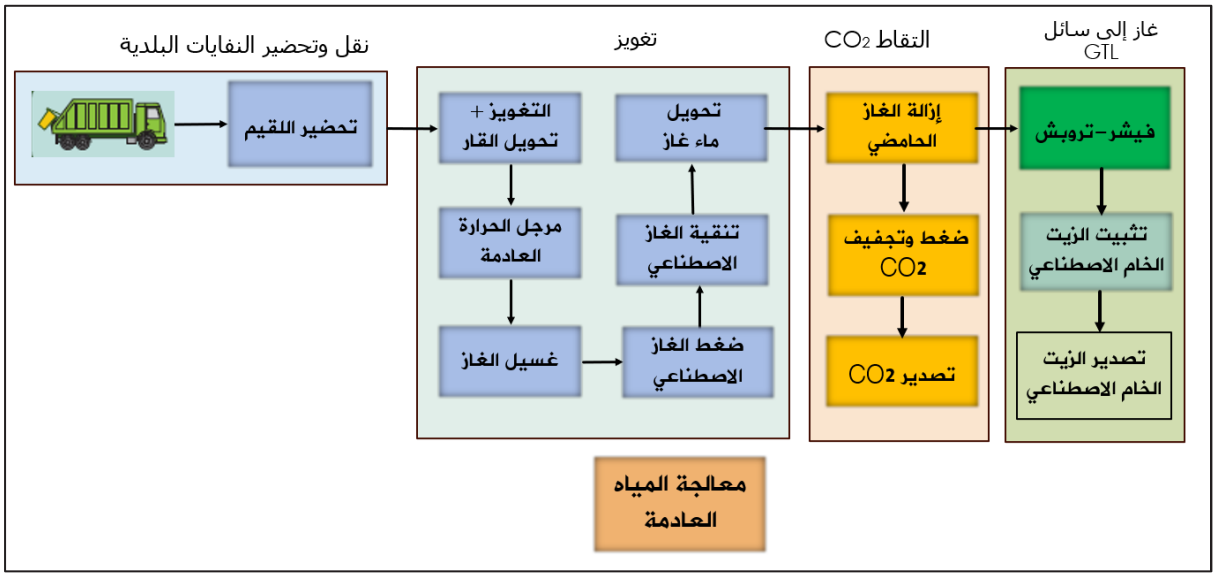
يمكن استخدام الزيت الخام الحيوي في العمليات المشتركة في مصفاة النفط، أو كلقيم في وحدة مستقلة لإنتاج الوقود المنخفض الكربون من الزيوت النباتية المستعملة، أو الشحوم الحيوانية أو النفايات البلدية.

تتكون عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي من أربعة مراحل رئيسية، وهي على النحو التالي:

- مرحلة تحضير النفايات وإزالة الشوائب.
- مرحلة التغويز، وغسيل الغاز الاصطناعي وضغطه.
- مرحلة تحويل الغاز إلى سائل باستخدام تقنية فيشر -تروبش
- مرحلة تثبيت الزيت الحيوي الخام.

كما تحتوي وحدة تحويل النفايات البلدية إلى زيت حيوي خام على مرافق خدمية كمنظومة التقاط غاز ثاني أوكسيد الكربون وتنقيته وتحضيره للتصدير، إضافة إلى وحدة معالجة مياه ملوثة. يبين الشكل (2-11) مخطط عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي.

الشكل (2-11): مخطط عملية تحويل النفايات البلدية إلى زيت خام حيوي



المصدر: Barbara, L., & Galea, C., 2024

2-9: تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون

يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير، ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع، وحتى مرحلة الاستهلاك. وفيما يلي أهم التقنيات الممكن تطبيقها في مراحل دورة حياة وقود الطيران المنخفض الكربون.

2-9-1: تقنيات خفض كثافة الكربون في مرحلة إنتاج النفط

أهم تقنيات خفض كثافة الكربون في وقود الطيران المنخفض الكربون في مرحلة حقول إنتاج النفط هي، (1) استخدام الطاقة المتجددة، (2) إدارة الحرق على الشعلة والحد من تسرب الغازات الهيدروكربونية الطيارة، و (3) واصطياد الكربون. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **استخدام الطاقة المتجددة**

إحدى الطرق الممكنة لاستخدام الطاقة المتجددة في حقول النفط هي استخدام منظومات الطاقة الشمسية لتوليد الحرارة أو بخار الماء اللازم لعمليات الاستخلاص المحسن للنفط (EOR) بدلاً من حرق الغاز الطبيعي أو الوقود الأحفوري.

من الطرق الأخرى لتطبيق الطاقة المتجددة في مرحلة إنتاج النفط استخدام الخلايا الكهروضوئية وتوربينات الرياح لتوليد الكهرباء اللازمة لتشغيل الضواغط ومضخات نقل النفط والغاز من خزانات التجميع إلى محطات المعالجة، عمليات الإنتاج الأخرى، أو لاستخدامها في التجمعات السكنية القريبة من الحقول.

وعلى الرغم من أن هذه التقنيات لا تساهم بتخفيض نسبة مهمة من إجمالي انبعاثات عمليات إنتاج النفط إلا أن الدراسات أشارت إلى أن استخدام الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية في حقول النفط لتغطية الطلب على الكهرباء للمنشأة، يمكن أن يؤدي إلى تخفيض في كثافة كربون وقود الطيران بنحو 0.36 غرام مكافئ CO_2/ميغا جول. وتقدر التكاليف المرتبطة باستخدام الطاقة المتجددة في نطاق 1.91-4.13 دولار أمريكي/طن مكافئ نفط. أو ما يعادل 132-290 دولار أمريكي/ طن مكافئ ثاني أوكسيد الكربون يتم تخفيضه في عملية إنتاج النفط. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **إدارة حرق الغاز على الشعلة وتنفيس وتسرب الغازات**

تعتبر عمليات حرق الغاز على الشعلة والانبعاثات المتسربة من المصادر المهمة لانبعاثات غازات الدفيئة من عمليات إنتاج النفط، وبالتالي فإن تطبيق برامج المراقبة والكشف المبكر عن التسربات يمكن أن يساهم في خفض كثافة الكربون للنفط المنتج بمعدل يصل إلى 10.3 غرام مكافئ ثاني أوكسيد الكربون/ ميجا جول من إجمالي كثافة الكربون الناتجة عن مرحلة إنتاج النفط. إلا أن هذه الكمية تتغير من حقل لآخر بتأثير عدة عوامل مثل نسبة الغاز المحروق إلى النفط المنتج، حسب تقنيات الإنتاج المستخدمة، فقد تتراوح من منخفضة إلى متوسطة أو مرتفعة. كما أن كمية الغازات المتسربة تتأثر بمدى تطبيق برامج

الصيانة الوقائية والدورية للمعدات ونظم الكشف عن التسربات وإصلاحها. يبين الجدول (2-2) تكاليف تقنيات خفض كثافة الكربون في حقول إنتاج النفط. (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الجدول (2- 2): تكاليف تقنيات خفض كثافة الكربون في حقول إنتاج النفط

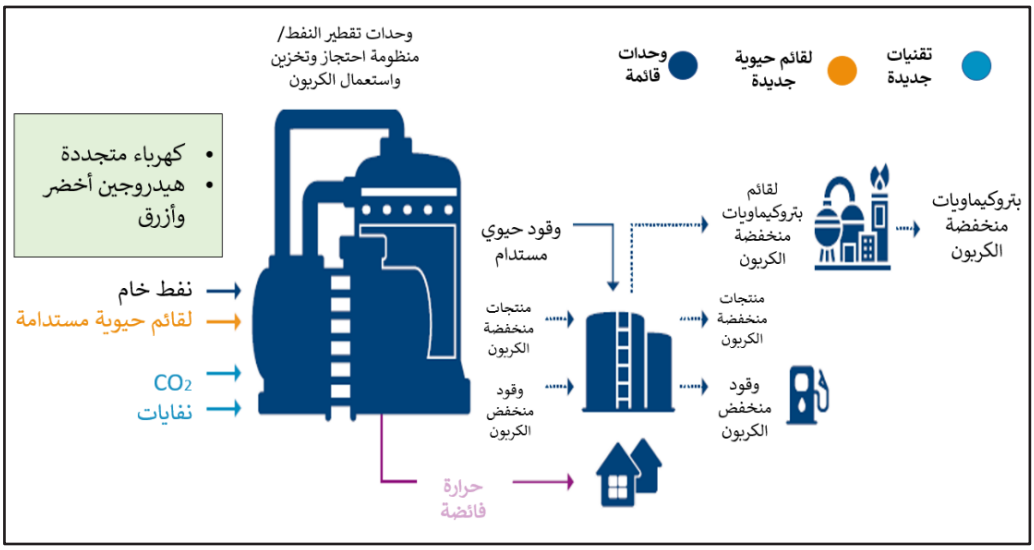
تقنيات تخفيض انبعاثات وقود الطيران في مرحلة إنتاج النفط	مقدار خفض كثافة الكربون (CO_2غ مكافئ/ميغا جول)	تغير كلفة إنتاج النفط	تكلفة التخفيض CO_2 دولار/طن مكافئ
استخدام الطاقة المتجددة في حقل النفط	0.36 – 0.35	4.13- 1.91	290-132
سياسة معتدلة لخفض الحرق على الشعلة	1.5	10^{-4}* 2.32	3.23
سياسة صارمة لخفض الحرق على الشعلة	1.9	10^{-4}* 2.93	4.1
خفض الانبعاثات والتسربات الهاربة	2.3	0.57	15.91

المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

2-9-2: تقنيات تخفيض كثافة الكربون في مرحلة تكرير النفط

فيما يتعلق بإمكانية تخفيض كثافة الكربون لوقود الطيران وتحويله إلى منتج بكثافة كربون منخفضة LCAF في مرحلة تكرير النفط، يمكن اعتماد العديد من التقنيات، أهمها: (1) اصطياد الكربون واستعماله وتخزينه (CCUS)، (2) إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر، و (3) استخدام الحرارة والطاقة من مصادر الطاقة المتجددة في المصفاة، و (4) ترشيد استهلاك الطاقة تحسين كفاءة استخدامها، و(5) تكرير لقائم حيوية مستدامة. يبين الشكل (2-12) تقنيات خفض كثافة الكربون في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (2-12): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **اصطياد وتخزين واستخدام ثاني أوكسيد الكربون CCUS**

تعتبر تقنية اصطياد واستعمال وتخزين غاز ثاني أوكسيد الكربون من الحلول الناجعة لخفض الانبعاثات الناتجة عن مصافي تكرير النفط، حيث ينقل CO_2 المحتجز إلى أماكن مناسبة لحقنه في طبقات آبار النفط والغاز الناضبة أو طبقات المياه الجوفية المالحة.

تأتي انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في مصافي تكرير النفط من عدة مصادر منفصلة، أهمها (1) أفران التسخين في وحدات عمليات التكرير، (2) المرافق (توليد الكهرباء وبخار الماء)، (3) وحدة التكسير بالعمل الحفاز المائع (FCC)، (4) ووحدات إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان SMR. (Herbertson, J., & Wheeler, D., 2022)

تعتمد فعالية تقنية اصطياد الكربون على تركيز ثاني أوكسيد الكربون في غاز المداخن، فكلما زاد تركيز ثاني أوكسيد الكربون زادت الفعالية، وحيث أن نسبة مصادر انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في العمليات الرئيسية في مصفاة تكرير النفط تختلف من مصدر لآخر، نجد أن انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن وحدات إنتاج الهيدروجين تمثل نسبة 5-20% من إجمالي انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في المصفاة، وتمثل أفران التسخين في وحدات عمليات التكرير 30-60% من إجمالي ثاني أوكسيد الكربون (حسب نوع الوقود المستخدم) ، والمرافق (توليد الكهرباء وبخار الماء) 20-50% ، ولوحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC 20-50%.

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

- طريقة اصطياد بعد الاحتراق Post-combustion، التي تتضمن فصل CO_2 من غازات احتراق الوقود الخارجة من مدخنة الفرن.
- طريقة اصطياد قبل الاحتراق Pre-combustion، التي تعتمد على تحويل الوقود الثقيل إلى وقود غازي يمكن فصل CO_2 منه بالامتصاص قبل استخدامه كوقود في الأفران.
- طريقة حرق الوقود باستخدام الأوكسجين النقي بدلاً من الهواء الجوي Oxyfuel process، وتسمى أيضاً بطريقة الأكسدة الجزئية Partial Oxidation ، وذلك بهدف الحصول على غازات احتراق الوقود على شكل غاز CO_2 نقي. (أوابك، 2023)

- **خفض انبعاثات وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC**

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

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

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

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

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

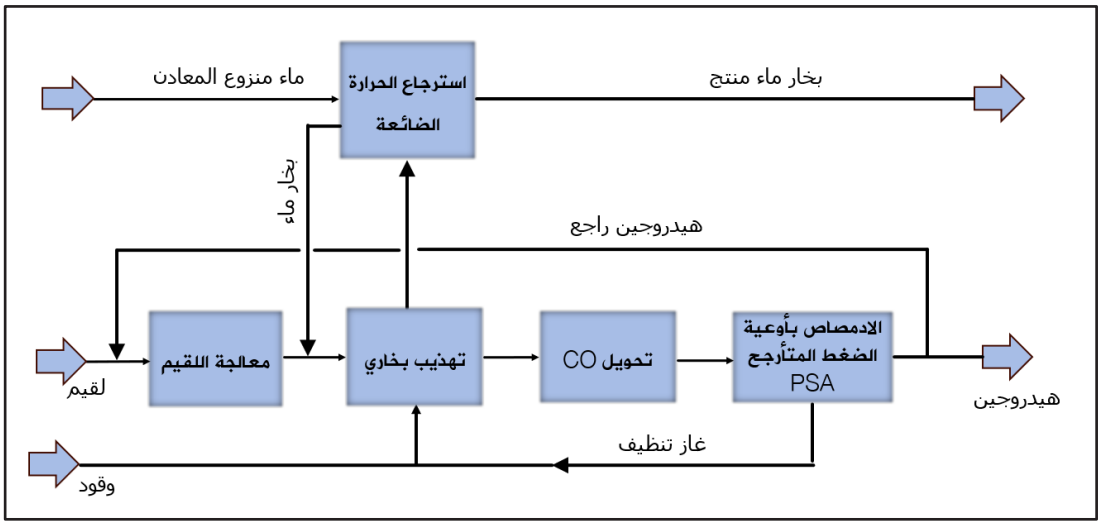
- **خفض انبعاثات وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان**

يستخدم الهيدروجين في مصافي تكرير النفط لمعالجة المنتجات البترولية وتخليصها من الكبريت والشوائب الأخرى بعملية تسمى المعالجة الهيدروجينية Hydrotreatment، ولتحسين خصائص بعض البواقي الثقيلة وتحويلها إلى منتجات خفيفة عالية القيمة من خلال تكسير السلاسل الكربونية

الطويلة ورفع نسبة الهيدروجين إلى الكربون في المنتجات بعملية تسمى التكسير الهيدروجيني Hydrocracking. (أوابك، 2024)

تتكون مراحل عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري من أربع مراحل رئيسية، يتم في المرحلة الأولى معالجة هيدروجينية أولية للقيم لتخليصه من المركبات الكبريتية، بعد ذلك يمزج الخارج من هذه المرحلة مع بخار الماء ليدخل إلى مفاعل التهذيب البخاري للميثان Steam Methane Reformer الذي يحتوي على عامل حفاز ضمن أنابيب داخل فرن للتسخين، لتعويض الحرارة اللازمة للتفاعل، حيث أن التفاعل ماص للحرارة Endothermal Reaction، وتؤخذ نواتج التفاعل التي تتكون من الهيدروجين وأكاسيد الكربون إلى وعاء لتحويل غاز أول أوكسيد الكربون CO إلى ثاني أوكسيد الكربون CO_2 مفاعل التحويل Shift reactor أما المرحلة الرابعة فهي مرحلة التنقية والتي تتكون من مفاعلات امتصاص لنزع أكاسيد الكربون المتبقية، تتبعها مرحلة تحويل الجزء المتبقي من أول وثاني أوكسيد الكربون إلى ميثان Methanation، وتصل فيها نقاوة الهيدروجين إلى 94-97%. وفي عقد الثمانينات من القرن الماضي ظهرت طريقة جديدة للتنقية باستخدام الادمصاص بأوعية الضغط المتأرجح Pressure Swing Adsorber-PSA، حيث تصل فيها نقاوة الهيدروجين المنتج إلى 99.9%. (Chlapik, et al., 2022) يبين الشكل (2-13) مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان.

الشكل (2-13): مخطط عملية إنتاج الهيدروجين بطريقة التهذيب البخاري للميثان



المصدر: (أوابك ، 2024)

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

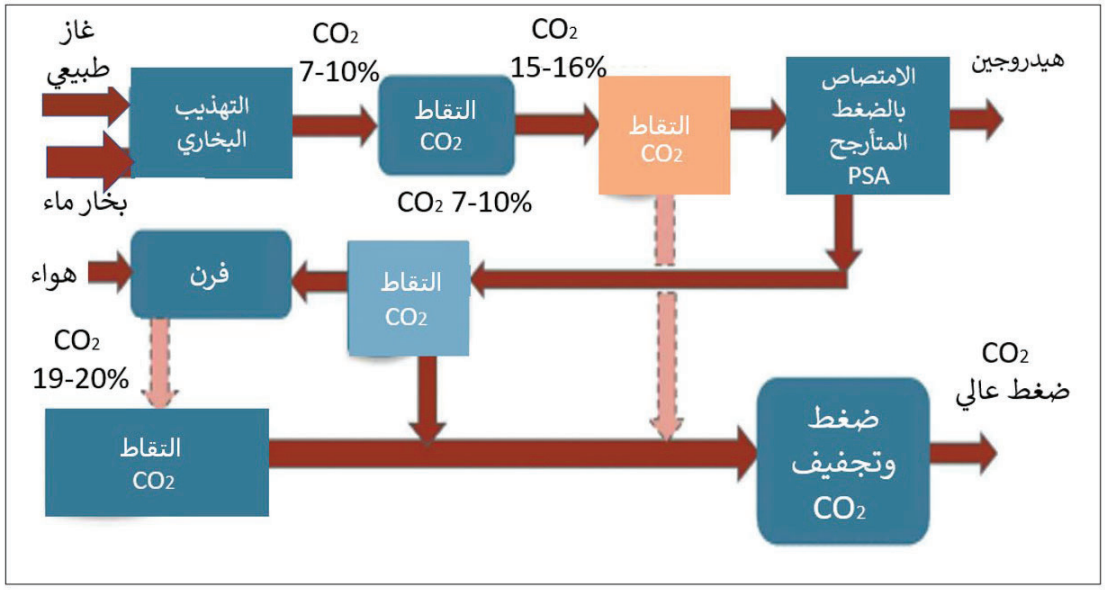
يبين الجدول (2-3) خصائص ومصادر التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR طاقتها 70 ألف $م^3$ قياسي/الساعة. كما يبين الشكل (2-14) خيارات التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR.

الجدول (2-3): خصائص ومصادر التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين SMR

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

المصدر: (Singh, R. B.,2022)

الشكل (2-14): خيارات التقاط CO_2 في وحدة إنتاج الهيدروجين بالتهذيب البخاري للميثان SMR



المصدر: (Singh, R. B.,, 2022)

باستخدام نموذج البرمجة الخطية (LP) أظهرت النتائج أن التقاط ثاني أوكسيد الكربون وتخزينه في عمليات مصافي تكرير النفط يمكن أن يؤدي إلى توفير 3.86 غ مكافئ ثاني أوكسيد الكربون/ ميجا جول

من إجمالي كثافة الكربون لوقود الطيران النفطي، وأن التكلفة المقدرة لالتقاط وتخزين ثاني أوكسيد الكربون 0.09 دولار أمريكي/ غالون من النفط الخام المكرر، أو ما يعادل 171 دولار أمريكي/ طن مكافئ ثاني أوكسيد الكربون.

تجدر الإشارة إلى أن تكلفة اصطياد وتخزين CO_2 تختلف من مصفاة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة كنوع الوحدات الإنتاجية، والمرافق الموجودة في المصفاة وتركيز غاز ثاني أوكسيد الكربون في الغازات المراد تركيب منظومة الاصطياد عليها، ومسافة الموقع المحتمل لتخزين CO_2.

- **إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون واستعماله**

يعتبر الهيدروجين المنخفض الكربون أحد الحلول الناجعة لخفض انبعاثات الكربون في المنشآت الصناعية، وخصوصاً بالنسبة لمصافي تكرير النفط، وذلك من خلال تطبيق التقنيات التالية:

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

تشير الدراسات إلى أن استخدام الهيدروجين الأخضر، المنتج بطريقة التحليل الكهربائي للماء باستخدام الكهرباء المتجددة، بدلاً من الهيدروجين المنتج بطريقة التهذيب البخاري للغاز الطبيعي أو النافثا SMR يمكن أن يؤدي إلى خفض انبعاثات الكربون بمقدار 0.54 غ مكافئ CO_2/ميغا جول، وأن الكلفة الإضافية لذلك تبلغ 4.45 دولار للطن من النفط الخام المكرر في المصفاة، أو ما يعادل 190 دولار للطن المكافئ لثاني أوكسيد الكربون. (Carter & Hickman, 2021)

كما يمكن استخدام أنواع عديدة من الطاقات المتجددة في مصافي النفط مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وغيرها تبعاً للموقع الجغرافي للمصفاة، بحيث يمكن أن يصل إجمالي تخفيض كثافة الكربون لوقود الطيران المنخفض الكربون في المصفاة إلى 4.4 غرام مكافئ CO_2/ ميغا جول. يبين الجدول (2-4) تقنيات خفض كثافة الكربون في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وتكاليفها (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الجدول (2-4): تقنيات خفض كثافة الكربون في مصافي تكرير النفط لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وتكاليفها

تقنيات تخفيض انبعاثات وقود الطيران في مرحلة تكرير النفط	مقدار خفض كثافة الكربون (غ مكافئ CO2/ميغاجول)	تغير كلفة إنتاج النفط	تكلفة التخفيض دولار/طن مكافئ CO_2
التقاط الكربون في عمليات المصفاة	3.86	28.60	171
إنتاج الهيدروجين من مصادر متجددة	0.54	4.45	190

المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

- **ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها**

تعتبر إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة من أفضل الوسائل الممكنة لتخفيض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون CO_2 المنبعثة من حرق الوقود في أفران عمليات التكرير.

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

أهم الإجراءات التي لا تحتاج إلى تكاليف أو بتكاليف بسيطة، هي ما يلي:

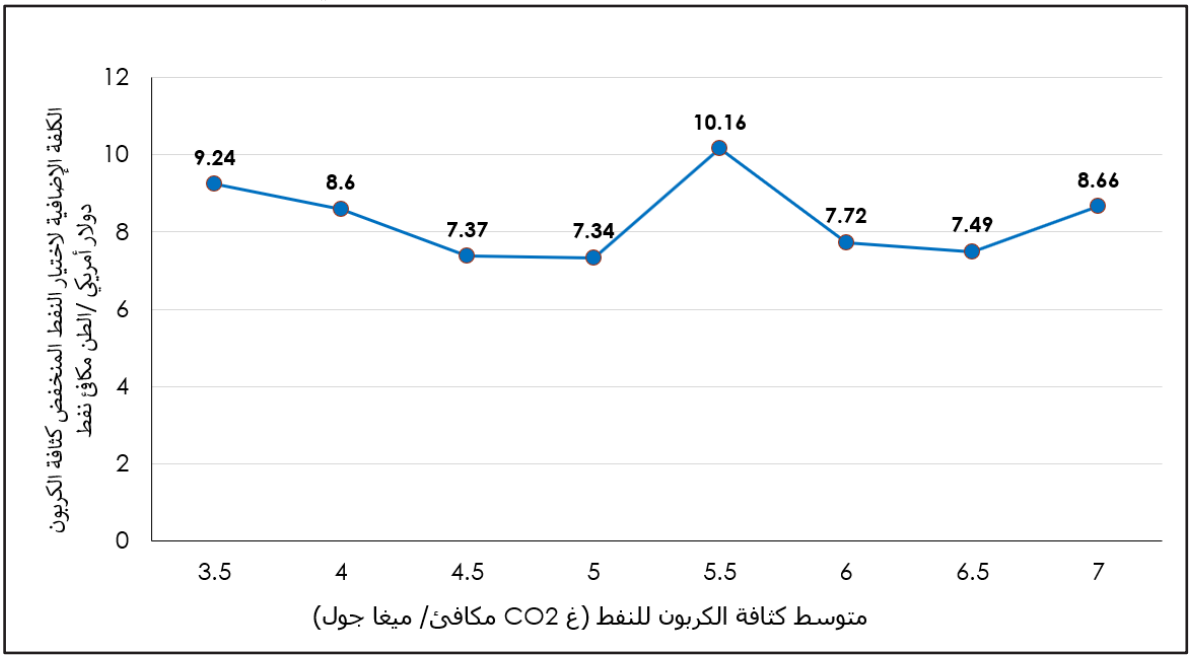
- **تنظيم ظروف تشغيل العمليات،** وذلك بهدف خفض استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى مع المحافظة على كفاءة العملية، مثل تخفيض نسبة الراجع إلى أبراج الفصل إلى الحد الأدنى.
- **تحسين عمليات الصيانة الدورية للمعدات** لتفادي الأعطال والتوقفات الطارئة التي ينتج عنها مخلفات ومنتجات خارجة عن المواصفات تحتاج إلى عمليات إعادة تكرير تستهلك طاقة إضافية.
- **تكرير نفط خام بمواصفات عالية الجودة** ذات كثافة خفيفة وغير حامضية وتحتوي على نسب منخفضة من الشوائب، حيث أن الأنواع الجيدة لا تحتاج إلى معالجة عميقة لنزع الشوائب منها وبالتالي يكون استهلاكها للطاقة أقل.
- **خفض غازات تنفيس المعدات والأوعية الناتجة عن** تنفيس محتويات الأوعية من الغازات الهيدروكربونية إلى الجو لتخفيض الضغط الزائد عن القيم التشغيلية النظامية، إضافة إلى الغازات التي تنطلق من خزانات النفط والمنتجات ومحطات تحميل وتفريغ المنتجات. وللحد من طرح هذه الغازات إلى الجو يمكن تركيب منظومة استرجاع حيث يتم تجميعها في خزان خاص ومعالجتها واستخدامها كوقود في الأفران

- **المحافظة على نظافة المبادلات الحرارية** وإزالة الرواسب المتراكمة على سطوح الأنابيب التي تمنع انتقال الحرارة وتسبب زيادة استهلاك الوقود في الفرن، أو ما تسمى بظاهرة الاتساخ، Fouling.
- **تحسين التكامل الحراري** بين الوحدات لتفادي التبريد المرحلي بين العمليات المتتالية.
- **صيانة مصائد البخار** والتأكد من سلامة عملها.
- **تحسين كفاءة حرق الوقود** من خلال ضبط نسبة الهواء الداخل إلى الحراقات، أو ما يطلق عليه بنسبة الهواء إلى الوقود، وبالتالي خفض كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة.
- أما إجراءات ترشيد استهلاك الطاقة بتكاليف متوسطة فهي تركيب معدات جديدة أو تغيير المعدات القائمة بأخرى ذات كفاءة أعلى، أو ذات خصائص تساعد على تخفيض كمية الطاقة المستهلكة، من أهمها:
- **استبدال الأجزاء الداخلية لأبراج التقطير** والفصل بأنواع متطورة تساهم في تخفيض كمية الوقود المستهلكة في تسخين المادة الداخلة إلى البرج أو كمية الطاقة اللازمة لتبريد الراجع إلى البرج.
- **استبدال المبادلات الحرارية** بأنواع ذات كفاءة أعلى مصنوعة من معادن ذات خصائص تمكنها من نقل الحرارة بكفاءة أعلى.
- **استخدام عوامل حفازة متطورة** يمكنها الوصول إلى التفاعلات المطلوبة في المفاعل بدرجات حرارة وضغوط أخفض، وبالتالي يتم خفض كمية الطاقة اللازمة لتسخين المادة الداخلة إلى المفاعل.
- **الاستفادة من الحرارة الضائعة** من غازات المدخنة في عدة مجالات، كتسخين هواء الاحتراق الداخل إلى الحراقات، أو توليد بخار الماء، أو لتسخين الغازات الفائضة الداخلة إلى فرن الاتلاف لتوفير الوقود المستهلك.
- **استرجاع الهيدروجين من خطوط غازات المصفاة** التي تنتج في بعض عمليات التكرير كمنتج ثانوي، يحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين، حيث يمكن معالجتها ورفع ضغطها ثم إدخالها إلى عنفة غازية Gas Turbine لتوليد الطاقة الكهربائية بحيث تزود بمنظومة اصطياد غاز ثاني أوكسيد الكربون.

- **تكرير نفط خام منخفض كثافة الكربون**

توجد علاقة مباشرة بين كثافة الكربون للنفط الخام المكرر في المصفاة وكثافة الكربون للمنتجات النهائية ومنها كيروسين الطيران المنخفض الكربون. وحيث أن النفط الذي يتميز بكثافة كربون منخفضة يكون سعره أعلى من النفط ذي كثافة الكربون المرتفعة، فإن هذا الإجراء سيترتب عليه تكاليف إضافية عند حساب تكلفة إنتاج الكيروسين المنخفض الكربون. يبين الشكل (2-15) التكلفة الإضافية لاختيار أنواع مختلفة من النفط الخام تبعاً لكثافة الكربون مقارنة بمتوسط سعر خامات الاتحاد الأوروبي.

الشكل (2-15): التكلفة الإضافية لاختيار أنواع مختلفة من النفط الخام تبعاً لكثافة الكربون مقارنة بمتوسط سعر خامات الاتحاد الأوروبي



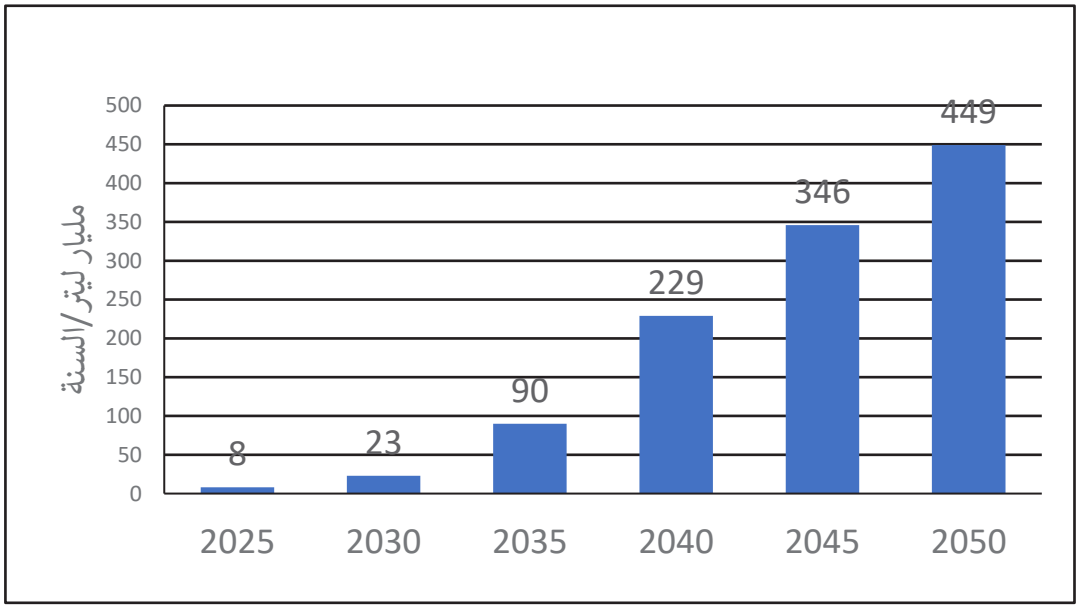
المصدر: (Chiaramonti, D., et al., 2021)

الفصل الثالث

تحديات إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تواجه عمليات إنتاج وقود الطيران المستدام صعوبات وتحديات عديدة لا يمكن حلها إلا من خلال دعم الحكومات للاستثمار وخلق أسواق مناسبة. فعلى الرغم من الدعم الكبير الذي تقدمه الحكومات في العديد من دول العالم لم تتجاوز كمية إنتاج وقود الطيران المستدام 600 مليون ليتر أو ما يعادل 0.2% من إجمالي الطلب العالمي على وقود الطيران في عام 2023. وحتى تتحقق خارطة طريق نزع الكربون في قطاع الطيران من المتوقع أن يصل الطلب على وقود الطيران المستدام إلى نحو 449 مليار ليتر/ السنة بحلول عام 2050. يبين الشكل (3-1) توقعات الطلب على وقود الطيران المستدام لتحقيق صفر انبعاثات بحلول عام 2050. (IATA, 2023)

الشكل (3-1): توقعات الطلب على وقود الطيران المستدام لتحقيق صفر انبعاثات في عام 2050



المصدر: (IATA, 2023)

من أهم الخصائص التي تساهم في انتشار استخدام وقود الطيران المنخفض الكربون المنتج من النفط أو الوقود الحيوي هي إمكانية مزجه مع الوقود النفطي التقليدي، وأن تتوافق خصائصه مع متطلبات المواصفات التي تحددها الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM 165521)، أو ما يعادلها

في معيار وزارة الدفاع البريطانية (Defence 91-9122)، إضافة إلى متطلبات الأداء التشغيلي والشروط التي تضمن سلامة محركات الطائرات الحالية دون الحاجة إلى إجراء أية تعديلات عليها. من هذه المواصفات القيمة الحراريةEnergy Content، ونقطة التجمدFreezing point، والثبات الحراري Thermal Stability، واللزوجة Viscosity، وخصائص الاحتراق Combustion Characteristics، وخاصية التزييت Lubricity، ومواصفات أخرى خاصة بوقود الطيران.

يعتمد تعزيز إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام على نطاق تجاري على عدة عوامل يرتبط معظمها بمواصفات المعايير الدولية، ومنح موافقات الإنتاج، وجاهزية التكنولوجيا، وفيما يلي شرح مبسط لهذه العوامل: (BOSCH, J., et al., 2017)

3-1: ارتفاع تكاليف الإنتاج

يمثل ارتفاع تكاليف الإنتاج العائق الأكبر لانتشار وقود الطيران المستدام، حيث تصل إلى 2.5-5 أضعاف تكلفة وقود الطيران التقليدي Jet A-1 (Barbara, L., & Galea, C., 2024)، إلا أنه من المتوقع أن تضيق الفجوة بين تكلفة النوعين بشكل تدريجي في المستقبل، وخصوصاً بعد تطبيق نظام تجارة الانبعاثات ETS. (Soone, J., 2020)

كما أن بعض التقنيات تتميز بارتفاع التكاليف الاستثمارية التي تمثل 50 إلى 70% من إجمالي تكاليف الإنتاج، مثل تقنية فيشر- تروبش بينما تشكل تكاليف المواد الأولية ما نسبته 10- 35%. ويمكن تخفيض تكاليف الإنتاج في تقنية فيشر- تروبش من خلال الاستفادة من اقتصاد الحجم، إلا أن تشغيل هذه التقنية بطاقة إنتاجية عالية ينشأ عنه صعوبات تتمثل في إمكانية نقل وتأمين المواد الأولية الكافية للمشروع.

أما تقنية الإستيرات والأحماض الدهنية المهدرجة HEFA فإن نسبة تكاليف المواد الأولية هي الأكبر من إجمالي تكاليف الإنتاج، حيث أنها تعتمد على الزيوت النباتية. كما أن استخدام الزيوت النباتية نشأ عنه مخاوف بيئية من استخدام الأراضي الزراعية لأغراض غير غذائية وتؤدي إلى ارتفاع أسعار المنتجات الزراعية الأخرى. وقد تمكنت بعض الدول الأوروبية من استخدام زيوت الطهي المستعملة التي يتم تجميعها من المطاعم لخفض تكاليف الإنتاج ووصلت نسبتها إلى حوالي 90% من إجمالي كمية الوقود الحيوي المنتج بهذه التقنية والبالغة حوالي مليون طن. ولتفادي مشكلة ارتفاع تكاليف نقل المواد الأولية هناك توجه نحو العمل على تصنيع أولي في موقع إنتاج الكتلة الحيوية ثم نقلها إلى وحدات إنتاج وقود الطيران المستدام. (Pavlenko, N., & Searle, S., 2021)

من جهة أخرى يحتاج الوقود المتجدد إلى بنية تحتية باهظة التكاليف، فعلى سبيل المثال، بدأت البرازيل بإنتاج الإيثانول الحيوي منذ عام 1970، وعلى الرغم من الدعم الحكومي الكبير فقد استغرقت مرحلة بناء سلسلة الإمداد أكثر من ثلاثين سنة إلى أن وصل معدل إنتاجها إلى مستوى يلبي حوالي 40% من إجمالي الطلب المحلي على وقود وسائل النقل، مما يدل على مدى تعقيد بناء سلسلة إمداد الوقود المتجدد.

3-2: انخفاض كفاءة عملية الإنتاج

يتطلب إنتاج وقود الطيران المستدام عملية عالية الكفاءة لتحويل المواد الخام إلى وقود قابل للاستهلاك، وذلك من حيث ارتفاع معدل استهلاك الطاقة، وصعوبة التخلص من النفايات الناتجة عن العملية.

3-3: غياب التوافق حول متطلبات الاستدامة

إن عدم وجود إجماع عالمي حول معايير موحدة لمتطلبات الاستدامة يؤدي إلى تردد منتجي الوقود المستدام وعدم القدرة على اختيار تكنولوجيا التصنيع المناسبة حيث من الممكن أن يسبب عدم التناسق الإقليمي حول معايير الاستدامة التي يجب على المنتجين الالتزام بها خلق بيئة تنافسية غير متكافئة وغير عادلة.

3-4: اختلاف السياسات بين الدول المتجاورة وتعقيد الإجراءات

يختلف الإطار العام لسياسة وخطط الاستدامة من دولة لأخرى، كما تختلف فيما بينها من حيث طريقة ونسبة الحوافز التي تقدمها مما يؤدي إلى تراجع المستثمرين عن المغامرة في إنتاج وقود الطيران المستدام

من جهة أخرى قد تستغرق إجراءات الموافقة على إدخال نوع جديد من الوقود للاستخدام في الطائرات عدة سنوات. فالموافقة لا تقتصر على هيئات اختبار مواصفات الوقود، إنما تتعلق أيضاً بمصنعي كل من محركات الطائرات وهياكلها. فعلى سبيل المثال استغرقت عملية الحصول على الموافقة لاستعمال وقود الطيران المنتج من مجمع "ساسول" لتحويل الفحم إلى سوائل بطريقة فيشر تروبش في جنوب أفريقيا فترة تزيد عن سبع سنوات، وبشرط عدم تجاوز نسبة مزجه مع الوقود النفطي عن 50%. علماً أنه إلى الآن لم تتم الموافقة على نسبة مزج تصل إلى 100% لأي نوع من أنواع الوقود الاصطناعي (BOSCH, J., et al., 2017)

3-5: صعوبة تأمين المواد الأولية اللازمة لإنتاج الوقود المستدام

تؤدي المنافسة على شراء المواد الخام اللازمة لتصنيع الوقود المستدام إلى اضطراب أسعارها وبالتالي ابتعاد المستثمرين عن الدخول في مشاريع غير مستقرة، وخصوصاً أن المواد الخام تشكل نسبة كبيرة من تكاليف التصنيع، وقد سجل العديد من حالات فشل الانتقال من وضع المشروع التجريبي إلى حالة الإنتاج التجاري بسبب ارتفاع تكاليف المواد الخام. أحد هذه المشاريع مشروع مصفاة Range Fuel الحيوية لإنتاج الإيثانول الحيوي في الولايات المتحدة الأمريكية طاقتها الإنتاجية 380 ألف لتر في السنة بتمويل من الحكومة ومستثمرين من القطاع الخاص، حيث استغرقت أعمال الإنشاء ثلاث سنوات، وبعد إنتاج أول كمية من الإيثانول في عام 2010 أعلن عن إفلاس المشروع بسبب ارتفاع تكاليف الحصول على الكميات المناسبة من المواد الخام.

3-6: الآثار البيئية السلبية لإنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام

تنجم الآثار البيئية الضارة لإنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام من انبعاثات غازات الدفيئة التي تتشكل خلال دورة حياة الوقود، بدءاً من إنتاج المواد الأولية، ثم عمليات الإنتاج وحتى الاستهلاك.

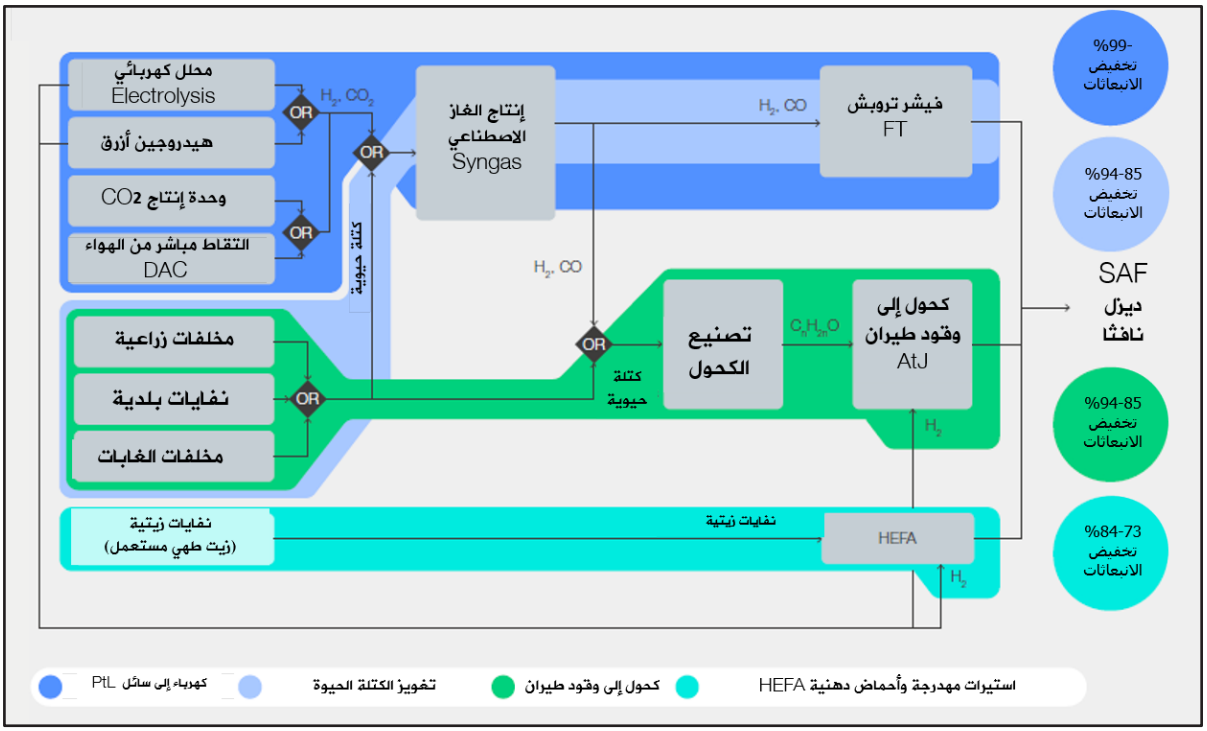
ففي مرحلة الإنتاج تختلف نسبة تخفيض انبعاثات حسب التقنية المتبعة في التصنيع ونوع الوقود المنتج، فعلى سبيل المثال تصل نسبة تخفيض الانبعاثات في تقنية تحويل الطاقة الكهربائية إلى سائل PtL حتى 99% بينما تتراوح نسبة التخفيض في تقنية هدرجة الإستيرات والأحماض الدهنية HEFA ضمن المجال (73-84%). يبين الشكل (3-2) نسبة تخفيض الانبعاثات لأهم تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام.

تكتسب انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن حرق وقود الطيران أهمية خاصة بالنسبة لتأثيرها على تغير المناخ، حيث أن الغازات التي تنطلق في المستويات العالية من طبقة الهواء الجوي يكون تأثيرها أكبر مقارنة بالغازات التي تنطلق على مستوى الأرض. كما يختلف تركيب غازات الاحتراق وشدة تأثيرها تبعاً لنوع الطائرة وكفاءة حرق الوقود. فبالإضافة إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون تتشكل أيضاً أكاسيد النتروجين التي تسبب تشكل غاز الأوزون في طبقات الجو المنخفضة.

من الانعكاسات الأخرى لإنتاج وقود الطيران المستدام هي الآثار البيئية التي تترافق مع استخدام الأراضي الزراعية التي كانت تستخدم لإنتاج الغذاء، فضلاً عن أضرار استخدام المبيدات الحشرية، وما

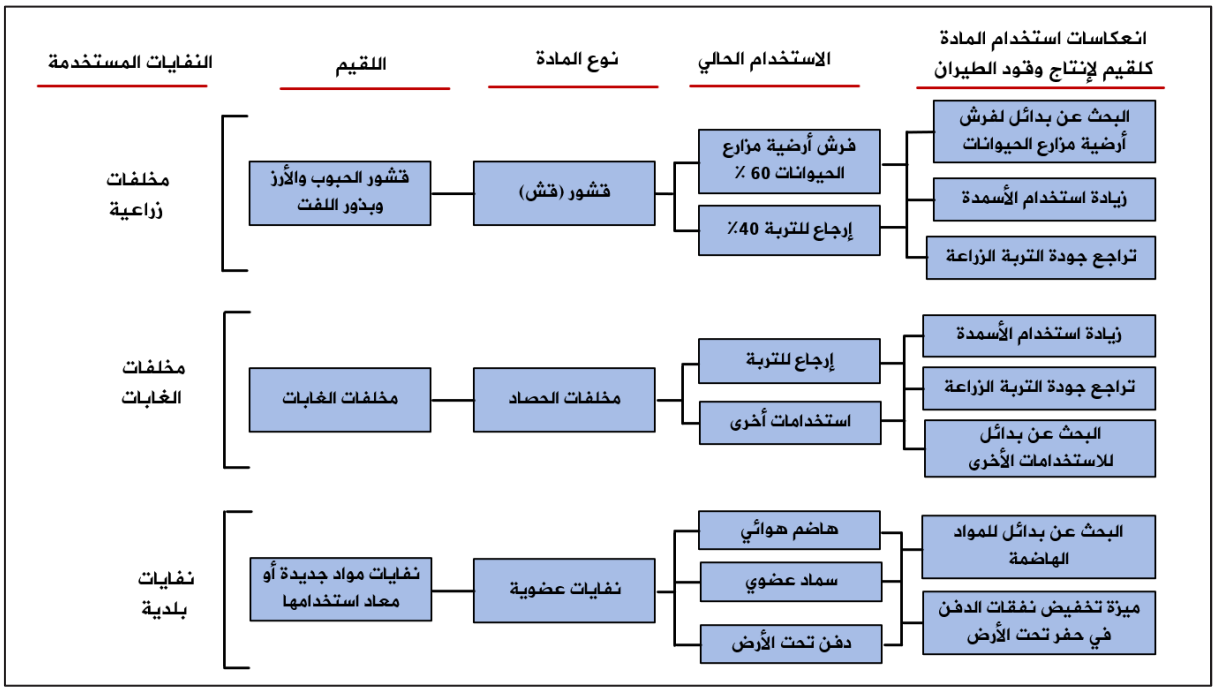
يتبعها من تأثير على التنوع البيولوجي. يبين الشكل (3-3) انعكاسات استخدام النفايات كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام.

الشكل (3-2): نسبة تخفيض الانبعاثات لأهم تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: Barbara, L., & Galea, C., 2024

الشكل (3-3): انعكاسات استخدام النفايات كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام



المصدر: (Fantuzzi, A., et al., 2023)

وفيما يلي شرح لأهم انعكاسات استخدام المواد الزراعية المتجددة لإنتاج وقود الطيران المستدام.

3-6-1: انبعاثات غازات الدفيئة

يعتبر احتراق الوقود الحيوي محايداً لثاني أوكسيد الكربون، بافتراض أن الكمية المنبعثة مساوية لكمية ثاني أوكسيد الكربون التي أزالتها المادة الأولية (الكتلة الحيوية النباتية) من الغلاف الجوي أثناء عملية التمثيل الضوئي على مدار دورة حياتها. هذا صحيح بالنسبة للنباتات السنوية، حيث يتم امتصاص ثاني أوكسيد الكربون المنطلق من احتراق الوقود الحيوي بواسطة نبات جديد في العام التالي، أما الوقود الحيوي المنتج من مواد أولية مصنعة من النباتات المعمرة فإنه سيبقى في الغلاف الجوي لفترة أطول، حيث يستغرق النبات فترة زمنية أطول ليحل محل النبات المستهلك في تصنيع المواد الأولية. بالتالي، يساهم ثاني أوكسيد الكربون المنبعث في هذه الحالة بشكل أكبر في ظاهرة الاحتباس الحراري، حيث يظل في الغلاف الجوي لفترة أطول قبل أن تمتصه النباتات الجديدة. علاوة على ذلك، فإن عمليات الحصاد والمعالجة والنقل والعمليات الأخرى من سلسلة إمداد الوقود الحيوي تستهلك طاقة يمكن أن يؤدي إنتاجها إلى انبعاث غازات الدفيئة من خلال احتراق الوقود الأحفوري. فضلاً عن إمكانية تفاقم المشكلة نتيجة استخدام الهندسة الجينية للمواد الأولية.

3-6-2: الاستخدام المباشر وغير المباشر للأراضي الزراعية

عندما تزرع مساحة أرض لم تكن مزروعة سابقاً يحدث تغيير في مخزون الكربون في الغطاء النباتي للمنطقة. وعند تغيير استخدام الأراضي من الغطاء النباتي الغني بالكربون، مثل الغابات، إلى الغطاء النباتي الأقل ثراءً بالكربون، مثل الحقول، فإن ذلك يؤدي إلى تقليل كمية الكربون التي يمكن تخزينها في الأرض وبالتالي إلى زيادة انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون. لذلك يجب أن تؤخذ هذه التأثيرات في الاعتبار، عند اختيار المواد الأولية والمسارات التكنولوجية لإنتاج الوقود الحيوي المستدام.

يرمز مصطلح التغيير غير المباشر في استخدام الأراضي إلى تحويل المحاصيل الغذائية إلى مواد أولية لتصنيع الوقود الحيوي. على سبيل المثال، إذا تم تحويل محصول حقل الذرة، الذي كان يستخدم سابقاً لتلبية الطلب على الغذاء، لاستخدامه كمادة أولية، فيجب تلبية الطلب على الغذاء في مكان آخر. قد يؤدي هذا إلى نقل إنتاج الغذاء إلى مناطق أخرى من الأرض، والتي تخضع لعملية تغيير مخزون الكربون كما هو موضح أعلاه. من الناحية العملية، يصعب تحديد الانبعاثات الناتجة عن تغيير استخدام الأراضي غير المباشر لأنها تحدث في موقع مختلف عن الإنتاج الفعلي للمواد الأولية، مما يجعل تتبع

الانبعاثات أمراً صعباً. كما يجب عدم استخدام الأراضي المستخدمة لزراعة المحاصيل الغذائية لإنتاج المواد الخام للوقود الحيوي، لأن ذلك قد يؤدي إلى إزالة الغابات أو الأراضي الرطبة لخلق مساحة جديدة لإنتاج الغذاء أو لتعويض النقص في انخفاض إنتاج الغذاء.

3-6-3: تسرب العناصر الغذائية

توجد العناصر الغذائية بتركيزات عالية في العديد من الأسمدة، بما في ذلك روث الحيوانات. من أهمها الفوسفور (P) والنيتروجين (N). عند تسرب هذه العناصر من الحقول إلى البحيرات والجداول، قد يتسببان في زيادة نسبة المغذيات، مما قد يؤدي إلى استنفاد الأكسجين في الماء، والذي بدوره يمكن أن يتسبب في موت الحيوانات المائية. ومع ذلك فإن العناصر الغذائية (خاصة الفوسفور) هي أيضاً موارد قيمة لها العديد من الاستخدامات، فعلى سبيل المثال يستخدم الفوسفور في صناعة الأسمدة والتعدين (مثل إنتاج الفولاذ)، والمشروبات الغازية، وبالتالي فإن إعادة تدوير المغذيات أمر يجب أخذه في الاعتبار عند اختيار المواد الأولية والمسارات التكنولوجية لإنتاج وقود الطيران المستدام.

3-6-4: أضرار المبيدات الحشرية

تستخدم المبيدات لحماية المحاصيل من الآفات، مثل الأعشاب الضارة والفطريات والحشرات، بهدف تحسين غلة المحاصيل وجودتها، إلا أن لهذه المبيدات آثاراً ضارة على البيئة وصحة الإنسان، وخصوصاً عندما تتسرب إلى مصادر المياه. ويمكن تخفيف استخدام المبيدات الحشرية بتغيير طريقة استخدام الأراضي، فالنباتات المعمرة تستهلك مبيدات أقل من النباتات الموسمية.

3-6-5: التأثير على التنوع البيولوجي

يقصد بالتنوع البيولوجي تنوع وتكاثر النباتات والحيوانات والكائنات الحية الأخرى في النظام البيئي. ولهذا التنوع فوائد عديدة للبشرية، حيث تعتمد عليه معظم القطاعات الصناعية والزراعية مثل الأخشاب والمياه، والألياف، والغذاء، والأعلاف. وقد يؤدي تغيير استخدام بعض الأراضي، مثل الغابات، لزراعة مواد أولية لتصنيع الوقود الحيوي، إلى الإضرار بالتنوع البيولوجي لهذه المناطق. لهذا يجب التخطيط عند إنتاج الكتلة الحيوية بحيث لا تؤثر على التنوع البيولوجي.

3-6-6: استخدام المياه

تستهلك زراعة المواد الأولية كمية كبيرة من المياه التي أصبحت مصادرها شحيحة في العديد من مناطق العالم، ومن المتوقع أن تزداد هذه المشكلة مستقبلاً.

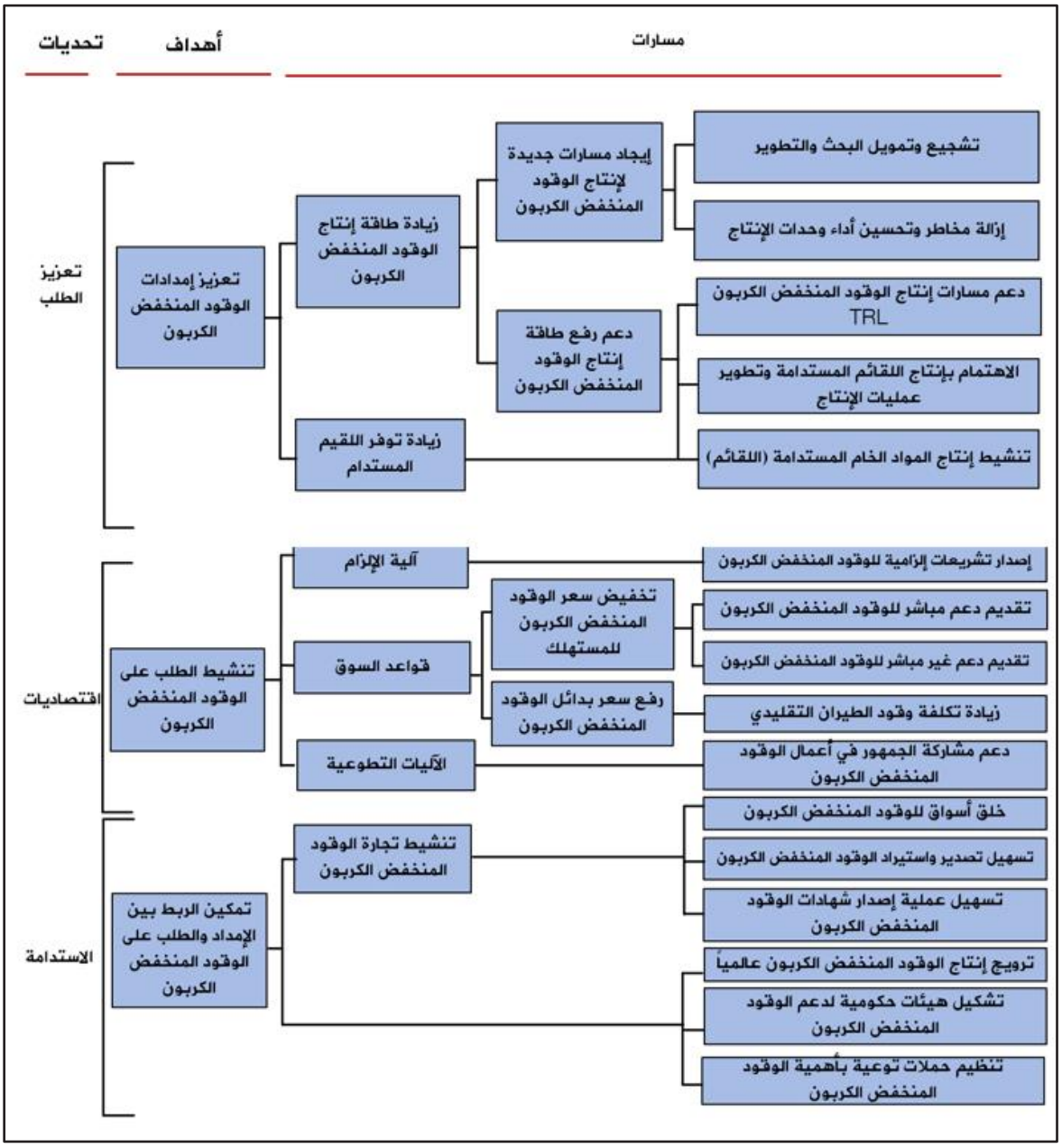
في الختام لا بد من مراعاة العديد من الجوانب عند إنتاج المواد الخام اللازمة لتصنيع وقود الطيران المستدام، أهمها:

- حاجة المواد الخام اللازمة لتصنيع وقود الطيران المستدام إلى توفر مساحات مناسبة من الأراضي وكميات كافية من المياه والمغذيات.
- وجود علاقة خطية بين أسعار الغذاء وإنتاج الوقود من مصادر حيوية.
- الأخذ بالاعتبار أن زراعة محاصيل البذور ينتج عنها كمية أكبر من ثاني أوكسيد الكربون مقارنة بالمحاصيل المعمرة، حيث أن عملية الحرث تؤدي إلى تشكل غاز ثاني أوكسيد الكربون نتيجة تأكسد الكربون المخزن في الحقل.
- تنفيذ تحليلات أكثر صرامة لدورة حياة الوقود المنخفض الكربون، وذلك من خلال الإجراءات التالية:
  - تضمين دراسة تقييم الآثار الثانوية لاختيارات استخدام اللقائم من مصادر متجددة مقارنة بالوقود الأحفوري الحالي.
  - مراعاة انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون من إنتاج الوقود وحتى احتراقه.
  - تضمين التأثيرات غير المتعلقة بثاني أوكسيد الكربون لكل من الإنتاج والاحتراق في تقييمات تأثير الوقود المنخفض الكربون.

3-7: تدابير تسهيل انتشار وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون

لتسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية تساهم في زيادة إمدادات الوقود المنخفض الكربون، أو تحفيز الطلب، أو تمكين الربط بين العرض والطلب. يبين الشكل (3-4) مسارات تسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون.

الشكل (3-4): مسارات تسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون



المصدر: (Fantuzzi, A., et al., 2023)

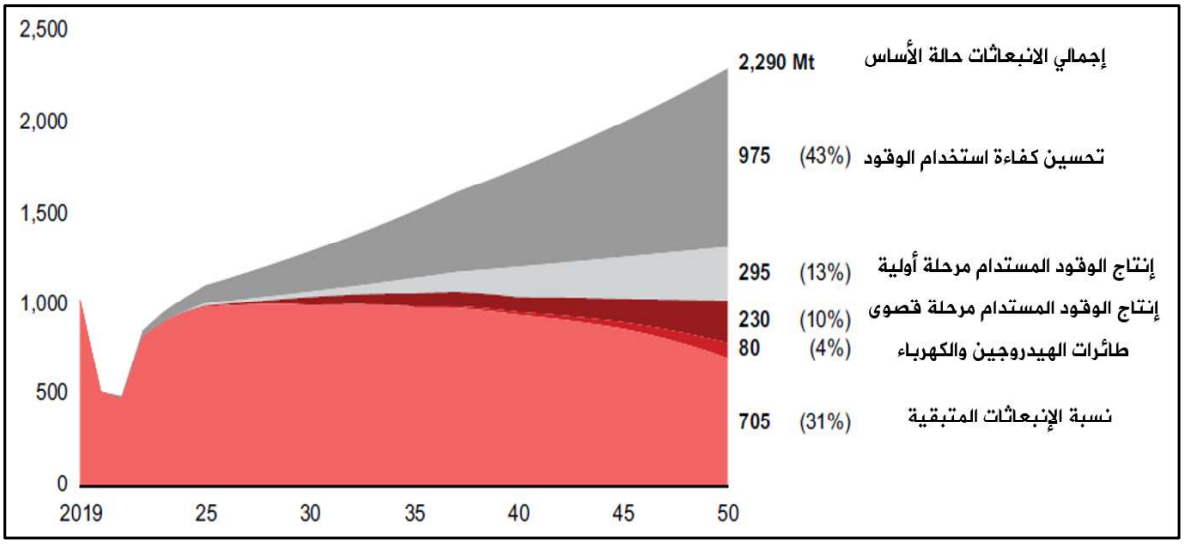
الفصل الرابع

مبادرات الحد من انبعاثات الكربون في قطاع الطيران

تشكل انبعاثات الكربون الناتجة من قطاع الطيران 2.5% من إجمالي الانبعاثات في العالم، حيث بلغت في عام 2023 نحو 670 مليون طن، وتشير التوقعات إلى أنها سترتفع بمعدل ثلاثة أضعاف بحلول عام 2050، أو ما يعادل 2.6 جيجا طن في السنة. (Bernard, Y., 2023)

على الرغم من تبني العديد من دول العالم رؤية واضحة لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر إلا أن أكثر السيناريوهات المتفائلة لا تتوقع خفض انبعاثات قطاع الطيران أكثر من 70% من إجمالي انبعاثات CO_2 بحلول عام 2050. يبين الشكل (4-1) التخفيض المتوقع لانبعاثات CO_2 في قطاع الطيران بتطبيق تقنيات التخفيض.

الشكل (4-1): التخفيض المتوقع لانبعاثات CO_2 في قطاع الطيران بتطبيق تقنيات التخفيض



المصدر: (Danicourt, J., et. 2022)

اعتمدت منظمة الطيران المدني الدولي ICAO خطة تتضمن عدة إجراءات لخفض انبعاثات الكربون إلى الصفر في قطاع بحلول عام 2050، أهمها تحسين تقنيات الطائرات، وتطوير عمليات التشغيل، واستخدام الوقود المستدام المنخفض الكربون، إضافة إلى إجراءات تجارة الكربون. كما أصدر

الاتحاد الأوروبي مجموعة من الإجراءات، ويعمل على إعداد العديد من التشريعات المتعلقة بنزع الكربون في قطاع الطيران. أما الولايات المتحدة فقد أعلنت عن إمكانية خفض انبعاثات الكربون بنسبة 20% بحلول عام 2030، وإلى الصفر بحلول عام 2050، من خلال نزع الكربون من الهواء الجوي في أماكن أخرى بالكميات الموازية للكميات الناتجة عن وقود الطيران. (Royal Society, 2023)

4-1: إجراءات تغيير نوع الوقود

تتركز إجراءات خفض انبعاثات الكربون المتعلقة بنوع الوقود في أربعة مسارات، هي الهيدروجين والأمونيا والوقود الحيوي والوقود الكهربائي e-fuel.(Sustainable Aviation, 2022)

4-1-1: استخدام الهيدروجين كوقود

يمكن استخدام الهيدروجين في الطائرات إما بالحرق في المحرك أو من خلال خلايا الوقود Fuel Cells لإنتاج الكهرباء اللازمة لتدوير المراوح. ويمكن تخزين الهيدروجين إما على شكل سائل في درجة حرارة (- 253 °م) أو على شكل غاز مضغوط إلى 350-700 بار.

ينتج الهيدروجين حالياً على مستوى تجاري بعملية التهذيب البخاري للميثان باستخدام الغاز الطبيعي كلقيم ويبلغ معدل إنتاجه في العالم حوالي 70 مليون طن/السنة. كما يمكن إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولدة بمصادر طاقة متجددة، ويسمى بالهيدروجين الأخضر، أو من خلال التهذيب البخاري للغاز الطبيعي مع تطبيق تقنية اصطياد وتخزين الكربون ويسمى بالهيدروجين الأزرق. (Royal Society, 2023)

يمكن أن يلعب الهيدروجين دوراً مهماً في مزيج وقود الطيران، إلا أن استخدامه لا يزال يواجه تحديات كبيرة، فعلى الرغم من أن الهيدروجين يتميز بعدم انطلاق غاز CO_2 عند استهلاكه، كما أن حجم محرك الطائرة يكون أصغر وبالتالي سينخفض الضجيج الناتج عن المحرك، إلا أن هناك صعوبات تتعلق بالحاجة إلى تعديل في تصميم محركات وهياكل الطائرات. كما أن زيادة الوزن اللازمة لتخزين الهيدروجين السائل وقصر المسافة التي يمكن أن تقطعها الطائرة تعتبر من أكبر المعيقات لاستخدامه كوقود للطائرات على الرغم من أن كثافة الطاقة للهيدروجين السائل تبلغ 2.8 ضعف وقود الطائرات النفاثة التقليدي. (Newsom, R., et al., 2023)

4-1-2: استخدام الأمونيا كوقود

الأمونيا غاز ينتج من تفاعل الهيدروجين (المنتج من التهذيب البخاري للغاز الطبيعي) مع النتروجين المنتج من الهواء. يمكن حرق غاز الأمونيا في المحركات للحصول على قوة الدفع أو استخدامه في خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء اللازمة لتدوير المراوح. كما يمكن تخزين الأمونيا على شكل سائل في درجة حرارة (- 30 °م) أو تحت الضغط 1 بار. وعندما يستخدم الهيدروجين الأخضر في عملية الإنتاج تسمى الأمونيا بالأمونيا الخضراء، كما تسمى بالأمونيا الزرقاء عند استخدام الهيدروجين الأزرق. (Royal Society, 2023)

4-1-3: استخدام وقود الطيران الحيوي Bio-Jet

يطلق على وقود الطيران الحيوي إسم وقود الطيران المستدام SAF وينتج حالياً من مواد حيوية على مستوى تجاري لكن بكميات محدودة جداً لا تتجاوز 4% من إجمالي استهلاك قطاع الطيران في العالم من الوقود. (حسب تقرير وكالة الطاقة الدولية IEA)، ويوصف بأنه زيت نباتي مهدرج (HVO)، أو إستيرات وأحماض دهنية معالجة بالهيدروجين (HEFA). من مساوئ استخدام هذا النوع من الوقود ارتفاع تكاليف إنتاجه، والحاجة إلى مزجه مع الوقود النفطي. (BOSCH, J., et al.,2017)

4-2: تطورات تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام

شهدت السنوات القليلة الماضية توجه العديد من الدول نحو تسريع إجراءات تطوير التشريعات والمعايير الخاصة بوقود الطيران المستدام بعد المطالبات التي صدرت من الهيئات المهتمة بشؤون البيئة لزيادة الاهتمام بوقود الطيران المستدام مقارنة بأنواع الوقود المتجدد الأخرى المستخدمة في وسائل النقل البري. وفيما يلي نبذة عن أهم التطورات الخاصة بوقود الطيران المستدام في بعض مناطق العالم. (Newsom, R., et al., 2023)

4-2-1: تطور وقود الطيران المستدام في الولايات المتحدة الأمريكية

انطلقت رحلة إصدار التشريعات الخاصة بوقود الطيران المستدام في عام 2005 في إطار قانون سياسة الطاقة في الولايات المتحدة الذي تضمن معايير الوقود المتجدد RFS، ثم تم تحديث القانون في عام 2007.

في عام 2021 تم وضع هدف طموح لإنتاج وقود الطيران المستدام بحيث يصل إلى ثلاثة ملايين طن في السنة بحلول عام 2030، وقد تم دعم هذا الهدف بمجموعة إجراءات كالإعفاءات الضريبية، وتخصيص مبلغ 175 مليون دولار لتمويل المشاريع البحثية وتطوير تقنيات إنتاج وقود الطيران المستدام، كما تم تخصيص استثمارات ومنح قروض وصلت قيمتها إلى 4.3 مليار دولار لتمويل مشاريع إنتاج وقود الطيران المستدام.

في عام 2022 صدر قانون تخفيض التضخم الذي تضمن منح حوافز لاستهلاك وقود الطيران المستدام بقيمة 1.75 دولار للغالون، إضافة إلى تمويل البنية التحتية للوقود بمبلغ 245 مليون دولار. وفي عام 2023 أصدرت الحكومة الفيدرالية خارطة طريق تهدف إلى تخفيض تكاليف إنتاج وقود الطيران المستدام، وتعزيز الاستدامة، ورفع الطاقة الإنتاجية المحلية إلى 3 مليار غالون في السنة، وذلك للوصول إلى تخفيض 50% من انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن استعمال وقود الطيران التقليدي بحلول عام 2030، على أن تصل إلى 35 مليار غالون في السنة بحلول عام 2050 لتغطي 100% من الطلب المحلي على وقود الطيران في الولايات المتحدة. (Goldner, w., et al., 2022)

وعلى مستوى الولايات أصدر المشرعون مؤخراً في ولاية كاليفورنيا قانوناً يلزم المنتجين بمزج نسبة 20% من الوقود المستدام مع وقود الطيران النفطي بحلول عام 2030.

4-2-2: تطور وقود الطيران المستدام في الاتحاد الأوروبي

على الرغم من التحديات التي تواجه إنتاج وقود الطيران المستدام في دول الاتحاد الأوروبي، كمحدودية الأراضي القابلة للزراعة، وارتفاع تكاليف الطاقة، وندرة توفر اللقائم الحيوية، إلا أنها نجحت في إصدار التشريعات والمبادرات التي يمكن أن تساهم في تشجيع عمليات الإنتاج والاستهلاك. (Barbara, L., & Galea, C., 2024)

بدأ الاتحاد الأوروبي العمل بمخطط تجارة الانبعاثات في 2005 وهو نظام للبدلات القابلة للتداول للشركات التي تغطي قطاعات صناعية مختارة (بما في ذلك توليد الطاقة الكهربائية والحرارية، والصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، والطيران). يعتمد النظام على مبدأ "الحد الأقصى والتجارة"، بحيث يتم تخفيض الحد الأقصى تدريجياً، بما يتماشى مع الأهداف الإجمالية لغازات الدفيئة للشركاء المشاركين، وأصبح منذ ذلك الحين حجر الزاوية في أدوات التخفيف من غازات الاحتباس الحراري، والتي تغطي اليوم نحو 45% من إجمالي انبعاثات الاتحاد الأوروبي.

تم تضمين انبعاثات قطاع الطيران في نظام مخطط تجارة الانبعاثات اعتباراً من عام 2012. ويشمل ذلك الانبعاثات من وإلى وضمن دول الاتحاد الأوروبي. أما الرحلات الخارجية فتم استثناؤها (Wormslev, E., et al., 2016 p.51)

ينص مخطط تجارة الانبعاثات على منح شركات الطيران تصاريح قابلة للتداول تغطي مستوى محدداً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من رحلاتها الجوية سنوياً. وعلى أن يبقى سقف الانبعاثات المسموح كما هو في كل عام خلال الفترة 2013-2020، بعد ذلك يتم تخفيضه بنسبة 5 % من متوسط المستوى السنوي لانبعاثات الطيران في الفترة 2004-2006. يتم تخصيص حوالي 82% من الانبعاثات على أنها تصريح مجاني لقطاع الطيران والنسبة 18٪ المتبقية (بالإضافة إلى الانبعاثات فوق الحد الأقصى) يجب تعويضها بشهادات الكربون.

في عام 2020 تبنى الاتحاد الأوروبي استراتيجية الاستدامة والتنقل الذكي التي تهدف إلى تشجيع إنتاج واستهلاك الوقود المستدام في قطاع الطيران.

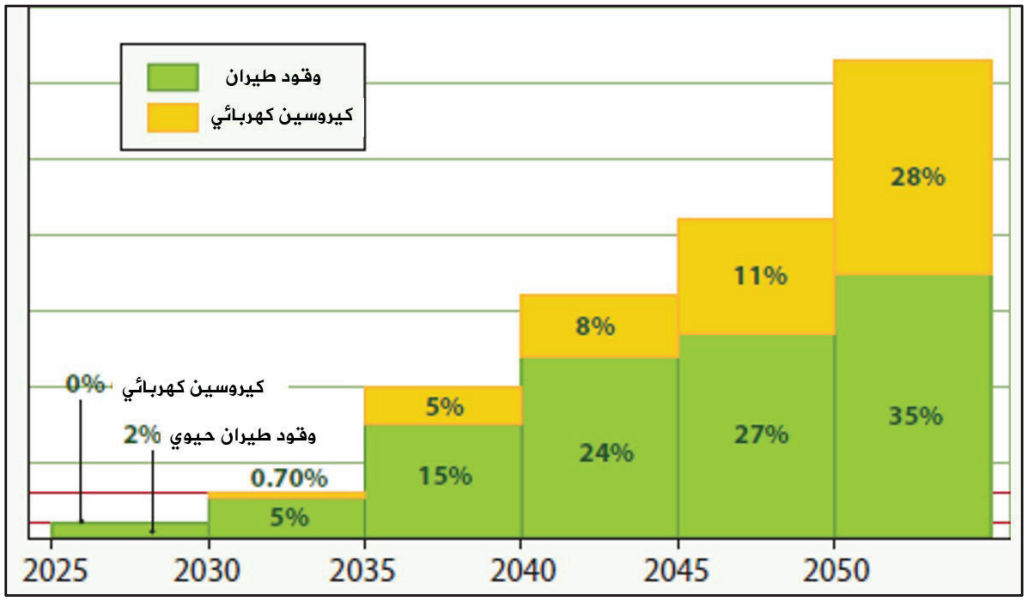
كما أطلق الإتحاد الأوروبي مؤخراً مبادرة الوقود المتجدد ReFuel EU التي تهدف إلى دعم أسواق وقود الطيران الأوروبية في الزيادة التدريجية لنسبة استخدام وقود الطيران المستدام بحيث تلتزم المطارات الأوروبية بنسبة مزج قدرها 5% بحلول عام 2030 كحد أدنى وعلى أن تصل إلى 63% بحلول عام 2050، إضافة إلى رفع نسبة مزج وقود الطيران الاصطناعي من 0.7% بحلول عام 2030 إلى 28% بحلول عام 2050. وتشترط المبادرة الأوروبية أن تكون كثافة الكربون لوقود الطيران المتجدد المستخدم أقل بنسبة 65% مقارنة بالوقود النفطي التقليدي. (Bauen, et al., 2022) في عام 2009 صدرت توجيهات الطاقة المتجددة التي تلزم دول الاتحاد الأوروبي بأن لا تقل نسبة وقود النقل من مصادر متجددة عن 10% بحلول عام 2020.

في عام 2016 صدرت أهداف الاتحاد الخاصة بالطاقة والمناخ وتضمنت تحديد هدف أن لا تقل نسبة الطاقة المتجددة عن 27% من إجمالي الطاقة المستهلكة بحلول عام 2030. كما أصدر الاتحاد في نفس العام مبادرة وقود الطيران المستدام المتضمنة إنشاء مشروع مشترك لإنتاج وقود الطيران المستدام بطاقة إنتاجية كبيرة.

كما تم إصدار قرار الوقود المتجدد ReFuel EU الذي بدأ العمل به في 1 يناير 2023 نتيجة مفاوضات انطلقت في بداية عام 2022، بين ثلاث مؤسسات تابعة للاتحاد الأوروبي، وهي المفوضية الأوروبية، والبرلمان الأوروبي، ومجلس الاتحاد الأوروبي. يتضمن القرار إعطاء مهلة عامين للشركات

المنتجة لوقود الطيران بحيث تبدأ بمزج الوقود المستدام والوقود الكهربائي e-fuel مع الوقود النفطي التقليدي اعتباراً من بداية عام 2025 بنسبة محدودة لا تتجاوز 2% على أن ترتفع بشكل تدريجي لتصل إلى 63% بحلول عام 2050. يبين الشكل (4-2) تطور الحد الأدنى لمزج وقود الطيران الحيوي والكهربائي في قرار الاتحاد الأوروبي للوقود المتجدد ReFuelEU

الشكل (4-2): تطور الحد الأدنى لمزج وقود الطيران الحيوي والكهربائي في قرار الاتحاد الأوروبي للوقود المتجدد ReFuelEU



المصدر: (Nelson, R., 2022)

وعلى مستوى الدول الأوروبية، أصدرت **ألمانيا** مبادرة في عام 2016 تتضمن هدف دعم إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام بحيث تصل نسبته إلى 10% من إجمالي وقود الطيران المستهلك بحلول عام 2025، وفي عام 2021 أصدرت **النرويج** قانوناً يلزم شركات الطيران باستخدام الوقود المستدام بنسبة 0.5% كمرحلة أولى على أن ترتفع بشكل تدريجي لتصل إلى 30% بحلول عام 2030، وبهذا تكون النرويج أول دولة في العالم تصدر قانوناً ملزماً لاستخدام وقود الطيران المستدام. كما أصدرت **السويد** قانوناً مماثلاً يلزم الطائرات بنسبة مزج الوقود المستدام إلى الوقود النفطي 1% على أن تصل إلى 30% بحلول عام 2030، ومن المتوقع أن تصدر كل من **فلندا وهولندا** قانوناً مماثلاً ثم تتبعها باقي دول الإتحاد الأوروبي. (Padt, A., 2021 p.70)

5-2-3: تطورات وقود الطيران المستدام في آسيا

تسعى الهند إلى مزج نسبة 1% من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2027، ثم إلى 2% في عام 2028، وسيتم تطبيق الخطة في البداية على الرحلات الدولية.

وأعلنت شركة النفط الهندية IOC. عن مشروع إنشاء وحدة لإنتاج وقود الطيران المستدام طاقتها الإنتاجية 80،000 طن متري سنويا مع LanzaJet في مصفاة Haryana، وذلك من خلال تحويل غاز النفايات إلى الإيثانول ووقود الطائرات.

أعلنت **سنغافورة** عن خطة لتزويد كافة الرحلات المغادرة من الدولة بوقود الطيران المستدام اعتباراً من بداية عام 2026 وذلك في إطار التزامها بالجهود الدولية للتحول إلى استخدام الوقود

أصدرت **ماليزيا** قراراً يلزم شركات الطيران بمزج الوقود المستدام بنسبة 1% اعتباراً من بداية عام 2026 وذلك في إطار خارطة الطريق الوطنية لانتقال الطاقة التي نشرتها في عام 2023 والتي تتضمن الوصول إلى نسبة مزج الوقود المستدام في قطاع الطيران إلى 47% بحلول عام 2050.

وفي أكتوبر 2023 وقعت شركة النفط الحكومية الماليزية "Petronas" وثاني أكبر شركة لتكرير النفط في اليابان Idemitsu Kosan Co. اتفاقية للتعاون في تطوير وتوزيع وقود الطيران المستدام. كما وقعت شركة "Petronas" اتفاقية مع مجلس زيت النخيل الماليزي "Malaysia's Palm Oil Board" للتعاون في إعداد دراسة حول إمكانية استخدام زيت الطهي ونفايات إنتاج زيت النخيل كلقيم لإنتاج وقود الطيران المستدام. (Hydrocarbon Processing, 2024)

في عام 2017، قررت **الصين** تنفيذ مخطط وطني لتداول الانبعاثات بهدف الحد من انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون وذلك اعتباراً من بداية عام 2020، لتغطي محطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم والغاز كمرحلة أولى، ومن المقرر أن تتوسع لتشمل سبعة قطاعات أخرى منها قطاع الطيران، وستكون الأكبر في العالم حتى الآن، حيث ستغطي سُبع انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون العالمية الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري. (IEA, 2021)

كما أعلنت إدارة الطاقة الوطنية الصينية في نوفمبر 2023 أنها ستطلق مشاريع تجريبية لتحفيز الإنتاج والاستهلاك المحلي للوقود الحيوي، بما في ذلك وقود الطيران المستدام SAF والديزل الحيوي. ولم تقدم تفاصيل عن التمويل والتوقيت.

في ديسمبر 2023، أعلنت شركة استثمار الطاقة الحكومية الصينية عن خطة لإنتاج 400 ألف طن سنوياً من وقود الطيران المستدام SAF في مقاطعة Heilongjiang الشمالية. سيبدأ المصنع كمشروع تجريبي بطاقة قدرها 10 آلاف طن سنوياً. ومن المقرر أن تنتج الدفعة الأولى من الوقود في أواخر عام 2025، وستتوسع إلى 400 ألف طن/السنة بحلول عام 2030.

في أبريل 2023 وقعت شركة إيرباص ومجموعة الصين الوطنية لوقود الطيران (CNAF) مذكرة تفاهم لزيادة إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام. كما وقعت مجموعة شركات مكونة من شركة Honeywell الأمريكية، وشركة Oriental Energy Company Ltd ومقرها جنوب مقاطعة Guangdong، ومنطقة التجارة الحرة في Tianjin اتفاقيات لإنتاج وقود الطيران المستدام بشكل مشترك بطاقة إنتاجية قدرها 1 مليون طن سنوياً.

أما **اليابان** فقد أعلنت في عام 2023 عن خطة للبدء بمزج وقود الطيران المستدام بنسبة 10% في الرحلات الدولية بحلول عام 2030. كما وقعت مجموعة هيئات مكونة من مؤسسة Nippon للصناعات الورقية، ومؤسسة Sumitomo، ومعهد Green Earth، اتفاقية تعاون لبحث إمكانية إنتاج الإيثانول الحيوي من النفايات الخشبية المنتجة من صناعة الورق وذلك لاستخدامه كمادة خام لإنتاج وقود الطيران المستدام بحلول 2027.

يذكر أن العديد من الشركات العالمية الأخرى تبحث إمكانية إنتاج وقود الطيران المستدام في اليابان، منها شركة Mitsubishi، وشركة Boeing، وشركة TotalEnergies وشركة Eneos Holding.

في **الفليبين** وقعت شركة الخطوط الجوية اتفاقية شراكة استراتيجية طويلة الأمد مع شركة Shell Eastern Petroleum لتزويد أسطول الطائرات بوقود الطيران المستدام من خلال الشراء من أسواق آسيا الباسيفيك والشرق الأوسط بمعدل مبدئي قدره 25 ألف طن متري سنوياً كحد أدنى.

في **أستراليا**، أطلقت مجموعة Qantas تحالفاً لتطوير إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام سمي "تحالف وقود الطيران المستدام" يتكون من شركات نقل أسترالية، ومجموعة Macquarie لخدمات التمويل العالمية، ومجموعة Boston Consulting ومجموعة Woodside Energy . كما اتفقت Qantas مع شركة Airbus على استثمار مبلغ 1.34 مليون دولار أمريكي لمشروع إنتاج وقود الطيران المستدام من المخلفات الزراعية في المصفاة الجاري إنشاؤها في ولاية Queensland الأسترالية. ومن المتوقع أن تنتج المصفاة 100 مليون لتر من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2025.

يذكر أن أستراليا تخطط لمزج وقود الطيران المستدام بنسبة 10% بحلول عام 2023، وعلى أن تصل النسبة إلى 60% بحلول عام 2050.

في **نيوزيلاندا**، خصصت الحكومة، بالتعاون مع شركة الطيران النيوزيلاندية، مبلغ 1.34 مليون دولار أمريكي لدراسة إمكانية إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام.

4-3: مبادرات هيئات الطيران الدولية

طورت صناعة الطيران عدة مبادرات خاصة بمكافحة تغير المناخ، بالتعاون والتنسيق مع منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO). يقود هذه المبادرات الاتحاد الدولي للنقل الجوي (IATA) ومجموعة عمل النقل الجوي (ATAG).

4-3-1: مبادرة منظمة الطيران المدني الدولي

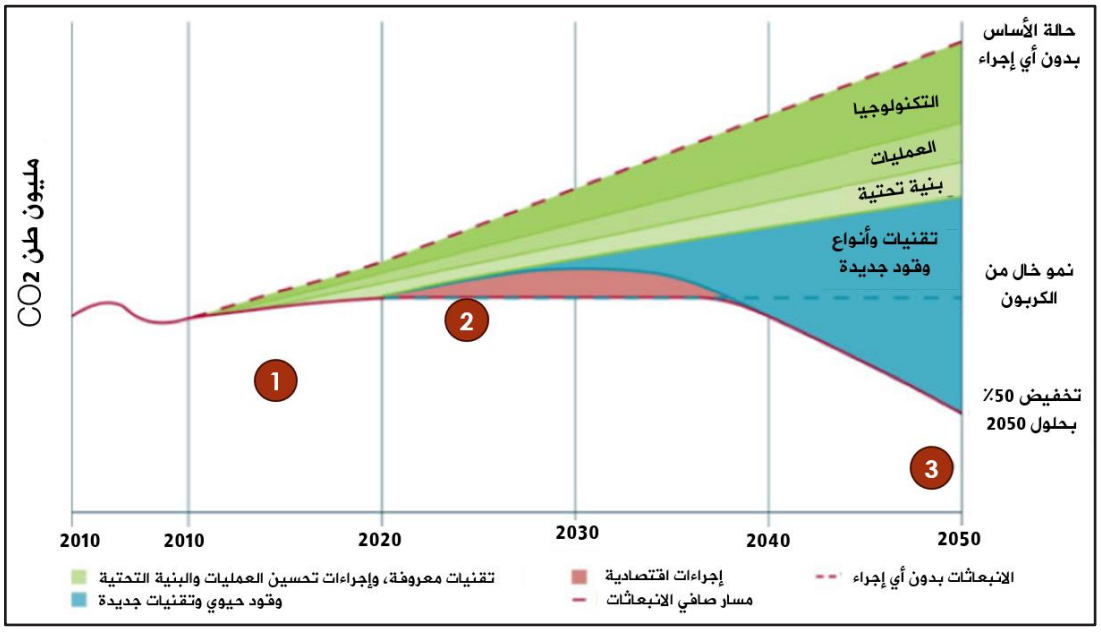
في عام 2007 أطلقت منظمة الطيران المدني الدولي استراتيجية تم تبنيها من قبل الصناعة بأكملها في عام 2008 أثناء انعقاد قمة الطيران والبيئة. ترتكز هذه الإستراتيجية على أربعة مجالات رئيسية لخفض انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون في النقل الجوي، هي التقنيات، والعمليات، والبنية التحتية، والأدوات الاقتصادية. ولكن لم يتم تقديم سياسة واضحة للوقود الحيوي.

وفي عام 2016 تبنت منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO) آلية عالمية تعتمد على مبدأ السوق سميت بخطة تعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي، تهدف إلى معالجة وتخفيف انبعاثات ثاني أوكسيد الكربون الناتجة عن قطاع الطيران الدولي بمعدل 85% من مستوى عام 2020 وذلك خلال الفترة 2024 ولغاية 2035. تتضمن الآلية التزام شركات الطيران بما يلي:(BOSCH, J. et al. 2017)

- تحسن سنوي قدره 1.5% في كفاءة الوقود من خلال الفترة 2009 إلى 2020
- نمو خالٍ من انبعاثات الكربون اعتباراً من عام 2020.
- تخفيض مطلق بنسبة 50٪ من انبعاثات الكربون بحلول عام 2050.

يعتمد تنفيذ هذه الإستراتيجية على أربعة مجالات رئيسية هي التكنولوجيا، والعمليات، والبنية التحتية، والوقود المتجدد. يبين الشكل (4-3) دور مجالات تنفيذ استراتيجية خفض انبعاثات الكربون في قطاع الطيران

الشكل (4-3): دور مجالات تنفيذ استراتيجية خفض انبعاثات الكربون في قطاع الطيران



المصدر: (Wormslev, E., et al., 2016)

4-3-2: مبادرة مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام

تأسست مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام SAFUG في عام 2008، بهدف تسريع تطوير وتسويق الوقود الحيوي المستدام القابل للمزج مع الوقود النفطي والاستخدام المباشر في الطائرات. تتكون المجموعة من شركات النقل الجوي ومنظمات صناعة الطيران الأخرى، وتستهلك حوالي 33 % من الطلب العالمي على وقود الطيران.

بالرغم من الاهتمام الواسع النطاق بإصدار التشريعات إلا أنها لم تتناول استعمال الوقود الحيوي المستدام بالشكل المناسب، باستثناء ما تمت مناقشته من خلال أنظمة تجارة وتداول انبعاثات الكربون مثل أنظمة تداول الانبعاثات، وبالتالي من غير المرجح أن تدعم شركات الطيران استخدام الوقود الحيوي على المدى القريب. (BOSCH, et al., 2017)

تشترط مجموعة مستخدمي وقود الطيران المستدام SAFUG أن يحقق وقود الطيران الحيوي المستدام الشروط التالية: (Wormslev, E., et al., 2016)

- أن يكون تأثيره ضئيل على التنوع البيولوجي
- أن يلبي معايير الاستدامة فيما يتعلق باستخدام الأرض والمياه والطاقة
- لا يزيح أو ينافس المحاصيل الغذائية والأعلاف

- يساهم في تحسين الاقتصاد ورفع مستوى المعيشة للمجتمع
- لا يتطلب أي معدات خاصة للتعامل مع الوقود أو أنظمة التوزيع أو تغيير في تصميم محرك الطائرة.

4-4: تطورات إنتاج وقود الطيران المستدام في الدول العربية

على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن لديها فرصاً ثمينة لتكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، والساليكورنيا Salicornia التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة. ولتعظيم طاقة إنتاج الوقود المستدام والمنخفض الكربون تحتاج الدول العربية إلى تنفيذ بعض الإجراءات، من أهمها:

- **تعزيز التعاون بين صناعة الطاقة وقطاع الطيران**

حققت بعض الدول العربية تقدماً ملحوظاً في بناء مبادرات وعلاقات تكاملية وثيقة بين صناعتي الطاقة والطيران، بهدف تعزيز إمدادات الوقود المستدام، وتتركز هذه المبادرات في دول الخليج العربية نظراً لما تمتلكه من بنية تحتية واسعة، فضلاً عن موقعها الجغرافي القريب من الأسواق الأسيوية والأوروبية، إلا أن دور الحكومات في إصدار التشريعات المساندة لهذه المبادرات لا يزال غائباً.

- **إصدار التشريعات والسياسات الداعمة**

لا تزال عملية إصدار التشريعات الخاصة بإنتاج وقود الطيران المستدام في الدول العربية في مراحلها الأولية، باستثناء دولة الإمارات العربية المتحدة التي أعلنت عن خارطة طريق لدعم إنتاج وقود الطيران المستدام بمساندة المنتدى الاقتصادي الدولي (Barbara, L., & Galea, C., 2024).

تكتسب التشريعات والسياسات الحكومية دوراً مهماً في تشجيع انتشار وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، وذلك نظراً لارتفاع تكاليف الإنتاج مقارنة بالوقود النفطي التقليدي، والحاجة إلى التعاون مع أطراف عديدة كمزودي التكنولوجيا، وشركات الإنتاج، والتسويق، والتوزيع. ولكي تكون السياسات الخاصة بوقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون فعّالة، يجب أن تتوفر فيها الخصائص التالية:

- أن تكون مستقرة وقابلة للتنفيذ حتى يكون القطاع الخاص على استعداد للمشاركة في الاستثمار.
- أن تكون صالحة لمدة كافية لتغطية الفترة الزمنية لتطوير المشروع (على سبيل المثال، 10 سنوات أو أكثر بحيث توفر درجة من القدرة على التنبؤ للمستثمرين.
- أن تكون محايدة من الناحية التكنولوجية لتمكين مسارات الإنتاج المتنوعة وسلاسل التوريد من التطور.
- ربط الحوافز بالأداء (على سبيل المثال، يجب تقدير الشركات التي تساهم بأداء أعلى في خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري).
- التعرف على احتياجات الشركات المتعثرة ومساندتها بالمنح والقروض.
- تحقيق آليات لتشجيع توسيع طاقة إنتاج الوقود المستدام، وتعزيز الابتكار التكنولوجي، ودفع الكفاءات لتوفير إمدادات كافية لتحقيق إزالة الكربون من قطاع الطيران.
- أن تكون مصممة بدعم سياسي من كافة الهيئات الحكومية المعنية.
- أن تكون مرنة وتحقق فوائد للمجتمع والبيئة.

- **تحسين الأداء التشغيلي لمصافي تكرير النفط**

يمكن لمصافي تكرير النفط القائمة في الدول العربية توسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة التي تعتمد على تكرير مواد خام متجددة إلى جانب النفط الخام بهدف تخفيض البصمة الكربونية لمنتجات المصفاة وإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون LCAF، حيث أن المعالجة المشتركة تعتبر حلاً فعالاً من حيث التكلفة وقريب الأمد لتوسيع نطاق إنتاج الوقود المستدام في المنطقة.

- **إنتاج وقود الطيران المستدام الكهربائي** e-SAF

تمتلك الدول العربية فرصة واعدة لإنتاج الوقود الكهربائي وتصديره إلى الأسواق العالمية بأسعار منافسة نظراً لما تتمتع به من قدرة على إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة بتكاليف منخفضة، حيث تتوفر فترات طويلة من السطوع الشمسي والأراضي الواسعة، ما يمكنها من إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الكهربائية المولدة من مزارع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، إلا أن إنتاج الوقود الكهربائي يواجه حالياً صعوبة تتعلق بالجدوى الاقتصادية لاستخدام الهيدروجين الأخضر حيث يلجأ

المستثمرون إلى استخدامه في عمليات إنتاج الأمونيا الخضراء أو الميثانول، باعتبارها صناعة ناضجة وتكلفتها أقل من تكلفة إنتاج الوقود الكهربائي.

تجدر الإشارة إلى أن المنظمة العربية للطيران المدني ACAO قد أعلنت في عام 2024 عن سعيها لتبني مبادرة عربية لتشجيع تطوير وإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون ومصادر الطاقة الأخرى النظيفة لأغراض الطيران. تقوم هذه المبادرة على دراسة إنشاء فريق إقليمي عربي مشترك مع منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، والتنسيق مع مؤسسات التمويل لتمويل دراسات الجدوى الفنية حول إمكانات الدول العربية لتطوير وإنتاج أنواع وقود الطيران المستدام. وتشير المنظمة إلى أن نسبة مشاركة وقود الطيران المستدام حالياً لا تتجاوز 0.2% من إجمالي استهلاك وقود الطيران في الدول العربية، وأن تحقيق أهداف الحياد الكربوني لقطاع الطيران يستلزم رفع الإنتاج إلى 30 مليار لتر بحلول عام 2030، و450 مليار لتر بحلول 2050. (ACAO, 2024). وفيما يلي عرض لأهم تطورات وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون في الدول العربية.

4-4-1: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الإمارات العربية المتحدة

في عام 2014 انطلقت مبادرة أبو ظبي لوقود الطيران الحيوي Biojet Abu Dhabi، تهدف إلى بحث إمكانية إنشاء سلسلة إمداد لوقود الطيران الحيوي في دولة الإمارات العربية المتحدة، بالتعاون بين طيران الإتحاد، وشركة بوينغ، وشركة أبو ظبي لتكرير النفط "تكرير"، وشركة توتال الفرنسية، ومعهد "مصدر" للعلوم والتكنولوجيا. وفي عام 2015 أصدرت المجموعة خارطة طريق تتضمن بعض التوصيات المتعلقة بإمكانية إنتاج اللقائم الحيوية، وأنواع التقنيات التي يمكن استخدامها، والإجراءات الممكن تطبيقها لتأسيس سلسلة إمداد وقود الطيران المستدام.

تجدر الإشارة إلى أن دولة الإمارات العربية المتحدة قد أعلنت عن خارطة طريق وطنية لوقود الطيران المستدام، حددت من خلالها هدفاً لتحقيق إنتاج سنوي يصل إلى 700 مليون ليتر من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2030، مما سيساهم في خفض ما يصل إلى 4.8 مليون طن من غاز ثاني أوكسيد الكربون. كما أعلنت دولة الإمارات التزامها بالوصول إلى صفر انبعاثات كربونية بحلول عام 2050.

في 30 يناير/ كانون الثاني 2023 أجرت دولة الإمارات أول رحلة تجريبية من نوعها في الشرق الأوسط باستخدام وقود الطيران المستدام بنسبة 100% في أحد محركات طائرة بوينغ 777، انطلقت الرحلة التجريبية من مطار دبي الدولي، وحلقت لمدة ساعة في المنطقة الساحلية المجاورة لدبي. يتكون

المهدرجة والأحماض الدهنية والكيروسين البارافيني الاصطناعي HEFA-SPK، والثاني من إنتاج شركة Virent يتكون من الكيروسين العطري الاصطناعي المنزوع الأوكسجين بالهدرجة HDO-SAK.تكمن أهمية هذه التجربة في إثبات إمكانية استخدام الوقود المستدام بنسبة 100% بينما لم تصل نسبة مزج الوقود المستدام مع الوقود النفطي التقليدي في مناطق العالم إلى أكثر من 50%.

بتاريخ 24 أكتوبر 2023 نفذت دولة الإمارات أول رحلة طيران تجريبية انطلقت من مطار دبي الدولي إلى سيدني باستخدام وقود طيران مستدام قامت بإنتاجه شركة شل، وإرساله إلى شبكة وقود الطيران في مطار دبي الدولي، ويتكون من مزيج وقود طيران مستدام بنسبة 40% ووقود طائرات تقليدي Jet A-1 بنسبة 60%، وبلغت كميته 350 ألف غالون. (Hydrocarbon Processing, 2023)

كما حصلت شركة نفط أبو ظبي الوطنية في عام 2023 على إجازة من المنظومة الدولية لمنح شهادات استدامة الكربون * ISCC لإنتاج وقود طيران مستدام في مصفاة "الرويس" التي تبلغ طاقتها التكريرية 920 ألف ب/ي، وتعتبر دولة الإمارات العربية المتحدة أول دولة تحصل على مثل هذه الشهادة في منطقة الشرق الأوسط، وهذا سيمكنها من تزويد المطارات الدولية بوقود الطيران المنخفض الكربون والمستدام من الزيوت النباتية المستعملة.

في عام 2024 وقعت شركة أبو ظبي لطاقة المستقبل الإماراتية Masdar اتفاقية مع شركة Total Energies الفرنسية لبحث إمكانية إنتاج وقود الطيران المستدام والميثانول. يهدف المشروع إلى التقاط CO_2 من المصادر الصناعية كلقيم إضافة إلى الهيدروجين الأخضر المنتج من الطاقة المتجددة، اللذين سيستخدمان لإنتاج الميثانول الأخضر ووقود الطيران المستدام SAF.

يأتي هذه المشروع في إطار استراتيجية الهيدروجين الوطنية لدولة الإمارات العربية المتحدة وسياسة إنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون، والتي تتضمن تزويد خطوط الطيران الوطنية في مطارات الدولة بوقود الطيران المستدام بنسبة 1% من إجمالي الوقود المستهلك بحلول عام 2031. ومن المتوقع أن يساهم المشروع في رفع إنتاج دولة الإمارات من الهيدروجين إلى 1.4 مليون طن في السنة بحلول عام 2031 (منها 1 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأخضر و0.4 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأزرق) ثم إلى 7.5 مليون طن/السنة بحلول عام 2040، ثم إلى 15 مليون طن/السنة بحلول عام 2050. (Kapoor, P., 2024)

* International Sustainability Carbon Certification

الأزرق) ثم إلى 7.5 مليون طن/السنة بحلول عام 2040، ثم إلى 15 مليون طن/السنة بحلول عام 2050. (Kapoor, P., 2024)

من جهة أخرى أنجزت دولة الإمارات العربية المتحدة خارطة طريق بالتعاون مع المنتدى الاقتصادي الدولي World Economic Forum لإنتاج وقود الطيران المستدام والهيدروجين المتجدد بتطبيق تقنية تحويل الكهرباء إلى سوائل Power to Liquid، بحيث يمكنها إنتاج نحو 15-73 % من استهلاكها لوقود الطيران من الوقود المستدام المنتج بتقنية تحويل الكهرباء إلى سائل.

كما وقعت كل من شركة بترول أبو ظبي الوطني "أدنوك" وشركة الطاقة المتجددة "مصدر" وشركة "بريتش بتروليوم" مذكرة تفاهم لإنجاز دراسة جدوى لمشروع إنتاج وقود الطيران المستدام من النفايات البلدية والهيدروجين.

5-4-2: تطورات وقود الطيران المستدام في مملكة البحرين

بدأت مملكة البحرين باستخدام وقود الطيران المستدام من خلال شركة طيران الخليج، الناقل الوطني لمملكة البحرين، حيث قامت بالتعاون مع الفورمولا 1 وشركة Boeing وشركة Rolls-Royce المنتجة لمحركات الطائرات، وشركة Neste المنتجة لوقود الطيران المستدام، بعرض جوي منخفض الانبعاثات في افتتاح موسم الفورمولا 1 لعام 2021 في حلبة البحرين الدولية في "الصخير". تأتي هذه المبادرة لتأكيد التزام المملكة بالمتطلبات الدولية لخفض الانبعاثات الكربونية لقطاع الطيران.

4-4-3: تطورات وقود الطيران المستدام في المملكة العربية السعودية

أعلنت شركتا "أرامكو" السعودية و"إيني" الإيطالية للنفط، عن توقيع اتفاق مع شركة "يونايتد إيرلاينز" الأميركية، أكبر شركة طيران في العالم، للانضمام إلى جهود شركة (OXCCU) البريطانية لبحث فرص خفض التكلفة الباهظة لوقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون بالتعاون مع شركة Energy Venture الأمريكية، وجامعة أوكسفورد البريطانية. (سكاي نيوز، 2023)

يأتي هذا المشروع في إطار جهود المملكة نحو تحقيق الاستدامة البيئية والتنمية المستدامة انطلاقاً من مستهدفات رؤية المملكة 2030 التي أولت حماية البيئة والموارد الطبيعية أهمية قصوى، من خلال الإعلان عن «مبادرة السعودية الخضراء»، و«مبادرة الشرق الأوسط الأخضر» اللتين سترسمان توجه المملكة والمنطقة في حماية الأرض والطبيعة ووضعها في خريطة طريق ذات معالم واضحة وطموحة، وستسهمان في تحقيق الأهداف العالمية الخاصة بتغير المناخ.

4-4-3: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة قطر

وقعت الخطوط الجوية القطرية اتفاقية مع شركة شل لتوريد 3000 طن متري من وقود الطائرات المستدام النقي في مطار شيفول بأمستردام. يهدف المشروع إلى تمكين الخطوط الجوية القطرية من مزج وقود الطائرات المستدام بنسبة 5% على الأقل خلال السنة المالية 2023-2024، كخطوة أولى من الهدف المحدد بنسبة 10% من إجمالي كمية الوقود المستهلك بحلول عام 2030. وبذلك تعتبر الخطوط الجوية القطرية هي أول شركة طيران في الشرق الأوسط وأفريقيا تقوم بشراء كمية كبيرة من الوقود المخصص للطائرات في أوروبا بما يتجاوز المتطلبات الحكومية.

كما وقعت الخطوط الجوية القطرية اتفاقية مع شركة Gevo. Inc، المنتجة لوقود الطيران المستدام ، تتضمن شراء 25 مليون جالون أمريكي من وقود الطائرات المستدام النقي على مدار خمس سنوات، ومن المتوقع أن تبدأ عمليات التسليم في عام 2028 في مطارات مختلفة في كاليفورنيا. وستقوم الخطوط الجوية القطرية بتوريد 5 ملايين جالون أمريكي من وقود الطائرات المستدام النقي كل عام وستمزجه مع إمداداتها الحالية من وقود الطائرات التقليدي.

4-4-4: تطورات وقود الطيران المستدام في دولة الكويت

عززت شركة البترول الكويتية العالمية المتفرعة من مؤسسة البترول الكويتية (KPC)، والتي تعمل تحت اسم Q8 في أوروبا، حضورها بشكل كبير في سوق وقود الطيران. واحتلت المؤسسة من خلال شركة Q8Aviation، موقعها كمورد رئيسي لوقود الطائرات في أوروبا، مستفيدة من تراجع صناعة تكرير النفط في هذه المنطقة، وتمكنت من إنشاء سلسلة إمداد عملاقة عبر مرافق الاستيراد التي أسستها في روتردام وسلوفينيا، فاستطاعت أن تستقطب أكثر من سبعين مطار دولي وإقليمي، ووصلت مبيعاتها السنوية من وقود الطيران إلى أكثر من 8 مليار لتر، لتزويد أكثر من 2000 طائرة تابعة لنحو 200 شركة طيران عالمية.

في إطار جهودها نحو الاستدامة، وقعت شركة Q8Aviation اتفاقيات تعاون وشراكات استراتيجية لتوفير وقود الطيران المستدام، منها على سبيل المثال، اتفاقية مع شركة EasyJet تقوم بموجبها تلبية متطلبات وقود الطيران المستدام للسنوات الخمس المقبلة، وذلك لمساعدة EasyJet لتحقيق هدفها للوصول إلى صافي انبعاثات كربونية صفرية بحلول عام 2050. (Q8Aviation, 2024)

4-4-5: تطورات وقود الطيران المستدام في جمهورية مصر العربية

وقعت كل من الشركة المصرية لتدوير النفايات الصلبة ECARU وشركة القلعة القابضة، وشركة Axens الفرنسية، اتفاقية لإعداد دراسات اقتصادية وفنية لمشروع إنتاج الإيثانول الحيوي، ووقود الطيران المستدام SAF. سوف تستغرق الدراسة سبعة أشهر. (Hydrocarbon processing, 2023)

4-4-6: تطورات وقود الطيران المستدام في سلطنة عمان

وقَّعت هيئة الطيران المدني مذكرة تعاون مشتركة مع مجموعة "OQ" العمانية وشركة " Sky Energy"؛ لدراسة تطوير منشأة لتصنيع وقود الطيران المستدام في سلطنة عُمان، حيث ستقوم الأطراف الموقعة بتحديد الإمكانيات الأساسية اللازمة لإنشاء الوحدة، وبناء القدرات من خلال الاستفادة من الخبرات العالمية، كما تنص مذكرة التعاون على بحث التقنيات المستخدمة في تصنيع وقود الطيران المستدام.

يأتي هذا المشروع في إطار جهود تعزيز الوقود الأخضر في سلطنة عُمان، وتسخير إمكانياتها لدعم إنتاج وانتشار وقود الطيران المستدام عالمياً. (وجهات، 2023)

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

- إن العائق الرئيسي أمام إنتاج وقود الطيران المستدام هو التكلفة، حيث يتراوح السعر من نحو الضعف إلى ثمانية أضعاف سعر وقود الطيران التقليدي، وفقاً لتحليل أجرته المؤسسات الدولية.
- إن الاستثمار في وقود الطيران منخفض الكربون يدعم تحول الصناعة نحو الاستدامة ويدفع التقدم في التقنيات الخضراء الأخرى.
- إن تحفيز إنتاج وقود الطيران المستدام يتطلب حوافز سياسية كبيرة لسد الفجوة السعرية بين وقود الطيران التقليدي والوقود الحيوي.
- للوصول إلى هدف الانبعاثات الصفرية الصافية، يجب الاستفادة من جميع المسارات المتاحة لإنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.
- يعد تمويل ودعم مؤسسات البحث والتطوير أمراً بالغ الأهمية لإيجاد التقنيات الحديثة لتحسين إنتاج وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون.
- من أهم الخصائص التي تساهم في انتشار استخدام وقود الطيران المنخفض الكربون المنتج من النفط أو الوقود الحيوي هي إمكانية مزجه مع الوقود النفطي التقليدي، وأن تتوافق خصائصه مع متطلبات المواصفات التي تحددها الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM 165521)، أو ما يعادلها في معيار وزارة الدفاع البريطانية (Defence 91-9122)، إضافة إلى متطلبات الأداء التشغيلي والشروط التي تضمن سلامة محركات الطائرات الحالية دون الحاجة إلى إجراء أية تعديلات عليها.
- يمكن أن تلعب مصافي تكرير النفط دوراً مهماً في إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون، وذلك من خلال تطبيق تقنية المعالجة المشتركة للمواد الخام المتجددة في عمليات تكرير النفط مثل وحدات التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، ووحدات المعالجة الهيدروجينية أو وحدات تقطير النفط الخام. وقد تلجأ بعض المصافي التي تتوفر لديها فائض في طاقة وحدات المعالجة الهيدروجينية إلى تعديل بعض المعدات في هذه الوحدات بحيث تصبح قادرة على معالجة مواد

خام متجددة فقط أو إنشاء مصافي حيوية متكاملة مع مصفاة تكرير النفط بحيث تستفيد من الخدمات المتاحة في المصفاة من مستودعات وخطوط أنابيب ومحطات مزج وتحضير المنتجات النهائية، إضافة إلى الخدمات الأخرى من الكهرباء والماء وبخار الماء والهيدروجين، ووحدات معالجة مياه الصرف الصناعي وغيرها.

- تكتسب عملية تكرير الزيوت المشتقة من الكتلة الحيوية لإنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون في مصافي تكرير النفط اهتماماً متنامياً ضمن جهود السعي لتلبية متطلبات خفض الانبعاثات الكربونية الناتجة عن المنتجات النفطية في كافة مراحل دورة حياتها، بدءاً من عمليات الإنتاج وحتى الاستهلاك.
- أثبتت المعالجة المشتركة أنها مسار فعال لتعزيز إنتاج وقود الطيران منخفض الكربون.
- يتطلب إنتاج وقود الطيران المنخفض الكربون تطبيق تقنيات تخفيض كثافة الكربون في كافة مراحل دورة حياة إنتاج الوقود انطلاقاً من مرحلة إنتاج النفط في الحقول، مروراً بنقله إلى مصافي التكرير، ثم عمليات التكرير والانتاج في المصافي، ونقل المنتج إلى محطات التوزيع وحتى مرحلة الاستهلاك.
- لتسهيل انتشار الوقود المنخفض الكربون على نطاق واسع لابد من تطبيق تدابير سياسية وتنظيمية تساهم في زيادة إمدادات الوقود المنخفض الكربون، أو تحفيز الطلب، أو تمكين الربط بين العرض والطلب.
- تتطلب عملية نزع الكربون من قطاع الطيران تضافر جهود كافة الهيئات والمؤسسات المعنية، والتنسيق والتكامل بين مزودي التكنولوجيا، والمؤسسات الحكومية، وهيئات حماية البيئة، وأسواق الطاقة، والمستثمرين، والمستهلكين.
- نظراً للحاجة إلى كافة الخيارات الممكنة لنزع الكربون وإعلان العديد من شركات النفط الكبرى عن استراتيجياتها للحد من البصمة الكربونية لعملياتها ومنتجاتها بحلول عامي 2030 و2050 فإن خيارات استخدام الوقود الأحفوري لابد من أخذه بالاعتبار في معادلة مزيج الطاقة، وخصوصاً وقود الطيران المنخفض الكربون (LCAF)
- يجب على قطاع الطيران أن يبحث عن الفرص ويسعى لحل الصعوبات التي تواجه إنتاج واستهلاك الوقود المستدام، حتى يتمكن من خفض الانبعاثات الكربونية وضمان مستقبل مستدام.

- ينبغي لمنتجي الوقود المستدام والطاقة التركيز على نشر طاقات إنتاج الوقود المستدام الحالية وإظهار حالة اليقين في استمرار الطلب على المدى الطويل، بهدف تشجيع المستثمرين على تمويل المشاريع المستقبلية.
- يجب على الحكومات العمل على إصدار التشريعات التي تدعم إنتاج واستهلاك وقود الطيران المستدام، وأن تسعى لإنشاء مشاريع إنتاج تعزز توفر الوقود في الأسواق.
- على الرغم من امتلاك معظم الدول العربية لاحتياطيات كبيرة من النفط والغاز إلا أن العديد من هذه الدول تقود الطريق لتنويع مزيج الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون ولديها فرصاً ثمينة لأن تكون من الدول الرائدة في إنتاج وتصدير وقود الطيران المستدام والمنخفض الكربون، بما تملكه من بنية تحتية وموارد تمويل لمشاريع الطاقة المتجددة، ولقائم متنوعة صالحة لإنتاج الوقود المستدام مثل الطحالب التي يمكن زراعتها في المياه المالحة، وبعض النباتات المقاومة للجفاف مثل الجاتروفا Jatropha، وغيرها من النباتات التي تتحمل نسبة أملاح عالية في التربة.
- شهدت بعض الدول العربية تطورات ملحوظة في مجال تشجيع إنتاج واستخدام وقود الطيران المستدام وعقدت شراكات واتفاقيات مع بعض الشركات العالمية المتخصصة. تتركز هذه التطورات في دولة الإمارات العربية المتحدة، والبحرين، والمملكة العربية السعودية، ودولة قطر، ودولة الكويت، وجمهورية مصر العربية، وسلطنة عمان.

Abstract

Aviation sector is responsible for around 2.5% of global carbon dioxide emissions, and 3.5% of global non-CO_2. It is widely seen as the hardest sector to decarbonize, whether it is looked at from a technological or an economic standpoint.

Low Carbon Aviation Fuel (LCAF) refers to a fossil fuel, which has been produced in a way that results in at least 10% lower lifecycle GHG emissions compared to a traditional fuel.

The study assesses to what extent the production and use of low carbon and sustainable aviation fuel may contribute to carbon reduction and mitigation.

This study shows that no one technology can reduce emissions to a sufficient level to meet the requirement of decarbonizing the aviation sector. Therefore, the deployment of multiple solutions is needed.

Petroleum refineries can play a significant role in producing low carbon aviation fuel through co-processing renewable feed, retrofitting units (such as hydrotreatment units) to handle only renewable feedstocks, or constructing full biorefineries integrated into the fossil refinery complex. Such concepts can utilize the existing infrastructure and distribution channels to airports and can reduce investment costs for biofuel production.

The study is divided into five main sections. The first describes the current background knowledge and policy framework for the development process of low carbon and sustainable aviation fuel. The second discusses the available technology and pathways for producing SAF and LCAF. The third section identifies the challenges facing the production of sustainable and low carbon aviation fuel and potential for initiating and scaling up its production in the world. The fourth section presents an overview of the development for the sustainable aviation fuel worldwide and in the Arab countries. The main conclusions and suggestions are summarized in section five.

A series of recommended actions are listed below to enhance the introduction of sustainable aviation fuel.

- The major barrier to production of sustainable aviation fuels is cost, with the price ranging from approximately two to eight times that of conventional aviation fuel, according to an analysis by the international institutions.

- Investing in low carbon aviation fuel supports the industry's shift towards sustainability and drives advancements in other green technologies.
- Stimulating sustainable aviation fuel production necessitates substantial policy incentives to bridge the price gap between traditional aviation fuel and biofuels.
- Promote the collaboration between public-private partnership, the aviation sector, jet fuel producers, universities and other public entities, to lower the risk in investing in sustainable fuel projects.
- Co-processing has proven to be an effective pathway to boost the production of low-carbon aviation fuel.
- To reach the target of net-zero emissions, all available pathways must be utilized.
- Financing and supporting research and development institutions is critical to find modern technologies to optimize the production of low carbon aviation fuel.
- While the Arab countries are known for its abundant reserves of oil and gas, many of these countries are leading the way to diversify its energy mix and reduce carbon emission.

قائمة المراجع

المراجع العربية

- أوابك، (2023) دراسة **"تقنيات نزع الكربون في مصافي تكرير النفط"** منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول. متوفرة على موقع المنظمة www.oapecorg.org
- وجهات، (2023) **"توقيع مذكرة تعاون لتطوير وقود الطيران المستدام في سلطنة عُمان"** موقع إخباري: https://wejhatt.com/?p=80154
- سكاي نيوز، (2023) **"أرامكو تستثمر في مشروع لإنتاج وقود طائرات منخفض الكربون"** موقع سكاي نيوز عربية.
- أوابك، (2024) **"أساسيات صناعة تكرير النفط"** الملتقى الخامس والعشرون لأساسيات النفط والغاز، دولة الكويت، 23-25 أبريل/نيسان 2024.

المراجع الإنجليزية

- ACAO, (2024) "Arab Civil Aviation Organization" www.acao.org.ma
- ATAG, (2017) "**Beginner's Guide to Sustainable Fuels"** Air Transport Action Group.
- Avery M., and Strohm, J., (2021) **"FCC Pathways to Co-processing"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, (2023). pp.35-45. www.digitalrefining.com
- Barbarà, L., & Galea, C., (2024) **"Scaling Up Sustainable Aviation Fuel Supply: Overcoming Barriers in Europe, the US and the Middle East"** World Economic Forum.
- Bauen, et al., (2022) **"CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential"** Applied Sciences.
- BYRUM, Z., et al., (2021) **"Technological Pathways for Decarbonizing Petroleum Refining"** Working Paper, World Resources Institute. Washington, USA.
- Berger, R., (2020) **"Sustainable Aviation Fuels: The Best Solution to Large Sustainable Aircraft"** ROLAND BERGER LTD. London. UK.
- Bernard, Y., (2023) **"Decarbonisation of transport fuels to reduce emissions"** Decarbonization Technology Magazine, November 2023. p.7-11. www.decarbonisationtechnology.com
- Bernard, Y., et al., (2021) "**All Roads Leading to Sustainable Aviation Fuel"** Decarbonization Technology Magazine. May 2021. P.p. 35-41

- BOSCH, J., et al., (2017) **"Aviation biofuels: strategically important, technically achievable, tough to deliver"** Grantham Institute Briefing paper No 23. Imperial Collegue. www.imperial.ac.uk
- Carrington, C., & Navedkhan, M., (2023) "**Biofuels syncrude pathway for producing SAF from waste"** Decarbonization Technology Magazine, May 2023. p.29-33. www.decarbonisationtechnology.com
- Carter, E., & Hickman A., (2021) **"Ready-now Blue Hydrogen Leads The Way to Decarbonization"** H2 Tech Magazine, Setember 2021. pp.23-29 .
- Chiaramonti, D., et al., (2021) **"Can Lower Carbon Aviation Fuels (LCAF) Really Complement Sustainable Aviation Fuel (SAF) towards EU Aviation Decarbonization?"** MDPI, Energies, Switzerland. www.mdpi.com
- Chlapik, K., Winch, D. & Dierking, D., (2022) **"Achieving 95% Direct CO2 Reduction for Hydrogen Plants"** Digital Refining, Q2, pp. 20-26.
- Danicourt, J., et., (2022) **"A Realistic Path to Net-Zero Emissions for Commercial Aviation"** BAIN & COMPANY**.**
- Fantuzzi, A., et al., (2023) **"Low-carbon Fuels for Aviation"** Imperial College, Institute for Molecular Science and Engineering. UK www.imperial.ac.uk
- Goldner, w., et al., (2022) "**SAF Grand Challenge Roadmap-Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel"** www.biomassboard.gov
- Herbertson, J., & Wheeler, D., (2022) "**Lower Carbon Aviation Fuels: contributing to the energy transition"** Climate Change Mitigation: Sustainable Aviation Fuels, Chapter seven, ICAO.
- Hydrocarbon processing, (2024) **"Asia's SAF projects and agreements"** Hydrocarbon processing Magazine www.hydrocarbonprocessing.com
- Hydrocarbon processing, (2023) **"Emirates and Shell Aviation Sign Agreement for SAF Supply at airline's Dubai Hub"** Hydrocarbon processing Magazine www.hydrocarbonprocessing.com
- Hydrocarbon processing, 2 (2023) **"ECARU, Qalaa Holdings, and Axens to study second-gen biofuel and SAF Production Project"** Hydrocarbon processing Magazine, July.2023.

- ICAO, (2023) **"Guidance on Potential Policies and Coordinated Approaches for the Deployment of Sustainable Aviation Fuel"** ICAO Committee on Aviation Environment Protection.
- ICAO, 2 (2023) **"Lower Carbon Aviation Fuels Technology Update**" Presentation developed by experts from the ICAO Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP).
- IATA, (2023) **"Net zero 2050: sustainable aviation fuels"** Fact Sheet. The International Air Transport Association. www.iata.org
- IEA, (2021) **"China's Emissions Trading Designing efficient allowance allocation Scheme"** Fact Sheet**,** International Energy Agency. Website: www.iea.org
- Jha, A., et al., (2021) **"A critical Analysis of CO2 Capture Technologies"** Hydrocarbon Processing Magazine. June 2021 pp. 59-65.
- Jing, L., et al., (2022) **"Understanding Variability in Petroleum Jet Fuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions to Inform Aviation Decarbonization"** Nature Communications Publisher. https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1
- Kapoor, P., (2024) **"UAE's Masdar and France's Total Energies explore Green Hydrogen to Methanol to SAF initiative**" O&GJ Middle east. August 2024.
- Ko, K., and Sivasubramanian, G., (2022) **"Hydrogen production with lower carbon Emissions"** Petroleum Technology Quarterly Magazine Q1, 2023. pp.55-63. Available at: www.digitalrefining.com
- Nelson, R., (2022) **"RefuelEU is the first step on the long road to decarbonize aviation and will have a significant impact on the evolution of demand for SAF in Europe" Decarbonization Technology Magazine, November 2022. p.7-11.** www.decarbonisationtechnology.com
- Newsom, R., et al., (2023) **"Sustainable aviation fuel (SAF) on the rise Sustainable development through a dynamic environment"** Ernst & Young LLP. www.ey.com
- Padt, A., (2021) **"Sustainable aviation fuel comes of age"** Neste. Decarbonization Technology Magazine, August 2021. www.decarbonisationtechnology.com
- Pavlenko, N., & Searle, S., (2021) **"Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels"** Working paper 2021-11, INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. www.theicct.org

- POST, (2020) **"Low Carbon Aviation Fuels"** POST, UK Parlument**,** POSTNOTE 616, February, 2020.
- Q8Aviation, (2024) "Q8 Latest News" www.q8aviation.com
- Repsol, (2021) "**Refining Transformation From the Traditional to the Low Carbon Refinery"** www.repsol.com
- Royal Society, (2023) **"Net Zero Aviation Fuel: Resoures Requirement and Environmental Impacts"** Policy Breifing.The Royal Society. https://royalsociety.org/news-resources/projects/low-carbon-energy-programme/net-zero-aviation-fuels/
- Sayles, S & Ohmes, R., (2021) **"Conversion to a green refinery. Assessing the Options, Risks, and Viability of the Biofuels Refinery of the future"** BECHT, Decarbonization Technology Magazine. pp.57-65 .
- Singh, R. B., (2022) **"Evaluate Options for Decarbonizing Petroleum Refineries"** Hydrocarbon Processing, Issue August 2022, pp. 29-34.
- Soone, J., (2020) **"Sustainable aviation fuels"** Breifing of European Parliamentary Research Service.
- Starck, L., et al. (2016) **"Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimization of Process Yield. Oil & Gas Science and Technology"** - Revue d'IFP Energies nouvelles, 2016.
- Sustainable Aviation, (2022) **"Decarbonisation Road-Map: A Path to Net Zero"** Sustainable Aviation, UK, Available at: www.sustainableaviation.co.uk
- Wagner DA SILVA, M., (2022) **"The role of biofuels in the energy transition" Petroleum Technology Quarterly Magazine,** Q1 2022, p.p.91-94. www.digitalrefining.com
- Wormslev, E., et al., (2016) **"Sustainable Jet Fuel for Aviation. Nordic Perpectives on the Use of Advanced Sustainable Jet Fuel for Aviation"** Nordic Council of Ministers. www.norden.org

منظمة الأقطار
العربية المصدرة
للبترول (أوابك)