منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد

إعداد
م. عماد ناصيف مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز نسخ أو اقتباس اي جزء من هذه الدراسة أو ترجمتها أو إعادة طباعتها أو نشرها باي صورة دون إذن خطي مسبق من المنظمة، إلا في حالات الاقتباس القصير، مع وجوب ذكر المصدر.

2025

توجه جميع المراسلات على العنوان التالي:

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

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

البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

الموقع الإلكتروني: www.oapecorg.org

مقدمة

مقدمة

يكتسب زيت الطهي المستعمل اهتماماً متنامياً مدفوعاً بالتوجه العالمي نحو البحث عن مصادر لإنتاج أنواع متعددة من الوقود المتجدد مثل الديزل الحيوي، ووقود الطيران المستدام، حيث بلغت كمية زيوت الطهي المستعملة المجمعة على مستوى العالم نحو 14 مليار ليتر في عام 2022 ومن المتوقع أن ترتفع إلى أكثر من 30 مليار ليتر بحلول عام 2030، وأن ترتفع تجارة زيت الطهي المستعمل في العالم من 3.7 مليار غالون في عام 2022 لتصل إلى 5-10 مليار غالون/السنة بحلول عام 2030، وهناك احتمال أن تصل الكمية إلى 17 مليار في حال اتخاذ بعض الإجراءات المحفزة لتجارة الزيوت المستعملة وتحويلها إلى وقود مستدام. (Times aerospace, 2023)

تركز هذه الدراسة على عملية تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد باستخدام تقنيات تعتمد على تحويل الدهون الثلاثية في الزيوت إلى إستيرات ميثيل الأحماض الدهنية (FAME) بوجود الكحول والمُحفِّز.

تستعرض الدراسة مصادر زيت الطهي المستعمل، واستراتيجيات تجميعه ونقله إلى مراكز الإنتاج، حيث تتم عمليات التنقية ثم تفاعلات التصنيع للحصول على وقود حيوي عالي الجودة، وخال من الشوائب والملوثات، مع الإشارة إلى أهم الفوائد الاقتصادية والبيئية، مما يوفر منظوراً متكاملاً للتغلب على التحديات الحالية، وتمهيد الطريق لإنتاج وقود حيوي مستدام.

كما تتناول الدراسة أهم التطورات العالمية في مجال إنتاج الوقود المستدام كالديزل الحيوي ووقود الطيران المستدام باستخدام زيوت الطهي المستعملة، وتحليل بعض التجارب الناجحة في مناطق العالم المختلفة.

ورصدت الدراسة الاهتمام الذي أبدته بعض الدول العربية بتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام، ومن المتوقع أن تتوسع هذه المشاريع في المستقبل، مدفوعة بتنامي الاهتمام بخفض الانبعاثات الكربونية، وتنويع موارد الدخل القومي، والحفاظ على الثروات الطبيعية.

في دولة الإمارات العربية المتحدة، تعمل شركة إينوك، بالتعاون مع شركة Neutral Fuels من خلال مبادرتين لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود الديزل الحيوي. تبلغ الطاقة الإنتاجية لمصنع إينوك في دبي (الذي افتُتح عام 2019) نحو 50 طناً يومياً من وقود الديزل الحيوي المصنع من زيوت الطهي المستعملة. تستخدم هذه المنتجات في السوق المحلي لتشغيل شاحنات توصيل المواد، وحافلات المدينة.

في المملكة العربية السعودية، أعلنت شركة أرامكو توتال للتكرير والبتروكيماويات (ساتورب) عن إنتاج وقود الطيران المستدام باستعمال زيوت الطهي المستعملة بتقنية التكرير المشترك CO-Processing في وحدة المعالجة الهيدروجينية المنخفضة الضغط، وذلك في مجمع التكرير في منطقة الجبيل على الساحل الشرقي للمملكة العربية السعودية. يعكس المشروع اهتمام المملكة بتلبية متطلبات حماية البيئة والتحول إلى الطاقة النظيفة بما يتوافق مع التوجه العالمي نحو الحد من انبعاثات الكربون، ومن المتوقع أن يساهم المشروع في تلبية الطلب المستقبلي المتنامي في المملكة على وقود الطيران المستدام، فضلاً عن خفض انبعاثات الكربون بمعدل يفوق 80% خلال دورة حياة الوقود مقارنة بانبعاثات الوقود البترولي التقليدي. كما أجرت الخطوط الجوية القطرية رحلة تجريبية باستخدام وقود الطائرات المستدام المنتج من تحويل زيوت الطهي المستعملة المستورد من فنلندا في عام 2023. ومن المتوقع إطلاق المزيد من المبادرات مع سعي شركات الطيران في المنطقة إلى تحقيق أهداف صافي انبعاثات صفري.

خلصت الدراسة إلى أن الاستثمار في عمليات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي مستدام لا يسهم في تعظيم الاستفادة من الموارد الطبيعية فحسب، بل يعتبر أحد الحلول الاستراتيجية لحماية البيئة وخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتعزيز أمن الطاقة من خلال توفير رديف مساند للوقود التقليدي، فضلاً عن دوره في دعم الاقتصاد الوطني من خلال خلق فرص عمل جديدة. كما أكدت الدراسة على أهمية دور الحكومات في إصدار التشريعات الناظمة لعملية تجميع زيوت الطهي المستعملة وتحديد معايير ومواصفات الوقود الحيوي المنتج.

والله ولي التوفيق

الأمين العام

جمال عيسى اللوغاني

قائمة المحتويات

مقدمة 1
قائمة المحتويات 3
قائمة الأشكال 5
قائمة الجداول 5
قائمة المصطلحات 6
ملخص تنفيذي 8
الفصل الأول: تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد، الفوائد والتحديات 16
1-1: فوائد تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي 19
2-1: مراحل تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي 20
3-1: تجميع زيوت الطهي المستعملة 21
1-3-1: القطاع المنزلي 22
2-3-1: القطاع الصناعي 23
4-1: عوامل نجاح عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة 24
1-4-1: النظم والقواعد 25
2-4-1: إعداد قاعدة بيانات لتوثيق عملية التجميع 25
5-1: توقعات تطور تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود مستدام 29
6-1: أمثلة لتجارب تجميع زيوت الطهي المستعملة 30
1-6-1: حملة مجموعة MOL لتجميع زيوت الطهي المستعملة 30
2-6-1: حملة تجميع زيوت الطهي المستعملة في الولايات المتحدة الأمريكية 31
الفصل الثاني: المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة 32
1-2: فصل الجسيمات الصلبة 35
2-2: التجفيف 35
1-3-2: طريقة الاستخلاص بالمذيب 36
2-3-2: طريقة المعالجة بمحلول قلوي 36
3-3-2: طريقة التقطير 37
4-3-2: طريقة الامتزاز 37
الفصل الثالث: تقنيات إنتاج الوقود الحيوي من زيت الطهي المستعمل 40
1-3: الأسترة التبادلية لإنتاج الديزل الحيوي 40
2-3: المعالجة الهيدروجينية 44
3-3: عملية التكسير الهيدروجيني لزيوت الطهي المستعملة 46
4-3: عملية التغويز + فيشر-تروبش 46
5-3: عملية التكرير المشترك في مصافي تكرير النفط 47
1-5-3: التكرير المشترك لزيت الطهي المستعمل في وحدة تقطير النفط الخام 48
2-5-3: التكرير المشترك للزيت الحيوي في وحدة التكسير الحفزي المائع 50
الفصل الرابع: تقنيات تنقية الديزل الحيوي المنتج 51
1-4: عمليات الفصل المعتمدة على التوازن 52
1-1-4: التقطير 52
2-1-4: الاستخلاص بالمذيب 53

4-1-3: استخلاص السوائل فوق الحرجة 54
4-2: عمليات الفصل القائمة على التوافق 55
4-2-1: الامتزاز 55
4-2-2: التبادل الأيوني 55
4-2-3: عمليات فصل المواد الصلبة عن السائلة 56
4-2-4: تقنيات الفصل بالأغشية 56
4-3: عمليات الفصل القائمة على التفاعل في تنقية الديزل الحيوي 57
4-3-1: التقطير التفاعلي 57
4-3-2: مفاعلات حيوية غشائية لمعالجة الديزل الحيوي 58
4-3-3: تبلور بمساعدة المذيب (SAC) 58
4-4: طرق تحسين جودة الديزل الحيوي 58
4-4-1: تقنية التكسير الحفزي أو الحراري 59
4-4-2: تقنية إزالة الأوكسجين في وسط خامل 60
4-4-3: تقنية إزالة الأوكسجين بوجود الهيدروجين 60
4-5: دراسة حالة: تجربة شركة Eco Solution., Ltd. لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى ديزل حيوي 61
الفصل الخامس: تطورات إنتاج الوقود الحيوي من زيوت الطهي المستعملة في العالم 63
5-1: نبذة تاريخية لاستخدام زيوت الطهي المستعملة لإنتاج الوقود الحيوي 63
5-2: دوافع وتحديات انتشار انتاج الوقود الحيوي من زيوت الطهي المستعملة: 64
5-3: مقارنة إنتاج الديزل الحيوي ووقود الطائرات المستدام من تحويل زيوت الطهي المستعملة 65
5-4: أهم منتجي وقود الطيران المستدام من زيوت الطهي المستعملة في العالم 67
5-5: مشاريع إنتاج الوقود الحيوي المشتق من زيت الطهي المستعمل في العالم 67
5-5-1: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في أمريكا الشمالية 68
5-5-2: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في أوروبا الغربية 70
5-5-3: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة في منطقة آسيا والمحيط الهادئ 74
5-5-4: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة في الدول العربية 78
الاستنتاجات والتوصيات 81
Abstract 83
المراجع 85

قائمة الأشكال

الشكل (1-1): توقعات تطور إمدادات زيوت الطهي المستعملة حتى عام 2030 17
الشكل (1-2): مجالات استهلاك زيوت الطهي المستعملة في العالم 18
الشكل (1-3): مراحل تحويل زيت الطهي المستعمل إلى ديزل حيوي 21
الشكل (1-4): توزع نسبة زيوت الطهي في العالم حسب المصدر 22
الشكل (1-5): مراحل عملية التجميع المركزية لزيوت الطهي المستعملة في القطاع المنزلي 23
الشكل (1-6): تحديات عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة 26
الشكل (2-1): مراحل عملية معالجة زيوت الطهي المستعملة 34
الشكل (3-1): سير عملية إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة التبادلية لزيوت الطهي المستعملة 42
الشكل (3-2): مخطط سير عملية المعالجة الهيدروجينية لزيوت الطهي المستعملة 45
الشكل (3-3): تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي بطريقة فيشر تروبش 47
الشكل (3-4): العمليات المشتركة المحتملة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط 48
الشكل (3-5): مخطط وحدة تقطير النفط الخام 49
الشكل (3-6): مخطط وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع في مصفاة تكرير النفط 50
الشكل (4-1): تصنيف طرق تنقية الديزل الحيوي بناءً على طبيعة العملية 52
الشكل (4-2): تقنية الترشيح بالأغشية لتنقية الديزل الحيوي 57
الشكل (4-3): تقنيات تحويل الزيوت والدهون الحيوية إلى هيدروكربونات 59

قائمة الجداول

الجدول (1-1): فوائد وصعوبات تجميع زيوت الطهي المستعملة 28
الجدول (1-2): تحليل مواطن القوة والضعف، وفرص وتحديات تجميع زيوت الطهي المستعملة في بعض دول العالم 28
الجدول (2-1): خصائص زيوت الطهي المستعملة 32
الجدول (2-2): تغيرات التركيب الكيميائي للزيت المستعمل أثناء عملية القلي 33
الجدول (3-2): تغير خصائص زيت الطهي المستعمل حسب طريقة الاستعمال 34
الجدول (4-2): تقنيات معالجة زيوت الطهي المستعملة لإنتاج الوقود الحيوي 38
الجدول (5-1): أهم مشاريع تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد في العالم 79

قائمة المصطلحات

- **أحماض دهنية حرة FFA: Free Fatty Acids** تتشكل الأحماض الدهنية الحرة كنواتج تحلل للزيوت النباتية عند تسخينها لفترات طويلة، كما في الطهي مثلاً. قد تُسبب هذه الأحماض مشكلات في إنتاج الديزل الحيوي، وقد تتفاعل لتكوين الصابون.
- **أسترة Esterification** نوع أساسي من التفاعلات العضوية، حيث يتفاعل الكحول مع حمض الكربوكسيل لتكوين إستر وماء. تتميز الإسترات برائحتها الزكية، وتوجد عادةً في المواد الطبيعية، كالفواكه والزهور، بالإضافة إلى العديد من المركبات الصناعية المستخدمة في نكهات الطعام والعطور.
- **أسترة تبادلية Transesterification** عملية تحويل الدهون الثلاثية (مثل الدهون والزيوت) إلى إسترات ألكيل الأحماض الدهنية والغليسرين بوجود محفز.
- **ديزل نفطي Petrodiesel** الديزل التقليدي المصنوع من النفط لتمييزه عن الديزل الحيوي.
- **ديزل حيوي Biodiesel** : الديزل المكون من إسترات الألكيل الطويلة السلسلة، المصنع من تفاعل الزيوت النباتية أو الدهون الحيوانية مع الكحول لإنتاج إسترات الأحماض الدهنية.
- **وقود حيوي Biofuel** : مصطلح عام يصف أنواع الوقود التي تُستمد طاقتها من التثبيت البيولوجي للكربون. يشمل الوقود الحيوي أنواع الوقود المشتقة من تحويل الكتلة الحيوية، بالإضافة إلى الكتلة الحيوية الصلبة والوقود السائل والغازات الحيوية المختلفة.
- **محفز Catalyst** مادة تعمل على تسريع التفاعل الكيميائي من خلال توفير مسار تفاعل بديل مع طاقة تنشيط أقل، دون أن يتم استهلاكها أو تغييرها بشكل دائم في العملية.
- BS EN 14214 معيار الجودة البريطاني الخاص بطرق اختبار الميثيل إسترات الأحماض الدهنية. FAME.
- **نقطة انسداد الفليتر البارد (CFPP):** أدنى درجة حرارة، يمر عندها حجم مُعين من وقود الديزل عبر جهاز ترشيح مُوحد في وقت مُحدد عند تبريده في ظروف مُعينة. يُعطي هذا الاختبار تقديرًا لأدنى درجة حرارة يُمكن أن يُوفرها الوقود لتدفق سلس في أنظمة وقود مُعينة.

- **تغويز Gasification : عملية حرارية كيميائية لتحويل المواد القائمة على الكربون مثل الكتلة الحيوية أو الوقود الأحفوري إلى خليط وقود غازي يسمى الغاز الاصطناعي في درجة حرارة أعلى من 700 درجة مئوية.**
- **تقطير أيزوتروبي** هو استخدام مكون ثالث لفصل مكونين متقاربين في درجة الغليان عن طريق تكوين خليط أيزوتروبي بين أحد المكونات الأصلية والمكون الثالث لزيادة الفرق في درجة الغليان وتسهيل الفصل بالتقطير.
- **تكرير مشترك Co-Processing** عملية مزج الزيوت الخام المشتقة من الكتلة الحيوية مثل زيت التحلل الحراري Pyrolysis oil، أو الدهون الثلاثية Triglycerides، واللغنين Lignin، والسكريات، وتكريرها مع المواد النفطية الداخلة إلى عمليات مصافي تكرير النفط
- **توجيه جودة الوقود FQD: EC/30/2009** يحدد هذا التوجيه المتطلبات البيئية للبنزين والديزل بهدف الحد من انبعاثاتهما الملوثة للهواء.
- **EN14214** المعيار الأوروبي الذي يحدد متطلبات الجودة وطرق الاختبار لإسترات ميثيل الأحماض الدهنية (FAME) (الديزل الحيوي) للاستخدام كوقود في محرك الديزل.
- **تغويز Gasification :** عملية حرارية كيميائية لتحويل المواد القائمة على الكربون مثل الكتلة الحيوية أو الوقود الأحفوري إلى خليط وقود غازي يسمى الغاز الاصطناعي في درجة حرارة أعلى من 700 درجة مئوية.
- **ميثيل إستيرات الأحماض الدهنية FAME: Fatty Acid Methyl Esters** الإسم الكيميائي للديزل الحيوي.
- **زيت الطهي المستعمل** Used Cooking Oil زيت نباتي تم استخدامه في طهي الطعام، ولم يعد صالحاً للاستخدام للغذاء، ويمكن تجميعه من مصادر مختلفة تشمل المنازل والمطاعم وشركات تصنيع الطعام والمطابخ الصناعية.

ملخص تنفيذي

مع تنامي الاهتمام بخفض الانبعاثات الكربونية والبحث عن مصادر مستدامة لإنتاج وقود متجدد يلبي متطلبات التشريعات البيئية، ظهرت فكرة إنتاج الوقود الحيوي المشتق من الزيوت النباتية أو الدهون الحيوانية، التي تتكون من الدهون الثلاثية المعروفة باسم إستر الأحماض الدهنية المرتبطة بالغليسرين، إلا أن انتشار هذا النوع من الوقود على نطاق واسع واجه تحديات كبيرة بسبب ارتفاع تكاليف إنتاج الزيوت النباتية المستخدمة كمواد خام، والتي تشكل نحو 90% من إجمالي تكاليف الإنتاج، إضافة إلى المخاوف من أن استخدام الزيوت النباتية في إنتاج الديزل الحيوي قد تنافس إمدادات الغذاء في الأمد البعيد، مما دفع الباحثين إلى إيجاد مواد خام رخيصة ومستدامة، كان منها زيوت الطهي المستعملة. (Saini, R., 2017)

لتقليل تكلفة المواد الخام للوقود الحيوي، وإيجاد حل للجدل الدائر حول استخدام الزيوت النباتية، توجهت الأبحاث إلى دراسة إمكانية استخدام زيوت الطهي المستعملة والتي يتم إنتاجها في جميع أنحاء العالم بمعدل 5.6 مليار غالون سنوياً في عام 2024، ومن المتوقع أن تصل الكمية إلى ما بين 8-10 مليار غالون بحلول عام 2030. (GlobalData, 2025)

فوائد تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي

تعتبر زيوت الطهي المستعملة أحد مصادر تلوث المياه الجوفية ومياه الأحواض والمصارف التي قد تدخل في النهاية إلى الأنهار أو المحيطات فتؤدي إلى إحداث ضرر في الحياة المائية، وتشكل تهديداً لصحة الإنسان والبيئة، نظراً لاحتوائها على مواد كيميائية سامة عندما تتجاوز نسبتها في الماء الحد الطبيعي. (Alias, N., et al., 2018)

ووفقاً للدراسات التي أجرتها منظمة الصحة العالمية، فإن ليتراً واحداً من زيت الطهي المستعمل يلوث 1000 ليتر من الماء ويصبح غير صالح للحياة. إضافة إلى أن ما ينتج عن ذلك من انسداد شبكات الصرف وبالتالي زيادة استهلاك الطاقة اللازمة للضخ والمعالجة بنسبة قد تصل إلى 25% في محطات معالجة مياه الصرف الصحي. (Casallasa, I., et al., 2018)

إضافة إلى الفوائد البيئية والاقتصادية لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي هناك فوائد غير مباشرة كخلق فرص عمل جديدة لعملية تجميع الزيوت وإنتاج الوقود وتوزيعه.

من الفوائد الأخرى لاستخدام الديزل الحيوي ارتفاع درجة الوميض أعلى من 130 °م، مما يجعل التعامل معه أكثر أماناً من الوقود النفطي التي تبلغ فيه درجة الوميض (52 °م).(Alias, N., et al., 2018)

لاستخدام الديزل الحيوي بدلاً من الديزل البترولي مزايا عديدة في مجال الاستدامة، من أهمها: تخفيض انبعاثات الكربون، حيث أن كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة في الغلاف الجوي نتيجة حرق الديزل الحيوي تمتصها النباتات الخاصة بإنتاج الزيت. ولذلك، يُعتبر الديزل الحيوي محايداً للكربون. وعندما يُنتج الديزل الحيوي من زيت الطهي المستعمل الذي كان سيُهدر إلى شبكة الصرف الصحي فإن مساهمة صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تكون موجبة.(Smith, H., et al., 2013)

أما تحديات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي فتتلخص في عدم توفر البنية التحتية لتجميع زيوت الطهي المستعملة في العديد من مناطق العالم، واحتواء زيوت الطهي المستعملة على شوائب مثل الماء وبقايا الطعام، ونسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة. وغياب نظم الاختبار لزيوت الطهي المستعملة للتأكد من مواصفاتها، وعدم وضوح السياسات والتشريعات بين مناطق العالم، وارتفاع تكاليف إنتاج الوقود الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة مقارنة بالوقود التقليدي المنتج من النفط، واعتماد ربحية المشروع بشكل كبير على الحوافز الحكومية، وأرصدة الكربون، وبرامج الوقود المنخفض الكربون.

تجميع زيوت الطهي المستعملة

تنقسم عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة إلى قطاعين، قطاع صناعي وقطاع منزلي. يشتمل القطاع الصناعي على شركات تصنيع الغذاء، والمطاعم، والشركات الأخرى المتخصصة بتقديم الطعام والمستشفيات والمدارس. تشكل المطاعم المصدر الرئيسي لزيوت الطهي المستعملة، حيث بلغت نسبتها على مستوى العالم 47% من إجمالي زيوت الطهي المستعملة التي تم تجميعها في عام 2023. يأتي بعدها شركات صناعة الأغذية بنسبة 37%، ثم الاستعمال المنزلي بنسبة 18% ومصادر أخرى بنسبة 3%.

يعتمد نجاح عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة على عاملين رئيسيين هما العامل الاقتصادي وعامل التشريعات الناظمة. فبالنسبة للعامل الاقتصادي يمكن تشجيع المطاعم على تجميع الزيوت المستعملة بمنح تعويضات مالية، وبالتالي تزداد كمية الزيوت المجمعة من المطاعم كلما كان الثمن المدفوع عالياً. أما ما يتعلق بالتشريعات فتساهم في ضبط العملية وإلزام البائعين على استرداد كمية من الزيوت المستعملة مقابل تسليمهم الزيت الجديد.

توقعات تطور تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود مستدام

تشير التوقعات إلى أنه بحلول عام 2030، سينمو إنتاج الوقود المتجدد المنتج من تحويل زيوت الطهي المستعملة وخصوصاً وقود الطائرات المستدام، وسيتحول من مشاريع صغيرة إلى مشاريع ضخمة بمليارات الليترات، وذلك بتأثير النمو الكبير لإنتاج وقود الطائرات المستدام الذي حدث في السنوات الخمس الأولى من عشرينيات القرن الحادي والعشرين، حيث تضاعف الإنتاج مرتين أو ثلاث مرات سنويًا. على سبيل المثال ارتفع الإنتاج من 300 مليون ليتر في عام 2022 (0.25 طن) إلى 600 مليون ليتر (0.5 طن) في عام 2023، والتوسع الجغرافي لمنتجي الوقود المتجدد، والسياسات التحفيزية التي تلجأ إليها الحكومات لتحسين الاقتصاد، والتزام شركات الطيران بمتطلبات التشريعات المناخية، التي تهدف إلى تحقيق صافي صفري للانبعاثات بحلول عام 2050.

المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة

تكمن مشكلة تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في احتوائها على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة free fatty acids التي تتفاعل مع المحفز في وحدة أسترة الزيوت فتشكل مواد خافضة للتوتر السطحي Surfactants، إضافة إلى وجود الرطوبة والجسيمات الصلبة التي تؤدي إلى تشكل الرواسب الكربونية في وقود الديزل والتي تسبب انسداد أنابيب منظومة الوقود في المحركات، لذلك يجب تخليص الزيت من هذه الشوائب قبل إدخاله إلى عملية التحويل إلى وقود حيوي.

تتكون عملية المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة قبل إدخالها إلى وحدة إنتاج الديزل الحيوي من ثلاث مراحل رئيسية: (1) الفلترة بمواد سلولوزية، (2) والتجفيف بالتسخين أو بالسيليكا جيل، (3) والأسترة بالميثانول لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى إستيرات الميثيل Methyl Esters

تقنيات إنتاج الوقود الحيوي من زيت الطهي المستعمل

يمكن إنتاج الوقود الحيوي من زيت الطهي المستعمل عبر مسارين رئيسيين: الأسترة التبادلية لإنتاج وقود الديزل الحيوي - إستيرات ميثيل الأحماض الدهنية FAME، والمعالجة الهيدروجينية لإنتاج وقود هيدروكربوني مثل الديزل المتجدد ووقود الطائرات المستدامSAF.

تتكون عملية الأسترة التبادلية للزيوت النباتية، أو زيوت الطهي المستعملة، أو الدهون الحيوانية من تفاعل الدهون الثلاثية Triglyceride المكونة للزيت مع الكحول بوجود محفز Catalyst من القلويات القوية، مثل هيدروكسيد الصوديوم أو هيدروكسيد البوتاسيوم، أو الأحماض، فتتشكل الإستيرات (الديزل الحيوي) والغليسرين.

يعتمد نوع الإستيرات الناتجة على نوع الكحول المستخدم في التفاعل. فعند استخدام الإيثانول ينتج إستيرات الإيثيل (Ethyl Esters)، أما عند استخدام الميثانول فينتج إستيرات الميثيل Methyl Esters تشترط معظم مواصفات وقود الديزل الحيوي حدًا أعلى لمحتوى الأحماض الدهنية الحرة، وذلك نظراً لأنها تسبب تشكل الرواسب التي تؤدي إلى تلف المحرك. لهذا تستخدم عملية الأسترة لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى إستر ألكيل الأحماض الدهنية Fatty Acid Alkyl Ester

أما المعالجة الهيدروجينية فهي عملية تحويل زيت الطهي المستعمل إلى وقود هيدروكربوني عن طريق تفاعله مع الهيدروجين بوجود محفز، حيث تُفكك جزيئات الدهون الثلاثية ويُزال الأوكسجين على شكل ماء وثاني أكسيد الكربون، مما يُنتج ألكانات مستقيمة السلسلة يمكن تكريرها إلى ديزل متجدد أو وقود طيران مستدام. يمكن إجراء هذه العملية في وحدات المعالجة الهيدروجينية التي تعالج المشتقات النفطية في مصافي تكرير النفط بعد إدخال بعض التعديلات عليها

من أهم مزايا عملية المعالجة الهيدروجينية تحمّلها للمواد الخام عالية الأحماض الدهنية الحرة (FFA) تصل إلى أكثر من 50%، ومن مساوئها حساسية المحفز لوجود بعض الشوائب في المواد الخام مثل الكبريت أو الكلور، ولتجنب تسمم المحفز يلزم إجراء معالجة مسبقة لإزالة هذه الشوائب.

يتميز منتج عملية المعالجة الهيدروجينية بخصائص مماثلة للوقود البترولي من حيث كثافة الطاقة، ويسمى الديزل المتجدد أو الزيت النباتي المهدرج HVO. لا يحتوي هذا الوقود على أوكسجين، ويحتوي على نسبة عالية من السيتان (75- 90)، وخالٍ من الكبريت، ويمكن مزجه مع الوقود البترولي في محركات الديزل.

كما يمكن تحويل زيت الطهي المستعمل (مثل أي مادة عضوية) إلى غاز اصطناعي (H_2 + CO) عبر التغويز Gasification، ثم تحويله بوجود محفز إلى وقود سائل عبر عملية فيشر-تروبش. لإنتاج هيدروكربونات اصطناعية تتطلب معالجة لتحسين خصائصها لتصبح منتجات قابلة للاستهلاك.

أما عملية التكرير المشترك Co-Processing فقد برزت كإحدى خيارات إنتاج الوقود الحيوي المتجدد من خلال مزج الزيوت الخام المشتقة من الكتلة الحيوية مثل زيت التحلل الحراري Pyrolysis oil، أو الدهون الثلاثية Triglycerides، واللغنين Lignin، والسكريات، لتكريرها مع المواد النفطية الداخلة إلى عمليات مصافي تكرير النفط. حيث يمكن خفض تكاليف إنتاج الوقود الحيوي مقارنة بالمصافي الحيوية المستقلة، من خلال استغلال الوحدات الخدمية المتوفرة في المصفاة، وشبكات توزيع ونقل المنتجات. وبالمقابل يمكن لمصافي تكرير النفط أن تستفيد من العمليات المشتركة في خفض انبعاثاتها الكربونية وتلبية متطلبات التشريعات البيئية.

تقنيات تنقية الديزل الحيوي المنتج

بعد عملية الأسترة التبادلية قد يحتوي الديزل الحيوي الناتج على شوائب مثل بقايا المحفزات، والغليسرين، والكحول غير المتفاعل، والأحماض الدهنية الحرة. ولضمان تحقيق منتج نهائي مطابق لمعايير الجودة والتشريعات البيئية يجب إزالة هذه الشوائب، حيث أن تأثيرها السلبي لا يقتصر على أداء المحرك فحسب، بل يؤدي إلى حدوث مشكلات في التخزين والنقل. ولهذه الغاية طورت في السنوات الأخيرة تقنيات تنقية مبتكرة لتحسين كفاءة إنتاج الديزل الحيوي وأدائه البيئي، بما يتوافق مع المواصفات القياسية الدولية مثل المواصفة الأمريكية ASTM D6571 أو الأوروبية EN14214.

تتكون تقنيات تنقية الديزل الحيوي من الغسيل الرطب باستخدام الماء، أو الماء المُحمَّض، أو المذيبات العضوية، أو السوائل الأيونية، والغسيل عبر الامتزاز والتبادل الأيوني، والفصل بالأغشية، وهي تقنيات مماثلة لتقنيات المعالجة الأولية للزيوت المستعملة.(Bateni, H., et al., 2017)

على الرغم من نجاح عملية مزج الديزل الحيوي مع الديزل النفطي واستخدامه في محركات وسائل النقل، إلا أنه لا يزال يعاني من بعض المشكلات مثل، امتصاص الرطوبة، والتآكل، واللزوجة العالية، وضعف خصائص الجريان في درجات الحرارة المنخفضة، وانخفاض كثافة الطاقة. ويعود السبب الرئيسي لهذه المشكلات إلى ارتفاع نسبة الأوكسجين.

لمعالجة المشكلات الناتجة عن استخدام الديزل الحيوي، يمكن إجراء تحسين مباشر أو غير مباشر للدهون الثلاثية والأحماض الدهنية لإنتاج هيدروكربونات شبيهة بالديزل من خلال عمليات تكسير حرارية أو حفزية، أو تقنية إزالة الأوكسجين في وسط خامل أو بوجود الهيدروجين.

تطورات إنتاج الوقود الحيوي من زيوت الطهي المستعملة في العالم

تشهد معظم مناطق العالم اهتماماً متنامياً بإنتاج الديزل الحيوي مدفوعاً بالفوائد العديدة لهذا المنتج مثل الطبيعة المتجددة، ودوره في إمكانية خفض غازات الاحتباس الحراري، وخاصة في البلدان المتقدمة مثل الولايات المتحدة الأمريكية وفرنسا والبرازيل. ومن المتوقع أن تصل نسبة استهلاك الهند لوقود الديزل الحيوي إلى 41.14% من إجمالي استهلاكها من وقود الديزل، فيما إذا تم استخدام موارد مثل زيت الطهي المستعمل والنفايات الحيوية الأخرى كمواد خام لإنتاج الديزل الحيوي.

في عام 2011 مُنحت أول شهادة لاستخدام الزيوت المستعملة في إنتاج كيروسين الطيران - HEFA SPK من المعايير الأمريكية لاختبار المواد ASTM للطائرات النفاثة عن طريق مزجها بالكيروسين التقليدي. كانت الكميات الأولية صغيرة لرحلات تجريبية وعروض توضيحية. وفي عام 2016 بدأ أول إنتاج مستمر لوقود الطائرات المستدام عندما أعادت شركة World Energy (باراماونت، كاليفورنيا) استخدام مصنع للديزل الحيوي لإنتاج وقود الطائرات المستدام من زيوت الطهي المستعملة. كان الإنتاج في هذه السنوات الأولى يُقاس بملايين الليترات سنوياً، وهي كمية قليلة جداً مقارنة بالاستهلاك العالمي لوقود الطائرات.

بين عامي 2016 و2020، استمر إنتاج وقود الطائرات المستدام باستخدام زيت الطهي المستعمل بكميات قليلة، لكنه بدأ بالازدياد عندما بدأت شركة Neste الفنلندية بتطوير عملية (NEXBTL) على نطاق أوسع بلغ عشرات الآلاف من الأطنان.

كما بدأت شركات أخرى مثل Eni الإيطالية و66 Phillips البريطانية تجارب معالجة مشتركة لدمج زيت الطهي المستعمل في عمليات مصافي تكرير النفط التي تمتلكها. وبحلول عام 2019، بدأ استخدام وقود الطائرات المستدام المشتق من زيت الطهي المستعمل من إنتاج شركة Eni في الرحلات التجارية، تبعتها الخطوط الجوية البريطانية باستخدام وقود الطائرات المستدام المنتج من زيوت الطهي المستعملة من شركة فيليبس 66 في عام 2022، حيث أشارت الشركة أنها تمكنت من التغلّب على العقبات التقنية والتنظيمية إلى حدّ كبير، مما ساهم في توسيع سريع للقدرة الإنتاجية في عشرينيات القرن الحادي والعشرين.

شهد العامان 2022-2023 نقطة تحول في إنتاج وقود الطائرات المستدام. ففي عام 2022، بلغ الإنتاج العالمي ما يُقدر بنحو 300 مليون ليتر (0.25 مليون طن) أي ضعف حجم عام 2021. وجاءت أوروبا في المرتبة الأولى في عام 2022 بنسبة 60% من إمدادات وقود الطائرات المستدام العالمية (بفضل شركات تصنيع مثل Neste وTotalEnergies، وشكل إنتاج أمريكا الشمالية نسبة 33% وآسيا نحو 7%.

في عام 2023، تضاعف الإنتاج مرة أخرى ليصل إلى أكثر من 600 مليون ليتر (0.5 مليون طن) وقد عززت هذه القفزة تشغيل منشآت جديدة أو موسعة، ولا سيما مشروع توسع Neste في سنغافورة (مما جعلها أكبر مصنع لوقود الطائرات المستدام في العالم بطاقة إنتاجيةقدرها مليون طن سنوياً، وزيادة التكرير المشترك لزيت الطهي المستعمل في مصافي تكرير النفط في الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والصين. حتى مع هذا النمو، لم يلبِّ وقود الطائرات المستدام في عام 2023 سوى حوالي 0.5 % من احتياجات وقود الطيران في العالم.

أهم منتجي وقود الطيران المستدام من زيوت الطهي المستعملة في العالم

لا تزال الشركات التي تنتج الوقود المستدام بتحويل زيوت الطهي المستعملة محدودة العدد، وأهمها، **شركة Neste الفنلندية**، المصنفة كأكبر منتج لوقود الطائرات المستدام على مستوى العالم، و**شركة World Energy الأمريكية**، المصنفة كأول شركة تنتج وقود الطائرات المستدام على المستوى التجاري

منذ عام 2016، و**شركة TotalEnergies الفرنسية،** وهي إحدى شركات النفط العالمية التي تحول مصافي تكرير النفط لتتمكن من تحويل مئات آلاف الأطنان من زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام، و**شركة Bp المملكة المتحدة** التي تجري عملية التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة في مصفاتي تكرير النفط (Lingen، و Castellon) .

يبلغ إجمالي إنتاج الوقود الحيوي المنتج من زيت الطهي المستعمل في جميع أنحاء العالم نحو 5.12 مليون طن في السنة، وهو ما يمثل نحو 11% من استهلاك وقود النقل. وفي الاتحاد الأوروبي (19%) أعلى من المتوسط العالمي، كما يبلغ إجمالي عدد المشاريع العاملة والمخطط إنشاؤها والتي هي قيد الإنشاء في العالم نحو 100 موقع لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد.

وفي الدول العربية، أبدت عدة دول خليجية اهتمامها بتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام، ولكن لا توجد مشاريع كبيرة حتى الآن. في عام 2023، أجرت الخطوط الجوية القطرية رحلة تجريبية باستخدام وقود الطائرات المستدام المنتج من تحويل زيوت الطهي المستعملة المستورد من فنلندا. ومن المتوقع إطلاق المزيد من المبادرات مع سعي شركات الطيران في المنطقة إلى تحقيق أهداف صافي انبعاثات صفري. وتعمل شركة إينوك، مقرها في دبي- دولة الإمارات العربية المتحدة، بالتعاون مع شركة Neutral Fuels من خلال مبادرتين لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود الديزل الحيوي. تبلغ الطاقة الإنتاجية لمصنع إينوك في دبي (الذي افتُتح عام 2019) نحو 50 طناً يومياً (15 مليون ليتر) من وقود الديزل الحيوي من تحويل زيوت الطهي المستعملة. وفي عام 2025 أطلقت بلدية دبي مشروعاً لتجميع زيوت الطهي المستعملة وتحويلها إلى وقود الديزل الحيوي، وذلك في إطار دعم رؤية دبي 2030 وأهداف الاقتصاد الأخضر في دولة الإمارات العربية المتحدة.

وفي المملكة العربية السعودية، أعلنت شركة أرامكو توتال للتكرير والبتروكيماويات (ساتورب) عن إنتاج وقود الطيران المستدام باستعمال زيوت الطهي المستعملة بتقنية التكرير المشترك CO-Processing في وحدة المعالجة الهيدروجينية المنخفضة الضغط، وذلك في مجمع التكرير في منطقة الجبيل على الساحل الشرقي للمملكة العربية السعودية. يأتي هذا المشروع في إطار خطة شركة توتال إنيرجيز لإنتاج 1.5 مليون طن /السنة من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2030 بما يحقق هدف الشركة للوصول إلى صفر انبعاثات بحلول عام 2050.

الفصل الأول

تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد، الفوائد والتحديات

مقدمة

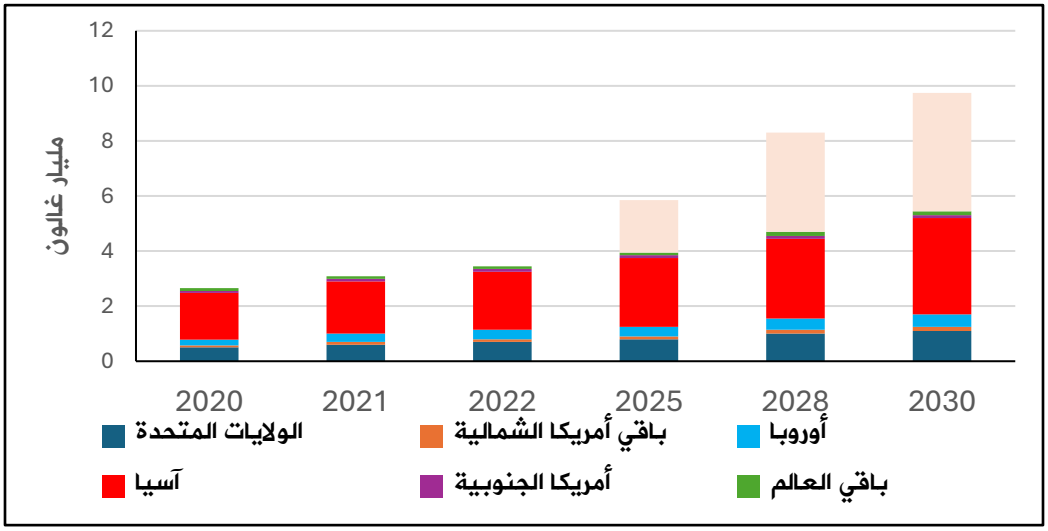
مع تنامي الاهتمام بخفض الانبعاثات الكربونية والبحث عن مصادر مستدامة لإنتاج وقود متجدد يلبي متطلبات التشريعات البيئية، ظهرت فكرة إنتاج الوقود الحيوي المشتق من الزيوت النباتية أو الدهون الحيوانية، التي تتكون من الدهون الثلاثية المعروفة باسم إستر الأحماض الدهنية المرتبطة بالغليسرين، إلا أن انتشار هذا النوع من الوقود على نطاق واسع واجه تحديات كبيرة بسبب ارتفاع تكاليف إنتاج الزيوت النباتية المستخدمة كمواد خام، والتي تشكل نحو 90% من إجمالي تكاليف الإنتاج، إضافة إلى المخاوف من أن استخدام الزيوت النباتية في إنتاج الديزل الحيوي قد تنافس إمدادات الغذاء في الأمد البعيد، مما دفع الباحثين إلى إيجاد مواد خام رخيصة ومستدامة، كان منها زيوت الطهي المستعملة. (Saini, R., 2017)

يتميز وقود الديزل الحيوي بقيمة حرارية عالية ورقم سيتاني مرتفع، فضلاً عن أن احتراقه يشكل نسبة منخفضة من الانبعاثات الضارة، مثل الجسيمات الدقيقة، وأول أكسيد الكربون، وأكاسيد الكبريت، والهيدروكربونات العطرية، مقارنة بالوقود النفطي، إلا أن تكاليف إنتاجه تفوق تكلفة إنتاج الوقود النفطي، ويرجع ذلك إلى ارتفاع تكلفة المواد الخام المنتجة من المحاصيل الزراعية، حيث تمثل 70-95% من إجمالي تكلفة الإنتاج.(Arachchige, U., et al., 2021) إضافة إلى الجدل القائم حول تأثير استخدام الزيوت النباتية لإنتاج الوقود على رفع أسعار المواد الغذائية. (Casallasa, I., et al., 2018) حيث لوحظ في السنوات الماضية ارتفاع كبير في الطلب العالمي على الزيوت النباتية من 83 مليون طن في السنة في عام 2000 إلى أكثر من 217 مليون طن في السنة في عام 2023، استخدم منها نحو167 لإنتاج وقود الديزل بينما استعمل الباقي في الغذاء والصناعات الدوائية. (Beghetto, V., 2025)

لتقليل تكلفة المواد الخام للوقود الحيوي، وإيجاد حل للجدل الدائر حول استخدام الزيوت النباتية، توجهت الأبحاث إلى دراسة إمكانية استخدام زيوت الطهي المستعملة والتي يقدر إنتاجها في جميع أنحاء

العالم بمعدل 5.6 مليار غالون سنوياً في عام 2024، ومن المتوقع أن تصل الكمية إلى ما بين 8-10 مليار غالون بحلول عام 2030. (GlobalData, 2025) يبين الشكل (1-1) توقعات تطور إمدادات زيوت الطهي المستعملة حتى عام 2030.

الشكل (1-1): توقعات تطور إمدادات زيوت الطهي المستعملة حتى عام 2030



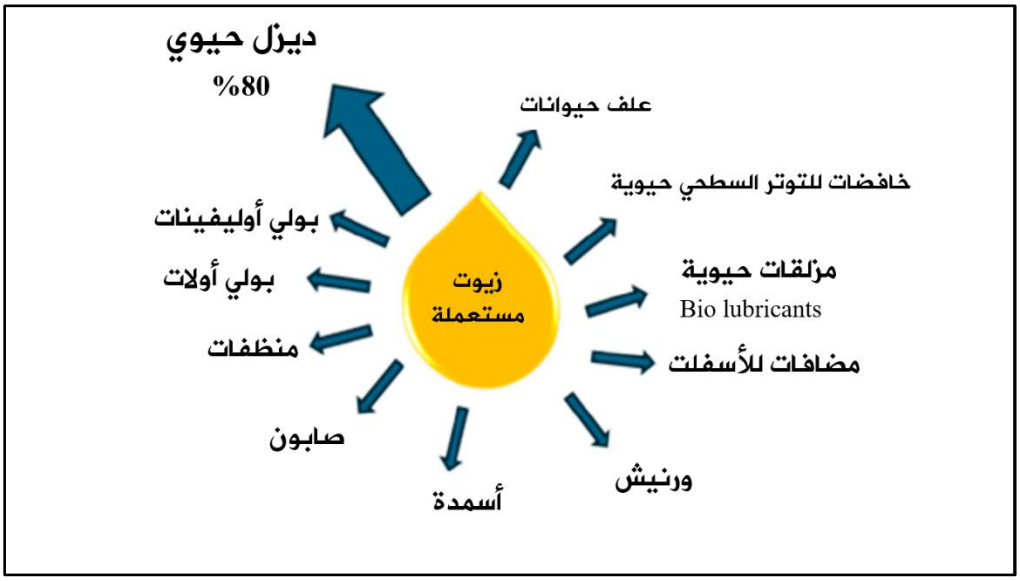
المصدر: (GlabalData, 2023)

يشير مصطلح زيت الطهي المستعمل إلى الزيت النباتي الذي تم استخدامه في طهي الطعام، ولم يعد صالحاً للاستخدام للغذاء، ويمكن تجميعه من مصادر مختلفة تشمل المنازل والمطاعم وشركات تصنيع الطعام والمطابخ الصناعية. وتعتبر زيوت الطهي المستعملة أحد مصادر تلوث المياه الجوفية ومياه الأحواض والمصارف، التي قد تدخل في النهاية إلى الأنهار أو المحيطات فتسبب أضراراً بالغة للحياة المائية، وتشكل تهديداً لصحة الإنسان والبيئة، نظراً لاحتوائها على مواد كيميائية سامة. ووفقاً للدراسات التي أجرتها منظمة الصحة العالمية، فإن ليتراً واحداً من زيت الطهي المستعمل يلوث 1000 ليتر من الماء ويصبح غير صالح للحياة، إضافة إلى ما ينتج عن ذلك من انخفاض في أداء شبكات الصرف، وزيادة في استهلاك

الطاقة بنسبة تقدر بنحو 25% في محطات معالجة مياه الصرف الصحي نتيجة ترسب المواد على سطح الأنابيب. (Casallasa, I., et al., 2018)

على الرغم من أن نحو 80 % من زيت الطهي المستعمل في العالم يتم تحويله إلى وقود ديزل حيوي إلا أن له استخدامات أخرى كأعلاف الحيوانات، وصناعة الصابون، والمنظفات، والأسمدة، وغيرها. يبين الشكل (1-2) مجالات استهلاك زيوت الطهي المستعملة في العالم. (Beghotti. V., 2025)

الشكل (1–2): مجالات استهلاك زيوت الطهي المستعملة في العالم



بالرغم من نجاح عملية إنتاج زيت الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة وانتشارها في العديد من مناطق العالم، وخصوصاً في الدول الأوروبية والولايات المتحدة، وما تتميز به هذه العملية من مزايا اقتصادية، إلا أن لهذا النوع من الوقود الحيوي بعض السلبيات كارتفاع معدل انبعاثات أكاسيد النيتروجين NOx، وانخفاض كمية الطاقة الناتجة عنه بسبب ارتفاع محتوى الأوكسجين مقارنة بالوقود النفطي، إضافة إلى ارتفاع لزوجته وصعوبة تخزينه نتيجة قابليته السريعة للأكسدة. (Hidalgo, J., et al. 2020)

من ناحية أخرى، يتطلب إنتاج الديزل الحيوي العديد من مراحل المعالجة والتحضير قبل إدخاله إلى عملية الأسترة، وينتج عن هذه المراحل بعض المخلفات. وقد يلجأ البعض لتجنب ذلك إلى استخدام زيت الطهي المستعمل للاحتراق المباشر لتوليد الحرارة والطاقة الكهربائية، بعد فصل الرطوبة والمواد الصلبة بعمليات الغسيل والتسخين. (Shaaban, S., 2012)

1-1: فوائد تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي

إلى جانب الفوائد البيئية والاقتصادية لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي هناك فوائد غير مباشرة كخلق فرص عمل جديدة لعملية تجميع الزيوت وإنتاج الوقود وتوزيعه.

من الفوائد الأخرى لاستخدام الديزل الحيوي ارتفاع درجة الوميض أعلى من 130 °م، مما يجعل التعامل معه أكثر أماناً من الوقود النفطي الذي تبلغ فيه درجة الوميض 52 °م.(Alias, N., et al., 2018)

لاستخدام الديزل الحيوي، بدلاً من الديزل البترولي، مزايا عديدة في مجال الاستدامة، من أهمها تخفيض انبعاثات الكربون، حيث أن الكمية المنخفضة من ثاني أكسيد الكربون المنبعثة في الغلاف الجوي نتيجة حرق الديزل الحيوي تمتصها النباتات الخاصة بإنتاج الزيت. ولذلك، يُعتبر الديزل الحيوي محايداً للكربون. وعندما يُنتج الديزل الحيوي من زيت الطهي المستعمل الذي كان سيُهدر إلى شبكة الصرف الصحي فإن مساهمة صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تكون موجبة.(Smith, H., et al., 2013)

فيما يتعلق بالانبعاثات من عوادم السيارات، يُعتقد أن الديزل الحيوي يتميز بانخفاض انبعاثات الجسيمات الدقيقة (PM) والهيدروكربون (HC) وأول أكسيد الكربون (CO)، مقارنةً بالديزل البترولي. إلا أن أحد عيوب استخدام الوقود الحيوي هو أن انبعاثات أكاسيد النيتروجين، وهي غازات مُسببة للضباب الدخاني، أعلى قليلاً مقارنةً بالديزل البترولي المنخفض الكبريت. (Smith, H., et al., 2013)

أما تحديات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي فتتلخص فيما يلي:

- عدم توفر البنية التحتية لتجميع زيوت الطهي المستعملة في العديد من مناطق العالم، مما يجعل إمداداتها محدودة وغير متوفرة في بعض البلدان.
- احتواء زيوت الطهي المستعملة على شوائب مثل الماء وبقايا الطعام، ونسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة. وهذا يجعلها بحاجة إلى معالجة أولية مكلفة مما يرفع من تكاليف وتعقيد عملية تحويلها إلى وقود متجدد.
- ارتفاع الطلب على زيوت الطهي المستعملة لتصنيع وقود الديزل المتجدد ووقود الطائرات المستدام، وفي نفس الوقت ارتفاع الطلب عليها لاستخدامات أخرى مثل صناعة الكيماويات الزيتية، وصناعة الأعلاف.

- غياب نظم الاختبار ومنح إجازات الجودة لزيوت الطهي المستعملة للتأكد من عدم خلطها بزيوت نباتية طازجة، أو وجود محاولات غش أخرى.
- تباين وعدم وضوح السياسات والتشريعات بين مناطق العالم، مما يضيف صعوبات على الاستثمار في مشاريع تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد.
- ارتفاع تكاليف إنتاج الوقود الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة مقارنة بالوقود التقليدي المنتج من النفط، واعتماد ربحية المشروع بشكل كبير على الحوافز الحكومية، و أرصدة الكربون، وبرامج الوقود المنخفض الكربون.

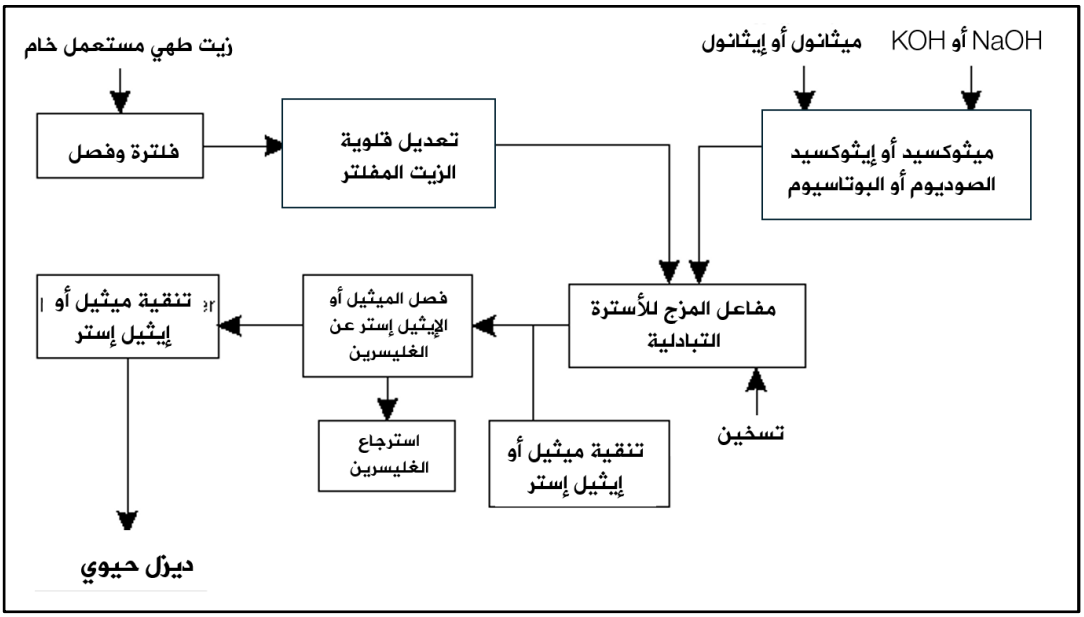
1-2: مراحل تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي

تتكون عملية تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود ديزل حيوي من المراحل الرئيسية التالية: (Smith. H., et al., 2013)

- تجميع الزيوت المستعملة من المطاعم ومصانع الغذاء.
- المعالجة الأولية لفصل المياه والشوائب
- التقطير لإزالة الروائح ونزع الأحماض الدهنية الحرة أو الأسترة الأولية لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى ميثيل إستر الأحماض الدهنية FAME (الديزل الحيوي)
- التفاعل مع الميثانول لتحويل الزيت إلى ميثيل إستر الأحماض الدهنية FAME (الديزل الحيوي)
- التنقية لاسترجاع الميثانول غير المتفاعل وإعادة استخدامه في عملية الإنتاج، وتجميع الغليسرين لبيعه كمنتج ثانوي.
- التجفيف والفلترة قبل التخزين النهائي والمزج في خزانات وقود الديزل.

يبين الشكل (1-3) مراحل تحويل زيت الطهي المستعمل إلى ديزل حيوي

الشكل (1–3): مراحل تحويل زيت الطهي المستعمل إلى ديزل حيوي



المصدر: (BERECZKY, A., 2016)

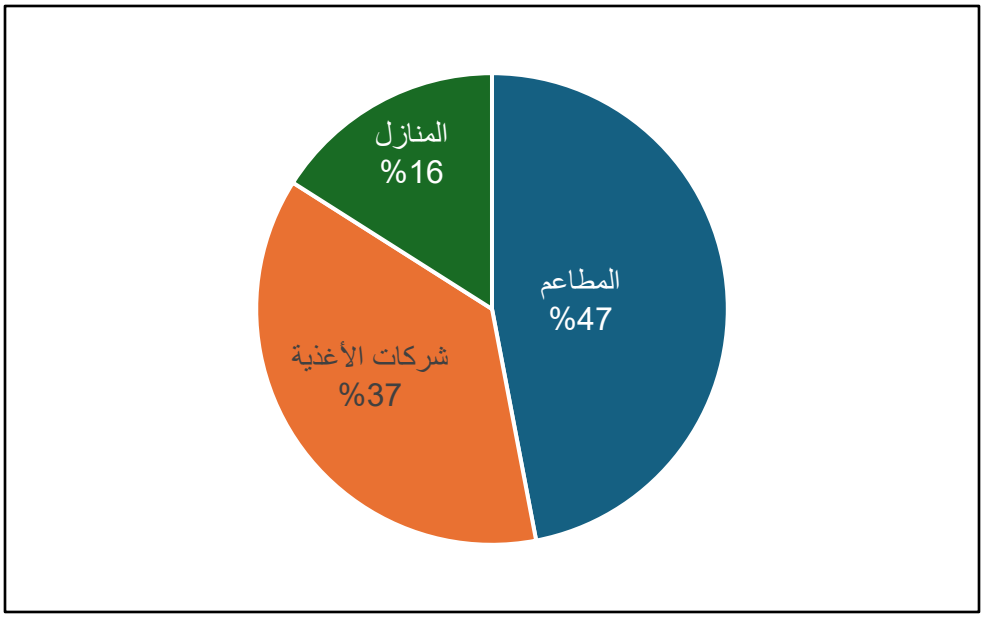
1–3: تجميع زيوت الطهي المستعملة

يعتمد نجاح عملية تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي بشكل كبير على إدارة عملية التجميع من مصانع تحضير الأغذية الكبيرة، والمطاعم، ومحلات الوجبات السريعة التي تقلي الطعام بكميات كبيرة، إضافة إلى تنظيم عملية تخزين الزيوت المستعملة وتحضيرها لإنتاج الوقود الحيوي منها.

تنقسم عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة إلى قطاعين، قطاع صناعي وقطاع منزلي. يشتمل القطاع الصناعي على شركات تصنيع الغذاء، والمطاعم، والشركات الأخرى المتخصصة بتقديم الطعام والمستشفيات والمدارس. تشكل المطاعم المصدر الرئيسي لزيوت الطهي المستعملة، حيث بلغت نسبتها على مستوى العالم 47% من إجمالي زيوت الطهي المستعملة التي تم تجميعها في عام 2023، تليها شركات صناعة الأغذية بنسبة 37%، ثم الاستعمال المنزلي بنسبة 18% ومصادر أخرى بنسبة 3%. وتعتبر عملية تجميع الزيوت المستعملة من القطاع الصناعي أسهل وأقل تكلفة مقارنة بالقطاع المنزلي، نظراً لإمكانية الحصول عليها بكميات كبيرة، إضافة إلى أن تجميع الزيوت من القطاع المنزلي يحتاج إلى إقناع الجمهور

بعملية إحضار الزيوت إلى أماكن التجميع. يبين الشكل (1-4) توزع نسبة زيوت الطهي في العالم حسب المصدر.

الشكل (1–4): توزع نسبة زيوت الطهي في العالم حسب المصدر

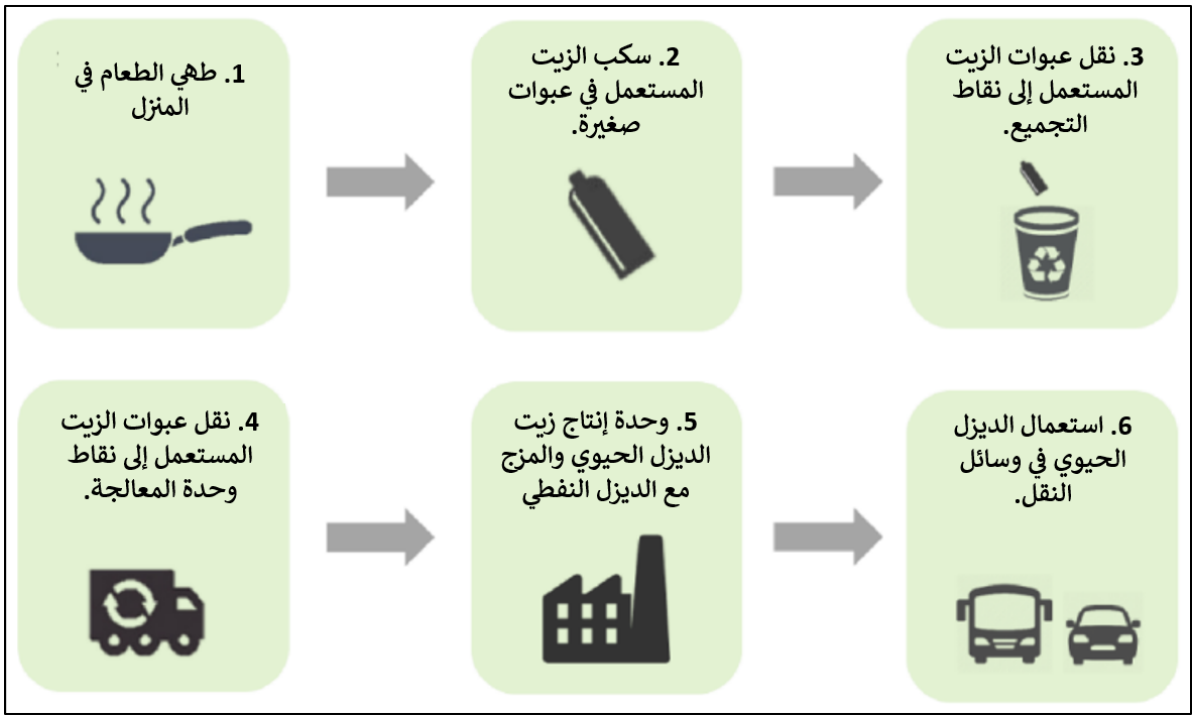


المصدر:(Gong, Y., et al., 2024)

1–3–1: القطاع المنزلي

يوجد ثلاث طرق لتجميع زيوت الطهي المستعملة من القطاع المنزلي، **الطريقة اللامركزية** حيث تقوم الشركة المسؤولة عن التجميع بالمرور إلى البيوت لتجميع الزيوت المستعملة. **والطريقة المركزية** التي يقوم فيها المواطن بإحضار الزيت المستعمل إلى نقاط تجميع عامة يمكن أن تتمركز بالقرب من المدارس ومراكز التسوق، ومواقف السيارات والأبنية البلدية، حيث يتم سكب الزيت المستعمل في حاوية كبيرة أو يتم إحضاره في عبوات صغيرة مخصصة لهذه الغاية. أما **الطريقة الثالثة** فهي مزيج بين الطريقتين. يبين الشكل (1-5) مراحل عملية التجميع المركزية لزيوت الطهي المستعملة في القطاع المنزلي.

الشكل (1–5): مراحل عملية التجميع المركزية لزيوت الطهي المستعملة في القطاع المنزلي



المصدر: (Grinsven, A., et al., 2020)

1–3–2: القطاع الصناعي

يتم تجميع زيت الطهي المستعمل من المطاعم وشركات تصنيع الأغذية بشكل مباشر إلى وحدات إنتاج الديزل الحيوي أو مراكز تجميع خاصة، حيث يصفى من المياه المرافقة وقطع الطعام المتبقية قبل بيعها إلى شركات تسويق زيوت الطهي المستعملة. (Grinsven, A., et al., 2020)

تختلف طرق تجميع الزيوت المستعملة من منطقة لأخرى تبعاً لعوامل عديدة. فعلى سبيل المثال، تتبع بريطانيا أربعة طرق لتجميع الزيوت المستعملة، وذلك على النحو التالي:

- شركات توريد زيت الطهي الجديد، حيث تتولى شركات توزيع الزيت الجديد عملية استرجاع الزيت المستعمل من الزبائن، ويتم تعويض الزبون من خلال تخفيض سعر الزيت الجديد مقابل كمية الزيت المستعمل المسترجعة.
- طريقة الدفع النقدي لكل ليتر يتم تجميعه من زيت الطهي المستعمل كقيمة تشجيعية تتراوح بين 10-20 بنس لكل ليتر. وتتولى هذه العملية شركات متخصصة بالتجميع. ويمكن للشركات ذات

الأحجام الأصغر أو التي لا تمتلك أماكن دائمة (مثل وحدات تقديم الطعام المتنقلة) إعادة الزيت المستعمل إلى المتاجر والحصول على 10 بنسات لكل ليتر.

- شركات تجميع النفايات المتخصصة بجمع النفايات المتنوعة يمكن أن تتولى تجميع زيوت الطهي المستعملة مستفيدة من المعدات والمتوفرة لديها في تخفيض التكاليف.
- تتولى شركات إنتاج الديزل الحيوي عملية التجميع إلى مواقع الإنتاج دون الاستعانة بشركات تجميع.
- طريقة الحلقة المغلقة، حيث يتم التعاقد بين الشركات المستهلكة لزيت الطهي مع شركات إنتاج الوقود الحيوي على تسليم كمية من الوقود الحيوي للاستخدام الذاتي مقابل كمية الزيت المستعمل التي تسلمها.
- مجموعة صغيرة من الأفراد يقومون بجمع الزيت دون أي تكلفة للاستخدام الشخصي، إما في مركباتهم أو في توليد الكهرباء، وبيع الفائض عن حاجتهم. (Smith, H., et al., 2013)

1-4: عوامل نجاح عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة

تشير الدراسات إلى أن عملية التجميع تعتبر من أهم التحديات التي تواجه الاستفادة من زيوت الطهي المستعملة. تختلف هذه الصعوبات باختلاف المصدر وطريقة استعمال الزيت، من أهمها ارتفاع تكاليف النقل من المطاعم إلى نقاط التخزين، وصعوبة الوصول إلى نقاط التجميع المركزية وعدم معرفة أماكن تواجدها، ونقص الوعي بخطورة الأثر البيئي لرمي الزيوت المستعملة في مجاري المياه، إضافة إلى عدم اليقين في مستوى أرباح شركات التجميع بسبب تأرجح كميات زيوت الطهي المستعملة التي تنتجها المطاعم.

يعتمد نجاح عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة على عاملين رئيسيين هما العامل الاقتصادي وعامل التشريعات الناظمة. فبالنسبة للعامل الاقتصادي يمكن تشجيع المطاعم على تجميع الزيوت المستعملة بمنح تعويضات مالية، وبالتالي تزداد كمية الزيوت المجمعة من المطاعم كلما كان الثمن المدفوع عالياً. أما ما يتعلق بالتشريعات فتساهم في ضبط العملية وإلزام البائعين على استرداد كمية من الزيوت المستعملة مقابل تسليمهم الزيت الجديد.

1-4-1: النظم والقواعد

تكتسب القواعد والتشريعات أهمية بالغة في نجاح عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة، وتختلف طريقة إصدار وتطبيق هذه التشريعات والقواعد من دولة لأخرى حسب الظروف السائدة في كل بلد، فعلى سبيل المثال، في بلجيكا، يلتزم بائعو الزيوت النباتية الغذائية بقوة القانون بالبرنامج الوطني لاسترجاع زيوت الطهي المستعملة، وتتولى هيئة مختصة بإدارة تراخيص بيع الزيوت والتعويضات التي تدفع للبائعين مقابل نسبة إعادة الزيت المستعمل. وفي فرنسا تُعهد مسؤولية تجميع الزيوت المستعملة إلى منتجي الديزل الحيوي منذ عام 2012، وعليهم إثبات قدرتهم على القيام بهذه المهمة قبل الحصول على ترخيص إنشاء الوحدة. أما في هولندا فلم تصدر أية تشريعات لتنظيم عملية تجميع الزيوت المستعملة، حيث تتم بشكل عادي في إطار عملية فرز وتدوير كافة أنواع النفايات. وفي المملكة المتحدة تفرض الحكومة على شركات تجميع ومعالجة زيوت الطهي المستعملة أن تكون مسجلة لدى وكالة البيئة لمنحها ترخيص شركة متخصصة بتجميع الزيوت المستعملة. (Grinsven, A., et al., 2020)

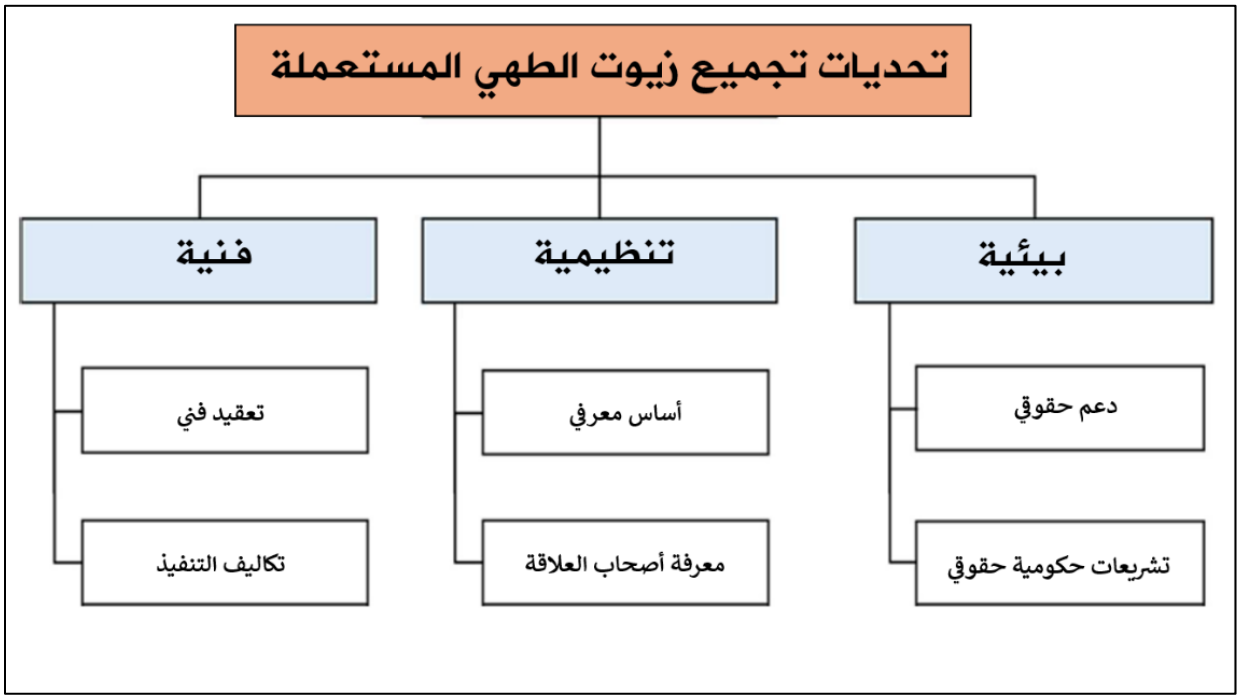
كما أصدرت الحكومة البريطانية قانوناً في عام 1991 يمنع رمي زيوت الطهي المستعملة في مجاري الصرف الصحي، أو استخدامها في تصنيع أعلاف الحيوانات، وحصر تصريفها عبر شركات تجميع النفايات، مع فرض غرامات لمن يخالف هذا القانون. (Smith, H., et al., 2013)

1-4-2: إعداد قاعدة بيانات لتوثيق عملية التجميع

تواجه عملية التجميع مشكلة خلط زيوت الطهي المستعملة بالزيوت المعدنية التالفة، مما يؤدي إلى تردي جودة الزيوت وارتفاع تكاليف معالجتها حتى تصبح صالحة للتحويل إلى وقود حيوي. يعود سبب صعوبة الكشف عن الغش في عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة إلى تشابه زيت الطهي المستعمل والزيت النباتي الجديد من الناحية الكيميائية إلى حد كبير. عادةً ما يحتوي زيت الطهي المستعمل على مستويات أعلى من الأحماض الدهنية الحرة، ونواتج أكسدة أكثر، وشوائب، ولكن يمكن تنظيفها. يمكن للاختبارات المتطورة (مثل فحص ملوثات محددة أو تحليل نظائر الكربون) أحيانًا تحديد ما إذا كان الزيت قد مر عبر عملية القلي، إلا أن النتائج ليست مضمونة. (Grinsven, A., et al., 2020)

لمكافحة الغش في عملية جمع زيوت الطهي المستعملة يطلب من شركات التجميع مراقبة جودة الزيت من خلال نظام مراقبة مشدد، والاحتفاظ بسجلات مفصلة للكميات المستلمة والمُرسلة. يُخصص لكل دفعة رقم شهادة خاص. تخضع هذه الشركات لعمليات تدقيق أولية وسنوية من قِبل جهات خارجية. تتضمن عملية التدقيق عادةً مراجعة سجلات الشراء، ومذكرات التسليم. فعلى سبيل المثال، دعت المفوضية الأوروبية خلال الفترة 2023-2024 خبراء لتعزيز عملية التحقق، وتشمل المقترحات إجراء عمليات تدقيق إلزامية في الموقع لجامعي النفايات الأجانب، وتشديد العقوبات مثل إلغاء الشهادات بأثر رجعي في حال اكتشاف احتيال، وطلب بيانات تحديد الموقع الجغرافي لمكان جمع النفايات. يبين الشكل (1-6) تحديات عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة.

الشكل (1–6): تحديات عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة



المصدر: (Gong, Y., et al., 2024)

لتفادي الصعوبات التي تعترض عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة وضمان نجاحها لا بد من وجود دور فعال للحكومات، وذلك من خلال الإجراءات التالية: (Arachchige, U., et al., 2021)

- إصدار التشريعات التي تحظر إعادة استخدام زيوت الطهي المستعملة في العمليات الغذائية.
- حظر تصريف زيوت الطهي المستعملة في خطوط تصريف مياه الصرف الصحي.

- إنشاء قاعدة بيانات لحصر ومراقبة التطورات المتعلقة بإنتاج واستيراد وتصدير زيوت الطهي الطازجة والمستعملة من قبل الصناعات المختلفة.
- إنشاء نظام شهادة وتشجيع شركات جمع زيوت الطهي المستعملة ونقلها إلى شركات إنتاج الديزل الحيوي.
- وضع معايير لمواصفات الجودة الدنيا لزيوت الطهي الطازجة التي يتم تسليمها للمطاعم وزيوت الطهي المستعملة التي يتم جمعها لإنتاج الوقود الحيوي.
- تنظيم حملات إعلامية لتوعية المستهلك بمخاطر التعامل مع الزيوت المستعملة وفوائد تجميعها، والتعريف بأساليب تحسين استخدام الزيوت في عمليات الطهي في المؤسسات المختلفة التي تنتج الزيوت المستعملة.
- تعزيز التعاون بين مراكز الأبحاث والمؤسسات والشركات، لتحديد أولويات البحث والتطوير في هذا المجال.
- إنشاء علامات تجارية مسجلة للزيوت المعاد تدويرها وما يمزج بها من الدهون الأخرى كمواد خام في إنتاج الديزل الحيوي.
- تطوير اختبارات تحليل سريعة لتحسين مراقبة جودة الزيوت المستعملة والحفاظ على جودة زيوت الطهي المستعملة.
- تحديد أسعار الزيوت المستعملة وإنشاء البنية التحتية لعملية التجميع من حاويات ووسائل وتحديد الشركات المستهلكة التي سيتم توصيل الزيت إليها.
- إجراء دراسات بحثية حول التأثير السام للزيوت والمونوميرات الحلقية والثنائيات ومركبات الأكسدة الثانوية وأكاسيد الستيرول الناتجة عن القلي.

يبين الجدول (1-1) فوائد وصعوبات تجميع زيوت الطهي المستعملة. كما يبين الجدول (1-2) تحليل مواطن القوة والضعف، وفرص وتحديات عملية تجميع زيوت الطهي المستعملة في بعض دول العالم.

الجدول (1–1): فوائد وصعوبات تجميع زيوت الطهي المستعملة

فوائد تجميع زيوت الطهي المستعملة	صعوبات تجميع زيوت الطهي المستعملة من المطاعم	صعوبات تجميع الزيت المستعمل من المنازل
• القيمة الاقتصادية للزيت المستعمل كمصدر متجدد. • حماية البيئة من التلوث الناتج عن رمي الزيت المستعمل في مجاري الصرف الصحي، وتفادي زيادة نفقات معالجة المياه وانسداد خطوط الصرف.	• ارتفاع تكاليف عملية تجميع الزيوت المستعملة بما في ذلك تكاليف النقل والأعمال الإدارية. • عدم استقرار العائد الاقتصادي من عملية التجميع بسبب تأرجح سعر وكمية الزيوت المستعملة.	•ارتفاع تكاليف تجميع الزيوت المستعملة بما في ذلك تكاليف النقل والأعمال الإدارية. • نقص المعرفة بأماكن نقاط تجميع الزيوت المستهلكة. • الجهل بالأضرار البيئية لزيوت الطهي المستعملة. • نقص تمويل حملات توعية الجمهور بأهمية تجميع زيوت الطهي المستعملة.

المصدر: (Sidhwani, I., et al., 2023)

الجدول (1–2): تحليل مواطن القوة والضعف، وفرص وتحديات تجميع زيوت الطهي المستعملة في بعض دول العالم

الدولة	مواطن القوة	مواطن الضعف	الفرص	التحديات
البرازيل	استبدال للقيم زيت الصويا العالي الإنتاجية	ارتفاع تكاليف إنتاج الوقود الحيوي مقارنة بالوقود الأحفوري بسبب نقص البنية التحتية لعملية النقل والتجميع.	• خلق فرص عمل للمهن التي لا تحتاج إلى خبرة • تخفيض تلوث المياه الجوفية. • تلبية الطلب المحلي على الوقود.	• احتمال إعادة استخدام الزيت المستعمل في سلسلة إمداد الغذاء. • صعوبة تجميع الزيوت المستعملة بالكمية المطلوبة.
الصين	انخفاض التدوير غير القانوني لزيوت الطهي المستعملة نتيجة الحوافز التي تمنح لعمال التجميع	بعض المؤسسات تبيع الزيوت المستعملة لمشترين غير قانونيين بهدف الربح	منح حوافز للمطاعم التي تستخدم الوقود الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة لتوليد الطاقة.	قيام بعض المؤسسات الصغيرة برمي الزيوت المستعملة في شبكة المياه الصحية.
اليابان	تقديم دعم لمنتجي الوقود الحيوي المصنع من زيوت الطهي المستعملة لتخفيض تكاليف الإنتاج.	تباين أسعار الوقود الحيوي نتيجة اختلاف التقنيات المطبقة في عملية الإنتاج.	تقديم إعفاءات ضريبية لمنتجي ومستهلكي الزيوت الحيوية المصنعة من زيوت الطهي المستعملة.	ضرورة إلزام كافة المنتجين بتطبيق تقنيات متطورة موحدة لتفادي التباين في الأسعار.
الولايات المتحدة	منح منتجي الوقود الحيوي 0.5 دولار/الغالون أدى إلى رفع معدل تدوير زيت الطهي المستعمل إلى 100%.	الحوافز الممنوحة أدت إلى تنامي الإمدادات غير القانونية لزيت الطهي المستعمل.	قيام الحكومة الفيدرالية بإجراءات صارمة لضبط المطاعم بإعطائها حوافز ودعم أكبر وتصنيف صحي أعلى.	• الحاجة إلى إدارة وضبط أكثر صرامة. • غياب آلية تحفيز للمطاعم تؤثر سلباً على عملية التجميع.

المصدر: (Manikandan, G., et al., 2023)

1-5: توقعات تطور تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود مستدام

تشير التوقعات إلى أنه بحلول عام 2030، سينمو إنتاج الوقود المتجدد المنتج من تحويل زيوت الطهي المستعملة وخصوصاً وقود الطائرات المستدام (SAF) وسيتحول من مشاريع صغيرة إلى مشاريع ضخمة بمليارات الليترات، وذلك بتأثير العوامل الرئيسية التالية:

- **النمو الكبير لإنتاج وقود الطائرات المستدام** الذي حدث في السنوات الخمس الأولى من عشرينيات القرن الحادي والعشرين، حيث تضاعف الإنتاج مرتين أو ثلاث مرات سنوياً. على سبيل المثال ارتفع الإنتاج من 300 مليون ليتر في عام 2022 (0.25 طن) إلى 600 مليون ليتر (0.5 طن) في عام 2023. حتى مع احتمال حدوث تباطؤ بعد عام 2025، فإن منحنى النمو الإجمالي سيبقى في ارتفاع شديد. ويعود السبب في ذلك إلى الانتشار السريع لمصافي الوقود المستدام القائمة على زيوت الطهي المستعملة.

- **التوسع الجغرافي:** فقد كان إنتاج وقود الطائرات المستدام في البداية يتركز في أوروبا بفضل السياسات المتبعة، ولكنه الآن يتجه نحو العولمة وخصوصاً في أمريكا الشمالية، إضافة إلى دخول آسيا إلى السوق بحلول عام 2030، وسيتم إنتاج وقود الطائرات المستدام في جميع قارات العالم (ربما باستثناء أفريقيا).(IATA, 2024)

- **السياسات التحفيزية** التي تلجأ إليها الحكومات لتحسين الاقتصاد. وبحلول عام 2030 من المتوقع التركيز أكثر على هذه السياسات بدافع خفض تكاليف الإنتاج وتشجيع المستثمرين. (Pratt, S., 2025)

- **التزام شركات الطيران بمتطلبات التشريعات المناخية**، التي تهدف إلى تحقيق صافي صفري للانبعاثات بحلول عام 2050، حيث أن وقود الطائرات المستدام لا غنى عنه في هذه الحالة. ولهذا السبب، أبرمت العديد منها عقود شراء طويلة الأجل من وقود الطائرات المستدام (أكثر من 16 مليار ليتر بحلول عام 2030 حتى الآن. علاوة على توجه العديد من شركات النفط العالمية الكبرى نحو التحول لإزالة الكربون من عملياتها ومنتجاتها، ومن المتوقع أن تمتلك شركات النفط الكبرى حصة كبيرة من طاقة وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2030. (Wood, L., 2024)

- **الاستثمار والاقتصاد:** من المرجح أن تتجاوز القيمة التراكمية للاستثمار في إنتاج وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2030 نحو 50 مليار دولار عالمياً، وأن الإنتاج سوف يرتفع من 538 مليون ليتر في

عام 2022 إلى 18.2 مليار ليتر بحلول عام 2030. ومع ذلك، لا يزال التكافؤ في التكلفة مع وقود الطائرات التقليدي بعيداً، ومن المتوقع أن تظل تكلفة وقود الطائرات المستدام ضعفين إلى ثلاثة أضعاف تكلفة وقود الطائرات النفاثة النفطي في عام 2030 في غياب سعر كربون مرتفع. وبالتالي فإن ارتفاع أسعار النفط أو رفع سعر الكربون سيساهم في أن يصبح وقود الطائرات المستدام أكثر تنافسية. (Harrington, T., 2023)

1-6: أمثلة لتجارب تجميع زيوت الطهي المستعملة

أطلقت بلجيكا في عام 2004 برمجاً وطنياً يتكون من إنشاء آلاف نقاط التجميع، رافقه حملة إعلامية قوية لتوعية الجمهور، أسفرت عن تجميع نحو 8300 ألف طن سنوياً. وفي النمسا حققت حملة تجميع الزيوت المستعملة المرتبة الأولى في أوروبا من حيث كمية الزيت المجمعة، حيث وصلت إلى 1 كغ للفرد، وذلك من خلال توفير عبوات في المجمعات الاستهلاكية وفي المراكز البلدية لتعبئة الزيت المستعمل في المنازل. وفي هولندا وصلت كمية زيوت الطهي المستعملة إلى 0.21 كغ لكل فرد. وفي إسبانيا اتبعت شركات تجميع زيوت الطهي المستعملة أسلوب منح هدية مقابل كل كمية يتم تسليمها، أو تقوم المجمعات الاستهلاكية بمنح المشتري خصم من ثمن الزيت الجديد مقابل تسليم كل ليتر من الزيت المستعمل.

1-6-1: حملة مجموعة MOL لتجميع زيوت الطهي المستعملة

في عام 2011، أطلقت مجموعة MOL (وهي شركة نفط وغاز عالمية مقرها في بودابيست- هنغاريا) برنامجاً لتبسيط عملية جمع الزيوت المستعملة من المنازل. وفي إطار هذا البرنامج، يُمكن تسليم الزيوت المستعملة في مواقع حددتها المجموعة، وذلك بهدف تحويل الزيت المجمع إلى وقود حيوي.

انطلق المشروع في هنغاريا ثم تبعتها كل من سلوفاكيا ورومانيا وصربيا وكرواتيا في تطبيق برنامج مماثل. منذ عام 2011 نظمت مجموعة MOL حملات سنوية للتعريف بالبرنامج وتوعية السكان بأضرار رمي زيوت الطهي المستعملة على البيئة. وقد نجحت الحملة الأولى في توفير 473 نقطة تجميع في كافة أنحاء هنغاريا، وتجميع نحو 800 طن من زيوت الطهي المستعملة.

وفي عام 2014 أسفرت حملة التوعية عن تحسن ملحوظ في الوعي العام وسلوك المواطنين، حيث أمكن تجميع كمية قياسية من الزيت خلال الشهر الأول من السنة بلغت 2002 طناً، أي ما يزيد بنحو سبع

أطنان عن الرقم القياسي الشهري السابق منذ عام 2011، وذلك نتيجة إضافة جوائز مالية للمشاركين في الحملة مما أدى إلى ارتفاع عدد المسجلين بنسبة 72% مقارنة بعام 2013. كما حظي الموقع الإلكتروني الذي أُنشئ للترويج للحملة في عام 2014 بأربعة أضعاف عدد الزوار مقارنةً بالموقع المُعدّ لحملة العام السابق، وحظي الفيديو الترويجي للحملة بأكثر من 55 ألف مُشاهد على يوتيوب. يتضمن الفيديو ثلاثة أفلام رسوم متحركة، تبين مواقفَ مُضحكة لما يُمكن أن يحدث لزيت الطهي المُستعمل الذي يُنسى في المنازل. وقد فاز الفيديو الذي أطلق عليه إسم "هابي أويل" بجائزة دولفين في مهرجان أفلام جوائز الإعلام والتلفزيون الذي عُقد في أكتوبر 2016.

لم يقتصر نجاح الحملة في تحقيق بعض الفوائد المالية من خلال جمع وتكرير حوالي 800 طن من الوقود الحيوي بين عامي 2011 و2016 فحسب، بل كان للحملة فوائد معنوية تتعلق بحماية البيئة وتوعية العامة بأهمية زيوت الطهي المستعملة كمصدر من مصادر الطاقة المتجددة. (MOL Group, 2020)

1-6-2: حملة تجميع زيوت الطهي المستعملة في الولايات المتحدة الأمريكية

إلى جانب حملات التوعية التي تنظمها هيئات حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية لتجميع الزيوت المستعملة من المطاعم تُدير بعض الحكومات المحلية برامج لتجميع زيت الطهي المستعمل من المنازل من خلال مراكز ترعاها بلديات المدينة. على سبيل المثال، تخصص بعض المدن نقاط تجميع في الأماكن العامة، وتُوفر عبوات بلاستيكية مجانية ذات قمع لتخزين الزيوت المستعملة.

الفصل الثاني

المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة

تكمن مشكلة تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في احتوائها على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة Free Fatty Acids التي تتفاعل مع المحفز في وحدة أسترة الزيوت فتشكل مواد خافضة للتوتر السطحي Surfactants، إضافة إلى وجود الرطوبة والجسيمات الصلبة التي تؤدي إلى تشكل الرواسب الكربونية في وقود الديزل والتي تسبب انسداد أنابيب منظومة الوقود في المحركات، لذلك يجب تخليص الزيت من هذه الشوائب قبل إدخاله إلى عملية التحويل إلى وقود حيوي. يبين الجدول (2-1) خصائص زيوت الطهي المستعملة.

الجدول (2-1): خصائص زيوت الطهي المستعملة

الخصائص	القيمة	وحدة القياس
محتوى الدهون	99.19	%
الأحماض الدهنية الحرة	2.98	%
مؤشر الإيودين	34.84	%
مؤشر التصبن	161.995	ملغ KOH / غ
المواد الطيارة	0.38	%
إجمالي المواد الصلبة	0.58	%

المصدر: (Hidalgo, J., et al. 2020)

حتى الآن لا توجد معايير دولية لقياس جودة زيوت الطهي المستعملة وتحديد صلاحيتها كمادة خام لإنتاج الديزل الحيوي، إلا أن هناك توافقاً على ألا تزيد نسبة الشوائب عن 1%، ونسبة الأحماض الدهنية الحرة عن 4%.

قبل استخدام زيوت الطهي المستعملة كمواد خام لإنتاج الديزل الحيوي، تقوم شركات التجميع بمعالجة الزيوت المجمعة لفصل الشوائب منها قبل تسليمها إلى مصانع الديزل الحيوي، وقد ترسل مباشرة إلى وحدات إنتاج الديزل الحيوي لتتولى معالجتها. ويشمل ذلك الفلترة لإزالة المواد الصلبة والصمغ والفسفوليبيدات ونزع الماء. بالإضافة إلى ذلك، غالبًا ما تكون إزالة الحموضة مطلوبة، حيث يميل الزيت المستعمل إلى أن يكون أكثر حموضة من الزيت الجديد. (Phillips, D., 2019)

تختلف جودة وخصائص زيوت الطهي المستعملة من شحنة لأخرى، مما يؤثر على عملية إنتاج الوقود، حيث أن تفاعلات التحلل المائي والتصبن تتسبب في انخفاض إنتاج الديزل الحيوي وارتفاع استهلاك المحفز Catalyst، ولهذا يجب تنقية الزيت قبل إدخاله إلى وحدات إنتاج وقود الديزل الحيوي.

يعود الاختلاف في جودة الزيوت المستعملة إلى سببين رئيسيين، الأول يتعلق بنوع المادة التي صنع منها الزيت الطازج، فعلى سبيل المثال يختلف زيت الطهي المستعمل المصنوع من زيت النخيل (الذي يستخدم كثيراً في آسيا) بشكل كبير عن زيت الطهي المستعمل الذي يعتمد على زيت بذور اللفت (الذي يستخدم كثيراً في دول الاتحاد الأوروبي). ونظراً لوجود فرق كبير في تركيبة الأحماض الدهنية بين أنواع النباتات المحتوية على الزيت، فإن ذلك يؤدي إلى إنتاج زيوت ذات خصائص فيزيائية وكيميائية مختلفة.

أما السبب الثاني فيتعلق إلى حد كبير بطبيعة وزمن عملية الطهي ودرجات الحرارة التي يتعرض لها الزيت أثناء القلي ونوع الطعام المقلي، حيث يخضع الزيت أثناء عملية القلي لعمليات كيميائية مختلفة تغير من خصائصه الفيزيائية والكيميائية، بما في ذلك قيمة الحموضة، واللزوجة، ونوع الأحماض الدهنية، والقيمة الحرارية، ومحتوى الرطوبة، والكربون. يبين الجدول (2-2) التغيرات في التركيب الكيميائي للزيت المستعمل أثناء عملية القلي. كما يبين الجدول (2-3) تغير خصائص الزيت المستعمل حسب الاستعمال.

الجدول (2-2): تغيرات التركيب الكيميائي للزيت المستعمل أثناء عملية القلي

التفاعل الكيميائي	السبب	تغير التركيب
تحلل مائي Hydrolysis	تفاعل الماء الموجود في الطعام مع زيت القلى في درجات الحرارة المرتفعة، وتفاعل رطوبة الجو مع الزيت.	زيادة في نسبة الجزيئات القطبية في الزيت المستعمل، إنتاج الأحماض الدهنية الحرة والغليسرول.
تفسخ حراري Thermal Degradation	يتفسخ ثلاثي الغليسيريد عند درجات الحرارة المرتفعة بغياب الأوكسجين.	إنتاج ألكانات Alkanes ، وألكينات Alkenes، وكيتونات نظامية systematic Ketones، وإستيرات الأوكسوبروبيل Oxopropyl esters، وCO، وCO_2، ومركبات ثنائية اليترابط Dimeric compounds
أكسدة Oxidation	تفاعل مع أوكسجين الهواء الجوي المحيط	تشكل بيروكسيد مائي Hydroperoxide، وتغير في محتوى الداينات واليترانيات المترافقة Conjugated dienes and trienes
بلمرة Polymerization	تفاعل بين مجموعات أسيل الدهون غير المشبعة Unsaturated Fatty Acyl Groups في درجات الحرارة المرتفعة.	تشكل ثلاثي أسيل غليسيريدات مبلمرة polymerized triacylglycerides، وثنائيات التكافؤ dimers، والأوليغوميرات Oligomers.

المصدر: (Panadare, D., & Rathod, V., 2025)

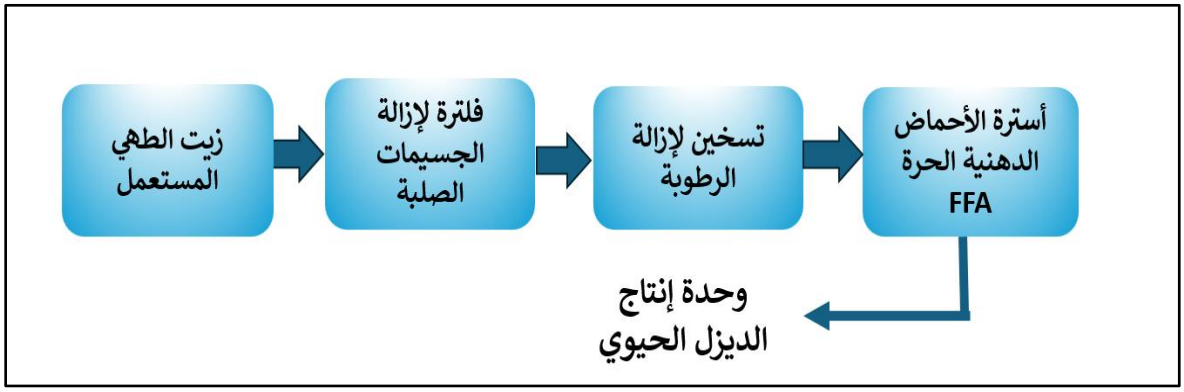
الجدول (2-3): تغير خصائص زيت الطهي المستعمل حسب طريقة الاستعمال

الخصائص	منزلي	المطاعم	مطاعم الوجبات السريعة
الكثافة (كغ/م3)	0.8929	0.8993	0.8969
S (جزء بالمليون وزناً)	0.00	187.70	26.30
N (جزء بالمليون وزناً)	0.40	49.10	61.90
H (% وزناً)	11.56	11.52	11.58
C (% وزناً)	77.24	76.53	76.32
O (% وزناً)	11.20	11.92	12.09
معامل الانكسار Refractive Index	1.45602	1.45561	1.45463
معامل البروم Bromine Index	46.6	43.1	44.3

المصدر (Alias, N., et al., 2018)

تتكون عملية المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة قبل إدخالها إلى وحدة إنتاج الديزل الحيوي من ثلاث مراحل رئيسية: (1) الفلترة بمواد سلولوزية، (2) والتجفيف بالتسخين أو بالسيليكا جيل، (3) والأسترة بالميثانول لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى إستيرات الميثيل Methyl Esters يبين الشكل (2-1) مراحل عملية معالجة زيوت الطهي المستعملة.

الشكل (2-1): مراحل عملية معالجة زيوت الطهي المستعملة



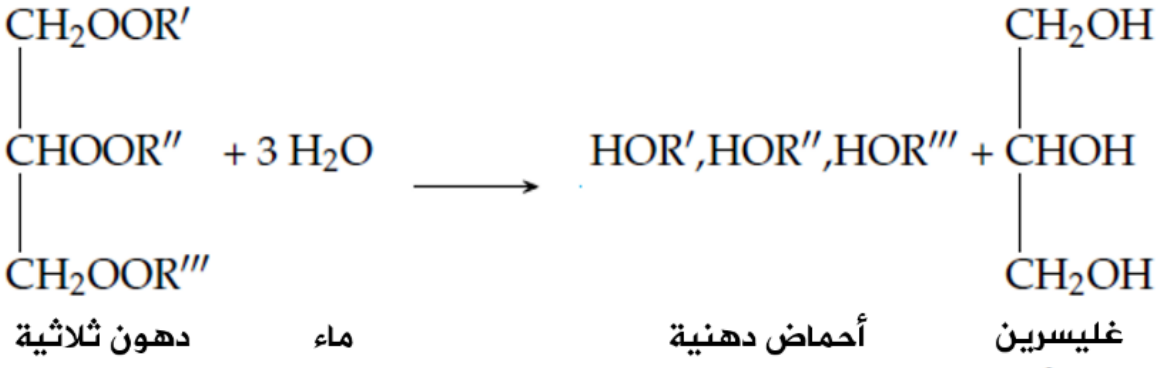
المصدر:(Kristiana,T., et al., 2023)

2-1: فصل الجسيمات الصلبة

تتم عملية فصل الجسيمات الصلبة من الزيت المستعمل بطريقتين. تعتمد الطريقة الأولى على الترقيد في خزانات كبيرة والفلترة مع تسخين الزيت إلى درجة حرارة أعلى من 60 °م، حيث تتم إزالة الجسيمات الدقيقة والمواد الكربونية الناتجة عن احتراق المواد العضوية، وقطع الورق وبقايا الطعام، والمواد الصلبة الأخرى، إضافة إلى فصل الدهون الصلبة أو المواد ذات درجة الانصهار المنخفضة التي تتشكل أثناء عمليات القلي. أما الطريقة الثانية فتعتمد على فصل الجسيمات الصلبة ومحتوى الماء في الزيت باستخدام أجهزة الطرد المركزي، وتتميز هذه الطريقة بارتفاع تكاليفها الاستثمارية والتشغيلية مقارنة بالطريقة الأولى. (Lichtfouse, E., et al., 2020)

2-2: التجفيف

يحتوي زيت الطهي المستعمل على نسبة من الرطوبة الناتجة عن عملية الطهي، كما يمكن أن يؤدي وجود الماء في المواد الخام إلى التحلل المائي للدهون الثلاثية فتتحول إلى أحماض دهنية حرة، وهي مركبات تؤدي إلى خفض على كفاءة عملية التحويل، وذلك كما هو مبين في المعادلة التالية: (Saini, R., 2017)



2-3: فصل الأحماض الدهنية الحرة FFA

يمكن أن يكون لتركيز الأحماض الدهنية الحرة في الزيت المستعمل تأثير كبير على تفاعلات الأسترة التبادلية، فإذا تجاوزت نسبتها عن 3% وزناً فقد يحدث التصبن (تكوين الصابون)، مما يتسبب في انخفاض إنتاج الديزل الحيوي وارتفاع معدل استهلاك المحفز، وبالتالي زيادة تكاليف الإنتاج.

يمكن إزالة الأحماض الدهنية الحرة من خلال عدة طرق، أهمها:

- الأسترة بالغليسرين، حيث يتم إعادة توليد الدهون الثلاثية Triglycerides.
- الاستخلاص بالمذيب (الإيثانول)
- المعالجة بمحلول قلوي، حيث تتم عملية نزع الأحماض على شكل صابون.
- تقطير الأحماض الدهنية.

2-3-1: طريقة الاستخلاص بالمذيب

يمكن إجراء عملية الأسترة من خلال التفاعل مع الكحول بوجود حمض الكبريت باعتباره محفز متجانس، حسب المعادلة التالية: (Thoai, D., et al., 2019)

$$RCOOH + R'OH \underset{}{\overset{H_2SO_4}{\rightleftharpoons}} RCOOR' + H_2O$$

2-3-2: طريقة المعالجة بمحلول قلوي

تعتبر طريق المعالجة بالمواد القلوية من أكثر الطرق شيوعاً، وهي على نوعين: الأول يعتمد على المعالجة بمحلول قلوي مخفف بتركيز 0.75 – 2 درجة، والثاني يعتمد على المعالجة بمحلول قلوي مركز بمعدل قلوية 2-5 درجات، وكلا العمليتين تجريان في درجة حرارة 50-60 °م للزيت و 70-80 °م للصودا الكاوية.

من مساوئ هذه الطريقة انخفاض معدل استرجاع المحفز وتآكل المعدات والأنابيب التي تحتوي على المحفز، وارتفاع تكاليف التشغيل. (Carlos, A., et al., 2011)

في هذه الطريقة يتم مزج زيت الطهي المستعمل بمحاليل قلوية مثل هيدروكسيد البوتاسيوم، وهيدروكسيد الصوديوم، فتتحول الأحماض الدهنية الحرة إلى صابون صلب. وبما أن الصابون غير قابل

للانحلال في الزيت يتم فصله من الزيت بواسطة الغسيل بالماء ثم بالفصل بطريقة الطرد المركزي. من مساوئ هذه الطريقة عدم إمكانية تطبيقها عندما تكون نسبة الأحماض الدهنية الحرة في زيوت الطهي المستعملة أعلى من 5%، وذلك بسبب كمية النفايات الكبيرة التي ستنتج عن العملية.

2-3-3: طريقة التقطير

تطبق تقنية التقطير عادة في صناعة الزيوت النباتية لإزالة الأحماض الدهنية الحرة عندما تكون نسبتها في الزيت أعلى من 10 %. وتتميز هذه الطريقة بأنها تُنتج كمية أقل من النفايات، ونسبة طفيفة من الخسارة في كمية الزيت، علاوة على أن الأحماض الدهنية الحرة الناتجة تكون عالية الجودة بما يكفي لاستخدامها في إنتاج منتجات أخرى. كما يُمكن أن تُساعد هذه الطريقة في إزالة شوائب أخرى إلا أن من مساوئها ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية نظراً لأنها تتطلب معدات تفريغ، واستهلاكاً كبيراً للطاقة.

2-3-4: طريقة الامتزاز

لطريقة المعالجة بالامتزاز مزايا اقتصادية نظراً لانخفاض تكاليفها ومرونة تشغيلها، فضلاً عن إمكانية إزالة الرطوبة والمركبات القطبية الأخرى مثل البيروكسيدات إضافة إلى فصل الأحماض الدهنية الحرة. يتم في هذه العملية تلامس زيت الطهي المستعمل مع مادة فعالة يمكنها الاحتفاظ ببعض المركبات من المزيج السائل بما في ذلك المركبات القطبية. من أكثر المواد الفعالة المستخدمة في هذه الطريقة الكربون المنشط، وراتنجات تبادل الشوارد، والطمي، والسيليكات، وسيليكات الألمنيوم. ونظراً لارتفاع تكاليف هذه المواد تسعى مراكز البحوث إلى دراسة إمكانية استعمال مواد رخيصة مثل قشور الأرز، وقشور جوز الهند. وعلى الرغم من مزايا هذه الطريقة إلا أن من مساوئها بقاء كمية كبيرة من الزيت ملتصقة بالمواد الصلبة المفصولة. يبين الجدول (2-4) تقنيات المعالجة الأولية لزيوت الطهي المستعملة لإنتاج الوقود الحيوي.

الجدول (2 – 4): تقنيات معالجة زيوت الطهي المستعملة لإنتاج الوقود الحيوي

المعالجة		المستوى التكنولوجي	المزايا	العيوب
إزالة الشوائب الصلبة	الترشيح واليترقيد	ناضجة	القدرة على تقليل كمية النفايات الصلبة	تتطلب درجة حرارة عالية (كثيفة الطاقة)، وتحتاج إلى إزالة الشوائب مثل الأحماض الدهنية الحرة.
	الطرد المركزي	ناضجة	إمكانية تقليل كمية النفايات الصلبة الناتجة واسترداد الزيت من مصائد الشحوم.	تتميز هذه العملية بتكاليف استثمار وتشغيل مرتفعة، ويتم دمجها مع طريقة معالجة أولية أخرى.
المعالجة الأولية للأحماض الدهنية الحرة	الأسترة	ناضجة	قابلة للتطبيق على أي نوع من الزيوت، وتتمتع بكفاءة عالية، كما يمكن دمجها مع عملية الأسترة التبادلية، لإنتاج نواتج ثانوية قيمة من الإستيرات تستخدم في تصنيع مواد كيميائية أخرى.	تتميز العملية بتكاليف معالجة عالية، وتوليد مياه عادمة، يؤدي استخدامها إلى تآكل المعدات مع انخفاض في معدل استرجاع الحفاز.
	الإمتزاز	ناضجة	استهلاك طاقة منخفض، قابلة للتطبيق على جميع أنواع الزيوت، توليد منخفض للمياه العادمة، وإزالة للشوائب الأخرى.	تنتج العملية نفايات صلبة، وتستهلك كميات كبيرة من مادة الامتزاز، انخفاض نسبة الاحتجاز.
	تعديل القلوية	ناضجة	قابل للتطبيق على جميع أنواع الزيوت التي تحتوي على نسبة الأحماض الدهنية الحرة (FFA) أقل من 5%.	فقدان كبير للزيت، نسبة عالية من الصابون والمياه العادمة كنواتج ثانوية، واستهلاك كبير للمياه لعملية الغسيل.
	التقطير	ناضجة	طريقة بسيطة، تتميز بانخفاض استهلاك المياه، الأحماض الدهنية الحرة المسترجعة عالية الجودة، مع فقدان طفيف للزيت.	تتميز بارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيلية، إلى جانب استهلاك كبير للطاقة، وإنتاج كميات كبيرة من المياه العادمة.
	تحلل بالغليسرين	ناضجة	صممت لمعالجة الزيوت ذات المحتوى العالي من الأحماض الدهنية الحرة (أكثر من 5%)، مع إمكانية استخدام الغليسرين الناتج من إنتاج الديزل الحيوي كمحفز، مما يسهم في خفض تكلفة الإنتاج. تتميز بعدم حاجتها لاستخدام الكحول، وقدرتها على تحويل الأحماض الدهنية إلى جزيئات غليسيريد مرة أخرى.	تحتاج إلى درجة حرارة مرتفعة، كما أنها تتميز بمعدل تفاعل بطيء
	الاستخلاص بالمذيب	وحدة مخبرية	إزالة الأحماض الدهنية الحرة والشوائب الأخرى	تتطلب توخي الدقة عند اختيار نوع المذيب

المعالجة		المستوى التكنولوجي	المزايا	العيوب
	تقنية الأغشية	وحدة مخبرية	تطبق على جميع أنواع الزيوت، مع استهلاك منخفض للطاقة، وفعالية عالية، ولا تتطلب مواد كيميائية إضافية، مع إنتاجية عالية من زيت الطهي المستعمل.	ينتج عنها كميات كبيرة من النفايات الصلبة، بالإضافة إلى ارتفاع تكلفة الأغشية
	الكروماتوغرافيا	وحدة مخبرية	قادرة على معالجة زيت الطهي ذي المحتوى العالي من الأحماض الدهنية بنسبة (10-15%)، مع زيادة في تحويل المواد الأولية، والإزالة المتزامنة للشوائب.	عملية تستغرق وقتًا طويلاً وبطيئة التنفيذ.
	المعالجة البيولوجية	وحدة مخبرية	انتاج منتجات ذات قيمة مضافة	تتميز العملية بتكاليف إنتاج مرتفعة، وكفاءة فصل منخفضة، مع حدوث إعاقة في بعض الأحيان.
إزالة الرطوبة	مايكروويف	وحدة مخبرية	استهلاك منخفض للطاقة في التسخين، إلى جانب كفاءة عالية في الفصل وسرعة في الأداء.	يشكل ارتفاع درجة الحرارة المفرطة خطراً، قد يؤدي إلى تحلل أو تدمير بعض المركبات العضوية.
	كيماويات التجفيف	وحدة مخبرية	استرجاع المواد الكيميائية المجففة	زيادة تكاليف الإنتاج نتيجة لتجديد المواد الكيميائية، مع استهلاك عال للطاقة، وتوليد نفايات.
	وحدة معالجة مصغرة	وحدة مخبرية	تتطلب درجات حرارة معتدلة، مما يقلل من استهلاك الطاقة مقارنة بأساليب التسخين التقليدية، مما يساهم في تقليل تكلفة التشغيل.	
إزالة اللدائن	أغشية، إنزيمات، إزالة اللدائن بالماء	ناضجة	تزيل العديد من الشوائب وتمنع تكوّن رواسب اللدائن.	تتطلب درجات حرارة مرتفعة وكميات كبيرة من الماء، مما يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة والمياه.
التنقية والمعالجة اللاحقة	التقطير	ناضجة	ينتج إستيرات الأحماض الدهنية عالية الجودة، ويوفر العديد من الخيارات لعملية التقطير.	تؤثر على خصائص الأكسدة في الديزل الحيوي، عالية التكلفة وتتطلب درجات حرارة مرتفعة.
	الغسل الرطب	ناضجة	معالجة فعالة للتعامل مع نسب مرتفعة من الشوائب، وتعتبر ملائمة كمرحلة متابعة في عملية الأسترة التبادلية القلوية، مع تكلفة منخفضة مقارنة بالطرق البديلة.	تنتج هذه العملية كميات كبيرة من المياه العادمة، كما أن تقليل محتوى الغليسرول فيها أقل فعالية مقارنةً بعملية الغسيل الجاف.
	الغسل الجاف بالراتنجات	ناضجة	يتمتع الراتنج بقدرة فعّالة على إزالة الصابون، والغليسرين، والمحفز من المنتج. كما يتميز بإمكانية تجديده وإعادة استخدامه، مما يساهم في تقليل كمية المياه العادمة الناتجة عن العملية.	يعد الراتنج مرتفع التكلفة، وينتج نفايات صلبة، كما أنه غير قادر على إزالة الميثانول.
	المفاعل الغشائي	ناضجة	تتميز هذه العملية بتكلفتها المنخفضة نسبيًا بفضل تكامل خطواتها، ولا تنتج عنها نفايات، كما يمكن إزالة الصابون والغليسرين بسهولة.	يتطلب الغشاء تنظيفاً منتظماً للحفاظ على كفاءته، كما يجب تنقية الميثانول قبل إعادة استخدامه.
	استخلاص السائل بالسائل	نطاق مخبري	تتم العملية في درجة حرارة الغرفة، وقادرة على إزالة جميع الشوائب.	

المصدر: (Carlos, A., et al., 2011)

الفصل الثالث

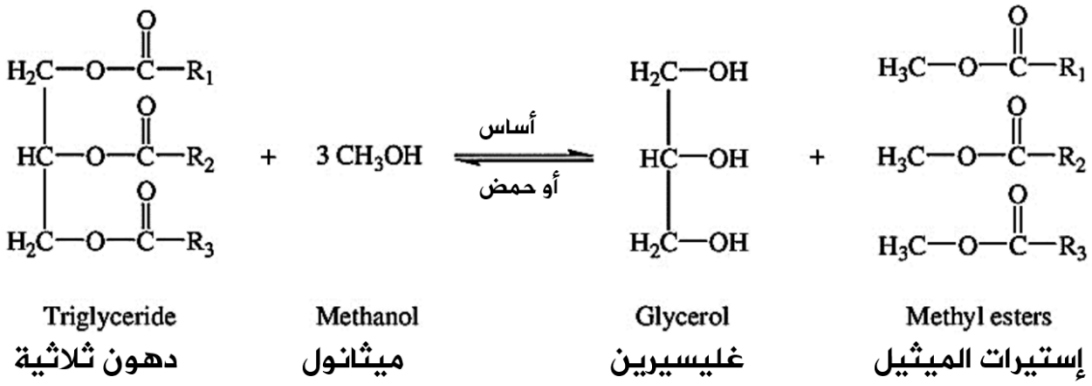
تقنيات إنتاج الوقود الحيوي من زيت الطهي المستعمل

يوجد العديد من تقنيات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى ديزل حيوي، من أهمها المعالجة الهيدروجينية، والتغويز Gasification، والتحلل الحراري Pyrolysis، والأسترة التبادلية.

يمكن إنتاج الوقود الحيوي من زيت الطهي المستعمل عبر مسارين رئيسيين: الأسترة التبادلية لإنتاج وقود الديزل الحيوي - إستيرات ميثيل الأحماض الدهنية FAME، والمعالجة الهيدروجينية لإنتاج وقود هيدروكربوني مثل الديزل المتجدد ووقود الطائرات المستدام. فيما يلي مناقشة مفصلة لهذه التقنيات.

3-1: الأسترة التبادلية لإنتاج الديزل الحيوي

تتكون عملية الأسترة التبادلية للزيوت النباتية، أو زيوت الطهي المستعملة، أو الدهون الحيوانية، من تفاعل الدهون الثلاثية Triglyceride المكونة للزيت مع الكحول بوجود محفز Catalyst من القلويات القوية، مثل هيدروكسيد الصوديوم أو هيدروكسيد البوتاسيوم، أو الأحماض، فتتشكل الإستيرات (الديزل الحيوي) والغليسرين حسب التفاعل التالي: (Arachchige, U., et al., 2021)



يُخلط الزيت المستعمل المعالج مع الكحول والمحفز في عملية الأسترة على دفعات في مفاعل ثابت، بينما تستخدم العمليات المستمرة مفاعلات ذات طبقة ثابتة. ينتج عن التفاعل طوران سائلان منفصلان

حسب الكثافة، هما: الديزل الحيوي الخام (الطور الأخف) والغليسرين (الطور الأثقل). يُغسل الديزل الحيوي الخام بعد ذلك بالماء أو يُمرَّر عبر راتنجات التبادل الأيوني لإزالة بقايا المحفز والصابون والميثانول، ثم يُجفف. النتيجة هي وقود ديزل حيوي مطابق للمعايير الأوروبية والأمريكية، وهو خليط من الإستيرات الدهنية يُمكن استخدامه في محركات الديزل. يُكرّر الغليسرين (حوالي 10% من وزن اللقيم) الناتج الثانوي، أو يُباع للاستخدام في صناعات أخرى (أو يُحوّل إلى منتجات ذات قيمة مضافة).

يوجد ثلاث مسارات لتقنية الأسترة التبادلية لإنتاج الوقود الحيوي من الزيوت والدهون الحيوانية، وهي كما يلي:

- أسترة تبادلية للزيت بوجود محفز قلوي
- أسترة متبادلة مباشرة للزيت بوجود محفز حامضي
- تحويل الزيت إلى حمض دهني ثم إلى ديزل حيوي

كافة مصانع إنتاج الديزل الحيوي تستخدم طريقة الأسترة التبادلية بوجود محفز قلوي نظراً لأنها أكثر اقتصادية، حيث أنها تتم في درجات حرارة وضغوط منخفضة، وتصل نسبة التحويل فيها إلى 98%. (Nitesh, B., et al., 2020)

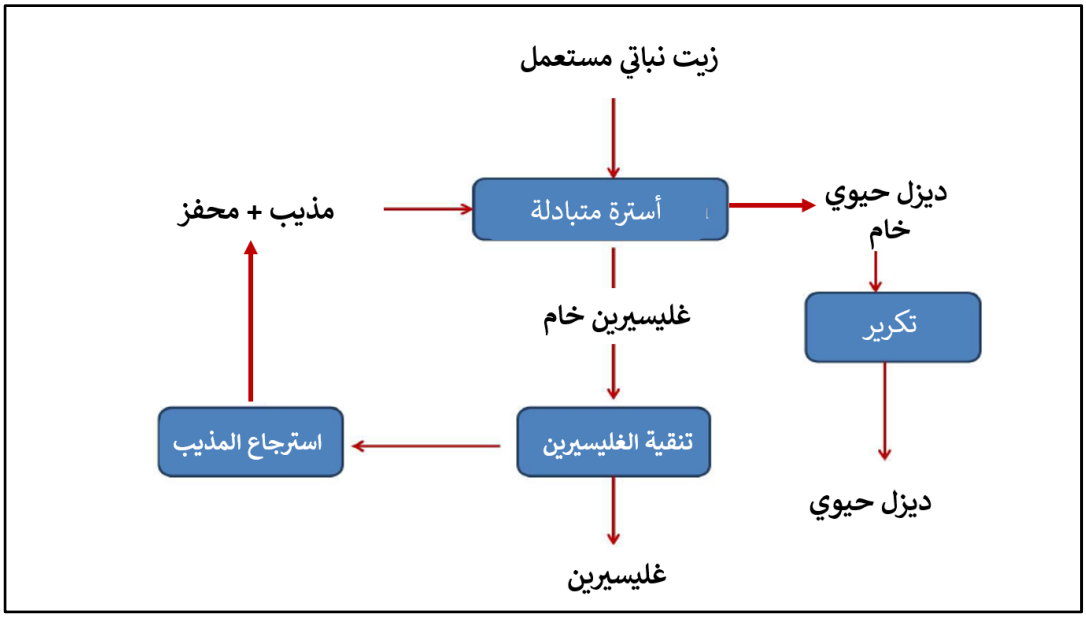
بالنسبة لزيوت الطهي المستعملة المنخفضة الجودة الحاوية على نسبة عالية جداً من الأحماض الدهنية الحرة أو الرطوبة فقد طوّر الباحثون طرقاً مثل أسترة الميثانول فوق الحرجة (بدون محفز، باستخدام الميثانول عند درجة حرارة عالية 350 درجة مئوية، وضغط 25 ميجا باسكال) والتي يُمكنها أسترة الأحماض الدهنية الحرة وأسترة الدهون الثلاثية في آنٍ واحد.

هناك طريقة تعتمد على تفاعل الأحماض الدهنية الحرة الموجودة في زيت الطهي المستعمل مع الغليسرين عند درجة حرارة حوالي 200 درجة مئوية، باستخدام محفز أكسيد الزنك لتكوين أحادي الغليسريد، مما يُعيد دمج الأحماض الدهنية الحرة بفعالية في ثلاثي الغليسريد.

يعتمد نوع الإستيرات الناتجة على نوع الكحول المستخدم في التفاعل. فعند استخدام الإيثانول ينتج إستيرات الإيثيل (Ethyl Esters)، أما عند استخدام الميثانول فينتج إستيرات الميثيل Methyl Esters تشترط معظم مواصفات وقود الديزل الحيوي حداً أعلى لمحتوى الأحماض الدهنية الحرة، وذلك نظراً لأنها

تسبب تشكل الرواسب التي تؤدي إلى تلف المحرك. لهذا تستخدم عملية الأسترة لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى إستر ألكيل الأحماض الدهنية Fatty Acid Alkyl Ester يبين الشكل (3-1) سير عملية إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة التبادلية لزيوت الطهي المستعملة.

الشكل (3-1): سير عملية إنتاج الديزل الحيوي بالأسترة التبادلية لزيوت الطهي المستعملة



المصدر:(Sidhwani, I., et al., 2023)

تعتبر تقنية الأسترة التبادلية من أكثر تقنيات التحويل اقتصادية، ولها ميزات وفوائد عديدة من أهمها:(Manikandan, G., et al., 2023)

- انخفاض تكلفة المواد الخام (الزيوت المستعملة) وارتفاع كفاءة الإنتاج.
- ينتج عنها نسبة منخفضة من المخلفات الملوثة للبيئة مقارنة بالتقنيات الأخرى.
- تحسن من خاصية التبخير، وتخفض لزوجة الزيت، والوزن الجزيئي، ودرجة الوميض Flash point، ونقطة الانسكاب Pour point.
- يمكن استخدام الوقود الحيوي المنتج دون الحاجة إلى إجراء تعديلات على المحرك.
- مرونة في إمكانية اختيار أنواع عديدة من المحفزات Catalyst

- خفض قابلية الأكسدة في المنتج مما يخفض من قابلية التفسخ الحيوي Biodegradability أثناء التخزين.

يتم إنتاج معظم وقود الديزل الحيوي من خلال عملية الأسترة التبادلية للزيوت النباتية الصالحة للأكل باستعمال نوعين من المحفزات المتجانسة حامضية وقلوية. تُستخدم المحفزات الحامضية مثل H_2SO_4 على نطاق واسع في عملية الأسترة، بينما تستخدم المحفزات القلوية مثل NaOH وKOH في عملية الأسترة التبادلية Transesterification. تتميز المحفزات المتجانسة بأنها تذوب أثناء التفاعل، وقد تكون سائلة أو غازية، والقدرة على تحفيز التفاعل عند درجة حرارة تفاعل وضغط جوي أقل، كما يمكن تحقيق نسبة تحويل عالية في وقت أقل، فضلا عن أنها متوفرة بكثرة واقتصادية. تمكن هذه العملية من الحصول على جودة منتج جيدة ووقت تفاعل أقصر نسبياً.

يقتصر استخدام **المحفز القلوي المتجانس** فقط على الزيت النباتي المكرر الذي يحتوي على أقل من 0.5% وزنًا من الأحماض الدهنية الحرة أو قيمة حمضية أقل من 1 ملغ KOH / غ. علاوة على ذلك، فإن فصل هذه المحفزات بعد اكتمال التفاعل يتطلب غسل الديزل الحيوي بالماء مما قد يؤدي إلى فقدان إستيرات الألكيل للأحماض الدهنية واستهلاك الطاقة وتوليد كمية كبيرة من مياه الصرف. هذا يزيد أيضًا من تكلفة إنتاج الديزل الحيوي الإجمالية حيث يصعب استرداد المحفز وقد يتسبب المحفز في تآكل المفاعل. يجب أن يكون ثلاثي الغليسريد والكحول خاليين من الماء، وأن تكون المواد الخام ذات محتوى منخفض من الأحماض الدهنية الحرة (FFA) لتجنب تشكل الصابون، وانخفاض كمية المنتج.

أما **المحفزات غير المتجانسة** Heterogeneous فهي مواد صلبة غير قابلة للذوبان أثناء التفاعل، ويتكون معظمها من أكاسيد معدنية مثل KBr/CaO، أو مواد مشتقة من عظام الدجاج. يعود سبب تفضيل المحفزات غير المتجانسة (الصلبة) على المتجانسة إلى إمكانية إعادة استخدامها، وكفاءة فصل وجودة أفضل للمنتجات النهائية. كما يتميز النوع القاعدي منها بالقدرة على تحمل نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة، وعدم الحاجة إلى الغسيل، وسهولة التجديد، وطبيعة المنتج الأقل تآكلية، والتكلفة المنخفضة، فضلاً عن أنها أكثر ملاءمة للبيئة. ومع ذلك، هناك بعض العيوب للمحفزات غير المتجانسة، حيث أنها تتطلب ظروف تفاعل شديدة (درجات حرارة وزمن تفاعل) للتحضير مقارنة بالمحفزات المتجانسة. فمثلاً تبلغ درجة حرارة التكليس للمحفز المستخرج من عظام الدجاج 9000 درجة مئوية. قد تكون المحفزات

الحامضية الصلبة مثل الزيوليت والأكاسيد المختلطة وزركونيا الكبريتات وراتنجات التبادل الأيوني مناسبة لإنتاج الديزل الحيوي من المواد الخام ذات المحتوى العالي من الأحماض الدهنية الحرة، ولكن لا يزال نشاطها منخفضاً لأنه يعتمد على ظروف التفاعل وكمية أعلى من استهلاك المحفز مقارنة بالمحفزات المتجانسة. علاوة على ذلك، في بعض الحالات، يلاحظ تشكل الصابون باستخدام محفز غير متجانس، وهذا يتطلب إجراء عمليات تنقية لضمان الجودة المطلوبة للوقود.

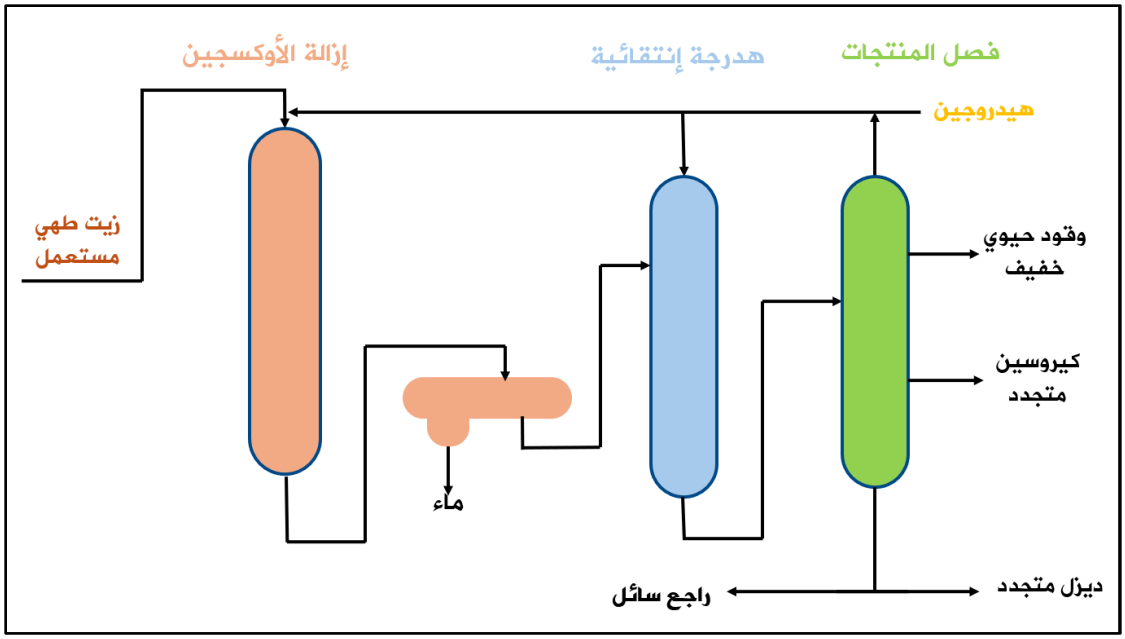
أما **المحفزات الأنزيمية** فقد أصبحت واحدة من أكثر المحفزات الواعدة لإنتاج الديزل الحيوي، ويمكنها تحمل نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة، وتحدث الأسترة والتبادل الأيوني في وقت واحد في هذه التفاعلات. تشتهر المحفزات الأنزيمية بكونها محفزات اقتصادية من حيث التكلفة، حيث تتميز بوقت تفاعل أقصر ودرجة حرارة تفاعل أقل، ومع ذلك فإنها تحتاج إلى كمية أكبر من المحفز، ويكون العائد الإنتاجي أقل مقارنة بالمحفزات المتجانسة وغير المتجانسة. (Abdul Raqeeb M., & Bhargavi R., 2015)

على الرغم من الفوائد العديدة لتقنية الأسترة التبادلية إلا أنها تعاني من مشكلة محدودية قبول لقائم تحتوي على نسبة أعلى من 1% من الأحماض الدهنية الحرة FFA عند استخدام محفزات ذات أساس قلوي. لهذا يجب معالجة الزيوت المستعملة قبل إدخالها إلى عملية الأسترة لتفادي حدوث تفاعلات التصبن التي تؤدي إلى انخفاض نسبة المنتج. (Ahmad, G., et al., 2023)

3-2: المعالجة الهيدروجينية

المعالجة الهيدروجينية هي عملية تحويل زيت الطهي المستعمل إلى وقود هيدروكربوني عن طريق تفاعله مع الهيدروجين بوجود محفز. تُفكك جزيئات الدهون الثلاثية ويُزال الأوكسجين على شكل ماء وثاني أكسيد الكربون، مما يُنتج ألكانات مستقيمة السلسلة يمكن تكريرها إلى ديزل متجدد أو وقود طيران مستدام. يمكن إجراء هذه العملية في وحدات المعالجة الهيدروجينية التي تعالج المشتقات النفطية في مصافي تكرير النفط بعد إدخال بعض التعديلات عليها. يبين الشكل (3-2) مخطط سير عملية المعالجة الهيدروجينية لزيوت الطهي المستعملة.

الشكل (3-2): مخطط سير عملية المعالجة الهيدروجينية لزيوت الطهي المستعملة



المصدر (أوابك، 2024)

تستخدم هذه العملية محفزات معدنية مشابهة لتلك المستخدمة في عمليات المعالجة الهيدروجينية للمنتجات النفطية في مصافي تكرير النفط، تتكون من النيكل والمولبيديوم أو الكوبالت والمولبيديوم محمولة على الألومينا.

يجري التفاعل بدرجات حرارة تتراوح بين 300 و400 درجة مئوية، وضغط هيدروجين مرتفع يتراوح بين 30 و70 بار، في مفاعل يحتوي على سرير ثابت، حيث يتدفق كل من زيت الطهي المستعمل المعالج مع والهيدروجين على سرير المحفز.

بعد عملية المعالجة الهيدروجينية يمرر المنتج على مفاعل الأزمرة الحاوي على محفز يتكون من معدن نبيل مثل البلاتينيوم أو الزيوليت، وذلك لإزالة الشموع التي تؤدي إلى رفع درجة تجمد كل من الديزل ووقود الطيران المستدام المنتجين إلى أعلى من 10 – 15 درجة مئوية، وهذه القيمة غير مقبولة وخصوصاً في فصل الشتاء البارد.

تتراوح نسبة إنتاج الديزل ووقود الطائرات المستدام في عملية المعالجة الهيدروجينية بمرحلة واحدة بين 80% و85% والباقي 10% إلى 15% يتكون من النافثا كمنتج ثانوي.

من أهم مزايا عملية المعالجة الهيدروجينية تحمّلها للمواد الخام عالية الأحماض الدهنية الحرة (FFA) تصل إلى أكثر من 50%، ومن مساوئها حساسية المحفز لوجود بعض الشوائب في المواد الخام مثل الكبريت أو الكلور، ولتجنب تسمم المحفز يلزم إجراء معالجة مسبقة لإزالة هذه الشوائب.

يتميز منتج عملية المعالجة الهيدروجينية بخصائص مماثلة للوقود البترولي من حيث كثافة الطاقة، ويسمى الديزل المتجدد أو الزيت النباتي المهدرج HVO. لا يحتوي هذا الوقود على أوكسجين، ويحتوي على نسبة عالية من السيتان (75- 90)، وخالٍ من الكبريت، ويمكن مزجه مع الوقود البترولي في محركات الديزل.

يمكن زيادة نسبة وقود الطائرات المستدام مطابق لمعايير ASTM D7566 (HEFA-SPK) إلى الحد الأقصى باستخدام محفز من النيكل المحول على وسط حامضي.

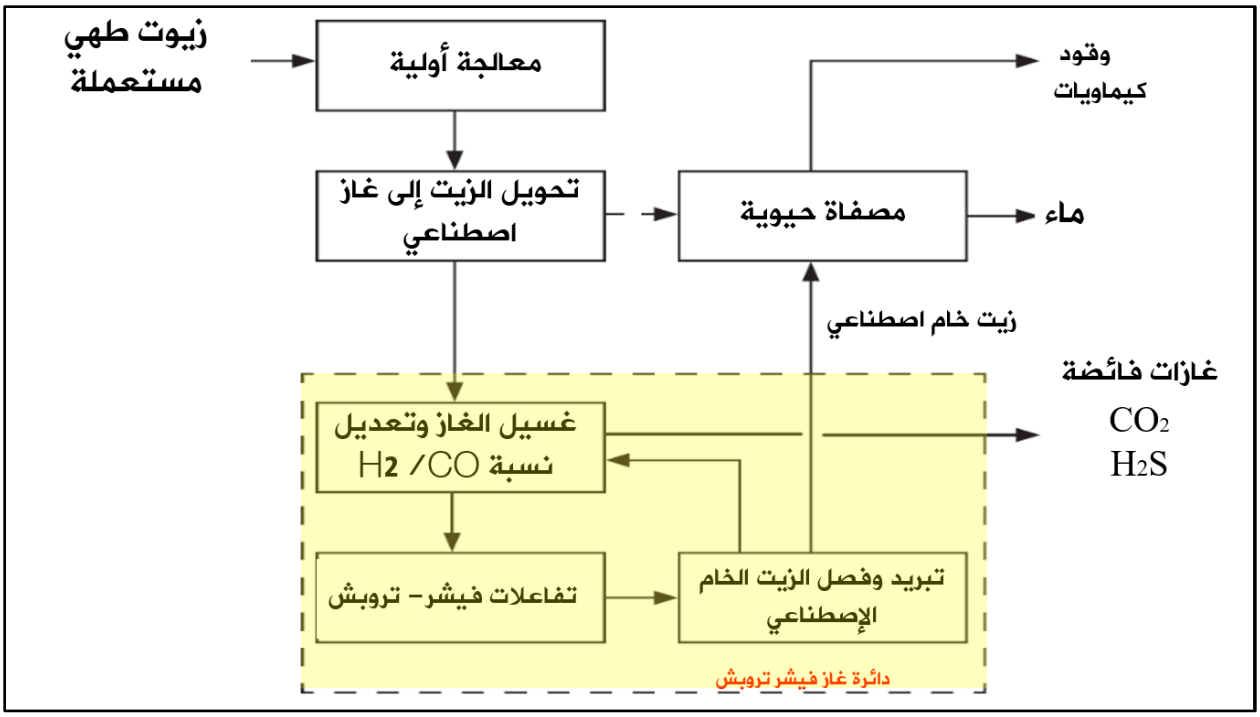
3-3: عملية التكسير الهيدروجيني لزيوت الطهي المستعملة

يُعد التكسير الهيدروجيني الحفزي لزيوت الطهي المستعملة بوجود الهيدروجين خياراً آخر، وهو في الأساس معالجة هيدروجينية ولكن بظروف حرارة وضغط أكثر شدة لإنتاج أنواع وقود خفيفة عالية القيمة مثل الغازولين ووقود الطيران وزيت الديزل.

3-4: عملية التغويز + فيشر-تروبش

يمكن تحويل زيت الطهي المستعمل (مثل أي مادة عضوية) إلى غاز اصطناعي (H_2 + CO) عبر التغويز Gasification، ثم تحويله بوجود محفز إلى وقود سائل عبر عملية فيشر-تروبش. لإنتاج هيدروكربونات اصطناعية تتطلب معالجة لتحسين خصائصها لتصبح منتجات قابلة للاستهلاك. يبين الشكل (3-3) مخطط تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي بطريقة فيشر تروبش.

الشكل (3-3): تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي بطريقة فيشر تروبش



المصدر: (Nitesh, B., et al., 2020)

3-5: عملية التكرير المشترك في مصافي تكرير النفط

تعرف عملية التكرير المشترك Co-Processing بأنها أحد خيارات إنتاج الوقود الحيوي المتجدد من خلال مزج الزيوت الخام المشتقة من الكتلة الحيوية مثل زيت التحلل الحراري Pyrolysis oil، أو الدهون الثلاثية Triglycerides، واللغنين Lignin، والسكريات، وتكريرها مع المواد النفطية الداخلة إلى عمليات مصافي تكرير النفط.

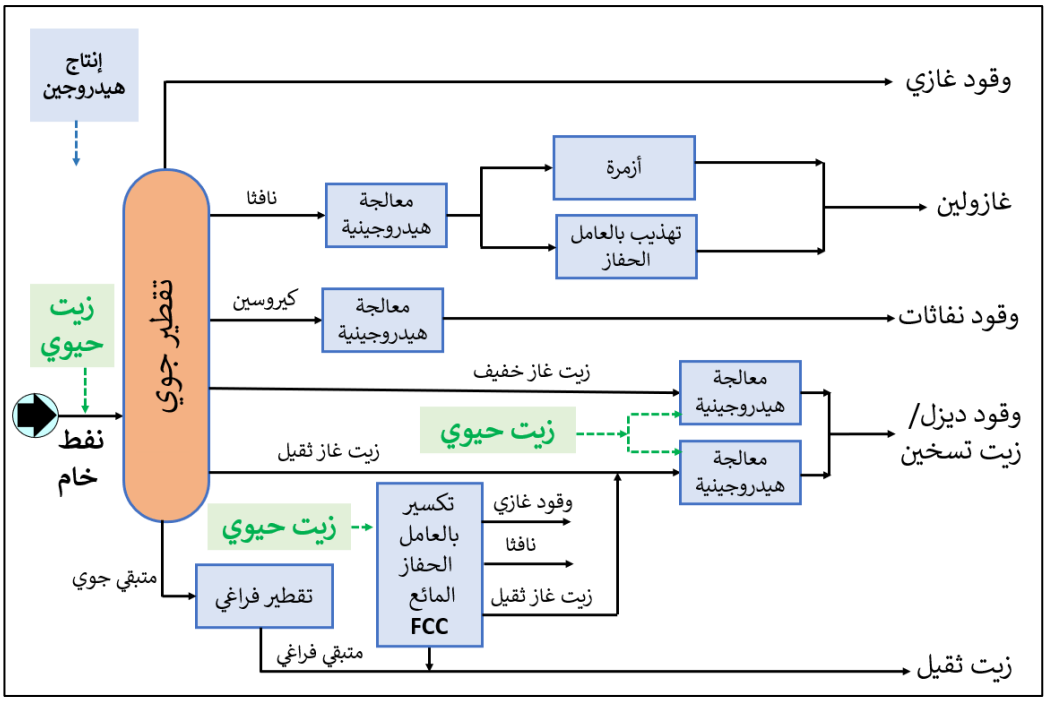
بدأت العديد من مصافي تكرير النفط في مناطق مختلفة من العالم في تكرير زيوت الطهي المستعملة بمزجه بنسبة محددة مع النفط الخام في وحدات التقطير أو في وحدات تكرير ومعالجة المنتجات النفطية.

تتركز الأهداف الرئيسية لعملية التكرير المشترك في إنتاج وقود متجدد بمواصفات وخصائص أفضل من الوقود الحيوي التقليدي، إضافة إلى خفض تكاليف إنتاج الوقود الحيوي مقارنة بالمصافي الحيوية المستقلة، من خلال استغلال الوحدات الخدمية المتوفرة في المصفاة، وشبكات توزيع ونقل المنتجات.

وبالمقابل يمكن لمصافي تكرير النفط أن تستفيد من العمليات المشتركة في خفض انبعاثاتها الكربونية وتلبية متطلبات التشريعات البيئية.

تحتوي مصفاة تكرير النفط على العديد من العمليات التي يمكنها معالجة المواد المشتقة من المصادر الحيوية إلى جانب المواد النفطية، وأهمها وحدات تقطير النفط الخام، وعملية التكسير الحراري، وعملية التكسير بالعامل الحفاز المائع FCC، وعمليات المعالجة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني. يبين الشكل (3-4) العمليات المشتركة المحتملة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (3-4): العمليات المشتركة المحتملة لتكرير الزيوت الحيوية في مصفاة تكرير النفط



المصدر:(Manara, P., et al., 2018)

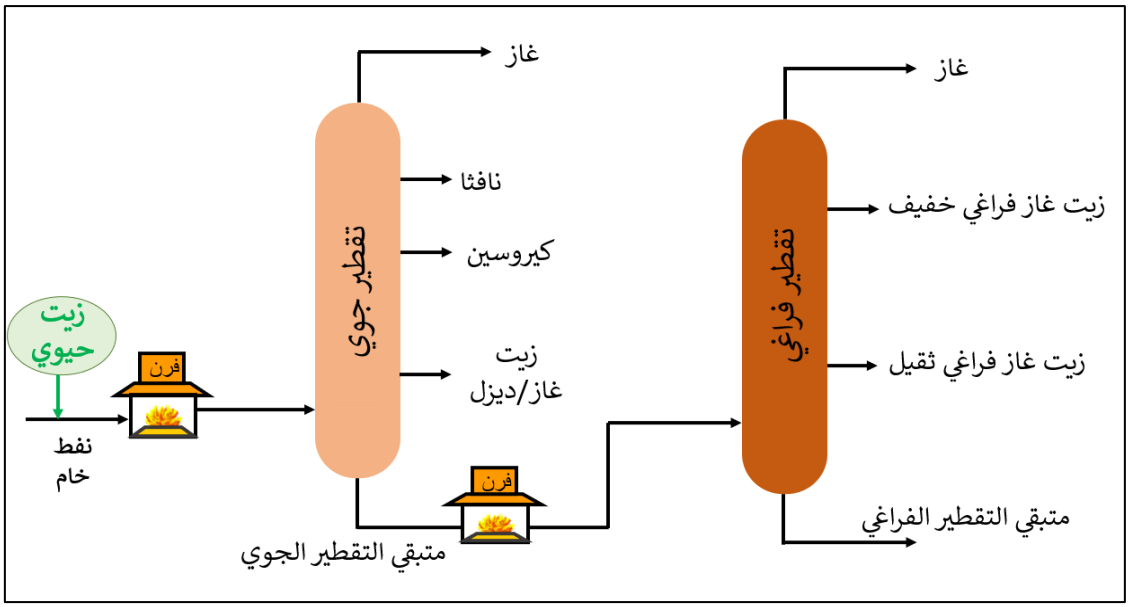
وفيما يلي شرح لأهم العمليات المشتركة المحتملة لمعالجة زيوت الطهي المستعملة مع المقطرات النفطية في مصفاة تكرير النفط:

3-5-1: التكرير المشترك لزيت الطهي المستعمل في وحدة تقطير النفط الخام

تعتبر وحدة تقطير النفط الخام Crude Distillation Unit إحدى العمليات الأساسية في مصفاة تكرير النفط، حيث يسخن فيها النفط إلى الدرجة 350 °م، ثم يدخل إلى برج تقطير ليفصل فيها إلى مقطرات

متنوعة، مثل غاز البترول المسال، والنافثا، والكيروسين، وزيت الغاز، وزيت الوقود، أو متبقي التقطير الجوي الذي يعاد تقطيره في وحدة تقطير فراغي، حيث يسخن إلى الدرجة 450 °م تحت الضغط الفراغي لإنتاج مقطرات خفيفة مثل زيت الغاز الفراغي الخفيف وزيت الغاز الفراغي الثقيل ومتبقي التقطير الفراغي. يبين الشكل (3-5) مخطط وحدة تقطير النفط الخام.

الشكل (3–5): مخطط وحدة تقطير النفط الخام



المصدر: (أوابك 2024)

يمكن معالجة الزيوت المستعملة في وحدة التقطير الجوي من خلال مزجها مع النفط الخام الداخل إلى الوحدة بنسبة محدودة تصل إلى 10% كحد أقصى.

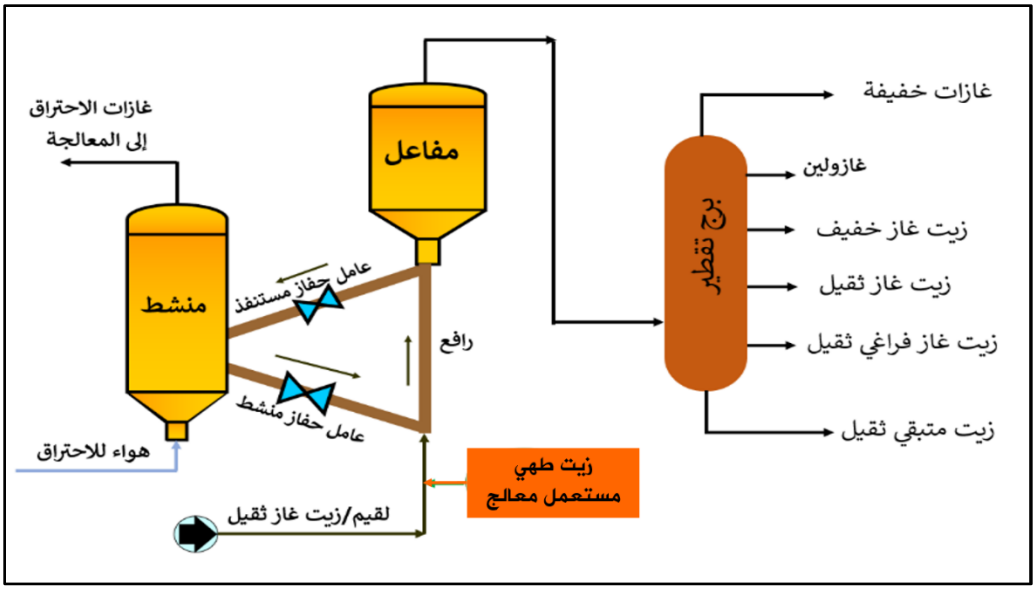
تواجه عملية التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة مع النفط الخام في وحدة التقطير صعوبات عديدة، وذلك نظراً لاختلاف بعض مواصفات الزيوت الخام الحيوية (المواد الحيوية الوسطية عن النفط الخام. فعلى سبيل المثال، عندما ترتفع نسبة الشوائب والملوثات في زيت الطهي المستعمل فإن ذلك يؤدي إلى انتقال هذه الشوائب إلى كافة الوحدات اللاحقة في المصفاة.

3-5-2: التكرير المشترك للزيت الحيوي في وحدة التكسير الحفزي المائع

تستخدم عملية التكسير الحفزي المائع Fluid Catalytic Cracking (FCC) في مصفاة تكرير النفط لتكسير السلاسل الهيدروكربونية الطويلة لبواقي التقطير الثقيلة مثل زيت الغاز الفراغي Vacuum Gas Oil (VGO) ، أو بواقي التقطير الفراغي Vacuum Residue (VR)، لتحويلها إلى منتجات خفيفة مثل زيت غاز ثقيل وزيت غاز خفيف، وغازولين وبروبلين، بوجود عامل حفاز مصنوع من الزيوليت المحمول على السيليكا أو الألومينا في درجة حرارة ضمن المجال 350-500 °م. كما يتم في هذه العملية إزالة الأوكسجين من اللقيم من خلال عمليات متزامنة وهي، نزع الماء Dehydration، ونزع الكربوكسيل Decarboxylation، ونزع الكربونيل Decarbonylation. ينشط العامل الحفاز في الموقع بحرق فحم الكوك المترسب على سطحه في وعاء التنشيط، ثم يعاد تدويره إلى المفاعل.

في عملية التكرير المشترك يحقن زيت الطهي المستعمل المعالج مع اللقيم الداخل وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع على غرار العملية المستخدمة في نفايات البلاستيك أو الكتلة الحيوية. حيث تُكَسِّره محفزات الزيوليت إلى هيدروكربونات أصغر يتم فصلها إلى غازولين وديزل وغازات. يبين الشكل (2-7) مخطط وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع في مصفاة تكرير النفط.

الشكل (3-6): مخطط وحدة التكسير بالعامل الحفاز المائع في مصفاة تكرير النفط



المصدر: (أوابك، 2024)

الفصل الرابع

تقنيات تنقية الديزل الحيوي المنتج

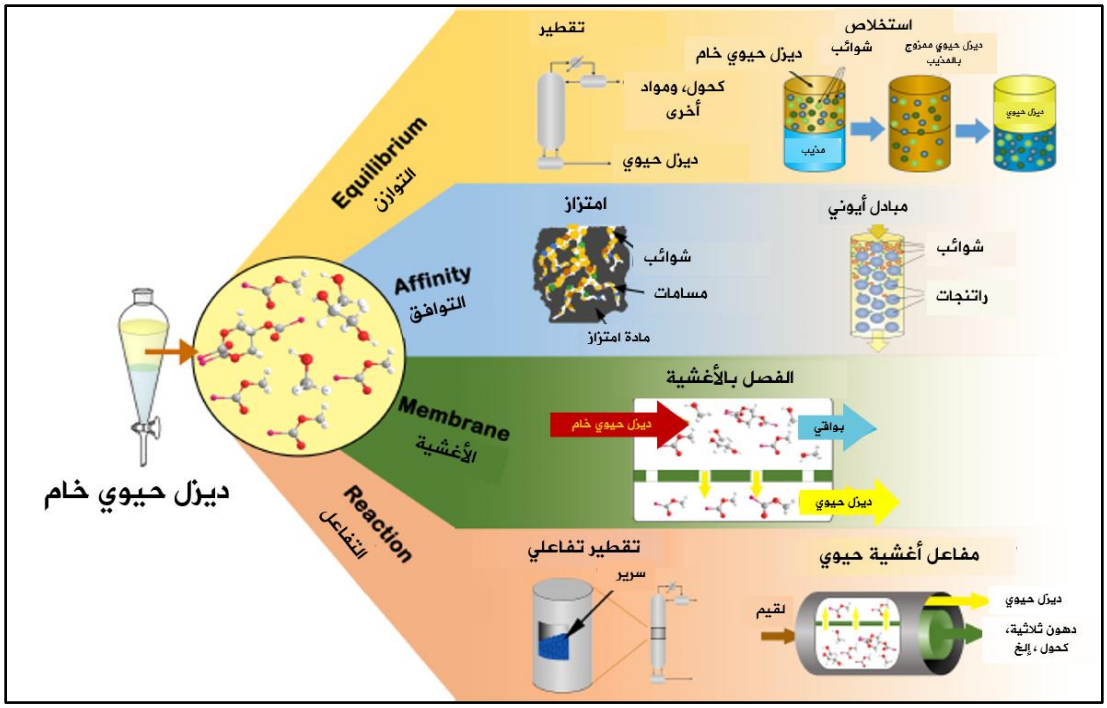
بعد عملية الأسترة التبادلية قد يحتوي الديزل الحيوي الناتج على شوائب مثل بواقي المحفزات، والغليسرين، والكحول غير المتفاعل، والأحماض الدهنية الحرة. ولضمان تحقيق منتج نهائي مطابق لمعايير الجودة والتشريعات البيئية يجب إزالة هذه الشوائب، حيث أن تأثيرها السلبي لا يقتصر على أداء المحرك فحسب، بل يؤدي أيضاً إلى حدوث مشكلات في التخزين والنقل. ولهذه الغاية طورت في السنوات الأخيرة تقنيات تنقية مبتكرة لتحسين كفاءة إنتاج الديزل الحيوي وأدائه البيئي، بما يتوافق مع المواصفات القياسية الدولية مثل المواصفة الأمريكية ASTM D6571 أو الأوروبية EN14214.

تتكون تقنيات تنقية الديزل الحيوي من الغسيل الرطب باستخدام الماء، أو الماء المُحمَّض، أو المذيبات العضوية، أو السوائل الأيونية، والغسيل عبر الامتزاز والتبادل الأيوني، والفصل بالأغشية، وهي تقنيات مماثلة لتقنيات المعالجة الأولية للزيوت المستعملة.(Bateni, H., et al., 2017)

ويمكن تصنيف طرق تنقية الديزل الحيوي بناءً على طبيعة العملية، مثل عمليات الفصل القائمة على التوازن Equilibrium base، والقائمة على التوافق Affinity Base، والقائمة على الفصل بالأغشية Membrane base، والقائمة على التفاعل Reaction Base حسب ما هو مبين في الشكل (4-1).

تجدر الإشارة إلى أن الجمع بين طرق التنقية عادةً ما يكون مطلوباً للحصول على نتائج تنقية أكثر فعالية.

الشكل (4-1): تصنيف طرق تنقية الديزل الحيوي بناءً على طبيعة العملية



المصدر: (Bateni, H., et al., 2017)

4-1: عمليات الفصل المعتمدة على التوازن

تعتبر عمليات الامتصاص والتقطير والاستخلاص بالسوائل، من أكثر عمليات الفصل القائمة على التوازن شيوعاً. وتستخدم عملية الامتصاص غالباً لفصل الجسيمات الصلبة والشوائب من خليط غازي، ولذلك لا تطبق في عمليات تنقية الديزل الحيوي.

4-1-1: التقطير

تطبق طريقة التقطير بشكل شائع لفصل المركبات الأكثر تطايراً عن المواد الأثقل في خليط سائل. ويوجد تقنيات تقطير مختلفة، بما في ذلك التقطير التقليدي (التقطير العادي، والتقطير الفراغي، والتقطير

بالبخار)، والتقطير الأزيوتروبي[1] Azeotropic distillation، والتقطير الاستخلاصي، والتقطير الجزيئي. وتعتبر عمليتا التقطير والتبخير التقليديتين من أكثر الطرق شيوعاً في تنقية الديزل الحيوي لإزالة الكحول أو الماء المتبقي من الديزل الحيوي الخام. يُفصل الكحول غير المتفاعل عن الديزل الحيوي قبل إجراء المزيد من التنقية في التقطير الجزيئي، الذي يُجرى تحت ضغط فراغي عالٍ، وبما أن المسار الحر للجزيئات أطول من مسافة التبخير وسطح المكثف فإن معظم الجزيئات المتبخرة تصل إلى سطح التكثيف دون أن تنحرف عند اصطدامها بجزيئات الغاز الغريبة، مما يؤدي إلى زيادة في معدل الفصل التي يمكن أن تصل إلى 98%.

4-1-2: الاستخلاص بالمذيب

الاستخلاص السائل بمذيب سائل هي تقنية فصل شائعة لاستخراج المكونات المرغوبة من سائل بواسطة مذيب محدد. وتعتبر من أكثر الطرق استخداماً لتنقية الديزل الحيوي، حيث تشمل جميع تقنيات الغسيل الرطب باستخدام الماء المنزوع الأيونات لإزالة الصابون والمحفز والكحول وغيرها من ملوثات الديزل الحيوي. وتلعب عوامل درجة حرارة الماء وحجمه دوراً رئيسياً في تحسين كفاءة التنقية، حيث يؤدي ارتفاع درجة حرارة الماء إلى زيادة انتشار الغليسرين من الديزل الحيوي إلى الماء، كما يوفر حجم الماء الأكبر مساحةً أكبر لانتقال الكتلة، مما يؤدي إلى ارتفاع معدل انتقال كتلة الغليسرين إلى الماء، وبالتالي تنقية فائقة باستخدام حجم ماء أكبر عند درجة حرارة مرتفعة. كما يمكن تحقيق المواصفات القياسية (أقل من 0.02% غليسرين) باستخدام عملية غسيل متعددة المراحل، إضافة إلى أن الخلط اللطيف أثناء الغسيل المائي يزيد من معدل انتقال الكتلة. إلا أن من مساوئ هذه الطريقة احتمال تكوين مستحلبات وفقدان الديزل الحيوي. الجدير بالذكر أن استخدام زيت نباتي مكرر، ومحتوى معتدل من المحفز، ومحتوى منخفض من الكحول في عملية الأسترة التبادلية يمكن أن يقلل من كمية المياه المطلوبة أثناء الغسيل الرطب ويمكن تحقيق تنقية أكثر فعالية باستخدام الماء المُحمض، متبوعاً بالغسيل المائي، حيث أن خفض الرقم الهيدروجيني للماء المستخدم يقلل من كمية المياه اللازمة للمعادلة (تصل إلى الرقم الهيدروجيني 7). ومن أكثر الأحماض شيوعاً المستخدمة لتحييد المحفز القلوي المتجانس قبل الغسيل المائي حمض الفوسفوريك وحمض الكبريتيك

[1] التقطير الأيزوتروبي هو استخدام مكون ثالث لفصل مكونين متقاربين في درجة الغليان عن طريق تكوين خليط أيزوتروبي بين أحد المكونات الأصلية والمكون الثالث لزيادة الفرق في درجة الغليان وتسهيل الفصل بالتقطير.

وحمض الهيدروكلوريك. كما أن استخدام الماء المُحمَّض يُؤدي إلى تحلل الصابون إلى أحماض دهنية حرة، وبالتالي يُقلل من قابلية الاستحلاب.

تم تقييم المذيبات العضوية، مثل إيثر البترول والـ n-هكسان، لتنقية الديزل الحيوي، حيث يُذاب الديزل الحيوي الخام في المذيب قبل غسله بالماء. تجدر الإشارة إلى أن الديزل الحيوي المنقى المُنتَج باستخدام الغسيل الرطب يحتاج إلى التجفيف لتقليل محتوى الماء إلى نطاق مقبول. يمكن إجراء عملية إزالة الماء (التجفيف) من خلال عمليات مختلفة، بما في ذلك التبخير الوميضي الفراغي، والتجفيف الحراري بالحمل الحراري، والأملاح اللامائية، وفقاعات الهواء الساخن، وغيرها من المواد الماصة للماء.

تعاني تقنيات الغسيل بالماء من مشكلة ارتفاع استهلاك المياه، وكمية كبيرة من إنتاج مياه الصرف، وبالتالي ارتفاع تكلفة الإنتاج، حيث يُستخدم من 3 إلى 10 ليترات من الماء لكل ليتر من وقود الديزل الحيوي، مما ينتج عنه حجم مكافئ من مياه الصرف الصناعي التي تحتاج إلى معالجة. بشكل عام، غالباً ما يكون محتوى الماء في الديزل الحيوي المنقى بطريقة الغسيل الرطب أعلى من 1000 جزء في المليون، حيث أن المزيد من خفض محتوى الماء لتلبية المواصفات القياسية أمر صعب ويستغرق وقتاً طويلاً ومكلفاً، مما دفع الخبراء إلى البحث عن طرق تنقية الديزل الحيوي بدون استخدام الماء. (Bateni, H., et al., 2017)

4-1-3: استخلاص السوائل فوق الحرجة

يعتمد مبدأ عملية استخلاص السوائل فوق الحرجة (SFE) على نقل كتلة عند ظروف تشغيل (أي درجة حرارة وضغط) أعلى من النقطة الحرجة للمذيب. يُعتبر ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج مذيباً آمناً وصديقاً للبيئة في معالجة الكتلة الحيوية، ويمكن الحصول على نسبة فصل للديزل الحيوي تبلغ 99.94% عند درجة حرارة 40 درجة مئوية، وضغط 30 ميجا باسكال، ومعدل تدفق 7 مل/دقيقة من ثاني أكسيد الكربون، مع زمن احتباس 90 دقيقة.

4 – 2: عمليات الفصل القائمة على التوافق

يُعد الامتزاز Adsorption والتبادل الأيوني من أكثر عمليات الفصل القائمة على التوافق شيوعاً، والمعروفة أيضاً باسم طرق الغسيل الجاف لتنقية الديزل الحيوي. في هذه العمليات، تُستخدم مادة ماصة مناسبة لامتصاص شوائب معينة بشكل انتقائي من الطور السائل على سطحها.

يتميز الغسيل الجاف بمزايا عديدة مقارنةً بالغسيل الرطب، بما في ذلك سهولة دمجه في محطة قائمة، وتقصير زمن التنقية، وبالتالي يؤدي عدم وجود الماء في تنقية الديزل الحيوي أثناء الغسيل الجاف إلى إنتاج ديزل حيوي بمحتوى مائي مقبول (أقل من 500 جزء في المليون) .

4 – 2 – 1: الامتزاز

الامتزاز هو العملية التي تلتصق بها ذرات أو أيونات أو جزيئات، تُعرف باسم المواد الماصة، من مادة (غالباً سائلة أو غازية) بسطح صلب يُسمى سطح الامتصاص. الامتزاز ليس مرادفًا للامتصاص، ومع ذلك، فإن مصطلح "الامتصاص" يشير إلى كلتا العمليتين. في عملية الامتصاص يخترق المكون أو يذوب في كتلة المادة الماصة، بينما يحدث الالتصاق بالسطح أثناء الامتزاز.

المواد الماصة هي مواد طبيعية أو صناعية ذات هياكل غير متبلورة أو ميكروبلورية، وتتميز بمواقع امتصاص قاعدية وحامضية، حيث يمكنها امتصاص المواد القطبية مثل الغليسرين والميثانول وترشيحها من الديزل الحيوي. عند اختيار مادة الامتزاز يجب الأخذ بالاعتبار عوامل الانتقائية، وقابلية التجديد، والحركية، والتوافق، والتكلفة. ويمكن أن يؤثر الاختيار المناسب للمادة الماصة إيجاباً على كفاءة العملية، كما يمكن تصنيف عملية الامتزاز لتنقية الديزل الحيوي بناءً على نوع المادة الماصة. تعتبر المواد الماصة القائمة على السيليكا، والمواد الماصة القائمة على المواد الحيوية، والمركبات المنشطة، بما في ذلك الألياف المنشطة، والطين المنشط من بين المواد الماصة الأكثر شيوعاً لهذه العملية.

4 – 2 – 2: التبادل الأيوني

التبادل الأيوني هو عملية تبادل الأيونات بين المحلول وطور صلب مناسب (مبادل) نتيجةً لتوافق أقوى (قوة كهروستاتيكية) بين النوع المستهدف والمجموعات الوظيفية على السطح. تتكون المبادلات

الأيونية من مصفوفة ذات شحنات زائدة متمركزة في مواقع محددة من الهيكل. تُعد راتنجات المبادلات الأيونية من أكثر أنواع المبادلات شيوعاً، وتُنتج عادةً عن طريق التحويل الوظيفي للبوليمر الناتج عن بلمرة الستيرين المتشابكة مع ثنائي فينيل بنزين. على الرغم من أن الراتنجات أظهرت أداءً واعداً في إزالة الصابون والغليسرين، إلا أن إزالة الميثانول كانت منخفضة نسبياً. ومن الجدير بالذكر أن راتنجات التبادل الأيوني قادرة أيضاً على إزالة المركبات المعدنية المتسربة من المحفز الصلب إلى الطور السائل (وقود الديزل الحيوي) بفعالية في حالة الأسترة الحفزية غير المتجانسة.

4-2-3: عمليات فصل المواد الصلبة عن السائلة

تقتصر تنقية الديزل الحيوي باستخدام طرق فصل المواد الصلبة عن السائلة على الترشيح، وتطبق غالباً بعد عملية الأسترة التبادلية غير المتجانسة، أو تنقية الديزل الحيوي بطريقة الغسيل الجاف. ويعتبر الترشيح إحدى الآليات الرئيسية لإزالة الصابون. وبما أن الميثانول يعمل كمذيب مساعد للصابون في الديزل الحيوي فإن طريقة الترشيح تكون فعالة في حالة ارتفاع تركيز الصابون وغياب الميثانول، وخاصةً في حالة صابون الصوديوم. على عكس صابون البوتاسيوم الذي يُعتبر صابوناً ليناً، بينما يميل صابون الصوديوم إلى التصلب وبالتالي يمكن فصله عن الديزل الحيوي بسهولة أكبر.

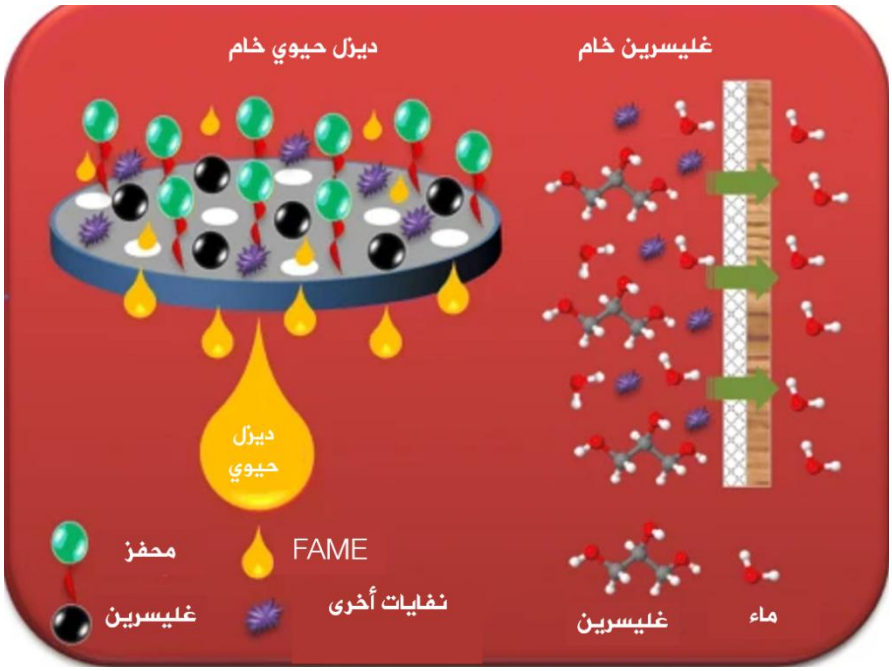
4-2-4: تقنيات الفصل بالأغشية

برزت تقنية الفصل بالأغشية كبديل لعمليات الغسيل بالماء لتفادي مشكلة تكون المستحلب في المنتج، وارتفاع كمية المياه العادمة إلى شبكة الصرف الصحي. تُستخدم أغشية الترشيح الدقيق (بين 0.1 و10 ميكرومتر)، والترشيح الفائق (بين 1 و20 نانومتر)، والترشيح النانوي (بحد أقصى حجم مسام يبلغ 1 نانومتر)، وذلك حسب خصائص المادة الخام.(Govindaraju, R., Chen, S., Wang, P. et al. 2021)

يهدف نظام الترشيح بالأغشية إلى السماح بنفاذ إستيرات ميثيل الأحماض الدهنية (FAMEs) بشكل انتقائي، والتي تُشكل مُنتج الديزل الحيوي، بينما يمنع مرور الشوائب المكونة من الدهون الثلاثية غير المتفاعلة، والميثانول/الإيثانول، والغليسرين، والصابون. قد يُشكل الغليسرين تحدياً في عملية الفصل، نظراً لوجوده كمعلق على شكل قطرات في طور الديزل الحيوي الخام، ويعتمد ذلك على درجة الحرارة. ويمكن لكل من الكحول الإضافي ومنتجات التصبين منع قطرات الغليسرين من الوصول إلى الحجم اللازم للفصل،

ويرجع ذلك إلى دورها كمواد فعالة سطحيًا في مرحلة الديزل الحيوي، مما يقلل من التوتر السطحي في القطرات ويزيد من نفاذية الغليسرين. يبين الشكل (4-2) تقنية الترشيح بالأغشية لتنقية الديزل الحيوي.

الشكل (4-2): تقنية الترشيح بالأغشية لتنقية الديزل الحيوي



المصدر: (Govindaraju, R., Chen, SS., Wang, LP. et al. 2021)

4-3: عمليات الفصل القائمة على التفاعل في تنقية الديزل الحيوي

عندما تكون التفاعلات قابلة للانعكاس في حالة التوازن فهذا يؤثر على كمية المنتج. وللتغلب على هذه المشكلة ومنع الوصول إلى حالة التوازن، يجب دمج عملية الفصل مع التفاعل لفصل المنتج والحفاظ على تركيزه بعيداً عن حالة التوازن. ومن أكثر طرق الفصل القائمة على التفاعل شيوعاً هي الفصل الهجين بين التفاعل والغشاء (مثل المفاعل الحيوي الغشائي)، والتقطير التفاعلي، ونظام التقطير الامتزازي.

4-3-1: التقطير التفاعلي

تُعرف تقنية دمج التفاعل الكيميائي مع فصل المنتج في عملية واحدة متعددة الوظائف باسم التقطير التفاعلي. يهدف هذا التكامل إلى منع الوصول إلى حالة التوازن الكيميائي، وبالتالي تحسين كفاءة العملية، مع انخفاض التكاليف الاستثمارية والتشغيلية، واستهلاك الطاقة. تواجه هذه العملية تحديات تشغيلية

واقتصادية، خاصةً في حالة تفاعلات الغاز-السائل في ظروف تشغيل قاسية وتفاعلات بطيئة للغاية. ويمكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام عمود كبير لتوفير زمن بقاء مناسب. كما يمكن إجراء التقطير التفاعلي باستخدام محفزات حامضية لإنتاج الديزل الحيوي أو المعالجة الأولية للمواد الخام ذات المحتوى العالي من الأحماض الدهنية الحرة.

4-3-2: مفاعلات حيوية غشائية لمعالجة الديزل الحيوي

تعتمد هذه الطريقة على استخدام البولي سلفون كمادة غشائية لتنقية وفصل الديزل الحيوي نظراً لمقاومته للحرارة وسلوكه الخامل نسبياً مقارنةً بالأغشية العضوية الأخرى.

4-3-3: تبلور بمساعدة المذيب (SAC)

تعتبر تقنية التبلور بمساعدة المذيب إحدى طرق التنقية المتقدمة التي حظيت باهتمام كبير. تتضمن هذه التقنية استخدام المذيبات العضوية لبلورة الشوائب بشكل انتقائي من خليط الديزل الحيوي. فعلى سبيل المثال، يمكن تحسين كفاءة التنقية باستخدام 2-ميثيل رباعي هيدروفوران (MeTHF-2) كمذيب عند درجة حرارة سائل تبريد -4 درجات مئوية، ومدة تبريد 10 دقائق وسرعة تحريك 210 دورة في الدقيقة. وهذه الطريق لا تُحسّن كفاءة التنقية فحسب، بل تُساهم أيضاً في تقليل استخدام المياه، وتقلل من إنتاج النفايات السائلة.

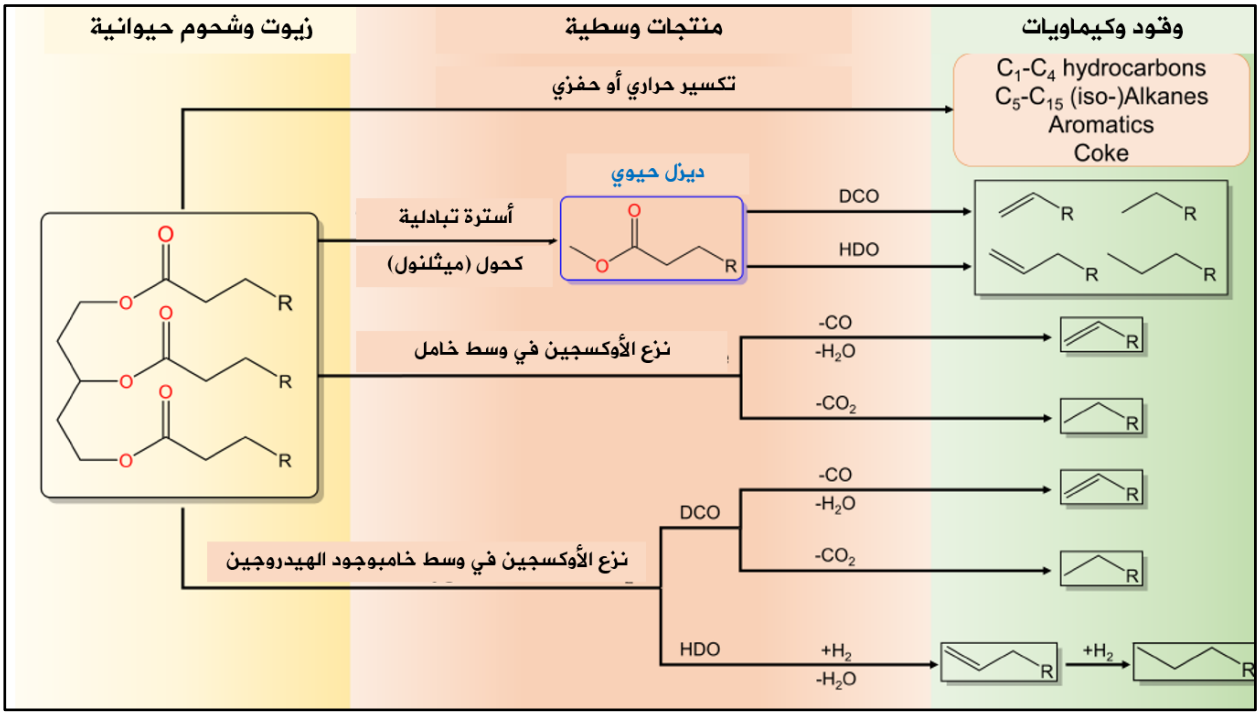
4-4: طرق تحسين جودة الديزل الحيوي

على الرغم من نجاح عملية مزج الديزل الحيوي مع الديزل النفطي واستخدامه في محركات وسائل النقل، إلا أنه لا يزال يعاني من بعض المشكلات مثل، امتصاص الرطوبة، والتآكل، واللزوجة العالية، وضعف خصائص الجريان في درجات الحرارة المنخفضة، وانخفاض كثافة الطاقة. ويعود السبب الرئيسي لهذه المشكلات ارتفاع نسبة الأوكسجين. (Bateni, H., et al., 2017)

لمعالجة المشكلات الناتجة عن استخدام الديزل الحيوي، يمكن إجراء تحسين مباشر أو غير مباشر للدهون الثلاثية والأحماض الدهنية لإنتاج هيدروكربونات شبيهة بالديزل من خلال عمليات حرارية وتحفيزية.

يوضح الشكل (4-3) التقنيات الرئيسية الممكنة للحصول على الوقود والمواد الكيميائية من الدهون الثلاثية، كجزيئات مماثلة للزيوت والدهون الحيوية. أجريت العديد من الدراسات لاكتساب بعض الأفكار حول آلية إزالة الأوكسجين في أجواء مختلفة.

الشكل (4 – 3): تقنيات تحويل الزيوت والدهون الحيوية إلى هيدروكربونات



المصدر: (Bateni, H., et al., 2017)

4 – 4 – 1: تقنية التكسير الحفزي أو الحراري

تشير العديد من الأبحاث إلى أن إزالة الأوكسجين ستؤدي إلى إزالة موازية للنيتروجين والكبريت، وبالتالي فإن إزالة الأوكسجين من الزيوت الحيوية سيساهم في الحصول على ديزل خالٍ من أكاسيد النيتروجين.

أما طريقة التكسير فغير مرغوبة نظراً لارتفاع نسبة إنتاج الهيدروكربونات الخفيفة (C1-C4) والألكانات قصيرة السلسلة (C5-C15) ذات كثافة طاقة منخفضة. وعادة ما تُستخدم محفزات التكسير الحفزي السائل FCC التجارية المكونة من السيليكا والألومينا والزيوليت في هذا النوع من التفاعلات.

تبدو تقنية إزالة الأوكسجين واعدة، إذ تُنتج هيدروكربونات شبيهة بالديزل ذات محتوى أوكسجين منخفض مقارنةً بعمليات التكسير والأسترة. كما يمكن أن تتجاوز خصائص وقود الديزل المتجدد (مثل رقم السيتان) الناتج عن إزالة الأوكسجين الحفزي للزيوت الطبيعية نظيرتها الأحفورية. علاوة على ذلك، فإن تصميم محفزات جديدة وتحسين ظروف التفاعل يمكن أن يزيد من إنتاج الهيدروكربونات غير المشبعة والكحولات إلى أقصى حد، مما قد يفتح آفاقاً جديدة لإنتاج مواد كيميائية ذات قيمة أعلى. تجدر الإشارة إلى أن إنتاج الديزل الحيوي متبوعاً بإزالة الأوكسجين ممكن ولكنه غير اقتصادي بسبب خطوات المعالجة الإضافية، مما يزيد بشكل كبير من تكاليف رأس المال والتشغيل. (Pattanaik, B., & Misra, R., 2017)

4-4-2: تقنية إزالة الأوكسجين في وسط خامل

من الطرق الأخرى لإزالة الأوكسجين من الزيوت الحيوية طريقة إزالة الأوكسجين في وسط خامل مثل النيتروجين أو الهيليوم أو الأرجون. تُعدّ المحفزات أحادية المعدن المدعومة بأكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) وثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) والكربون (وخاصةً المعادن النبيلة المدعومة بالكربون) المحفزات المُفضّلة لإزالة الأوكسجين الانتقائية في الأجواء الخاملة، إلا أن لهذه التقنية بعض المشكلات، مثل محدودية إزالة الأوكسجين، وسرعة تثبيط المحفز بسبب تشكل فحم الكوك، والانتقائية العالية تجاه التفاعلات غير المرغوبة مثل التكسير.

4-4-3: تقنية إزالة الأوكسجين بوجود الهيدروجين

لتجنب المشكلات التي تواجه تقنية إزالة الأوكسجين في وسط خامل يتم اللجوء إلى تقنية إزالة الأوكسجين بوجود الهيدروجين. نشأت الفكرة في الأصل من المعالجة الهيدروجينية للوقود البترولي لإزالة الشوائب غير المرغوبة مثل الكبريت والنيتروجين لتحسين جودة المنتجات وتلبية متطلبات التشريعات البيئية. وخلافاً للطريقة المذكورة سابقاً، يمكن في هذه العملية إزالة الأوكسجين من خلال كلٍّ من مساري إزالة الأوكسجين بالهيدروجين (HDO) ونزع الكربوكسيل/نزع الكربونيل (DCO). بالإضافة إلى ذلك، تتم إعاقة التفاعلات غير المرغوبة، مثل التكسير وتشكل العطريات وتكون فحم الكوك، بشكل كبير في وجود الهيدروجين.

تجدر الإشارة إلى أن السلاسل الهيدروكربونية في بنية الدهون الثلاثية أو الأحماض الدهنية قد تكون طويلة أو قصيرة، ومشبعة أو غير مشبعة، وذلك حسب مصدر الدهون الثلاثية. على سبيل المثال، يتكون زيت النخيل الخام بشكل رئيسي من أحماض دهنية مشبعة مثل حمض اللوريك (C_{12}، 54.5%)، وحمض الميريستيك (C_{14}، 12.1%)، وحمض البالمتيك (C_{16}، 7.7%) . من جهة أخرى، يحتوي زيت بذور اللفت بشكل رئيسي على أحماض دهنية غير مشبعة من النوع C_{18} حمض الأوليك بنسبة 63.7%، و15.4% حمض اللينوليك، و14.3% حمض اللينولينيك، مع رابطة مزدوجة واحدة، ورابطتين، وثلاث روابط مزدوجة على التوالي. عادةً ما يؤدي نزع الأوكسجين بوجود الهيدروجين إلى تشبع هذه السلسلة إذا كانت غير مشبعة في الأصل، بينما بعد نزع الأوكسجين بوجود الغازات الخاملة، يمكن أن تبقى الروابط المزدوجة سليمة.

يعتمد اختيار مسارات إزالة الأوكسجين من الزيوت النباتية (DCO) و(HDO) في ظل وجود الهيدروجين على تركيب المادة الخام، وظروف التفاعل، ونوع المحفز.

4 – 5: دراسة حالة: تجربة شركة Eco Solution., Ltd. لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى ديزل حيوي

أنشأت شركة Eco Solution. Ltd. المحدودة الكورية الجنوبية وحدة لإنتاج الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة الناتجة عن المطاعم وشركة تصنيع الطعام تبلغ طاقتها الإنتاجية 85 مليون ليتر في السنة (2.5 مليون غالون أمريكي في السنة).

ينقل الزيت المستعمل من المطاعم وشركات تصنيع الطعام في كوريا الشمالية إلى موقع الوحدة بواسطة صهاريج نقل برية، حيث تجرى عليه عملية معالجة أولية ليصبح جاهزاً لعملية التحويل إلى ديزل حيوي.

يعتمد مبدأ عمل الوحدة على طريقة الأسترة التبادلية، حيث يتم ضخ الزيت المستعمل المعالج مع الميثانول المحفز (ميثوكسيد الصوديوم) إلى مفاعل الأسترة التبادلية على شكل دفعات. يتم تطبيق الحرارة والضغط لتسريع تفاعل تحويل الإسترات لإنتاج الديزل الحيوي والغليسرين كمنتج ثانوي. يخضع ناتج التفاعل لعملية فصل تحت الضغط الفراغي لاستعادة جزء من الميثانول الزائد. ثم يترك كل من خليط الديزل الحيوي/الغليسرين المزال جزئياً من الميثانول للترقيد لمدة كافية لفصل الديزل الحيوي عن الغليسرين. بعد فصل الديزل الحيوي والغليسرين، يتم غسل الديزل الحيوي أربع مرات لإزالة المحفز المتبقي والغليسرين

والشوائب الأخرى القابلة للذوبان في الماء. ثم ينقل الديزل الحيوي المغسول إلى منظومة فصل تحت الضغط الفراغي لإزالة المياه المتبقية، ومنه إلى عمود التقطير حيث يتم تبخير ميثيل الإستيرات وإعادة تكثيفها. أما وقود الديزل الحيوي النهائي فيرحل إلى خزانات مؤقتة لإجراء بعض التحاليل عليه للتأكد من مطابقته للمعايير المعتمدة قبل شحنه إلى الزبائن. وفي نفس الوقت يتم فصل الغليسرين الخام من العملية وضخه إلى خزان مؤقت تمهيداً لترحيله إلى المستهلكين. (CARB, 2019)

الفصل الخامس

تطورات إنتاج الوقود الحيوي من زيوت الطهي المستعملة في العالم

تشهد معظم مناطق العالم اهتماماً متنامياً بإنتاج الديزل الحيوي مدفوعاً بالفوائد العديدة لهذا المنتج مثل الطبيعة المتجددة، ودوره في إمكانية خفض غازات الاحتباس الحراري، وخاصة في البلدان المتقدمة مثل الولايات المتحدة الأمريكية وفرنسا والبرازيل. ومن المتوقع أن تصل نسبة استهلاك الهند لوقود الديزل الحيوي إلى 41.14% من إجمالي استهلاكها من وقود الديزل، فيما إذا تم استخدام موارد مثل زيت الطهي المستعمل والنفايات الحيوية الأخرى كمواد خام لإنتاج الديزل الحيوي.

5-1: نبذة تاريخية حول استخدام زيوت الطهي المستعملة لإنتاج الوقود الحيوي

في عام 2011 مُنحت أول شهادة لاستخدام الزيوت المستعملة في إنتاج كيروسين الطيران - HEFA SPK من المعايير الأمريكية لاختبار المواد ASTM في الطائرات النفاثة عن طريق مزجها بالكيروسين التقليدي. كانت الكميات الأولية صغيرة مخصصة لرحلات تجريبية وعروض توضيحية. وفي عام 2016 بدأ أول إنتاج مستمر لوقود الطائرات المستدام عندما أعادت شركة World Energy (باراماونت، كاليفورنيا) استخدام مصنع للديزل الحيوي لإنتاج وقود الطائرات المستدام من زيوت الطهي المستعملة. كان الإنتاج في هذه السنوات الأولى يُقاس بملايين الليترات سنوياً، وهي كمية قليلة جداً مقارنة بالاستهلاك العالمي لوقود الطائرات.

بين عامي 2016 و2020، استمر إنتاج وقود الطائرات المستدام باستخدام زيت الطهي المستعمل بكميات قليلة، لكنه بدأ بالازدياد عندما بدأت شركة Neste الفنلندية بتطوير عملية (NEXBTL) على نطاق أوسع بلغ عشرات الآلاف من الأطنان.

كما بدأت شركات أخرى مثل Eni الإيطالية و66 Phillips البريطانية تجارب معالجة مشتركة لدمج زيت الطهي المستعمل في عمليات مصافي تكرير النفط التي تمتلكها. وبحلول عام 2019، بدأ استخدام وقود

الطائرات المستدام المشتق من زيت الطهي المستعمل من إنتاج شركة Eni في الرحلات التجارية، تبعتها الخطوط الجوية البريطانية باستخدام وقود الطائرات المستدام المنتج من زيوت الطهي المستعملة من شركة فيليبس 66 في عام 2022، حيث أشارت الشركة أنها تمكنت من التغلّب على العقبات التقنية والتنظيمية إلى حدّ كبير، مما ساهم في توسيع سريع للقدرة الإنتاجية في عشرينيات القرن الحادي والعشرين.

شهد العامان 2022-2023 نقطة تحول في إنتاج وقود الطائرات المستدام. ففي عام 2022، بلغ الإنتاج العالمي نحو 300 مليون ليتر (0.25 مليون طن) أي ضعف حجم عام 2021. وجاءت أوروبا في المرتبة الأولى في عام 2022 بنسبة 60% من إمدادات وقود الطائرات المستدام العالمية (بفضل شركات تصنيع مثل Neste وTotalEnergies، في حين شكل إنتاج أمريكا الشمالية نسبة 33% وآسيا نحو 7%.

في عام 2023، تضاعف الإنتاج مرة أخرى ليصل إلى أكثر من 600 مليون ليتر (0.5 مليون طن) وقد عززت هذه القفزة تشغيل منشآت جديدة أو موسعة، ولا سيما مشروع توسع Neste في سنغافورة (مما جعلها أكبر مصنع لوقود الطائرات المستدام في العالم بطاقة إنتاجية قدرها مليون طن سنوياً، وزيادة التكرير المشترك لزيت الطهي المستعمل في مصافي تكرير النفط في الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي والصين. حتى مع هذا النمو، لم يلبِّ وقود الطائرات المستدام في عام 2023 سوى حوالي 0.5 % من احتياجات وقود الطيران في العالم.

5-2: دوافع وتحديات انتشار انتاج الوقود الحيوي من زيوت الطهي المستعملة:

أحد أهم دوافع استخدام الوقود الحيوي هو قدرته على الحد بشكل ملحوظ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري المرتبطة بقطاع النقل، وخاصة في المساعدة على الانتقال نحو نظام خالٍ من الكربون.

- **توفر التكنولوجيا المتطورة لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود** مثل تقنية الإستيرات والأحماض الدهنية المعالجة بالهيدروجين Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)، والمعتمدة من المعايير الأمريكية لاختبار المواد ASTM
- **استدامة توفر زيوت الطهي المستعملة** كمصدر رخيص للنفايات غير القابلة للاستخدام كغذاء، والتي يمكن أن تحصل على دعم حكومي في حال تحويلها إلى وقود مستدام وغير ضار بالبيئة.

- **إصدار بعض الحكومات قرارات ملزمة لاستعمال الوقود الحيوي والمتجدد**، مثل قرار الاتحاد الأوروبي ReFuelEU الذي يلزم بإنتاج 2% من وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2025 ثم رفعها إلى 6% بحلول عام 2030، وفي الولايات المتحدة الأمريكية صدر قرار بإنتاج 3 مليار غالون من وقود الطيران المستدام سنوياً بحلول عام 2030. وتستهدف اليابان أن تصل نسبة وقود الطائرات المستدام إلى 10% بحلول عام 2030. (Pratt, S., 2025)
- **التزام شركات النقل الجوي بتوقيع عقود شراء** وقود طائرات مستدام طويلة الأجل لتلبية متطلبات خفض الانبعاثات إلى الصفر، مما يسهم في تشجيع الوقود المنتج من زيوت الطهي المستعملة.
- **توفر كميات كبيرة من زيوت الطهي المستعملة** في كافة مناطق العالم مما يساعد على تسهيل عملية تجميع الزيوت المستعملة واستقرار امداداتها لوحدات الإنتاج.

5-3: مقارنة إنتاج الديزل الحيوي ووقود الطائرات المستدام من تحويل زيوت الطهي المستعملة

يمكن إنتاج عدة أنواع من الوقود من زيوت الطهي المستعملة، أبرزها الديزل الحيوي (FAME، إستر ميثيل الأحماض الدهنية) أو الديزل المتجدد (HVO، زيت نباتي مُعالج بالهيدروجين) المستخدم في النقل البري، ووقود الطائرات المستدام غالباً ما يُنتَج عبر مسار HEFA، وهو عملية مُعدّلة لمعالجة هيدروجينية للزيوت النباتية. هناك فروق تكلفة ملحوظة بين إنتاج الديزل الحيوي وإنتاج وقود الطائرات المستدام من زيوت الطهي المستعملة، وذلك في المجالات التالية:

يُنتَج الديزل الحيوي المعتمد على من زيوت الطهي المستعملة (FAME) عن طريق الاسترة التبادلية، وهي عملية بسيطة نسبياً. أما وقود الطائرات المستدام (HEFA-SPK) المنتج من زيوت الطهي المستعملة فيُنتَج عن طريق المعالجة الهيدروجينية وتكرير الزيت إلى مواصفات وقود الطائرات، وهي عملية أكثر تعقيداً. ونتيجة لذلك فإن تكلفة إنتاج وقود الطائرات المستدام أعلى للغالون الواحد من الديزل الحيوي. وفقاً لتحليل أُجري عام 2023، بلغت تكلفة إنتاج الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة في الولايات المتحدة حوالي 4.69 دولاراً للغالون (باستثناء تكاليف التوزيع). في المقابل، قد تتراوح تكلفة إنتاج غالون واحد من وقود الطائرات المستدام من زيوت الطهي المستعملة (HEFA) بين 6 إلى 8 دولارات (قبل الحوافز). تشكل تكلفة المواد الخام النسبة الأعلى من تكاليف الإنتاج سواءً كان ذلك للديزل الحيوي أو وقود

الطيران المستدام، حيث تصل إلى نحو 60% من تكلفة المنتج. وبالنسبة لوقود الطائرات المستدام تُضاف تكلفة الهيدروجين المستخدم في العملية، وعمليات الأزمرة الأكثر شدة، مما يجعل تكلفة إنتاج الغالون الواحد من وقود الطائرات المستدام أعلى قليلاً من الديزل المتجدد (والذي بدوره أعلى قليلاً من وقود الديزل الحيوي FAME).

يُتداول الديزل الحيوي (أو الديزل المتجدد) القائم على زيت الطهي المستعمل في بعض الأسواق العالمية بسعر متقارب مع الديزل التقليدي بعد تطبيق الدعم. على سبيل المثال، بلغ متوسط سعر الديزل في الولايات المتحدة عند مخرج وحدة الإنتاج 3.88 دولار أمريكي للغالون في عام 2023، ووصل السعر بعد إضافة تكاليف التوزيع إلى 4.84 دولار أمريكي للغالون. ولكن بفضل سياسات الدعم والخصم الضريبي التي تبلغ قيمتها نحو 1.55 دولار أمريكي للغالون في عام 2022، انخفضت التكلفة الفعلية للإنتاج بنحو 2.55 دولار أمريكي، مما جعل السعر النهائي للديزل الحيوي يتراوح بين 2.80 و3.00 دولار أمريكي للغالون.

من ناحية أخرى، تراوحت أسعار وقود الطائرات المستدام في الأسواق العالمية في عام 2023 بين 3.11 و 6.14 دولاراً للغالون (وفي بعض الحالات تصل إلى نحو 10 دولارات للكميات القليلة). وهذا السعر أعلى بمرتين إلى أربع مرات من وقود الطائرات التقليدي البترولي، الذي بلغ متوسط سعره نحو 2.42 للغالون في أوائل عام 2025.

تؤثر الحوافز الحكومية بشدة على التكاليف الفعلية، حيث تمنح العديد من الدول إعفاءات ضريبية أو تفرض حصة سوقية للديزل المنتج من زيوت الطهي المستعملة، مما يعزز سعره. على سبيل المثال، تقدم كل من الولايات المتحدة وأوروبا دعماً بقيمة دولار واحد للغالون لمزج وقود الديزل الحيوي مع الوقود التقليدي، مما ساهم في جعل وقود الديزل المنتج من زيوت الطهي المستعملة قابلاً للاستخدام. كما قدّم قانون خفض التضخم الأمريكي خصماً ضريبياً لوقود الطائرات المستدام بقيمة 1.25-1.75 دولار أمريكي/غالون للفترة 2023-2027.

وعلى الرغم من كل هذه الحوافز بقي سعر وقود الطائرات المستدام في عام 2024 يُعادل نحو ثلاثة أضعاف سعر وقود الطائرات التقليدي في الولايات المتحدة الأمريكية، إلا أنه مع توسع إنتاج وقود الطائرات المستدام وتطور تكنولوجيا التصنيع وتغير أسعار المواد الخام، من المتوقع أن تنخفض تكاليف الإنتاج.

مما تقدم يمكن القول أن تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي، وتعاون الهيئات ذات العلاقة مثل شركات الطيران، مع الدعم الحكومي سيساهم في تخفيض الفارق بين سعر الوقود الحيوي والوقود النفطي.

5 – 4: أهم منتجي وقود الطيران المستدام من زيوت الطهي المستعملة في العالم

لا تزال الشركات التي تنتج الوقود المستدام بتحويل زيوت الطهي المستعملة محدودة العدد، منها:

- **شركة Neste الفنلندية**، وتصنف المنتج الأكبر لوقود الطائرات المستدام على مستوى العالم. حيث بلغ إجمالي إنتاجها في أواخر العقد الأول من القرن الحادي والعشرين نحو 100 ألف طن من وقود الطائرات المستدام. وفي عام 2023 بلغ إجمالي إنتاجها من مصفاتي سنغافورة وروتردام نحو 1.5 مليون طن/السنة.
- **شركة World Energy – الولايات المتحدة الأمريكية**، وهي أول شركة تنتج وقود الطائرات المستدام على المستوى التجاري منذ عام 2016، ثم وصلت الطاقة الإنتاجية لوحدتها في كاليفورنيا إلى 250 مليون غالون في السنة (0.95 مليون طن) بحلول عام 2024 باستعمال زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية.
- **شركة TotalEnergies-فرنسا** وهي إحدى شركات النفط العالمية التي تحول مصافي تكرير النفط (Grandpuits، و Normandy) لتتمكن من تحويل مئات آلاف الأطنان من زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام بحلول 2025.
- **شركة Bp المملكة المتحدة** تجري عملية التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة في مصفاتي تكرير النفط (Lingen، و Castellon)

5 – 5: مشاريع إنتاج الوقود الحيوي المشتق من زيت الطهي المستعمل في العالم

يُنتج الوقود الحيوي المشتق من زيت الطهي المستعمل بما في ذلك الديزل المتجدد، والديزل الحيوي، ووقود الطيران المستدام، على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم. وقد تم تحويل العديد من مصافي

تكرير النفط إلى مصافٍ حيوية لمعالجة زيت الطهي المستعمل وغيره من الدهون لإنتاج وقود منخفض الكربون، ويتم ذلك في معظم الحالات بالشراكة مع شركات طاقة كبرى وبحوافز حكومية.

يبلغ إجمالي إنتاج الوقود الحيوي المنتج من زيت الطهي المستعمل في جميع أنحاء العالم نحو 5.12 مليون طن في السنة، وهو ما يمثل نحو 11% من استهلاك وقود النقل. وفي الاتحاد الأوروبي (19%) أعلى من المتوسط العالمي (11%).(Grinsven, A., et al. 2020)

يبلغ إجمالي عدد المشاريع العاملة والمخطط إنشاؤها والتي هي قيد الإنشاء في العالم نحو 100 موقع لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد.

فيما يلي عرض لأهم مشاريع إنتاج الوقود الحيوي الرئيسية القائمة على زيت الطهي المستعمل في مناطق العالم، بما في ذلك المشاريع العاملة والمخطط لها والمقترحة، وموقعها، وطاقتها الإنتاجية، والشركاء الرئيسيين، ووضعها الحالي.

5-5-1: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في أمريكا الشمالية

شهدت الولايات المتحدة الأمريكية طفرة في مشاريع الوقود المتجدد الكبيرة القائمة على زيت الطهي المستعمل، غالباً من خلال تحويل مصافي تكرير النفط إلى مصافٍ حيوية أو عقود شراكة. وفيما يلي أهم هذه المشاريع:

- **مشروع Diamond Green Diesel** (نوركو) في موقعين هما لوس أنجلوس وبورت آرثر بولاية تكساس، وهو مشروع مشترك بنسبة 50/50 بين Valero Energy و Darling Ingredients، وهو من أكبر مشاريع إنتاج الديزل المتجدد في العالم. بعد توسعة عام 2023، حيث بلغت الطاقة الإنتاجية الإجمالية 1.2 مليار غالون سنوياً من الديزل المتجدد باستخدام زيت الطهي المستعمل والدهون الحيوانية كمواد خام.

- **مشروع ماراثون-نيستي مارتينيز للطاقة المتجددة** بولاية كاليفورنيا، وهو مشروع مشترك بين Marathon Petroleum، وNeste، لتحويل مصفاة مارتينيز في سان فرانسيسكو إلى مصفاة حيوية، وقد بدأ الإنتاج اعتباراً من الربع الثاني من عام 2024، بلغت طاقتها الإنتاجية الكاملة 50000 برميل يومياً، أي

ما يعادل 730 مليون غالون سنوياً من الديزل المتجدد في السنة. يحتوي المشروع على وحدة معالجة أولية للمواد الخام المكونة من مزيج زيت الطهي المستعمل والشحم الحيواني والزيوت النباتية.

- **مشروع شركة World Energy Paramount** بولاية كاليفورنيا- وهو أول مصنع تجاري في العالم لإنتاج وقود الطائرات المستدام بدأ الإنتاج في عام 2016 باستخدام زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية عبر تقنية شركة Honeywell لإنتاج الإستيرات والأحماض الدسمة المهدرجة (HEFA). تبلغ الطاقة الإنتاجية الأولية نحو 35 مليون غالون/سنة، وخضعت لتوسعة كبيرة لتصل إلى 250 مليون غالون/سنة من وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2024.

تعود ملكية المشروع لكل من Honeywell- UOP و Air Products لإمدادات الهيدروجين وAmazon وAir United Airlines.

- **مشروع تحويل مصفاة تكرير النفط Rodeo** في سان فرانسيسكو بولاية كاليفورنيا إلى مصفاة حيوية لإنتاج الديزل المتجدد ووقود الطائرات المستدام، وصلت طاقتها الإنتاجية إلى 50,000 برميل يومياً (حوالي 800 مليون غالون سنوياً) في يونيو 2024، من زيوت الطهي المستعملة والدهون والزيوت النباتية. صُممت المنشأة لتعمل بنسبة 100% على مواد خام مُهدرة (زيت الطهي المستعمل، والشحم الحيواني، إلخ). وهو مشروع مشترك بين شركة Phillips 66 وشركة Rodeo Renewed.

- **مشروع شيفرون** لتحويل زيت الطهي المستعمل والشحم الحيواني، وزيوت الذرة والصويا غير الصالحة للأكل بولاية لويزيانا. بُنيت هذه المنشأة في الأصل بواسطة مجموعة الطاقة المتجددة، وتم توسيعها من 90 مليون غالون إلى 340 مليون غالون سنوياً من وقود الديزل المتجدد (اكتملت أعمالها الميكانيكية في عام 2023). وأصبحت مملوكة لشركة شيفرون (بعد استحواذها على مجموعة الطاقة المتجددة REG)، وقد بدأت الإنتاج بعد التوسعة في مطلع عام 2025.

- **مشروع شركة HF Sinclair بولاية وايومنغ Inclair** (المعروفة سابقاً باسم HollyFrontier) لتحويل مصفاة تكرير نفط سابقة إلى وحدة لإنتاج ديزل متجدد في عام 2021 طاقتها الإنتاجية 252000 غالون يومياً (حوالي 90 مليون غالون سنوياً) من الديزل المتجدد باستخدام زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية وزيت دوار الشمس.

• **مشروع Montana Renewables بولاية مونتانا** تملكها شركة Calumet بدأت إنتاج الديزل المتجدد أواخر عام 2022 طاقتها الإنتاجية 30 مليون غالون سنوياً (114 مليون ليتر/السنة) من وقود الطائرات المستدام (HEFA-SPK) إلى جانب الديزل، باستخدام زيت الطهي المستعمل والدهون الحيوانية كمادة خام. وتم البدء بمشروع رفع طاقة إنتاج وقود الطائرات المستدام بمقدار 150 مليون غالون سنوياً ومن المتوقع أن يبدأ الإنتاج بحلول عام 2026.

• **مشروع New Rise renewable Fuels بولاية نيفادا**، تبلغ طاقة المشروع الإنتاجية نحو 3000 برميل يومياً (حوالي 45 مليون غالون سنوياً) من وقود الطائرات المتجدد باستخدام زيوت الطهي المستعملة. وبدأ الإنتاج في فبراير 2025.

• **مشروع Par Pacific Kapolei في ولاية هاواي** لتحويل وحدة تكرير نفط إلى إنتاج وقود الطائرات المستدام باستخدام زيت الطهي المستعمل المجمع محلياً. تبلغ الطاقة الإنتاجية 2000 برميل يوميًا (30 مليون غالون سنوياً) من وقود الطائرات المستدام. وقد بدأ الإنتاج في النصف الثاني من عام 2025

في كندا، مشروع التكرير المشترك لزيت الطهي المستعمل والشحم البقري في مصفاة شركة Parkland لتكرير النفط في برنابي- كندا، بالشراكة مع شركة كولومبيا البريطانية، لإنتاج وقود طائرات مستدام في كندا بطاقة إنتاجية قدرها 101,000 ليتر سنوياً.

في بنما تعمل شركة SGP for Bio Energy بالتعاون مع شركة Topsoe لبناء أكبر مركز لإنتاج الوقود الحيوي في العالم بحلول عام 2027، لتحويل زيوت الطهي المستعملة وزيوت المحاصيل الزراعية لإنتاج الديزل المتجدد ووقود الطائرات المستدام اعتماداً على تقنية Hydro-flex بطاقة إنتاجية تبلغ 180,000 برميل يومياً، ما يعادل 2.6 مليار غالون سنوياً من وقود الديزل الحيوي ووقود الطائرات المستدام. سيتم تنفيذ المشروع على ثلاث مراحل بطاقة 60,000 برميل يومياً.

5-5-2: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي في أوروبا الغربية

على الرغم من أن استهلاك الديزل الحيوي المصنع من زيوت الطهي المستعملة يمثل 19% من إجمالي استهلاك وقود الديزل الحيوي في الاتحاد الأوروبي، فإن عشر دول أعضاء فقط تستهلك كميات كبيرة، حيث تبلغ أعلى حصة من زيوت الطهي المستعملة كجزء من وقود الديزل الحيوي في قبرص ومالطا. أما

الدول الأخرى المهمة من حيث الحصة النسبية لاستهلاك الديزل الحيوي المصنوع من زيوت الطهي المستعملة فهي ألمانيا، وأيرلندا، والمجر، وهولندا، والبرتغال، والمملكة المتحدة، وسلوفينيا، وبلغاريا.

أما من حيث الإنتاج فقد بلغ عدد مصافي إنتاج الديزل الحيوي في أوروبا والمملكة المتحدة نحو 188 مصفاة بطاقة إنتاجية إجمالية قدرها 21230 مليون ليتر من زيت الديزل الحيوي ونحو 5000 مليون ليتر من الزيت النباتي المهدرج. (Sapp, M., 2022)

يتركز إنتاج الديزل الحيوي في منطقة أوروبا والمملكة المتحدة في خمسة دول فقط، هي ألمانيا وفرنسا، وإيطاليا، وإسبانيا، وهولندا حيث وصل إجمالي إنتاجها إلى نحو 2.8 مليون طن في عام 2019 وبلغت نسبة إنتاج الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة إلى نحو 18.5% من إجمالي إنتاج الديزل الحيوي. وبالمقابل تمثل نسبة استهلاك زيت الديزل المنتج من زيوت الطهي المستعملة إلى نحو 19 % من إجمالي زيت الديزل الحيوي المستهلك في دول الاتحاد الأوروبي، وهذا يشير إلى أن كل الكمية المنتجة تسوق محلياً. (Grinsven, A., et al., 2020)

أولى الاتحاد الأوروبي اهتماماً بالغاً بتنظيم سوق زيوت الطهي المستعملة المنتجة في دول الاتحاد، حيث تقوم شركات مرموقة بتجميع زيوت الطهي المستعملة من المنتجين الصناعيين والتجاريين وتوصيلها إلى منتجي الديزل الحيوي، مما ساهم في ارتفاع الكمية البسيطة المنتجة في عام 2016 ليصل إجمالي ماتم استيراده من الخارج نحو 500,000 طن في عام 2018 معظمها من الصين وإندونيسيا وماليزيا. وفي عام 2020 بلغت كمية زيوت الطهي المستعملة التي تستوردها دول الإتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة من الصين، وإندونيسيا، وماليزيا، وروسيا، والولايات المتحدة، والمملكة العربية السعودية نحو 1.4 مليون طن/السنة، بينما تقدر كمية زيوت الطهي المجمعة في الاتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة بنحو 0.7-1.2 مليون طن/السنة. (Grinsven, A., et al. 2020)

تواجه السوق الأوروبية مشكلة تتعلق بإمكانية تتبع الزيوت المستعملة المستوردة من الصين حتى الوصول إلى السوق الأوروبية للتأكد من أنها تلبي معايير الاستدامة في الاتحاد الأوروبي، وذلك نتيجة حدوث حالات مزج الزيت المستعمل بمواد مخالفة للمعايير المطلوبة بدافع الربح. (Alias, N., et al., 2018)

تعتبر أوروبا من المناطق الرائدة في استخدام زيت الطهي المستعمل كوقود حيوي، وهي تتوسع الآن في استخدامه لإنتاج وقود الديزل المتجدد من الزيت النباتي المهدرج (HVO) ووقود الطائرات المستدام. وفيما يلي أهم المشاريع القائمة والمخططة في أوروبا.

في إيطاليا، تم تحويل مصفاة البندقية في بورتو مارغيرا المملوكة لشركة Eni، وهي أول مصفاة لتكرير النفط في العالم تُحوّل إلى مصفاة حيوية لتحويل زيت الطهي المستعمل والدهون الحيوانية إلى وقود حيوي. وبدأت الإنتاج في عام 2014. تبلغ طاقتها الإنتاجية نحو 400,000 طن سنوياً (حوالي 130 مليون غالون سنوياً) من وقود الزيت النباتي المهدرج (HVO).

كما قامت شركة Eni بتحويل مصفاة Gela في صقلية في عام 2019 لإنتاج 750000 طن سنوياً من الزيت النباتي المهدرج (HVO) (250 مليون غالون سنويا). تُعالج المصفاة زيت الطهي المستعمل والدهون والزيوت النباتية. ومنذ عام 2022، تُعالج أيضًا النافثا الحيوية بشكل مُشترك لتحويلها إلى وقود طائرات مستدام. في عام 2025، أطلقت شركة Eni وحدة "Biojet" في مصفاة Gela، مما يُتيح إنتاج ما يصل إلى 150000 طن سنوياً من وقود الطائرات المستدام النقي.

في فلندا ، طورت شركة Neste مصفاة تكرير النفط التي تملكها في فنلندا لتعمل بتقنية التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية، وتنتج منذ عام 2016 نحو 100,000 طن في السنة (34 مليون غالون) من وقود الطائرات المستدام، اعتماداً على عملية الهدرجة NEXBTL التي صممتها الشركة.

في فرنسا، قامت شركة Total Energies بتحويل مصفاة La Mede إلى مصفاة حيوية في عام 2019، لإنتاج 500,000 طن سنويًا (167 مليون غالون) من الديزل المهدرج. اعتمدت الشركة في البداية على زيت النخيل المستورد، ثم استثمرت الشركة نحو 75 مليون يورو عام 2023 لتطوير المصفاة لمعالجة الزيوت المستعملة والشحم الحيواني بالكامل اعتباراً من عام 2023.

كما نفذت شركة TotalEnergies مشروع تحويل مصفاة Grandboy في فرنسا إلى مجمع للوقود الحيوي والبلاستيك الحيوي وقد بدأت المصفاة بالإنتاج في مطلع عام 2025، بطاقة إنتاجية قدرها 210,000 طن سنوياً (70 مليون غالون سنوياً) من وقود الطائرات المستدام باستخدام زيوت طهي

مُستعملة ودهون حيوانية. ومن المخطط إضافة 75 ألف طن سنوياً من وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2027 (بإجمالي نحو 285 ألف طن). يشارك في تمويل المشروع كل من الخطوط الجوية الفرنسية ووكالات فرنسية (تمويل مشترك).

في إسبانيا، بدأت شركة Bp بعملية التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة مع النفط الخام في مصفاة تكرير النفط Castellon وتحويلها إلى وقود طائرات مستدام في عام 2021، مما يجعل أول وقود طائرات مستدام يُنتج محلياً في إسبانيا في عام 2023. وتخطط شركة Bp لإنشاء وحدة جديدة للوقود المتجدد بطاقة 650,000 طن سنويًا بحلول عام 2030 في مصفاة Castellon.

كما أصبحت شركة Bp أول شركة تقوم بإنتاج وقود الطيران المستدام في مصفاة Lingen (ألمانيا) في عام 2022، عبر التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة في وحدة التكسير الهيدروجيني. وعلى الرغم من أن الكميات متواضعة (في حدود 5-10 ملايين غالون سنوياً)، إلا أنها أثبتت الجدوى الفنية والاقتصادية لعملية التكرير المشترك في مصافي تكرير النفط.

وفي المملكة المتحدة، أصبحت مصفاة Humber المملوكة لشركة Phillips 66 أول مصفاة بريطانية لتكرير النفط تنتج وقود الطائرات المُستدام منذ عام 2021 عبر التكرير المشترك لزيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية بنحو 0.5 مليون ليتر يومياً (20-30 مليون غالون). وقد قامت الشركة بتسليم ملايين الليترات من وقود الطائرات المُستدام إلى الخطوط الجوية البريطانية في عام 2022.

في النمسا، أطلقت شركة OMV عملية التكرير المشترك لتكرير زيوت الطهي المستعملة مع النفط الخام في مصفاة schwechat في عام 2022، مُنتجةً 1500 طن (0.5 مليون غالون) من وقود الطائرات المُستدام وتسليمه للخطوط الجوية النمساوية. تستهدف شركة OMV الوصول إلى 700,000 طن سنوياً من وقود الطائرات المُستدام بحلول عام 2030 من خلال التوسعات.

في هولندا كانت شركة Shell قد بدأت بتشييد منشأة جديدة بطاقة 820,000 طن سنوياً (نحو 275 مليون غالون) لإنتاج وقود الطائرات المُستدام والديزل المُتجدد من زيوت الطهي المستعملة ونفايات أخرى. وكان من المتوقع أن تكون هذه المنشأة واحدة من أكبر المنشآت في أوروبا، إلا أن الشركة أوقفت المشروع

مؤقتاً في منتصف عام 2024 بسبب ظروف السوق (مُسجّلةً خسارةً بقيمة مليار دولار في انتظار التحسنات الاقتصادية).

من جهة أخرى، قامت شركة Neste بإنشاء مصفاة حيوية في روتردام، تعتبر أكبر مصنع ديزل مُتجدد في أوروبا، تُنتج ديزل الزيت النباتي المهدرج (HVO). تبلغ الطاقة الإنتاجية الحالية 500,000 طن سنوياً (نحو 170 مليون غالون). يجري العمل على توسعة المشروع للوصول إلى 1.2 مليون طن سنوياً بحلول عام 2026. تستخدم زيوت الطهي المستعملة والدهون الحيوانية كمادة خام.

كما أطلقت شركة SkyNRG مشروعها الأول في Delfzijl - هولندا لإنتاج وقود الطائرات المستدام بالتعاون مع KLM وSHV Energy بتمويل من الحكومة الهولندية واستثمارات من بعض الشركات. سيستخدم المشروع زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية لإنتاج 100,000 طن سنوياً (34 مليون غالون) من وقود الطائرات المستدام. وقد وقعت مع شركة الطيران KLM عقداً لمدة عشر سنوات لشراء 75% من الإنتاج ومن المتوقع أن تبدأ العمل بحلول 2026

5-5-3: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة في منطقة آسيا والمحيط الهادئ

تأتي منطقة آسيا في المرتبة الأولى في قائمة مصدري زيوت الطهي المستعملة في العالم، بينما تأتي أوروبا كأكبر مستورد. كما يلاحظ تنامي الطلب على هذه الزيوت مع زيادة التوجه نحو إنتاج الوقود الحيوي، حيث وصلت نسبة تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي إلى نحو 80% من إجمالي كمية الزيوت المستعملة، مدفوعاً بالتوجه نحو إنتاج الوقود الحيوي من الزيوت النباتية كمصدر متجدد. أما النسبة الباقية فتستهلك في صناعة الكيماويات وأعلاف الحيوانات، إلا أن هذه الاستخدامات تميل إلى الانحدار بسبب التشريعات التي تمنع استخدام الزيوت المستعملة في صناعة الأعلاف. (GlobalData, 2023)

في سنغافورة، أطلقت شركة Neste مشروعاً في مصفاة تكرير النفط Tuas، بعد توسعة بقيمة 1.6 مليار يورو، يعتبر أكبر وحدة وقود حيوي في العالم تعتمد على زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية كمادة خام، بدأ تشغيلها في أبريل 2023، ويمكنها إنتاج مليون طن من وقود الطائرات المستدام سنوياً (1.25 مليار ليتر)، أي ما يعادل زيادة قدرها عشرة أضعاف طاقة إنتاج شركة Neste من وقود الطائرات المستدام.

في الصين، يجري العمل على الاستفادة من وفرة زيت الطهي المستعمل والعمل على تحويله إلى وقود، وذلك من خلال المشاريع التالية:

- **مشروع شركة Oriental Energy** في مقاطعة ماومينغ بولاية غوانغدونغ الصينية يتكون من مصفاة حيوية جديدة لإنتاج مليون طن سنوياً (330 مليون غالون سنوياً) من الإسترات المهدرجة والأحماض الدهنية (HEFA) . ويعتمد المشروع على تقنية Ecofining لشركة Honeywell UOP لتحويل زيوت الطهي المستعملة والدهون الحيوانية إلى ديزل متجدد ووقود طائرات مستدام ومن المتوقع البدء بالإنتاج في عام 2026.
- **مشروع شركة EcoCeres في مقاطعة تايشينغ (جيانغسو)** بدعم من شركة تاونجاس في هونغ كونغ). يتكون من مصنع لتحويل زيوت الطهي المستعملة والشحوم الحيوانية إلى 100,000 طن سنويًا من وقود الطائرات المُستدام (SAF) و200,000 طن سنويًا من الديزل المُتجدد. بدأ المشروع بتصدير المنتج إلى أوروبا (مثل الخطوط الجوية البريطانية) منذ عام 2022.
- **مشروع شركة Tianzhou New Energy** في مقاطعة سيتشوان يتكون من مصنع لإنتاج 200,000 طن سنويًا (68 مليون غالون) من وقود الطائرات المُستدام (SAF) باستخدام زيوت الطهي المستعملة من المتوقع بدء التشغيل في النصف الثاني من عام.
- **مشروع شركة Jincheng في مقاطعة تشنغدو** يهدف إلى إنتاج 500,000 طن سنوياً (170مليون غالون) من وقود الطائرات المستدام. من المتوقع بدء التشغيل الأولي في عام 2026.
- **مشروع شركة Zhejiang Jiao** للتكنولوجيا الحيوية في مقاطعة ليانيونغانغ لإنتاج 500,000 طن سنوياً من وقود الطائرات المستدام. بدأ الإنتاج التجريبي في أواخر عام 2024 لكنه توقف نظراً لأن الطلب المحلي على وقود الطائرات المستدام لا يزال في بداياته بانتظار إصدار تشريعات تنظيمية.

من جهة أخرى، قامت العديد من مصافي التكرير المملوكة للدولة (سينوبك، بتروتشاينا) بتجربة تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام. على سبيل المثال، أنتجت مصفاة تشنهاي التابعة لشركة سينوبك دفعات تجريبية استُخدمت في رحلة تجريبية عام 2022. ونظراً لعدم صدور تشريعات

للسماح باستخدام أو مزج وقود الطائرات المستدام في الصين فإن معظم المشاريع الكبيرة تستهدف الأسواق الخارجية للتصدير .

في سبتمبر 2022، أعلنت مصفاة تكرير النفط Zhenhai المملوكة لشركة سينوبيك الصينية عن تشغيل أول وحدة لإنتاج وقود الطيران المستدام من تحويل زيوت الطهي المستعملة، بتقنية الإستيرات والأحماض الدهنية المهدرجة HEFA وتعتبر الأولى التي حصلت على شهادة RSB Roundtable on Sustainable Biomaterials، نظراً لما تتميز به من عمليات إنتاج وسلسلة إمداد مستدامة.

في اليابان، تعتمد اليابان على زيوت الطهي المستعملة في معظم عمليات إنتاج الديزل الحيوي حيث تصل الكمية التي يتم جمعها سنوياً إلى نحو 450,000 طن، والتي يمكن تحويلها إلى نحو 410 ملايين طن من الديزل الحيوي (أو الديزل المُتجدد). في الماضي، كان هناك 116 مشروعاً تُديرها الحكومات البلدية والمنظمات الإقليمية غير الربحية في جميع أنحاء اليابان، والتي شاركت في مشاريع صغيرة لإنتاج الديزل الحيوي من خلال "مشروع بذور اللفت". وشملت هذه المشاريع زراعة بذور اللفت لإنتاج زيت الطهي، وجمع الزيت المستعمل، وتحويله إلى وقود متجدد لتشغيل شاحنات نقل البضائع. وهناك مشروع آخر لمدينة كيوتو لجمع زيوت الطهي المستعملة من المطاعم والمنازل. يتم معالجة الزيت وتحويله إلى وقود الديزل الحيوي في مصفاة المدينة، والتي تنتج ما يقرب من 5000 ليتر يومياً أو 1.3 مليون ليتر من وقود الديزل الحيوي سنوياً والذي يُستخدم في شاحنات القمامة بالمدينة، والحافلات البلدية. علاوة على ذلك، توجد في كيوتو أيضاً شركة خاصة (REVO International Kyoto) تنتج وقود الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة. تأسست هذه الشركة من مجموعة مواطنين تضمنت أنشطتها جمع الزيوت المستعملة لغرض حماية البيئة، ثم توسعت أنشطتها وأنشأت شبكتها الخاصة لجمع المواد الخام من المنازل والمطاعم وأي مؤسسة عامة أو خاصة على مستوى البلاد.

كما تنتج مصفاة كيوتو الحيوية نحو 11 مليون ليتر من وقود الديزل الحيوي سنويا، وهي أكبر مصفاة وقود ديزل حيوي في اليابان تصدر منتجها إلى هولندا منذ عام 2011. (IEA Bioenergy, 2023)

تعمل شركتا JGC القابضة وKosmo Oil على تحويل مصفاة Sakai التابعة لشركة كوزمو في أوساكا لإنتاج 30 مليون ليتر/سنة (24,000 طن، 7.9 مليون غالون) من وقود الطائرات المستدام. يتم جمع المواد

الخام من زيوت الطهي المستعملة من خلال شريكهما ريفو ومطارات كانساي، التي تجمع الزيوت المستعملة من مطاعم المطارات. وقد بدأ التشغيل في منتصف عام 2025. يدعم هذا المشروع هدف اليابان المتمثل في إنتاج وقود الطائرات المستدام بنسبة 10% بحلول عام 2030.

كما تخطط شركتا ENEOS وMitsui لإنشاء مصنع منفصل في اليابان لإنتاج وقود الطائرات المستدام بحلول عام 2026 باستخدام زيوت الطهي المستعملة والطحالب في يوكوهاما، وتشارك شركة All Nippon Airways في مشروع تجريبي لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود الديزل الحيوي بدعم من NEDO. مع ذلك، يُعد مشروع Sakai المنشأة الرئيسية لإنتاج وقود الطائرات المستدام باستخدام زيوت الطهي المستعملة.

في إندونيسيا، قامت شركة النفط الحكومية بيرتامينا بتحديث وحدة معالجة هيدروجينية في مصفاة سيلاكاب (جاوة الوسطى، إندونيسيا) في عام 2025 لإنتاج وقود الطائرات المستدام من زيوت الطهي المستعملة في أغسطس 2025، سلمت الشركة دفعة أولى قدرها 32,000 ليتر من وقود الطائرات المستدام لرحلة تجريبية بين جاكرتا وبالي. يمكن للوحدة أن تنتج ما يصل إلى 1400 كيلو ليتر/يوم (أكثر من 500 مليون ليتر/سنة) إذا كُرِّست بالكامل للوقود المستدام. وتخطط شركة بيرتامينا لتوريد حوالي 1.7 مليون ليتر إلى مطار جاكرتا في عام 2025، وتوسيع نطاقها باستخدام مزيج إلزامي من الوقود المستدام بنسبة 3% بدءاً من عام 2026.

كما أعلنت شركة التكرير والبتروكيماويات الإندونيسية العالمية Kilane Pertamina International (KPI) خطة لرفع إنتاجها من وقود الطيران المستدام والزيت النباتي المهدرج HVO من خلال تحويل نحو 6000 طن في اليوم من زيت الطهي المستعمل، وذلك في إطار مشروع مصفاة سيلاكاب الخضراء سوف تستخدم منتجات الوحدة كأحد مكونات مزيج وقود الديزل، كما يستخدم وقود الطيران المستدام لتلبية الطلب المحلي المتنامي على هذا المنتج. (Oil & Fats International, 2025)

في الهند، تشغل شركة النفط الهندية مصفاة بانيبات الحيوية في هاريانا أول وحدة وقود طائرات مستدام في الهند تعتمد على زيت الطهي المستعمل المُجمَّع محلياً بدأت عملها في عام 2025. تنتج الوحدة 35,000 طن/السنة أو ما يعادل (12 مليون غالون) من وقود الطائرات المستدام باستخدام زيت الطهي

المستعمل المُجمَّع من مصانع الأغذية وسلاسل المطاعم (عبر البرنامج الوطني للوقود المستدام). يساعد هذا الإنتاج في تلبية متطلبات الهند من مزيج وقود الطائرات المستدام بنسبة 1% للرحلات الدولية في عام 2027. يتمتع المشروع بشهادة ISCC CORSIA ودعم حكومي، حيث تسعى الهند إلى تعظيم الاستفادة من إمداداتها الكبيرة من زيوت الطهي المستعملة.

5-5-4: تطورات تحويل زيوت الطهي المستعملة في الدول العربية

أبدت عدة دول خليجية اهتمامها بتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود طائرات مستدام، ولكن لا توجد مشاريع كبيرة حتى الآن. في عام 2023، أجرت الخطوط الجوية القطرية رحلة تجريبية باستخدام وقود الطائرات المستدام المنتج من تحويل زيوت الطهي المستعملة المستورد من فنلندا. ومن المتوقع إطلاق المزيد من المبادرات مع سعي شركات الطيران في المنطقة إلى تحقيق أهداف خفض الانبعاثات إلى الصفر.

في دولة الإمارات العربية المتحدة، تعمل شركة إينوك، مقرها في دبي، بالتعاون مع شركة Neutral Fuels من خلال مبادرتين لتحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود الديزل الحيوي. تعمل شركة Neutral Fuels منذ عام 2011، وتنتج حوالي 4 ملايين ليتر سنوياً من وقود الديزل الحيوي من زيت الطهي المستعمل محلياً. تبلغ الطاقة الإنتاجية لمصنع إينوك في دبي (الذي افتُتح عام 2019) 50 طناً يومياً (15 مليون ليتر) من وقود الديزل الحيوي من تحويل زيوت الطهي المستعملة. تستخدم هذه المنتجات في الأسواق المحلية في شاحنات توصيل البضائع، وحافلات المدينة.

في عام 2025 أطلقت بلدية دبي مشروعاً لتجميع زيوت الطهي المستعملة وتحويلها إلى وقود الديزل الحيوي، وذلك في إطار دعم رؤية دبي 2030 وأهداف الاقتصاد الأخضر في دولة الإمارات العربية المتحدة.

في المملكة العربية السعودية، أعلنت شركة أرامكو توتال للتكرير والبتروكيماويات (ساتورب) عن إنتاج وقود الطيران المستدام باستخدام زيوت الطهي المستعملة بتقنية التكرير المشترك CO-Processing في وحدة المعالجة الهيدروجينية المنخفضة الضغط، وذلك في مجمع التكرير في منطقة الجبيل على الساحل الشرقي للمملكة العربية السعودية. يأتي هذا المشروع في إطار خطة شركة توتال إنيرجيز لإنتاج 1.5 مليون طن /السنة من وقود الطيران المستدام بحلول عام 2030 بما يحقق هدف الشركة للوصول إلى صفر

انبعاثات بحلول عام 2050. كما يعكس المشروع اهتمام المملكة بتلبية متطلبات حماية البيئة والتحول إلى الطاقة النظيفة بما يتوافق مع التوجه العالمي نحو الحد من انبعاثات الكربون، ومن المتوقع أن يساهم المشروع في تلبية الطلب المستقبلي المتنامي في المملكة على وقود الطيران المستدام، فضلاً عن خفض انبعاثات الكربون بمعدل يفوق 80% خلال دورة حياة الوقود مقارنة بانبعاثات الوقود البترولي التقليدي. (OGJ, 2023)

يذكر أن مجمع أرامكو توتال للتكرير والبتروكيماويات بدأ تشغيله في عام 2014، وهو شركة مشتركة بين أرامكو السعودية بحصة 62.5% وشركة توتال إنيرجيز الفرنسية بحصة 37.5%، يحتوي على مصفاة طاقتها التكريرية 460 ألف برميل/اليوم متكاملة مع وحدات لإنتاج البتروكيماويات.

يلخص الجدول (5-1) أهم مشاريع تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد في العالم.

الجدول (5-1): أهم مشاريع تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد في العالم

المشروع	الموقع	الطاقة الإنتاجية	الشركاء	تاريخ التشغيل
World Energy Paramount	كاليفورنيا – الولايات المتحدة	250 مليون غالون/ السنة (946 مليون لينر)	World Energy, Honeywell UOP, Air Products	2024
Neste Porvoo Refinery	فنلندا	100 ألف طن / السنة (34 مليون غالون)	Neste (NEXBTL tech)	2016
Neste Rotterdam	هولندا	500 ألف طن/ السنة (170 مليون غالون)	Neste +مالك المشروع	2023
Neste Tuas Refinery	سنغافورة	1 مليون طن/ السنة (350 مليون غالون)	Neste، ومطارChangi	2023
Diamond Green Diesel	تكساس الولايات المتحدة	480 مليون غالون/ السنة 235 مليون غالون (SAF)	Valero & Darling JV, Honeywell Ecofining	2024
Rodeo Refinery	كاليفورنيا الولايات المتحدة	10,000 برميل/ اليوم (150 مليون غالون/ السنة)	Phillips 66	2024
Humber Refinery	المملكة المتحدة	0.5 مليون ليتر/ اليوم	Phillips 66	2018
Castellón Refinery	إسبانيا	10 مليون ليتر	Bp, Air Bp, Valencia HyVal	2021
Lingen Refinery	ألمانيا	–	BP, Air BP	2022
Schwechat Refinery	النمسا	1500 طن/ السنة (0.5 مليون غالون)	OMV Austrian Airlines, Münzer Bio	2022

المشروع	الموقع	الطاقة الإنتاجية	الشركاء	تاريخ التشغيل
Taranto Refinery	إيطاليا	1 مليون ليتر/ السنة	Eni, ITA Airways	2021
Pertamina Cilacap	إندونيسيا	1.4 مليون ليتر/ اليوم (135 مليون غالون/ السنة)	Pertamina, Patra Niaga, Pelita Air	2025
EcoCeres, Jiangsu	الصين	100 ألف طن/ السنة SAF 200 ألف طن/ السنة ديزل		
Montana Renewables	الولايات المتحدة	30 مليون غالون/ السنة وسترفع إلى 180 مليون في 2026	Calumet ,Topsoe , DOE	2022
IOCL Panipat	هريانا- الهند	12 مليون غالون / السنة	Indian Oil Corp.	2025
Cosmo Oil Sakai	أوساكا- اليابان	30 مليون ليتر/ السنة	JGC Holdings, Cosmo Oil, REVO Intl.,	2025
TotalEnergies Grandpuits	فرنسا	210 ألف طن/ السنة (71 مليون غالون/ السنة)	TotalEnergies; French Gov.	2025
Eni Gela Biojet	صقلية-إيطاليا	150 ألف طن/ السنة (50 مليون غالون)	Eni; Honeywell UOP	2024
Tianzhou New Energy	سيشوان-الصين	200 ألف طن/ السنة	Tianzhou New Energy	2025
Jinshang Tech	سيشوان-الصين	500 ألف طن/ السنة (170 مليون غالون)	Jinshang Environmental Protection Tech	2026
Zhejiang Jiaao	جيانغسو-الصين	500 ألف طن/ السنة (170 مليون غالون)	Jiaao Enprotech	توقف 2024
SkyNRG Delfzijl	هولاندا	100 ألف طن/ السنة (34 مليون غالون)	SkyNRG, KLM, SHV Energy; (APG تمويل)	2028
Shell Rotterdam	هولاندا	820 ألف طن/ السنة (278 مليون غالون)	Shell	2025 نوقف
SGP BioEnergy	بنما	180 ألف برميل/ اليوم (2.6 مليار غالون/ السنة)	SGP BioEnergy; Topsoe & Fluor (tech) حكومة بنما	2027

المصدر: (SAF Investor, 2025)

الاستنتاجات والتوصيات

اكتسب وقود الطيران المستدام المنتج من زيوت الطهي المستعملة زخماً عالمياً في العقدين الماضيين كبديل للوقود التقليدي، نظراً لدوره في خفض انبعاثات الكربون خلال دورة حياة المنتج.

خلصت الدراسة إلى التوصيات التالية:

لوقود الديزل الحيوي مزايا وفوائد عديدة مقارنة بالوقود البترولي التقليدي. فبالإضافة إلى إمكانية إنتاجه من مصادر متجددة كالزيوت النباتية المستعملة والشحوم الحيوانية، يتميز بقابليته للتحلل الحيوي، فضلاً عن دوره في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة والانبعاثات الكبريتية والجسيمات الدقيقة الصلبة، وقدرته الممتازة على تزييت السطوح المعدنية للمحرك، وانخفاض سميته.

يعتمد نجاح عملية تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي بشكل كبير على إدارة عملية التجميع من مصانع تحضير الأغذية الكبيرة، والمطاعم، ومحلات الوجبات السريعة التي تقلي الطعام بكميات كبيرة، إضافة إلى تنظيم عملية تخزين الزيوت المستعملة وتحضيرها لإنتاج الوقود الحيوي منها.

من أكثر الطرق شيوعاً لإنتاج الديزل الحيوي طريقة الأسترة التبادلية، كما تعتبر زيوت الطهي المستعملة من اللقائم الواعدة لإنتاج الديزل الحيوي، إلا أن احتواءها على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة يؤدي إلى انخفاض مردود العملية، لهذا يجب إجراء عملية أسترة للزيت قبل إدخاله إلى عملية الأسترة التبادلية.

للحكومات دور أساسي في تشجيع عملية تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي من خلال إصدار التشريعات الناظمة لعملية التجميع من المواقع المنتجة للزيوت المستعملة، وتحديد معايير ومواصفات الوقود الحيوي المنتج.

تقع على الحكومات مسؤولية تنظيم حملات توعية للجمهور عبر وسائل الإعلام المختلفة والمدارس للتعريف بمخاطر إعادة استعمال زيوت الطهي مرات عديدة، والمشكلات المحتملة من طرحها في مجاري المياه الصحية.

إن الاستثمار في عمليات تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود حيوي مستدام لا يسهم في تعظيم الاستفادة من الموارد الطبيعية فحسب، بل يعتبر أحد الحلول الاستراتيجية لحماية البيئة وخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتعزيز أمن الطاقة من خلال توفير رديف مساند للوقود التقليدي، فضلاً عن دوره في دعم الاقتصاد الوطني من خلال خلق فرص عمل جديدة.

مع توسع إنتاج الديزل الحيوي، تُعد تحليلات التكلفة والعائد التفصيلية، بالإضافة إلى دراسات فنية واقتصادية، ضرورية لتعزيز الاستثمار ودعم السياسات. وينبغي أن تهدف هذه التحليلات إلى تحسين تكاليف الإنتاج، وتعزيز كفاءة الطاقة، وضمان بقاء إنتاج الديزل الحيوي منافساً للوقود التقليدي.

Abstract

Renewable fuel produced from used cooking oil has gained momentum worldwide as a replacement for conventional fuel, offering significant carbon emission reductions during its life cycle.

Used cooking oil is considered to be one of the most important feedstocks to be used in biodiesel production, not only because the destination of these materials in the production of fuels does not affect other markets, such as the food market, as vegetable oils do, but also because its high wide availability and low cost that allow reduction in biodiesel production costs, since cost remains one of the main drawbacks of biodiesel when compared to conventional fuels.

The production of biodiesel from used cooking oil involves five stages: collection, pre-treatment, transesterification of used cooking oil, and purification of the product.

The production of biodiesel by oil transesterification is generating a fuel with a high heating value and cetane number, which also mitigates unwanted emissions such as particulate matter, carbon monoxide, sulfur oxides and aromatic hydrocarbons. Nevertheless, the costs of the process are higher than the fossil fuel refining, mainly because of the cost of the crops.

The **first chapter** addresses the characteristics of used cooking oil that are important to determine the quality and suitability of biodiesel that will be produced. challenges facing the collection system of used cooking oil.

Chapter two explains the pretreatment process of used cooking oil before entering the biodiesel production unit which consists of filtration with cellulosic

materials, drying by heating or silica gel, and esterification with methanol to convert free fatty acids into methyl esters.

Chapter three investigates the benefits and constraints of the process of transforming waste cooking oil into biodiesel, while

Chapter four investigates the technologies for converting used cooking oils into biodiesel, the most important of which are hydrotreating, gasification, pyrolysis, and transesterification.

Chapter five provides a comprehensive overview of major bio-fuel production projects around the globe that utilize used cooking oil as part of their feedstock, including operational facilities as well as planned and proposed projects. Each project listing includes the location, production capacity, and key partners.

The study concludes that investing in converting used cooking oil into sustainable biofuel not only contributes to maximizing the use of natural resources but is also a strategic solution for protecting the environment, reducing greenhouse gas emissions, and enhancing energy security by providing an alternative backup to conventional fuels. It also plays a role in supporting the national economy by creating new job opportunities. The study also emphasized the importance of governments in issuing legislation regulating the collection of used cooking oil and setting standards and specifications for the produced biofuel.

المراجع

- Abdul Raqeeb M., & Bhargavi R., (2015) **"Biodiesel production from waste cooking oil"** Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. Available at: www.jocpr.com
- Ahmad, G., et al., (2023) **"Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Extracted Catalyst from Plantain Banana Stem via RSM and ANN Optimization for Sustainable Development"** MDPI.
- Alias, N., et al., (2018) **"Characterization of Waste Cooking Oil for Biodiesel Production"** Journal Kejuruteraan.
- Arachchige, U., et al., (2021) **"Potential Utilization of Waste Cooking Oil in Sri Lanka: Policy Implementation"** International Journal of Scientific Engineering and Science Volume 5, Issue 11, pp. 1-5, 2021. ISSN (Online): 2456-7361
- Bateni., H., et al., (2020) "**A comprehensive Review on Biodiesel Purification and Upgrading"** Biofuel Research Journal.
- Beghetto, V., (2025) **"Waste Cooking Oils into High-Value Products: Where Is Industry Going?"** MDPI
- BERECZKY, A., (2016) **"Effect of the Use of Waste Vegetable Oil Based Biodiesel on the Landscape in Diesel Engines"** Thermal Science Magazine· January 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/311242210
- CARB (2019) **"Biodiesel produced from used cooking oil"** California Air Resources Board. USA
- Carlos, A., et al., (2011) **"Biodiesel Production from Waste Cooking Oil"** National University of Colombia, Colombia.
- Casallasa, I., et al., (2018) **"Pre-treatment of Waste Cooking Oils for Biodiesel Production"** CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS.
- GlobalData, (2023) **"Global Supply and Trade oh Used Cooking Oil" Available at: www.globaldata.com**
- Gong, Y., et al., (2024) **"Waste Cooking Oil Recycling and the Potential Use of Blockchain Technology in the UK"** MDPI.
- Govindaraju, R., Chen, SS., Wang, LP. et al. (2021) **"Significance of Membrane Applications for High-Quality Biodiesel and Byproduct (Glycerol) in Biofuel Industries"** https://doi.org/10.1007/s40726-021-00182-8
- Grinsven, A., et al., (2020) Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU, CE Delft. Available at: www.cedelft.eu

- Harrington, T., (2023) **"$30 billion SAF Market and 30-fold increase in Global Production By 2030" Forecast report. GreenAir News. Available at: https://www.greenairnews.com**
- Hidalgo, J., et al. (2020) **"Waste to Energy Potential of Domestic Waste Cooking Oil in Guayaquil: A review"** 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy", 29-31 July 2020, Buenos Aires, Argentina.
- IATA, (2024) **"The Journey to Net Zero CO2 Emissions By 2050 Continues"** IATA-annual-review.
- IEA, Bioenergy (2023) **"Implementation Agendas: Compare-and-Contrast Transport Biofuels Policies"**
- Kristiana, T., et al., (2023) **"Producing high quality biodiesel from used cooking oil in Indonesia"** WORKING PAPER 2023-18 INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION.
- Lichtfouse, E., et al., (2020) **"Membranes for Environmental Applications"** Environmental Chemistry for a Sustainable World. Springer.
- Manikandan, G., et al., (2023) "**Review of Waste Cooking Oil (WCO) as a Feedstock for Biofuel—Indian Perspective"** MDPI. https://www.mdpi.com/journal/energies
- MOL Group, (2020) **"Used cooking oil collection campaign"** Available at: https://molgroup.info/storage/documents/esettanulmanyok/kornyezet/1_used_cooking_oil_campaign.pdf
- Nitesh, B., et al., (2020) **"Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil**" International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT) www.ijcrt.org
- OGJ, (2023) **"Satorp's Jubail Complex Producing SAF via Co-processing of Used Cooking Oil"** Oil & Gas Journal Oct. 30, 2023.
- Oil & Fats International, (2025) **"Indonesia to Boost SAF and HVO Production from UCO"** Available at: https://www.ofimagazine.com/news/indonesia-to-boost-saf-and-hvo-production-from-uco
- Panadare, D., & Rathod, V., (2025)**"Valorization of used cooking oil: Challenges, current developments, and bioconversion approaches"** Journal of Cleaner Production, MDPI.
- Pattanaik, B., & Misra, R., (2017) **"Effect of reaction pathway and operating parameters on the deoxygenation of vegetable oils to produce diesel range hydrocarbon fuels: A review"** Renewable and Sustainable Energy Reviews. ELSEVIER.
- Phillips, D., (2019) **"Used Cooking Oil" Available at:** www.ofimagazine.com

- Pratt, S., (2025) "**SAF Mandates Prepare for Takeoff. The Western Producer" Available at:** https://www.producer.com/news/saf-mandates-prepare-for-takeoff/#post-302928
- SAF Investor, (2025) **"Existing and Planned SAF Projects"** Available at: https://www.safinvestor.com/existing-and-planned-saf-projects/#
- Saini, R., (2017) "Conversion of Waste Cooking Oil to Biodiesel" International Journal of Petroleum Science and Technology ISSN 0973-6328 Volume 11, Number 1(2017), pp. 9-2© Research India Publications http://www.ripublication.com
- Sapp, M., (2023) **"Clean Fuels Alliance America report assesses global supplies of used cooking oil"** Biofuel Digest https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/clean-fuels-alliance-america-report-assesses-global-uco-supplies/
- Shaaban, S., (2012) **"Biodiesel Production from Waste Cooking Oil"** Petroleum Refining Division, Egyptian Petroleum Research Institute (EPRI), Cairo, Egypt.
- Sidhwani, I., et al.,(2023) **"Wealth from Waste: A Green Method to Produce Biodiesel from Waste Cooking Oil and Generation of Useful Products from Waste Further Generated "A Social Awareness Initiative"** DU Journal of Undergraduate Research and Innovation.
- Smith. H., et al., (2013) **"The Market for Biodiesel Production from Used Cooking Oils and Fats, Oils and Greases in London"** Leading resource Sustainability.
- Times aerospace, (2023) **"IATA announces estimates for SAF production"** https://www.timesaerospace.aero/news/sustainability/iata-announces-estimates-for-saf-production
- Thoai, D., et al., (2019) **"Pre-treatment of waste cooking oil with high free fatty acids content for biodiesel production: An optimization study via response surface methodology"** Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi & Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim www.vjc.wiley-vch.de.
- Wood, L., (2024) "**Global Sustainable Aviation Fuel Industry Outlook 2024-2030: UCO and Soy Oil Projected to Drive a Significant Chunk of the Feedstock Requirement for SAF by 2030**" BUSINESS WIRE. Dublin.