

الرقم الترتيبي:
الرقم التسلسلي:

جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية العلوم التطبيقية
قسم هندسة الطرائق



أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه علوم

تخصص: هندسة الطرائق

من إعداد:

عبد الغني سروطي

الموضوع:

تثمين زيوت بنور نبات الجاتروفيا كيركاس في انتاج الوقود الحيوي بالمنطقة
الجنوبية الشرقية من الجزائر.

Valorisation des huiles des graines de la plante *Jatropha curcas* du sud-est Algérien en bio-carburant.

نوقشت يوم: 2022/ 06/ 02

لجنة المناقشة:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالي	محمد الأمين سكيريفة
مشرفا ومقررا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالي	مراد قريشي
مناقشا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالي	صالح الدونيت
مناقشا	جامعة غرداية	أستاذ تعليم عالي	نور الدين بوراس
مناقشا	جامعة الوادي	أستاذ تعليم عالي	صلاح الدين العويني
مناقشا	جامعة الوادي	أستاذ تعليم عالي	عمار بن مية

الموسم الجامعي: 2022/2021

الملخص

ارتفع الطلب على الزيوت النباتية للاستخدام المنزلي والصناعي بشكل كبير مع نمو سكان العالم. تم اكتشاف الزيوت النباتية المشتقة من النباتات على أنها ذات قيمة غذائية وصناعية كبيرة. بسبب ارتفاع الأحماض الدهنية الأحادية غير المشبعة والمكونات المفيدة، فإن الجاتروفا كركاس هي واحدة من البذور الزيتية التي تحتوي على نسبة عالية من الزيت. يشكل حمض اللينوليك والأحماض الثانوية الأخرى مثل حامض دهني وحمض الأوليك غالبية الأحماض الدهنية، مما يجعله مناسباً لمجموعة واسعة من الاستخدامات. استخدمت هذه الدراسة طريقة استخلاص Soxhlet لوصف الزيت النباتي المستخرج من جاتروفا كركاس، والذي تم زراعته لأول مرة في منطقة الواد جنوب شرق الجزائر، باستخدام الهكسان العادي كمذيب عند 60 درجة مئوية لمدة 8 ساعات. كان ناتج الزيت من الوزن الجاف إلى الوزن 63.15%. كان الزيت المستخرج سائلاً في درجة حرارة الغرفة، طيب الرائحة ذو لون أبيض مائل للصفرة. أظهرت الخصائص الفيزيائية والكيميائية أن زيت البذور له مستوى رطوبة 5.58%، وكثافة 0.915، ولزوجية 49.85 مم²/ثا، ومؤشر بيروكسيد 1.1 ملي مكافئ / كجم، وقيمة حمضية 2.9%، ومؤشر يود لـ 96.3 ملغ/غ، معامل انكسار 1.458 ومؤشر تصين 202.87 مجم KOH / جم. أظهر التحليل الكروماتوغرافيا للغاز حامض دهني (8.5%)، حمض البالمتيك (11.2%)، وحمض الأوليك (65.9%). علاوة على ذلك، أظهرت الخصائص الفيزيائية والكيميائية للديزل الحيوي المنتج: اللزوجة، الكثافة، نقطة الوميض، قيمة الحمض والقيمة الحرارية لتكون 4.38 مم²/ثانية، 870 كغ/م³، 128.5 م°، 0.29 ملغ KOH/غ من الزيت و39.74 ميغا جول/كجم، على التوالي. يمكن استخدام وقود الديزل الحيوي المنتج في المزج مع الديزل التجاري والمساهمة في اقتصاد الوقود في الجزائر. **كلمات مفتاحية:** جاتروفا كركاس؛ توصيف الزيت الخصائص الفيزيائية والكيميائية، تقنيات الاستخلاص، الديزل الحيوي.

Abstract

The demand for vegetable oils for domestic and industrial use has risen significantly as the world's population has grown. Vegetable oils derived from plants have been discovered as having great nutritional and industrial value. Because of its high monounsaturated fatty acid content and beneficial components, *Jatropha curcas* is one of the oilseeds with high oil content. Linoleic acid and other minor acids like stearic, palmitic, and oleic acid make up the majority of its fatty acid profile, making it suitable for a wide range of uses. This study employed the Soxhlet extraction method to describe the phyto-oil recovered from *Jatropha curcas* L., which was planted for the first time in the El Oued region of southeastern Algeria, using normal hexane as the solvent at 60 °C for 8 hours. The dry weight-to-weight oil yield was 63.15%. The extracted oil was liquid at room temperature, pleasant in smell and a yellowish-white hue. The physicochemical properties showed that the seed oil has a moisture level of 5.58 %, a density of 0.915, a viscosity of 49.85 mm²/s, a peroxide index of 1.1 mEq/kg, an acid value of 2.9 %, and an iodine indicator of 96.3 mg/g, a refractive index of 1.458, and a saponification index of 202.87 mg KOH/g. Gas chromatographic analysis showed stearic acid (8.5%), palmitic acid (11.2%), and oleic acid (65.9%). Furthermore, the physical and chemical properties of the biodiesel produced are shown: viscosity, density, flash point, acid value, and calorific value were found to be 4.38 mm²/s, 870 kg/m³, 128.5 °C, 0.29 mg KOH/g of oil, and 39.74 MJ/Kg, respectively. The produced biodiesel can potentially be used in blending with commercial diesel and contribute to the fuel economy of Algeria.

Keywords: *Jatropha curcas* L.; Oil Characterization; Physicochemical Properties; Biodiesel.

إِهْدَاء

إلى من علمني النجاح و الصبر... إلى من علمني العطاء بدون انتظار...
أبسي طيب الله ثراه.

إلى من علمتني و عانت الصعاب لأصل إلى ما أنا فيه... إلى من

كان دعاؤها سر نجاحي و حناؤها بلسم جراحي... أُمسي.

إلى جميع أفراد أسرتي العزيزة و الكبيرة كل باسمه أينما وجدوا.

إلى أصدقائي رفقاء دوبي من داخل الجامعة وخارجها.

إلى كل من يفتتح بفكرة فيدعو إليها ويعمل على تحقيقها، لا يبغى بها

إلا وجه الله و منفعة الناس.

إليكم أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع.



شكر وتقدير

علامة شكر المرء إعلان حمده فمن كتم المعروفه منهم فما شكر
فالشكر أولاً لله عز وجل على أن هدايتي لسلوك طريق البحث والتشبه بأهل
العلم وإن كان بيني وبينهم مفاوز.

وأقدم بعظيم الشكر والتقدير للأستاذ الدكتور مراد قريشي على حسن
تعاونيه، إذ أمدني بما احتجت

إليه من مؤلفات واستفسارات كان لها أكبر الأثر في إنجاز هذه الدراسة.
بالإضافة إلى

حرصه الدائم على أن يكون هذا العمل في أعلى مستوى فيجزيه الله كل خير.

ثم أزجي الشكر والثناء أجله لأستاذي الاستاذ عمار بن مية على حسن رعايته
لهذه الدراسة.

وشكر لأساتذتي الكرام:

الأستاذ: محمد الأمين سكيربفة رئيساً.

الأستاذ: صالح الدونيت مناقشاً.

الأستاذ: نور الدين بوراس مناقشاً.

الأستاذ: صلاح الدين العويني مناقشاً.

على تفضلهما بمناقشة هذه الدراسة.

وأشكر شكراً غير مقطوع إلى من ساعدني في الحصول على مصادر الدراسة
ومراجعتها وخاصة فيمن ساعدني في الجانب التطبيقي.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

((رَبَّنَا آتِنَا مِنْ لَدُنْكَ رَحْمَةً وَهَيِّئْ لَنَا مِنْ أَمْرِنَا رَشَدًا))

صدق الله العظيم

فهرس المحتويات

	شكر و عرفان	
	الاهداء	
I	فهرس المحتويات	
VI	فهرس الرموز والمختصرات والاشكال والصور والجدول	
1	مقدمة عامة	
الجانب النظري		
الفصل 1 الدراسة النظرية للنبات		
3	أصل وانتشار نبات جاتروفا كركاس لين. (Jatropha curcas Linn.):	1.1
4	التعريف بنبات الجاتروفا كركاس (Jatropha curcas L.):	2.1
4	التعريف بالعائلة الفربيونية (Euphorbiaceae family):	1.2.1
5	التصنيف النباتي لـ (Jatropha L curcas):	2.2.1
5	وصف نبات (Jatropha curcas L) "الوصف المورفولوجي للنبات":	3.2.1
6	التسميات المحلية:	3.1
8	السمية:	4.1
9	تقنيات استخلاص زيت بذور نبات (Jatropha curcas L):	5.1
9	الاستخلاص بالمذيبات:	1.5.1
9	الاستخلاص بالماء الساخن:	1.1.5.1
10	الاستخلاص بتقنية الموجات فوق الصوتية:	2.1.5.1
10	الاستخلاص بالموانع الحرجة:	3.1.5.1
10	الاستخلاص بـ Soxhlet:	4.1.5.1
11	الاستخلاص بالطرق الميكانيكية:	2.5.1
12	الاستخلاص الإنزيمي:	3.5.1
12	الاستخلاص الميكروبي:	4.5.1
13	طرق أخرى للاستخلاص:	5.5.1
13	مقارنة بين تقنيات الاستخلاص المختلفة (الجدول 2.1):	6.5.1
14	الخصائص الفيزيائية والكيميائية لزيت بذور نبات (Jatropha curcas L):	6.1
14	الكثافة:	1.6.1
15	اللزوجة:	2.6.1
15	مؤشر اليود:	3.6.1
16	مؤشر الحموضة:	4.6.1
16	قيمة التصبن:	5.6.1
16	مؤشر الانكسار:	6.6.1
17	مؤشر البيروكسيد:	7.6.1
17	الأحماض الدهنية الحرة:	8.6.1
18	التركيب الكيميائي لزيت بذور نبات (Jatropha curcas L):	7.1
19	الفينولات:	1.7.1
19	مركبات الفلافونويد:	2.7.1
19	القلويدات:	3.7.1
20	البروتينات:	4.7.1
20	الأحماض الدهنية المشكلة اساسا لزيت بذور نبات (Jatropha curcas L):	8.1
20	تعريف الليبيدات Lipids (الدهون):	1.8.1

20	تصنيف الدهون:	2.8.1
21	الدهون البسيطة:	1.2.8.1
21	الدهون المركبة:	2.2.8.1
22	الفوسفوليبيد:	1.2.2.8.1
22	الجليسريدات:	2.2.2.8.1
23	الدهون المركبة الأخرى:	3.2.2.8.1
23	الدهون المشتقة:	3.2.8.1
23	الأحماض الدهنية:	1.3.2.8.1
24	هيكل المركبات الهامة التي تشكل زيت بذور ج. كركاس:	9.1
25	الخاتمة:	10.1

الفصل 2 التطبيقات الحديثة " والمستدامة " لنبات الـ ج. كركاس

26	التطبيقات الحديثة " والمستدامة " لنبات الـ ج. كركاس (Jatropha curcas L):	2
26	الأهمية الكيميائية:	1.2
27	التطبيقات البيولوجية:	2.2
27	الطب والتجميل:	1.2.2
28	مكافحة الآفات:	2.2.2
28	المعالجة الحيوية (التربة):	3.2.2
29	التطبيقات الصناعية	3.2
29	زيوت التشحيم الحيوية	1.3.2
29	زيت المحولات	2.3.2
29	طلاء الاسطح	3.3.2
30	صناعة الألواح الحبيبية غير اللاصقة واللصق وصناعة الورق	4.3.2
31	تطبيقات في مجال الطاقات المتجددة	4.2
31	الكتلة الحية:	1.4.2
31	الوقود الحيوي:	1.1.4.2
31	تعريف الوقود الحيوي:	1.1.1.4.2
32	أجيال الوقود الحيوي:	2.1.1.4.2
33	أنواع الوقود الحيوي:	3.1.1.4.2
33	الغاز الحيوي (biogas):	1.3.1.1.4.2
33	الايثانول والبيوتانول	2.3.1.1.4.2
34	الهيدروجين الحيوي:	3.3.1.1.4.2
34	الديزل الحيوي	4.3.1.1.4.2
35	استخدامات اخرى:	5.2
36	خصائص واستخدامات كعكة البذور	1.5.2
38	انتاج الديزل الحيوي	6.2
39	تفاعلات الاسترة التبادلية:	1.6.2
40	العوامل المؤثرة في تفاعل الاسترة التبادلية:	1.1.6.2
40	العائلات الرئيسية للمحفزات:	2.1.6.2
40	طريقة المحفز الحمضي:	1.2.1.6.2
42	الطريقة المحفز القلوي:	2.2.1.6.2
42	محفز الانزيم غير المتجانسة:	3.2.1.6.2
42	الخصائص الفيزيوكيميائية للديزل الحيوي:	7.2
43	محتوى الماء:	1.7.2

44	رقم السيتان:	2.7.2
44	نقطة الوميض:	3.7.2
45	محتوى الكبريت:	4.7.2
45	السعة الحرارية:	5.7.2
46	بقايا الكربون:	6.7.2
46	استخدام المنتجات الثانوية للديزل الحيوي والمعالجة:	8.2
47	الاتجاهات الاقتصادية:	9.2
48	الخاتمة	10.2

الجانب التطبيقي

الفصل 3 الطرق والوسائل

50	نطاق العمل:	1.3
51	المواد الأولية:	2.3
51	بذور الجاتروفا كيركاس:	1.2.3
51	زراعة الجاتروفا كيركاس:	2.2.3
52	طرق ووسائل العمل التجريبي:	3.3
52	استخلاص وتحليل زيت الجاتروفا كيركاس:	1.3.3
52	الأدوات والأجهزة المستعملة:	1.1.3.3
53	المواد الكيميائية المستعملة:	2.1.3.3
53	استخلاص زيت الجاتروفا كركاس:	3.1.3.3
55	قياس الماء والمحتوى المتطاير:	5.1.3.3
55	التحليل الفيزيائي والكيميائي لزيت الجاتروفا كركاس:	6.1.3.3
55	الكثافة (الوزن النوعي):	1.6.1.3.3
56	معامل الانكسار:	2.6.1.3.3
57	اللزوجة:	3.6.1.3.3
57	قيمة الحمض (AV) والأحماض الدهنية الحرة (FFAs):	4.6.1.3.3
58	مؤشر التصبن (Si):	5.6.1.3.3
59	مؤشر اليود (Ii):	6.6.1.3.3
59	مؤشر بيروكسيد (PI):	7.6.1.3.3
60	تحليل GC-MS:	8.6.1.3.3
60	إنتاج وتحليل وقود الديزل الحيوي:	2.3.3
60	مخطط تدفق العملية:	1.2.3.3
61	الاسترة التبادلية (transestérification):	2.2.3.3
63	الأدوات والأجهزة المستعملة:	1.2.2.3.3
63	المواد الكيميائية المستعملة:	2.2.2.3.3
63	العوامل المؤثرة في التفاعل الاسترة التبادلية:	3.2.2.3.3
63	حساب كمية المواد المتفاعلة للاسترة التبادلية:	4.2.2.3.3
63	حساب كمية الميثانول مقابل الزيت:	1.4.2.2.3.3
66	حساب كمية المحفز:	2.4.2.2.3.3
66	تفاعل الاسترة التبادلية:	5.2.2.3.3
67	الفصل (الشكل 8.3):	1.5.2.2.3.3
67	الغسيل (الشكل 8.3):	2.5.2.2.3.3
68	مردود تفاعل الاسترة التبادلية:	3.2.3.3
68	الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج:	4.2.3.3

68	رقم السيتان (CN):	1.4.2.3.3
69	بقايا الكربون (Cr):	2.4.2.3.3
70	السرعات الحرارية (القيمة الحرارية HHV)	3.4.2.3.3
70	الخاتمة	4.3

الفصل 4 النتائج ومناقشتها

71	النتائج والمناقشة:	4
71	زراعة الجاتروفا كركاس:	1.4
73	توصيف بذور الجاتروفا كركاس:	2.4
74	استخلاص الزيت:	3.4
75	التحليل الفيزيوكيميائي لزيت البذور:	4.4
77	تحليل مطياف الكتلة اللوني للغاز (GC-MS):	5.4
79	إنتاج وقود الديزل الحيوي:	6.4
79	الاسترة التبادلية (transestérification):	1.6.4
80	جودة وقود الديزل الحيوي:	2.6.4
80	الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج:	3.6.4
81	الكثافة (الوزن النوعي):	1.3.6.4
82	اللزوجة:	2.3.6.4
82	محتوى الماء:	3.3.6.4
83	قيمة الحمض (AV):	4.3.6.4
83	قيمة اليود (IV):	5.3.6.4
84	رقم السيتان:	6.3.6.4
84	قيمة التصبن (SV):	7.3.6.4
84	السرعات الحرارية (HHV):	8.3.6.4
85	بقايا الكربون:	9.3.6.4
86	الخاتمة	7.4
88	الخاتمة والافاق	

فهرس الرموز والمحتويات والاشكال والصور والجداول

❖ فهرس الجداول

5	الجدول 1.1: التصنيف العلمي الجاتروفا كركاس.
14	الجدول 2.1: مقارنة بين طرق الاستخلاص.
18	الجدول 3.1: الخصائص الفيزيوكيميائية لزيت بذور بعض النباتات.
36	الجدول 1.2. محتويات كعكة بذور الجاتروفا.
36	الجدول 2.2. المحتوى الدقيق للغاية من كعكة بذور الجاتروفا.
37	الجدول 3.2. قيمة قشرة فاكهة الـ ج. كركاس وقشور البذور لإنتاج الطاقة.
37	الجدول 4.2. استخدامات المنتجات التي أساسها من الـ ج. كركاس.
38	الجدول 5.2. تكوين الأحماض الدهنية لزيت الـ ج. كركاس الخام.
41	الجدول 6.2. إنتاج وقود الديزل الحيوي للـ ج. كركاس في ظروف مختلفة.
43	الجدول 7.2. الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي الجاتروفا.
52	الجدول 1.3: يمثل مختلف الأدوات والأجهزة المستعملة في الدراسة.
53	الجدول 2.3: يوضح المواد الكيميائية المستخدمة.
63	الجدول 3.3: يمثل مختلف الأدوات والأجهزة المستخدمة.
63	الجدول 4.3: يوضح المواد الكيميائية المستخدمة.
66	الجدول 5.3: النسب وكمية المواد المستخدمة لتفاعل الاسترة التبادلية.
73	الجدول 1.4. توصيف بذور الجاتروفا كركاس.
75	الجدول 2.4. توصيف أجزاء فاكهة وبذور الجاتروفا كركاس.
75	الجدول 3.4. نتائج الخصائص الفيزيوكيميائي لزيت بذور الجاتروفا كركاس.
78	الجدول 4.4. المكونات النباتية التي تم تحديدها بواسطة GC-MS في مستخلص n-hexane من الجاتروفا كركاس.
81	الجدول 5.4. الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج.

❖ فهرس الاشكال والصور

3	الشكل 1.1. مركز المنشأ (الأصل) والمناطق المحتملة لزراعة الجاتروفا في العالم.
4	الشكل 2.1. كأس الزهرة (Sepal)، البتلة (Petal)، مئبر (Anther)، الحامل المئبر (Filament)، فتحة المدقة (Stigma)، قلم المدقة (Style)، المبيض (Ovary)، البويضة (ovule)، الوعاء (receptacle)، المدقة (carpel) والسداة (stamen).
7	الشكل 3.1. جاتروفا كركاس، أ. الأفرع الطرفية، ب. الخطوط محورية على سطح الورقة؛ ج. تفرع الإزهار، د. سداة الزهرة، هـ. الزهرة المؤنثة، ر. الفاكهة، ز. البذور (الجانب البطني)، ح. البذور (الجانب الظهري)، ذ. البذور (الجانب الجانبي).
8	الشكل 4.1. إسترات Phorbol من زيت جاتروفا كركاس.
11	الشكل 5.1. جهاز Soxhlet.
12	الشكل 6.1. تقنيات استخلاص الدهون المختلفة.
21	الشكل 7.1. هيكل الدهون الثلاثية.
22	الشكل 8.1. هيكل الفوسفوليبيد.
23	الشكل 9.1. هيكل أحادي الجالاكتوزيل ديجليسيريد (Monogalactosyldiglyceride).
24	الشكل 10.1. الأحماض الدهنية المشبعة وغير المشبعة الموجودة طبيعياً.
25	الشكل 11.1. هيكل أهم المركبات التي يتكون منها زيت بذور الجاتروفا كركاس. (أ) يشير إلى المجموعات الكربوكسيلية؛ (ب) يشير إلى الروابط المزدوجة. (ج) يشير إلى مجموعات الهيدروكسيل.
26	الشكل 1.2: مخطط توضيحي للتطبيقات الصناعية لنبات الـ ج. كركاس.
30	الشكل 2.2. عملية صنع ألواح ليفية متوسطة الكثافة.
32	الشكل 3.2. يمثل أجيال الوقود الحيوي.
35	الشكل 4.2. رسم تخطيطي لتوضيح دورة الديزل الحيوي.
38	الشكل 5.2. عملية إنتاج وقود الديزل الحيوي، كما هو شائع في الصناعة.
39	الشكل 6.2. تفاعل التحويل بالأسطرة المستخدم لإنتاج إسترات الديزل الحيوي.
47	الشكل 7.2. استهلاك الديزل السنوي.
48	الشكل 8.2. إنتاج وقود الديزل الحيوي في العالم.
48	الشكل 9.2. الطلب على وقود الديزل الحيوي.
50	الشكل 1.3. يوضح مراحل العمل (اللون الأحمر يوضح مسار العمل).
52	الشكل 2.3. يوضح موقع زراعة جاتروفا كركاس.
54	الشكل 4.3. برتوكول استخلاص زيت الجاتروفا كركاس بجهاز Soxhlet.
55	الشكل 5.3. مخطط لتحديد محتوى الرطوبة باستخدام مجفف أو فرن تجفيف.
56	الصورة 1.3. توضح وزن القنينة (أ): وزن القنينة مملوءة بالزيت، ب: وزن القنينة مملوءة بالماء).
57	الصورة 2.3. جهاز مقياس الانكسار Abbe لحساب معامل الانكسار.

58	الصورة 3.3. معايرة قيمة الحمض (AV) والأحماض الدهنية الحرة (FFAs).
59	الصورة 4.3. يوضح مراحل عملية التصبن (أ: التفاعل، ب: المعايرة، ج: العينة في نقطة التعديل).
61	الشكل 6.3. مخطط يوضح مراحل إنتاج وقود الديزل الحيوي.
62	الشكل 7.3. المدخلات والمخرجات مع تفاعل الأسترة التبادلية.
64	الشكل 8.3. آلية تفاعل الأسترة التبادلية.
67	الشكل 9.3. مخطط يوضح مراحل إنتاج الوقود الحيوي عن طريق تفاعل الاسترة التبادلية.
69	الصورة 5.3. توضح الجهاز المستعمل في هذه التجربة لقياس بقايا الكربون.
72	الشكل 1.4. صور لنبات الجاتروفا كركاس توضح مراحل استنبات ونمو شجيرة الجاتروفا كركاس من البذر الى الانتاج.
73	الشكل 2.4. صور لفاكهة الجاتروفا كركاس توضح مراحل النضج، ج. الفاكهة في طور النمو، أ. الفكهة جافة، ب. البذور جافة.
74	الصورة 1.4. تمثل الزيت المستخلص من زيت بذور الجاتروفا كركاس.
77	الشكل 3.4. كروماتوجرام GC لزيت بذرة جاتروفا كركاس L.

❖ قائمة الرموز والاختصارات

Blend Of 5 Percent Biodiesel with Mineral Diesel	B5	مزيج من 5 في المائة من وقود الديزل الحيوي مع الديزل المعدني
Dry Matter	DM	مادة جافة
Food And Agriculture Organization of The United Nations	FAO	منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة
Supercritical fluid extraction	SFE	الاستخلاص بالسوائل فوق الحرج
Pressurized liquid extraction	PLE	الاستخلاص بالسائل المضغوط
Microwave-assisted extraction	MAE	الاستخلاص بمساعدة الميكروويف
Jatropha Methyl Ester	JME	إستر ميثيل الجاتروفا
Potassium	K	البوتاسيوم
Kilocalories	Kcals	كيلو سعر حراري
Kilogram	Kg	كيلو غرام
Kilowatt	kW	كيلوات
European Standard	EN	المعيار الأوروبي
American Society for Testing of Materials	ASTM	الجمعية الأمريكية لاختبار المواد
Fatty Acid Methyl Ester	FAME	إستر ميثيل الأحماض الدهنية
Free Fatty Acid	FFA	الأحماض الدهنية الحرة
Gas Chromatography Mass Spectroscopy	GC-MS	التحليل الطيفي الكتلي للغاز
Iodine Value	IV	قيمة اليود
Parts Per Million	ppm	أجزاء في المليون
Acid Number	AN	رقم الحمض
Saponification Number	Si	مؤشر التصبن
Peroxide Index	Pi	مؤشر البيروكسيد
Jatropha Curcas Linn	J. curcas L.	جاتروفا كركاس لين
Soxhlet Extractor	Soxhlet	جهاز الاستخلاص سوكلسي
Yield	η	المردود
Extracted Oil Mass	M_{HE}	كتلة الزيت المستخلص
Sample Mass	M_{E our m}	كتلة العينة
Humidity Rate	M_m	نسبة الرطوبة

فهرس الرموز والاشكال والصور والجداول

Density Or Specific Weight	ρ	الكثافة او الوزن النوعي
Volume	V	الحجم
Normality	N	العيارية
Molar Mass of Oleic Acid	M(C18:1)	الكتلة المولية لحمض الأوليك
Cetane Number	CN	رقم السيتان
Carbon Residue	/	بقايا الكربون
Higher Heating Value	HHV	السرعات الحرارية
Sensitive Balance	/	ميزان حساس
Rotary Evaporator	/	جهاز التبخير الدوراني
Refractive Index Device	/	جهاز قرينة الانكسار
Water Bath	/	حمام مائي
Density Bottle	/	قنبينة الكثافة
Ph Meter	/	جهاز مقياس الأس الهيدروجيني
Megajoules/Kg	MJ/kg	ميغا جول/كغ

المقدمة العامة

المقدمة العامة

يمثل الاستهلاك المتزايد للطاقة نتيجة للتصنيع المتزايد للمجتمعات الحديثة، التوسع الحضري فضلا عن النمو الديموغرافي السريع للسكان في العالم أحد أهم المشاكل التي تواجه البشرية، متطلبات الطاقة لقطاع الصناعة يتم إشباعها بشكل أساسي من خلال الموارد ذات الأصل البتروكيميائي [1]. يغطي الوقود الأحفوري مثل البترول 80٪ من الاستهلاك العالمي للطاقة [2]؛ بدرجة أولى تشهد نسب احتياطات الوقود الأحفوري انخفاضا مستمرا نظرا لنفاذ مصادر التعويض لهذا المخزون، إضافة إلى التأثيرات البيئية السلبية كانبعاث وتراكم الغازات، مثل ثاني أكسيد الكربون، ثاني أكسيد الكبريت، أكاسيد النيتروجين، أكسيد النيتروز (N₂O)، والميثان، التي تمثل السبب الرئيسي لظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ [3].

تحاول البلدان ذات الاحتياطات النفطية المنخفضة التحول إلى أشكال أخرى لإنتاج الطاقة لتلبية احتياجاتهم باستغلال موارد الطاقة المتجددة والمستدامة. أهم مصدر لإنتاج الطاقة المتجددة هي الكتلة الحيوية، والتي يمكن تحويلها إلى وقود حيوي [4]. مصطلح الوقود الحيوي يشير إلى أي وقود سائل أو غاز أو صلب ينتج في الغالب من المواد الأولية المتجددة للكتلة الحيوية وأمثلة الأنواع الأكثر شيوعا للوقود الحيوي هي الإيثانول الحيوي، الميثانول الحيوي، الغاز الحيوي، الديزل الحيوي، الفحم الحيوي، الزيت الحيوي، الهيدروجين الحيوي.

أدى تهمين الكتلة الحيوية مؤخرًا إلى اهتمام كبير من طرف الباحثين للمواد الخام، لا سيما ذات الطبيعة الكربوهيدراتية كالحبوب والبنجر وقصب السكر، واللجنوسليلوز (lignocellulosic) كالخشب والقش والأعلاف، بالإضافة إلى المصادر النباتية الزيتية (الزيوت النباتية) [5]، [6].

تتألف الزيوت النباتية من أحماض دهنية، توجد في النباتات لما لها من أهمية في تكوين الأغشية في الكلوروبلاست والميتوكوندريا، وكذلك توجد الدهون بكميات في البذور والثمار وتقوم بتزويد النباتات بالطاقة، تستعمل خلال التكاثر وزيت بذور النباتات مثل الزيتون والتمر وجوز الهند والكمثرى. يستعمل تجاريا ويستعمل كغذاء وفي صناعة الصابون والاصباغ [7].

من النباتات التي استخلص الزيت من بذورها وهي غير صالحة للاكل نبات جاتروفا كركاس، وهي شجيرة معمرة نفضية البذور الزيتية. موطنها أمريكا الوسطى والجنوبية. اسمها العلمي **jatropha curcas Linn.** تعود إلى عائلة السوسبية أو عائلة أم الحليب **Euphorbiaceae**، الجاتروفا شجيرة متعددة الأغراض. يمكن أيضا استخدام كل جزء من أجزاء النبات لأغراض مختلفة. يستعمل زيت بعض الفصائل منها للعلاج التقليدي، كزيت للمحركات أو كوقود الديزل الحيوي [8]، [9]، [10]، هذا الأخير، هو عبارة على إستر أحادي ألكيل ينتج من الدهون الثلاثية لمواد الزيتية النباتية والحيوانية عبر عملية تحلل الكحول المعروفة باسم الأسترة التبادلية [11]. الأسترة التبادلية هي عملية تحويل الأحماض الدهنية إلى

استرات كحولية في وجود حمض أو محفز قلوي [12]. تتم عملية التحويل من الدهون الثلاثية إلى استرات مع الجلسرين كمنتج ثانوي [13].

يعتبر استخلاص الزيت أهم خطوة قبل إنتاج وقود الديزل الحيوي ويختلف باختلاف الجزء الذي يحتوي على الزيت سواء النواة أو البذرة. المنتجات الرئيسية في البذور أو النواة هي الزيت الخام والكعكة والتي تحتوي على ألياف وكربوهيدرات وبروتينات. هناك ثلاث طرق رئيسية لاستخلاص الزيت: الاستخلاص الميكانيكي، الاستخلاص الإنزيمي والاستخلاص بالمذيبات.

طريقة الاستخلاص بالمذيبات هي إحدى الطرق التقليدية تُطبق عادة على البذور. تعتبر هذه الطريقة واحدة من أكثر الطرق فعالية في استخلاص الزيوت النباتية، مع بقاء كمية أقل من الزيت المتبقي في الكعكة أو الكسب [14]. يعتمد اختيار المذيب بشكل أساسي على خصائص الترشيح القسوى للمادة المذابة المرغوبة [15]. المذيبات شائعة الاستخدام هي الهكسان وثنائي إيثيل الإيثر وإيثر البترول والإيثانول.

إن اختيار نبات جاتروفا كركاس كنوع ذي أولوية وأهمية له ما يبرره حقيقة أن بذوره تحتوي على زيت ذو قيمة عالية للطاقة والتي يمكن مقارنة خصائصها مع خصائص الديزل، إذا هي مصدر بديل عن المدخرات النفطية والمشتقات البترولية. بالإضافة إلى ذلك، فإن هذا المصدر غير مكلف ويوفر العديد من المنتجات والفوائد التي تعزز التنمية الصحراوية المتكاملة، كذلك التجارب الناجحة لزراعة هذا النوع موجودة في مدينة الوادي جنوب شرق الجزائر لأول مرة، كل الخصائص والميزات التي يتميز بها نبات جاتروفا كركاس هذه، إلى جانب المناخ المناسب لزراعتها في مدينة الوادي، تعني أن هذا النبات يمكن أن يلعب دوراً مهماً في البرامج البيئية لإعادة تأهيل الأراضي المتدهورة أو الهامشية، والتي تهدف إلى استعادة القاعدة الإنتاجية للأرض. وتحسين الظروف الاقتصادية لسكان المنطقة خصوصاً والبلد عموماً.

قسمت هذه الأطروحة إضافة لمقدمة عامة حول الموضوع إلى أربعة فصول تطرقت إلى ما يلي:

♣ الفصل الأول: عبارة عن بحث في المراجع يشمل عناصر أساسية متعلقة بالموضوع (الدراسة النظرية للنبات).

♣ الفصل الثاني: التطبيقات الحديثة والمستدامة لزيت بذور (*Jatropha curcas L*).

♣ الفصل الثالث: عمل تطبيقي يشمل استخلاص زيت بذور نبات الجاتروفا كركاس وتحديد خصائصه الفيزيو-كيميائية وتركيبته الكيميائية وتحويله عن طريق الاسترة التبادلية إلى الوقود الحيوي (الطرق والوسائل).

♣ الفصل الرابع: مناقشة النتائج المتحصل عليها (النتائج ومناقشتها).

ليختتم هذا العمل بخاتمة عامة، توصيات ووافق للدراسة.

الجانب

النظري

الفصل الأول:

الدراسة النظرية للنبات

كان استخدام بذور النباتات كمصدر للزيوت النباتية منذ العصور القديمة. الدهون المشتقة من النباتات، مثل الدهون والزيوت النباتية، هي مواد دهنية [16]. تستخدم المكسرات والبذور والحبوب والفول في صناعة الزيوت النباتية [17]. نظرًا لأنها منتجات تقليدية وذات أهمية اقتصادية في معظم المناطق الاستوائية وشبه الاستوائية، فقد تمت زراعة هذه النباتات لتحسين قدرتها على إنتاج الزيت [18]. جاتروفا كركاس لين. هو أحد هذه النباتات. التي تعتبر كمصدر غير مستغل للزيوت النباتية التي يمكن استخدامها بدلاً من النباتات التقليدية. وعلى الرغم من إجراء مزيد من الدراسة حول مكونات زيت الجاتروفا، إلا أن طرق الاستخلاص الفعالة والصدقية للبيئة لا تزال ضرورية. نتيجة لذلك، نوضح في هذا الفصل أهمية زيت بذور الجاتروفا كركاس في التطبيقات الصناعية المتنوعة من خلال تحديد طرق الاستخلاص الأكثر صلة وكذلك الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيت.

1.1 أصل وانتشار نبات جاتروفا كركاس لين. (*Jatropha curcas* Linn.):

الموطن الأصلي للجاتروفا كركاس (الشكل 1.1). هو المكسيك وأمريكا الوسطى (بليز وكوستاريكا والسلفادور وهندوراس ونيكاراغوا وبنما) [19]. تم إدخال الجاتروفا إلى جزر الرأس الأخضر وغينيا بيساو في منتصف القرن السادس عشر بواسطة البحارة البرتغاليين بسبب إمكاناته الطبية. بعد ذلك، تم إدخالها إلى مستعمرات برتغالية أخرى في إفريقيا (أي موزمبيق وأنغولا)، وبعد ذلك تم نقله إلى آسيا (أي الهند والصين وإندونيسيا) [20]. يتواجد نبات الجاتروفا بكثرة في المناطق الاستوائية بسبب تنوعه الوراثي، مما يتيح زراعته في ظروف مناخية مختلفة (الشكل 1.1). يحدث توزيعه الطبيعي تحت هطول الأمطار السنوي بين 944 و 3121 ملم، وفي درجات حرارة تتراوح بين 16.5 و 32.5 درجة مئوية [21] [19].



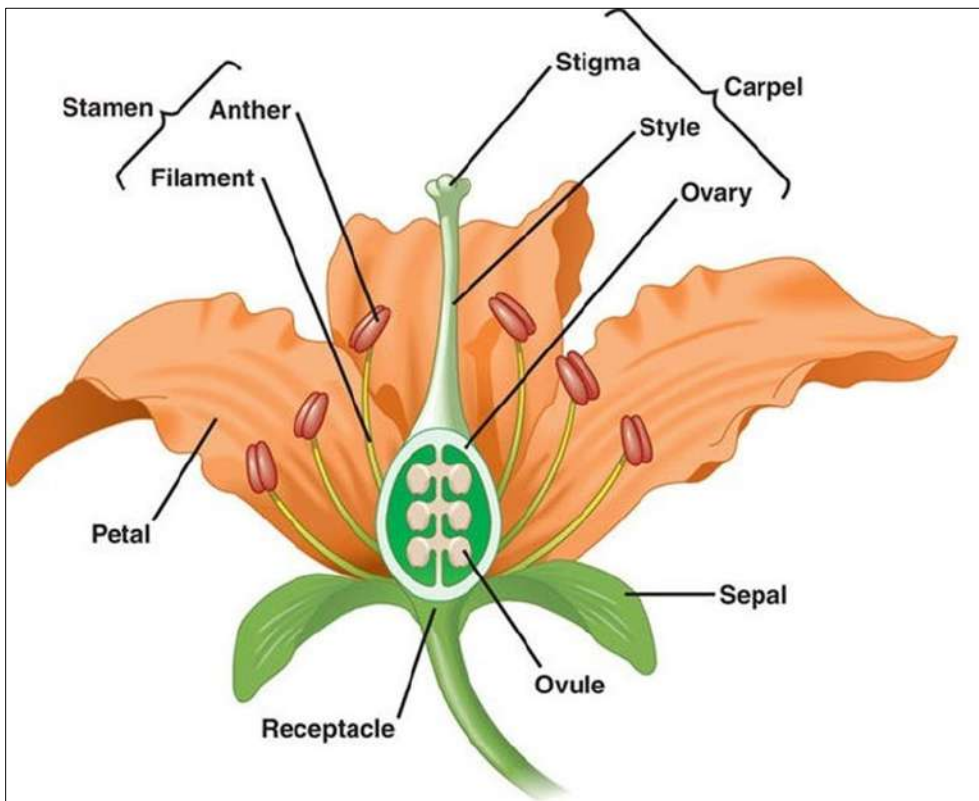
الشكل 1.1. مركز المنشأ (الأصل) والمناطق المحتملة لزراعة الجاتروفا في العالم [22].

2.1 التعريف بنبات الجاتروفا كركاس (*Jatropha curcas L.*):

1.2.1 التعريف بالعائلة الفربيونية (*Euphorbiaceae family*):

تتكون الفربيونية (*Euphorbiaceae*) من أحادي المسكن أو ثنائي المسكن، أعشاب، شجيرات، كروم، أو أشجار، كما تحتوي على مادة اللاتكس الموجودة في بعض المجموعات الرئيسية. السيقان عسارية وشبيهة بالصبار في البعض (على سبيل المثال، بعض *Euphorbias*). الأوراق بسيطة، ونادرًا ما تكون ثلاثية الفصوص أو على شكل راحة اليد، أو لولبية، أو متعكسة، وهي موجودة بشكل عام، ويتم تعديلها في بعض الأحيان على شكل غدد أو أشواك (على سبيل المثال، العديد من الباذنجان العساري). تتميز الفربيونيات بوجود أزهار أحادية الجنس (الشكل 2.1). مع مبيض متعدد مكون من 3 مدقات (*carpels*) مع بويضة واحدة لكل المدقة، وقمة محورية في وضع المشيمة، والعديد من الأصناف ذات اللاتكس الأحمر أو الأصفر أو الأبيض عادةً ("حليبي")، الفربيونية وحدها تحتوي على أزهار منخفضة السداة (*stamen*)، وبعضها يتميز بأزهار السياتيوم (*cyathium*) [23].

أنواع الفربيونية منتشرة في جميع أنحاء العالم. لها الأهمية الاقتصادية التي تشمل مختلف الزيوت، والأخشاب، والأدوية الطبية، والصبغة، ونباتات الزينة. تعتبر أيضا أنواع الفربيونية النضرة من المكونات الرئيسية للمجتمعات النباتية في جنوب إفريقيا، بالإضافة إلى أصناف الزينة الهامة [23].



الشكل 2.1 كأس الزهرة (*Sepal*)، البتلة (*Petal*)، مئبر (*Anther*)، الحامل المئبر (*Filament*)، فتحة المدقة (*Stigma*)، قلم المدقة (*Style*)، المبيض (*Ovary*)، البويضة (*ovule*)، الوعاء (*receptacle*)، المدقة (*carpel*) والسداة (*stamen*) [23].

2.2.1 التصنيف النباتي لـ (Jatropha curcas L):

الجدول 1.1: التصنيف العلمي
الجatroفا كركاس [24]

النطاق:	حقيقيات النوى
المملكة:	نباتات
الفرقة العليا:	النباتات الجينية
القسم:	النباتات الوعائية
الشعبة:	حقيقيات الأوراق
الشعبة:	البذريات
العمارة:	كاسيات البذور
الطائفة:	ثنائيات الفلقة
الطويفة:	الوردانيات
الرتبة العليا:	الوردوايات
الرتبة:	المليبيغيات
الفصيلة:	الفربيونية
الأسرة:	الكروتونات
القبيلة:	الجatroفاوية
الجنس:	الجatroفا
النوع:	جatroفا كوركاس

وصف عالم النبات السويدي كارل لينينوس الجatroفا كركاس لأول مرة عام 1753 [24]، وعلى الرغم من وجود عدد من المرادفات، إلا أن هذا الاسم لا يزال صالحًا حتى اليوم. تنتمي الجatroفا كركاس إلى عائلة سبورج (spurge) الفربيونية (Euphorbiaceae) أو الفصيلة اللبئية، وهي عائلة نباتية تضم 228 جنسًا وأكثر من 6500 نوع من الأشجار والشجيرات [25]. ينتمي جنس Jatropha إلى قبيلة Jatropheae من فصيلة Crotonoideae. يتألف الجنس من حوالي 180 نوعًا، معظمهم في المناطق الدافئة المعتدلة وشبه الاستوائية والمناطق المدارية الجافة موسميًا. يشتق اسم Jatropha من الكلمات اللاتينية "jatros" "(طبيب)" و"trope" (طعام) بسبب خصائصه الطبية [26]. كما يوضح الجدول 1.1 التصنيف النباتي المتسلسل من النطاق إلى النوع لنبته الجatroفا كركاس.

3.2.1 وصف نبات (Jatropha curcas L) "الوصف المورفولوجي للنبات":

الجatroفا شجرة يبلغ ارتفاعها حوالي 3-5 أمتار. في ظل ظروف موثية، يمكن أن تصل إلى 10 أمتار. يُظهر النبات نموًا مفصليًا مع انقطاع مورفولوجيا. تشكل شتلاتها عمومًا جذرًا مركزيًا وأربعة جذور جانبية والعديد من الجذور الثانوية. الأوراق، مرتبة بالتناوب على الساق، مفصصة بشكل سطحي وتتفاوت من 6 إلى 15 سم في الطول والعرض (الشكل 3.1. أ). يمكن أن يختلف حجم الورقة وشكلها من نوع إلى آخر. كما هو الحال مع الأصناف الأخرى في هذه العائلة، تحتوي الأنسجة الوعائية للسيقان والفروع على مادة اللاتكس الأبيض [27] [28]. الأغصان والسيقان مجوفة والخشب اللين قليل القيمة [27].

الجatroفا هي نبتة أحادية الجنس، مما يعني أنها تحمل أزهارًا ذكورًا وإناثًا منفصلة على نفس النبات. عدد الإناث أقل من الذكور ويتم حملها على قمة الإزهار، مع انخفاض عدد الذكور إلى أسفل. تبلغ نسبة الأزهار الذكور إلى الإناث في المتوسط 1:29 ولكن هذا متغير بدرجة كبيرة وقد يتراوح من 25-93 زهرة ذكر إلى 5:1 أزهار أنثوية يتم إنتاجها في كل عنقود [29]. كما تم الإبلاغ عن أن نسبة الزهور من الذكور إلى الإناث تنخفض مع تقدم عمر النبات [30]، مما يشير إلى أن قدرة الإثمار قد تزداد مع تقدم العمر.

تعتمد أزهار الجاتروفا أحادية الجنس على التلقيح بواسطة الحشرات، بما في ذلك النحل والذباب والنمل. عادة ما ينتج عن عنقود واحد 10 فواكه أو أكثر. تنتج مجموعة الفاكهة عمومًا عن التلقيح المتبادل مع النباتات الفردية الأخرى، في حالة عدم وصول حبوب اللقاح من الأشجار الأخرى، هذا لأن أزهار الذكور تسقط حبوب اللقاح قبل أن تتقبل الأزهار الأنثوية في نفس النبات. اما الجاتروفا لديها القدرة على التلقيح الذاتي [29].

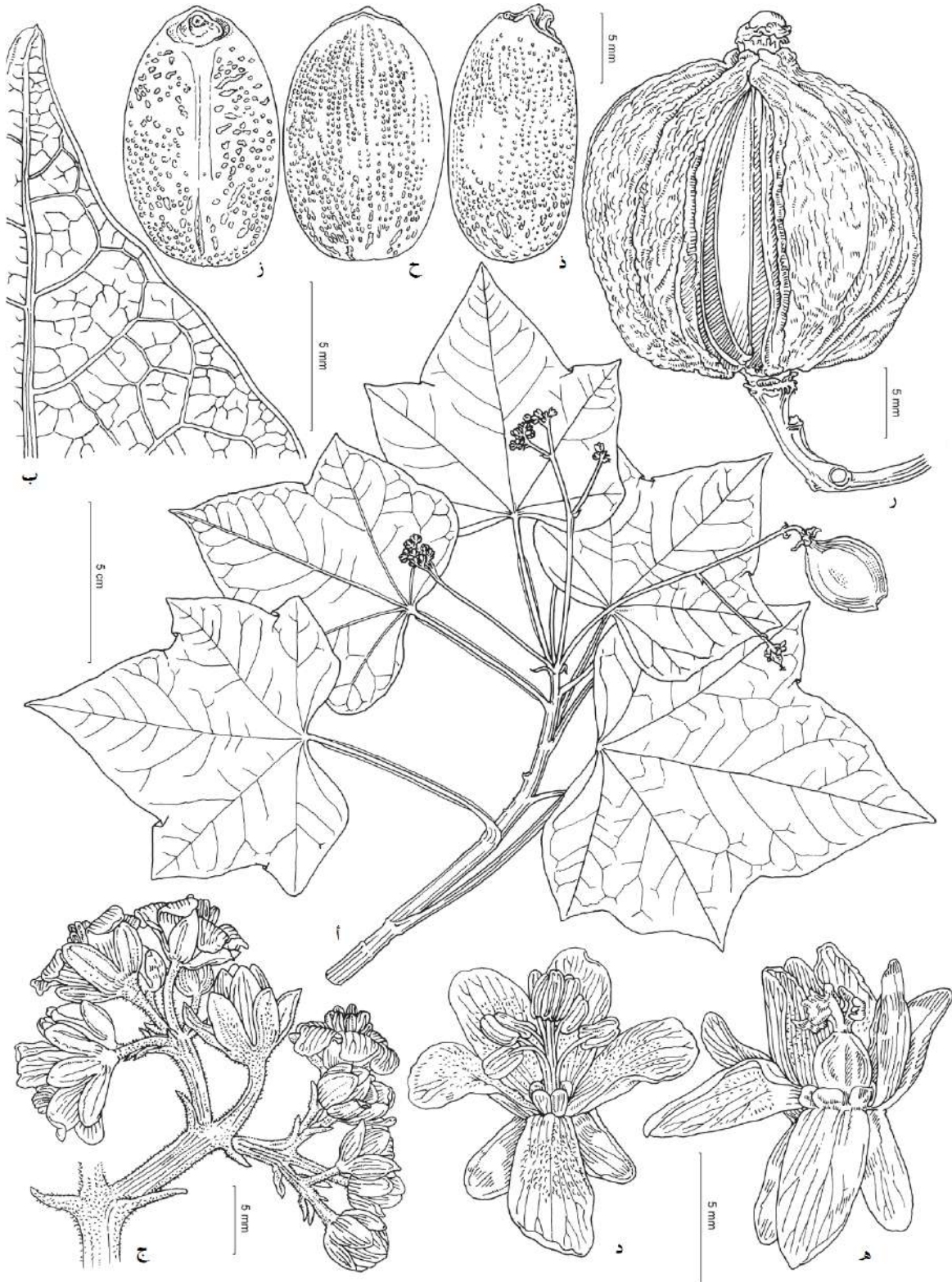
الثمار بيضاوية الشكل (الشكل 3.1.1 ذ. ح. ز.)، خضراء ولحمية، تتحول إلى اللون الأصفر ثم البني مع تقدم العمر. تنضج الثمار وتكون جاهزة للحصاد بعد حوالي 90 يومًا من الإزهار. الإزهار وبالتالي الإثمار مستمر، أي أن الثمار الناضجة وغير الناضجة تحمل معًا. تحتوي كل فاكهة على حبتين أو ثلاث بذور سوداء، بحجم 2سم×1سم (الشكل 3.1.1 ذ. ح. ز.). في المتوسط، تحتوي البذور على 35٪ من الزيوت غير الصالحة للأكل [27].

تنمو الجاتروفا بسهولة من البذور التي تنبت في حوالي 10 أيام، أو من عقل الساق. النمو سريع. قد يصل النبات إلى متر واحد ويزهر في غضون خمسة أشهر في ظل ظروف جيدة [31]. النمو متمائل، مع أزهار نهائية وتفرعات جانبية، تصل في النهاية إلى ارتفاع يتراوح من 3 إلى 5 أمتار في ظل ظروف جيدة. يستغرق الوصول إلى مرحلة النضج من أربع إلى خمس سنوات بشكل عام [27]. يحدث النمو الخضري خلال موسم الأمطار، هي أشجار نفضية، تتساقط أوراقها في موسم الجفاف. يحدث التزهير خلال موسم الأمطار، عادة تزهر مرتين في السنة خلال الصيف و/أو الخريف [32]. تتشكل الأزهار في الجاتروفا بشكل نهائي، مع وجود عدة أزهار في نفس السويقة، أي أنها أزهار عنقودية (الشكل 3.1.1 ج. د. هـ.)، يمثل محورها الأساسي أشكالًا متفرعة [33]. يتم إنتاج البذور في السنة الأولى أو الثانية من النمو. يُعتقد أن عمر أشجار الجاتروفا يتراوح من 30 إلى 50 عامًا أو أكثر [27].

3.1 التسميات المحلية:

لدى جاتروفا كركاس العديد من الأسماء العامية في العالم نذكر منها ما يلي: شجرة جوز بربادوس، الجوز البرازيلي اللادع، الجوز الفيزيائي الكوبي، حبوب الكركاس، جوز التين، الجوز الطبيعي، بندق الخنزير، الجوز السام وشجرة الجوز المطهر (الإنجليزية)، ترويض الطائر (البرازيلية)، المسعف الكبير، الصنوبر الهندي الكبير ونبات الخروع الكبير (الفرنسية)، تطهير القدم (الهولندية)، جوز الطيب، شجرة جوز الطيب، الجوز الأسود والجوز المنظف (الألمانية)، فول الهندي (الإيطالية)، حب الملوك أو الداند البري (العربية)، الخروع البرية والخروع الأبيض (الهندية)، الفحم (تنزانيا)، جوز الصنوبر (المكسيك)، الفول المطهر (جنوب إفريقيا)، فول الجحيم، الجوز الأمريكي، عشبة الإله الصالح، عشبة الشيطان، المسعف، الحاجز المسعف، المسعف المبارك، (جزر الكاريبي)، الفاصوليا الهندية، الفاصوليا البربرية،

الفاصوليا المطهرة، المكسرات المطهرة وحبوب الخروع الكبيرة (الإيطالية)، شجرة الصنوبر او الجوز الهندي، الشجرة المقدسة ، البنق الملين (اسبانيا) [31]، [34]، [26].

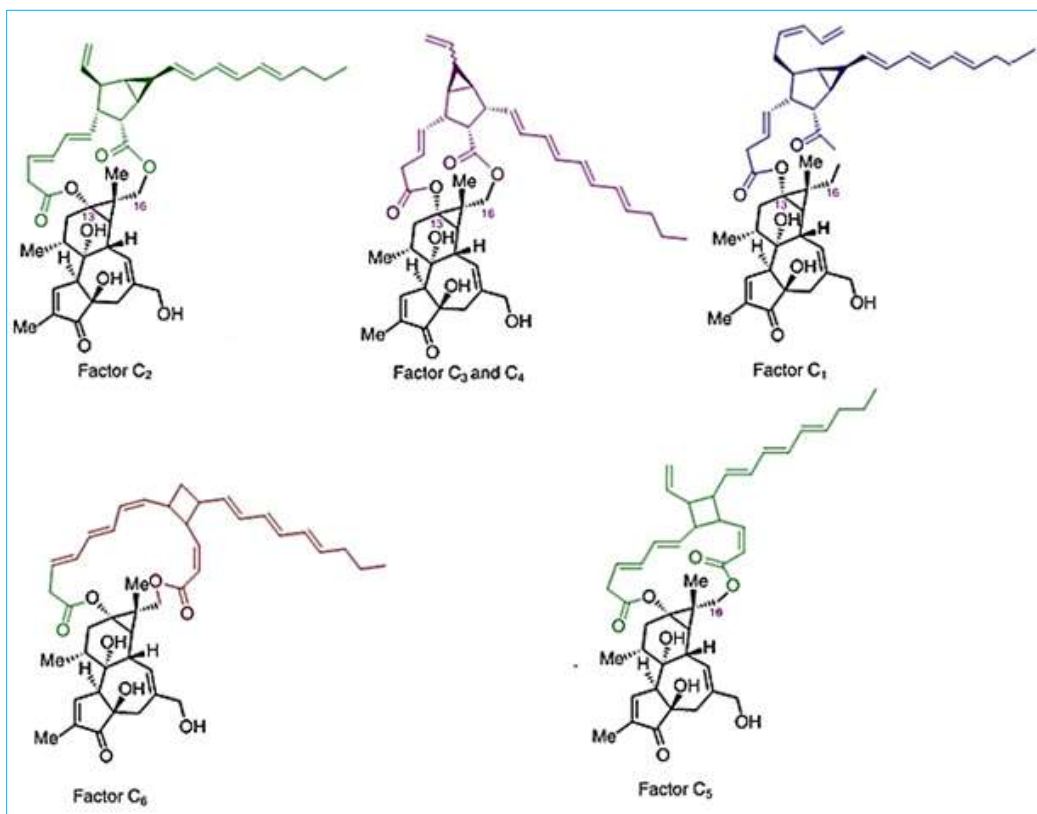


شكل 3.1. جاتروفا كركاس، أ. الأفرع الطرفية، ب. الخطوط محورية على سطح الورقة؛ ج. تفرع الإزهار، د. سداة الزهرة، هـ. الزهرة المؤنثة، ر. الفاكهة، ز. البذور (الجانب البطني)، ح. البذور (الجانب الظهري)، ذ. البذور (الجانب الجانبي) [35].

4.1 السمية:

تشتمل مجموعة متنوعة من أنواع الجاتروفا على خليط من المواد الكيميائية السامة ومضادات التغذية، كما يتضح من الأبحاث السابقة [36]، [37]. يبدو أن أكثر المواد الكيميائية النباتية خطورة الموجودة في مستخلصات المذيبات العضوية والمستخلصات المائية، على التوالي، هي استرات الفيربول (phorbol) (الشكل 4.1) وكورسين (curcin) [38]، [39]، [40]. على الرغم من عدم فهم توزيع مضادات المغذيات والمواد الكيميائية السامة في الأجزاء الهوائية من نبات الجاتروفا جيدًا، إلا أن جميع أجزاء النبات ضارة الهوائية واللاهوائية. تؤثر أنواع المستخلصات وطبيعة المواد الكيميائية المختبرة والجرعة وطريقة الإغذاء وحساسية الحيوانات على الأعراض ودرجة السمية [36]، [37]. إن وجود مواد كيميائية نباتية ذات خصائص مقلقة مثل التأثيرات المفيدة والسلبية في مستخلصات نبات الجاتروفا يوحي بالحد من تطبيقات المنتجات القائمة على الجاتروفا في الطب والتغذية.

ومع ذلك، فإن البذور السامة ليس مفيدة كعلف على الرغم من احتوائها على أفضل تركيبة بروتينية [41]. تم الإبلاغ عن صنف غير سام من منطقة بابانتلا (Papantla) في ولاية فيراكروز في المكسيك، وهو مناسب للاستهلاك البشري وطبيعته غير الضارة تم التأكد من عدم سميتها باستخدام الأسماك والفئران كنماذج تجريبية [42]. تحظى زراعة الصنف غير السام من جاتروفا كركاس بأهمية قصوى لأنها يمكن أن توفر زيتًا صالحًا للأكل وكسبًا للماشية وتعطي قيمة مضافة للمحصول.



شكل 4.1. إسترات Phorbol من زيت جاتروفا كركاس [43].

هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتحديد ما إذا كان لمكون أو مستخلص الجاتروفا آثار إيجابية أو سلبية، وتحت أي ظروف تحدث هذه التأثيرات. في الطب، يجب تجنب استخدام مستخلصات نبات الجاتروفا التي تحتوي على مواد كيميائية خطيرة مثل إسترات الفوربول. عندما يتم استخدام المواد الفعالة في شكل نقي، قد يكون الاستخدام العلاجي هو الأمثل. يعتبر تناول بذور أو أوراق الجاتروفا غير المصنعة عن طريق الفم سامًا للحيوانات الأعلى مثل الجرذان والخنازير والدجاج والأغنام والماعز والعجول، وقد يكون قاتلاً. الأعضاء الأساسية المصابة هي الكبد والكلى والطحال والرئتين والقلب. على الرغم من أن التركيزات الدقيقة التي تسبب فيها النباتات أو أجزاء النبات أو مواد كيميائية الجاتروفا ضرراً للإنسان غير معروفة، إلا أنه يجب تجنب الاتصال الموضعي عن طريق الفم أو العين لفترة طويلة [43]، [44] [45].

5.1 تقنيات استخلاص زيت بذور نبات (*Jatropha curcas L*):

هناك أربعة طرق رئيسية تم تحديدها لاستخراج الزيت: (1) الاستخلاص بالمذيبات، (2) الاستخلاص الميكانيكي، (3) الاستخلاص الأنزيمي، (4) الاستخلاص الميكروبيولوجي. يعد الاستخلاص بالضغط الميكانيكي والمذيبات من أكثر الطرق شيوعاً لاستخراج الزيت التجاري. قبل استخلاص الزيت، يجب تجفيف البذور. يمكن تجفيف البذور إما في الفرن عند 105 درجة مئوية أو تجفيفها بالشمس لمدة 3 أسابيع [20]، [30]، [46].

1.5.1 الاستخلاص بالمذيبات:

الاستخلاص بالمذيب هو تقنية إزالة أحد المكونات من مادة صلبة عن طريق مذيب سائل (الشكل 6.1. ط). ويسمى أيضاً بالرشح. هناك العديد من العوامل التي تؤثر على مردودية الاستخلاص مثل حجم الحبيبات ونوع السائل المختار ودرجة حرارة المذيب وتحريك المذيب. يُفضل حجم الجسيمات الصغير لأنه يسمح بمساحة بينية (مساحة التلامس) أكبر بين المادة الصلبة والسائلة. يجب أن يكون السائل المختار مذيباً انتقائياً جيداً ويجب أن تكون لزوجته منخفضة بدرجة كافية ليتم انتشارها بسهولة. تؤثر درجة الحرارة أيضاً على مردودية الاستخلاص. بحيث تزداد قابلية ذوبان المادة مع زيادة درجة الحرارة. يؤثر تحريك المذيب أيضاً، فهو يزيد من انتقال المذيب وبالتالي يزيد من نقل المواد من سطح الحبيبات. يعتبر الاستخلاص بالمذيبات اقتصادياً فقط عند الإنتاج على نطاق واسع لأكثر من 50 طنًا من وقود الديزل الحيوي يوميًا. هناك ثلاث طرق يتم استخدامها في هذا النوع على النحو التالي [20]، [30]، [46]:

1.1.5.1 الاستخلاص بالماء الساخن:

في هذه الطريقة، يتم استخدام الحمام المائي لاستخراج الزيت. يتم خلط البذور المطحونة مع المذيب وتؤخذ في دورق، والذي يتم غمره في حمام مائي عند درجة حرارة ثابتة لفترة زمنية محددة. التحريك

المقدم خارجياً لنفس الفترة الزمنية. بعد الانتهاء من الفترة الزمنية المطلوبة، يترك الدورق ساكناً في درجة حرارة الغرفة. حتى تستقر البذور المطحونة الأثقل في الدورق ويتم فصل المزيج عن طريق عملية الترشيح. تكمن ميزة هذه العملية في أنها تستغرق وقتاً أقل من جهاز Soxhlet. عيب هذه العملية هو أنها تتطلب ترشيح واستعادة مذيب أقل من جهاز Soxhlet [46].

2.1.5.1 الاستخلاص بتقنية الموجات فوق الصوتية:

في هذه العملية، يتم استخدام حمام مائي بالموجات فوق الصوتية (الشكل 6.1.1. ذ). بعد غمر قارورة أو أنبوب اختبار يحتوي على البذور المطحونة والمذيب جزئياً في الحمام. ثم تتعرض للاهتزازات فوق الصوتية. يمكن إضافة الماء المجمد لمنع ارتفاع درجة حرارة الجهاز. تشير المادة الغروانية إلى استخلاص الزيت من البذور في المذيب. تعتمد هذه الطريقة على التوتر السطحي، درجة حرارة التشغيل وإزالة الغازات من المحلول [46].

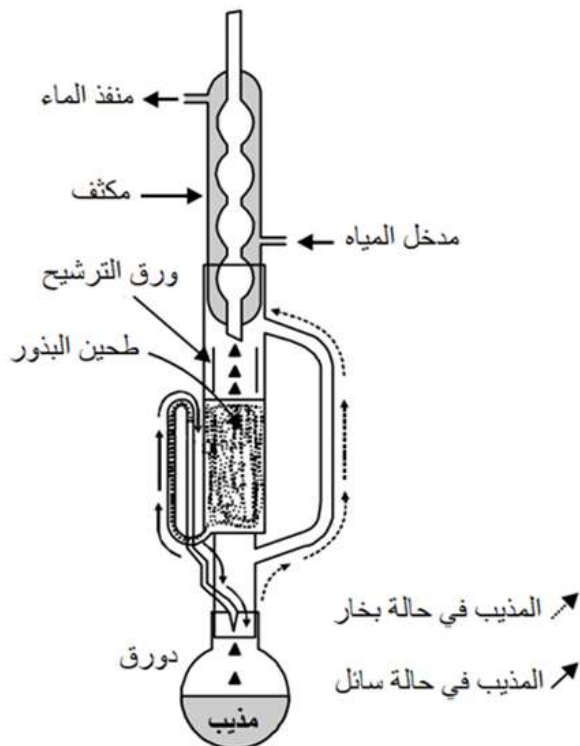
3.1.5.1 الاستخلاص بالموائع الحرجة:

يعد استخدام الموائع فوق الحرجة (Supercritical fluids) تقنية صديقة للبيئة حيث يتم استخدام مائع فوق نقطته الحرجة عند ضغط حرج معين (Pc) ودرجة حرارة حرجة (Tc) (الشكل 6.1.1. د). في عمليات الاستخلاص وتفاعلات الأسترة التبادلية، يتم استخدام ثاني أكسيد الكربون كمائع فوق الحرجة (SC-CO₂) على نطاق واسع لأنه، بالإضافة إلى كونه متجدداً وغير قابل للاشتعال، يمكن الوصول إلى نقاطه الحرجة بسهولة، حيث أن Tc هي 31 م° و Pc هو 7.38 ميجا باسكال (MPa) [47]. تسمح حقيقة أن ثاني أكسيد الكربون يكون في الحالة الغازية عند الضغط الجوي باستعادة المستخلص بسهولة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن إعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون لتجنب القلق بشأن تأثير الاحتباس الحراري. تمت دراسة SC-CO₂ على نطاق واسع واستخدامها في الصناعات الغذائية والأدوية ومستحضرات التجميل، في عمليات استخلاص المركبات الطبيعية من المنتجات الغذائية، مثل إزالة الكافيين من القهوة والشاي. كما تم تطبيقها أيضاً في استخلاص الزيوت الأساسية والأدوية من المواد الطبيعية، وفي استخلاص الدهون، وأيضاً في تفاعلات الأسترة التبادلية للحصول على وقود الديزل الحيوي [47]، [48]، [49].

4.1.5.1 الاستخلاص بـ Soxhlet:

بالمقارنة مع الاستخلاص بالماء الساخن، تم الحصول على الزيت بطريقة أحسن باستخدام جهاز مبتكر يسمى جهاز Soxhlet. يسمح هذا الجهاز باستخلاص الزيت من عينات البذور باستخدام طريقة الاستخلاص بالتقطير. في جهاز Soxhlet، تنقع العينة في مذيب ساخن يتم شفطه دورياً وتقطيره وإعادته إلى العينة. وتستمر العملية حتى يتضح المذيب المسحوب. ميزة جهاز Soxhlet على استخلاص بالماء

الساخن هي أنه لا يوجد ترشيح ضروري وأن المردود المتحصل عليه من الزيت أفضل من عملية الاستخلاص بالماء الساخن. الهكسان هو المذيب الأكثر استخدامًا في تقنية الاستخلاص بالمذيبات نظرًا لتكلفته المنخفضة نسبيًا وسميته المنخفضة. يمكن أيضًا استخدام مذيبات عضوية أخرى مثل البنزين والكحول والكلوروفورم. تم تقييم الماء كمذيب لاستخلاص الزيت من فول الصويا ولكن أعطى إنتاجية منخفضة وإمكانية عالية للتلوث الميكروبيولوجي بالزيت [46].



الشكل 5.1. جهاز Soxhlet [46].

2.5.1 الاستخلاص بالطرق الميكانيكية:

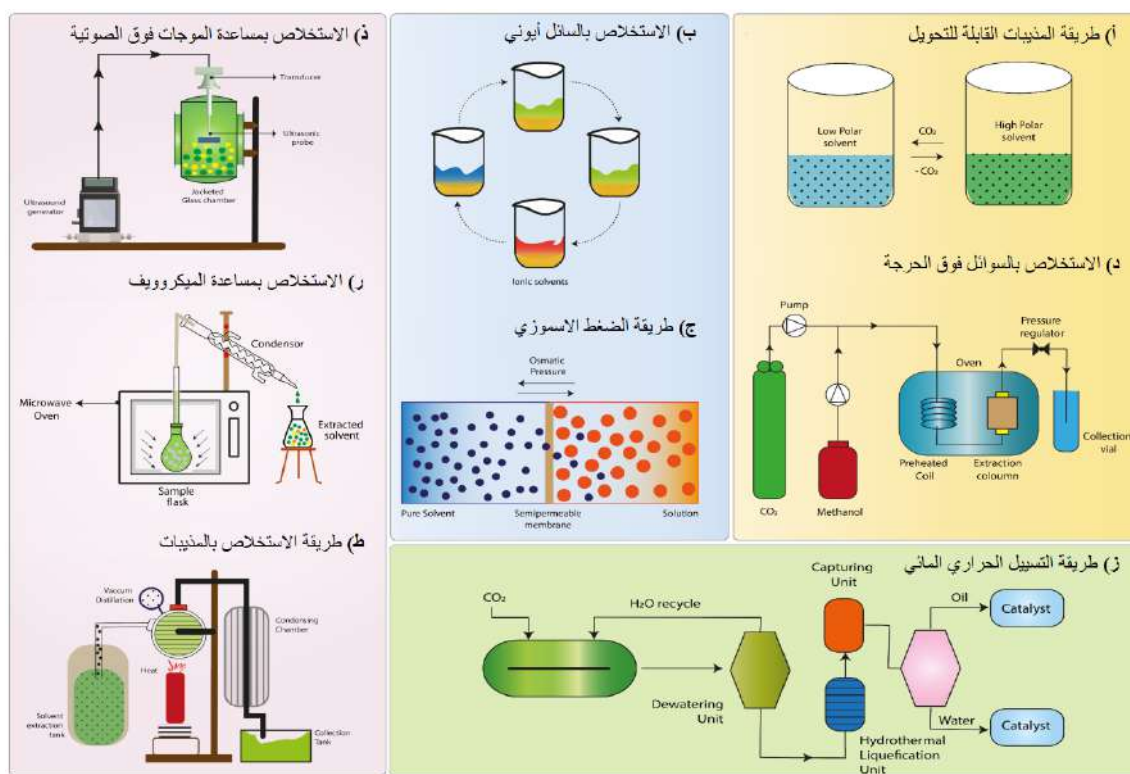
في هذا النوع من الطرق لاستخلاص الزيت، يمكن وضع البذور المجففة الكاملة، أو الحبوب المجففة، أو مزيج من الاثنين معًا في مكبس يدوي أو مكبس لولبي يحركه المحرك. يمكن للمكابس اللولبية التي تُدار بالمحرك، على سبيل المثال، استخلاص 68-80% من الزيت المتاح، في حين أن مكابس الكبس اليدوية يمكن أن تستخلص 60-65% فقط. يمكن تعريض البذور لمجموعة متنوعة من عمليات الاستخلاص عن طريق الطارد، وهو ما يفسر النطاق الواسع [50]، [51]، [52]. على الرغم من ذلك فإن تقنية استخلاص الزيت باستخدام المكابس الميكانيكية هي الأكثر تقليدية. أيضًا الزيت المستخلص بواسطة مكابس ميكانيكية يحتاج إلى مزيد من المعالجة للترشيح وإزالة الصمغ. هناك مشكلة أخرى مرتبطة بالمكابس الميكانيكية التقليدية وهي أن تصميمها مناسب لبعض البذور المعينة، ويتأثر مردود الزيت بالنسبة للبذور الأخرى [46].

3.5.1 الاستخلاص الإنزيمي:

ظهرت تقنية استخلاص الزيت الأنزيمي كطريقة واعدة لاستخراج الزيت. في هذه العملية يتم استخدام إنزيمات مناسبة لتحرير الزيت من البذور المطحونة. وتتمثل مزاياها الرئيسية في أنه صديق للبيئة ولا ينتج مركبات عضوية متطايرة كملوثات جوية. عيب واحد مرتبط بهذه التقنية هو وقت العملية الطويل وهو أمر ضروري للإنزيمات لتحرير الأجسام الزيتية [53]. شاه (Shah) وآخرون قاموا باستخلاص الزيت الحيوي من الجاتروفا كركاس، واستخدم الباحثون استخلاص الزيت الإنزيمي المائي واكتشفوا أن استخدام البروتياز القلوي أدى إلى نتائج أفضل [54]، [55].

4.5.1 الاستخلاص الميكروبي:

تم استخدام خلية بكتيرية معزولة من سلطعون الأرز لاستخلاص الزيت من بذور الجاتروفا بشكل مائي (ملاط) دون التأثير على التركيب البروتيني للسوياء عن طريق تلقيح بذور الجاتروفا بـ 1.0 مل من خلية البداية البكتيرية وتطبيق مضاد حيوي على عينات عديدة. بعد أن تم احتضان البكتيريا العسوية القزمة (*Bacillus pumilus*) المستزرعة مع ملاط نواة دافئ في وسط مائي مع درجة حموضة أولية قدرها 5.5 لمدة 6 ساعات عند 37 درجة مئوية، تم استخلاص زيت الجاتروفا بمعدل 73% [56]. هذا النهج له مزايا متعددة بحيث يمكن استخدام البروتين المتبقي لاستخدامات أخرى؛ ليست هناك حاجة لتصنيع إنزيم نقي، ويمكن استخدام الزيت الناتج في إنتاج وقود الديزل الحيوي.



الشكل 6.1. تقنيات استخلاص الدهون المختلفة [57].

5.5.1 طرق أخرى للاستخلاص:

عادةً ما تستخدم طرق الاستخلاص التقليدية، بما في ذلك النقع والترشيح واستخراج الجزر، المذيبات العضوية وتتطلب حجمًا كبيرًا من المذيبات ووقت استخلاص طويل. تم أيضًا تطبيق بعض طرق الاستخلاص الحديثة، مثل الاستخلاص بالسوائل فوق الحرج (SFE)، والاستخلاص بالسائل المضغوط (PLE)، والاستخلاص بمساعدة الميكروويف (MAE)، في استخلاص المنتجات الطبيعية، وهي توفر بعض المزايا مثل المذيبات العضوية الأقل استهلاكًا، وقت استخلاص أقصر وانتقائية أعلى. بعض طرق الاستخلاص، مثل طريقة المذيبات القابلة لتحويل، طريقة الضغط الاسموزي، طريقة التسييل الحراري المائي والاستخلاص بالسائل الأيوني نادرًا ما تستخدم في التحقيق الكيميائي النباتي الحالي ولن تناقش في هذه المراجعة.

6.5.1 مقارنة بين تقنيات الاستخلاص المختلفة (الجدول 2.1):

تم تصميم عمليات معالجة البذور الزيتية واستخلاص الزيت للحصول على زيت عالي الجودة بأقل عدد من المكونات غير المرغوب فيها، وتحقيق عوائد استخلاص عالية وإنتاج كعكة عالية القيمة. يعتمد اختيار طريقة الاستخراج على طبيعة المادة الخام، ومحتوى الزيت للمادة، ومستوى الزيت المتبقي المسموح به في العجينة، ومدى تمسخ البروتين المسموح به، وتطبيق المنتج، وحجم الإنتاج [58]. يعتمد الحد الأقصى لمستوى الزيت الذي يمكن استخلاصه من عينة بذرة معينة على طريقة الاستخلاص. يتم الاستخلاص الصناعي للزيت من البذور، بشكل عام، من خلال عمليتين - الاستخلاص بالمذيبات والاستخلاص الميكانيكي. كلا النهجين لهما مزايا وعيوب فيما يتعلق بحجم التشغيل والمركزية وكفاءة الاستخراج والمخاطر البيئية والصحية. بالنسبة للبذور التي تحتوي على نسبة عالية من الزيت (فوق 35٪) مثل بذور الكتان والقرطم وبذور عباد الشمس وال فول السوداني ونواة النخيل وبذور اللفت وبذور القطن، يتم تضمين كلا الخطوتين. في حين أن المواد التي تحتوي على نسبة منخفضة من الزيت، مثل فول الصويا ونخالة الأرز، يمكن استخلاصها بالمذيب مباشرة [59]. يوفر استخلاص المذيبات استخلاصًا مرتفعًا للزيت، لكن الاستخلاص المشترك لمكونات غير ثلاثية الجليسيريد يتطلب عملية تكرير إضافية [60]. كما يتطلب أيضًا استردادًا صارمًا ومكثف للطاقة لاستخلاص المذيبات لتقليل مستوى المواد المتطايرة في كل من الزيت و الكعكة (الكسب أو الكيك) [61]، [62]. الاستخلاص الميكانيكي أبسط ويفضل عمومًا بسبب انخفاض تكلفة الاستثمار والتشغيل. كما يمكن تشغيله بواسطة موظفين شبه مهرة وينتج زيتًا ذا نوعية جيدة نسبيًا، ويسمح باستخدام بقايا الكعكة [63]. ومع ذلك، فإن عيب الاستخلاص الميكانيكي هو انخفاض مردوده مقارنة بالاستخلاص بالمذيبات. يمكن تنفيذ طرق الاستخلاص الأخرى مثل استخلاص ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج [64]، الاستخلاص المائي [65] مع أو بدون المعالجة الإنزيمية لاستخلاص الزيت [66].

الجدول 2.1: مقارنة بين طرق الاستخلاص [67].

طريق الاستخلاص الخاصية	الاستخلاص الميكانيكي	الاستخلاص المائي	الاستخلاص بالمذيبات	الاستخلاص بـ SC-CO ₂
مردود الزيت	90-60%	80-40%	99-90%	99-90%
جودة الزيت	منخفض إلى متوسط (أ)	محتوى الفوسفور متوسطة	محتوى الفوسفور منخفض إلى مرتفع (ب)	محتوى الفوسفور منخفضة
أحماض دهنية حرة (FFA)	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
استقرار التأكسد	متوسط	متوسط	منخفض إلى متوسط	منخفض
جودة الكعكة	/	/	/	/
بروتين (NSI)	مرتفع	متوسط	منخفض	متوسط
بقايا الزيت	7-17%	10-20%	أقل من 1%	أقل من 1%
نطاق الإنتاج	صغير إلى متوسط	متوسطة إلى كبير	كبير	متوسطة إلى كبير
متطلبات الطاقة	قليل	متوسط	مرتفع	متوسط
التكلفة الإجمالية	قليل	متوسط الارتفاع	عالي	عالي

(أ) أعطى الضغط البارد محتوى الفوسفور أقل من الضغط الساخن.
(ب) يعتمد على المذيب المستخدم. يعطي استخراج الهكسان محتوى فوسفور أعلى من استخراج الكحول.

6.1 الخصائص الفيزيائية والكيميائية لزيت بذور نبات (*Jatropha curcas L*):

إن الفهم المتعمق للخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيوت ومكوناتها مهم لتطبيق هذه المنتجات الزيتية في مختلف المنتجات الغذائية وغير الغذائية. لذلك جودة الزيت والاتساق مهمان لمعرفة أي مجال يمكن استغلاله بشكل أفضل. يمكن أن يكون المحتوى الفيزيائي والكيميائي للزيت متغيرًا للغاية، لأن خصائص الزيت تتأثر بالبيئة والتفاعل الجيني، وكذلك حجم البذور ووزنها ومحتوى الزيت. يمكن أن يؤثر نضج الثمار أيضًا على تكوين الأحماض الدهنية للزيت، كما أن المعالجة والتخزين تؤثر بشكل أكبر على جودة الزيت [30]، [68]. تشمل الخصائص الفيزيائية والكيميائية (الجدول 4) المهمة للزيوت محتوى الدهون الصلبة، اللزوجة، الكثافة، الكثافة النوعية، مؤشر الحموضة، قيمة التصبن، معامل الانكسار... الخ. تعد جودة الزيت مهمة أيضًا عند الاستخلاص زيت الجاتروفا. لهذا يجب المزيد من البحث لضرورة تحديد نوعية الزيت الذي يمكن الحصول عليه بشكل معقول في الظروف الريفية الموجودة. بشكل عام، من الضروري أيضًا ضمان تقليل تلوث الزيت، وقيمه الحمضية المنخفضة، واستقراره العالي للأكسدة ومحتوياته المنخفضة من الفوسفور والرماد والماء.

1.6.1 الكثافة:

تُعرف الكثافة بأنها كتلة المنتج الموجودة في حجم ثابت، تحت ظروف ضغط ودرجة حرارة محددة جيدًا. الكثافة هي خاصية مهمة تدخل في تقييم المواد الخام السائلة. على سبيل المثال في صناعة الدهون والزيوت، تعد بيانات الكثافة ضرورية لأغراض التجارة لأن جميع منتجات الدهون والزيوت يتم تداولها على أساس الوزن ولكن يتم قياسها على أساس الحجم [69].

2.6.1 اللزوجة:

تعكس لزوجة الزيت مقاومته لتدفقه؛ وتمثل قوى الاحتكاك الداخلي وتعتمد بدرجة كبيرة على درجة الحرارة. تتأثر لزوجة الزيوت بالخصائص الكيميائية تأثراً كبيراً، على سبيل المثال، مستوى عدم التشبع وطول سلسلة الأحماض الدهنية التي تشكل ثلاثي الجلسرين [70]. بالكاد تنخفض اللزوجة مع مستوى أعلى من عدم التشبع. تتصرف زيوت الطعام كسوائل نيوتونية مثالية على مدى واسع من معدلات القص، وبالتالي يمكن أن تتميز بلزوجة واحدة. لقد ثبت أن درجة الحرارة تؤثر بقوة على لزوجة السوائل. تنخفض اللزوجة عادة مع ارتفاع درجة الحرارة. بالقرب من درجة حرارة الانصهار، قد يحدث السلوك غير النيوتوني بسبب تبلور الزيت [71]. لقد وجد أن اللزوجة تزداد مع زيادة الوزن الجزيئي وتنخفض مع زيادة عدم التشبع ودرجة الحرارة [72]. لاحظ تيمز [73] انخفاض حوالي 30% في لزوجة الزيت مقابل كل زيادة في درجة الحرارة بمقدار 10 درجات مئوية. حدد دوت وبراساد [70] لزوجة دهن الزبدة (34 سنتي بواز) وزيت بذرة القطن المهدرج (45 سنتي بواز) وزيت النخيل (37 سنتي بواز) عند 40 م°.

3.6.1 مؤشر اليود:

تحتوي الزيوت والدهون على أحماض مشبعة وغير مشبعة وتعتمد العديد من خصائصها على نسبة هذين النوعين من الأحماض. تقليدياً، تم قياس متوسط عدم التشبع كقيمة اليود بناءً على تفاعل كيميائي مع أحادي كلوريد اليود (كاشف Wijs) أو مركبات الهالوجين المختلطة الأخرى في ظل ظروف خاضعة للرقابة. لا تزال القيمة مذكورة في العديد من المواصفات المتعلقة بالزيوت والدهون. ومع ذلك، لديها عدد من العيوب والقيود. يستغرق القياس وقتاً طويلاً، ويتطلب عمالة مكثفة، ويستخدم كواشف ومذيبات غير مرغوب فيها. لهذا السبب، غالباً ما يتم حساب قيمة اليود من تركيبة الأحماض الدهنية التي يحددها GC باستخدام قيم اليود النظرية للمكونات الفردية. يوجد اختلاف محسوس بين القيم التجريبية والمحسوبة. قد تكون قيم اليود المحسوبة للأحماض الدهنية المتعددة غير المشبعة منخفضة من خلال الهالوجين غير الكامل. أحد القيود المهمة هو أن قيمة اليود لا تميز بين رابطة الحلقات المستقلة والأيزومرات العابرة وهذه المعلومات مهمة عند اتباع الهدرجة التحفيزية الجزئية [69].

لفت كنوثر (Knothe) [74] الانتباه إلى حقيقة أن متوسط عدم التشبع يميز بين الأحماض المشبعة وغير المشبعة ولكنه لا يعكس الاختلاف المهم في التفاعل بين الأحماض الأحادية غير المشبعة والأحماض غير المشبعة المتعددة. وقد اقترح مؤشرات جديدة تقيس مكافئ موضع الأليل (Allylic position equivalent) من الأحماض الأحادية غير المشبعة والمتعددة غير المشبعة ومكافئ الموضع ثنائي الأليل (Bis-allylic position equivalent) من الأحماض المتعددة غير المشبعة فقط. يمكن تحديدها بواسطة GC أو من إشارات H1 و13 الكربون (C13) NMR المميزة لكل من هذه الأنواع الحمضية.

4.6.1 مؤشر الحموضة:

تعطي قيمة الحمض مؤشرا على جودة الأحماض الدهنية في الزيت. وتشير قيمة الحموضة على وجود الأحماض الدهنية الحرة في الزيوت وهذا يبين وجود ومدى التحلل المائي بواسطة الإنزيمات المحللة للدهون والأكسدة [75]. تشير القيمة الحمضية المنخفضة في الزيت إلى أن الزيت سيكون مستقرًا على مدى فترة زمنية طويلة ويكون محمي من التفسخ والأكسدة. يمكن أن يعزى ذلك إلى وجود مضادات الأكسدة الطبيعية في البذور مثل الفيتامينات C و A بالإضافة إلى المواد الكيميائية النباتية المحتملة الأخرى مثل الفلافونويد. تُستخدم قيمة الحمض كمؤشر على مدى صلاحية الزيت ومدى ملاءمته للاستخدام في صناعات الطلاء والصابون [76]. أظهرت القيمة الحمضية المرتفعة في الزيت أن الزيت قد لا يكون مناسبًا للاستخدام في الطهي (غير صالح للأكل)، ولكنه مع ذلك يكون مفيدًا لإنتاج الدهانات والصابون السائل والشامبو [77]، [76]. كما أن القيمة الحمضية الملموسة للزيوت هي مؤشر على أن النبات قد يكون سامًا للماشية [76].

5.6.1 قيمة التصبن:

التصبن هو عملية تكوين دهون محايدة باستخدام مادة قلوية، وتقسيمها إلى جلسرين وأحماض دهنية. يتم تعريف قيمة التصبن على أنها كمية القلويات اللازمة لتصبن كمية معينة من الزيت، كما هو معبر عنها بملغ من KOH لتصبن 1 جرام من العينة [78]. تشير قيمة التصبن أيضًا إلى طبيعة الأحماض الدهنية الموجودة في الدهون الثلاثية. السلسلة الهيدروكربونية الأطول في الدهن أو الزيت، حمض أقل تحلل مائيًا محررة لكل جرام، وبالتالي قيمة تصبن منخفضة. علاوة على ذلك، توضح قيمة التصبن متوسط طول السلسلة لجميع الأحماض الدهنية الموجودة في الزيت [79]. تشير قيمة التصبن الأعلى إلى متوسط طول الأحماض الدهنية المنخفضة ومتوسط الوزن الجزيئي الأخف للدهون الثلاثية والعكس بالعكس. أظهرت الدراسات أن متوسط قيمة التصبن لزيت ج. كركاس المزروع في مناطق مختلفة يتراوح بين 189.5 و213.14 مجم من KOH g⁻¹ من الزيت [80]. تسببت قيمة التصبن الأعلى في فقدان محصول الإستر أثناء تفاعل الأسترة التبادلية. على سبيل المثال، فيسنتي (Vicente) وآخرون [81] أظهروا أن تصبن الدهون الثلاثية وانحلال الإستر بواسطة الجلسرين أدى إلى فقدان عائدات الديزل الحيوي.

6.6.1 مؤشر الانكسار:

يُقاس معامل الانكسار بسهولة على كميات صغيرة من المواد. يمثل معامل الانكسار الزاوية التي ينحني عندها شعاع الضوء عندما يمر من الزيت إلى الهواء. تتأثر قيمة معامل الانكسار بدرجة الحرارة وتقاس عادة عند 25 درجة مئوية. بسبب الطبيعة الصلبة لبعض الزيوت ومكوناتها، تُقاس مؤشرات الانكسار لهذه الزيوت عادةً عند درجات حرارة أعلى من 40 درجة مئوية [82]. تتأثر هذه القيمة أيضًا بالعوامل

الداخلية، بحيث يزداد معامل الانكسار مع زيادة طول السلسلة (ولكن ليس بطريقة خطية) ومع زيادة عدم التشبع. تختلف الأيزومرات الهندسية عن بعضها البعض وتختلف البوليينات المتقطعة عن طريق الميثيلين عن تلك التي بها عدم تشبع مترافق. يحتوي ثلاثي الجلسرين على قيم أعلى من الأحماض الحرة [69].

7.6.1 مؤشر البيروكسيد:

قيمة البيروكسيد هي المؤشر الأكثر شيوعًا لأكسدة الدهون. تتميز الزيوت النباتية غير المكررة بقيمة أعلى من البيروكسيد مقارنة بالزيوت المكررة [83]. تشير القيم العالية لقيمة البيروكسيد إلى مستويات عالية من التفسخ والتأكسد للزيوت وتشير أيضًا إلى غياب أو انخفاض مستويات مضادات الأكسدة؛ ومع ذلك، يمكن استخدام بعض مضادات الأكسدة لتقليل التفسخ مثل بروبيجادليت (propylgadolite) وبوتيل هيدروكسيل أنيسول (butyl hydroxyl anisole) [84]. نصت منظمة الصحة العالمية / منظمة الأغذية والزراعة (WHO/FAO) [85] على حد أقصى مسموح به لمستوى بيروكسيد لا يزيد عن 10 مكافئ من الأكسجين / كغ من الزيت؛ لذلك، قد لا تكون بعض الزيوت التي تمت مراجعتها مناسبة للاستهلاك.

8.6.1 الأحماض الدهنية الحرة:

الأحماض الدهنية الحرة هي نسبة مئوية من وزن حمض دهني محدد (على سبيل المثال، نسبة حمض الأوليك) [86]. التركيزات العالية من الأحماض الدهنية الحرة غير مرغوب فيها في الزيوت النباتية الخام لأنها تؤدي إلى خسائر كبيرة في الزيت المحايد أثناء التكرير. في الدهون الخام، تقدر الأحماض الدهنية الحرة كمية الزيت التي ستفقد أثناء خطوات التكرير المصممة لإزالة الأحماض الدهنية [87]. تعتبر المستويات العالية من الأحماض الدهنية الحرة وخاصة أحماض اللينوليك غير مرغوب فيها في الزيوت الجاهزة لأنها يمكن أن تسبب نكهات مختلفة وتقصر العمر الافتراضي للزيوت. كمية الأحماض الدهنية الحرة في الزيت هي مؤشر على جودته الإجمالية. يمكن أن تتكون من خلال التحلل المائي أو في مراحل متقدمة من الأكسدة. تعمل الكمية الزائدة من الأحماض الدهنية الحرة على تقليل نقطة دخان الزيت وتسبب في "انفجار" الزيت أثناء الطهي. الزيوت عالية الجودة منخفضة في الأحماض الدهنية الحرة [88]. في الزيوت النباتية المكررة، كلما انخفضت الأحماض الدهنية الحرة كلما كان الزيت مقبولاً للإنسان من حيث الطعم [83].

الجدول 3.1: الخصائص الفيزيوكيميائية لزيت بذور بعض النباتات [83].

* FFA	* PV	* IV	* SV	* AV	* Vs	* Ds	* RI	بذور النبات / الخاصية
1.98	2.90	49.40	158.40	3.97	-	-	-	زيت بذور اليقطين (<i>Telfairia occidentalis</i>)
14.40	25.00	101.00	-	3.56	32.220	0.921	-	
1.74	2.26	115.60	179.04	3.48	-	-	1.460	
6.34	-	16.00	184.00	12.60	45.00	-	1.463	
31.49	-	15.80	187.00	62.60	44.70	-	1.461	
2.40	-	123.83	162.69	4.77	119.00	0.911	1.476	
28.40	3.10	44.40	168.30	0.82	-	-	1.654	زيت بذور الكاجو (<i>Anacardium Occidentale</i>)
0.73	2.94	136.89	17.60	12.66	-	-	1.470	
1.18	1.60	115.01	10.01	22.72	-	-	1.470	
5.40	-	41.30	137.00	10.70	-	-	1.458	
5.40	7.95	41.30	137.00	10.70	-	-	-	
2.24	10.58	50.61	212.00	2.24	-	0.910	1.420	
18.10	-	-	193.00	35.80	41.40	0.895	-	زيت بذور الجاتروفا (<i>Jatropha curcas L.</i>)
9.39	56.00	20.30	240.53	18.76	20.49	0.886	-	
11.94	44.00	26.09	230.71	23.87	76.18	0.881	-	
0.60	-	73.46	122.49	1.20	-	-	-	
0.75	-	135.85	208.50	1.50	-	-	-	
0.25	8.00	103.00	189.00	0.50	-	-	-	
0.23	7.45	116.00	191.00	0.45	-	-	-	زيت بذور السمسم (<i>sesamum Indica L.</i>)
0.25	1.80	106.00	189.54	0.49	-	-	1.464	
1.30	7.50	121.40	-	2.48	-	-	-	
1.35	4.71	106.88	-	2.63	-	-	-	
0.58	-	87.72	185.83	1.15	9.42	-	1.469	
0.44	-	84.80	181.55	0.87	6.48	-	1.467	
7.40	158.64	58.64	180.77	14.80	0.43	0.948	1.792	زيت بذور الخروع (<i>Ricinus communis</i>)
1.20	-	76.93	123.30	2.39	-	-	-	

* RI: معامل الانكسار، DS: الكثافة، VS: اللزوجة، AV: قيمة الحموضة، SV: قيمة التصبن، IV: قيمة اليود، PV: قيمة البروكسيد، FFA: الأحماض الدهنية الحرة.

7.1 التركيب الكيميائي لزيت بذور نبات (*Jatropha curcas L.*):

يتكون الزيت في الغالب من الأحماض الدهنية، ولكنه يحتوي أيضًا على أجزاء غير قابلة للتصبن مثل الكاروتينات، الفينولات، الفوسفوليبيد، والمواد الكيميائية النباتية، وكذلك فيتوستيرول، توكوفيرول، وتوكوترينول.

تحتوي بذور ج. كركاس على محتوى بروتين خام بنسبة 31-35% ومحتوى دهون 55-58% [89]. هناك 97.6% دهون متعادلة، 0.95% دهون سكرية، و1.45% فوسفوليبيدات في الزيت [90]. بنسبة 3: 1، يفوق عدد الأحماض الدهنية غير المشبعة عدد الأحماض الدهنية المشبعة [91]. حمض الأوليك (41.5-48.8%)، حمض اللينوليك (34.6-44.4%)، حمض البالمتيك (10.5-13%)، حمض الستريك (2.3-2.8%)، وكذلك الأحماض *Cis-11-eicosenoic* و *Cis-11,14eicosadienoic*، هذه الأحماض الدهنية الأولية المحددة في زيت ج. كركاس [89]. نظرًا لاحتوائه على نسبة عالية من الزيت والبروتين، فإن هذه النبات مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات والصناعات. بدأ تسويق ج. كركاس باستيراد زيت

بذورها من الرأس الأخضر إلى البرتغال لتصنيع الصابون والمصابيح الزيتية منذ مئات السنين [92]. كانت صفات زيت البذور مقنعة بدرجة كافية لاعتبارها بديلاً للوقود الأحفوري للمساعدة في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري [93]. يمكن للشموع والصابون ومستحضرات التجميل الاستفادة من الزيت. إذا تمت إزالة السموم منها، فإن كعكة البذور أو وجبة النواة توفر مكمل بروتين مغذي للغاية وفعال من حيث التكلفة للأعلاف الحيوانية [41]. تم الإبلاغ مؤخرًا عن جدوى تصنيع الميثانول السليلوزي من المنتجات الثانوية لاستخراج زيت ج. كركاس [94]. يمكن استخدام النبات كسور حي، لمنع تآكل التربة، واستعادة الأرض [31].

1.7.1 الفينولات:

تحتوي جميع النباتات على مواد كيميائية فينولية، والتي تعتبر مكونات نشطة بيولوجيًا. نظرًا لأنها تثبط أو تقاوم عامل تنشيط الصفائح الدموية (Platelet-activating factor)، وهو وسيط قوي للالتهاب الفسفوليبيدي، فإن هذه الأدوية لها خصائص مضادة للتخثر ومضادة للالتهابات [95]. تم استخلاص عدد من المواد الكيميائية الفينولية، بما في ذلك 3-هيدروكسي-4-ميثوكسي بنزaldehyde و 4-هيدروكسي بنزوات، من أقسام مختلفة من ج كركاس [96]، Syringaldehyde و Caffeyaldehyde من كعكة البذور [97].

2.7.1 مركبات الفلافونويد:

مركبات الفلافونويد هي مستقبلات ثانوية لها مجموعة واسعة من التأثيرات الدوائية، بما في ذلك الخصائص المضادة للسرطان، والفيروسات، ومضادات التسمم، وخصائص حماية الكبد. تم فصل اثنين من مركبات الفلافونويد من الجاتروفا بواسطة خفاجي (Khafagy) وآخرون [98] سميا فلافونويد جليكوسيد 1 وفلافونويد جليكوسيد 2، في حين أن لينغ يي (Ling-yi) وآخرون [99] أبلغوا عن فصل نوبيليتين (nobiletin). رافيندرانات وآخرون (Ravindranath) [100] أبلغوا عن فصل التومنتين (tomentin).

3.7.1 القلويدات:

قلويدات هي فئة من المواد الكيميائية المحتوية على النيتروجين التي لها تطبيقات طبية أساسية. تشتهر باحتوائها على مسكنات مخدرة، ومضادة للملاريا، ومضادة للبكتيريا، ومضادة للأورام، ومضادة للسرطان، ومجموعة متنوعة من الخصائص الدوائية الأخرى. تم فصل اثنين من قلويدات من أوراق الجاتروفا بواسطة ستوبمان (Staubmann) [101] وهما بيروليدين (5-هيدروكسي بيروليدين -2-وان) و يوراسيل (بيريميدين -2، 4-ديون) ((Pyrrolidine (5-hydroxypyrrolidin-2-one) and pyrimidine-) و Uracil (2,4-dione) على التوالي. داس (Das) وآخرون [102] قاموا بفصل الإيميدازول (4-بوتيل-

2-كلورو-5-فورميل-1H-إيميدازول) (4-Butyl-2-chloro-5-formyl-1H-imidazole) (curcamide)) من كعكة بذور الجاتروفا. (Yao) وآخرون [97] فصلوا مركب دياميد (كركاميد) (Diamide) (curcamide)) من كعكة بذور الجاتروفا.

4.7.1 البروتينات:

تمت دراسة بروتينات والبيبتيدات ج. كركاس لدورها في أنشطة التمثيل الغذائي للنبات، والدفاع ضد الحيوانات العاشبة والأنشطة البيولوجية. تم فصل البروتينات الوظيفية مثل الأكوابورينات (Aquaporins) من أجزاء مختلفة من جاتروفا كركاس. تلعب هذه البروتينات أدوارًا أساسية في تكيف النبات مع إجهاد الجفاف من خلال التحكم في حركة المياه عبر الغشاء. تلعب الأكوابورينات في ج. كركاس دورًا مهمًا في النمو السريع للنبات أثناء الظروف الجوية الجافة [103]. البروتينات الوظيفية الأخرى المستخلصة من النبات هي: كركاسين أو ليكتين (Curcasin a lectin) تم فصله من طرف ستراب (Stripe) وآخرون [104]؛ اثنين من الإسترايس (esterases) والليياز [101]. الكركين، وهو بروتياز من لاتكس ج. كركاس [105]؛ فيتات (phytate) ومثبط التربسين [106]. فان دن بيرج (Van den Berg) وآخرون [107] استخلصوا البيبتيد الدوري كركاسكلين أ (Peptide Curcacyclin A)، وأوفين (Auvin) وآخرون [108] استخلصوا الكركاسكلين ب (Curcacyclin B).

8.1 الأحماض الدهنية المشكلة اساسا لزيت بذور نبات (Jatropha curcas L):

1.8.1 تعريف الليبيدات Lipids (الدهون):

في علم الأحياء والكيمياء الحيوية، الدهن هو جزيء حيوي دقيق قابل للذوبان في المذيبات غير القطبية [109]. المذيبات غير القطبية هي عادة هيدروكربونات تستخدم لإذابة جزيئات دهون الهيدروكربونات الأخرى التي تحدث بشكل طبيعي والتي لا تذوب في الماء، بما في ذلك الأحماض الدهنية والشموع والستيرولات والأحادي الجليسيريد والثنائي الجليسيريد والدهون الثلاثية والفوسفوليبيدات. يمكن أن تكون الدهون في حالة صلبة، مثل الشمع، أو في حالة سائلة، مثل الزيوت. للدهون تطبيقات في صناعات مستحضرات التجميل والأغذية وكذلك في التكنولوجيا الحيوية [110].

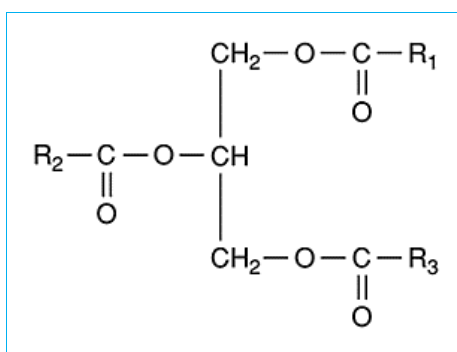
2.8.1 تصنيف الدهون:

يمكن تصنيف الهياكل الدهنية بناءً على الخصائص الفيزيائية في درجة حرارة الغرفة (الزيوت سائلة والدهون صلبة)، أو قطبيتها (دهون قطبية ومحايدة)، أو ضرورتها للبشر (الأحماض الدهنية الأساسية وغير الأساسية)، أو بنيتها (بسيطة أو مركبة). تشمل الدهون المحايدة الأحماض الدهنية والكحوليات والجليسيريدات والستيرولات، بينما تشمل الدهون القطبية الجليسيروفوسفوليبيد

والجليسيروغليكووليبيدات. يعتبر الفصل إلى فئات القطبية تعسفيًا إلى حد ما، حيث أن بعض الأحماض الدهنية قصيرة السلسلة قطبية للغاية. وبالتالي، فإن التصنيف القائم على الهيكل هو الأفضل [111]. استنادًا إلى الهيكل، يمكن تصنيف الدهون على أنها مشتقة أو بسيطة أو معقدة. تشمل الدهون المشتقة على الأحماض الدهنية والكحول، وهي اللبنة الأساسية للدهون البسيطة والمعقدة. تشمل الدهون البسيطة، المكونة من الأحماض الدهنية ومكونات الكحول، على أسيل جلسرين، إيثر أسيل جليسيرول، ستيرول، وإستراتها وإسترات الشمع. بشكل عام، يمكن أن تتحلل الدهون البسيطة إلى مكونين مختلفين، عادة ما يكون الكحول والحمض. تشمل الدهون المعقدة الفوسفوليبيدات (الجليسيروفوسفوليبيدات)، الجليكووليبيدات (الجلسروجليكووليبيدات)، والسفينجوليبيد. تنتج هذه الهياكل ثلاثة أو أكثر من المركبات المختلفة عند التحلل المائي [111].

1.2.8.1 الدهون البسيطة:

الدهون الرئيسية البسيطة هي الدهون الثلاثية (المعروفة أيضًا باسم ثلاثي الجلسرين) وإسترات الستيريل وإسترات الشمع. يؤدي التحلل المائي لهذه الدهون على التوالي إلى إنتاج الجلسرين مع الأحماض الدهنية والستيرولات مع الأحماض الدهنية والكحولات الدهنية مع الأحماض الدهنية. وهي المكونات الرئيسية للزيوت والدهون الصالحة للأكل، وغالبا ما تمثل أكثر من 95% من الزيوت المكررة. الدهون الثلاثية هي إسترات الجلسرين كحول ثلاثي الهيدروجين مع ثلاثة أحماض دهنية (الشكل 7.1). تعتمد العديد من خصائص الدهون الثلاثية على مكونات الأحماض الدهنية. وبالتالي، فإن نقطة انصهار ثلاثي الجليسيريد تعكس نقطة انصهار الأحماض الدهنية المكونة، مع وجود ثلاثة أحماض دهنية عالية نقطة الانصهار ينتج عنها دهون ثلاثية عالية الانصهار. عدم التشبع في الأحماض الدهنية يجعل الدهون الثلاثية عرضة للأكسدة، تمامًا مثل الأحماض الدهنية نفسها [111]، [112].



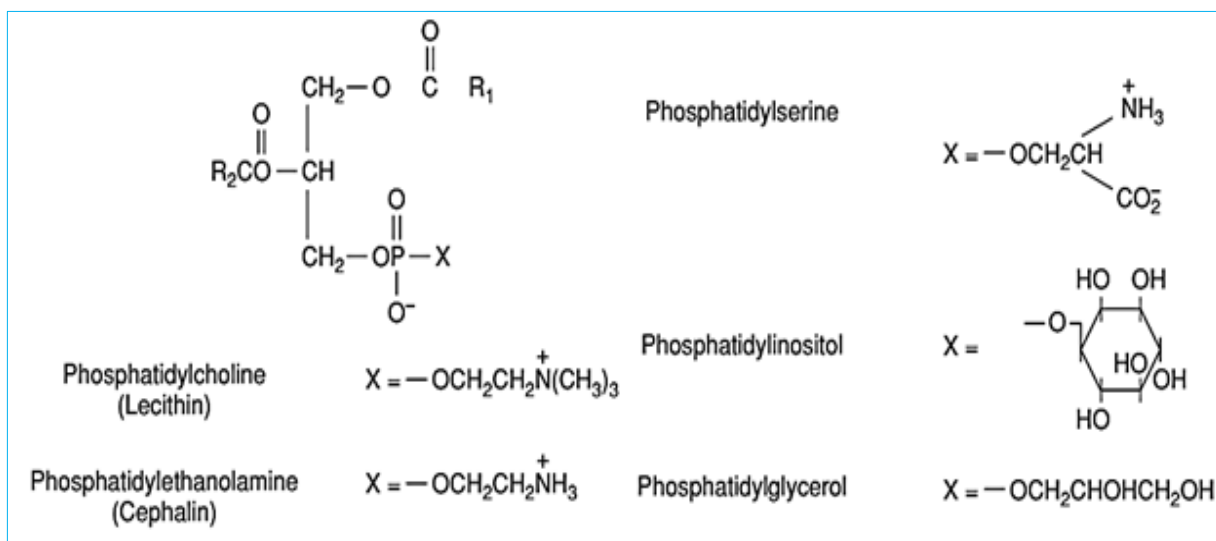
الشكل 7.1. هيكل الدهون الثلاثية [113].

2.2.8.1 الدهون المركبة:

هناك العديد من المركبات في هذه المجموعة. ربما تكون الدهون الفوسفورية هي أهم الدهون المركبة لعلوم الغذاء.

1.2.2.8.1 الفوسفوليبيد:

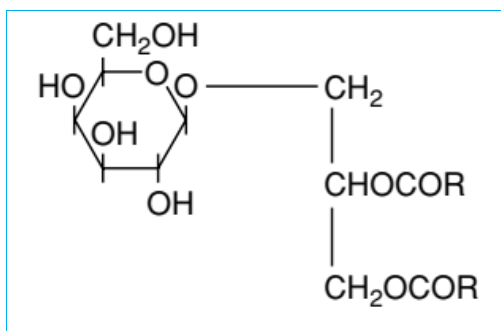
تمثل هذه مجموعة كبيرة ومنتشرة من المركبات. من بين أهمها الفوسفوليبيدات (الشكل 8.1) التي تحتوي على مجموعة الفوسفات كجزء لا يتجزأ من بنيتها. هذا الجزء من الجزيء قطبي للغاية وقابل للذوبان في الماء، في حين أن الجزء الذي يتضمن سلاسل الهيدروكربون الضخمة للأحماض الدهنية غير قطبي وقابل للذوبان في الدهون. نتيجة لذلك، يمكن للفوسفوليبيدات أن تربط بين واجهات الماء الدهني، وترتبط المنطقة القطبية بالمرحلة المائية والباقي مع الدهون أو غيرها من الأوساط غير القطبية. وهكذا، عندما تنتشتت في الماء، فإن جزيئات الفسفوليبيد، التي يمكن اعتبارها هياكل ذات شقين برأس قطبي وذيلان غير قطبيين، تميل إلى تكوين طبقة مزدوجة، مع سلاسل الهيدروكربون الكارهة للماء التي تواجه بعضها البعض، والتجمعات القطبية المحبة للماء تسقط إلى الخارج. تعتبر الخصائص المتأصلة للأجزاء المختلفة من جزيئات الفسفوليبيد ذات أهمية كبيرة فيما يتعلق بالتنظيم الهيكلي لأغشية الخلايا. وهي غير قابلة للذوبان في الماء بشكل عام على الرغم من أنها تشكل مستحلبات بسهولة. وهي أقل قابلية للذوبان في الأسيتون من الدهون الأخرى ويمكن فصلها عنها على هذا الأساس [112].



الشكل 8.1. هيكل الفوسفوليبيد [113].

2.2.2.8.1 الغليسريدات:

تتكون الجلسرينات من جلسرين أحادي وثنائي وثلثي الاستبدال [114]، أشهرها الأحماض الدهنية الثلاثية في الجلسرين، والتي تسمى الدهون الثلاثية. تستخدم كلمة "Triacylglycerol" أحياناً بشكل مترادف مع "Triglyceride". في هذه المركبات، يتم أسترة كل مجموعات الهيدروكسيل الثلاث من الجلسرين، عادةً بواسطة أحماض دهنية مختلفة. لأنها تعمل كمخزن للطاقة [115].



الشكل 9.1. هيكل أحادي الجالاكتوزيل ديجليسيريد
(Monogalactosyldiglyceride) [113].

3.2.2.8.1 الدهون المركبة الأخرى:

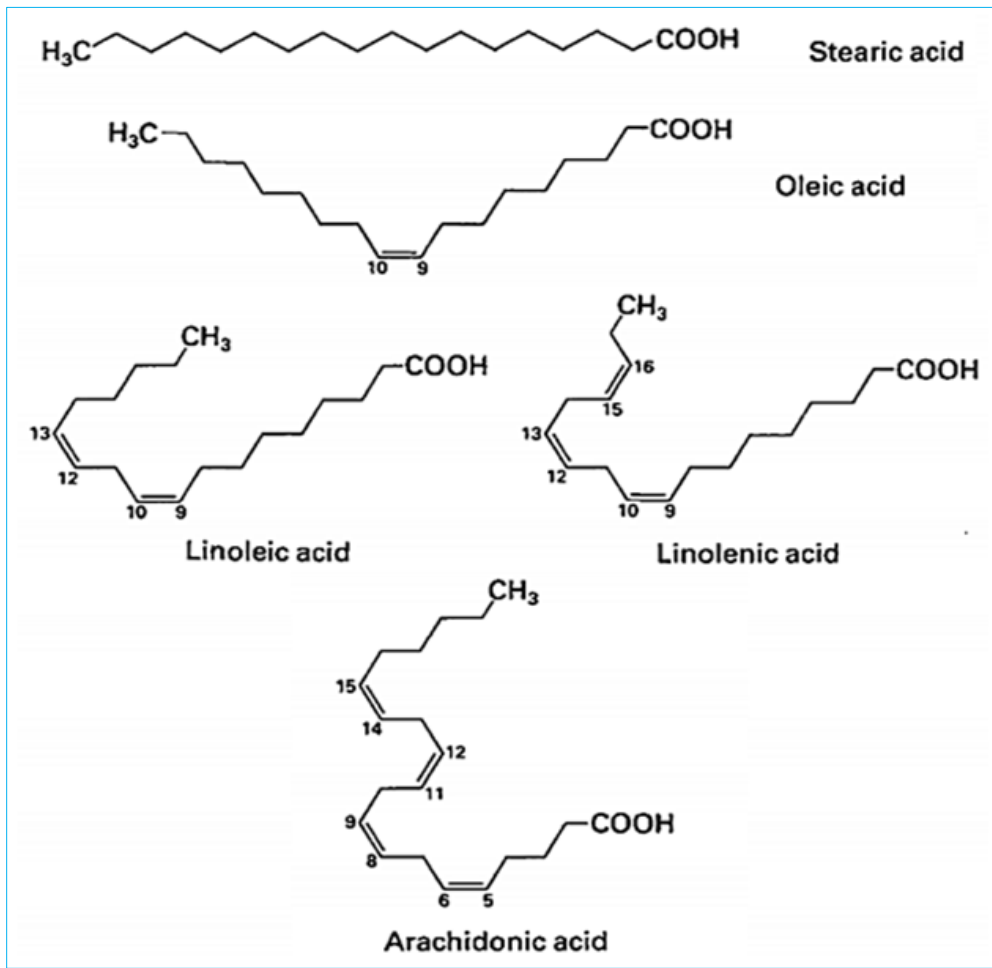
تشتمل الدهون المركبة الأخرى على السفينجوليبيدات أو السفينجومييلين والجليكوليبيدات أو السريبيروسيدات، والتي توجد بشكل رئيسي في الجهاز العصبي. تشكل البلازماوجينات نسبة كبيرة من إجمالي الدهون الفسفورية للعضلات. البروتينات الدهنية عبارة عن معقدات فضفاضة من الدهون والبروتينات حيث يتم تجميع المكونات معًا بواسطة قوى ثانوية بدلاً من الروابط التساهمية. يوجد الكثير من الدهون في بلازما الدم في هذا الشكل، وتتكون أساسًا من الدهون الفوسفورية وإسترات الكوليسترول. من جهة أخرى أن المنشطات تختلف هيكلًا اختلافاً كبيرًا عن الدهون الأخرى، إلا أنها تظهر خصائص ذوبان نموذجية مثل الفسفوليبيد فهي مكونات مهمة للأغشية. لديهم جميعًا بنية حلقيّة مشتركة مشتقة من الفينانثرين [112].

3.2.8.1 الدهون المشتقة:

تشتمل هذه المجموعة من الدهون على مجموعة من المركبات التي تختلف بشكل كبير في بنيتها. تشمل الدهون المشتقة الرئيسية ما يلي: (1) الأحماض الدهنية، (2) الفيتامينات والبروفيتامينات التي تذوب في الدهون، (3) الكحوليات - بما في ذلك الستيرويدات - (4) التربينويد؛ و (5) اثيرات [111].

1.3.2.8.1 الأحماض الدهنية:

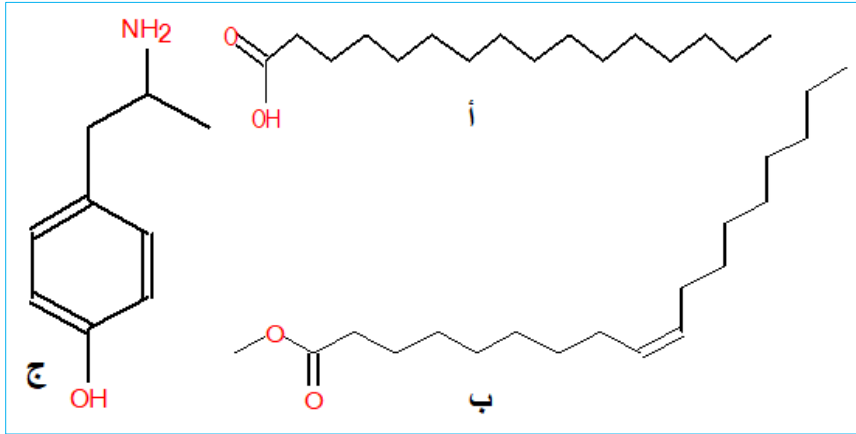
الأحماض الدهنية هي عبارة عن أحماض كربوكسيلية ذات سلسلة أليفاتية. تحتوي هذه الأحماض الدهنية الطبيعية على سلسلة كربون يتراوح طولها عادةً بين 4 و 24 ذرة كربون [116]. قد تكون سلسلة الكربون، مشبعة أو غير مشبعة ويمكن ربطها بمجموعات وظيفية تحتوي على الأكسجين، الهالوجينات، النيتروجين، والكبريت. إذا كان الحمض الدهني يحتوي على رابطة مزدوجة، فهناك احتمال وجود أيزومرية التماكب مقرون-مفروق (Cis-trans isomerism) الهندسية، مما يؤثر بشكل كبير على التكوين الجزيء، وتعتمد الأحماض الدهنية الطبيعية غير المشبعة بشكل عام على تكوين الرابطة الأيزومرية للتماكب مفروق (cis) التي تميل إلى ثني سلسلة الهيدروكربون وبالتالي تميّع طبقات الدهون الثنائية عن طريق خفض درجة حرارة انصهارها [117]. تعتبر الأحماض الدهنية المكون الأساسي لزيتون النباتية الشكل 10.



الشكل 10.1. الاحماض الدهنية المشبعة وغير المشبعة الموجودة طبيعياً [113].

9.1 هيكل المركبات الهامة التي تشكل زيت بذور ج. كركاس:

المكون الأساسي لزيت بذور ج. كركاس هو الدهون الثلاثية. الرابطة المزدوجة وسلسلة من 18 كربون تشكل جزيء الدهون الثلاثية [118]. تهتم الكيمياء بشكل أساسي بالوظائف العضوية الشائعة بما في ذلك مجموعات الكربوكسيل ومجموعات الهيدروكسيل وعدم التشبع (الشكل 10) [119]، [120]. تسمح المجموعة الكربوكسيلية في جزيء زيت بذور ج. كركاس بإنتاج مجموعة متنوعة من منتجات الأسترة. يمكن أسيتيل مجموعة الهيدروكسيل (OH-) الموجودة في الكربون الثاني عشر أو حذفها عن طريق إجراء تجفيف لزيادة عدم التشبع وتوليد زيت شبه جاف [121]، [122]. يمكن استخدام الاندماج الكاوية والانحلال الحراري بدرجة حرارة عالية لفصل الموقع التفاعلي لمجموعة الهيدروكسيل، مما ينتج عنه جزيئات مفيدة ذات سلاسل أقصر [119]. علاوة على ذلك، تعمل مجموعة الهيدروكسيل على تقوية الهيكل، مما يقلل من إنتاج الهيدروبيروكسيد [123]. تعتبر عملية الكربوكسيل والإيبوكسيد والهدرجة جميعها طرقاً لتغيير الرابطة المزدوجة في بنية [124]. أخيراً، يمكن تغيير نقطة عدم التشبع المفردة من خلال الإيبوكسيد والهدرجة [118].



الشكل 11.1. هيكل أهم المركبات التي يتكون منها زيت بذور الجاتروفا كركاس. (أ) يشير إلى المجموعات الكربوكسيلية؛ (ب) يشير إلى الروابط المزدوجة. (ج) يشير إلى مجموعات الهيدروكسيل.

10.1 الخاتمة:

توضح الدراسة في هذا الفصل إمكانات الاستخلاص الفعال للدهون والعائد المرتفع الامران اللذان يمثلان الصعوبات الحيوية في المعالجة النهائية في استغلال الزيوت النباتية وخاصة صناعة الوقود الحيوي. في الوقت الحاضر، تُستخدم طرق الاستخلاص بالمذيبات بشكل شائع لاستخلاص الزيوت لأنها توفر أعلى إنتاجية. استخدام الطرق الميكانيكية، على الرغم من أنها صديقة للبيئة ورخيصة، إلا أنها ليست خيارًا حكيماً بسبب ضعف المحصول واحتمال تحلل الدهون أو الزيوت. تبدو الطرق الخالية من المذيبات واعدة على نطاق المختبر في الوقت الحاضر، ويجب إجراء المزيد من الأبحاث لتقليل استخدام المذيبات للتسويق على نطاق واسع. يمكن أن تكون الطريقة الواعدة لاستخراج الزيوت بكفاءة وفعالية هي استخدام طرق تجميعية مثل طرق الاستخراج الأنزيمية والميكانيكية والمذيبات. على سبيل المثال، الطرق الخالية من المذيبات مثل التحلل الإنزيمي عند دمجها مع طرق أخرى ستقلل من استخدام المذيبات واستهلاك الطاقة وتزيد أيضاً من كفاءة المحصول. من أجل التسويق التجاري الناجح والإنتاج الفعال من حيث التكلفة، يجب معالجة المشكلة المذكورة أعلاه بشكل شامل، ويمكن تحقيق هذا الهدف من خلال جهود البحث والتطوير المستمرة من قبل الأوساط الأكاديمية ومؤسسات البحث والصناعات.

من جهة أخرى المواد النشطة بيولوجياً الموجودة في الزيوت (الدهون) بصفة عامة وزيت بذور الجاتروفا كركاس بصفة خاصة، مثل البوليفينول، فيتوستيرول، وتوكوفيرول، لها خصائص مضادة للالتهابات ومضادة للأكسدة، والتي قد تساعد على إطالة العمر الافتراضي للزيت. يرجع استقرار زيت بذور ج. كركاس إلى انخفاض حموضته.

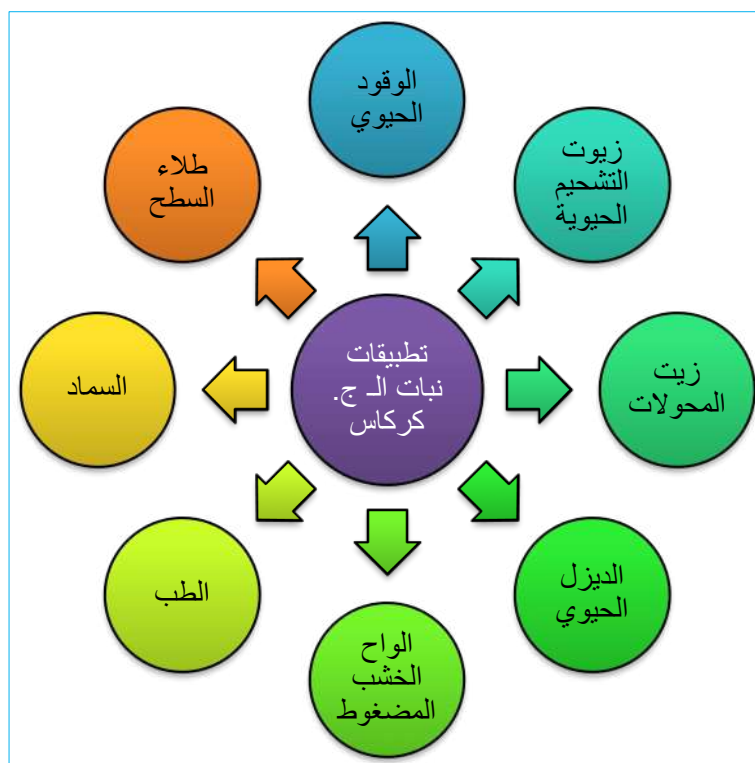
الفصل الثاني:

التطبيقات الحديثة "المستدامة" لنباتة

(*Jatropha curcas* L.)

الجatroفا كركاس لين. (*Jatropha curcas* Linn.) شجرة متعددة الأغراض. مصدر بديل للحصول على وقود الديزل الحيوي وتغذية الإنسان والحيوان وإنتاج الأسمدة والطب التقليدي. لذلك يستخدم الـ ج. كركاس لـ. تقليديا لعلاج الالتهابات البكتيرية والفطرية أو للأمراض مع نوبات الحمى وآلام العضلات أو اليرقان. كما أنها تستخدم للحصول على عقاقير جديدة من خلال تحديد المكونات النشطة، والتي تسمح بالقضاء على مسببات الأمراض أو تثبيط علامات وأعراض الأمراض البشرية والبيطرية [125].

نظرا للأهمية الكيميائية والتطبيقات البيولوجية والصيدلانية والصناعية (الشكل 1.2) للـ ج. كركاس لـ. تم في هذا الفصل إجراء مراجعة شاملة ومحدثة على تحقيقات مختلفة، مما سمح بتحديد الجوانب الأكثر صلة بالمركبات الكيميائية الرئيسية الموجودة في كل جزء من أجزاء الـ ج. كركاس لـ. وبالمثل، تم تحديد الاستخدامات البيولوجية، والمنفعة الطبية، والسمية والأهمية الصناعية للـ ج. كركاس لـ.



شكل 1.2: مخطط توضيحي للتطبيقات التي يمكن استغلالها لنبات الـ ج. كركاس.

2 التطبيقات الحديثة " والمستدامة " لنبات الـ ج. كركاس (*Jatropha curcas* L):

1.2 الأهمية الكيميائية:

تقوم النباتات والكائنات الحية عموماً بتجميع مركبات مختلفة لعملها (المستقلبات الأولية) مثل الأحماض الأمينية والكربوهيدرات والدهون والجليسيريد والأحماض النووية والمركبات التي تتدخل في تفاعلاتها البيئية مع البيئة (المستقلبات الثانوية) مثل التربين والمركبات الفينولات والجليكوسيدات والقلويدات. تؤدي هذه المستقلبات وظائف دفاعية ضد الحيوانات المفترسة ومسببات الأمراض. أدت معرفة

ودراسة وفائدة هذه المستقبلات إلى تطوير الكيمياء النباتية من خلال دمج تقنيات جديدة لاستخراج وتنقية وتحديد الجزيئات النشطة بيولوجيًا، كماد خام لتصنيع المستحضرات الصيدلانية ومستحضرات التجميل والمغذيات والمنتجات الزراعية.

2.2 التطبيقات البيولوجية:

1.2.2 الطب والتجميل:

يوصل الطب التقليدي توفير التغطية الصحية لأكثر من 80% من سكان العالم، ولا سيما في البلدان النامية [126]. في أفريقيا، يعد استخدام المنتجات الطبيعية لعلاج الأمراض المختلفة هو الخيار الرئيسي للسكان. وبالمثل، كان المعالجون التقليديون هم مقدمي الرعاية الصحية الأولية [127]، [128].

جميع أجزاء الـ ج. كركاس بما في ذلك البذور والأوراق واللحاء، طازجة أو مغلية، تستخدم في الطب التقليدي والشعبي والأغراض البيطرية لفترة طويلة [129]. أظهرت إحدى المواد الكيميائية النباتية (Curcacycline A) المعزولة من الـ ج. كركاس نشاطاً مضاداً للأورام [130]. يمكن استخدام زيت البذور لعلاج الأكزيما والأمراض الجلدية وتسكين الآلام الروماتيزمية [31]. يستخدم محتوى حمض اللينوليك في زيت نواة الـ ج. كركاس للعناية بالبشرة. ذكر غوناسكيريا (Goonasekera) وآخرون [131] أن مستخلصات المذيبات المختلفة من الـ ج. كركاس لها تأثير غير فعال، لأن الزيت يحتوي على مفعول مسهل قوي، كما أنه يستخدم على نطاق واسع لأمراض الجلد وتسكين الآلام، مثل تلك الناجمة عن الروماتيزم. تم العثور على مادة اللاتكس نفسها لتكون مثبتاً قوياً لفيروس موزايك البطيخ [132]. تستخدم الأوراق واللاتكس في التئام الجروح والقروح المقاومة للحرارة واللثة الإنتانية كمقبض في الجروح والكدمات. أظهر التحقيق في نشاط التخرثر أن لاتكس الـ ج. كركاس الكامل يقلل بشكل كبير من وقت تخرثر الدم البشري. يحتوي أيضاً لاتكس الـ ج. كركاس على العديد من القلويات مثل جاتروفين وجاتروفام وكوركين بخصائص مضادة للسرطان [133]. تم الإبلاغ عن إنزيم محلل للبروتين (كركين Curcain) له نشاط في التئام الجروح في الفئران [105]. مسحوق جذور الـ ج. كركاس في شكل معجون يستخدم لعلاج الالتهابات [132]. موانزا وآخرون [134] ذكروا أن مستخلص الميثانوليك من أوراق الـ ج. كركاس يحمي الخلية اللمفاوية البشرية المستزرعة ضد تأثير اعتلال خلوي لفيروس نقص المناعة البشرية. تم أيضاً الإبلاغ عن أن مستخلص الميثانوليك من أوراق الـ ج. كركاس يحتوي على حاصرات بيتا (beta-blockers)، والتي لها تأثير محتمل في القلب والأوعية الدموية لدى البشر [135]. أبلغ بالاجي (Balaji) وآخرون [136] عن النشاط الكبدي لمستخلص الميثانولي من أوراق الـ ج. كركاس على الأفلاتوكسين b1 الناجم عن سرطان الكبد. تم الإبلاغ عن أن Jatrophone (أو كما يسمى diterpenoid)، والذي تم استخلاصه من أجزاء مختلفة من الـ ج. كركاس، مع تفاعل الثيول البيولوجي (تثبيط نشاط الورم)، ونشاط مضاد لسرطان الدم، ضد سرطان الدم الليمفاوي P-388، ضد السمية الخلوية وضد استنبات خلايا KB، والنشاط

مضاد للحساسية [137]، [138]، [139]. قام شاتورفيدى (Chaturvedi) [140] بفحص النشاط المضاد للميكروبات لرباعي ميثيل بيرازين (pyrazine)، وهو قلويد أميد مستخلص من أوراق الـ ج. كركاس ضد خمسة أنواع من البكتيريا المسببة للأمراض البشرية.

2.2.2 مكافحة الآفات:

تعتبر ج. كركاس من الأنواع النباتية المفيدة في مكافحة الآفات من خلال استخدام المواد الفعالة التي تم الحصول عليها من أجزاء مختلفة منها والتي يمكن أن تتحكم بكفاءة في الفطريات والطفيليات والكائنات الأخرى التي تؤثر على نمو وإنتاج المحاصيل ذات الأهمية الاقتصادية. يمثل استبدال مبيدات الآفات الاصطناعية بمواد نباتية بديلاً قابلاً للتطبيق لأنها غير مكلفة وتتحلل بسرعة وعلى الرغم من كونها سامة، إلا أنها لا تترك آثاراً طويلة الأمد؛ ومع ذلك، يجب استخدامها بنفس الحذر مثل مبيدات الآفات الكيميائية. تعتمد تفاعلات نبات الـ ج. كركاس إلى الفطريات على وجود مادة مضادة للفطريات بآلية دفاعية تحث على جعل جدران الخلايا تفرز الغازات. كانت تفاعلات الحشرات النباتية هي الأكثر دراسة وتم تحديد المستقلبات المختلفة التي تعمل كمبيدات حشرية، تليها المواد النباتية التي تتحكم في النيماتودا وغيرها التي يمكنها مكافحة العث والبزاقات والجرذان [141]، [142]. تم توضيح أنشطة مبيدات الرخويات والمبيدات الحشرية ومبيدات الفطريات ومبيد للنيماتودا لإسترات الفربول (phorbol) من هذا النبات في التجارب المعملية والتجارب الميدانية [30] [143]. تم الإبلاغ على نشاط الزيت المستخلص كمبيد حشري فعال ضد آفات السوسة والذباب المنزلي، والتحكم في دودة لوز القطن وحفار ساق الذرة الرفيعة [92]. جميع أجزاء الـ ج. كركاس تظهر خصائص المبيدات ضد الحشرات والآفات مثل دودة القطن، وآفات البقول والبطاطا والذرة [40]. تم التعرف على زيت الـ ج. كركاس على أنه فعال في السيطرة على الجرب القارمي في الأغنام عندما يقترن بحمض الأسكوربيك [144].

3.2.2 المعالجة الحيوية (التربة):

تم استخدام الـ ج. كركاس في عمليات المعالجة النباتية للتربة الملوثة أساساً بزيوت التشحيم المستخدمة في السيارات. يوفر المصنع بديلاً مربحاً ومجدياً بيئياً لاستصلاح التربة. لاختبار تأثير الـ ج. كركاس على المعالجة النباتية للتربة، أجريت دراسة في التربة الملوثة بالهيدروكربونات، مع ملاحظة انخفاضها بين 89 و96%؛ تضمنت التجربة أيضاً تحليل منطقة الجذور، مما سمح بإثبات أن آلية تحلل النفط كانت بشكل أساسي من خلال التحلل الجزئي؛ يفسر ذلك وجود العديد من الكائنات الحية الدقيقة ذات النشاط الأيضي المتأثر بجذر النبات. وخلصت الدراسة إلى أن لدى الـ ج. كركاس إمكانات كبيرة في استعادة التربة الملوثة بالهيدروكربونات [145]. وقد تم إثبات قدرة المعالجة النباتية للـ ج. كركاس ضد المعادن الثقيلة باستخدام النباتات المزروعة في تربة الحقائق الخصبة، في وجود وغياب المواد الكيميائية المخيلية. مثل

إيثيلين ديامين رباعي حمض الخليك (EDTA¹)، ثنائي إيثيلين ثلاثي أمين حمض الخليك (DTPA²)، حامض الستريك، حمض المالك، تشكل معقدات أكثر قابلية للذوبان مع أيونات المعادن، وتسهل امتصاصها [146]. من بين هذه العناصر، كان EDTA هو العامل المخلب الأكثر استخدامًا في دراسات المعالجة النباتية نظرًا لكفاءته العالية في استخراج العديد من المعادن [147]. حسنت هذه المادة امتصاص العناصر الخمسة (Mn، Cu، Cr، Al، Fe) التي تم تقييمها؛ يشير تأثير تراكم المعادن إلى أن EDTA عند 0.3 غ/كغ كانت أكثر وضوحًا من EDTA عند 0.1 غ/كغ؛ يحسن الامتصاص في 1.17% في الجذر و0.62% في الساق و86% في الأوراق. تشير هذه النتائج إلى أن الـ ج. كركاس لديها القدرة على تحليل المعادن الثقيلة دون إضعاف نمو النبات [148].

3.2 التطبيقات الصناعية

1.3.2 زيوت التشحيم الحيوية

في تجربة زيت الـ ج. كركاس الحيوي، تم مزج مادة التشحيم SAE 40 مع 0%، 20%، 30%، 40%، و50% من حجم زيت الـ ج. كركاس. تم استخدام مواد التشحيم الحيوية القائمة على زيت الـ ج. كركاس لتزيت مسامير الألمنيوم وقرص الكاستيرون (cast-iron disc). باستخدام مقياس اللزوجة ومحلل الزيوت المتعددة، أظهر الباحثون أن 10 في المائة من زيوت التشحيم الحيوي من زيت الـ ج. كركاس ينتج أقل تآكل ويولد أقل قدر من الحرارة مقارنة بالعينات الأخرى، في حين أن مستويات التلوث التي تزيد عن 10 في المائة تزيد بدرجة كبيرة من درجة حرارة التآكل والتشحيم [8]، [149].

2.3.2 زيت المحولات

نظرًا لأنه ثبت أن زيت الـ ج. كركاس يفي بمعايير ASTM D وقابل للتحلل البيولوجي وآمن للبيئة نظرًا لانخفاض محتواه الحمضي، يمكن استخدامه بدلاً من زيت المحولات العادي. هذا صحيح بشكل خاص في المناطق الحساسة بيئيًا، حيث يمكن أن تعرض الانسكابات أو التسريبات الحياة البحرية للخطر [150]، [151].

3.3.2 طلاء الاسطح

تعتبر البلمرة من أهم العمليات الصناعية. الراتنجات والمستحلب نوعان رئيسيان من البوليمر. راتنجات الألكيد هي إلى حد بعيد أهم فئة من راتنجات الطلاء. تشير التقديرات إلى أن راتنجات الألكيد تساهم بحوالي 70% في الروابط التقليدية المستخدمة في طلاء الأسطح اليوم. اجتذبت الراتنجات المتحجرة

¹ DTPA :Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid

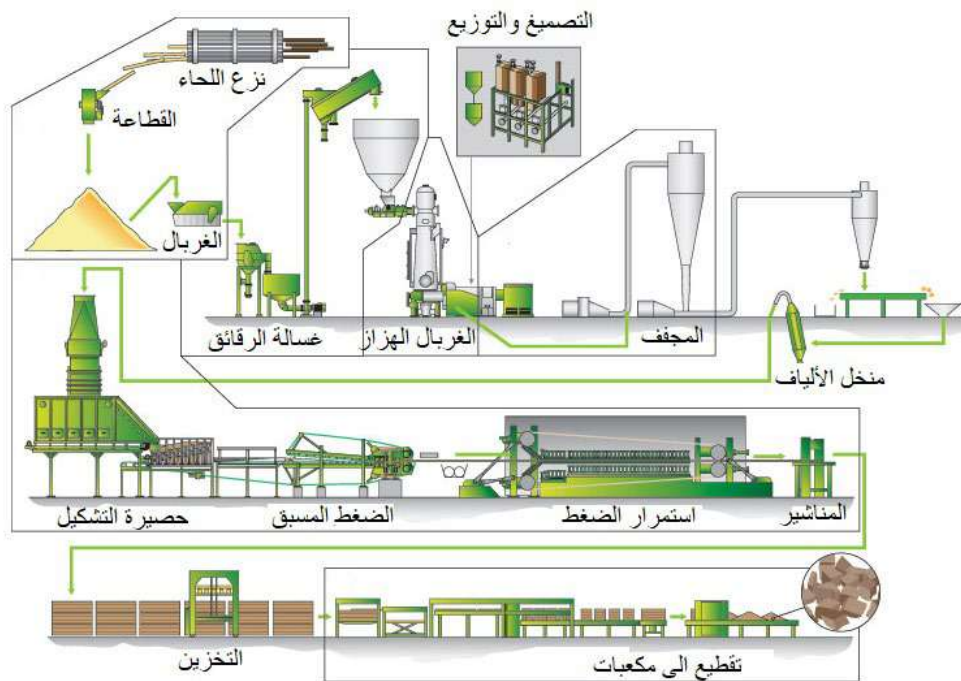
² DTPA :Diethylene Triamine Pentaacetic Acid

اهتمامًا كبيرًا في العقود القليلة الماضية منذ أن أصبحت المساهمة المهمة التي يمكن أن تقدمها للزيوت الخام معروفة [152].

في ماليزيا، تم إنتاج زيت الـج. كركاس من مصادر متجددة رخيصة نسبيًا لإنتاج الديزل الحيوي. تعتبر الـج. كركاس ثالث أكبر محصول زراعي. تتكون قشرة بذور الجاتروفا من الكربون المنشط، ويستخدم زيت البذور في الطلاء والمواد اللاصقة. تعتمد الطلاءات المصنوعة من الجاتروفا على بروتينات بذورها وراتنج الألكيد [153]. يحتوي زيت بذور الـج. كركاس على علكة ذات خصائص لاصقة محسنة. يستخدم زيت الجاتروفا الإيبوكسيدي (EJO) بدون إزالة الصمغ كزيت خام. تم تصنيع أوليغومرات الجاتروفا القابلة للمعالجة بالأشعة فوق البنفسجية عن طريق الأكريل الجزئي لزيوت الإيبوكسي. يمكن أيضًا تحضير أوليغومرات البولي يوريثان القابلة للمعالجة بالأشعة فوق البنفسجية عن طريق المعالجة الهيدروكسيلية الجزئية للزيوت أولاً عن طريق الأسترة ثم إجراء عمليات الأيزوسيانات والأكريلة لتحضير الطلاءات والتحقق من أداء المعالجة بالأشعة فوق البنفسجية [154].

4.3.2 صناعة الألواح الحبيبية غير اللاصقة واللّب وصناعة الورق

في كل من البلدان المتقدمة والنامية، تعد صناعة اللّب والورق من أهم القطاعات الاقتصادية. يعتبر جاتروفا كركاس من أكثر مصادر ألياف صناعة الورق وفرة بسبب وجود العديد من المركبات (اللجنين والمستخلصات). علاوة على ذلك، فإن وجود المونومرات التشخيصية داخل جاتروفا كركاس أكد وجود اللجنين، وهو منتج ثانوي من صناعة الورق والألواح الحبيبية (الشكل 2.2). غير اللاصقة التي تعد أحد المصادر الرئيسية لصناعة الورق وألياف ألواح الجسيمات غير اللاصقة [155]، [156].



الشكل 2.2. عملية صنع ألواح ليفية متوسطة الكثافة [157].

4.2 تطبيقات في مجال الطاقات المتجددة

يعتبر الطاقة المتجددة هي تلك التي تستهلك موارد الطاقة الأولية التي لا تخضع للنضوب. تشمل أمثلة التقنيات المتجددة السابقة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية والكتلة الحيوية، هي موارد دائمة لا تتعرض لخطر التوافر على المدى الطويل. يجب إدارة بعض الموارد الطبيعية المتجددة مثل الطاقة الحرارية الأرضية والمياه العذبة والأخشاب والكتلة الحيوية بعناية لتجنب تجاوز قدرة البيئة على تجديدها. يوفر تقييم دورة الحياة وسيلة منهجية لتقييم التجديد. المصطلح له دلالة على استدامة البيئة الطبيعية. البنزين والفحم والغاز الطبيعي والديزل والسلع الأخرى المشتقة من الوقود الأحفوري غير قابلة للتجديد. على عكس الوقود الأحفوري، يمكن أن يكون لموارد الطاقات المتجددة عائد مستدام [158].

1.4.2 الكتلة الحية:

يعرّف مكتب الولايات المتحدة لكفاءة الطاقة والطاقة المتجددة (EERE³) الكتلة الحيوية على أنها "مورد طاقة مشتق من مادة عضوية" [159]. تُعرّف منظمة الأغذية والزراعة (FAO) الكتلة الحيوية بأنها "مادة ذات أصل بيولوجي باستثناء المواد المضمنة في التكوينات الجيولوجية والتي تتحول إلى أحفوري" [160]. ويُعرّف أنجو داهية (Anju Dahiya) [161] الكتلة الحيوية على أنها "مواد بيولوجية حية مؤخرًا ومخلفات حيوانية".

الطاقة الحيوية، تُستخدم لإنتاج الوقود والحرارة، والكهرباء، وتمتاز بأنها آمنة على البيئة والإنسان، ومتجددة باستمرار، وترفع مستوى اقتصاد البلاد، ومن أهم مصادرها: نفايات المحاصيل الزراعية، مخلفات الغابات بعد قطع الأشجار، النباتات التلقائية (كالجatroفا مثلا)، الطحالب الدقيقة، نفايات الأخشاب، ... الخ. لذلك فإن استخدام الكتلة الحيوية المستدامة كمصدر للطاقة المتجددة بديلاً قابلاً للتطبيق لتكاليف الطاقة القائمة على الوقود الأحفوري والاحتباس الحراري. تنتج الكتلة الحيوية النباتية أيضاً مجموعة من المنتجات المشتركة، لا يزال العديد منها غير معروف. تحدد تقنيات إنتاج الوقود الحيوي واستخلاص المنتجات المشتركة، بالإضافة إلى مصدر الكتلة الحيوية، أنواع المنتجات المشتركة المنتجة [162]، [9]. إن أي كتلة حيوية قابلة للتحويل للحالة السائلة تُسمى الوقود الحيوي (Biofuels)، وهذا الوقود له أنواع عدة.

1.1.4.2 الوقود الحيوي:

1.1.1.4.2 تعريف الوقود الحيوي:

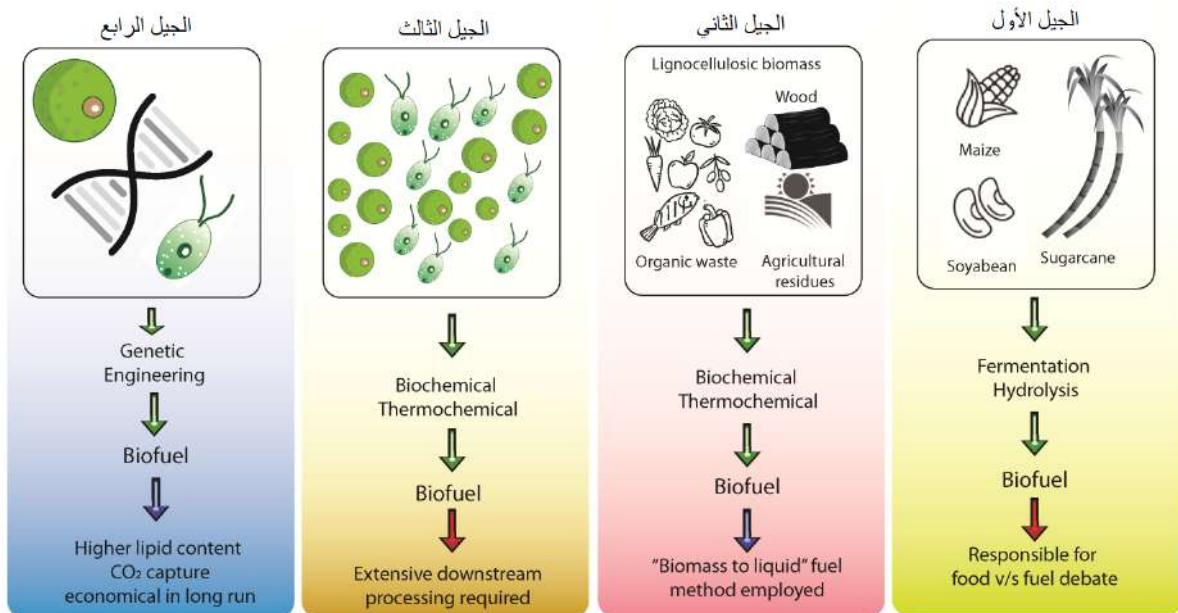
يعرّف EERE مصطلح الوقود الحيوي على أنه "الكتلة الحيوية المحولة إلى وقود سائل أو غازي مثل الإيثانول والميثانول والميثان والهيدروجين" [159]. بينما تُعرّف منظمة الأغذية والزراعة (FAO) الوقود الحيوي على أنه "الوقود المنتج بشكل مباشر أو غير مباشر من الكتلة الحيوية" [160]. يستخدم

³ EERE :Energy Efficiency and Renewable Energy

الوقود الحيوي على نطاق واسع لمعالجة أنواع مختلفة من الوقود المشتق من المواد الحية، مثل الإيثانول والديزل الحيوي، الغاز الحيوي. "

2.1.1.4.2 أجيال الوقود الحيوي:

يصنف الوقود الحيوي الي عدة اجيال على النحو التالي الشكل 3.2.:



الشكل 3.2. يمثل أجيال الوقود الحيوي [57].

♣ الجيل الأول للوقود الحيوي:

يتم إنتاج الوقود الحيوي في الجيل الأول من الزيوت والسكريات والنشويات الناتجة عن المحاصيل الغذائية [161].

♣ الجيل الثاني للوقود الحيوي:

الوقود الحيوي من الجيل الثاني هو المصطلح المخصص لأنواع الوقود الحيوي بما في ذلك الإيثانول الحيوي والديزل الحيوي المنتج من المواد غير الغذائية كمواد وسيطة. في نهاية المطاف، لن يكون لهذه الأنواع من الوقود الحيوي منافسة أو منافسة على الأقل مع المحاصيل الغذائية، وسيتم زراعة بقايا المحاصيل والأنواع النباتية الأخرى غير المحصولية حصرياً لإنتاج الطاقة الحيوية [161]، [163].

♣ الجيل الثالث للوقود الحيوي:

يتم إنتاج الوقود الحيوي في الجيل الثالث من الطحالب التي يمكنها إنتاج عوائد مضاعفة أضعاف [161] والبكتيريا الزرقاء [164]، [165].

♣ الجيل الرابع للوقود الحيوي:

يتم إنتاج الوقود الحيوي في الجيل الرابع وعلى سبيل المثال، الهيدروجين الحيوي والكهرباء الحيوية باستخدام آليات التمثيل الضوئي [164]، [165].

3.1.1.4.2 أنواع الوقود الحيوي:

تستخدم بقايا النباتات، وخاصة الأجزاء ذات المحتوى العالي من الدهون، لإنتاج أنواع مختلفة من الوقود الحيوي مثل الغاز الحيوي، الديزل الحيوي، الهيدروجين الحيوي، والإيثانول والميثانول الحيويين.

1.3.1.1.4.2 الغاز الحيوي (biogas):

يعتبر الغاز الحيوي أو الميثانول الحيوي (Biomethane) أحد أكثر عوامل الجذب شيوعاً لتحويل واستخدامات الطاقة النظيفة وإنتاج الوقود الحيوي. إن وجود السليلوز، والهيميسليلوز، والدهون، والبروتين، والكاربوهيدرات يعطي المخلفات الزراعية إمكانية استكشافها كمحصول للطاقة وإنتاج الوقود الأخضر. كلما زادت محتويات الدهون، زاد الميل إلى إنتاج الميثان (محتوى طاقة أعلى)، مقارنةً بمكونات الكاربوهيدرات والبروتينات، باعتبارها مصدرًا للطاقة الكامنة. على الرغم من أن إنتاج الميثان قد تم اعتباره ممكنًا وتم تنفيذه بنجاح على مر السنين، إلا أن التحقيق في إثبات مخلفات الحيوانات هو مادة أولية أكثر ملاءمة لإنتاج الغاز الحيوي. ويرجع ذلك إلى ارتفاع نسبة الرطوبة والمحتوى العضوي وانخفاض نسبة الكربون إلى النيتروجين (C: N)، مما يؤدي إلى سهولة تخمير المواد الخام (روث الحيوانات) [166]، [167].

ومع ذلك، فإن إنتاج الغاز الحيوي من خلال التوليد المشترك، بما في ذلك النفايات الحيوانية (الروث) والكتل الحيوية، قد أظهر عائدًا ممتازًا في إنتاج الوقود الحيوي، مقارنةً بقشور الفاكهة ونباتات الحبوب الأخرى عالية السليلوز. يعتبر وجود النيتروجين في فضلات الحيوانات عاملاً أساسياً، مع محتوى السكر في بقايا النبات/الفاكهة، وبالتالي تعزيز أنشطة البكتيريا التي تسهل العملية اللاهوائية. تم بنجاح عرض مزيج من النفايات القائمة على النيتروجين مع نفايات النبات الفاكهة [168].

2.3.1.1.4.2 الإيثانول والبيوتانول

يتم تخمير السكريات (بشكل رئيسي من قصب السكر) والحبوب النشوية المهضومة إلى الإيثانول والبيوتانول كبديل للبنزين. يُعرف تخمير الإيثانول لاستعماله في المشروبات الكحولية منذ عصور ما قبل التاريخ، ولكن من الصعب الاعتماد عليه كبنزين لأن له قيمة أقل من السرعات الحرارية كوقود للسيارات من البيوتانول. تم البحث عن تخمير البيوتانول للحبوب وتسويقه خلال الحرب العالمية الأولى، عن طريق عزل البكتيريا كلوستريديوم أسيتوبوتيليكوم (CA^4) والتي كانت فعالة في إنتاج عوائد عالية من البيوتانول

⁴ CA :Clostridium acetobutylicum

والأسيون، مما يؤدي إلى صناعة كاملة تعتمد على هذا التخمر [169]، [170]. من ناحية أخرى يتفوق البيوتانول من حيث الرغبة في استخدامه، بدلاً من وقود الديزل الحيوي [171]، [172].

3.3.1.1.4.2 الهيدروجين الحيوي:

الهيدروجين الحيوي هو وقود طاقة نظيف ينتج من تحويل الموارد الزراعية القابلة للتحلل بسهولة. إنه شكل من أشكال الطاقة الخضراء، ولكل جزيء من الهيدروجين طاقة عالية كافية تسمح باستخدامه كوقود، وبالتالي ينتج سائل (ماء) بعد الاحتراق [173]. جلب اكتشاف وتطوير تكنولوجيا الهيدروجين أملاً جديداً لتوسيع الطاقة المتجددة لتنظيم تأثيرات الاحتباس الحراري، الناتجة عن التلوث الناجم عن حرق الوقود الأحفوري [174]. تتطلب العمليات المتضمنة في إنتاج الهيدروجين الحيوي مركبات عضوية قابلة للتحلل الحيوي، تُستخدم كركيزة أثناء عملية التحويل الذاتي التغذية. في مثل هذه الحالة، يلزم استخدام كائنات معينة (الطحالب، والطلائعيات، وغيرها من الميكروبات وحيدة الخلية) التي يمكن أن تسهل تحويل طاقة الشمس إلى الهيدروجين مباشرة. أيضاً، يمكن أن تكون عملية التحويل غير المتجانسة، التي تتضمن تحطيم محتويات الكربوهيدرات في المواد الأولية للككتلة الحيوية (المواد الخام)، في وجود اللاهوائيات من خلال عملية التحويل التخمرية المظلمة، كخيار آخر [175].

من المفهوم أن عملية إنتاج الهيدروجين الحيوي تتبع سلسلة معقدة من الأنشطة وتقتصر على الطبيعة غير المتجانسة للركيزة المستخدمة، سواء كانت ذات بنية معقدة وتمنع الأنشطة الميكروبية (التحلل المائي) أم لا. تمت المعالجة المسبقة لساق الذرة لإنتاج الهيدروجين الحيوي، والذي يبدو أنه يزيد المحصول في كل من المعالجة الحمضية والقلوية، مقارنةً بالمواد الأولية للمعالجة الأخرى المستخدمة [176]، [177].

تجدر الإشارة إلى أنه في ظل الظروف العادية، يمكن أن تؤثر متطلبات درجة الحرارة التشغيلية للتشغيل اللاهوائي، إلى جانب ظروف المعالجة الفيزيائية والكيميائية الضرورية، على إنتاج الهيدروجين الحيوي من فضلات الحيوانات/السماط الطبيعي، بينما في عملية التوليد المشترك، يتم الجمع بين الماشية (الغنية في النترات والكربوهيدرات) ومخلفات المحاصيل ستؤدي إلى إنتاج أعلى للهيدروجين الحيوي [178]. ومن ثم، فإن الأنواع الواسعة من المحاصيل الزراعية، والجيل الثاني من المحاصيل التي تحتوي على نسبة عالية من الكربوهيدرات/السكر البسيط، ومخلفات الأغذية الصناعية الزراعية (مصل اللبن للتخمير أو نفايات إنتاج الجبن) هي موارد محتملة لتوليد عائدات الهيدروجين الحيوي المربحة [179]، [180].

4.3.1.1.4.2 الديزل الحيوي:

يعتبر إنتاج وقود الديزل الحيوي أكثر ملاءمة كبديل للطاقة نظراً لمصادره الواسعة المتاحة (المواد الأولية). قد تختلف أنواع المواد الأولية للديزل الحيوي من بلد إلى آخر وتعتمد بشكل كبير على تربيتها

والمواقع الجغرافية [181]، [182]. تم تحديد أكثر من 350 محصولاً من المحاصيل الزيتية، من بينها فقط فول الصويا والنخيل وزيت دوار الشمس وزيت بذور القطن وبذور اللفت والفول السوداني التي تعتبر وقوداً بديلاً محتملاً [183]، [184]. لكن في ماليزيا، يعتبر زيت النخيل المادة الخام الرئيسية لإنتاج الديزل الحيوي [185].

تم العثور على الـ ج. كركاس غير الصالحة للأكل كمصدر محتمل للديزل الحيوي (الشكل 4.2). تتمتع مستخلصات زيت بذور الـ ج. كركاس بخصائص فيزيائية كيميائية جيدة. يمكن أن تستفيد المواد الأولية للديزل الحيوي والتطبيقات الصناعية الأخرى من ارتفاع تركيز الأحماض الدهنية الأحادية غير المشبعة [40]، [162]، [186]. تم دراسة بذور الـ ج. كركاس على نطاق واسع كمصدر للزيت. والتي تحتوي بذورها على 25-35% من الزيت الخام [187]، [188]. يحتوي الزيت على 21% من الأحماض الدهنية المشبعة و79% من الأحماض الدهنية غير المشبعة [187] [92]. يتمتع زيت الـ ج. كركاس بصفات جيدة من المواد الأولية لإنتاج الديزل الحيوي، وهو الذي يفي بمعايير الاتحاد الأوروبي وأمريكا الشمالية [187]، [188]. بدأ عدد من البلدان، بما في ذلك الهند، باكستان، الصين، المكسيك، البرازيل، نيجيريا، إندونيسيا، مدغشقر، مالي، تايلاند، غانا، بنغلاديش، كينيا، الرأس الأخضر وبلدان أخرى، مبرمجين زراعة الـ ج. كركاس كمحطة للطاقة [189].



الشكل 4.2. رسم تخطيطي لتوضيح دورة الديزل الحيوي [190].

5.2 استخدامات أخرى:

من المثير للاهتمام ملاحظة أن محتوى الطاقة للأجزاء المتبقية من نبتة الـ ج. كركاس بما فيها الكعكة بعد استخلاص الزيت يتجاوز محتوى الطاقة الزيت نفسه.

1.5.2 خصائص واستخدامات كعكة البذور

بمجرد استخلاص الزيت، يبقى حوالي 50 في المائة من وزن البذور الأصلي كمخلفات لكعكة البذور، وبشكل أساسي على شكل بروتين وكربوهيدرات. تعتمد كمية الزيت المتبقية في كعكة البذور على عملية الاستخراج. هناك مقايضات لكعكة البذرة. يمكن استخدامه كسماد أو وقود أو إذا تم إزالة السموم منه أو في حالة استخدام أنواع غير سامة، فيمكن استخدامه كعلف للحيوانات. ومع ذلك، فمن المهم أن عدم إعادة كعكة البذور إلى المزرعة كسماد يقلل من فائدة الـ ج. كركاس في تحسين الأراضي المتدهورة.

♣ علف الماشية

كعكة بذور الـ ج. كركاس غنية بالبروتين - 58.1 في المائة من حيث الوزن مقارنة بنسبة 48 في المائة من وجبة فول الصويا - وستكون مكملًا غذائيًا قيمًا لبروتين الماشية إذا لم يكن بسبب سميتها. حاليًا، إزالة السموم ليست مجدية تجاريًا. يمكن أن يؤدي استخدام أصناف غير سامة من المكسيك إلى زيادة استخدام هذا المنتج الثانوي الذي يحتمل أن يكون ذا قيمة، ولكن حتى هذه الأصناف قد تحتاج إلى علاج لتجنب المشكلات الإكلينيكية الفرعية التي يمكن أن تنشأ مع التغذية طويلة الأمد لكعكة بذور الجاتروفا للماشية [106].

♣ سماد عضوي

تصنع كعكة بذور الجاتروفا سمادًا عضويًا ممتازًا يحتوي على نسبة عالية من النيتروجين مماثلة أو أفضل من فضلات الدجاج. يظهر تكوينها من المغذيات الكبيرة في الجدول 1.2.

الجدول 1.2. محتويات كعكة بذور الجاتروفا

المصدر	% Mg	% Ca	% K	% P	% N
[30]	1.4-1.3	0.7-0.6	1.7-0.9	3.0-2.1	6.5-4.4
[191]	/	/	1.4-0.8	1.2-0.65	4.5-3.0
[192]	0.68	0.31	1.75	0.9	4.91

كسماد عضوي، يمكن أن تقدم كعكة البذور مساهمة قيمة في متطلبات المغذيات الدقيقة. يقدم الجدول 2.2 تحليلًا لمحتوى المغذيات الدقيقة بواسطة باتوليا (Patolia) وآخرون [191].

الجدول 2.2. المحتوى الدقيق للغاية من كعكة بذور الجاتروفا [191].

Cu ملغ/كغ	Zn ملغ/كغ	Mn ملغ/كغ	Fe ملغ/كغ	S%
25-18	50-30	500-300	1000-800	0.35-0.2

♣ استخدام قشور الفاكهة وقشور البذور:

يمكن استخدام قشور فاكهة الـ ج. كركاس وقشور البذور للاحتراق المباشر. نظرًا لأن الأصداف تشكل حوالي 35-40 في المائة من الفاكهة الكاملة من حيث الوزن ولها قيمة حرارية تقترب من قيمة حطب الوقود، فقد تكون منتجًا ثانويًا مفيدًا لإنتاج زيت الـ ج. كركاس. كما هو مبين في الجدول 3.2، فإن القيم الحرارية لبروسوبيس جوليفلورا (نوع من حطب الوقود في المناطق شبه القاحلة) وقشور فاكهة الـ ج. كركاس متشابهة. ومع ذلك، يلزم أربعة أضعاف حجم قشور الفاكهة لتساوي قيمة تسخين حطب الوقود، نظرًا لكثافتها الظاهرية المنخفضة.

الجدول 3.2. قيمة قشرة فاكهة الـ ج. كركاس وقشور البذور لإنتاج الطاقة [193].

قشور بذور الـ ج. كركاس	قشرة فاكهة الـ ج. كركاس	قوالب الكتلة الحيوية	خشب (بروسوبيس جوليفلورا)	
223.09	106.18	545	407	الكثافة الظاهرية كغ/م ³
3.97	14.88	8.77	1.07	نسبة الرماد %
4044	3762	4130	4018	قيمة السرعات الحرارية كيلو كالوري/كغ

يمكن تجفيف قشور الفاكهة وطحنها إلى مسحوق وتشكيلها في قوالب وقود. وجدت تجربة أن 1 كغ من القوالب استغرق حوالي 35 دقيقة للاحتراق الكامل، مما أعطى درجات حرارة تتراوح بين 525-780 م° [193].

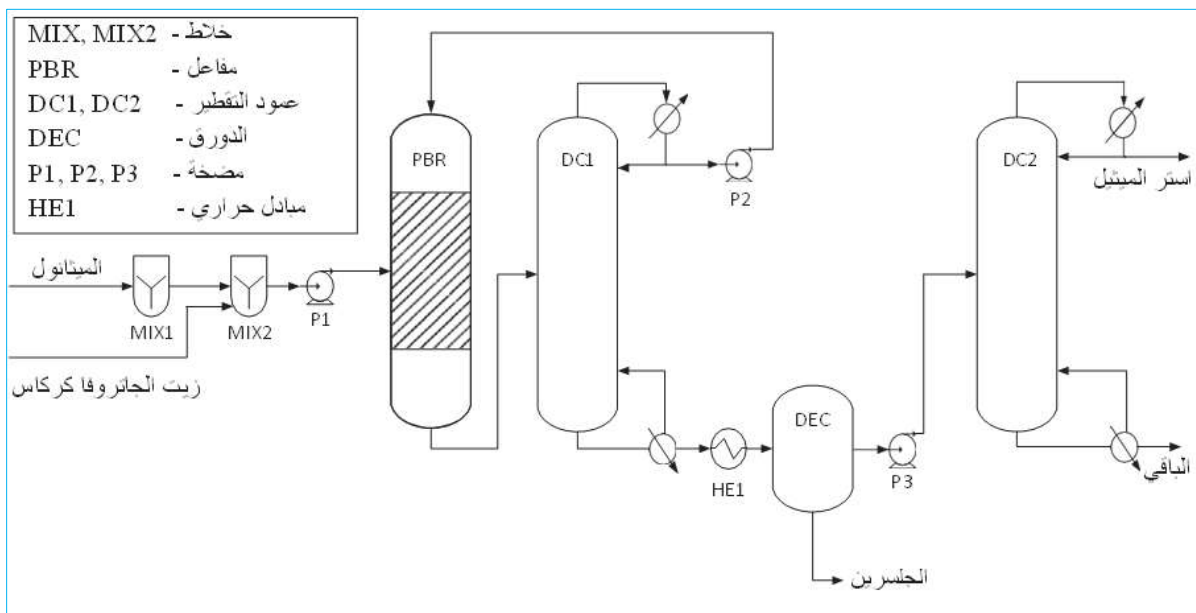
يحتوي الـ ج. كركاس على العديد من القيم الطبية للأغراض البشرية والبيطرية وصناعية كما ذكرنا سلفًا ولديه إمكانات هائلة لاشتقاق عديد القيم للاستخدام في مختلف القطاعات. تم استخدام جميع أجزاء الـ ج. كركاس (البذور والأوراق واللحاء الطازجة أو مغلي) في الطب التقليدي والأغراض البيطرية لفترة طويلة [194]، [195]. يتم إعطاء بعض الاستخدامات الأخرى للـ ج. كركاس في الجدول 4.2.

الجدول 4.2. استخدامات المنتجات التي أساسها من الـ ج. كركاس [189].

جزء النبات	الاستخدامات
لحاء الشجر أو اللاتكس	ينتج صبغة زرقاء داكنة يقال إنها تستخدم في الفلبين لتلوين القماش، وتشطيب الشباك والخطوط. في بعض أجزاء جنوب إفريقيا والفلبين، يستخدم كسم لصيد الأسماك. في نيجيريا، يستخدم صائدو الطيور اللاتكس بخلطه مع الذرة كطعم.
بروتينات الجاتروفا	إنتاج المواد اللاصقة للخشب / الورق - التركيبات اللاصقة للخشب القائمة على البولي كيتون سمد
كعكة بذور الجاتروفا	قوالب لاستخدامها كوقود إنتاج الغاز الحيوي المواد الخام للبلستيك والألياف التركيبية كركيزة لتخمير الحالة الصلبة لإنتاج: البروتياز (proteases)، الليباز (lipases)، والزيلانيز (xylanase). مصدر للسكريات القابلة للتخمير والبروتينات المذابة

6.2 إنتاج الديزل الحيوي

تسمى مخاليط من استرات الميثيل أو الإيثيل للأحماض الدهنية المشتقة من خلال الاسترة التبادلية لثلاثي الجلسرين (TAG^5) الموجودة في الزيوت النباتية بالديزل الحيوي [196]. يتم إنتاج وقود الديزل الحيوي من زيت الـج. كركاس (الشكل 5.2). ان العديد من المتغيرات مثل نوع المحفز ومحتوى الأحماض الدهنية الحرة (FFA^6) ونسبة الكحول المولية من كمية الزيت ودرجة حرارة التفاعل والمحتوى الماء ووقت التفاعل وما إلى ذلك، تظهر تأثيرها على محصول وقود الديزل الحيوي من زيت الـج. كركاس. تتدهور جودة زيت الـج. كركاس الخام تدريجياً عند التعامل غير السليم وظروف التخزين غير المناسبة.



شكل 5.2. عملية إنتاج وقود الديزل الحيوي، كما هو شائع في الصناعة [197].

محتوى الرطوبة لهما تأثيرات كبيرة على الاسترة التبادلية للدهون الثلاثية مع الكحول FFA ومحتوى الرطوبة لهما تأثيرات كبيرة على الاسترة التبادلية للدهون الثلاثية مع الكحول [198]. تزداد نسبة الأحماض الدهنية الحرة بسبب التحلل المائي للدهون الثلاثية للزيت في وجود الرطوبة والأكسدة. يحتوي زيت الـج. كركاس الخام على تركيزات أعلى من الأحماض الدهنية غير المشبعة مثل حمض اللينوليك وحمض الأوليك (الجدول 2.5). [199]. سيؤدي المحتوى العالي من الأحماض الدهنية الحرة ($< 1\%$ وزن/وزن) إلى تكوين الصابون باستخدام محفز قلوي وهذا يجعل عملية الفصل صعبة ويؤدي في النهاية إلى انخفاض إنتاج الديزل الحيوي. تم طرح الاسترة التبادلية المحفزة بالحمض كبديل لهذا [200]؛ العيب الرئيسي لهذا التفاعل البطء الكبير مقارنة بتفاعل المحفز القلوي. وبالتالي، تم اقتراح المعالجة المسبقة المكونة من خطوتين من أجل تقليل مستويات الأحماض الدهنية المرتفعة لزيت الـج. كركاس [199]. تقلل

⁵ TAG :Triacylglycerol

⁶ FFA :Free fatty acids

PBR :Pack Bed Reactor

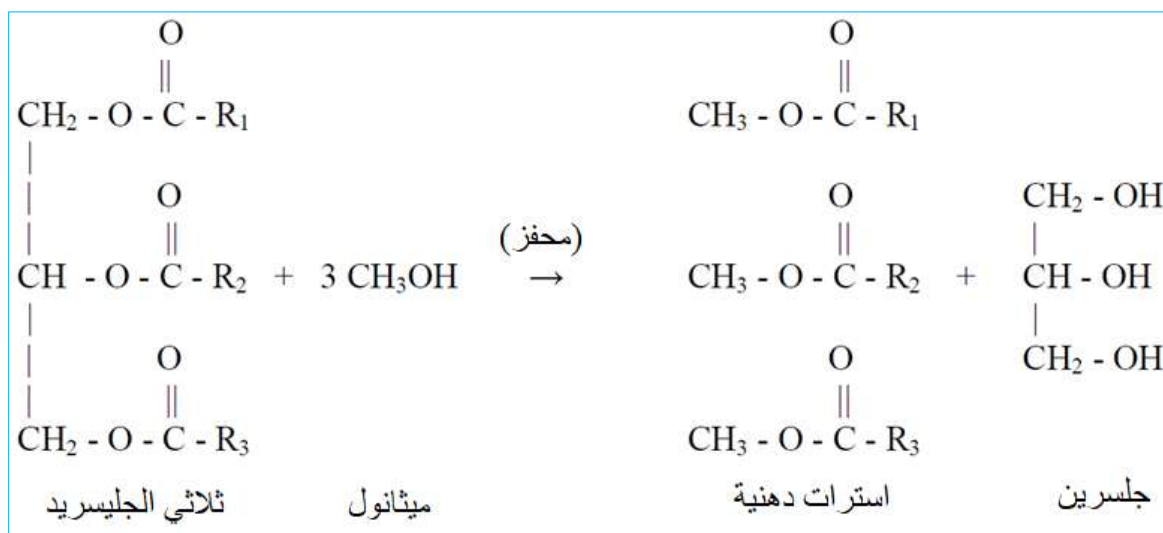
خطوة المعالجة المسبقة من مستوى الأحماض الدهنية الحرة إلى أقل من 1٪، قبل استخدامها مع محفز قلوي، ولكن هذه العملية تستغرق وقتاً طويلاً.

الجدول 5.2. تكوين الأحماض الدهنية لزيت الج. كركاس الخام [199].

الحمض الدهني	الصيغة	الاسم العلمي	بنية	% كتلية
ميريستيك	C14H28O2	Tetradecanoic	14:00	0.1-0
بالميت	C16H32O2	Hexadecanoic	16:00	15.3-14.1
بالميتوليك	C16H30O2	cis-9-Hexadecanoic	16:01	1.3-0
ستاريك	C18H36O2	Octadecanoic	18:00	9.8-3.7
أوليك	C18H34O2	cis-9-Octadecanoic	18:01	45.8-34.3
لينوليك	C18H32O2	cis-9,cis-12-Octadecadienoic	18:02	44.2-29.0
لينولينيك	C18H30O2	Cis-6,cis-9,cis-12-Octadecatrienoic	18:03	0.3-0
أراكيدية	C20H40O2	Eicosanoic	20:00	0.3-0
بهيني	C22H44O2	Docosanoic	22:00	0.2-0

1.6.2 تفاعلات الاسترة التبادلية:

الطريقة المستخدمة بشكل شائع لإنتاج وقود الديزل الحيوي هي الاسترة التبادلية للزيوت النباتية مع الميثانول، باستخدام المواد المحفزة القلوية أو الحمضية أو الإنزيمية (الشكل 6.2). وهي تفاعل الدهون الثلاثية مع الكحوليات لتوليد، على سبيل المثال، ميثيل أو إيثيل الاستر، والجلسرين كمنتجات ثانوية.



الشكل 6.2. تفاعل التحويل بالاسترة المستخدمة لإنتاج إسترات الديزل الحيوي [46].

تستخدم معظم العمليات التجارية لإنتاج وقود الديزل الحيوي من الزيوت النباتية محفزات قلوية متجانسة فعالة جداً مثل هيدروكسيد الصوديوم أو ميثوكسيد الصوديوم. يمكن أن توفر هذه المحفزات عوائد من تفاعل الاسترة بالقرب من 99٪ [201]، [202]. ومع ذلك، فإن هذه المركبات القلوية لها بعض العيوب: ضرورة تطبيق الزيوت النباتية المكررة، والمشاكل المتعلقة باستعادة الجلسرين النقي (المنتج الثانوي

الرئيسي)، وتشكيل الصابون، والجليسرول الأحادي والثنائي. علاوة على ذلك، يجب تحييد هذه المركبات، مما يؤدي إلى عدم ظهورها في مياه الصرف الصحي، أو ان أمكن إعادة استخدامها. يجعل تكوين المستحلبات المستقرة فصل استرات الميثيل أمراً صعباً، ويصبح التفاعل شديد الحساسية لوجود الماء وFFA. يمكن حل هذه المشكلات باستخدام محفز استرة غير متجانس [203]، [196]. من المتوقع أن تكون المحفزات غير المتجانسة فعالة في إنتاج وقود الديزل الحيوي بسبب تكلفتها المنخفضة وتأثيرها البيئي الأدنى، وإمكانية تبسيط عملية الإنتاج والتنقية في ظل ظروف معتدلة [204].

1.1.6.2 العوامل المؤثرة في تفاعل الاسترة التبادلية:

يوضح الجدول 6.2. الأعمال المتعلقة بالاسترة التبادلية لزيت الـ ج. كركاس في ظل ظروف مختلفة. يؤثر نوع وكمية المتغيرات مثل الكحول وFFA والنسبة المولية والمحفز ودرجة حرارة التفاعل ووقت التفاعل ومعدل وطريقة التحريك على مردود تفاعل الاسترة التبادلية لزيت الـ ج. كركاس. تتوفر حالياً عمليات مختلفة لاسترة الزيوت النباتية لإنتاج ميثيل استر الـ ج. كركاس. من بينها العلاج التحفيزي المتجانس [199]، [205]، المحفز غير المتجانس [206] أو العلاج بالكحول التحفيزي الإنزيمي [207]، [208]، علاجات الكحول فوق الحرجة [207]، [209] واستخلاص تفاعلي محفز بالليياز في الموقع [210].

2.1.6.2 العائلات الرئيسية للمحفزات:

توجد عدة طرق للمعالجة الديزل الحيوي التي تم تطويرها لإنتاج زيت الجاتروفا نذكر منها: (1) الاسترة التبادلية باستخدام محفز حمضي، (2) الأسترة التبادلية باستخدام محفز قلوي، (3) الاسترة التبادلية باستخدام محفز إنزيم أو المحفز بالليياز في الموقع. يمكن استخدام الليياز من مصادر مختلفة لتحفيز عملية الأسترة عن طريق تثبيتها على دعامة مناسبة. ميزة التثبيت هي أنه يمكن إعادة استخدام الإنزيم دون عملية فصل [211]. يعتمد إنتاج وقود الديزل الحيوي لهذه الطرق على عدة عوامل، مثل درجة حرارة التفاعل، والنسبة المولية للكحول إلى الزيت، والمحفز، ووقت التفاعل، ووجود الرطوبة وFFA، وكثافة الخلط [1]، [212].

1.2.1.6.2 طريقة المحفز الحمضي:

تتكون تقنية محفز الحمض من خمس طرق رئيسية، وهي (1) الميثانول [213]، [214]، (2) كبريتات الحديدك [215]، (3) حمض السلفونيك [216]، (4) الميثانول كلوريد الهيدروجين [217]، (ت) وثلاثي فلوريد البورون الميثانولي [218]. ومع ذلك، يُفضل حمض الكبريتيك وحمض الهيدروكلوريك وحمض السلفونيك عادةً كمحفزات في الأسترة التبادلية. يتم أولاً إذابة المحفز في ميثانول (كحول) وخلطه جيداً عن طريق التقليب في مفاعل. بعد ذلك، يتم نقل وقود الديزل الحيوي، الذي سيتم استراتته عبر الأسترة،

إلى المفاعل ويضاف الخليط (كحول ومحفز) إلى الزيت. توفر أحماض السلفونيك والكبريتيك إنتاجية عالية جداً من استرات الألكيل، على الرغم من أن معدل التفاعل بطيء، ويشار إليه عادةً باسم أحماض برونستيد. ومع ذلك، فإن كمية الكحول في الخليط تؤثر على تكوين استرات الألكيل. إن الكميات الزائدة من الكحول أثناء عملية الاسترة تجعل استعادة الجلسرين أمراً صعباً. يؤدي هذا إلى استنتاج مفاده أن نسبة الزيت والكحول يجب أن يتم تحديدها وتحديدها تجريبياً لكل عملية استرة [219].

الجدول 6.2. إنتاج وقود الديزل الحيوي للـ ج. كركاس في ظروف مختلفة [220].

الرقم	الزيت	الكحول	النسبة المولية (الكحول/الزيت)	المحفز	T [°م]	المدة	التحريك	المردود [%]
1	FFA % 1.27-0.29	الميثانول	1 : 4.50	1.5% KOH وزن	60	30 د	التحريك	92%
		الإيثانول	1.14 : 6.9		75	90 د	التحريك	88.4%
3	FFA 3.09%	الميثانول	20 % وزن	1% NaOH وزن	60	90 د	التحريك	98%
4		الميثانول	20 % حجم/حجم	HCl 1%	60	42 د	التحريك	
				NaOH 0.5%	60	30 د	التحريك	
5		الأسيتات إيثيل	نسبة أسيتات الإيثيل إلى النسبة المولية للزيت 1 : 11	10% من نوفوزيم 435 (ليياز ب مبيضات أنتاركتيكا)	50	12 سا	150 د/الدقيقة	91.3%
6		بروبان - 2- أول	1 : 04	30% وزن من نوفوزيم 435 (ليياز ب من مبيضات أنتاركتيكا، مثبت على راتينج أكريليك كبير المسام)	50	8 سا	150 د/الدقيقة	92.8%
7		الميثانول	النسبة المولية لميثانول/زيت 1 : 9	1.5% CaO	70	2.5 سا	التحريك	93%
8	4.62% محتوى الماء	أسيتات الميثيل	نسبة المذيب / البذور 1 : 7.5	30% وزن من نوفوزيم 435 (ليياز ب من مبيضات أنتاركتيكا ، مثبت على راتينج أكريليك كبير المسام)	50	36 سا	180	86.1%
		إيثيل الأسيتات					د/الدقيقة	87.2%
9		الميثانول	1 : 03	KOH/NaOH (1 وزن % من الزيت)		2-4 سا	التحريك	
10	FFA 2.71%	الإيثانول	1 : 04	بسيودوموناس سيباسيا لياز مثبت على سيليت (Pseudomonas cepacia) lipase immobilized on (celite)	50	8 سا	200 د/الدقيقة	98%
11	FFA 14%	الميثانول	0.28 حجم/حجم	1.43 % H2SO4 حجم/حجم KOH (القيمة الحمضية 3.5- 1 وزن/الحجم)	60	88 د	التحريك	> 99%
		الميثانول	0.16 حجم/حجم		60	24 د	التحريك	
12	FFA 14.9%	الميثانول	70 % وزن	3.3% NaOH وزن	65	2 سا	400 د/الدقيقة	55%
		الميثانول	06 % وزن	1% H2SO4 وزن	50	1 سا		90%
		الميثانول	24 % وزن	1.4% NaOH وزن	50	2 سا		
13	زيت الج. كركاس الخام	الميثانول	1 : 50		300	40 د		82.5%
		الإيثانول						85%
14	زيت الج. كركاس الخام	الميثانول	1 : 24	0.8 wt-0/00 0.8 % وزن	250	28 د	400 د/الدقيقة	90.5%
17	زيت مبيض مزال الرائحة	الميثانول	1 : 09	3.3% NaOCH3 وزن	45	30 د	300 د/الدقيقة	96.29%
		الإيثانول						45 د

2.2.1.6.2 الطريقة المحفز القلوي:

في هذه التقنية، يتم إذابة المحفز، الذي يكون في هذه الحالة KOH أو NaOH، أولاً في الكحول (ميثانول) كما في الطريقة السابقة عن طريق التقليب القوي في مفاعل لمدة ساعتين عند 340 كلفن (67 م°) تحت الضغط المحيط. تنتج هذه العملية مستويين من السوائل على مرحلتين - استر وجلسرين - كلاهما في شكل خام. الاسترة القلوية المحفزة أسرع من طريقة محفز التفاعل الحمضي. ينتج التفاعل الأول للقاعدة مع الكحول ألكوكسيدات ومحفز بروتونات. يشكل هذا التفاعل إستر ألكيل مع دهون ثنائية مقابلة من تفاعل أليف النواة على الألكوكسيدات في مجموعة الكربونيل المتولدة من وسيط رباعي السطوح. تصبح الديجليسيريدات والأحادية الجليسيريد استرات ألكيل والجلسرين من خلال نفس عملية التفاعل التي تمت مناقشتها سابقاً. تعطي القلويات المعدنية الألكوكسيدات إنتاجية عالية جداً < 98% كمحفزات في معدل تفاعل قصير يبلغ 30 دقيقة [6]. هذا صحيح بشكل خاص عند تطبيقه في بعض التركيزات المولية المنخفضة بنسبة 0.5 مول % . يجب أن نتذكر أنه لكي يعملوا بشكل فعال، فإنهم يحتاجون أو يتطلبون عدم وجود الماء [221].

3.2.1.6.2 محفز الانزيم غير المتجانسة:

طريقة التحفيز الحيوي للاسترة التبادلية لها تصنيفان رئيسيان: الليباز خارج الخلية والليباز داخل الخلايا. الليباز خارج الخلية هو من مرق الكائنات الحية الدقيقة المنتجة الحية ومن ثم يتم تنقيته ويتضمن إنزيمات معززة من الكائنات الدقيقة مثل *Mucor miehei* و *R. Oryzae* و *C. Antarctica* و *P. cepacia*. يبقى الليباز داخل الخلايا أو في جدران الخلية المنتجة بسبب عدم حركة الإنزيمات [222]. تتمتع الأسترة الانتقالية بالمحفز الحيوي بالعديد من المزايا على طريقة التحويل الكيميائي. على سبيل المثال، إنتاج صفر من المنتجات الثانوية، وصعوبة أقل في إزالة المنتجات النهائية من المفاعل. التحويل مع الدهون الثلاثية يطلق الجلسرين كمنتج ثانوي. في التفاعلات الأنزيمية، ينتج الجلسرين بدرجة نقاء عالية بحيث يمكن استخدامه للوقود المتجدد والمواد الكيميائية. المزايا الأخرى هي درجة حرارة المعالجة المنخفضة من 35-45 درجة مئوية والتي تسمح بإعادة تدوير المحفزات، وبالتالي تقليل تكلفة الإنتاج بشكل كبير، مما يعزز الاستدامة [219].

7.2 الخصائص الفيزيوكيميائية للديزل الحيوي:

يمكن تعريف خصائص وقود الديزل الحيوي من حيث الخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل الكثافة واللزوجة وقيمة اليود وقيمة الحموضة (مذكورة في الفصل الأول (1.6.1)، (2.6.1)، (3.6.1) و(4.6.1) على التوالي نظراً لأهميتها لزيت) ومحتوى الماء ورقم السيتان ونقطة الوميض ومحتوى الكبريت والسعة

الحرارية وبقايا الكربون ... الخ. هذه الخصائص الفيزيائية والكيميائية سنتطرق لها في هذا الفصل لان لها أهمية بالغة بالنسبة للديزل الحيوي.

1.7.2 محتوى الماء:

السبب الرئيسي لقياس محتوى الماء في وقود الديزل الحيوي هو التحديد الدقيق للحجم الصافي للوقود الفعلي الموجود في العينة [1]. هناك العديد من الطرق المستخدمة لتحديد محتوى الماء في عينة الوقود، مثل التقطير والتبخير والزيلين وطرق المعايرة بالتحليل الحجمي بطريقة Karl Fischer. على سبيل المثال، تعتمد طريقة التبخر على قياس كتلة الماء في عينة كتلة معروفة قبل التبخر وبعد التبخر [223].

الجدول 7.2. الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي الجاتروفا [205].

الخاصية	طريقة الاختبار	المجال	طريقة الاختبار	المجال	جاتروفا ميثيل استر
نقطة الوميض [م°]	ASTM 6751	الأدنى 130	IS 15607	الأدنى 120	163
اللزوجة عند 40 م° [cSt]	ASTM 6751	6.0-1.9	IS 15607	6.0-2.5	4.40
الرماد الكبريتي [% الكتلة]	D-874	الأقصى 0.02	IS 15607	الأقصى 0.02	0.002
الكبريت [% كتلة]	D-5453	الأقصى 0.05	ASTM D5453	الأقصى 0.05	0.004
تآكل النحاس	D-130	الأقصى 3	IS 15607	الأقصى 1	1
رقم سيتان	D-613	الأدنى 47	IS 15607	الأدنى 51	57.1
الماء والرواسب [% حجم]	D-2709	الأقصى 0.05	D-2709	الأقصى 0.05	0.05
قيمة الحمض [ملغ/KOH/غ]	D-664	الأقصى 0.80	IS 15607	الأقصى 0.50	0.48
الجلسرين الحر [% كتلة]	D-6584	الأقصى 0.02	D-6584	الأقصى 0.02	0.01
إجمالي الجلسرين [% الكتلة]	D-6584	الأقصى 0.24	D-6584	الأقصى 0.25	0.02
الفوسفور [% الكتلة]	D-4951	الأقصى 0.001	D-4951	> 0.001	> 0.001
درجة حرارة التقطير [م°]	D-1160	90% at 360	Not under spec.	90%	90%

إن وجود الماء في وقود الديزل الحيوي، والذي يتكون أثناء عملية الإنتاج والنقل والتخزين [224]، يطرح العديد من المشاكل مثل التلف الشديد لمعدات حقن الوقود وتآكل صهاريج التخزين [225]. يتم تصنيف الماء في وقود الديزل الحيوي إلى شكلين رئيسيين: الماء القابل للذوبان، والذي يعتمد على تكوين درجة حرارة الوقود، والماء الحر، والذي يؤدي إلى التآكل. ومع ذلك، بالنظر إلى أن وقود الديزل الحيوي مسبب للرطوبة إلى حد كبير بطبيعته، تؤدي فترات التخزين الطويلة إلى زيادة محتوى الماء القابل للذوبان في عينة وقود الديزل الحيوي [226]، [227]. على الرغم من أن معرفة محتوى الماء في وقود الديزل

الحيوي أمر مهم، يجب التأكيد على أن إزالة الماء عملية صعبة في عينة معينة. المعايير المعترف بها دوليًا والمستخدمة لتوجيه قياسات وحدود المحتوى الرطوبة (الماء) هي كما يلي: EN 14214 و EN ISO 12937 و ASTM D6751، يجب ألا يتجاوز محتوى الماء المسموح به 500 جزء في المليون [228].

2.7.2 رقم السيتان:

رقم السيتان (CN) هو واحد من الخصائص الأساسية والمهمة لوقود الديزل الحيوي. الاحتراق هو المرحلة النهائية من دورة الحياة في المحرك. لذلك، فإن رقم السيتان هو أحد الخصائص الرئيسية التي تؤثر على الكفاءة والمنتجات الثانوية الأخرى لعملية الاحتراق في المحرك. على الرغم من أنه بلا وحدة، إلا أنه المؤشر الأساسي لجودة الوقود وسلوك الاشتعال لأي وقود معين. لقد لوحظ أن الوقود الذي يحتوي على رقم عالي من السيتان يوفر وقتًا أقصر لتأخير الاشتعال (الوقت بين الحقن وبداية الاشتعال) والعكس بالعكس. في عملية الاحتراق، يُفضل إجراء الدراسات والتجارب على أنواع الوقود ذات تأخير الاشتعال الأقصر مقارنةً بالوقود ذي فترات التأخير الأطول في الاشتعال [219].

تم تطوير عدد من معايير لقياس رقم السيتان دوليًا للمساعدة في توحيد أرقام وقود السيتان. على سبيل المثال، تم تطوير ASTM D613 [229] في الولايات المتحدة الأمريكية، بينما طورت المنظمة الدولية للقياس الموحد (ISO) ISO 5165 (ISO). تم تطوير ASTM D975 [222] للديزل البترولي ويتطلب رقم السيتان 40. يتطلب معيار رقم السيتان الأوروبي EN 590 [230] حدًا أدنى لعدد السيتان يبلغ 51 بينما بالنسبة للديزل الحيوي، تحدد جميع الهيئات القياسية عددًا أدنى من السيتان يبلغ 47 في ASTM 6751 و 51 كحد أدنى للديزل الحيوي في EN 14214 [219].

3.7.2 نقطة الوميض:

نقطة الوميض هي أدنى درجة حرارة يتسبب فيها مصدر الاشتعال المطبق في اشتعال أبخرة العينة، إنها إحدى خصائص الوقود الأساسية التي تميز سلامة وقود الديزل الحيوي في التخزين والنقل [80]. تعمل مواصفات نقطة الوميض لوقود الديزل الحيوي على تقييد كمية الكحول في وقود الديزل الحيوي. الطرق الموصوفة، وكلاهما يستخدم اختبار نقطة الوميض ذات الكوب المغلق، هي ASTM D93 في ASTM 7467D و ISO 3679 و EN 14214 وتقييد الميثانول بحد أقصى يبلغ 0.1% تقريبًا في وقود الديزل الحيوي. أحد عيوب تحديد نقطة الوميض هو الحاجة إلى كمية كبيرة من العينة (حوالي 70-75 مل من أجل ASTM D93) [231].

4.7.2 محتوى الكبريت:

في عام 2006، أصدرت وكالة حماية البيئة (EPA⁷) الأمريكية قرارًا بتخفيض مستوى الكبريت في وقود الديزل على الطرق السريعة. وقد انتقل الوقود من الديزل منخفض الكبريت (LSD⁸) بمستوى كبريت أقصى يبلغ 500 جزء في المليون إلى ديزل يحتوي على نسبة كبريت منخفضة للغاية (ULSD⁹) عند 15 جزء في المليون، يجب أن يتوافق وقود الديزل الحيوي ومخاليطه مع الديزل الأحفوري أيضًا مع هذا التفويض [232]. للتأكد من أن وقود الديزل المباع في المضخة يفي أيضًا بالمعيار، فقد فرضت مصافي الديزل معيارًا أكثر صرامة لخفض الكبريت أقل بكثير من 15 جزء في المليون، حتى أقل من 3 ~ 4 جزء في المليون، بسبب مخاوف من التلوث المحتمل بين بوابة المصفاة ومضخات البيع بالتجزئة [233]. نظرًا لاستخدام وقود الديزل الحيوي بشكل متكرر كوقود للنقل، يجب أن يفي بنفس معيار الكبريت. تحت مواصفات الديزل الحيوي للمعيارين ASTM D6751 و EN14214، المقابلة لحد الكبريت البالغ 15 جزء في المليون و10 جزء في المليون على التوالي [231].

5.7.2 السعة الحرارية:

هذه هي كمية الحرارة المنبعثة أثناء الاحتراق عند حرق وحدة الوقود. يؤثر على خصائص الاحتراق والكفاءة الحرارية ومعدل استهلاك الوقود. يمكن تحديد مقياس القيمة الحرارية للوقود الحيوي من خلال DIN 51900-1 ويعتمد على محتوى الأحماض الدهنية ووجود الهيدروجين والأكسجين ومياه الكربون. كلما ارتفعت القيمة الحرارية، كلما كان الوقود أقل رغبة، ومع وجود غالبية الوقود الحيوي قيم أقل بسبب ارتفاع محتوى الأكسجين، ثبت أن الكحول أكثر رغبة مقارنة بالوقود الأحفوري الغازي [234]. ومع ذلك، فإن المزالق الرئيسية بسبب انخفاض القيمة الحرارية هي الامتزاج، وعدم الاستقرار، وضعف ميل التشحيم، والتي يمكن تحسينها من خلال استخدام المواد المضافة [235]. عموماً يتضمن الوقود فكرة أن المادة التي تخضع لتغير فيزيائي وكيميائي في المقابل الإفراج عن كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للقيام بالعمل. وتنقسم أنواع الوقود إلى فئتين [219]:

- الوقود الطبيعي مثل الفحم والبتروول والغاز الطبيعي والكتلة الحيوية والخشب؛ و... الخ.
- الوقود الاصطناعي مثل فحم الكوك الذي هو نتيجة مباشرة للتخليق الكيميائي للمواد عالية الطاقة بما في ذلك الطاقة النووية.

⁷ EPA :Environmental Protection Agency

⁸ LSD :Low Sulphur diesel

⁹ ULSD :Ultra-low Sulphur diesel

6.7.2 بقايا الكربون:

تعتبر بقايا الكربون أحد أهم معايير جودة وقود الديزل الحيوي [236]. بشكل عام، توجد عدة طرق وتعديلات لتحديد بقايا الكربون. يتطلب EN 14214 التعديل بالتقطير السابق (EN ISO 10370) وتحديد بقايا الكربون بنسبة 10٪ من بقايا التقطير بسبب انخفاض حد الاكتشاف وإمكانية المقارنة المباشرة مع وقود الديزل الأحفوري. ومع ذلك، فإن خطوة التقطير هذه تسبب مشاكل [236]، [237]. في حالة هذا العمل، تم استخدام تحديد بقايا الكربون للديزل الحيوي الأصلي بواسطة طريقة الكوب المغلق Conradson بدون التقطير السابق. وبالتالي، تتوافق القيم المقاسة مباشرةً مع معيار وقود الديزل الحيوي الأمريكي ASTM D6751، والقيمة القصوى المسموح بها 0.05 بالوزن٪ ومع معيار الاتحاد الأوروبي EN 14214، القيمة القصوى المسموح بها 0.30٪ بالوزن من بقايا 10٪ بعد التقطير [238].

8.2 استخدام المنتجات الثانوية للديزل الحيوي والمعالجة:

كوسيلة لتقليل تكاليف وقود الديزل الحيوي، تمت دراسة استخدام مصادر الكربون منخفضة التكلفة لجعلها قادرة على المنافسة لبعض الوقت [239]، [240]. كما توفر علاقة التآزر في جميع حالات معالجة النفايات فرصة اقتصادية لتحويل النفايات إلى تدفقات وإيرادات وبالتالي تقليل تكاليف إنتاج وقود الديزل الحيوي [241]. يخلف إنتاج وقود الديزل الحيوي ثلاث نفايات رئيسية هي الجلسرين والميثانول والماء المستخدم في غسل وقود الديزل الحيوي [242]. على سبيل المثال، لكل إنتاج عشرة أجزاء من وقود الديزل الحيوي ينتج جزءًا واحدًا من الجلسرين. لذلك، مع زيادة إنتاج وقود الديزل الحيوي وانخفاض الطلب على الجلسرين الخام، يجب أن تستخدم الخيارات الفعالة والحكيمة لموارد نفايات وقود الديزل الحيوي أمرًا بالغ الأهمية [219].

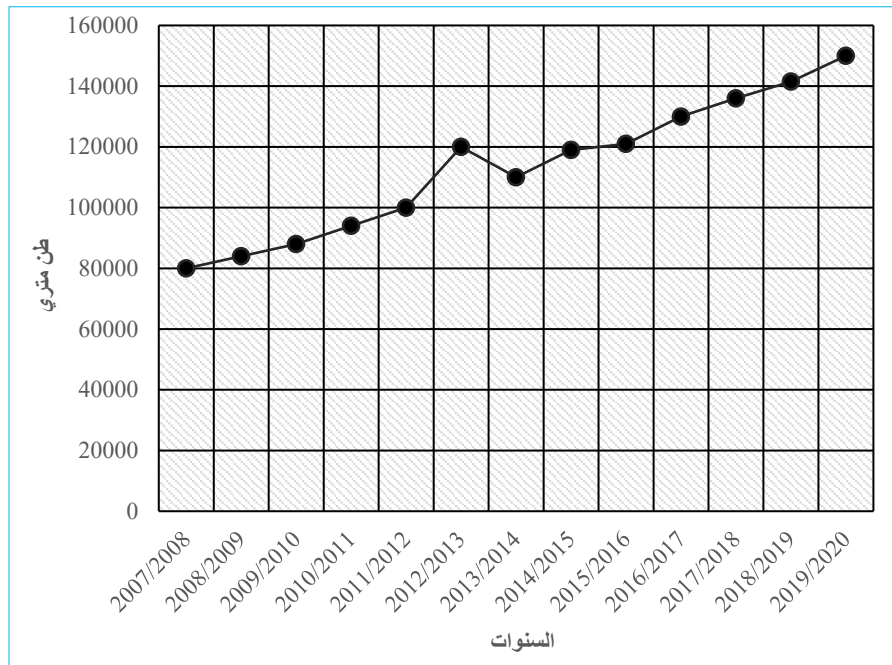
تعتمد طبيعة هذه المركبات والمنتجات الثانوية على نوع المادة الخام وتقنية المعالجة المطبقة. نظرًا لأن تقنية المعالجة تؤثر على إنتاج وقود الديزل الحيوي، فيجب أن تؤثر أيضًا على خصائص المنتجات الثانوية. وبعبارة أخرى، فإن تقنيات ومحفزات المعالجة الجديدة لها دور أكبر في التأثير على تكوين واستخدام الجلسرين [243]. ومع ذلك، فإن هذه المنتجات الثانوية مناسبة للهضم اللاهوائي وإنتاج الغاز الحيوي. يحتوي الجلسرين الخام على 50-60٪ من الجلسرين، 12-16٪ قلويات مثل الصابون والهيدروكسيدات القلوية، 15-18٪ استرات الميثيل، 8-12٪ ميثانول و 2-3٪ ماء [244].

في أوروبا، هناك 245 مصنعًا تعالج وقود الديزل الحيوي بما يزيد عن 9 ملايين طن متري من زيت الديزل الحيوي السائل سنويًا. في الاتحاد الأوروبي، المنتجون والمستهلكون الرئيسيون للديزل الحيوي هم ألمانيا وإيطاليا وفرنسا والسويد. ومع ذلك، فإن البلدان الأخرى تلحق بالركب بسرعة وبشكل رئيسي الولايات المتحدة والبرازيل والهند والأرجنتين وماليزيا [36]. نظرًا لأن إنتاج وقود الديزل الحيوي يتزايد بشكل كبير، كذلك يتم توليد الجلسرين الخام. ومع ذلك، لتحسين الجدوى الاقتصادية لصناعة وقود الديزل

الحيوي في مرحلة الجلسرين، تم إجراء مزيد من الدراسات لإيجاد الإمكانيات. شارك الباحثون التاليين في إيجاد هذه الاحتمالات في مجموعة واسعة من الدراسات مثل [225]، [229]، [242].

9.2 الاتجاهات الاقتصادية:

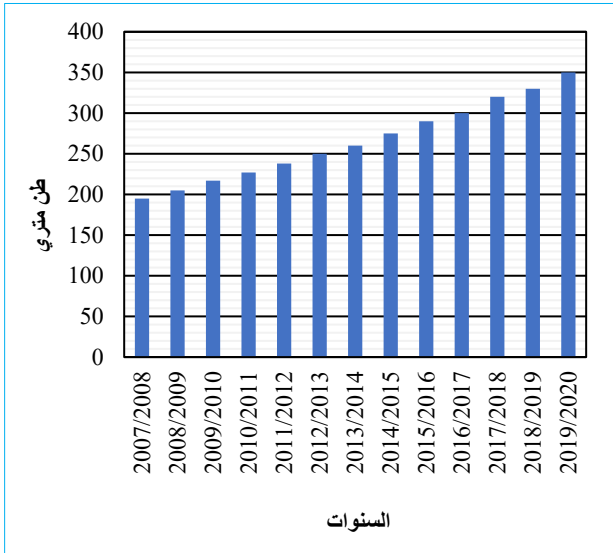
حاليًا، تمثل المركبات التي تعمل بالديزل حوالي ثلث المركبات المباعة في أوروبا والولايات المتحدة [245]. يوضح الشكل 7.2. استهلاك وقود الديزل في جميع أنحاء العالم. مع انخفاض كمية البترول المتاح، تزداد الحاجة إلى تقنيات بديلة يمكنها إطالة استخدام الوقود السائل وتخفيف النقص القادم في وقود النقل [5]. يوجد حاليًا نوعان من أنواع وقود النقل السائلة القائمة على الكتلة الحيوية والتي لديها القدرة على استبدال البنزين ووقود الديزل: الإيثانول الحيوي والديزل الحيوي. من المفترض أن يتم استخدام وقود الديزل الحيوي كبديل للديزل الأحفوري وأن الإيثانول الحيوي سيحل محل البنزين [246].



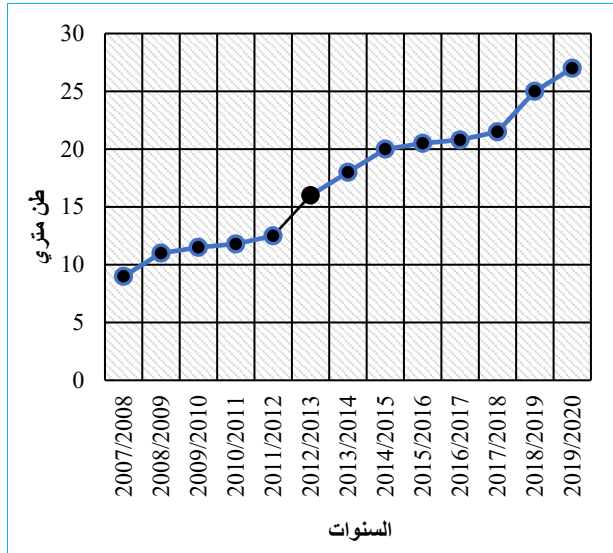
الشكل 7.2. استهلاك الديزل السنوي [247].

على مدى العقد الماضي (2000-2010)، زاد إنتاج وقود الديزل الحيوي إلى مستوى غير مسبوق، مدفوعًا بشكل أساسي بارتفاع أسعار النفط، وارتفاع الطلب من البلدان الناشئة، والمضاربة، والجهود المبذولة لمكافحة تغير المناخ. يوضح الشكل 8.2. كيفية زيادة الإنتاج العالمي للديزل الحيوي من 9 ملايين طن في عام 2007 إلى 27 مليون طن في عام 2020، وهو ما يمثل زيادة قدرها 300% على مدار خمس سنوات. تشير التقديرات إلى أن وقود الديزل الحيوي يمكن أن يحل محل ما يقرب من 10% من استهلاك وقود الديزل في أوروبا و5% من إجمالي الطلب على الوقود في جنوب شرق آسيا [248]. يوضح الشكل 9.2. زيادة في الاستهلاك العالمي لوقود الديزل؛ زاد الطلب على وقود الديزل الحيوي من أقل من 200 مليون لتر في عام 2000 إلى حوالي 251 مليون لتر في عام 2012 وسوف يتجاوز 350 مليون لتر في

عام 2020. وتعزى هذه الزيادة الكبيرة في الطلب العالمي على وقود الديزل الحيوي إلى التزام الدول بتنويع مصادر إمدادات الطاقة وأمن الطاقة. السياسات بسبب بروتوكول كيوتو و/أو الأهداف الوطنية. لذلك، هناك فرص تصدير قوية للبلدان التي يمكنها إنتاج وقود الديزل الحيوي. ستتطلب زيادة استهلاك وقود الديزل الحيوي عملية إنتاج محسنة تتميز بقدرة إنتاجية عالية وعمليات مبسطة وعوائد عالية ونقص المتطلبات الكيميائية الخاصة وتيارات النفايات. [243]



الشكل 9.2. الطلب على وقود الديزل الحيوي.



الشكل 8.2. إنتاج وقود الديزل الحيوي في العالم.

يلاحظ استطلاع للسوق العالمي ثلاث اتجاهات رئيسية في سوق القيم للجatroفا. الاتجاه الأول هو التوسع في إنتاج الجatroفا على نطاق تجاري من الهند إلى إفريقيا وجنوب شرق آسيا وأمريكا اللاتينية. الاتجاه الثاني هو مشاركة الحكومات والمخاوف الرئيسية المتعلقة بالطاقة في زراعة وإنتاج الجatroفا. الاتجاه الرئيسي الثالث هو أن المشاريع القائمة على الجatroفا يتم تطويرها ككيانات ثنائية الغرض، سواء كبرامج حكومية أو كحل لمتطلبات الوقود الحيوي العالمي المتزايد [197].

10.2 الخاتمة

تعتبر الجatroفا كركاس واحداً من تلك التي تقدم عدداً كبيراً من التقارير التي تظهر فائدتها في الصناعات الدوائية والزراعية والتجميلية والغذائية والصناعية. وقود الديزل الحيوي هو واحد من بين هذه الأنواع وهو نظيف الاحتراق له بنية كيميائية من إسترات ألكيل الأحماض الدهنية. من بين الطرق المختلفة المتاحة لإنتاج وقود الديزل الحيوي، التحويل التبادلي المحفز بالقلويات للزيوت النباتية والدهون الحيوانية هو الأسلوب الأكثر شيوعاً حالياً. الاسترة التبادلية هي في الأساس رد فعل متسلسل. ومع ذلك، عندما يحتوي زيت الجatroفا كركاس على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة أو الماء، فإن المحفز القلوي سوف يتفاعل مع الأحماض الدهنية الحرة لتكوين الصابون. هذه تفاعلات غير مرغوب فيها تقلل من عائد منتج الديزل الحيوي. هناك ثلاث طرق أولية لتقليل كمية الأحماض الدهنية الحرة: أسترة الأحماض الدهنية الحرة

بالميثانول في وجود محفزات حمضية؛ استخدام اليود كمحفز؛ وإضافة الجلسرين في المواد الخام الحمضية مع محفز مثل كلوريد الزنك والتسخين لدرجة حرارة عالية. الكحول الأكثر استخدامًا هو الميثانول، في حين أن هيدروكسيد الصوديوم وهيدروكسيد البوتاسيوم هما المحفزات الأكثر استخدامًا. أثناء التفاعل، يتم إنتاج الجلسرين كمنتج ثانوي. نظرًا لتطبيقاته الصناعية العديدة، يجب تكرير الجلسرين الخام إلى درجة نقاء أعلى من 99% لجعله قابلاً للاستخدام. لتكرير وقود الديزل الحيوي الخام المنتج، يجب أولاً تحييد المنتج ثم وضعه في مزيج كحول قبل التنظيف بإحدى الطرق التالية: غسل بالماء، أو استخلاص بالغشاء، أو الغسيل الجاف. بعد ذلك تحليل وقود الديزل الحيوي النهائي باستخدام معدات تحليلية متطورة للتأكد من أنه يفي بالمعايير الدولية، حتى لو تم تخزينه لفترة طويلة.

هناك أربعة عوامل أساسية تؤثر على محصول وقود الديزل الحيوي، أي كمية الكحول ووقت التفاعل ودرجة حرارة التفاعل وتركيز المحفز. لضمان تفاعل استرة كامل، يجب زيادة النسبة المولية للكحول إلى الدهون الثلاثية إلى 6:1 باستخدام محفز قلوي. نظرًا لأن معدل تحويل إسترات الأحماض الدهنية يزداد مع وقت التفاعل، فإن مردود منتج الديزل الحيوي يصل إلى الحد الأقصى في وقت التفاعل الأمثل. يمكن أن تقلل درجة حرارة التفاعل الأعلى من لزوجة الزيوت، مما يعزز معدل التفاعل. اعتمادًا على الدراسات السابقة، تراوحت درجة الحرارة المثلى بين 50 درجة مئوية و60 درجة مئوية. الحالة المثلى لتركيز المحفز هي حوالي 1.5% بالوزن لهيدروكسيد الصوديوم، وهو المحفز الأكثر استخدامًا. مع تزايد القلق بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري، من المتوقع أن يستمر استخدام وقود الديزل الحيوي في النمو بوتيرة سريعة. سيؤدي ذلك إلى تطوير طرق أكثر تطوراً لإنتاج وقود الديزل الحيوي وتكريره لمواكبة الطلب المتزايد في السوق.

الجانفج

العملبي

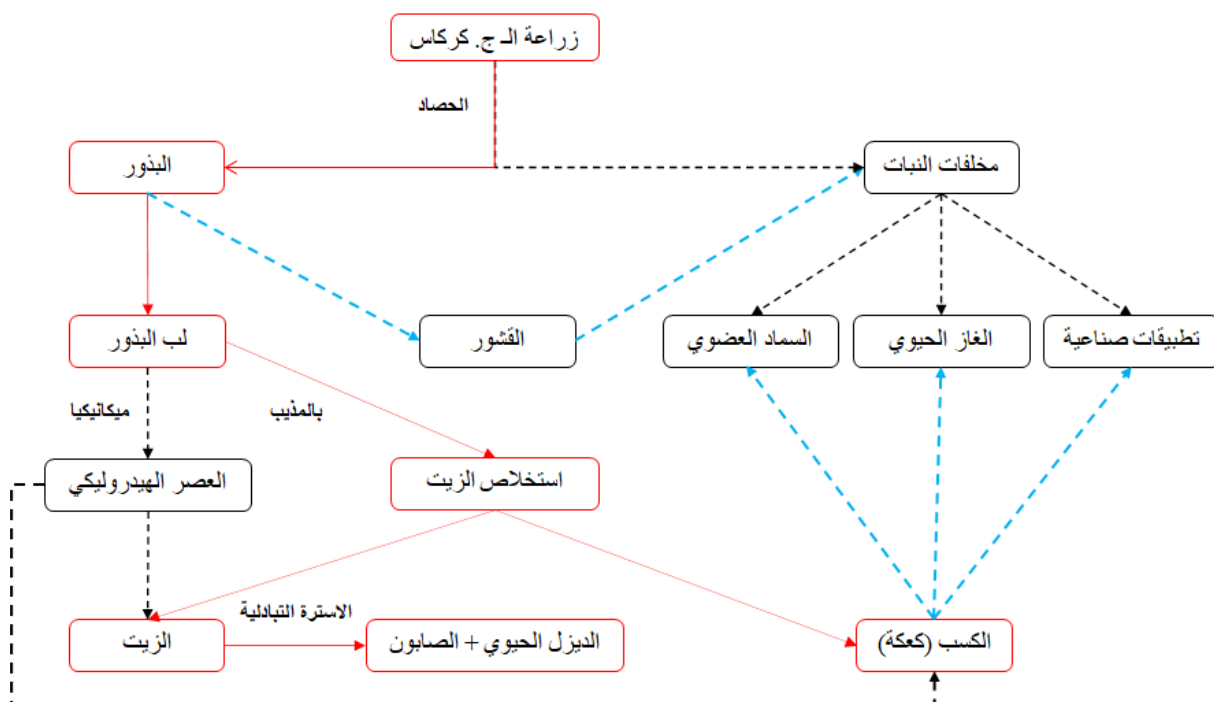
الفصل الثالث:

الطرق والوسائل

جاتروفا كركاس هو نبات مقاوم للجفاف يزدهر في مجموعة واسعة من البيئات، بما في ذلك التربة الرملية والمالحة، ويمكنه تحمل درجات الحرارة العالية والصقيع الخفيف. إنه نبات سريع النمو ويمكن أن ينتج البذور بعد 2-5 سنوات من الزراعة، وهو مقاوم للآفات والأمراض. يتراوح الإنتاج السنوي من الجاتروفا من 0.5 إلى 12 طنًا [249]. لتعزيز إنتاج النفط المستخدم في صناعة الوقود الحيوي، تمت زراعة الـ ج. كركاس في منطقة الواد في جنوب شرق الجزائر، التي تتميز بمناخ صحراوي جاف وقاحل في الصيف وتربة رملية بالكامل [250].

في هذا الفصل سنتطرق الى: (1) تجربة نجاح زراعة نبات الـ ج. كركاس في الجزائر من حيث سهولة زراعته وإنتاجية المحصول والزيت. (2) تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيت المنتج. (3) الدراسة النوعية والكمية لمكوناتها من الأحماض الدهنية للنتبؤ بالمجالات الصناعية التي يمكن استخدامها فيها. (4) تحويل الزيت الى وقود الديزل الحيوي عن طريق الاسترة التبادلية. (5) تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج من زيت الـ ج. كركاس.

1.3 نطاق العمل:



الشكل 1.3. يوضح مراحل العمل (اللون الاحمر يوضح مسار العمل).

تم جمع المعلومات من عملية زراعة الجاتروفا إلى إنتاج الوقود الديزل الحيوي من المشروع التجريبي في منطقة الوادي في جنوب شرق الجزائر. تشمل التحليل (1) عملية الزراعة في مفهوم المحصول السنوي حيث يتم قطع نباتات الجاتروفا سنة بعد أخرى للقيمة المضافة ككتلة حيوية (أوراق، لحاء، قشور،

إلخ)؛ (2) يتم استخلاص زيت الجاتروفا بواسطة المذيبات (الهكسان)؛ و(3) يتم عملية تحويل الزيت الى وقود الديزل الحيوي بواسطة الاسترة التبادلية مع الميثانول وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) كمحفز (الشكل 1.3). لا توجد محاولة لتحديد المنفعة الاقتصادية نظرًا لأن سعر السوق لـ JME¹ والمنتجات المشتركة لم يتم تحديدها بعد. عمر مزرعة الجاتروفا في موقع الدراسة هذا هو 5 سنوات فقط ولكن الافتراض (بناءً على دراسات في أماكن أخرى) هو أن زراعة الجاتروفا تتطلب عملية تحضير الأرض ومجموعة قطع جديدة كل 5 سنوات للحصول على مخرجات مرضية.

2.3 المواد الأولية:

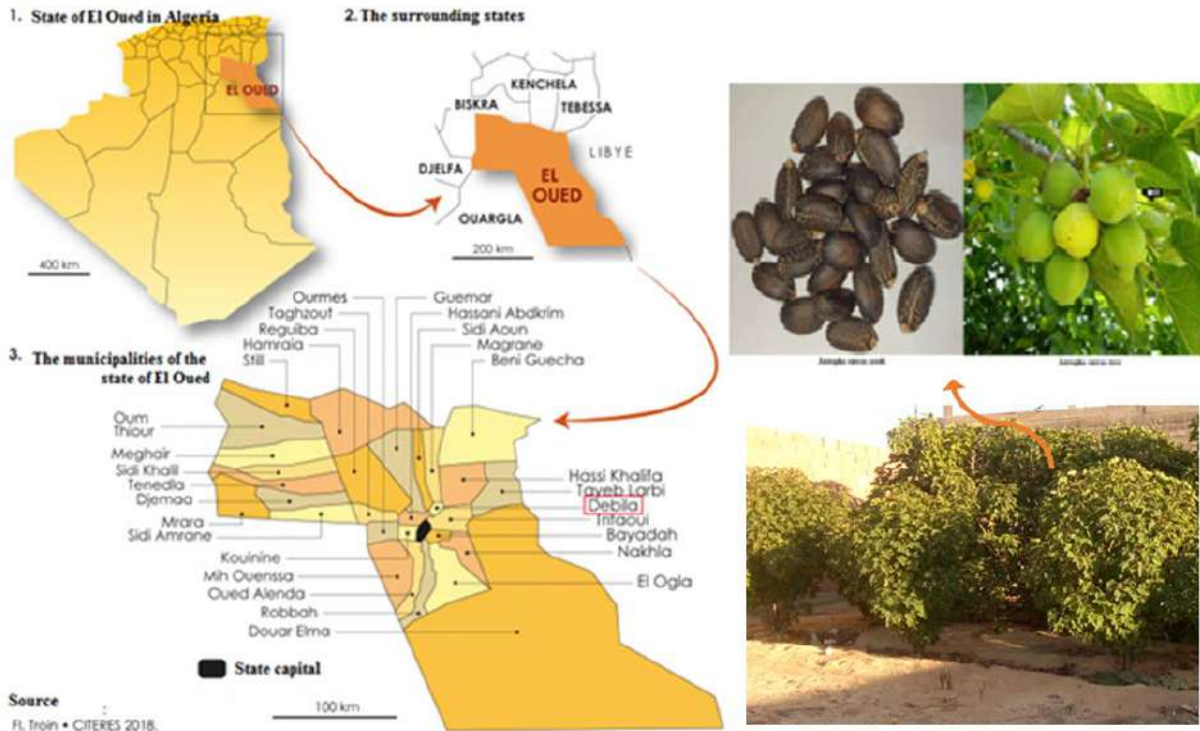
1.2.3 بذور الجاتروفا كيركاس:

تم شراء البذور من الهند (عبر الإنترنت). بعد ذلك، تم تقديمها إلى "المركز الجزائري لإصدار الشهادات والتحكم في البذور" للتحقق من انتمائهم إلى الجاتروفا كيركاس.

2.2.3 زراعة الجاتروفا كيركاس:

بعد توفير البذور في يونيو 2014، وفي أكفادو، الدبيلة، بالقرب من مدينة الوادي، الجزائر (° 33 E "26.1' 56 ° 6 N 29 '54.2") الشكل 2.3، تم زراعة هذه البذور في دلاء البولي ايثيلين. في فبراير 2015 أصبحت الشجيرات جاهزة، فتم نقلهم إلى موقع الزراعة. بعد وضع الأسمدة العضوية داخل حفر 50×50×50 سم. بحيث كان موقع الزراعة أرض هامشية فقيرة، غير مزروعة، وتتميز بتربة رملية. تم زرع الشجيرات الناتجة في مزرعة تجريبية وتم ريها طوال الفترة التجريبية بمياه جوفية على عمق 350 إلى 400 متر، من 15 مايو إلى نهاية أغسطس، كانت تسقى مرتين في اليوم، من بداية سبتمبر إلى 15 مايو، تم سقيها من مرة واحدة في اليوم إلى مرة واحدة في الأسبوع، حسب الحاجة. في عامها الثالث، تمت اول عملية للحصاد، في نهاية يوليو تم جمع الثمار الناضجة، لكنها لم تكن كلها دفعة واحدة. بدلا من ذلك، تم جمع الثمار الناضجة فقط (الجافة ذات اللون البني) كل ثلاثة إلى أربعة أيام لأن ترك الثمار ناضجة لفترة يؤثر على حموضة الزيت. ثم تجفف أكثر في مكان جيد التهوية في درجة حرارة الغرفة، مع الحرص على تحريكها من وقت إلى اخر لتجف جيدا. في النهاية، تم تخزين البذور المجففة في مكان جاف للاستخدام المختبري.

JME: Jatropha Methyl Ester.¹



الشكل 2.3. يوضح موقع زراعة جاتروفا كركاس.

3.3 طرق ووسائل العمل التجريبي:

1.3.3 استخلاص وتحليل زيت الجاتروفا كيركاس:

1.1.3.3 الأدوات والأجهزة المستعملة:

في الجدول رقم (1.3) يلخص مختلف الادوات والاجهزة المستعملة في هذا العمل:

جدول 1.3: يمثل مختلف الأدوات والأجهزة المستعملة في الدراسة.

الأجهزة	الأدوات
ميزان حساس (Balance Sensitive)	أنبوب اختبار مدرج
جهاز سوكلسي (Soxhlet)	قمع الفصل
جهاز التبخير الدوراني (Rotavapor)	دورق سعته 250 - 500 مل
جهاز قرينة الانكسار (Refractomètre)	سحاحة سعته 25 مل
حاضنة مختبر (Etuves)	بشر سعته 100 مل
حمام مائي (Bain Marie)	طبق بتري
قنينة الكثافة (Flacons de densité)	
جهاز مقياس الأس الهيدروجيني (PH mètre)	

2.1.3.3 المواد الكيميائية المستعملة:

في هذا العمل الاختيار الصحيح للمذيب سوف يعطي أفضل استخراج وظروف تشغيل المثلى يجب أن يكون المذيب يمتلك قدرة ذوبان عالية، ونقطة غليان منخفضة، ولزوجة منخفضة، (يتم عرض الخصائص الفيزيائية للمذيبات الأكثر شيوعاً في الملحق 2).

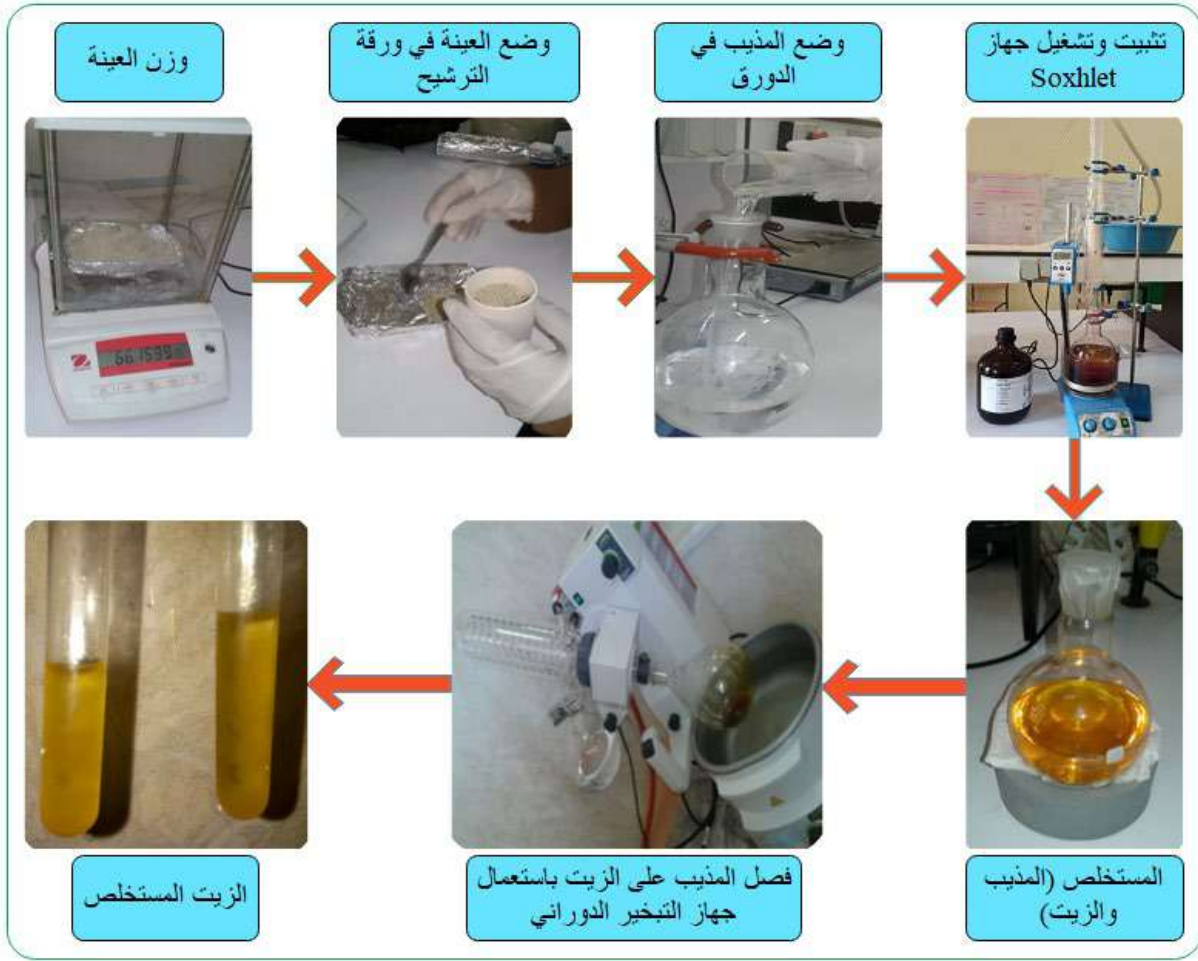
وفي الجدول رقم (2.3) يلخص المواد الكيميائية المستعملة في هذا العمل:

جدول 2.3: يوضح المواد الكيميائية المستخدمة

النقاوة (%)	الصيغة الإجمالية	المواد
96.3	C ₂ H ₅ OH	الإيثانول
95	KOH	هيدروكسيد البوتاسيوم
37	HCl	حمض الهيدروكلوريك
99-99.4	CHCl ₃	كلوروفورم
95	C ₆ H ₁₄	الهكسان
96	CH ₃ OH	الميثانول
/	H ₂ O	ماء مقطر
/	C ₂₀ H ₁₄ O ₄	الفينول فيتالين

3.1.3.3 استخلاص زيت الجاتروفا كركاس:

نتبع الإجراءات المحددة في المنهجية التالية (الشكل 4.3) للحصول على زيت الجاتروفا كركاس أولاً تم تقشير الفاكهة المجففة للحصول على البذور، ثم تم تقشير البذور للحصول على اللب فقط والذي تم طحنه بعد ذلك لاستخلاص الزيت بأكبر قدر ممكن. تم تجفيف الطحين في فرن عند درجة حرارة 60 درجة مئوية حتى يتم تثبيت الوزن لتقليل محتوى الرطوبة. تم وزن 60 غ من الطحين المجفف في الخطوة السابقة، ووضعه في كشتبان، وإدخاله في ورق ارتداد سعة 500 مل. تم استخدام الهكسان (n-hexane) كمذيب للاستخلاص (نقطة غليانه 60 م°) [251]، كانت كمية الهكسان المأخوذة 6 اضعاف حجم العينة [46]. تم تحريك الخليط لمدة 8 ساعات في جهاز الاستخلاص Soxhlet وهو جهاز مثبت يدوياً (الشكل 4.3). بعد ذلك، تم فصل الزيت المذاب في الهكسان باستخدام جهاز التبخير الدوراني عند 60 درجة مئوية تحت ضغط منخفض. تم تجفيف الزيت المستخلص عند 60 درجة مئوية في فرن تجفيف حتى وصل إلى وزن ثابت لإزالة آثار المذيب والماء. أخيراً، تم تخزين الزيت النقي في الثلاجة للتحليل الفيزيائي والكيميائي لاحقاً [251].



الشكل 4.3. برتوكول استخلاص زيت الجاتروفا كيركاس بجهاز Soxhlet.

4.1.3.3 مردود الزيت:

يمكن إجراء استخلاص الزيت من خلال عدة تقنيات، على سبيل المثال استخلاص Soxhlet، Ultrasonication، الضاغط الميكانيكي،... إلخ. هنا، تم استخدام جهاز الاستخلاص Soxhlet لاستخلاص الزيت من البذور. تم حساب نسبة الزيت المستخلص بقسمة وزن الزيت على الوزن الأولي للعينة. تم حساب نسبة مردود الزيت الثابت باستخدام المعادلة التالية [252]:

$$(1.3) \dots \eta (\%) = \frac{M_{HE} (g)}{M_E (g)} \times 100\%$$

η : نسبت مردود الزيت.

M_{HE} : كتلة الزيت المستخلص (غ).

M_E : كتلة العينة (غ).

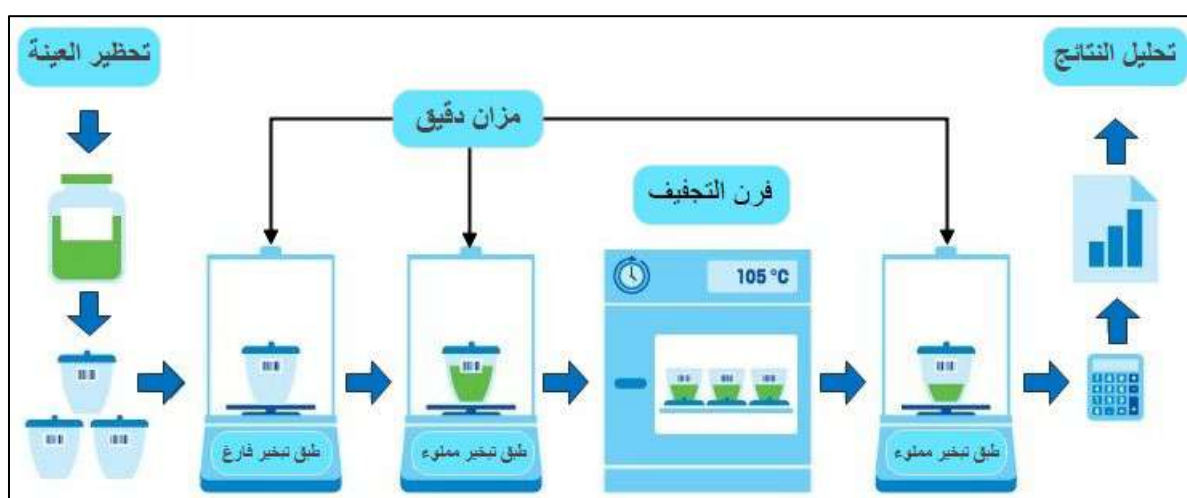
5.1.3.3 قياس الماء والمحتوى المتطاير:

تم أخذ 5 غرامات من مسحوق بذور الـ ج. كركاس (العينة)، ثم وضعها في طبق بتري موزون مسبقاً ثم تم وضع العينة داخل حاضنة مخبر (الملحق 02) عند درجة حرارة 105 م°، لمدة 6 ساعات، وبعد ذلك تم وزن العينة كل ساعة إلى أن ثبت الوزن الشكل 5.3. ووفقاً للمعيار الدولي: NFT 60-201 [252]. تم التعبير عن قياس الرطوبة كنسبة مئوية من كتلة البذور على النحو التالي:

$$M_m (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.3)$$

mM : نسبة الرطوبة.

m_1 و $2m$: وزن العينة قبل وبعد التجفيف (g) على التوالي.



الشكل 5.3. مخطط لتحديد محتوى الرطوبة باستخدام مجفف أو فرن تجفيف.

6.1.3.3 التحليل الفيزيائي والكيميائي لزيت الجاتروفا كركاس:

في هذه الدراسة، تم تحديد جودة الزيت المستخلص من بذور الجاتروفا كركاس من خلال التحليلات الفيزيائية والكيميائية لبعض الخصائص الحيوية مثل الكثافة، واللزوجة الحركية ومعامل الانكسار وقيمة الحمض والأحماض الدهنية الحرة ومؤشر التصبن ومؤشر اليود ومؤشر بيروكسيد وتحليل GC-MS.

1.6.1.3.3 الكثافة (الوزن النوعي):

نسمي الكثافة (الوزن النوعي)، هي توفر معلومات عن المجموعة التي ينتمي إليها الزيت. تعتمد على مبدأ قياس الكتلة، عند درجة حرارة الغرفة، لحجم مادة دهنية موجودة في جهاز قياس الكثافة تمت معايرته مسبقاً عند نفس درجة الحرارة.

تم وزن القنينة الكثافة وهي فارغة وجافة، ثم تملأ إلى نهايتها بماء من الدرجة المراد تقدير الوزن النوعي عندها، نقوم بسد القنينة بالغطاء الزجاجي المسنفر الذي يتوسطه أنبوبة شعرية حيث يندفع الماء

الزائد منها لتفادي انحباس أية فقاعات هوائية بداخله. بنفس الطريقة تملأ القنينة بالوسائل المراد تقدير كثافته النوعية والمتمثل في الزيت كما موضح في الصورة 1.3. تم تحديد الكثافة وفقاً لمعيار: NFT 60-214: 2001PR، عند درجة حرارة 30 درجة مئوية [252] والمعرف بالعلاقة التالية:

$$(3.3) \dots\dots\dots \rho = \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_2}$$

ρ: الكثافة او الوزن النوعي.

1m : كتلة مقياس Pycnometer بالزيت (غ).

2m : كتلة مقياس Pycnometer الفارغ (غ).

3m : كتلة مقياس Pycnometer بالماء (غ).



الصورة 1.3. توضح وزن القنينة (أ): وزن القنينة مملوءة بالزيت، ب: وزن القنينة مملوءة بالماء)

2.6.1.3.3 معامل الانكسار:

تم استخدام جهاز مقياس الانكسار Abbe لحساب معامل الانكسار الصورة 2.3. أجريت الدراسات في 25 درجة مئوية وقدمت النتائج كرقم مع أربعة منازل عشرية. تم تنظيف وتجفيف المنشور بالزيلين (Xylene). تم ضبط الجهاز في المكان المناسب للضوء وهذا من اجل اعطاء قراءة الأكثر وضوحا لحساب معامل الانكسار. ثم تم وضع بضع قطرات من الزيت على المنشور وأغلق المنشور واتركه لمدة 1-2 دقيقة قبل اخذ القراءة. مع العلم إن عدم التشبع وطول السلسلة للأحماض الدهنية يأتزان على معامل انكسار الزيت [253].



الصورة 2.3. جهاز مقياس الانكسار Abbe لحساب معامل الانكسار.

3.6.1.3.3 اللزوجة:

تم إجراؤه باستخدام **Brookfield DV1M**، مقياس اللزوجة من النوع الدوار من مختبرات الكيمياء، في درجة حرارة الغرفة، تم استخدام حجم المغزل S05 عند 100 دورة في الدقيقة لمدة دقيقة واحدة [254].

4.6.1.3.3 قيمة الحمض (AV) والأحماض الدهنية الحرة (FFAs):

تم قياس قيمة الحمض ونسبة الأحماض الدهنية الحرة للزيت الجاتروفا كركاس باتباع طريقة ASTM D 974:2014 [255]. نسبة الأحماض الدهنية الحرة هي عدد جرامات الأحماض الدهنية في 100 ملغ من الزيت. علاوة على ذلك، فإن قيمة الحمض هي عدد المليغرامات من هيدروكسيد البوتاسيوم اللازمة لتحديد الأحماض الدهنية الحرة في 1 جرام من عينة الزيت. تم استخدام محلول KOH مع N 0.1 كمحلول معاير لقياس قيمة الحمض والأحماض الدهنية الحرة. كانت الخطوة الأولى هي وزن عينة الزيت. تم وزن جرامين (2غ) من الزيت النقي بشكل دقيق في ورق مخروطي سعة 250 مل. بعد ذلك، تمت إضافة 20 مل من الإيثانول المحايد مع بضع قطرات من مؤشر الفينول فتالين. وتم تسخين القارورة في حمام مائي لمدة 3 دقائق. ثم تم تبريد القارورة بعد ذلك، تمت معايرة هذا الخليط بواسطة محلول هيدروكسيد البوتاسيوم الكحولي (KOH) مع التحريك بقوة حتى يتغير الخليط إلى اللون الوردي بشكل دائم الصورة 3.3. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء معايرة فارغة جنباً إلى جنب. تم التعبير عن قيمة الحمض وحمض دهني حر كما هو موضح بالمعادلات التالية:

$$(4.3) \dots\dots\dots AV = \frac{V * N * 56.11}{m}$$

$$(5.3) \dots\dots\dots \% \text{FFA} = \left(\frac{V * N * M_{C18:1}}{m * 1000} \right) * 100 \%$$

بحيث:

V: حجم KOH (مل).

N: عيارية KOH

m: كتلة العينة (غ).

$M_{C18:1}$: الكتلة المولية لحمض الأوليك غ/مول.



الصورة 3.3. معايرة قيمة الحمض (AV) والأحماض الدهنية الحرة (FFAs).

5.6.1.3.3 مؤشر التصين (Si):

تم حساب مؤشر التصين وفقاً لمعيار NBR 14854-1: 2014 فيما يلي طريقة العمل بالتفصيل:
تم وزن جرامين من الزيت بشكل دقيق في ورق دائري سعة 250 مل باستخدام طريقة النقل. تم استخدام ماصة لإضافة محلول هيدروكسيد البوتاسيوم الكحولي 0.5 N الذي تم إنتاجه حديثاً (25 مل) إلى العينة، وتم إعادة المزج بلطف في حمام مائي باستخدام مكثف الهواء لمدة ساعة واحدة. ثم تم تبريد القارورة، وتنظيف طرف المكثف بالماء المقطر، وتم معايرة المحتويات باستخدام محلول حمض الهيدروكلوريك (0.5 N) والفينول فتالين كمؤشر الصورة 4.3. في نفس الوقت، تم إجراء معايرة فارغة.

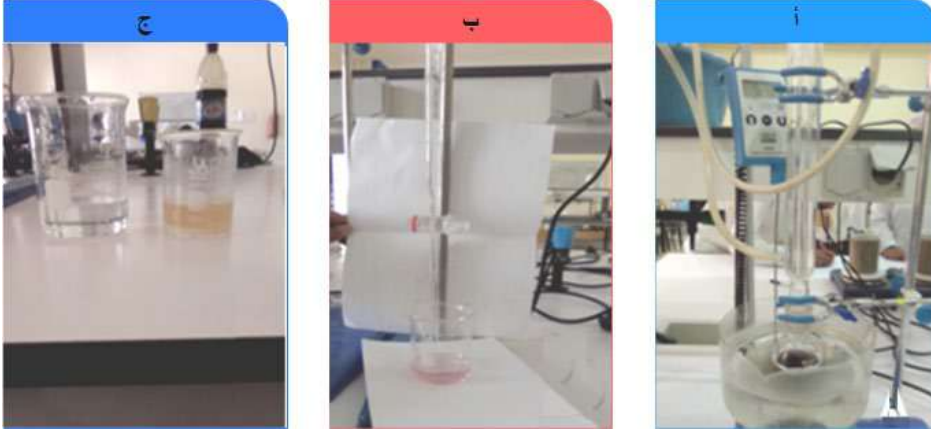
باستخدام المعادلة التالية تم الحصول على قيمة Si [256]:

$$(6.3) \dots\dots\dots S_i = \frac{(V_0 - V) * 28.055}{m}$$

V_0 : حجم حمض الهيدروكلوريك المستخدم للاختبار الفارغ (مل).

V : حجم حمض الهيدروكلوريك المستخدم في الاختبار في الزيت (مل).

m : كتلة العينة (غ).



الصورة 4.3. يوضح مراحل عملية التصبن (أ: التفاعل، ب: المعايرة، ج: العينة في نقطة التعديل).

6.6.1.3.3 مؤشر اليود (Ii):

تم إعطاء مؤشر اليود (Ii) وفقا ISO 3961: 2018، على النحو التالي:

$$(7.3) \dots\dots\dots I_i = \frac{(V_0 - V) * N * 12.69}{m}$$

N : عيارية ثيوسلفات الصوديوم $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (0.1 N).

V_0 : حجم محلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ اللازمة للمعايرة في اختبار فارغ (مل).

V : حجم محلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ اللازمة لمعايرة العينة (مل).

m : كتلة العينة (غ).

7.6.1.3.3 مؤشر بيروكسيد (P_I):

تم حساب مؤشر البيروكسيد (P_I) وفقا للمعادلة [253]:

$$(8.3) \dots\dots\dots P_I = \frac{(V - V_0) \times N}{m} \times 1000$$

N : عيارية ثيوسلفات الصوديوم $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (0.002 N).

V_0 : حجم محلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ اللازمة للمعايرة في اختبار فارغ (مل).

V : حجم محلول $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ اللازمة لمعايرة العينة (مل).

m : كتلة العينة (غ).

8.6.1.3.3 تحليل GC-MS:

تم تحديد تركيبة الأحماض الدهنية الحرة لزيت بذور جاتروفا كيركاس باستخدام طريقة TE-CH-208 الداخلية بناءً على إرشادات AOAC (2012). كان GC-MS عبارة عن نظام كروماتوغرافيا غاز اجيلنت لتكنولوجيا من طراز GC-7890A/MS-5975C (اجيلنت لتكنولوجيا، سانتا كلارا، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية كما موضح في الشكل 2 الملحق 2) مجهزاً بعمود DB-5MS من السيليكيا الشعري المنصهر (5 ٪ فينيل ميثيل بولي سيلوكسان، 30 × 0.25 مم، سماكة الفيلم 0.25 ميكرومتر، اجيلنت لتكنولوجيا). تمت إضافة حمض البيروجاليك (0.2 جم) إلى زيت الجاتروفا كيركاس لمنع الأكسدة. تم تحويل 0.1 مل من الزيت إلى إسترات ميثيل الأحماض الدهنية (FAMES) باستخدام 1 مل من 10٪ (وزن/وزن) البورون ثلاثي فلوريد الميثانول (BF₃-ميثانول)، قبل حقنه في كروماتوغرافيا الغاز. تم تشغيل العمود في ظل الظروف التالية: كانت درجة الحرارة الأولية 50 درجة مئوية، وتم الحفاظ على ثبات هذه الدرجة لمدة دقيقة واحدة؛ بعد ذلك، تمت زيادة درجة الحرارة بمعدل 10 درجات مئوية في الدقيقة حتى الوصول إلى 250 درجة مئوية، مع الحفاظ على ثبات هذه الدرجة في الأخير لمدة دقيقة واحدة. بعد ذلك، تم استخدام التدرج الثاني بالذهاب إلى 300 درجة مئوية عند 50 درجة مئوية في دقيقة، مع الحفاظ على ثبات 300 درجة مئوية لمدة 3 دقائق. تم حقن عشرة ميكرو لتر من محلول العينة (في حاقتن مسخن 200 درجة مئوية) بنسبة 1:10 في وضع الانقسام. الجهد المضاعف للإلكترون تم ضبطه بين 1400-1500 فولت وتم ضبط التيار عند 10 أمبير في مطياف الكتلة. كانت درجة الحرارة في مربع الانطلاق 250 درجة مئوية، في حين كانت درجة الحرارة في خط النقل 270 درجة مئوية. كان مسح الكتلة في المجال 40-650 اوم (amu). تمت مقارنة فترات الاحتفاظ بالمعايير الحقيقية التي تم تقييمها في ظل ظروف متطابقة مع فترات ذروة الشهرة لتحديدها [257].

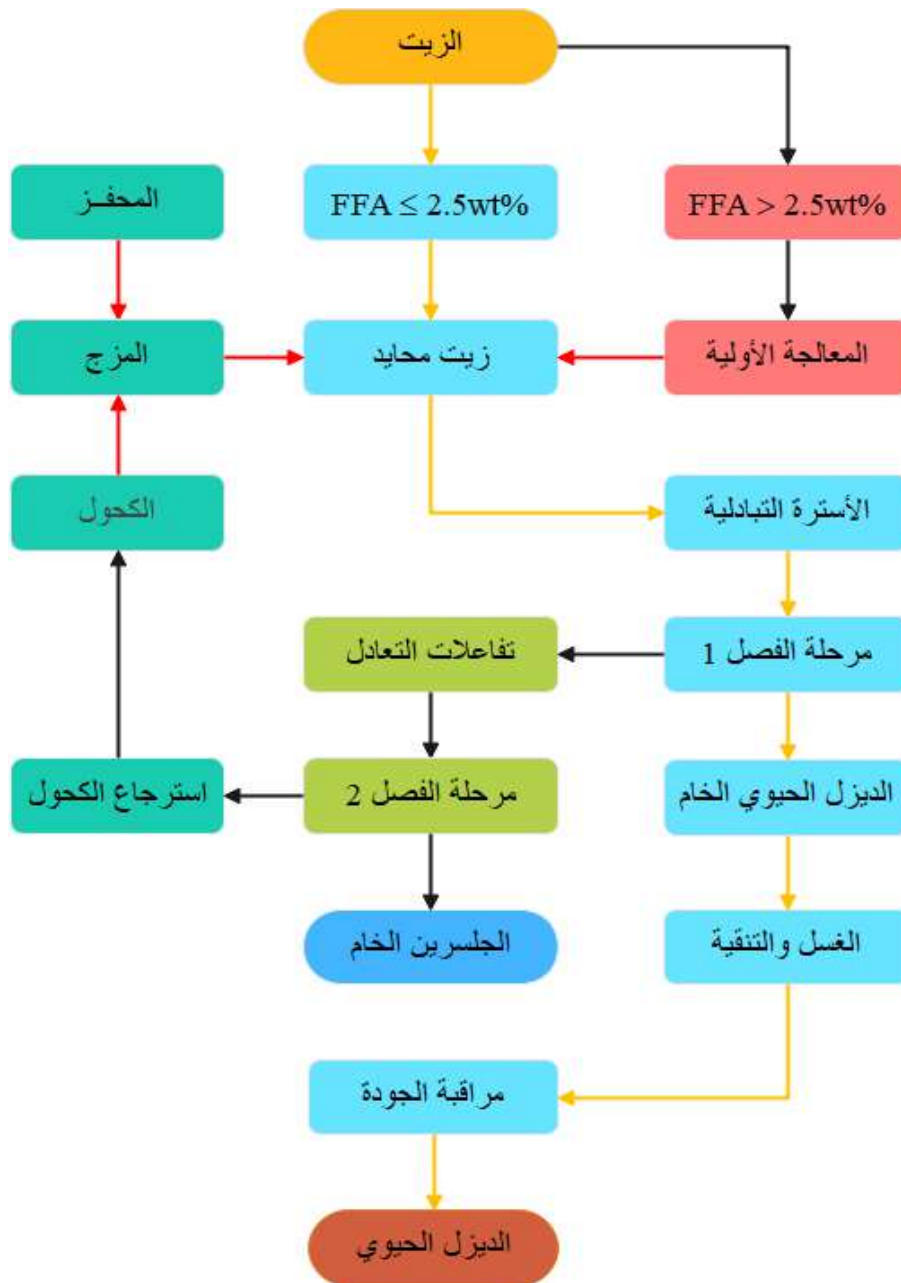
2.3.3 إنتاج وتحليل وقود الديزل الحيوي:

تشير العديد من المنشورات إلى استخدام زيت الجاتروفا كركاس النقي أو الممزوج في عدة استخدامات كالشموع، الصابون، صناعة مستحضرات التجميل [258]، زيت المحرك [259]، [260]، وكبدل للديزل [257]. يتم تحويل زيت الجاتروفا كركاس بشكل أساسي إلى إسترات الميثيل (وقود الديزل الحيوي) والجلسرين. يجب اعتبار استخدام وقود الديزل الحيوي من الجاتروفا كركاس بمثابة استرة تبادلية للمنتج النهائي، الخطوة التالية هي عملية إنتاج وقود الديزل الحيوي عن طريق الاسترة التبادلية.

1.2.3.3 مخطط تدفق العملية:

اليوم، يتم إنتاج معظم وقود الديزل الحيوي بواسطة عملية التحفيز القلوي. يوضح الشكل 6.3 مخطط تدفق مبسط لعملية المحفز القلوي. كما تم وصفه في الملحق 01 (الفقرة 1.1)، فإن المواد الأولية

التي تحتوي على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة سوف تتفاعل بشكل غير مرغوب فيه مع المحفز القلوي وبالتالي تكوين الصابون. الحد الأقصى لمقدار الأحماض الدهنية الحرة المقبولة في نظام محفز قلوي أقل من 2.5% بالوزن FFA. إذا كان الزيت أو المادة الأولية الدهنية تحتوي على نسبة FFA تزيد عن 2.5% بالوزن، فإن خطوة المعالجة المسبقة ضرورية قبل عملية الأسترة التبادلية [261] (انظر الفقرة 1.1. الملحق 01).



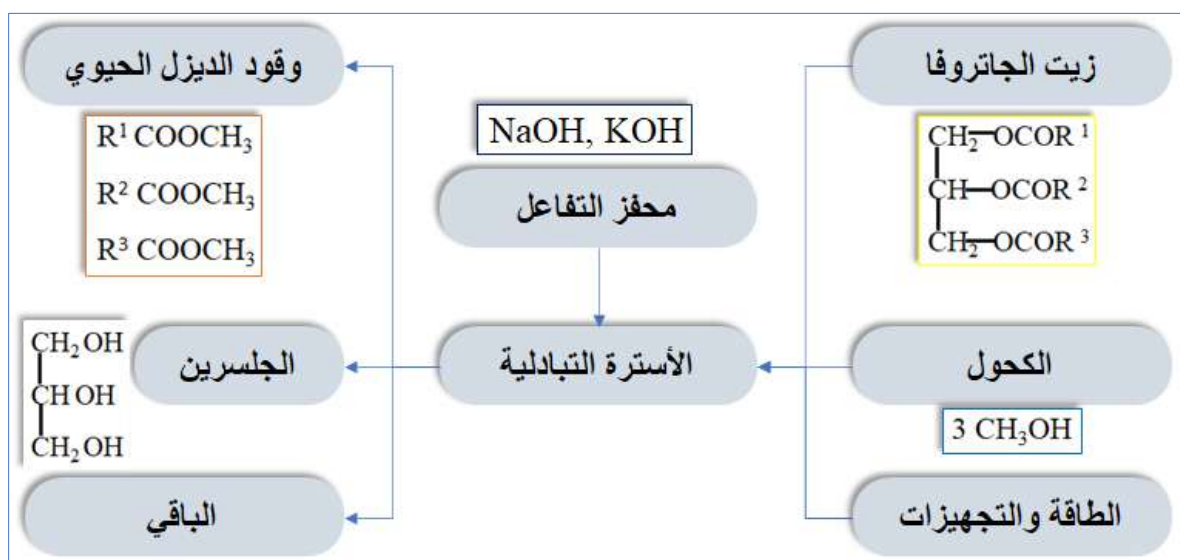
الشكل 6.3. مخطط يوضح مراحل إنتاج وقود الديزل الحيوي [242].

2.2.3.3 الاسترة التبادلية (transesterification):

على الرغم من أن عملية الأسترة التبادلية واضحة تمامًا، إلا أن الخلفية الجينية والبيئية للزيت المنتج قد تتطلب تعديل نسب المدخلات لكاشف الكحول ومحفز التفاعل بالإضافة إلى تعديلات على درجة حرارة

ووقت التفاعل، من أجل الوصول إلى الإنتاج الأمثل للديزل الحيوي الناتج. قامة شيترا (Chitra) وآخرون [262] بتحديد المدخلات المثلى للاسترة التبادلية لزيت الجاتروفا كركاس (3.1% أحماض دهنية حرة وقيمة الحمض 6.2 ملغ KOH/غ) على أنها 20% ميثانول (من كتلة الزيت) (نسبة الميثانول المولي: زيت: 5.5: 1)، و1% هيدروكسيد الصوديوم بالكتلة على أساس الزيت. يتم تحقيق أقصى إنتاج للإستر (98%) بعد 90 دقيقة من زمن التفاعل عند 60 درجة مئوية [262]. يحتاج التحويل الأمثل لزيت الجاتروفا كركاس الذي يحتوي على نسبة عالية من الأحماض الدهنية الحرة (14%) وقيمة الحمض مرتفعة (28 ملغ KOH/غ) إلى معالجة مسبقة (أسترة) مع الميثانول (نسبة الميثانول المولي: الزيت: 6.5: 1) باستخدام H_2SO_4 كمحفز (1.43%) خلال 88 دقيقة عند 60 درجة مئوية. بعد المعالجة المسبقة، تم تحقيق أقصى معدل تحويل بأكثر من 99% عن طريق الأسترة التبادلية مع الميثانول (نسبة الميثانول المولي: الزيت: 4: 1) و0.6% KOH بالوزن خلال 24 دقيقة [263].

تتطلب عملية الاسترة التبادلية المحفزة الناجحة محتوى من الأحماض الدهنية الحرة (FFA)، وهو لا يتجاوز مستوى 2% FFA [264]، الذي يمكن السماح به لإنتاج وقود الديزل الحيوي التقليدي عبر عملية الاسترة التبادلية باستخدام محفز قلوي. يمكن أن يتفاعل FFA مع المحفز القلوي لإنتاج الصابون، مما يؤدي إلى تنقية مكلفة لمنتج الديزل الحيوي [265]. لحل هذه الصعوبة، يتم إجراء عملية من خطوتين حيث يتم تحويل الأحماض الدهنية الحرة في الجاتروفا أولاً إلى إستر الميثيل (وقود الديزل الحيوي) عبر عملية الأسترة باستخدام محفز حمضي ويتم بعد ذلك تفاعل الدهون الثلاثية المتبقية (الزيت) مع الميثانول لإنتاج المزيد من إستر الميثيل عبر الطريقة التقليدية [266]. عملية الاسترة التبادلية الشكل 7.3. وبما ان نتائج الخصائص الفيزيائية والكيميائية لزيت الجاتروفا كركاس التي أجريت في هذه الدراسة أعطت قيمة FFA اقل من 2% لهذا لم تكن ضرورة لمعالجة مسبقة للزيت (أسترة).



الشكل 7.3. المدخلات والمخرجات مع تفاعل الأسترة التبادلية.

1.2.2.3.3 الأدوات والأجهزة المستعملة:

في الجدول رقم (3.3) يلخص مختلف الادوات والاجهزة المستعملة في تفاعل الاسترة التبادلية:
جدول 3.3: يمثل مختلف الأدوات والأجهزة المستخدمة.

المكثف	قمع الفصل	شريط مغناطيسي ²	بالون 250 مل	الادوات
سخان البالون	ميزان الحرارة	ميزان الكتلة	محرك مغناطيسي	الاجهزة

2.2.2.3.3 المواد الكيميائية المستعملة:

وفي الجدول رقم (4.3) يلخص المواد الكيميائية المستعملة في تفاعل الاسترة التبادلية:
جدول 4.3: يوضح المواد الكيميائية المستخدمة.

المواد	الميثانول	هيدروكسيد البوتاسيوم	حمض الخل مخفف	ماء مقطر	ملح (كلوريد صوديوم)
الصيغة الكيميائية	CH ₃ OH	KOH	CH ₃ COOH	H ₂ O	NaCl
النقاوة (%)	96	/	/	/	/

3.2.2.3.3 العوامل المؤثرة في تفاعل الاسترة التبادلية:

في هذه الخطوة نتبع الشروط المثالية لتفاعل الاسترة التبادلية لإنتاج الأستر الميثيلي (الديزل الحيوي) من زيت بذور الـ ج. كركاس المستخلص:

- نسبة كتلة الميثانول المستخدمة / كتلة الميثانول المتكافئ الضروري للتحويل (6: 1) لزيادة قابلية الذوبان الجلسريدات في الكحول.
- كمية المحفز (هيدروكسيد البوتاسيوم) من 1 % فيما يتعلق بالكتلة الأولية من الزيت بذور الـ ج. كركاس.
- درجة حرارة التفاعل 60 م°.
- سرعة الخلط عالية لتحسين سطح الاتصال بين الاثنين.

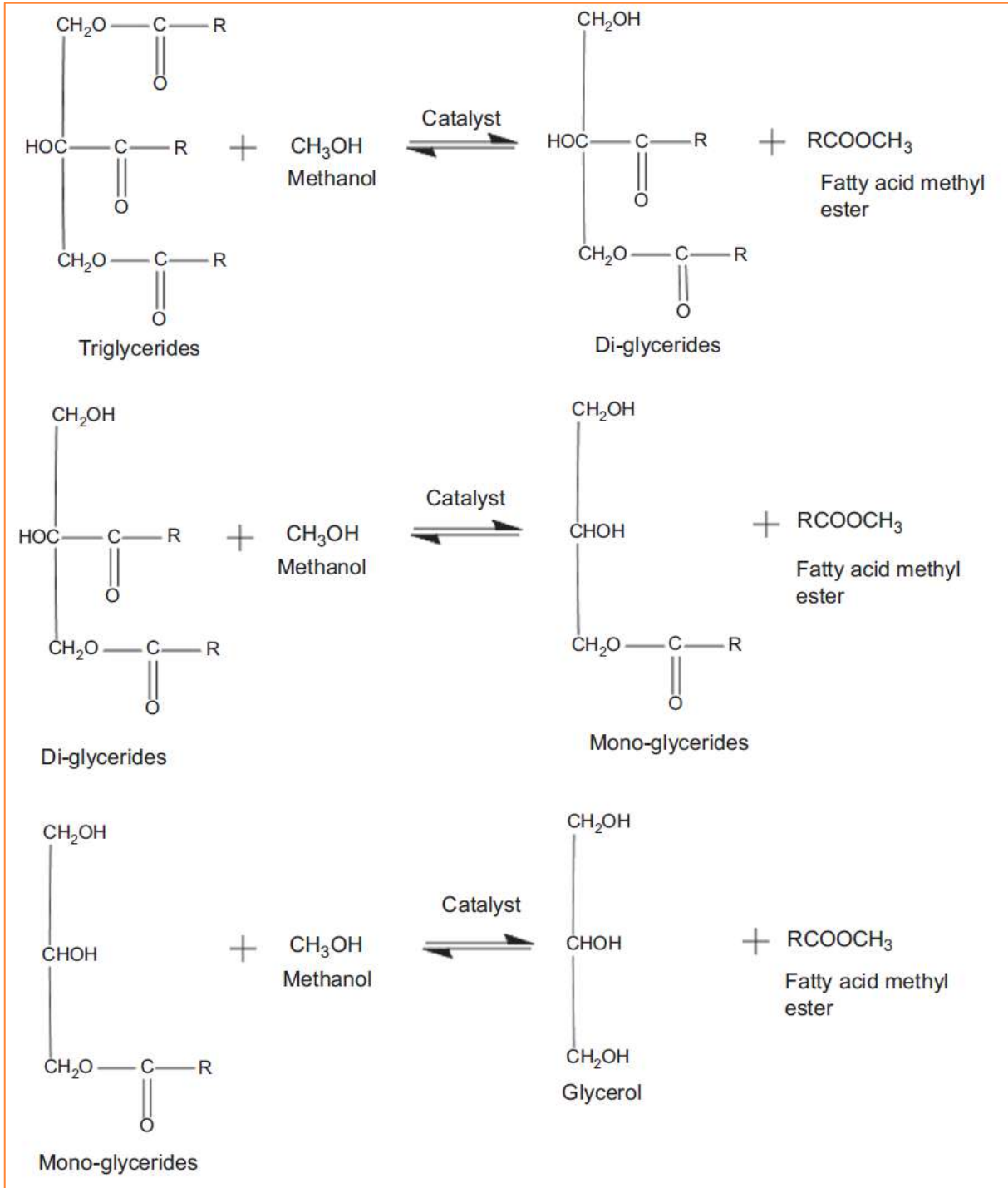
4.2.2.3.3 حساب كمية المواد المتفاعلة للأسترة التبادلية:

1.4.2.2.3.3 حساب كمية الميثانول مقابل الزيت:

تعتمد في هذه الحالة على معادلة التفاعل الكيميائي العام للأسترة التبادلية لذلك نتبع الخطوات التالية لحساب الكمية الحقيقية اللازمة للميثانول:

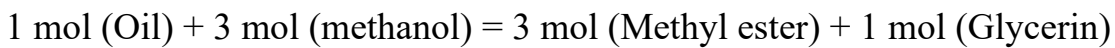


² Barreau magnétique

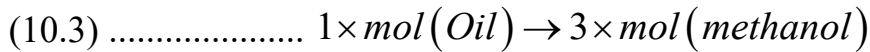


الشكل 8.3. آلية تفاعل الأسترة التبادلية [267].

من المعادلة (9.3) نستنتج ما يلي:



ومنه فان واحد مول من الزيت يقابله ثلاثة مول من الايثانول.



بما انه تجريبيا يستحيل التعامل بعدد المولات توجب علينا التحويل الى العدد الكتلي، أي حساب كتلة

واحد مول من الزيت او الكحول بالعلاقة التالية:

$$(11.3) \dots\dots\dots n = \frac{m}{M}$$

$$(12.3) \dots\dots\dots m = n \times M \Leftarrow$$

m: كتلة العينة (غ).
M: الكتلة الحجمية (غ/مول).
n: عدد المولات (مول).

من المعلوم ان الكتلة المولية للميثانول 32.04 غ/مول لذلك بتطبيق العلاقة (12.3) نستطيع حساب الكتلة مقابل لـ 3 مول من الميثانول.
تطبيق عددي:

$$m_{\text{ل و ن ا ث م}} = 3 \times 32.04 = 96.12$$

$$96.12 \text{ غ} = m_{\text{ل و ن ا ث م}} \Leftarrow$$

اما بالنسبة للزيت (زيت الـ ج. كركاس) وبما انه عبارة على خليط من الاحماض الدهنية لذلك توجب أولا حساب متوسط الكتلة المولية لهذا الخليط. استنادا لنتائج تركيبة الزيت المدروس ونسبة كل مكون من مكوناته يمكن حساب متوسط الكتلة المولية بالعلاقة التالية:

$$(13.3) \dots\dots\dots M_{\text{melange}} = \sum_{i=1}^n x_i \times M_i$$

$$(14.3) \dots\dots\dots M_{\text{OilJatropha}} = x_{\text{Palmitic}} M_{\text{Palmitic}} + x_{\text{Oleic}} M_{\text{Oleic}} + x_{\text{Stearic}} M_{\text{Stearic}}$$

تطبيق عددي:

$$M_{\text{OilJatropha}} = 11.2 \times 256.4 + 65.9 \times 282.47 + 8.5 \times 284.48$$

$$M_{\text{OilJatropha}} = 239.04533 \text{ g/mol}$$

بعد حساب متوسط الكتلة المولية لزيت الـ ج. كركاس يمكننا حساب كتلة 1 مول من الزيت وذلك بتطبيق العلاقة (12.3).
تطبيق عددي:

$$m_{\text{ت ي ز}} = 1 \times 239.04533 = 239.04533 \text{ g}$$

$$239.04533 \text{ غ} = m_{\text{ت ي ز}} \Leftarrow$$

تم وزن في هذه الدراسة 20 غ من الزيت مع اخذ نسبة 1:6 (ميثانول/الزيت) [268] (الملحق 01 الفقرة 2.1)، من هذه المعطيات نستطيع حساب الكمية الفعلية للميثانول اللازمة في هذه التجربة: لدينا:

$$239.04533g_{(Oil)} \rightarrow 96.12g_{(Methnol)}$$

$$20_{(Oil)}g \rightarrow m_{(Methnol)}g$$

بتطبيق القاعدة الثلاثية نجد ما يلي:

$$m_{(Methnol)} = \frac{20 \times 96.12}{239.04533} = 8.042g$$

الكمية النهائية تساوي:

$$m_{Methnol}^{final} = 6 \times 8.042 = 48.252g$$

2.4.2.2.3.3 حساب كمية المحفز:

نحسب كمية المحفز بالنسبة 1% [268] من كتلة الزيت بالعلاقة التالية:

$$(15.3) \dots\dots\dots m_{KOH} = x_{KOH} \times m_{Oil}$$

نتحصل على كمية المحفز من العلاقة رقم (11) نجد:

$$m_{KOH} = x_{KOH} \times m_{Oil}$$

$$m_{KOH} = 0.01 \times 20 = 0.2g$$

الجدول رقم (5.3) يلخص النسبة وكمية المواد المستخدمة في تفاعل الاسترة التبادلية:

جدول 5.3: النسب وكمية المواد المستخدمة لتفاعل الاسترة التبادلية.

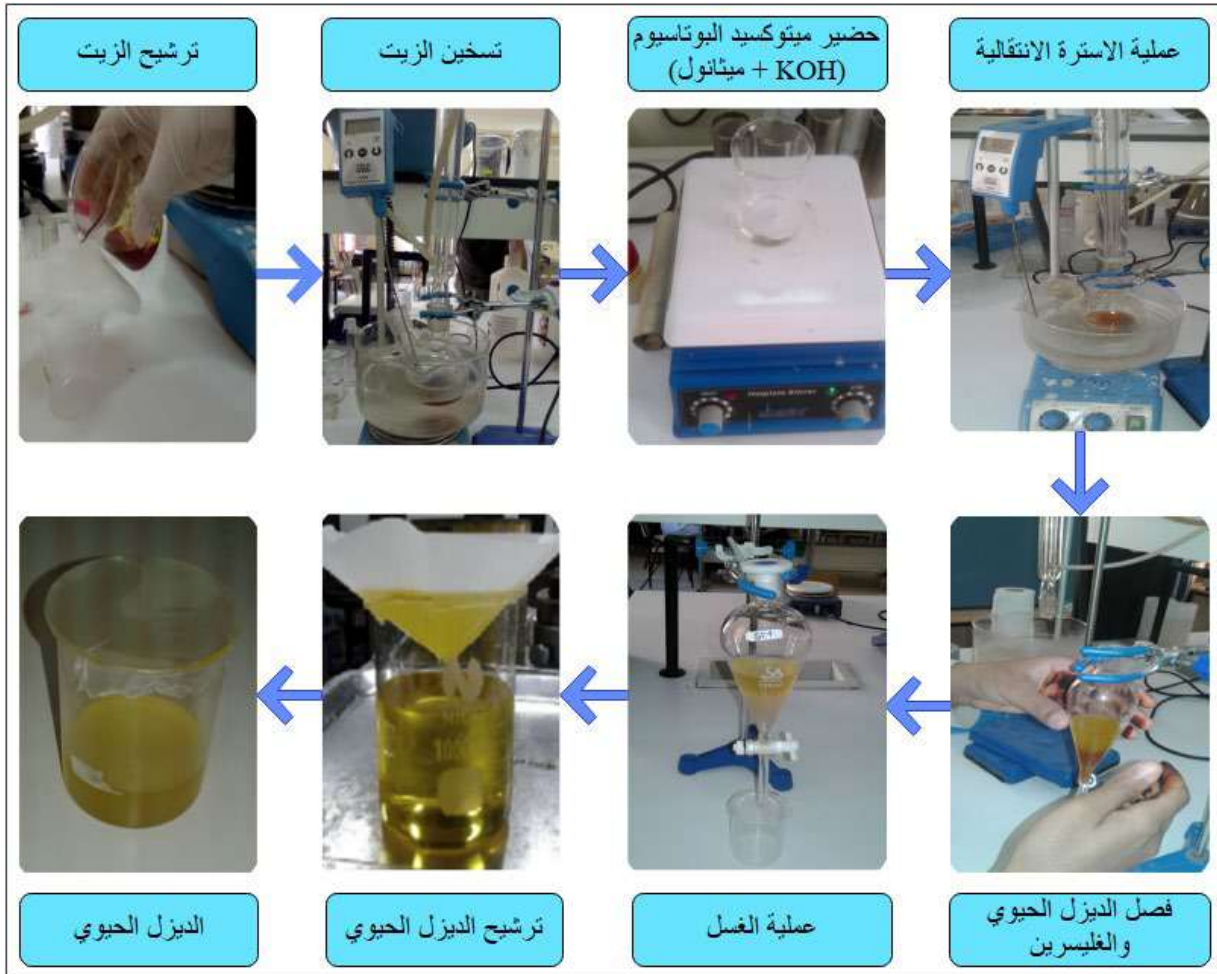
المواد	النسبة الكتلية %	m (الميثانول) غ	m (الزيت) غ	m KOH غ
الكمية	1:6 ميثانول و 1% KOH (كما هو موضح في الفقرة 3.2.2.3.3)	48.252	20	0.2

5.2.2.3.3 تفاعل الاسترة التبادلية:

قمنا في هذا الجزء بإتباع الخطوات تفاعل الاسترة التبادلية التالية:

قمنا بترشيح الزيت المستخلص لإزالة أي جزيئات صلبة ثم وضعنا كمية من الزيت في دورق ذو حجم 250 مل ونسخنه الى ان يصل درجة حرارة 55 م° (من اجل نزع الماء). وقمنا بمزج المادة المحفزة (KOH) في الميثانول إلى أن تنحل بشكل كامل وتتحول الى ميتوكسيد البوتاسيوم بواسطة خلاط مغناطيسي.

ووضعنا محلول ميتوكسيد البوتاسيوم في زيت تدريجيا ونثبت درجة حرارة 65 م° ونترك التفاعل لمدة ساعتين الشكل 8.3.



الشكل 9.3. مخطط يوضح مراحل انتاج الوقود الحيوي عن طريق تفاعل الاسترة التبادلية.

1.5.2.2.3.3 الفصل (الشكل 9.3):

نضع الخليط في قمع الفصل لفصل الديزل الحيوي والجليسرين لمدة ساعتين او أكثر بدون تحريك (من اجل تفادي اختلاط الديزل الحيوي مع الجليسرين).

2.5.2.2.3.3 الغسيل (الشكل 9.3):

بعد فصل الجليسرين عن الديزل الحيوي نقوم بغسله باستخدام الماء الدافئ ويترك مزيج الديزل الحيوي والماء ليستقر، من اجل التخلص من آثار الصابون أو الجليسرين المتبقي في طبقة الوقود الحيوي ثم نكرر العملية مرتين ونضيف له كمية من حمض الخل الممدد حيث يقوم حمض الخل بمعادلة بقايا KOH المنحلة بالديزل الحيوي.

3.2.3.3 مردود تفاعل الاسترة التبادلية:

يعبر مردود تفاعل الاسترة التبادلية على الكمية المنتجة من الديزل الحيوي في الظروف التجريبية المذكورة سابقا. ويتم حسابه بالعلاقة التالية [269]:

$$(16.3) \dots\dots\dots R\% = \frac{M_{\text{Biodiesel}}}{M_{\text{Oil}}} \times 100$$

R : مردود تفاعل الاسترة التبادلية %.

M_{BD} : كتلة الديزل الحيوي غ.

M_{Oil} : كتلة الزيت قبل بداية التفاعل غ.

4.2.3.3 الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج:

في هذه الدراسة، تم تحديد جودة وقود الديزل الحيوي من زيت بذور الجاتروفا كركاس من خلال التحليلات الفيزيوكيميائية لبعض الخصائص الحيوية مثل الكثافة، نقطة الوميض، اللزوجة، الرماد الكبريتي، رقم السيستان، محتوى الماء، رقم الحمض، قيمة اليود وقيمة السرعات الحرارية.

تم تحديد محتوى الماء، الكثافة، اللزوجة، قيمة الحمض، رقم التصبن وقيمة اليود بنفس الطرق والمعايير التي استعملت مع إيجاد خصائص زيت الـ ج. كركاس والمذكورة في الفقرات من 5.1.3.3 الى 1.6.1.3.3، 3.6.1.3.3 الى 6.6.1.3.3 على التوالي، اما فيما يلي سنذكر طرق وبرتوكولات المخبرية او الحسابية كل حسب الحاجة لباقي الخصائص، وهي كالآتي:

1.4.2.3.3 رقم السيستان (CN):

إنه رقم بلا أبعاد يصف جودة اشتعال الوقود في حالة ثابتة [270]. هذه إحدى المعلمات التي يتم أخذها في الاعتبار عند اختيار وقود الديزل الحيوي. يلعب الوقود الذي يحتوي على نسبة أعلى من CN دورًا في بدء تشغيل المحرك بسرعة وضمان الاحتراق السلس في المحرك [271]. ولكن تم انتقاد رقم السيستان في السنوات الأخيرة لعدم عكسه ظروف الاشتعال بدقة في محركات الشحن التوربينية الحديثة، خاصة مع الوقود الحيوي [272]. تحدد معايير وقود الديزل الحيوي الأسترالية والأوروبية CN إلى قيمة دنيا تبلغ 51، في حين أن معيار ASTM يحددها إلى حد أدنى قدره 47 [273]. كما تم تحديد رقم السيستان (CN) في هذه الدراسة بواسطة المعادلة التي تعتمد على قيمة اليود (IV) وقيمة التصبن (SV) وتكتب على الشكل التالي [274]، [275]:

$$(17.3) \dots\dots\dots CN = 46.3 + \frac{5458}{SV} - 0.225 * IV$$

2.4.2.3.3 بقايا الكربون (Cr):

تميل زيوت الوقود إلى تكوين رواسب كربونية عند حرقها. تعطي قيمة بقايا الكربون للوقود مؤشراً تقريبياً لقابلية الاحتراق وميول تكوين الرواسب للوقود. هناك طريقتان لتحديد بقايا الكربون: اختبار كونرادسون (Conradson) واختبار رامسبوتوم (Ramsbottom). تعتبر مواعد التفتيت غير حساسة عملياً لبقايا الكربون للوقود [276].

تم استخدام الفرن الكهربائي (الصورة 6.3) لمعرفة كمية بقايا الكربون في وقود الديزل الحيوي. تم إجراء القياس وفقاً لطريقة ASTM D4530 (نتائج الاختبار لهذه الطريقة معادلة لكلا الطريقتين السالف ذكرهما). تم استخدام هذه الطريقة لمعرفة كمية بقايا الكربون الموجودة بعد الاحتراق لعينة الوقود الحيوي. الغرض منه هو تقديم بعض المفاهيم المتعلقة بخصائص تكوين الرواسب للوقود الحيوي النسبية. في هذه التجربة، تم وضع 5 جرام من الوقود الخالي من الرطوبة في البوتقة بعد وزنها وهي فارقة. ثم تم وضع البوتقة في وسط الجهاز. بعد ذلك، تم إغلاق البوتقة بغطاء، وتم عمل مخرج للأبخرة لتصريفها بمجرد تشكلها. تم تشغيل الفرن الكهربائي لتسخين عينة الوقود. في هذه الحالة، تمت زيادة درجة حرارة الفرن ببطء حتى 500 م° بمعدل تسخين 10 م° في الدقيقة وتم الحفاظ على درجة الحرارة هذه لمدة 15 دقيقة لتأكد من تمام احتراق عينة الوقود الحيوي. بعدما تمت عملية الاحتراق للوقود، تم إغلاق مصدر الطاقة للفرن حتى وصلت درجة حرارة العينة إلى 150 م°. عند هذه الدرجة تم إخراج البوتقة من الفرن وحفظها في مجفف لتقليل درجة حرارة العينة إلى 30 م°. أخيراً، تم وزن بقايا الكربون (الرواسب) بميزان دقيق، وكانت عملية حساب النسبة المئوية الكتلية لبقايا الكربون على النحو التالي:

$$(18.3) \dots\dots\dots Cr \% = \frac{A}{W_s} \times 100$$

A = بقايا الكربون (الرواسب)، غ.

W_s = وزن العينة، غ.



الصورة 5.3. توضح الجهاز المستعمل في هذه التجربة لقياس بقايا الكربون.

3.4.2.3.3 السعرات الحرارية (القيمة الحرارية³ HHV)

القيمة الحرارية هي كمية الطاقة التي يتم إطلاقها أو إنتاجها عند احتراق 1 كجم من الوقود أو حرق أي مادة أخرى في وجود الأكسجين. وحدة النظام الدولي للوحدات هي كيلو جول/كغ. في الأساس، ينتج مول واحد من الهيدروجين، وهو 2 غ، حوالي 30 سعرة حرارية من الحرارة، بينما ينتج 1 مول من الكربون، أي 12 غ، حوالي 96 سعرة حرارية. لذلك، ينتج الهيدروجين 15 سعراً حرارياً لكل غرام بينما ينتج الكربون حوالي 8 سعرات حرارية لكل غرام [267].

تجريبيًا يتم استخدام مسعر القنبلة لقياس القيمة الحرارية لعينات الوقود الحيوي، وفقاً لمعيار ASTM D240، لكن يمكن أيضاً تحديد القيمة الحرارية الإجمالية للوقود الحيوي على النحو التالي [277]:

$$HHV = 49.43 - (0.041 \times SV + 0.015 \times IV) \dots\dots\dots (19.3)$$

SV : رقم التصين ملغ KOH/غ.

IV : قيمة اليود غ/100غ.

4.3 الخاتمة

تمت جدولة نتائج جميع الاختبارات التي تم إجراؤها على كل من عينات الزيت ووقود الديزل الحيوي. وتضمنت النتيجة اللزوجة الحركية، الكثافة، محتوى الماء، قيمة الحمض، قيمة اليود والمردود لكلاهما، اما نقطة الوميض، رقم السيستان، بقايا الكربون والقيمة الحرارية لوقود الديزل الحيوي فقط. هناك العديد من العوامل التي يمكن أن تؤثر على محصول الزيت المستخلص وجودته مثل أنواع المواد الأولية ومحتوى الأحماض الدهنية الحرة التي تتأثر بوقت الجني وكيفية التخزين وطبيعة المناخ والمكان الجغرافي وكمية المذيب ونوعه ودرجة الحرارة والطرق الاستخلاص المتبعة. اما بالنسبة لوقود الديزل الحيوي وباعتماد طريقة الأسترة التبادلية لإنتاجه وهي في الأساس تفاعل متسلسل. فان العوامل المأثرة هي أنواع المواد الأولية المواد الخام (الزيت) ونسبة الأحماض الدهنية الحرة أو الماء، فإن المحفز القلوي سوف يتفاعل مع الأحماض الدهنية الحرة لتكوين الصابون، ويمكن للماء تحلل الدهون الثلاثية إلى دهون ثنائية وتشكيل المزيد من الدهون الحرة الأحماض. هذه تفاعلات غير مرغوب فيها تقلل من عائد منتج الديزل الحيوي. لذلك، بعد تكرير المواد الخام، يجب معالجة المواد الأولية الحمضية مسبقاً لمنع تفاعل التصين. أيضاً كمية الكحول والنسبة المولية وأنواع وتركيز المحفزات المستخدمة ووقت التفاعل ودرجة حرارة التفاعل تؤثر على محصول وقود الديزل الحيوي وجودته. في هذه الدراسة، تم استخدام النسبة المولية كفيد على زيت الجاتروفا كركاس لإنتاج وقود الديزل الحيوي.

³ HHV: Higher Heating Value.

الفصل الرابع:

النتائج ومناقشتها

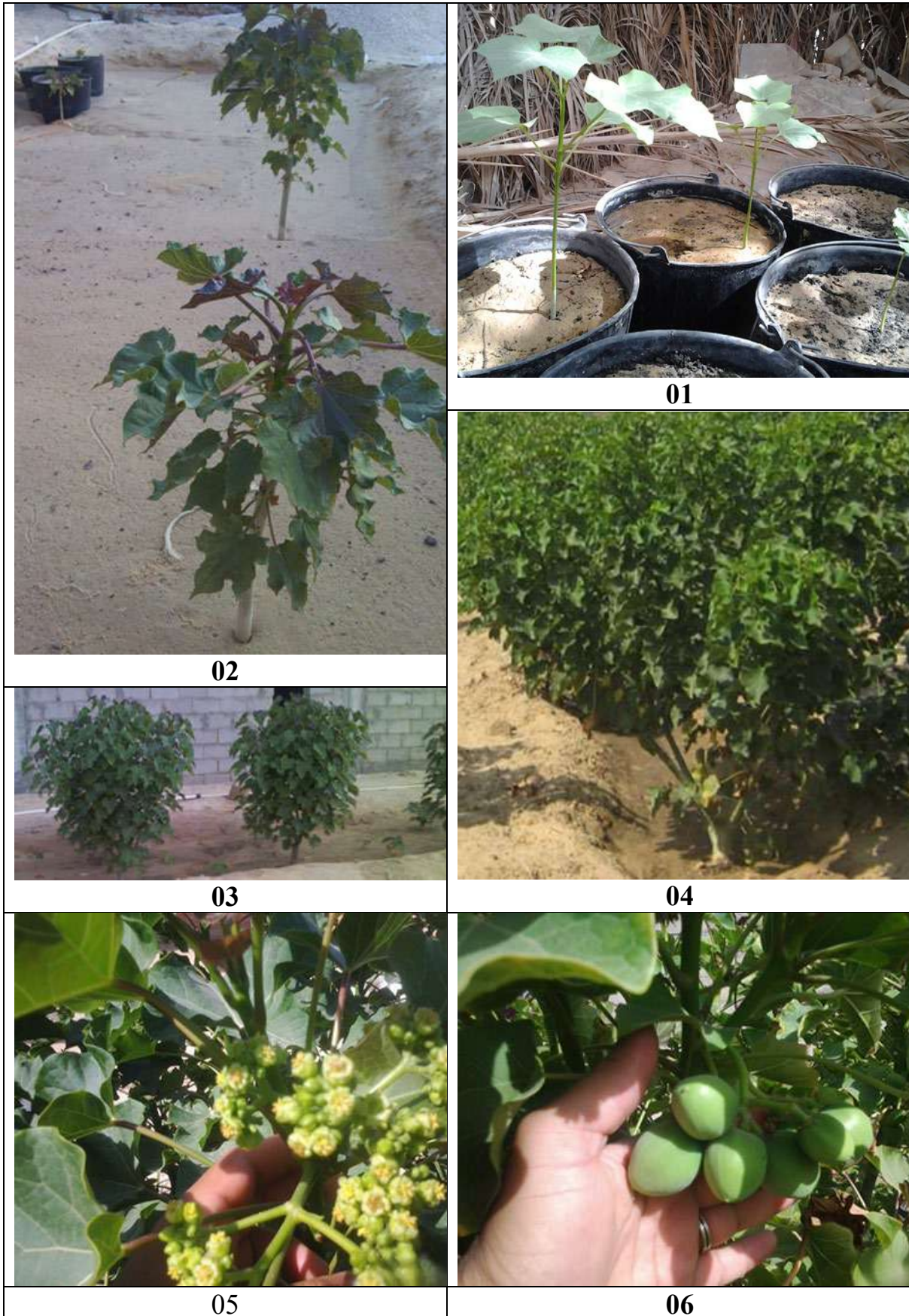
في هذا العمل بعد الانتهاء من استخلاص زيت الجاتروفا كركاس وتحويله إلى وقود الديزل الحيوي عن طريق عملية الاسترة التبادلية، وتحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهما. تمت دراسة جودة الزيت المستخلص وفي أي المجالات يمكن استخدامه، وذلك من خلال خصائصه وبالمقارنة مع دراسات سابقة. أيضا تمت دراسة جودة وقود الديزل الحيوي الناتج عن الاسترة التبادلية الأساسية من زيت نبات الجاتروفا كركاس (*Jatropha Curcas L.*) المزروعة في الجنوب الشرقي الجزائري، وتم التحقق من تأثير تركيبة المواد الخام على الخصائص مثل الكثافة واللزوجة وعدد السيتان وقيمة اليود.

4 النتائج والمناقشة:

1.4 زراعة الجاتروفا كركاس:

اشارت الكثير من البحوث العلمية الى ان نبات الجاتروفا كركاس يمكنه ان يبقى نابتا عند توفر معدل سنوي للأمطار بحدود 250 ملم سنويا ولكي يكون انتاج هذا النبات انتاجا مقبولا لايد من توفر كمية الامطار تبلغ 600 ملم سنويا [40]، [30]، وهذا العامل لا تستطيع المنطقة التي تمت فيها الدراسة توفيره كونها تقع ضمن المناطق الجافة من الجزائر اذ كانت معدلات الامطار السنوية اقل من 200 ملم سنويا في ولاية الوادي. لهذا يتبين ان كمية الامطار لا توفر حتى الحدود الدنيا لحاجة النبات لغرض الاستمرار في النمو والتي تقل كثيرا عن حاجته، لذلك ومن اجل الحفاظ على النبات ضمان الانتاج تم معالجة النقص الحاصل في معدلات الامطار باستخدام مياه الري التي يمكن الحصول عليها من المياه الجوفية كالأبار المتوفرة في المنطقة، لذا استجاب نبات الجاتروفا كركاس لعملية الري وحقق إنتاجًا جيدًا. في هذه الدراسة، يمكن للهكتار أن ينتج 1.1 طن من الزيت لكل هكتار. بالمقارنة مع الهند والوطن الأم وبلد آسيوي يتمتع بمناخ ملائم وظروف طبيعية لنمو هذا النبات، الذي يقدر إنتاجه بـ 1.5 طن للهكتار [75]، يمكننا اعتبار النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية . يبين الشكل 1.4 مخطط استنبات شجيرة الجاتروفا كركاس من مرحلة البذر الى الانتاج في جنوب شرق الجزائر.

لذلك هذا يتيح استعمال نبات الجاتروفا كركاس في مجالات عدة كما تم ذكره في الفصل الاول؛ والتي تساهم في تنمية الاقتصاد وزيادة دخل المزارعين، وذلك على غرار الطاقة المتجددة المنتجة من الكتلة الحيوية على سبيل المثال.



الشكل 1.4. صور لنبات الجاتروفا كركاس توضح مراحل استنبات ونمو شجيرة الجاتروفا كركاس من البذور الى الانتاج.

الصورة الأولى نجاح عملية الانبات في دلاء البولي ايثيلين. الصورة الثانية نجاح ونمو نبتة الجاتروفا في موقع الدراسة بعد مرور سنة واحدة. الصورة الثالثة نمو النبتة بشكل جيد وهي في السنة الثانية من العمر. الصورة الرابعة تمثل النبتة في عمرها أكثر من ثلاث سنوات. الصورة الخامسة تمثل نبتة الجاتروفا في حالة الازهار. الصورة السادسة والأخيرة نبتة الجاتروفا في حالة عقد الثمار.

2.4 توصيف بذور الجاتروفا كركاس:

تمت اول عملية للحصاد، في نهاية يوليو تم جمع الثمار الناضجة، لكنها لم تكن كلها دفعة واحدة وهذا يشير الى النمو الجيد وسلامة النبات. كان لون الثمار الناضجة الجافة ذات اللون البني، كما يشير اللون الأصفر الى بداية النضج. ثم تجفف أكثر في مكان جيد التهوية في درجة حرارة الغرفة (الصور أ في الشكل 2.4). في النهاية، تم تقشير الثمار لفصل القشرة على البذور كما هو موضح في الصور ب في الشكل 2.4.

الجدول 1.4. توصيف بذور الجاتروفا كركاس.

التوصيفات التحليلية	وزن 100 بذرة	حجم 100 بذرة	اللون	الرائحة	الطعم
القيم	55.49 غرام	129 ملل	أسود بني باهت	غير مقبول	مر



الشكل 2.4. صور لفاكهة الجاتروفا كركاس توضح مراحل النضج، ج. الفاكهة في طور النضج، أ. الفكهة جافة، ب. البذور جافة.

تم تقييم خصائص بذور الجاتروفا كركاس من حيث الخصائص الفيزيائية. ترد الخواص الفيزيائية لـ 100 بذرة في الجدول 1. توجد مواد كيميائية إما في اللب أو النواة التي تتأثر بشكل مباشر بالمعاملات الفيزيائية. يرتبط متوسط وزن وحجم البذور ارتباطاً مباشراً بصلاية البذور، مما يؤثر بشكل مباشر على عملية التحليل. يمكن للخصائص الفيزيائية لبذرة واحدة مقارنة ببذرة أخرى أن تميز جودة منتج البذور الخاصة بها. تم الإبلاغ عن أن سمية البذور ورائحتها الكريهة ناتجة عن البروتين.

تم تقييم الخواص الفيزيائية لبذور الجاتروفا كركاس ذات اللون البني المائل إلى الأسود الباهت (بدون قشور). يسرد الجدول 1.4 الخصائص الفيزيائية للبذور.

3.4 استخلاص الزيت:

في مراجعاتهم الشاملة لتقنيات استخلاص الزيت وتقنيات إنتاج الديزل الحيوي، عتاباني (Atabani) وآخرون [278] أشاروا إلى أن استخلاص الزيت باستخدام طريقة Soxhlet ون-الهكسان كمنزيب يؤدي إلى أعلى عائد للزيت، مما يجعله المنزيب الأكثر شيوعاً. معظم الزيوت قابلة للذوبان في الهكسان وهذا يساهم في قدرتها الفائقة على تحقيق عائد أعلى [279]. لذلك في هذه الدراسة، استخدمنا ن-الهكسان لاستخلاص الزيت من بذور الجاتروفا كركاس بطريقة Soxhlet. ومع ذلك، يفضل استخدام الإيثانول كمنزيب من حيث الصحة البيئية وكونه متجددًا لأن الإيثانول أقل سمية ومتجددًا (يمكن إنتاجه من مصادر متجددة عن طريق تخمير الأعلاف المحتوية على السكر أو مواد العلف النشوية أو مواد اللجنوسليلوز) [280]. أظهر النتائج أن الزيت الذي تم الحصول عليه باستخدام ن-هكسان لونا مصفراً واضحاً. وظهرت أيضاً أن لب بذور الجاتروفا يحتوي على 63.15% من زيت، مع العلم وجدنا أن وزن اللب يمثل 41.8%. بينما يمثل وزن القشرة (قشرة البذرة) 21.35% من الوزن الإجمالي للبذور كما هو مفصل في الجدول 2.4. تم تحضير هذا الزيت لاختبار الخصائص الفيزيائية الكيميائية ولإنتاج الديزل الحيوي.



الصورة 1.4. تمثل الزيت المستخلص من زيت بذور الجاتروفا كركاس.

بعد أن تمت عملية الاستخلاص، من المهم الإشارة إلى كمية البذور الموجودة في ثمار الجاتروفا كركاس. وجدنا أن الثمار تحتوي بين 3 و4 بذرات. وجدنا أيضاً، وزن البذور يمثل في المتوسط 64.85% بينما يمثل وزن القشرة (قشرة الفاكهة) ما متوسط 35.25% من الوزن الإجمالي للثمار كما هو مفصل في الرسم البياني (الجدول 2.4).

الجدول 2.4. توصيف أجزاء فاكهة وبذور الجاتروفا كركاس.

النسبة بالوزن	التوصيفات
64,85%	البذور
35,15%	قشور الفاكهة
32,27%	اللبن منزوع الرطوبة
20,35%	قشور
5,58%	الرطوبة
41,80%	الزيت
63,15%	الزيت
36,85%	باقي المادة الصلبة من اللب

4.4 التحليل الفيزيوكيميائي لزيت البذور:

تختلف خصائص الدهون والزيوت باختلاف درجة تشبع الهيدروجين أو عدم تشبعه. نتيجة لذلك، تكون الزيوت المختلفة أقل تشبعًا أو أكثر اعتمادًا على ما إذا كانت تحتوي على كمية أعلى أو أقل من تشبع الأحماض الدهنية. نتيجة لذلك، يحتاج الباحثون إلى معرفة مقدار عدم التشبع الموجود في العينة. العدد المتنوع من معلمات الاختبار مثل مؤشر اليود (Ii) وقيمة التصبن (Si) والرقم الحمضي (AV) الذي طبقناه بالفعل على العينة.

الجدول 3.4. نتائج الخصائص الفيزيوكيميائية لزيت بذور الجاتروفا كركاس.

الخصائص	الوحدة	القيمة	القيمة [75]	القيمة [281]
الكثافة عند 25 درجة مئوية	g/ml	0,915	0.933	-
اللزوجة في درجة حرارة الغرفة	mm ² /s	49.85	54.80	-
مؤشر التصبن (Si)	mg KOH/g	202,87	209.0	195
مؤشر البيروكسيد (Pi)	milliequivalents/kg	1,1	1.63	-
معامل الانكسار (28 م°)	/	1,458	1.477	-
مؤشر اليود (II)	g/100g	96,3	112	101.7
قيمة الحمض (AV)	mg KOH/g	2,9	6.16	38.2
الأحماض الدهنية الحرة (FFA)	%	1.46	-	-

يوضح الجدول 3.4 النتائج التي تم الحصول عليها من العمل التجريبي: محصول الزيت، محتوى الرطوبة، الكثافة عند 25 درجة مئوية، اللزوجة عند درجة حرارة الغرفة، مؤشر التصبن، مؤشر البيروكسيد، معامل الانكسار (28 م°)، مؤشر اليود، وقيمة الحمض، مقارنة مع الهندي والماليزي لزيت بذور الجاتروفا كركاس [75]، [281].

بذور جاتروفا كركاس هي العضو الأساسي في النبات لتخزين الزيت. وجد أن إنتاج زيت بذور الجاتروفا كركاس أعلى بنسبة 63,15% (وزن / وزن) من إنتاج محاصيل البذور الزيتية التقليدية المختلفة، بما في ذلك القطن (15.0-24.0%) وفول الصويا (17.0-21.0%)، القرطم (25.0-40.0%)، والخرذل

(24.0-40.0%) [282]. قد تكون الخصائص المناخية والجيولوجية للأماكن المختلفة هي المسؤولة عن هذا التباين في محتوى الزيت بين الأنواع والمحليات [283]. علاوة على ذلك، كان للموسم الذي جمعت فيه البذور تأثير على إنتاج زيت بذور الجاتروفا كركاس L. البذور التي يتم جمعها خلال موسم الجفاف لها تركيز أكبر. تتميز البذور التي يتم جمعها في موسم الجفاف بإنتاجية عالية من الزيت، مما يجعلها ممتازة لتصنيع وقود الديزل الحيوي والأغراض الصناعية الأخرى.

في الدراسة الحالية، كان محصول الزيت المستخلص من حبات بذور جاتروفا كركاس أعلى من تلك التي تم الإبلاغ عنها لبذور الـ ج. كركاس حيث بلغت 27 في المائة [284]، 32% [285]، [286]، [287]، و34% [288]، و43%، و47% [289] من خلال أنواع متعددة من البحث. ومع ذلك، عند مقارنتها بالعديد من محاصيل البذور الزيتية غير الصالحة للأكل لتوليد وقود الديزل الحيوي، مثل **Raphanus Sativus L**، كان إنتاج الزيت في هذا البحث أكبر. **Sapium Sebiferum L**، بنسبة 26% [290]، **Sapium Sebiferum L**، بذور المطاط Sap بنسبة 24% [291]، **Alurites Moluccana** بنسبة 20%، **Moringa Oleifera** بنسبة 25%، و **Pachira Glabra** هو 23 في المائة [287].

Ii هي وحدة قياس لمتوسط كمية عدم التشبع في الدهون والزيوت، ويتم التعبير عنها بالسنتيجرام من اليود الممتص لكل جرام من العينة [292]. بسبب محتواه العالي من الأحماض الدهنية غير المشبعة، يحتوي الزيت على قيمة عالية من اليود (الجدول 3.4).

تم اكتشاف أن AV مفيد في مجموعة متنوعة من الخصائص الكيميائية والفيزيائية للدهون والزيوت، بالإضافة إلى الاستخدامات الفسيولوجية وكإجراء لضمان الجودة للهدرجة. تشمل هذه التطبيقات الاستخدام في معايير الديزل الحيوي وتقييم ثبات الأكسدة. قيمة اليود من الجاتروفا التي تم جمعها من منطقة الواد (الجزائر) أعلى بنسبة 96.3% من 105.20% في نيجيريا و135.85% في ماليزيا [74].

كان محتوى الرطوبة (الجدول 3.4) لنواة الجاتروفا منخفضة عند 5.58%. هذا يمكن أن يسمح بتخزين البذور لفترة طويلة دون تغيير تركيبها الكيميائي وإمكانية منخفضة للتلوث الميكروبيولوجي [293]. من التجربة، كانت كثافة الزيت حوالي 0.915 جم / مل أقل قليلاً من تلك التي تم الحصول عليها من المحصول الهندي.

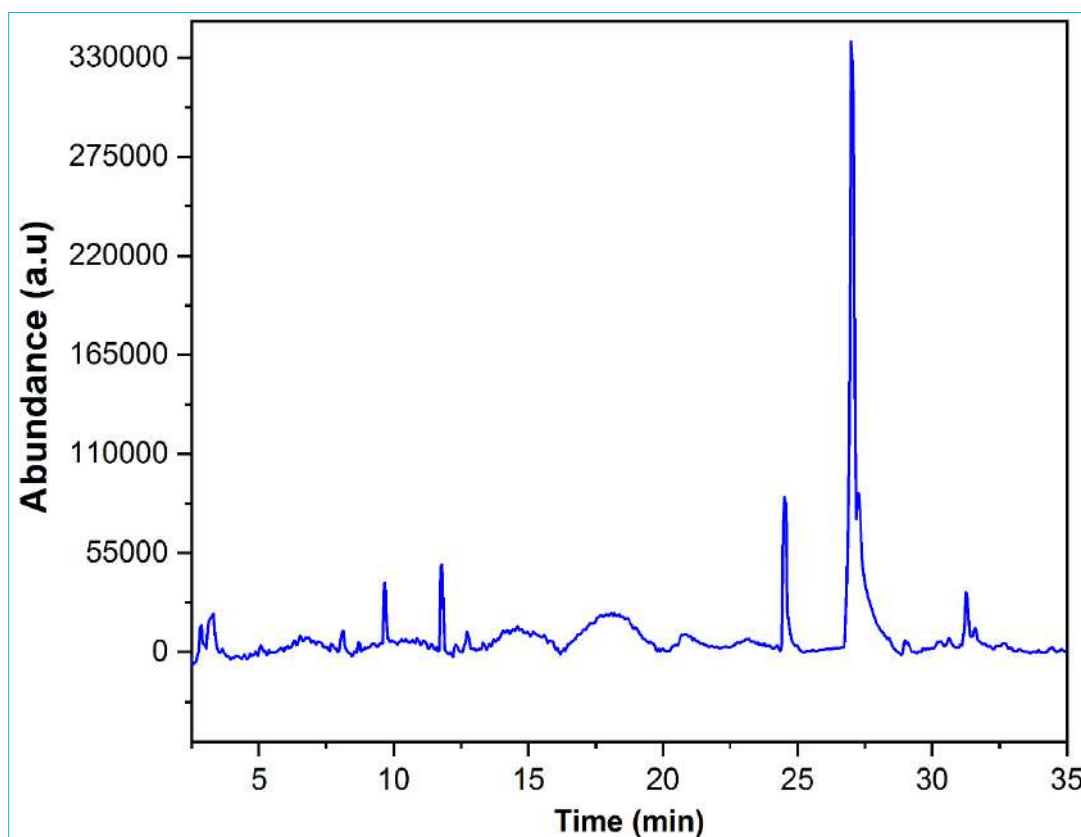
تؤثر الكتلة الجزيئية الكبيرة للزيوت النباتية وطول سلسلة الأحماض الدهنية ودرجة عدم التشبع على اللزوجة [294]. فيما يتعلق بقيمة اللزوجة في هذه الدراسة (49.85 مم²/ثانية)، كانت في نفس النطاق كما ذكره أكبر (Akbar) وآخرون [292]. تبلغ قيمة مؤشر التصين 202.87 ملغ / KOH غ، مما يعني أن العينة المدروسة تحتوي على وزن جزيئي مرتفع من الأحماض الدهنية.

مؤشر البيروكسيد هو 1.1 ميكا / كغ، بينما أكبر وآخرون. يساوي 1.63 ملي مكافئ/كغ. إنه ببساطة مؤشر على أن الزيت أقل عرضة لتحلل الدهون بسبب الأكسدة في الرابطة المزدوجة للأحماض الدهنية غير المشبعة التي تسبب النخر في درجة حرارة الغرفة [295]، [296].

تم العثور على مؤشر انكسار الزيت ومؤشر اليود 1.458 و 96.3 غ/100 غ، على التوالي، وهو مؤشر على الهيمنة العالية للأحماض الدهنية غير المشبعة طويلة السلسلة [294]. تم الحصول على قيمة الحمض عند 2.9 ملغ KOH/غ، مما يعني أن الزيت يمكن أن يكون صالحًا للأكل نظرًا لأنه أقل من الحد الأقصى المقبول البالغ 4.0 ملغ KOH/غ.

5.4 تحليل مطياف الكتلة اللوني للغاز (GC-MS):

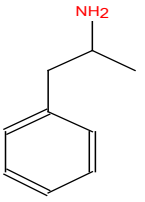
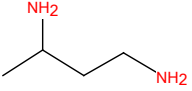
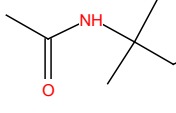
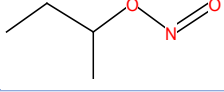
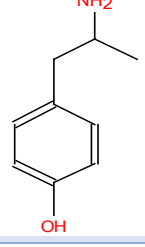
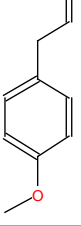
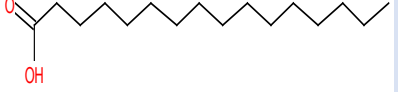
كان تحديد تركيبة الزيت المستخلص من نواة بذور الجاتروفا عن طريق GC-MS سمة مهمة أخرى أجريت في هذه الدراسة. حيث أظهر تحليل GC-MS (الشكل 3.4) الأحماض الدهنية والتي تمثل النسبة الأكبر من إجمالي المواد المستخرجة (85.6%) وهي حمض الأوليك، وهو حمض احادي غير مشبع، باعتباره الأكثر وفرة (65.9%)، يليه حمض بالميتيك وحمض الستياريك (11.2% و 8.5%، على التوالي)، وهما احماض دهنية مشبعة (الجدول 4.4)، وتمت مقارنة هذه النتائج مع تلك التي حصل عليها شيانغ وآخرون [295]. تعتبر مختلف الزيوت النباتية مادة خام محتملة لإنتاج الوقود الحيوي ولكن جودة الوقود تتأثر بتركيبه الزيت [297]. من ناحية أخرى لكي يكون الوقود الناتج مثاليًا، يجب أن يكون الزيت النباتي منخفض التشبع ومنخفض عدم التشبع المتعدد، أي أن يكون مرتفعًا في الأحماض الدهنية الأحادية غير المشبعة [298]. وهذا يؤكد احتمالية إنتاج وقود حيوي من هذا الزيت ذات جودة عالية.

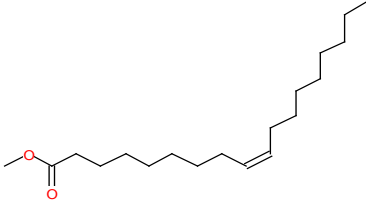
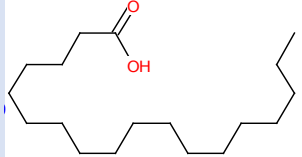
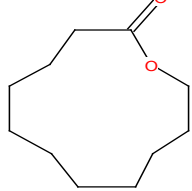
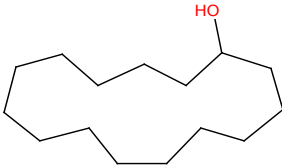


الشكل 3.4. كروماتوجرام GC-MS لزيت بذرة جاتروفا كركاس L.

تم تحديد أيضا في تركيبة الزيت ديكسترو أمفيتامين (Dextroamphetamine) و 1,3-Butanediamine و Sec-Butyl nitrite Phenol, 4-(2-Acetamide, N-(1,1,3,3-tetramethylbutyl) و aminopropyl-(Estragole)، والتي تمثل في مجملها 14.4% من إجمالي المواد المستخرجة، وهي مواد لها فوائد متعدد مع الاخذ بعين الاعتبار لسميتها. نأخذ على سبيل المثال الاستراغول (Estragole) وهو الأكثر وفرة في هذه الأخيرة بنسبة 4.2% وهو مركب عطري ذو رائحة حلوة وعشبية مثل اليانسون والشمر [299]. وهذا يعزز احتمالية استعمال هذا الزيت في مجالات متعددة.

الجدول 4.4. المكونات النباتية التي تم تحديدها بواسطة GC-MS في مستخلص n-hexane من الجاتروفا كركاس.

الرقم	مساحة الذروة (%)	البنية الجزيئية	الكتلة المولية غ/مول	اسم المركب	وقت المكوث
1	1.2		135,2062	Dextroamphetamine	3.41
2	0.9		88,15148	1,3-Butanediamine	3.73
3	1.4		171.2798	Acetamide, N-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)	3.81
4	1.9		103.12	Sec-Butyl nitrite	3.92
5	1.2		151.21	Phenol, 4-(2-aminopropyl)-	8.79
6	4.2		148,2017	Estragole	12.52
7	11.2		256,4	n-Hexadecanoic acid (Palmitic acid)	25.43

27.85	9-Octadecadienoic acid, methyl ester (Oleic acid)	282,47		65.9	8
28.09	Octadecadienoic acid (Stearic acid)	284,48		8.5	9
29.72	Undecanoic acid, hydroxy-, lactone	184.2753		0.8	10
31.9	Cyclopentadecanol	226.40		2.8	11

6.4 إنتاج وقود الديزل الحيوي:

تم تقييم جودة وقود الديزل الحيوي وفقاً للمعيار الأوروبي EN 14214 او المعيار الأمريكي ASTM D6751. تحدد هذه المنظمات المعايير التي يجب أن تفي بوقود الديزل الحيوي ذي الجودة العالية، أو خليط الديزل والديزل الحيوي، لاستخدامه في النقل. كما تم استخدام طرق مماثلة لتوصيف الزيوت النباتية.

1.6.4 الاسترة التبادلية (transestérification):

أولاً، في هذا البحث، تم إجراء مراجعة تجريبية للاسترة التبادلية الأساسية في المفاعل المخبري، بهدف تحسين متغيرات العملية الرئيسية: كمية ونوع المحفز الأساسي المتجانس، ومعدل التحريض (التحريك)، ونسبة الميثانول المولية ودرجة حرارة التفاعل. تم اختيار الزيت التجاري لعباد الشمس لعملية التحسين لأنه قدم خصائص وسطية لزيت قيد الدراسة.

نظراً لأن معظم خصائص وقود الديزل الحيوي تعتمد على المواد الخام المستخدمة، وعلى وجه التحديد، على محتواه من الأحماض الدهنية [278]، فقد تم إجراء دراسة عن جودة وقود الديزل الحيوي من حيث المادة الخام، باستخدام ظروف التفاعل الأكثر ملاءمة.

في هذا العمل، تم إجراء الاسترة التبادلية للزيت مع الميثانول عند 60 م° بنسبة 1:6 مول (ميثانول/زيت) لمدة ساعتين. ومع كمية المحفز (هيدروكسيد البوتاسيوم) بنسبة 1% (وزن/وزن) من الكتلة الأولية للزيت بذور الـ ج. كركاس، كشفت النتائج أن الحد الأقصى لإنتاج إستر ميثيل الأحماض الدهنية بلغ

89.76%. علاوة على ذلك، فإن عملية الأسترة التبادلية بتركيز محفز قاعدي أعلى من 1.5% (وزن / وزن) ستزيد من تكوين الصابون.

مما يعني ان كمية المحفز لها تأثير كبير على مردود الوقود الحيوي، وكذلك نسبة الميثانول ودرجة حرارة التفاعل وسرعة الخلط العالية لتحسين سطح الاتصال بين المتفاعلات.

2.6.4 جودة وقود الديزل الحيوي:

بعد الأسترة التبادلية، مع استخدام محفز قلوي (قاعدي) للحصول على منتج الديزل الحيوي النهائي. وبعد التنقية، تم تمييز المنتج لتقييم جودته، مع مراعاة تسعة معايير رئيسية للجودة؛ النتائج معروضة في الجدول 4.4. من النتائج، يمكننا ملاحظة خاصيتين: اللزوجة الحركية لا تتوافق مع معايير جودة وقود الديزل الحيوي الأوروبي، وبقايا الكربون لا تتوافق مع معايير جودة وقود الديزل الحيوي الأوروبي والأمريكي. أظهرت الخصائص الثمانية الأخرى التي تم تقييمها منتجًا عالي الجودة وتتوافق مع النتيجة التي قدمها جيببترز (غوببترز) وآخرون [92].

فيما يتعلق بنقاء المنتج، الذي تستدل عليه اللزوجة الحركية، يمكننا أن نرى أنها تنتمي الى المجال المطلوب لمنتج عالي الجودة لكن في درجة حرارة مختلفة، وبما ان اللزوجة تتأثر بدرجة الحرارة عكسياً لذلك لو نرفع درجة الحرارة بـ 10 م° فان النتيجة ستكون خارج مجال الجودة المطلوب. نظرًا لأن هذا زيت خام، ولم يتم تنفيذ أي خطوات معالجة مسبقة إضافية، فمن المحتمل أن تكون الشوائب المتبقية قد أدت إلى النتائج التي تم الحصول عليها. ينطبق ذلك أيضا على بقايا الكربون.

3.6.4 الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج:

يتم عرض ملف تعريف الأحماض الدهنية لإسترات الميثيل الموجودة في وقود الديزل الحيوي للـ ج. كركاس في الجدول 5.4 تم العثور على النسبة المئوية لإسترات الميثيل الموجودة في وقود الديزل الحيوي لتكون 89.76% كما هو موضح في الجدول 3.4. ميثيل الاوليبيك ($C_{19}H_{36}O_2$) هو أكثر إسترات الميثيل أحادي التشعب المسيطر في ملف وقود الديزل الحيوي بنسبة 65.9%. إنه مركب جيد جدًا يميل إلى تعيين الاستقرار للديزل الحيوي، لأن درجة عالية من عدم التشعب في إسترات ميثيل الأحماض الدهنية تحد من ملاءمتها للاستخدام كوقود بسبب ميل البلمرة المرتفع، والذي ينتج عن الأكسدة مثلما أكده سنوسي (Sunusi) وآخرون [300]. يعرض الجدول 4.4 ملف تعريف الأحماض الدهنية لوقود الديزل الحيوي.

الجدول 5.4. الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوقود الديزل الحيوي المنتج.

البوديزل		البتروديزل	Gubitz et al. [92]	النتيجة	الخصائص
EN 14214	ASTM D6751	ASTM D975	–	89.76	مردود تفاعل %
860–900	880	850	879	870	الكثافة عند 15 م ³ /كغ
3.5–5.0	1.9–6.0	2.6	4.84 (30 م ³)	4.38 (30 م ³)	اللزوجة الحركية ملم ² /ثانية عند 40 م ³
–	–	–	–	200.75	قيمة التصبن ملغ غ/KOH
Min. 51	Min. 47	40–55	51	53	رقم السيتان
max 500 mg/kg	max 0.5	0.05	0.16 ملغ/كغ	0.028	محتوى الماء % (وزن/وزن)
Max.0.5	Max.0.50	0.062	0.24	0.29	قيمة الحمض ملغ غ/KOH
max 0.3	max 0.05	0.01	0.025	0.32	بقايا الكربون % (وزن/وزن)
Max. 120	max 115	38.3	86.5	97	قيمة اليود غ/100 غ
–	–	42–46	–	39.74	السرعات الحرارية (HHV) ميغا جول/كغ

1.3.6.4 الكثافة (الوزن النوعي):

الكثافة هي خاصية الوقود الرئيسية، والتي تؤثر بشكل مباشر على خصائص أداء المحرك لأن العديد من هذه الخصائص، مثل رقم السيتان أو قيمة السرعات الحرارية (HHV)، مرتبطة بالكثافة [301]. نظرًا لدرجة الحرارة التي تؤثر بشدة على الكثافة، فإن اعتماد الكثافة عند 15 م³ يتم تحديده بواسطة معايير الجودة، مثل معيار EN 14214 الأوروبي الذي حدد نطاق الكثافة من 0.86 إلى 0.90 غ/مل. وقود الديزل الحيوي له كثافة أعلى من البتروديزل [302]. تعتمد قيمة كثافة وقود الديزل الحيوي على تركيبة استرات الميثيل ونقاوتها. من ناحية، تزداد الكثافة مع تناقص طول السلسلة (عدد ذرات الكربون) وزيادة عدد الروابط المزدوجة (درجة عدم التشبع). من ناحية أخرى، يمكن تقليل الكثافة بسبب وجود ملوثات منخفضة الكثافة، مثل الميثانول في هذه الحالة [303].

في هذا العمل، حققت كثافة الوقود الحيوي التي تم الحصول عليه معايير الجودة. بحيث كانت قيمة الكثافة لبذور الجاتروفا كركاس 870 كغ/م³.

2.3.6.4 اللزوجة:

اللزوجة هي قياس الاحتكاك الداخلي بين الجزيئات أو مقاومة تدفق السوائل. في محرك الديزل، يتم رش الوقود السائل في الهواء المضغوط وتحويله إلى قطرات صغيرة بالقرب من مخرج الفوهة [304]. تتأثر اللزوجة الحركية للمركبات الدهنية بشكل كبير بالهيكل المركب، كما هو موضح في البيانات الحالية التي تم الحصول عليها عند 30 م°. من العوامل المؤثرة هي طول السلسلة وعدد وطبيعة الروابط المزدوجة وموضعها [305]. بشكل عام، تُظهر الهيدروكربونات الموجودة في الديزل الأحفوري لزوجة أقل في نطاق أضيق من الإسترات الدهنية التي تشتمل على وقود الديزل الحيوي والمركبات الدهنية ذات الصلة، حيث يؤثر ثنائي بنزوثيوفين على لزوجة مذيب منخفض اللزوجة أقل من الهيدروكربونات طويلة السلسلة والإسترات الدهنية. في بعض الحالات، قد تؤثر لزوجة الأحماض الدهنية التي تشتمل على مادة أولية معينة على جودة الإسترات الناتجة كوقود ديزل حيوي [282].

تؤدي قيم اللزوجة العالية إلى تزيق الوقود السيئ، والاحتراق غير الكامل، وترسب الكربون على الحاقنات [303]، [282]، [306]. تسبب اللزوجة العالية أيضاً المزيد من المشاكل في الطقس البارد، لأن اللزوجة تزداد مع انخفاض درجات الحرارة [307]. من ناحية أخرى، قد لا يوفر الوقود منخفض اللزوجة تزيقاً كافياً للتوافق الدقيق لمضخات حقن الوقود، مما يؤدي إلى التسرب أو التآكل المتزايد [282]. اللزوجة الحركية عند 40 درجة مئوية محدودة بـ 3.5-5.0 مم²/ثانية في المعيار الأوروبي EN 14214، و 1.9-6.0 مم²/ثانية في المعيار الأمريكي ASTM D6751. كما هو مبين في الجدول 5.4، كانت قيمة لزوجة 4.38 مل²/ثانية عند 30 م° لوقود الديزل الحيوي المنتج في هذه الدراسة متشابهة جداً مع غويبتز وآخرون [92] ولكنها لم تستوفي نطاق معايير الجودة. وبالتالي، يمكن ان يكون سبب انخفاض اللزوجة راجع لعملية التنقية الجيدة وخاصة الميثانول (لزوجة الميثانول منخفض جدا 0.696 مم²/ثانية [308]). أيضا يمكن طول سلسلة المركب السائد (مثيل استر الأوليك بنسبة 65.9%) لها تأثير مباشر على انخفاضها.

3.3.6.4 محتوى الماء:

يعد محتوى الماء في وقود الديزل الحيوي أحد مؤشرات نقاء وقود الديزل الحيوي. يؤثر الماء الزائد في وقود الديزل الحيوي على استقرار الأكسدة، مما يحد من العمر الافتراضي للديزل الحيوي [302]. يمكن أن يتسبب وجود الماء في وقود الديزل الحيوي في تكوين الأكسيد والتآكل. بالإضافة إلى ذلك، فهو يساعد في نمو الميكروبات الذي يمكن أن يحدث في السطح البيئي بين وقود الديزل الحيوي والمياه المحايدة. يسمح المعيار EN 14214 بمحتوى مائي يبلغ 500 ملغ/كغ، أي 0.05% بالوزن، لعدم تجاوز قابلية ذوبان الماء في وقود الديزل الحيوي وبالتالي لتجنب بقاء الماء محايداً [309]. في هذه الدراسة، تمت تنقية وقود الديزل الحيوي الخام بطريقة غسيل مائي باستخدام ماء دافئ. تراوح محتوى الماء لوقود الديزل الحيوي المنقى بـ 0.028%.

4.3.6.4 قيمة الحمض (AV):

قيمة الحمض هي قياس لتركيز الأحماض الدهنية الحرة وتتأثر بعدة عوامل مثل نوع المادة الخام المستخدمة في إنتاج وقود الديزل الحيوي ودرجة صقلها. يمكن أيضاً استخدام هذه الخاصية لقياس نضارة وقود الديزل الحيوي لأن الوقود المخزن على المدى الطويل مع الأكسدة سيكون له على الأرجح قيمة حمضية أعلى [304]. أخيراً، يمكن أن تتشكل الحموضة بسبب المركبات الحمضية التي يمكن العثور عليها في وقود الديزل الحيوي والتي هي أحماض معدنية متبقية من عملية الاسترة التبادلية، وأحماض دهنية خالية من عملية التحلل المائي أو عملية ما بعد التحلل المائي للإسترات، ومنتجات الأكسدة الثانوية في شكل أحماض عضوية أخرى [310]. ان حموضة الوقود الحيوي المرتفعة يمكن تتسبب في التآكل وتكوين الرواسب داخل المحرك، لا سيما في حاقيات الوقود، عن طريق تحفيز البلمرة في حلقات ووقود إعادة التدوير الساخنة [305]. ومع ذلك، فقد ثبت أن الأحماض الدهنية الحرة كأحماض كربوكسيلية ضعيفة تشكل مخاطر أقل بكثير من الأحماض المعدنية القوية [311].

كانت المواد الخام المستخدمة في هذه الدراسة من زيوت الج. كركاس منخفضة المحتوى من الأحماض الدهنية الحرة (1.46% الجدول 4.3). وكانت القيم الحمضية لعينة الزيت $AV = 2.9$ ملغ KOH/غ زيت (الجدول 4.3)، والتي استوفت المتطلبات لاستخدام محفز قلوي كمادة وسيطة لعملية تحويل أسترة تبادلية أحادية الخطوة. كانت القيم الحمضية لعينة وقود الديزل الحيوي (0.29 ملغ KOH/غ للعينة) التي تم تحليلها أدنى من القيمة القصوى 0.50 ملغ KOH/غ للعينة التي يشير إليها المعيار EN 14214.

5.3.6.4 قيمة اليود (IV):

يتم التعبير عن النسبة المئوية لكتلة اليود التي تمتصها كتلة العينة بقيمة اليود، والتي تقيس درجة عدم تشبع الوقود. نتيجة لذلك، ترتفع قيمة اليود مع زيادة عدد الروابط المزدوجة. لذلك، تعتمد IV على توزيع الأحماض الدهنية في المادة الخام، وهي مستقلة عن درجة التحويل، نظرياً، لأن عدد الروابط المزدوجة لا يتأثر بدرجة الاسترة التبادلية. في الواقع، بمقارنة القيم الواردة في الجدولين 3.4 و5.4، وجد أن الاختلافات بين المواد الأولية (زيت الجاتروفا كركاس) والديزل الحيوي كانت ضئيلة.

يمكن أن تشير قيمة اليود العالية إلى عدم الاستقرار الكيميائي لأن الروابط المزدوجة هي مناطق تفاعلية موضعية للمركب [309]. وفقاً لهذا البيان، فإن وقود الديزل الحيوي للجاتروفا كركاس (97.0 غ/100غ للعينة) كان الأكثر استقراراً لهذه الدراسة هذا من جهة، ومن جهة أخرى لم يتجاوز الحد المسموح به بموجب المعيار EN 14214.

6.3.6.4 رقم السيتان:

يعتبر رقم السيتان (CN) من أهم مؤشرات جودة وقود الديزل لأنه مرتبط بوقت اشتعال الوقود في غرفة الاحتراق، وتضمن القيمة العالية لرقم السيتان التحكم الجيد في الاحتراق، مما يزيد من كفاءة المحرك. علاوة على ذلك، يوفر الوقود ذو رقم السيتان العالي بداية باردة، وضوضاء منخفضة، وحركة بطيئة، وغازات أقل تلويثاً عند المخرج [309].

يعد تحديد رقم السيتان للوقود من خلال الإجراء التجريبي مهمة شاقة لصناعة إنتاج وقود الديزل الحيوي. تتمثل إحدى طرق حل مشكلة تحديد رقم السيتان في تطوير نماذج للتنبؤ برقم السيتان عندما تكون بعض المعلمات معروفة. نظرًا لأن تركيبة الأحماض الدهنية للزيوت الأساسية تؤثر بشكل أساسي على عدد السيتان للديزل الحيوي المنتج منه، يمكن تطوير النماذج المتعلقة برقم السيتان لتكوين FAME [304]. وفقاً للمعادلة المقترحة في المرجعين [274]، [275]، يمكن تقدير رقم السيتان (CI) بناءً على قيم التصبن واليود. يوصي تقدير مؤشر السيتان باستخدام إسترات الميثيل (وقود الديزل الحيوي) فقط، وليس الزيوت. تظهر الإسترات عالية التشبع أعلى قيمة لرقم السيتان [312]. كبديل لرقم السيتان، يمكن أيضاً استخدام قيمة رقم السيتان المقدرة لاختبار جودة اشتعال الوقود الحيوي، والتي كانت تساوي 53.68 وهي تقع ضمن حدود معايير ASTM وEN 14214.

7.3.6.4 قيمة التصبن (SV):

قيمة التصبن (SV) هي مليغرام من KOH اللازمة لتصبن 1 غرام من العينة. إنه مرتبط بمتوسط الوزن الجزيئي، لذلك تقل قيمة التصبن للزيت مع زيادة وزنه الجزيئي [313]. ومع ذلك، فإن الأحماض من الدهون الثلاثية هي نفسها تلك التي تشكل FAME (وقود الديزل الحيوي)، وبالتالي، لا يتغير متوسط الوزن الجزيئي بشكل كبير، كما أن المواد الخام المستخدمة لإنتاج وقود الديزل الحيوي تتأثر بشدة في هذه الخاصية [314]. في الواقع، بمقارنة القيم الواردة في الجدولين 3.4 و5.4، وجد أن الاختلافات بين المواد الأولية (زيت الجاتروفا كركاس) والديزل الحيوي كانت ضئيلة. لا يضع المعيار EN 14214 حدوداً لهذه المعلمة. يمكن رؤية القيم التي تم الحصول عليها للديزل الحيوي المنتج في الجدول 5.4 (200.75 ملغ KOH/غ).

8.3.6.4 السرعات الحرارية (HHV):

على الرغم من أن وقود الديزل الحيوي لا يحتوي على مواد عطرية، إلا أنه يحتوي على استرات الميثيل بمستويات مختلفة من التشبع. من المعروف أن قيمة السرعات الحرارية تزداد مع زيادة طول السلسلة وتتناقص مع زيادة عدد الروابط المزدوجة. تنتج الزيادة في السرعات الحرارية عن الزيادة الكبيرة في عدد ذرات الكربون والهيدروجين بالإضافة إلى زيادة نسبة هذه العناصر بالنسبة إلى الأكسجين. الانخفاض في

السرعات الحرارية هو نتيجة لانخفاض عدد ذرات الهيدروجين (أي زيادة في عدم التشبع) في الجزيء [313].

يتطلب التحديد التجريبي لقيمة السرعات الحرارية (HHV) أجهزة خاصة. لذلك، طور دميرباس [313] معادلة رياضية لحساب قيم السرعات الحرارية للوقود المنتج من اللجنوسليلوز بدلالة قيمة اليود وقيمة التصبن. من هذه الناحية، تقل قيمة التصبن مع زيادة الوزن الجزيئي، وتزداد نسب الكربون والهيدروجين مع انخفاض الوزن الجزيئي. من ناحية أخرى، تؤدي الزيادة في قيمة اليود (عدم تشبع أكبر) إلى انخفاض في قيمة التسخين الأعلى. مع هذه الاعتبارات، كانت المعادلة المقترحة لحساب قيم السرعات الحرارية للوقود الحيوي المذكورة في الفقرة 4.4.2.3.3 من الفصل الثالث، والتي أعطت قيمة السرعات الحرارية 39.74 ميغا جول/كغ.

9.3.6.4 بقايا الكربون:

تدل بقايا الكربون في الوقود على اتجاهات ترسيب الكربون للوقود بعد الاحتراق. تعتبر بقايا الكربون للديزل الحيوي أكثر أهمية من وقود الديزل لأنها تظهر ارتباطاً كبيراً بوجود الأحماض الدهنية الحرة والجليسيريدات والصابون والبوليمرات والأحماض الدهنية غير المشبعة والشوائب غير العضوية. على الرغم من أن هذه البقايا لا تتكون فقط من الكربون، فإن مصطلح "بقايا الكربون" موجود في جميع المعايير لأنه شائع الاستخدام منذ فترة طويلة. نطاق المعايير الحديثة موضح في الجدول 5.4 [315]، [316].

سيؤدي استخدام الزيت النباتي كوقود بدون تحويل الأسترة إلى وقود حيوي إلى المزيد من رواسب الكربون حيث ينخفض مستوى التشبع فيه. كلما زاد عدم التشبع في الديزل الحيوي، زاد عدد رواسب الكربون المتكونة من الوقود المشبع. بشكل عام، يعتبر ترسيب الكربون من وقود الديزل الحيوي أقل بكثير مقارنةً بالديزل البترولي، ويرجع ذلك على الأرجح إلى عدم وجود مواد عطرية في وقود الديزل الحيوي مما يجعل تكوين بقايا عطرية كبيرة أمراً صعباً [267].

تم استخدام جهاز بقايا الكربون لمعرفة كمية بقايا الكربون لوقود الديزل الحيوي. تم إجراء القياس وفقاً لطريقة ASTM D4530. تم استخدام هذه الطريقة لمعرفة كمية بقايا الكربون الموجودة بعد الانحلال الحراري لعينة الوقود. لقد كانت قيمة بقايا الكربون لوقود الديزل الحيوي المنتج من بذور الـ ج. كركاس 0.042 والتي جاءت وفق معايير الجودة والتي كانت أقل من الحد الأقصى (0.05% وزن) لـ ASTM D6751.

7.4 الخاتمة

نظرًا لارتفاع نسبة إنتاج الزيت التي تحققت في هذه الدراسة، تعد بذور الجاتروفا كركاس مصدرًا مهمًا للزيت. نظرًا لانخفاض قيم البيروكسيد والحمض والأحماض الدهنية الحرة، يتمتع الزيت بجودة تخزين ممتازة. علاوة على ذلك، أشارت قيمة التصبن إلى أنه يمكن استخدام الزيت لصنع الصابون في بيئة صناعية. قد يشير وجود مكونات كيميائية نباتية في الزيت إلى أن له إمكانات علاجية أو طبية. لتطبيقه المرتقب، هناك حاجة إلى مزيد من الدراسة حول سمية زيت بذور الجاتروفا وعملية إزالة السموم.

كما هو متوقع، تعتمد الخصائص مثل الكثافة، واللزوجة الحركية، وقيمة اليود، ورقم السيتان، وقيمة السرعات الحرارية، إلى حد كبير على درجة عدم تشبع وقود الديزل الحيوي، أي على توزيع إسترات الميثيل، أو توزيع الأحماض الدهنية للمواد الخام. معظم الخواص، تأثرت بشكل أكبر بعمليات الاسترة التبادلية والتنقية أكثر من تأثرها بالمواد الخام.

تعد جودة وقود الديزل الحيوي أهم عامل من وجهة نظر المحرك، وقد تم تحديد معايير مختلفة للتحقق من الجودة. ومن أجل تحسين جودة وقود الديزل الحيوي، من الممكن استخدام مخاليط الزيت في إنتاج وقود الديزل الحيوي. بالإضافة إلى ذلك، يجب اتباع الطرق الصديقة للبيئة وأكثر كفاءة في تنقية وقود الديزل الحيوي المنتج من زيوت الج. كركاس ذات المحتوى المنخفض من الأحماض الدهنية الحرة.

الخاتمة العامة

الخاتمة

تعد الجاتروفا كركاس مصدرًا للعديد من المنتجات ذات الصلة بالأغذية والطاقة. حققت هذه الدراسة في استدامة مسارات المعالجة المختلفة لعناصر الجاتروفا كركاس بما في ذلك الزيت وكعكة البذور. تم التحقيق بدقة في المسارات المحتملة من خلال مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة. تبين أن زراعة الجاتروفا كمحصول اقتصادي يمكن أن تكون بديلاً أو رديفاً اقتصادياً وطنياً يسد الثغرة الناتجة عن نقص البترول والطلب المتزايد على الوقود والمحروقات ولاسيما في أوقات الأزمات. بالإضافة إلى فوائده للبيئة واستخداماتها الأخرى الضرورية للإنسان والحيوان. فإن شجرة الجاتروفا وبحسب الدراسة تستخدم بشكل أساسي في محاربة التصحر كونها تنمو بنجاح في الأماكن المتصحرة والجافة والقاحلة.

تكشف أيضاً هذه الدراسة عن خصائص الفيزيائية والكيميائية للزيت ولوقود الديزل الحيوي من بذور جاتروفا كركاس المدروسة في الجزائر. من الواضح أن وقود الديزل الحيوي للجاتروفا يُظهر خصائص فيزيائية وكيميائية وحرارية مرضية. تم العثور على المركب الأعلى من الأحماض الدهنية غير المشبعة، مثل حمض الأوليك، كمكوناً رئيسية للديزل الحيوي بنسبة 65.9%.

على الرغم من أن ج. كركاس يشتمل على خصائص مناسبة لإنتاج وقود الديزل الحيوي كما هو موضح في هذه الدراسة ومقارنة مع معايير الجودة لـ EN 14214 و ASTM D6751، إلا أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تم الإبلاغ عنها ج. كركاس تعتمد وتتأثر بشكل كبير بالعديد من العوامل الحيوية والتكنولوجية. علاوة على ذلك، يرتبط المرود والخصائص الفيزيائية والكيميائية لزيوت ج. كركاس والديزل الحيوي ارتباطاً وثيقاً بأنواع استخلاص الزيت وتقنيات إنتاج الديزل الحيوي.

وبالتالي، يجب أن تركز الدراسات المستقبلية على ابتكار التقنيات وتطويرها وتحسينها لتحديث جمع البذور ومعالجتها واستخلاص الزيت وعملية إنتاج وقود الديزل الحيوي. هناك حاجة أيضاً إلى أعمال تجريبية مكثفة بشأن التحسين الجزيئي والوراثي لتأمين مواد أولية مناسبة وعالية الجودة لإنتاج وقود الديزل الحيوي المستدام.

مما سبق تم تحديد ج. كركاس على أنه مادة وسيطة واعدة لإنتاج وقود الديزل الحيوي المستدام بسبب تركيبته الفيزيائية والكيميائية المناسبة، وزيادة إنتاجية البذور والزيوت، وانخفاض المنافسة مع المحاصيل الغذائية وغير صالحة للأكل. لذلك يمكن أن يكون وقود الديزل الحيوي المنتج من الجاتروفا كركاس مصدرًا واعدًا للوقود الحيوي في الجزائر لتلبية احتياجات الطاقة المستقبلية لأن محتوى الزيت في البذور عالي نسبياً كما أن زراعته مجدية. يمكن أيضاً اعتبار إنتاج وقود الديزل الحيوي من الزيت المستخلص لتحسين أقصى استفادة من المواد الخام، أمراً يتطلب مزيداً من البحث.

الآفاق

- بما أن الجاتروفا أحد أهم مصادر الوقود الحيوي فيجب أن تكون جزءا من إستراتيجية الدولة لإنتاج الطاقة المتجددة، كما يجب تقييم إمكاناتها المستدامة من حيث المزايا الاقتصادية والاجتماعية والبيئية والتقنية للمنطقة المتنامية المعنية قبل إنشاء إنتاج وقود الحيوي على نطاق واسع.
- يجب أن يكون التوسع في زراعة الجاتروفا في مناطق محطات معالجة مياه الصرف الصحي والتي لا تتطلب المعالجة الكبيرة والمكلفة، مع استغلال الأراضي المهمشة التي لا تستخدم إطلاقا في الزراعة الخاصة للإنتاج الغذائي.
- وفي الأخير، فإن الجاتروفا كركاس تحتوي على خليط من العديد من المواد الفعالة في جميع أجزاء النبات، والتي تستخدم كمبيدات حشرية ومبيدات فطرية وفي استخدامات طبية، لذلك نوصي بدراستها لتحقيق أكبر استفادة منها.

قائمة المراجع

- [1] A. Srivastava et R. Prasad, « Triglycerides-based diesel fuels », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, n° 2, p. 111-133, juin 2000, doi: 10.1016/S1364-0321(99)00013-1.
- [2] J. C. Escobar, E. S. Lora, O. J. Venturini, E. E. Yáñez, E. F. Castillo, et O. Almazan, « Biofuels: Environment, technology and food security », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 6, p. 1275-1287, août 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.014.
- [3] S. Türe, D. Uzun, et I. E. Türe, « The potential use of sweet sorghum as a non-polluting source of energy », *Energy*, vol. 22, n° 1, p. 17-19, janv. 1997, doi: 10.1016/0360-5442(95)00024-0.
- [4] D. Mitchell, « A Note on Rising Food Prices », Social Science Research Network, Rochester, NY, SSRN Scholarly Paper ID 1233058, juill. 2008. Consulté le : 12 février 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://papers.ssrn.com/abstract=1233058>
- [5] A. Demirbas, « Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review », *Appl. Energy*, vol. 86, p. S108-S117, nov. 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.036.
- [6] A. Demirbas, « Progress and recent trends in biodiesel fuels », *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, n° 1, p. 14-34, janv. 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.001.
- [7] J. B. Harborne, « Phytochemical Methods: A Guide to Modern Techniques of Plant Analysis », 1973.
- [8] M. F. M. Gunam Resul, T. I. Mohd. Ghazi, et A. Idris, « Kinetic study of jatropha biolubricant from transesterification of jatropha curcas oil with trimethylolpropane: Effects of temperature », *Ind. Crops Prod.*, vol. 38, p. 87-92, juill. 2012, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.01.012.
- [9] S. Bonnet et S. H. Gheewala, « Potential of Jatropha as an Energy Crop », in *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop: Volume 1: Farming, Economics and Biofuel*, N. Carels, M. Sujatha, et B. Bahadur, Éd. New York, NY: Springer, 2012, p. 571-582. doi: 10.1007/978-1-4614-4806-8_30.
- [10] Warra, Wawata, Gunu, et Aujara, « Extraction and Physicochemical Analysis of some selected Northern Nigerian Industrial oils », *Arch. Appl. Sci. Res.*, vol. 3, p. 536-541, 2011.
- [11] M. M. K. Bhuiya, M. G. Rasul, M. M. K. Khan, N. Ashwath, A. K. Azad, et M. A. Hazrat, « Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part 2: Properties, performance and emission characteristics », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, p. 1129-1146, mars 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.086.
- [12] M. Salaheldeen, M. K. Aroua, A. A. Mariod, S. F. Cheng, M. A. Abdelrahman, et A. E. Atabani, « Physicochemical characterization and thermal behavior of biodiesel and biodiesel–diesel blends derived from crude Moringa peregrina seed oil », *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, p. 535-542, mars 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.087.
- [13] A. E. Atabani *et al.*, « Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, p. 211-245, févr. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.013.
- [14] M. Buenrostro et A. C. López-Munguia, « Enzymatic extraction of avocado oil », *Biotechnol. Lett.*, vol. 8, n° 7, p. 505-506, juill. 1986, doi: 10.1007/BF01025210.
- [15] R. Dutta, U. Sarkar, et A. Mukherjee, « Soxhlet Extraction of Crotalaria Juncea Oil Using Cylindrical and Annular Packed Beds », *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 6, n° 2, p. 130-133, avr. 2015, doi: 10.7763/IJCEA.2015.V6.466.
- [16] S. Emmanuel, P. A. Aderemi, et O. Jumoke, « SOLVENT EXTRACTION AND CHARACTERIZATION OF OIL FROM AFRICAN STAR APPLE (CHRYSOPHYLLUM ALBIDUM) SEEDS », 2012.
- [17] M. Athar et S. M. Nasir, « Taxonomic perspective of plant species yielding vegetable oils used in cosmetics and skin care products », *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 4, n° 1, Art. n° 1, mars 2005, doi: 10.4314/ajb.v4i1.15049.
- [18] K. O. Omeje, O. K. Iroha, A. A. Edeke, H. C. Omeje, et V. O. Apeh, « Characterization and fatty acid profile analysis of oil extracted from unexploited seed of African star apple (Udara) », *OCL*, vol. 26, p. 10, 2019, doi: 10.1051/ocl/2019007.
- [19] W. M. Achten *et al.*, « Towards domestication of Jatropha curcas », *Biofuels*, vol. 1, n° 1, p. 91-107, janv. 2010, doi: 10.4155/bfs.09.4.

- [20] A. S. Silitonga, A. E. Atabani, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, I. A. Badruddin, et S. Mekhilef, « A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 8, p. 3733-3756, oct. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.011.
- [21] W. H. Maes, A. Trabucco, W. M. J. Achten, et B. Muys, « Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. », *Biomass Bioenergy*, vol. 33, n° 10, p. 1481-1485, oct. 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2009.06.001.
- [22] A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, H. C. Ong, A. E. Atabani, et W. T. Chong, « A global comparative review of biodiesel production from *Jatropha curcas* using different homogeneous acid and alkaline catalysts: Study of physical and chemical properties », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, p. 514-533, août 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.044.
- [23] M. G. Simpson, « 8 - Diversity and Classification of Flowering Plants: Eudicots », in *Plant Systematics (Second Edition)*, M. G. Simpson, Éd. San Diego: Academic Press, 2010, p. 275-448. doi: 10.1016/B978-0-12-374380-0.50008-7.
- [24] C. von Linné et L. Salvius, *Caroli Linnaei ... Species plantarum : exhibentes plantas rite cognitatas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas...*, vol. 2. Holmiae : Impensis Laurentii Salvii, 1753, p. 1-673. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/13830>
- [25] « *Jatropha curcas* L. — The Plant List ». <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-104552> (consulté le 16 octobre 2021).
- [26] C. R. Carvalho, W. R. Clarindo, M. M. Praça, F. S. Araújo, et N. Carels, « Genome size, base composition and karyotype of *Jatropha curcas* L., an important biofuel plant », *Plant Sci.*, vol. 174, n° 6, p. 613-617, juin 2008, doi: 10.1016/j.plantsci.2008.03.010.
- [27] R. Brittain et N. B. Lutaladio, « *Jatropha*: a smallholder bioenergy crop: the potential for pro-poor development. », 2010.
- [28] G. P. Kumar, S. K. Yadav, P. R. Thawale, S. K. Singh, et A. A. Juwarkar, « Growth of *Jatropha curcas* on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter* – A greenhouse study », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n° 6, p. 2078-2082, avr. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.03.032.
- [29] J. S. R. Aluri, « Pollination ecology and fruiting behaviour in a monoecious species *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) », *Curr. Sci.*, vol. 83, déc. 2002.
- [30] W. M. J. Achten *et al.*, « *Jatropha* bio-diesel production and use », *Biomass Bioenergy*, vol. 32, n° 12, p. 1063-1084, déc. 2008, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.03.003.
- [31] J. Heller, *Physic Nut, Jatropha Curcas L.* Biodiversity International, 1996.
- [32] B. N. Divakara, H. D. Upadhyaya, S. P. Wani, et C. L. L. Gowda, « Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review », *Appl. Energy*, vol. 87, n° 3, p. 732-742, mars 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.07.013.
- [33] A. M. A. de Lucena, G. C. L. Vasconcelos, K. A. A. de L. Medeiros, N. I. Medeiros, O. S. Medeiros, et N. H. C. Arriel, « Características morfológicas de pedúnculos reprodutivos de acessos de *Jatropha curcas* L. », *Sci. Plena*, vol. 10, 2014.
- [34] V. Kumar, H. P. S. Makkar, et K. Becker, « Evaluations of the nutritional value of *Jatropha curcas* protein isolate in common carp (*Cyprinus carpio* L.) », *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, vol. 96, n° 6, p. 1030-1043, 2012, doi: 10.1111/j.1439-0396.2011.01217.x.
- [35] P. C. van Welzen, F. S. T. Sweet, et F. J. Fernández-Casas, « A revision of *Jatropha* (Euphorbiaceae) in Malesia », *Blumea Biodivers. Evol. Biogeogr. Plants*, vol. 62, p. 58-74, janv. 2017, doi: 10.3767/000651917X695421.
- [36] S. R. Mariz *et al.*, « Estudo toxicológico agudo do extrato etanólico de partes aéreas de *Jatropha gossypifolia* L. em ratos », *Rev. Bras. Farmacogn.*, vol. 16, p. 372-378, sept. 2006, doi: 10.1590/S0102-695X2006000300015.
- [37] S. C. N. Servin *et al.*, « [Effects of *Jatropha gossypifolia* L. (bellyache bush) extract on the healing process of colonic anastomosis: experimental study in rats]. », *Acta Cir. Bras.*, vol. 21 Suppl 3, p. 89-96, 2006.
- [38] E. Chivandi, P. Bag, et M. Pleasant, « Effects Of Dietary *Jatropha curcas* Meal on Percent Packed Cell Volume, Serum Glucose, Cholesterol and Triglyceride Concentration and Alpha-Amylase Activity of Weaned Fattening Pigs. », 2006.

- [39] J. Langrand *et al.*, « Intoxications par pignons d'Inde (*Jatropha curcas*) : 24 observations rapportées aux centres antipoison de Paris et Marseille », *Bull. Société Pathol. Exot.*, vol. 108, n° 2, p. 139-143, mars 2015, doi: 10.1007/s13149-014-0412-3.
- [40] A. Kumar et S. Sharma, « An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review », *Ind. Crops Prod.*, vol. 28, n° 1, p. 1-10, juill. 2008, doi: 10.1016/j.indcrop.2008.01.001.
- [41] H. Makkar, A. O. Aderibigbe, et K. Becker, « Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors », *Food Chem.*, vol. 62, n° 2, p. 207-215, 1998, doi: 10.1016/s0308-8146(97)00183-0.
- [42] N. Kumar, K. G. Vijay Anand, et M. P. Reddy, « Plant regeneration of non-toxic *Jatropha curcas*—impacts of plant growth regulators, source and type of explants », *J. Plant Biochem. Biotechnol.*, vol. 20, n° 1, p. 125-133, janv. 2011, doi: 10.1007/s13562-011-0037-6.
- [43] G. R. K. Kumar, V. A. Bapat, et T. S. Johnson, « Phorbol Esters and Other Toxic Constituents of *Jatropha curcas* L. », in *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop: Volume 1: Farming, Economics and Biofuel*, N. Carels, M. Sujatha, et B. Bahadur, Éd. New York, NY: Springer, 2012, p. 441-460. doi: 10.1007/978-1-4614-4806-8_24.
- [44] A. R. Oyi, J. Onaolapo, et J. O. Adigun, « Phytochemical and antimicrobial screening of the latex of *Jatropha curcas* Linn (Euphorbiaceae) », *J. Phytomedicine Ther.*, vol. 7, p. 63-74, janv. 2002.
- [45] G. Goel, H. P. S. Makkar, G. Francis, et K. Becker, « Phorbol Esters: Structure, Biological Activity, and Toxicity in Animals », *Int. J. Toxicol.*, vol. 26, n° 4, p. 279-288, juill. 2007, doi: 10.1080/10915810701464641.
- [46] P. Mahanta et A. Shrivastava, « TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF BIO-DIESEL AS AN ENERGY ALTERNATIVE ».
- [47] H.-W. Yen, S.-C. Yang, C.-H. Chen, J. S. Jesisca, et J.-S. Chang, « Supercritical fluid extraction of valuable compounds from microalgal biomass », *Bioresour. Technol.*, vol. 184, p. 291-296, mai 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.030.
- [48] F. Sahena *et al.*, « Application of supercritical CO₂ in lipid extraction – A review », *J. Food Eng.*, vol. 95, n° 2, p. 240-253, nov. 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.06.026.
- [49] J. Płotka-Wasyłka, M. Rutkowska, K. Owczarek, M. Tobiszewski, et J. Namieśnik, « Extraction with environmentally friendly solvents », *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 91, p. 12-25, juin 2017, doi: 10.1016/j.trac.2017.03.006.
- [50] A. Warra, « Cosmetic potentials of physic nut (*Jatropha curcas* Linn.) seed oil: A review », *Am. J. Sci. Ind. Res.*, vol. 3, p. 358-366, 2012.
- [51] M. Baldini, E. Bulfoni, et C. Ferfuià, « Seed processing and oil quality of *Jatropha curcas* L. on farm scale: A comparison with other energy crops », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 19, p. 7-14, 2014.
- [52] J. Blin *et al.*, « Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, p. 580-597, juin 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.018.
- [53] « Ultrasound-assisted extraction », *Stewart Postharvest Rev.*, vol. 5, n° 5, p. 1-11, 2009, doi: 10.2212/spr.2009.5.1.
- [54] S. S. S. A, et G. Mn, « Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by combination of ultrasonication and aqueous enzymatic oil extraction », *Bioresour. Technol.*, vol. 96, n° 1, janv. 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.026.
- [55] S. Shah, A. Sharma, et M. N. Gupta, « Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by enzyme assisted three phase partitioning », *Ind. Crops Prod.*, vol. 20, n° 3, p. 275-279, nov. 2004, doi: 10.1016/j.indcrop.2003.10.010.
- [56] A. Marasabessy, M. R. Moeis, J. P. M. Sanders, et R. A. Weusthuis, « Enhancing *Jatropha* oil extraction yield from the kernels assisted by a xylan-degrading bacterium to preserve protein structure », *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 90, n° 6, p. 2027-2036, 2011, doi: 10.1007/s00253-011-3312-5.
- [57] S. Anto *et al.*, « Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production », *Chemosphere*, vol. 242, p. 125079, mars 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125079.
- [58] N. T. Dunford, « Oil and Oilseed Processing II Oil Extraction Techniques », 2016.
- [59] F. D. Gunstone, « The Chemistry of Oils and Fats: Sources, Composition, Properties, and Uses », 2004.

- [60] A. P. Gandhi *et al.*, « Studies on alternative solvents for the extraction of oil-I soybean », *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 38, n° 3, p. 369-375, 2003, doi: 10.1046/j.1365-2621.2003.00683.x.
- [61] T. A. Russin, J. I. Boye, Y. Arcand, et S. H. Rajamohamed, « Alternative Techniques for Defatting Soy: A Practical Review », *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, n° 2, p. 200-223, févr. 2011, doi: 10.1007/s11947-010-0367-8.
- [62] M. J. Venter, P. Willems, N. J. M. Kuipers, et A. B. de Haan, « Gas assisted mechanical expression of cocoa butter from cocoa nibs and edible oils from oilseeds », *J. Supercrit. Fluids*, vol. 37, n° 3, p. 350-358, mai 2006, doi: 10.1016/j.supflu.2005.12.015.
- [63] J. O. Olajide, J. C. Igbeka, T. J. Afolabi, et O. A. Emiola, « Prediction of oil yield from groundnut kernels in an hydraulic press using artificial neural network (ANN) », *J. Food Eng.*, vol. 81, n° 4, p. 643-646, août 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.06.007.
- [64] O. Boutin et E. Badens, « Extraction from oleaginous seeds using supercritical CO₂: Experimental design and products quality », *J. Food Eng.*, vol. 92, n° 4, p. 396-402, juin 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.12.007.
- [65] C. M. Cater, K. C. Rhee, R. D. Hagenmaier, et K. F. Mattil, « Aqueous extraction—An alternative oilseed milling process », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 51, n° 4, p. 137-141, 1974, doi: 10.1007/BF02639723.
- [66] H. Domínguez, M. J. Núñez, et J. M. Lema, « Enzymatic pretreatment to enhance oil extraction from fruits and oilseeds: a review », *Food Chem.*, vol. 49, n° 3, p. 271-286, janv. 1994, doi: 10.1016/0308-8146(94)90172-4.
- [67] E. Subroto, « Optimization of *Jatropha curcas* pure plant oil production », Thesis fully internal (DIV), University of Groningen, [Groningen], 2015.
- [68] A. K. Raina et B. R. Gaikwad, « Chemobotany of *Jatropha* species in India and further characterisation of *curcas* oil' ». », *J. Oil Technol. Assoc. India*, vol. 19, n° 4, p. 81-85, 1987.
- [69] F. D. Gunstone, « Oils and Fats in the Food Industry », 2008.
- [70] N. V. K. Dutt et D. H. L. Prasad, « Inter-relationships among the properties of fatty oils », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 66, n° 5, p. 701-703, 1989, doi: 10.1007/BF02669956.
- [71] R. West et D. Rousseau, « Crystallization and rheology of palm oil in the presence of sugar », *Food Res. Int.*, vol. 85, p. 224-234, juill. 2016, doi: 10.1016/j.foodres.2016.05.010.
- [72] A. Devi et B. S. Khatkar, « Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 53, n° 10, p. 3633-3641, oct. 2016, doi: 10.1007/s13197-016-2355-0.
- [73] R. E. Timms, « Physical properties of oils and mixtures of oils », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 62, n° 2, p. 241-249, févr. 1985, doi: 10.1007/BF02541385.
- [74] G. Knothe, « Structure indices in FA chemistry. How relevant is the iodine value? », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 79, n° 9, p. 847-854, 2002, doi: 10.1007/s11746-002-0569-4.
- [75] M. D. Ranken, *Food Industries Manual* /, 23rd edition. Boston, MA : Springer US, 1993. [En ligne]. Disponible sur: <https://stanford.idm.oclc.org/login?url=https://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-2099-3>
- [76] M. O. Aremu, O. Olaofe, et E. T. Akintayo, « Chemical Composition and Physicochemical Characteristics of Two Varieties of Bambara Groundnut (*Vigna subterrenea*) Flours », *J. Appl. Sci.*, vol. 6, p. 1900-1903, 2006.
- [77] E. T. Akintayo, « Chemical composition and physicochemical properties of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) seed and seed oils », *Riv. Ital. Delle Sostanze Grasse*, vol. 74, p. 13-15, 1997.
- [78] M. Marutani, J. A. Soria, Mário, Á., et Martínez, « Characterization of Crude and Biodiesel Oils of *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* in Guam », 2018.
- [79] C. Holliger *et al.*, « Towards a standardization of biomethane potential tests », *Water Sci. Technol.*, vol. 74, n° 11, p. 2515-2522, sept. 2016, doi: 10.2166/wst.2016.336.
- [80] G. A. Ewunie, J. Morken, O. I. Lekang, et Z. D. Yigezu, « Factors affecting the potential of *Jatropha curcas* for sustainable biodiesel production: A critical review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, p. 110500, mars 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110500.
- [81] G. Vicente, M. Martínez, et J. Aracil, « Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems », *Bioresour. Technol.*, vol. 92, n° 3, p. 297-305, mai 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.08.014.

- [82] D. Firestone, Éd., *Physical and chemical characteristics of oils, fats, and waxes* /, 2nd ed. Champaign, IL : AOCS Press, 2006. [En ligne]. Disponible sur: <https://stanford.idm.oclc.org/login?url=https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPCCOFWE1/physical-and-chemical?kpromoter=marc>
- [83] M. O. Aremu, H. Ibrahim, et T. O. Bamidele, « Physicochemical Characteristics of the Oils Extracted from Some Nigerian Plant Foods - A Review », *Chem. Process Eng. Res.*, vol. 32, p. 36-52, 2015.
- [84] M. Z. Kyari, « Extraction and characterization of seed oils », *Int Agrophys*, vol. 22, n° 2, p. 139-142, 2008.
- [85] S. Puvarodom et N. Bunplaeng, « Comparison between the sulphuric-peroxide digestion method and the alternative procedures for plant analysis », 1994.
- [86] S. S. Nielsen, « Introduction To The Chemical Analysis Of Foods », 2002.
- [87] T. J. Weiss, *Food oils and their uses.*, n° Ed. 2. Ellis Horwood Ltd., 1983.
- [88] D. G. Overhults, G. M. White, H. E. Hamilton, et I. J. Ross, « Drying Soybeans With Heated Air », *Trans. ASABE*, vol. 16, p. 112-0113, 1973.
- [89] J. Martínez-Herrera, P. Siddhuraju, G. Francis, G. Dávila-Ortíz, et K. Becker, « Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico », *Food Chem.*, vol. 96, n° 1, p. 80-89, mai 2006, doi: 10.1016/j.foodchem.2005.01.059.
- [90] K. S. Rao, P. P. Chakrabarti, B. V. S. K. Rao, et R. B. N. Prasad, « Phospholipid Composition of *Jatropha curcas* Seed Lipids », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 86, n° 2, p. 197, 2009, doi: 10.1007/s11746-008-1325-8.
- [91] A. Joshi, P. Singha, et R. K. Bachheti, « PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF SEED OIL OF *JATROPHA CURCAS* L. COLLECTED FROM DEHRADUN (UTTARAKHAND) INDIA », *Int. J. Appl. Biol. P*, 2011.
- [92] G. M. Gübitz, M. Mittelbach, et M. Trabi, « Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. », *Bioresour. Technol.*, vol. 67, n° 1, p. 73-82, janv. 1999, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00069-3.
- [93] H. A. Abdelgadir, A. K. Jäger, S. D. Johnson, et J. Van Staden, « Influence of plant growth regulators on flowering, fruiting, seed oil content, and oil quality of *Jatropha curcas* », *South Afr. J. Bot.*, vol. 76, n° 3, p. 440-446, août 2010, doi: 10.1016/j.sajb.2010.02.088.
- [94] E. M. Visser, D. O. Filho, M. A. Martins, et B. L. Steward, « Bioethanol production potential from Brazilian biodiesel co-products », *Biomass Bioenergy*, vol. 35, n° 1, p. 489-494, janv. 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.09.009.
- [95] E. Fragopoulou *et al.*, « Biological activity of acetylated phenolic compounds », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 55, n° 1, p. 80-89, janv. 2007, doi: 10.1021/jf0627221.
- [96] X.-P. Zhang, M.-L. Zhang, X.-H. Su, C.-H. Huo, Y.-C. Gu, et Q.-W. Shi, « Chemical Constituents of the Plants from Genus *Jatropha* », *Chem. Biodivers.*, vol. 6, n° 12, p. 2166-2183, 2009, doi: 10.1002/cbdv.200700461.
- [97] L. Yao, C. Han, G. Chen, X. Song, Y. Chang, et W. Zang, « A new asymmetric diamide from the seed cake of *Jatropha curcas* L », *Fitoterapia*, vol. 83, n° 8, p. 1318-1321, déc. 2012, doi: 10.1016/j.fitote.2012.04.001.
- [98] S. M. Khafagy, Y. A. Mohamed, N. A. Abdel Salam, et Z. F. Mahmoud, « Phytochemical study of *Jatropha curcas* », *Planta Med.*, vol. 31, n° 3, p. 273-277, mai 1977.
- [99] K. Ling-yi, M. Zhi-da, S. Jian-xia, et F. Rui, « Chemical Constituents from Roots of *Jatropha curcas* », *J. Integr. Plant Biol.*, vol. 38, 1996.
- [100] N. Ravindranath, M. R. Reddy, G. Mahender, R. Ramu, K. R. Kumar, et B. Das, « Deoxypreussomerins from *Jatropha curcas*: are they also plant metabolites? », *Phytochemistry*, vol. 65, n° 16, p. 2387-2390, août 2004, doi: 10.1016/j.phytochem.2004.06.032.
- [101] R. Staubmann, I. Ncube, G. M. Gübitz, W. Steiner, et J. S. Read, « Esterase and lipase activity in *Jatropha curcas* L. seeds », *J. Biotechnol.*, vol. 75, n° 2-3, p. 117-126, oct. 1999, doi: 10.1016/S0168-1656(99)00151-0.
- [102] B. Das, M. R. Reddy, N. Ravindranath, K. H. Kishore, et U. S. N. Murthy, « Studies on Phytochemicals. Part 48. A Substituted Imidazole Derivative from *Jatropha curcas*. », *ChemInform*, vol. 36, n° 39, 2005, doi: 10.1002/chin.200539182.

- [103] R. K. Devappa, H. P. S. Makkar, et K. Becker, « Nutritional, biochemical, and pharmaceutical potential of proteins and peptides from jatropha: review », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 58, n° 11, p. 6543-6555, juin 2010, doi: 10.1021/jf100003z.
- [104] F. Stirpe, A. Pession-Brizzi, E. Lorenzoni, P. Strocchi, L. Montanaro, et S. Sperti, « Studies on the proteins from the seeds of *Croton tiglium* and of *Jatropha curcas*. Toxic properties and inhibition of protein synthesis in vitro », *Biochem. J.*, vol. 156, n° 1, p. 1-6, avr. 1976, doi: 10.1042/bj1560001.
- [105] L. K. Nath et S. K. Dutta, « Wound healing response of the proteolytic enzyme curcain », *Indian J. Pharmacol.*, vol. 24, n° 2, p. 114, janv. 1992.
- [106] H. P. S. Makkar et K. Becker, « Potential of *J. curcas* seed meal as a protein supplement to livestock feed, constraints to its utilisation and possible strategies to overcome constraints », 1997.
- [107] A. j. j. van den Berg *et al.*, « Curcacycline A — a novel cyclic octapeptide isolated from the latex of *Jatropha curcas* L », *FEBS Lett.*, vol. 358, n° 3, p. 215-218, 1995, doi: 10.1016/0014-5793(94)01405-P.
- [108] C. Auvin, C. Baraguey, A. Blond, F. Lezenven, J.-L. Pousset, et B. Bodo, « Curcacycline B, a cyclic nonapeptide from *Jatropha curcas* enhancing rotamase activity of cyclophilin », *Tetrahedron Lett.*, vol. 38, n° 16, p. 2845-2848, avr. 1997, doi: 10.1016/S0040-4039(97)00495-4.
- [109] P. Muller, « Glossary of terms used in physical organic chemistry (IUPAC Recommendations 1994) », *Pure Appl. Chem.*, vol. 66, n° 5, p. 1077-1184, janv. 1994, doi: 10.1351/pac199466051077.
- [110] S. Mashaghi, T. Jadidi, G. Koenderink, et A. Mashaghi, « Lipid Nanotechnology », *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, n° 2, p. 4242-4282, févr. 2013, doi: 10.3390/ijms14024242.
- [111] M. H. Gordon, « FATS | Classification », in *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)*, B. Caballero, Éd. Oxford: Academic Press, 2003, p. 2287-2292. doi: 10.1016/B0-12-227055-X/00701-X.
- [112] A. S. Cole et J. E. Eastoe, « Chapter 8 - Lipids », in *Biochemistry and Oral Biology (Second Edition)*, A. S. Cole et J. E. Eastoe, Éd. Butterworth-Heinemann, 1988, p. 100-108. doi: 10.1016/B978-0-7236-1751-8.50015-6.
- [113] R. Macrae, R. K. Robinson, et M. J. Sadler, « Encyclopaedia of food science, food technology and nutrition », 1993.
- [114] R. A. Coleman et D. P. Lee, « Enzymes of triacylglycerol synthesis and their regulation », *Prog. Lipid Res.*, vol. 43, n° 2, p. 134-176, mars 2004, doi: 10.1016/s0163-7827(03)00051-1.
- [115] C. K. Mathews, K. E. Van Holde, et K. G. Ahern, *Biochemistry*, 3rd ed. San Francisco, Harlow: Addison Wesley Longman, 2000, p. Consulté le: 31 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://catalogue.sunderland.ac.uk/items/34645>
- [116] J. L. Groff, S. S. Gropper, et S. M. Hunt, « Advanced nutrition and human metabolism, 2nd ed », *St Paul Minneap. West Publ. Co.*, 1995.
- [117] J. E. Hunter, « Dietary trans fatty acids: Review of recent human studies and food industry responses », *Lipids*, vol. 41, n° 11, p. 967-992, nov. 2006, doi: 10.1007/s11745-006-5049-y.
- [118] V. R. Patel, G. G. Dumancas, L. C. Kasi Viswanath, R. Maples, et B. J. J. Subong, « Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production », *Lipid Insights*, vol. 9, p. 1-12, 2016, doi: 10.4137/LPI.S40233.
- [119] E. B. Mubofu, « Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials », *Sustain. Chem. Process.*, vol. 4, n° 1, p. 11, juill. 2016, doi: 10.1186/s40508-016-0055-8.
- [120] N. J. Vickers, « Animal Communication: When I'm Calling You, Will You Answer Too? », *Curr. Biol.*, vol. 27, n° 14, p. R713-R715, juill. 2017, doi: 10.1016/j.cub.2017.05.064.
- [121] A. Nezihe, D. Elif, Y. Özlem, et E. A. Tunçer, « Microwave Heating Application To Produce Dehydrated Castor Oil », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, n° 1, p. 398-403, janv. 2011, doi: 10.1021/ie1013037.
- [122] S. Sinadinović-Fišer, M. Janković, et O. Borota, « Epoxidation of castor oil with peracetic acid formed in situ in the presence of an ion exchange resin », *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 62, p. 106-113, déc. 2012, doi: 10.1016/j.cep.2012.08.005.
- [123] W. R. Wan Aliuddin, « Characterization and modification of castor oil extracted from the newly malaysian produced castor beans », Consulté le: 1 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/reader/159179498>
- [124] H. Alwaseem, C. J. Donahue, et S. Marincean, « Catalytic Transfer Hydrogenation of Castor Oil », *J. Chem. Educ.*, vol. 91, n° 4, p. 575-578, avr. 2014, doi: 10.1021/ed300476u.

- [125] L. C. Pabón et P. Hernández-Rodríguez, « Importancia química de *Jatropha curcas* y sus aplicaciones biológicas, farmacológicas e industriales », *Rev. Cuba. Plantas Med.*, vol. 17, n° 2, p. 194-209, juin 2012.
- [126] B. India, R. Tanzania, U. Canada, et B. Ethiopia, « Traditional Medicine - Growing Needs and Potential », 2002.
- [127] S. David, « The Ancient and Modern Worlds Unite to Fight HIV/AIDS in Tanga, Tanzania - medicinal plants | Science in Africa ». <http://www.scienceinfrica.com/ancient-and-modern-worlds-unite-fight-hiv/aids-tanga-tanzania-medicinal-plants> (consulté le 13 novembre 2021).
- [128] M. J. Moshi *et al.*, « EVALUATION OF ETHNOMEDICAL CLAIMS AND BRINE SHRIMP TOXICITY OF SOME PLANTS USED IN TANZANIA AS TRADITIONAL MEDICINES. », *Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med.*, vol. 3, p. 48-58, 2006.
- [129] J. A. Duke et J. A. Duke, *Handbook of medicinal herbs*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [130] J. Lin, F. Yan, L. Tang, et F. Chen, « Antitumor effects of curcin from seeds of *Jatropha curcas* », *Acta Pharmacol. Sin.*, vol. 24, n° 3, p. 241-246, mars 2003.
- [131] M. M. Goonasekera, V. K. Gunawardana, K. Jayasena, S. G. Mohammed, et S. Balasubramaniam, « Pregnancy terminating effect of *Jatropha curcas* in rats », *J. Ethnopharmacol.*, vol. 47, n° 3, p. 117-123, juill. 1995, doi: 10.1016/0378-8741(95)01263-d.
- [132] V. C. Pandey, K. Singh, J. S. Singh, A. Kumar, B. Singh, et R. P. Singh, « *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 5, p. 2870-2883, juin 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.004.
- [133] R. Thomas, N. K. Sah, et P. B. Sharma, « Therapeutic Biology of *Jatropha curcas*: A Mini Review », *Curr. Pharm. Biotechnol.*, vol. 9, n° 4, p. 315-324, août 2008, doi: 10.2174/138920108785161505.
- [134] D. N. Muanza, K. L. Euler, L. Williams, et D. J. Newman, « Screening for Antitumor and Anti-HIV Activities of Nine Medicinal Plants from Zaire », *Int. J. Pharmacogn.*, vol. 33, n° 2, p. 98-106, janv. 1995, doi: 10.3109/13880209509055207.
- [135] F. R. Fojas *et al.*, « Pharmacological studies on *Jatropha curcas* as a possible source of anti-arrhythmic (beta-blocker) agent », *Philipp J Sci*, vol. 115, n° 4, p. 317-328, 1986.
- [136] R. Balaji, V. Suba, N. Rekha, et M. Deecaraman, « Hepatoprotective activity of methanolic fraction of *Jatropha curcas* on aflatoxin b1 induced hepatic carcinoma », *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 2, p. 287-296, 2009.
- [137] A. F. dos Santos et A. E. Sant'Ana, « Molluscicidal activity of the diterpenoids jatrophone and jatropholones A and B isolated from *Jatropha elliptica* (Pohl) Muell. Arg », *Phytother. Res. PTR*, vol. 13, n° 8, p. 660-664, déc. 1999.
- [138] L. H. Martini, C. R. Souza, P. B. Marques, J. B. Calixto, R. A. Yunes, et D. O. Souza, « Compounds Extracted from *Phyllanthus* and *Jatropha elliptica* Inhibit the Binding of [3H]Glutamate and [3H]GMP-PNP in Rat Cerebral Cortex Membrane », *Neurochem. Res.*, vol. 25, p. 211-215, 2004.
- [139] M. D. Taylor *et al.*, « Plant anticancer agents. 28. New antileukemic jatrophone derivatives from *Jatropha gossypifolia*: structural and stereochemical assignment through nuclear magnetic resonance spectroscopy », *ACS Publications*, 1 mai 2002. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja00348a036> (consulté le 17 octobre 2021).
- [140] P. Chaturvedi, « The isolation, characterisation and anti-microbial activity of alkaloids of *Jatropha curcas* and *Piper longum*. », *J. Phytol. Res.*, vol. 21, n° 1, p. 53-56, 2008.
- [141] G. M. Gübitz, M. Mittelbach, et M. Trabi, « Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. », *Bioresour. Technol.*, vol. 67, n° 1, p. 73-82, janv. 1999, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00069-3.
- [142] S. Y. Liu *et al.*, « Anthraquinones in *Rheum palmatum* and *Rumex dentatus*(Polygonaceae), and phorbol esters in *Jatropha curcas*(Euphorbiaceae) with molluscicidal activity against the schistosome vector snails *Oncomelania*, *Biomphalaria*, and *Bulinus* », *Trop. Med. Int. Health*, vol. 2, n° 2, p. 179-188, 1997, doi: 10.1046/j.1365-3156.1997.d01-242.x.
- [143] M. O. Nwosu et J. I. Okafor, « Preliminary studies of the antifungal activities of some medicinal plants against *Basidiobolus* and some other pathogenic fungi », *Mycoses*, vol. 38, n° 5-6, p. 191-195, juin 1995, doi: 10.1111/j.1439-0507.1995.tb00048.x.

- [144] U. Dimri et M. C. Sharma, « Effects of sarcoptic mange and its control with oil of Cedrus deodara, Pongamia glabra, Jatropha curcas and benzyl benzoate, both with and without ascorbic acid on growing sheep: epidemiology; assessment of clinical, haematological, cell-mediated humoral immune responses and pathology », *J. Vet. Med. A Physiol. Pathol. Clin. Med.*, vol. 51, n° 2, p. 71-78, mars 2004, doi: 10.1111/j.1439-0442.2004.00601.x.
- [145] P. Agamuthu, O. P. Abioye, et A. A. Aziz, « Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using Jatropha curcas », *J. Hazard. Mater.*, vol. 179, n° 1, p. 891-894, juill. 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.03.088.
- [146] L. H. Wu, Y. M. Luo, P. Christie, et M. H. Wong, « Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil », *Chemosphere*, vol. 50, n° 6, p. 819-822, févr. 2003, doi: 10.1016/s0045-6535(02)00225-4.
- [147] C. Luo, Z. Shen, et X. Li, « Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS », *Chemosphere*, vol. 59, n° 1, p. 1-11, mars 2005, doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.100.
- [148] S. Jamil, P. C. Abhilash, N. Singh, et P. N. Sharma, « Jatropha curcas: A potential crop for phytoremediation of coal fly ash », *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, n° 1, p. 269-275, déc. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.004.
- [149] C. A. S. Bork, J. F. S. Gonçalves, et J. O. Gomes, « The Jatropha curcas vegetable base soluble cutting oil as a renewable source in the machining of aluminum alloy 7050-T7451 », *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 67, n° 2, p. 181-195, janv. 2015, doi: 10.1108/ILT-09-2014-0090.
- [150] S. Bashi, U. U. Abdullahi, R. Yunus, et A. Nordin, « Use of natural vegetable oils as alternative dielectric transformer coolants », vol. 67, p. 4-9, juin 2006.
- [151] Z. N. Garba, C. E. Gimba, et P. C. Emmanuel, « Production and Characterisation of Biobased Transformer Oil from Jatropha Curcas Seed », 2013.
- [152] N. Hlaing et M. M. Oo, « Manufacture of Alkyd Resin from Castor Oil », 2008.
- [153] H. P. S. A. Khalil, N. A. S. Aprilia, A. H. Bhat, M. Jawaid, M. T. Paridah, et D. Rudi, « A Jatropha biomass as renewable materials for biocomposites and its applications », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, p. 667-685, juin 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.036.
- [154] M. M. Aung, Z. Yaakob, L. C. Abdullah, M. Rayung, et W. J. Li, « A comparative study of acrylate oligomer on Jatropha and Palm oil-based UV-curable surface coating », *Ind. Crops Prod.*, vol. 77, p. 1047-1052, déc. 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.09.065.
- [155] O. Gordobil, R. Moriana, L. Zhang, J. Labidi, et O. Sevastyanova, « Assesment of technical lignins for uses in biofuels and biomaterials: Structure-related properties, proximate analysis and chemical modification », *Ind. Crops Prod.*, vol. 83, p. 155-165, mai 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.12.048.
- [156] A. Nindita, I. S. Dewi, B. S. Purwoko, et R. H. Setyobudi, « Genetic Improvement and Biotechnology Research of Jatropha curcas Linn. Review: Future Research Opportunity and Sustainability Challenges in Indonesia », *Energy Procedia*, vol. 65, p. 3-7, janv. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.021.
- [157] « Making Woodforce - Woodforce ». <https://www.woodforce.com/about/making-woodforce> (consulté le 18 novembre 2021).
- [158] G. W. Frey et D. M. Linke, « Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way », *Energy Policy*, vol. 30, n° 14, p. 1261-1265, nov. 2002, doi: 10.1016/S0301-4215(02)00086-1.
- [159] « Full Text Glossary », *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/full-text-glossary> (consulté le 16 novembre 2021).
- [160] « Bioenergy | Energy | Food and Agriculture Organization of the United Nations ». <https://www.fao.org/energy/bioenergy/en/> (consulté le 16 novembre 2021).
- [161] « Bioenergy - 1st Edition ». <https://www.elsevier.com/books/bioenergy/dahiya/978-0-12-407909-0> (consulté le 16 novembre 2021).
- [162] N. Kumar, M. P. Reddy, et M. Sujatha, « Genetic Transformation of Jatropha curcas: Current Status and Future Prospects », in *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop: Volume 2: Genetic Improvement and Biotechnology*, B. Bahadur, M. Sujatha, et N. Carels, Éd. New York, NY: Springer, 2013, p. 535-546. doi: 10.1007/978-1-4614-4915-7_28.
- [163] A. H. Hirani, N. Javed, M. Asif, S. K. Basu, et A. Kumar, « A Review on First- and Second-Generation Biofuel Productions », in *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming:*

- Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, A. Kumar, S. Ogita, et Y.-Y. Yau, Éd. New Delhi: Springer India, 2018, p. 141-154. doi: 10.1007/978-81-322-3763-1_8.
- [164] J. Gressel, « Transgenics are imperative for biofuel crops », *Plant Sci.*, vol. 174, n° 3, p. 246-263, mars 2008, doi: 10.1016/j.plantsci.2007.11.009.
- [165] L. R. Lynd *et al.*, « How biotech can transform biofuels », *Nat. Biotechnol.*, vol. 26, n° 2, p. 169-172, févr. 2008, doi: 10.1038/nbt0208-169.
- [166] H. Ren *et al.*, « Effects of temperature on the performance of anaerobic co-digestion of vegetable waste and swine manure », *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 11, n° 1, Art. n° 1, janv. 2018, doi: 10.25165/ijabe.v11i1.3706.
- [167] M. Shahbaz, M. Ammar, D. Zou, R. M. Korai, et X. Li, « An Insight into the Anaerobic Co-digestion of Municipal Solid Waste and Food Waste: Influence of Co-substrate Mixture Ratio and Substrate to Inoculum Ratio on Biogas Production », *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 187, n° 4, p. 1356-1370, avr. 2019, doi: 10.1007/s12010-018-2891-3.
- [168] E. A. Scano, C. Asquer, A. Pistis, L. Ortu, V. Demontis, et D. Cocco, « Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant », *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, p. 22-30, janv. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.09.004.
- [169] D. T. Jones et D. R. Woods, « Acetone-butanol fermentation revisited », *Microbiol. Rev.*, vol. 50, n° 4, p. 484-524, déc. 1986, doi: 10.1128/mr.50.4.484-524.1986.
- [170] X. Kong *et al.*, « Biobutanol production from sugarcane bagasse hydrolysate generated with the assistance of gamma-valerolactone », *Process Biochem.*, vol. 51, n° 10, p. 1538-1543, oct. 2016, doi: 10.1016/j.procbio.2016.06.013.
- [171] Y. Li, W. Tang, Y. Chen, J. Liu, et C. F. Lee, « Potential of acetone-butanol-ethanol (ABE) as a biofuel », *Fuel*, vol. 242, p. 673-686, avr. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.063.
- [172] K. R. Szulczyk, « Which is a better transportation fuel--butanol or ethanol? », *Int. J. Energy Environ.*, n° 3, 2010.
- [173] L. Di Paola, V. Russo, et V. Piemonte, « 9 - Membrane reactors for biohydrogen production and processing », in *Membrane Reactors for Energy Applications and Basic Chemical Production*, A. Basile, L. Di Paola, F. I. Hai, et V. Piemonte, Éd. Woodhead Publishing, 2015, p. 267-286. doi: 10.1016/B978-1-78242-223-5.00009-1.
- [174] F. Dalena, A. Basile, et C. Rossi, *Bioenergy systems for the future: prospects for biofuels and biohydrogen*. Woodhead Publishing, 2017.
- [175] A. Ghimire *et al.*, « A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: Process parameters and use of by-products », *Appl. Energy*, vol. 144, p. 73-95, avr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.045.
- [176] N. Nasr, M. Gupta, E. Elbeshbishy, H. Hafez, M. H. El Naggat, et G. Nakhla, « Biohydrogen production from pretreated corn cobs », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n° 35, p. 19921-19927, déc. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.004.
- [177] K. Bala-Amutha et A. G. Murugesan, « Biohydrogen production using corn stalk employing *Bacillus licheniformis* MSU AGM 2 strain », *Renew. Energy*, vol. 50, p. 621-627, févr. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.07.033.
- [178] X. Wu, W. Yao, et J. Zhu, « Effect of pH on continuous biohydrogen production from liquid swine manure with glucose supplement using an anaerobic sequencing batch reactor », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 13, p. 6592-6599, juill. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.097.
- [179] X. M. Guo, E. Trably, E. Latrille, H. Carrère, et J.-P. Steyer, « Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 19, p. 10660-10673, oct. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.008.
- [180] K. Urbaniec et R. R. Bakker, « Biomass residues as raw material for dark hydrogen fermentation – A review », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, n° 9, p. 3648-3658, mars 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.073.
- [181] L. Lin, Z. Cunshan, S. Vittayapadung, S. Xiangqian, et D. Mingdong, « Opportunities and challenges for biodiesel fuel », *Appl. Energy*, vol. 88, n° 4, p. 1020-1031, avr. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.029.
- [182] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, et A. A. Aziz, « High quality biodiesel and its diesel engine application: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n° 7, p. 1999-2008, sept. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.020.

- [183] D. Ayhan, « Importance of biodiesel as transportation fuel - ScienceDirect ». <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421507001516?via%3Dihub> (consulté le 18 novembre 2021).
- [184] W. Parawira, « Biodiesel production from *Jatropha curcas*: A review », *Sci. Res. Essays*, vol. 5, p. 1796-1808, 2010.
- [185] M. Mofijur *et al.*, « Prospects of biodiesel from *Jatropha* in Malaysia », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 7, p. 5007-5020, sept. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.010.
- [186] B. G. Laviola, A. A. Alves, R. B. Rocha, et M. A. Drumond, « The Importance of *Jatropha* for Brazil », in *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop: Volume 1: Farming, Economics and Biofuel*, N. Carels, M. Sujatha, et B. Bahadur, Éd. New York, NY: Springer, 2012, p. 71-94. doi: 10.1007/978-1-4614-4806-8_5.
- [187] H. P. S. Makkar et K. Becker, « *Jatropha curcas*, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts », *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 111, n° 8, p. 773-787, août 2009, doi: 10.1002/ejlt.200800244.
- [188] A. J. King, W. He, J. A. Cuevas, M. Freudenberger, D. Ramiarmanana, et I. A. Graham, « Potential of *Jatropha curcas* as a source of renewable oil and animal feed », *J. Exp. Bot.*, vol. 60, n° 10, p. 2897-2905, juill. 2009, doi: 10.1093/jxb/erp025.
- [189] H. Makkar, V. Kumar, et K. Becker, « Use of detoxified *Jatropha* kernel meal and protein isolate in farm animal species », 2012, p. 273.
- [190] D. Singh *et al.*, « A comprehensive review of physicochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock: *Jatropha curcas* », *Fuel*, vol. 285, p. 119110, févr. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119110.
- [191] A. Ghosh *et al.*, « Response of *Jatropha curcas* under different spacing to *Jatropha* de-oiled cake », 2007.
- [192] S. P. Wani, M. Osman, E. D'Silva, et T. K. Sreedevi, « Improved livelihoods and environmental protection through biodiesel plantations in Asia. », *Asian Biotechnol. Dev. Rev.*, vol. 8, n° 2, Art. n° 2, 2006.
- [193] R. N. Singh, D. K. Vyas, N. S. L. Srivastava, et M. Narra, « SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy », *Renew. Energy*, vol. 33, n° 8, p. 1868-1873, août 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.10.007.
- [194] J. Duke, « Medicinal plants », *Science*, vol. 229, n° 4718, p. 1036, 1038, sept. 1985.
- [195] J. A. Duke, *Handbook of Medicinal Herbs*, 2^e éd. Boca Raton: CRC Press, 2002. doi: 10.1201/9781420040463.
- [196] M. Szczęśna Antczak, A. Kubiak, T. Antczak, et S. Bielecki, « Enzymatic biodiesel synthesis – Key factors affecting efficiency of the process », *Renew. Energy*, vol. 34, n° 5, p. 1185-1194, mai 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.11.013.
- [197] N. N. A. N. Yusuf, S. K. Kamarudin, et Z. Yaakob, « Overview on the production of biodiesel from *Jatropha curcas* L. by using heterogenous catalysts », *Biofuels Bioprod. Biorefining*, vol. 6, n° 3, p. 319-334, 2012, doi: 10.1002/bbb.345.
- [198] J. W. Goodrum, « Volatility and boiling points of biodiesel from vegetable oils and tallow », *Biomass Bioenergy*, vol. 22, n° 3, p. 205-211, mars 2002, doi: 10.1016/S0961-9534(01)00074-5.
- [199] H. J. Berchmans et S. Hirata, « Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n° 6, p. 1716-1721, avr. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.03.051.
- [200] E. Crabbe, C. Nolasco-Hipolito, G. Kobayashi, K. Sonomoto, et A. Ishizaki, « Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties », *Process Biochem.*, vol. 37, n° 1, p. 65-71, sept. 2001, doi: 10.1016/S0032-9592(01)00178-9.
- [201] H. Fukuda, A. Kondo, et H. Noda, « Biodiesel fuel production by transesterification of oils », *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 92, n° 5, p. 405-416, janv. 2001, doi: 10.1016/S1389-1723(01)80288-7.
- [202] F. Ma et M. A. Hanna, « Biodiesel production: a review | Journal Series #12109, Agricultural Research Division, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln.1 », *Bioresour. Technol.*, vol. 70, n° 1, p. 1-15, oct. 1999, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00025-5.
- [203] G. Arzamendi, I. Campo, E. Arguiñarena, M. Sánchez, M. Montes, et L. M. Gandía, « Synthesis of biodiesel with heterogeneous NaOH/alumina catalysts: Comparison with homogeneous NaOH », *Chem. Eng. J.*, vol. 134, n° 1, p. 123-130, nov. 2007, doi: 10.1016/j.cej.2007.03.049.

- [204] X. Liu, X. Piao, Y. Wang, S. Zhu, et H. He, « Calcium methoxide as a solid base catalyst for the transesterification of soybean oil to biodiesel with methanol », *Fuel*, vol. 87, n° 7, p. 1076-1082, juin 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2007.05.059.
- [205] R. Sarin, M. Sharma, S. Sinharay, et R. K. Malhotra, « Jatropha–Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia », *Fuel*, vol. 86, n° 10, p. 1365-1371, juill. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.11.040.
- [206] S. Saka et D. Kusdiana, « Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol », *Fuel*, vol. 80, n° 2, p. 225-231, janv. 2001, doi: 10.1016/S0016-2361(00)00083-1.
- [207] V. Rathore et G. Madras, « Synthesis of biodiesel from edible and non-edible oils in supercritical alcohols and enzymatic synthesis in supercritical carbon dioxide », *Fuel*, vol. 86, n° 17, p. 2650-2659, déc. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2007.03.014.
- [208] S. Shah et M. N. Gupta, « Lipase catalyzed preparation of biodiesel from Jatropha oil in a solvent free system », *Process Biochem.*, vol. 42, n° 3, p. 409-414, mars 2007, doi: 10.1016/j.procbio.2006.09.024.
- [209] H. Zhu *et al.*, « Preparation of Biodiesel Catalyzed by Solid Super Base of Calcium Oxide and Its Refining Process », *Chin. J. Catal.*, vol. 27, n° 5, p. 391-396, mai 2006, doi: 10.1016/S1872-2067(06)60024-7.
- [210] E.-Z. Su, W.-Q. Xu, K.-L. Gao, Y. Zheng, et D.-Z. Wei, « Lipase-catalyzed in situ reactive extraction of oilseeds with short-chained alkyl acetates for fatty acid esters production », *J. Mol. Catal. B Enzym.*, vol. 48, n° 1, p. 28-32, sept. 2007, doi: 10.1016/j.molcatb.2007.06.003.
- [211] S. V. Ranganathan, S. L. Narasimhan, et K. Muthukumar, « An overview of enzymatic production of biodiesel », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n° 10, p. 3975-3981, juill. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.04.060.
- [212] G. Çaylı et S. Küsefoğlu, « Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA », *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, n° 2, p. 118-122, févr. 2008, doi: 10.1016/j.fuproc.2007.06.020.
- [213] S. Deepakkumar, M. Arvind, G. Aravinth, M. Mohan, M. Vijayadhasan, et M. Loganathan, « Biodiesel production from high FFA rubber seed oil », *Adv. Nat. Appl. Sci.*, vol. 10, n° 9 SE, p. 221-228, juin 2016.
- [214] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, et C. Muraleedharan, « Biodiesel production from high FFA rubber seed oil », *Fuel*, vol. 84, n° 4, p. 335-340, mars 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2004.09.016.
- [215] Y. Wang, S. O. Pengzhan Liu, et Z. Zhang, « Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process », *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, n° 1, p. 184-188, janv. 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2006.04.016.
- [216] L. Guerreiro, J. E. Castanheiro, I. M. Fonseca, R. M. Martin-Aranda, A. M. Ramos, et J. Vital, « Transesterification of soybean oil over sulfonic acid functionalised polymeric membranes », *Catal. Today*, vol. 118, n° 1, p. 166-171, oct. 2006, doi: 10.1016/j.cattod.2005.12.012.
- [217] D. Darnoko et M. Cheryan, « Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 77, n° 12, p. 1263-1267, déc. 2000, doi: 10.1007/s11746-000-0198-y.
- [218] D. C. Rule, « Direct transesterification of total fatty acids of adipose tissue, and of freeze-dried muscle and liver with boron-trifluoride in methanol », *Meat Sci.*, vol. 46, n° 1, p. 23-32, mai 1997, doi: 10.1016/S0309-1740(97)00008-9.
- [219] S. Maroa et F. Inambao, « Biodiesels Production Processes and Technologies », in *Biodiesel, Combustion, Performance and Emissions Characteristics*, S. Maroa et F. Inambao, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 17-27. doi: 10.1007/978-3-030-51166-1_3.
- [220] N. Nazir *et al.*, « Extraction, transesterification and process control in biodiesel production from Jatropha curcas », *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 111, n° 12, p. 1185-1200, 2009, doi: 10.1002/ejlt.200800259.
- [221] U. Schuchardt, R. Sercheli, et R. M. Vargas, « Transesterification of vegetable oils: a review », *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 9, p. 199-210, mai 1998, doi: 10.1590/S0103-50531998000300002.
- [222] A. Abbaszaadeh, B. Ghobadian, M. R. Omidkhan, et G. Najafi, « Current biodiesel production technologies: A comparative review », *Energy Convers. Manag.*, vol. 63, p. 138-148, nov. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.02.027.
- [223] G. Katre, C. Joshi, M. Khot, S. Zinjarde, et A. RaviKumar, « Evaluation of single cell oil (SCO) from a tropical marine yeast Yarrowia lipolytica NCIM 3589 as a potential feedstock for biodiesel », *AMB Express*, vol. 2, n° 1, p. 36, juill. 2012, doi: 10.1186/2191-0855-2-36.

- [224] P. P. Shah, C. Wee, J. M. White, S. Sanford, et G. Meier, « Experimental Determination and Thermodynamic Modeling of Water Content in Biodiesel - Diesel Blend s », 2010.
- [225] N. Luo, X. Fu, F. Cao, T. Xiao, et P. P. Edwards, « Glycerol aqueous phase reforming for hydrogen generation over Pt catalyst – Effect of catalyst composition and reaction conditions », *Fuel*, vol. 87, n° 17, p. 3483-3489, déc. 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.06.021.
- [226] C. J. Mueller, W. J. Cannella, et G. T. Kalghatgi, « Fuels for Engines and the Impact of Fuel Composition on Engine Performance », in *Encyclopedia of Automotive Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 1-27. doi: 10.1002/9781118354179.auto125.
- [227] M. B. Oliveira, F. R. Varanda, I. M. Marrucho, A. J. Queimada, et J. A. P. Coutinho, « Prediction of Water Solubility in Biodiesel with the CPA Equation of State », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, n° 12, p. 4278-4285, juin 2008, doi: 10.1021/ie800018x.
- [228] B. Bharathiraja *et al.*, « Biodiesel production using chemical and biological methods – A review of process, catalyst, acyl acceptor, source and process variables », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, p. 368-382, oct. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.084.
- [229] G. P. da Silva, M. Mack, et J. Contiero, « Glycerol: A promising and abundant carbon source for industrial microbiology », *Biotechnol. Adv.*, vol. 27, n° 1, p. 30-39, janv. 2009, doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.07.006.
- [230] Y. Gonzalez-Garcia, R. Hernandez, G. Zhang, F. M. Escalante, W. Holmes, et W. T. French, « Lipids accumulation in *Rhodotorula glutinis* and *Cryptococcus curvatus* growing on distillery wastewater as culture medium », *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 32, n° 1, p. 69-74, 2013.
- [231] G. Knothe et J. V. Gerpen, Éd., *The Biodiesel Handbook*. New York: AOCS Publishing, 2005. doi: 10.1201/9781439822357.
- [232] « Biodiesel Fuel Quality – Farm Energy ». <https://farm-energy.extension.org/biodiesel-fuel-quality/#Sulfur> (consulté le 22 novembre 2021).
- [233] B. B. He, J. H. V. Gerpen, et J. C. Thompson, « Sulfur Content in Selected Oils and Fats and their Corresponding Methyl Esters », *Appl. Eng. Agric.*, vol. 25, p. 223-226, 2009.
- [234] T. Zhang, L. J. Nilsson, C. Björkholtz, K. Munch, et I. Denbratt, « Effect of using butanol and octanol isomers on engine performance of steady state and cold start ability in different types of Diesel engines », *Fuel*, vol. 184, p. 708-717, nov. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.07.046.
- [235] T. He, Z. Chen, L. Zhu, et Q. Zhang, « The influence of alcohol additives and EGR on the combustion and emission characteristics of diesel engine under high-load condition », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 140, p. 363-372, juill. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.064.
- [236] M. Mittelbach et C. Remschmidt, « Biodiesel the comprehensive handbook », *M Mittelbach Publ. Gratz Austria*, 2004.
- [237] K. Komers et J. Machek, « Remarks to Conradson Carbonisation Index and to Neutralisation Number of Biodiesel », in *Proceedings of the International Conference on Standards and Analysis of Biodiesel, Vienna*, 1995, vol. 11, p. 182-184.
- [238] M. Černoch, M. Hájek, et F. Skopal, « Relationships among flash point, carbon residue, viscosity and some impurities in biodiesel after ethanolysis of rapeseed oil », *Bioresour. Technol.*, vol. 101, n° 19, p. 7397-7401, oct. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.003.
- [239] M. Olkiewicz, A. Fortuny, F. Stüber, A. Fabregat, J. Font, et Ch. Bengoa, « Evaluation of Different Sludges from WWTP as a Potential Source for Biodiesel Production », *Procedia Eng.*, vol. 42, p. 634-643, janv. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.456.
- [240] M. K. Gouda, S. H. Omar, et L. M. Aouad, « Single cell oil production by *Gordonia* sp. DG using agro-industrial wastes », *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 24, n° 9, p. 1703, janv. 2008, doi: 10.1007/s11274-008-9664-z.
- [241] R. L. Skaggs, A. M. Coleman, T. E. Seiple, et A. R. Milbrandt, « Waste-to-Energy biofuel production potential for selected feedstocks in the conterminous United States », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, p. 2640-2651, févr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.107.
- [242] D. Y. C. Leung, X. Wu, et M. K. H. Leung, « A review on biodiesel production using catalyzed transesterification », *Appl. Energy*, vol. 87, n° 4, p. 1083-1095, avr. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.10.006.
- [243] L. Bournay, D. Casanave, B. Delfort, G. Hillion, et J. A. Chodorge, « New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants », *Catal. Today*, vol. 106, n° 1, p. 190-192, oct. 2005, doi: 10.1016/j.cattod.2005.07.181.

- [244] J. C. Thompson et B. B. He, « Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks. », *Appl. Eng. Agric.*, vol. 22, n° 2, p. 261-265, 2006.
- [245] M. H. Jayed, H. H. Masjuki, R. Saidur, M. A. Kalam, et M. I. Jahirul, « Environmental aspects and challenges of oilseed produced biodiesel in Southeast Asia », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 9, p. 2452-2462, déc. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.023.
- [246] A. Z. Abdullah, B. Salamatinia, H. Mootabadi, et S. Bhatia, « Current status and policies on biodiesel industry in Malaysia as the world's leading producer of palm oil », *Energy Policy*, vol. 37, n° 12, p. 5440-5448, déc. 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.012.
- [247] Y. M. Ako, M. Grass, et M. Zeller, « "Competition for Resources in a Changing World: New Drive for Rural Development" Potentials and Constraints of Biofuel Production in Ethiopia », 2008.
- [248] A. N. Phan et T. M. Phan, « Biodiesel production from waste cooking oils », *Fuel*, vol. 87, n° 17, p. 3490-3496, déc. 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.07.008.
- [249] K. Openshaw, « A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise », *Biomass Bioenergy*, vol. 19, n° 1, p. 1-15, juill. 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(00)00019-2.
- [250] O. Ben Mya, L. Ben Amar, B. Zarroud, et H. Hammami, « Deglet Nour Dates *Phoenix dactylifera* L.: An Alternative Source to Sugar in Algeria », *Sugar Tech*, vol. 19, n° 3, p. 337-340, juin 2017, doi: 10.1007/s12355-016-0462-x.
- [251] L. Mekhzoumi et N. Harnane, « Profitability and Competitiveness of Peanuts Farming in Oued Souf: A Policy Analysis Matrix approach », *مجلة البشائر الاقتصادية*, vol. 7, n° 1, p. 1179-1194, avr. 2021.
- [252] J. B. Kandpal et M. Madan, « *Jatropha curcas*: a renewable source of energy for meeting future energy needs », *Renew. Energy*, vol. 6, n° 2, p. 159-160, mars 1995, doi: 10.1016/0960-1481(94)00081-G.
- [253] S. C. Singhal, J. Sekiya, et O. T. A. of India, *Modern Technology in the Oils & Fats Industry*, 2003rd edition. Oil Technologists' Association of India, 2003.
- [254] C. R. Daubert et B. E. Farkas, « Viscosity Measurement Using a Brookfield Viscometer », in *Food Analysis Laboratory Manual*, S. S. Nielsen, Éd. Boston, MA: Springer US, 2010, p. 165-169. doi: 10.1007/978-1-4419-1463-7_20.
- [255] T. G. Amabye et A. M. Bezabh, « Physicochemical Characterization and Phytochemical Screening of *Jatropha Curcas*L. Seed Oil Cultivated in Tigray Ethiopia », *Adv. Biochem.*, vol. 3, n° 3, Art. n° 3, sept. 2015, doi: 10.11648/j.ab.20150303.11.
- [256] B. Abdullah et J. Salimon, « Physicochemical Characteristics of Malaysian Rubber (*Hevea Brasiliensis*) Seed Oil », *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 31, janv. 2009.
- [257] D. Premjet, A. K. Obeng, H. Y. Yoo, S. W. Kim, et S. Premjet, « Physicochemical Characterization of *Jatropha podagrica* Seed Oil for Potential Biodiesel Production and other Industrial Applications in Thailand », *Sains Malays.*, vol. 50, n° 1, p. 85-92, janv. 2021, doi: 10.17576/jsm-2021-5001-09.
- [258] N. R. B. M. Yusoff, S. bin H. Hasan, et N. H. binti Abdullah, « Process to Produce Biodiesel Using *Jatropha Curcas* Oil (JCO) », *Int. J. Mater. Sci. Eng.*, p. 100-103, 2013, doi: 10.12720/ijmse.1.2.100-103.
- [259] T. I. Olasheu, K. A. Adebisi, M. O. Durowoju, et K. O. Odesanya, « Characterization of Castor (*Ricinus Communis*) And *Jatropha (Jatropha Curcas)* Oils as Alternative Base Oil for Automotive Lubricants », vol. 5, n° 8, p. 19, 2014.
- [260] B. Sabiu, I. A. Mohamed-Dabo, N. Mohammed, S. Kasim, I. H. Almustapha, et Y. Abdullahi Yamusa, « Production of bio-lubricant from *Jatropha curcas* seed oil », *J Chem Eng Mater Sci*, vol. 4, p. 72-79, janv. 2013.
- [261] I. Center, « Feasibility report, small scale biodiesel production », *Waste Manag. Res. Cent.*, 2006.
- [262] P. Chitra, P. Venkatachalam, et A. Sampathrajan, « Optimisation of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of *Jatropha curcas* oil », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 9, n° 3, p. 13-18, sept. 2005, doi: 10.1016/S0973-0826(08)60518-9.
- [263] A. Kumar Tiwari, A. Kumar, et H. Raheman, « Biodiesel production from *jatropha* oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process », *Biomass Bioenergy*, vol. 31, n° 8, p. 569-575, août 2007, doi: 10.1016/j.biombioe.2007.03.003.

- [264] H. J. Berchmans et S. Hirata, « Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n° 6, p. 1716-1721, avr. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.03.051.
- [265] S. Jain et M. P. Sharma, « Kinetics of acid base catalyzed transesterification of *Jatropha curcas* oil », *Bioresour. Technol.*, vol. 101, n° 20, p. 7701-7706, oct. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.034.
- [266] S. Phuenduang, P. Siricharnsakunchai, L. Simasatitkul, W. Paengjuntuek, et A. Arpornwichanop, « Optimization of Biodiesel Production from *Jatropha* Oil using Reactive Distillation », 2011.
- [267] V. Thangarasu et R. Anand, « 11 - Physicochemical fuel properties and tribological behavior of aegle marmelos correa biodiesel », in *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, K. Azad, Éd. Woodhead Publishing, 2019, p. 309-336. doi: 10.1016/B978-0-08-102728-8.00011-5.
- [268] V. C. Eze, A. N. Phan, et A. P. Harvey, « A more robust model of the biodiesel reaction, allowing identification of process conditions for significantly enhanced rate and water tolerance », *Bioresour. Technol.*, vol. 156, p. 222-231, mars 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.01.028.
- [269] H. C. Ong, A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, W. T. Chong, et M. H. Boosroh, « Production and comparative fuel properties of biodiesel from non-edible oils: *Jatropha curcas*, *Sterculia foetida* and *Ceiba pentandra* », *Energy Convers. Manag.*, vol. 73, p. 245-255, sept. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.04.011.
- [270] M. Habibullah *et al.*, « Potential of biodiesel as a renewable energy source in Bangladesh », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, p. 819-834, oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.149.
- [271] I. M. Rizwanul Fattah, H. H. Masjuki, A. M. Liaquat, R. Ramli, M. A. Kalam, et V. N. Riazuddin, « Impact of various biodiesel fuels obtained from edible and non-edible oils on engine exhaust gas and noise emissions », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, p. 552-567, févr. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.036.
- [272] J. H. V. Gerpen, B. H. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, et G. Knothe, « Biodiesel Analytical Methods: August 2002–January 2004 », 2004.
- [273] M. Mofijur, M. G. Rasul, N. M. S. Hassan, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, et H. M. Mahmudul, « Chapter Fourteen - Assessment of Physical, Chemical, and Tribological Properties of Different Biodiesel Fuels », in *Clean Energy for Sustainable Development*, M. G. Rasul, A. Kalam Azad, et S. C. Sharma, Éd. Academic Press, 2017, p. 441-463. doi: 10.1016/B978-0-12-805423-9.00014-4.
- [274] P. K. Devan et N. V. Mahalakshmi, « Study of the performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using poon oil-based fuels », *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, n° 4, p. 513-519, avr. 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.01.009.
- [275] M. M. Rahman, M. Rasul, N. M. S. Hassan, et J. Hyde, « Prospects of Biodiesel Production from Macadamia Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engines », *Energies*, vol. 9, p. 1-15, 2016.
- [276] D. K. Sarkar, « Chapter 3 - Fuels and Combustion », in *Thermal Power Plant*, D. K. Sarkar, Éd. Elsevier, 2015, p. 91-137. doi: 10.1016/B978-0-12-801575-9.00003-2.
- [277] A. Demirbaş, « Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils », *Fuel*, vol. 77, n° 9, p. 1117-1120, juill. 1998, doi: 10.1016/S0016-2361(97)00289-5.
- [278] A. E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, et S. Mekhilef, « A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 4, p. 2070-2093, mai 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.003.
- [279] J. M. Danlami, A. Arsad, M. A. A. Zaini, et H. Sulaiman, « A comparative study of various oil extraction techniques from plants », *Rev. Chem. Eng.*, vol. 30, n° 6, p. 605-626, déc. 2014, doi: 10.1515/revce-2013-0038.
- [280] C. Capello, U. Fischer, et K. Hungerbühler, « What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents », *Green Chem.*, vol. 9, n° 9, p. 927-934, août 2007, doi: 10.1039/B617536H.
- [281] C. C. Siang, « *Jatropha curcas* : Development of a New Oil Crop for Biofuel », 2009.
- [282] G. Knothe et K. R. Steidley, « Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components », *Fuel*, vol. 84, n° 9, p. 1059-1065, juin 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2005.01.016.
- [283] B. K. Highina, I. M. Bugaje, et B. Umar, « Biodiesel production from *Jatropha caucis* oil in a batch reactor using zinc oxide as catalyst », *J. Pet. Technol. Altern. Fuels*, vol. 2, n° 9, p. 146-149, sept. 2011, doi: 10.5897/JPTAF.9000005.

- [284] A. A. Abou-Arab et F. M. Abu-Salem, « NUTRITIONAL QUALITY OF *Jatropha curcas* SEEDS AND EFFECT OF SOME BIOLOGICAL AND CHEMICAL TREATMENTS ON THEIR ANTINUTRITIONAL FACTORS », *J. Food Dairy Sci.*, vol. 34, n° 12, p. 11059-11076, déc. 2009, doi: 10.21608/jfds.2009.115821.
- [285] J. S. de Oliveira *et al.*, « Characteristics and composition of *Jatropha gossypifolia* and *Jatropha curcas* L. oils and application for biodiesel production », *Biomass Bioenergy*, vol. 33, n° 3, p. 449-453, mars 2009, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.08.006.
- [286] O. Kibazohi et R. S. Sangwan, « Vegetable oil production potential from *Jatropha curcas*, *Croton megalocarpus*, *Aleurites moluccana*, *Moringa oleifera* and *Pachira glabra*: Assessment of renewable energy resources for bio-energy production in Africa », *Biomass Bioenergy*, vol. 35, n° 3, p. 1352-1356, mars 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.12.048.
- [287] E. T. Akintayo, « Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes », *Bioresour. Technol.*, vol. 92, n° 3, p. 307-310, mai 2004, doi: 10.1016/S0960-8524(03)00197-4.
- [288] H. Jaliliannosrati, N. A. S. Amin, A. Talebian-Kiakalaieh, et I. Noshadi, « Microwave assisted biodiesel production from *Jatropha curcas* L. seed by two-step in situ process: optimization using response surface methodology », *Bioresour. Technol.*, vol. 136, p. 565-573, mai 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.02.078.
- [289] S. N. Shah, O. K. Iha, F. C. S. C. Alves, B. K. Sharma, S. Z. Erhan, et P. A. Z. Suarez, « Potential Application of Turnip Oil (*Raphanus sativus* L.) for Biodiesel Production: Physical-Chemical Properties of Neat Oil, Biofuels and their Blends with Ultra-Low Sulphur Diesel (ULSD) », *BioEnergy Res.*, vol. 6, n° 2, p. 841-850, juin 2013, doi: 10.1007/s12155-013-9310-y.
- [290] R. Wang *et al.*, « Production and selected fuel properties of biodiesel from promising non-edible oils: *Euphorbia lathyris* L., *Sapium sebiferum* L. and *Jatropha curcas* L », *Bioresour. Technol.*, vol. 102, n° 2, p. 1194-1199, janv. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.09.066.
- [291] W. Roschat, T. Siritanon, B. Yoosuk, T. Sudyoadsuk, et V. Promarak, « Rubber seed oil as potential non-edible feedstock for biodiesel production using heterogeneous catalyst in Thailand », *Renew. Energy*, vol. 101, p. 937-944, févr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.09.057.
- [292] E. Akbar, Z. Yaakob, S. K. Kamarudin, M. Ismail, et J. Salimon, « Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil seed from Malaysia and its potential as biodiesel feedstock feedstock », *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 29, p. 396-403, 2009.
- [293] J. Salimon et R. Abdullah, « PHYSIOCOCHEMICAL PROPERTIES OF MALAYSIAN *JATROPHA CURCAS* SEED OIL », *Sains Malays.*, vol. 37, p. 379-382, 2008.
- [294] X. Ying, « Callus Induction from *Jatropha curcas* Endosperm and Elimination of Microbial Contamination in Culture », *Chin. J. Applied Environ. Biol.*, 2006.
- [295] B. Esteban, J.-R. Riba, G. Baquero, A. Rius, et R. Puig, « Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils », *Biomass Bioenergy*, vol. 42, p. 164-171, juill. 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.03.007.
- [296] F. Siano, M. C. Straccia, M. Paolucci, G. Fasulo, F. Boscaino, et M. G. Volpe, « Physico-chemical properties and fatty acid composition of pomegranate, cherry and pumpkin seed oils », *J. Sci. Food Agric.*, vol. 96, n° 5, p. 1730-1735, mars 2016, doi: 10.1002/jsfa.7279.
- [297] C. W. Sabandar, N. Ahmat, F. M. Jaafar, et I. Sahidin, « Medicinal property, phytochemistry and pharmacology of several *Jatropha* species (Euphorbiaceae): a review », *Phytochemistry*, vol. 85, p. 7-29, janv. 2013, doi: 10.1016/j.phytochem.2012.10.009.
- [298] R. Yusop, « Physicochemical Properties Analysis of *Jatropha curcas* Seed Oil for Industrial Applications », sept. 2013.
- [299] Q. X. Li et C. L. Chang, « Chapter 25 - Basil (*Ocimum basilicum* L.) Oils », in *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, V. R. Preedy, Éd. San Diego: Academic Press, 2016, p. 231-238. doi: 10.1016/B978-0-12-416641-7.00025-0.
- [300] S. Sani, M. U. Kaisan, D. M. Kulla, A. I. Obi, A. Jibrin, et B. Ashok, « Determination of physico-chemical properties of biodiesel from *Citrullus lanatus* seeds oil and diesel blends », *Ind. Crops Prod.*, vol. 122, p. 702-708, oct. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.002.
- [301] M. E. Tat et J. H. Van Gerpen, « The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 77, n° 2, p. 115-119, 2000, doi: 10.1007/s11746-000-0019-3.

- [302] M. A. Bashir, M. Thiri, X. Yang, Y. Yang, et A. M. Safdar, « Purification of biodiesel via pre-washing of transesterified waste oil to produce less contaminated wastewater », *J. Clean. Prod.*, vol. 180, p. 466-471, avr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.126.
- [303] E. Alptekin et M. Canakci, « Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends », *Renew. Energy*, vol. 33, n° 12, p. 2623-2630, déc. 2008, doi: 10.1016/j.renene.2008.02.020.
- [304] A. A. Refaat, « Correlation between the chemical structure of biodiesel and its physical properties », *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 6, n° 4, p. 677-694, sept. 2009, doi: 10.1007/BF03326109.
- [305] G. Martínez, N. Sánchez, J. M. Encinar, et J. F. González, « Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution », *Biomass Bioenergy*, vol. 63, p. 22-32, avr. 2014, doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.034.
- [306] G. Knothe et K. R. Steidley, « Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures », *Fuel*, vol. 86, n° 16, p. 2560-2567, nov. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2007.02.006.
- [307] R. M. Joshi et M. J. Pegg, « Flow properties of biodiesel fuel blends at low temperatures », *Fuel*, vol. 86, n° 1, p. 143-151, janv. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.06.005.
- [308] B. González, N. Calvar, E. Gómez, et Á. Domínguez, « Density, dynamic viscosity, and derived properties of binary mixtures of methanol or ethanol with water, ethyl acetate, and methyl acetate at T=(293.15, 298.15, and 303.15)K », *J. Chem. Thermodyn.*, vol. 39, n° 12, p. 1578-1588, déc. 2007, doi: 10.1016/j.jct.2007.05.004.
- [309] C. B. Prakash, *A critical review of biodiesel as a transportation fuel in Canada*. Global Change Strategies International Incorporated, 1998.
- [310] Z. J. Predojević, « The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps », *Fuel*, vol. 87, n° 17, p. 3522-3528, déc. 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.07.003.
- [311] J. Cvengroš, « Acidity and corrosiveness of methyl esters of vegetable oils », *Lipid Fett*, vol. 100, n° 2, p. 41-44, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1521-4133(199802)100:2<41::AID-LIPI41>3.0.CO;2-Y.
- [312] K. Krisnangkura, « A simple method for estimation of cetane index of vegetable oil methyl esters », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 63, n° 4, p. 552-553, 1986, doi: 10.1007/BF02645752.
- [313] A. Demirbaş, « Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils », *Fuel*, vol. 77, n° 9, p. 1117-1120, juill. 1998, doi: 10.1016/S0016-2361(97)00289-5.
- [314] J. M. Encinar, J. F. González, et A. Rodríguez-Reinares, « Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, n° 15, p. 5491-5499, juill. 2005, doi: 10.1021/ie040214f.
- [315] S. Fernando, P. Karra, R. Hernandez, et S. K. Jha, « Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality », *Energy*, vol. 32, n° 5, p. 844-851, mai 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.06.019.
- [316] A. Murugesan, C. Umarani, T. R. Chinnusamy, M. Krishnan, R. Subramanian, et N. Neduzchezhain, « Production and analysis of bio-diesel from non-edible oils—A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 4, p. 825-834, mai 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.02.003.
- [317] M. Mittelbach et M. Koncar, *Method for the preparation of fatty acid alkyl esters*. Google Patents, 1998.
- [318] S. Turkay et H. Civelekoglu, « Deacidification of sulfur olive oil. I. Single-stage liquid-liquid extraction of miscella with ethyl alcohol », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 68, n° 2, p. 83-86, 1991, doi: 10.1007/BF02662322.
- [319] Y. Zhang, X. H. Lu, Y. L. Yu, et J. B. Ji, « Study on the coupling process of catalytic esterification and extraction of high acid value waste oil with methanol », in *International conference on biomass energy technologies. Guangzhou, China*, 2008, p. 3-5.
- [320] M. Di Serio, R. Tesser, M. Dimiccoli, F. Cammarota, M. Nastasi, et E. Santacesaria, « Synthesis of biodiesel via homogeneous Lewis acid catalyst », *J. Mol. Catal. Chem.*, vol. 239, n° 1, p. 111-115, sept. 2005, doi: 10.1016/j.molcata.2005.05.041.
- [321] M. Sheng, D. L. Tian, et G. M. Cao, « Production of biodiesel fuel from wast edible oil », *China Acad. J.*, vol. 26, 2008.

- [322] S. M. de Rezende *et al.*, « Transesterification of vegetable oils promoted by poly(styrene-divinylbenzene) and poly(divinylbenzene) », *Appl. Catal. Gen.*, vol. 349, n° 1, p. 198-203, oct. 2008, doi: 10.1016/j.apcata.2008.07.030.
- [323] W.-Y. Lou, M.-H. Zong, et Z.-Q. Duan, « Efficient production of biodiesel from high free fatty acid-containing waste oils using various carbohydrate-derived solid acid catalysts », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n° 18, p. 8752-8758, déc. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.04.038.
- [324] C. Li, Y. H. Liu, A. X. Luo, R. S. Ruan, et C. M. Liu, « New two-step method of producing biodiesel from waster cooking oil », *Cereals Oils Process*, 2008.
- [325] J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszek, D. Clements, et G. Knothe, « Biodiesel production technology », *Natl. Renew. Energy Lab.*, vol. 1617, p. 80401-3393, 2004.
- [326] I. Janajreh, T. ElSamad, A. AlJaberi, et M. Diouri, « Transesterification of Waste Cooking Oil: Kinetic Study and Reactive Flow Analysis », *Energy Procedia*, vol. 75, p. 547-553, août 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.451.
- [327] C. N. Van, « Maîtrise de l'aptitude technologique des oléagineux par modification structurale : applications aux opérations d'extraction et de transestérification in-situ », phdthesis, Université de La Rochelle, 2010. Consulté le: 13 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00597795>
- [328] R. Fao et J. F. E. C. on F. and F. A. in H. N. eng 10-14 N. 2008 Geneva, « Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation, 10-14 November 2008, Geneva », Rome (Italy) FAO, 2010. Consulté le: 13 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/013/i1953e/i1953e00.pdf>



Characterization and fatty acid profile analysis of *Jatropha curcas* L. oil cultivated in the Algerian desert

Abdelghani Serouti^{1,2} · Mourad Korichi¹ · Omar Ben Mya^{2,3}

Received: 28 July 2021 / Revised: 28 September 2021 / Accepted: 29 September 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

This study employed the Soxhlet extraction method to describe the phyto-oil recovered from *Jatropha curcas* L., which was planted for the first time in the El Oued region of southeastern Algeria, using normal hexane as the solvent at 60 °C for 8 h. The dry weight-to-weight oil yield was 63.15%. The extracted oil was liquid at room temperature, with a nice sweet aroma and a yellowish-white hue. The physicochemical properties showed that the seed oil has a moisture level of 5.58%, a density of 0.915, a viscosity of 49.85 mm²/s, a peroxide index of 1.1 mEq/kg, an acid value of 2.9%, and an iodine indicator of 96.3 mg/g, a refractive index of 1.458, and a saponification index of 202.87 mg KOH/g. Gas chromatographic analysis showed stearic acid (8.5%), palmitic acid (11.2%), and oleic acid (65.9%). Furthermore, the quality of the extracted oil demonstrated that the seed is an excellent source of oil that might be used in industry.

Keywords *Jatropha curcas* L. · Oil characterization · Physicochemical properties · Fatty acid analysis · GC–MS

1 Introduction

The gap between the demand and supply of vegetable oils has widened in the world in general, and among manufacturers in particular, as they mostly rely on common vegetable oils to prepare their various products such as soybean oil, cottonseed oil, palm kernel oil, castor seed oil, peanut oil, and so on [1, 2]. Consequently, the scarcity of vegetable oils and fats for industrial, pharmaceutical, or other purposes has always pursued the resources of these manufacturers. Therefore, research was underway to exploit other wild plants such as *Jatropha* in Saharan areas. The *Jatropha* genus has more than 170 species of shrubs and belongs to the Euphorbiaceae family, the subfamily Platilobeae, such as *Jatropha platyphylla*,

Jatropha gossypifolia, and *Jatropha curcas* L., the latter producing seeds that are high in oil [3, 4]. Although this species is native to Mexico, it is found in many countries of Asia, Africa, and South America, and has been established to support agriculture and social and economic security in developing regions [5]. *Jatropha curcas* is a versatile plant with a lot of characteristics and a lot of promise. Its many components have a wide range of uses. Biodiesel, soap, and other products can be made from the oil taken from the seeds [6, 7]. Traditional medicine uses leaves to treat coughing and as an antiseptic [8]. The tree may be utilized as both a firewood source and a protective barrier [9].

Jatropha curcas L. is a drought-resistant plant that thrives in a wide range of environments, including sandy and salt soils, and can tolerate high temperatures and light frosts. It is a fast-growing plant and can produce seeds 2–5 years after planting, resistant to pests and diseases. The annual production of *Jatropha* ranges from 0.5 to 12 tons [10]. To advance the production of oil used in the biofuel industry, *J. curcas* L. was cultivated in the El Oued region in southeastern Algeria, which has a dry and a sweltering desert climate in summer and an entirely sandy soil [11].

J. curcas L. kernels make up a large portion of the seeds, accounting for 61.3–63.1% and 40–60% of the oil as a valuable end product. This oil has a higher percentage of unsaturated fatty acids than castor oil, a lower viscosity

✉ Omar Ben Mya
omar-benmya@univ-eloued.dz

¹ Laboratory of Dynamique, Interactions and Systems Reactivity, Faculty of Applied Sciences, University of Ouargla, PO Box 511, Ouargla, Algeria

² Department of Process Engineering & Petrochemistry, Faculty of Technology, University of El Oued, PO Box 789, 39000 El Oued, Algeria

³ Laboratory of Biodiversity and Biotechnology Applications in Agriculture Field (BABDA), University of El Oued, PO Box 789, El Oued, Algeria

الملحق 01

1.1. المعالجة المسبقة للمواد الأولية الحمضية

تم اقتراح العديد من طرق المعالجة المسبقة لتقليل المحتوى العالي من الأحماض الدهنية الحرة للزيوت، بما في ذلك التقطير بالبخار [317]، والاستخلاص بالكحول [318]، والأسترة عن طريق التحفيز الحمضي [319]. ومع ذلك، فإن التقطير بالبخار لتقليل نسبة الأحماض الدهنية العالية يتطلب درجة حرارة عالية وكفاءة منخفضة. بسبب قابلية الذوبان المحدودة للأحماض الدهنية الحرة في الكحول، يحتاج الاستخلاص بطريقة الكحول إلى كمية كبيرة من المذيب وتكون العملية معقدة. بالمقارنة مع الطريقتين السابقتين، فإن الأسترة بواسطة التحفيز الحمضي تحقق أفضل استخدام للأحماض الدهنية الحرة في الزيت وتحولها إلى وقود ديزل حيوي [318]، [319]. المعالجة المسبقة الشائعة هي أسترة *FFA* بالميثانول في وجود محفزات حمضية (حمض الكبريتيك عادة). يمكن أن تكون المحفزات عبارة عن محفزات حمضية متجانسة أو محفزات حمضية صلبة [320]. بالمقارنة مع المحفزات السابقة، توفر المحفزات الحمضية الصلبة بعض المزايا للتخلص من مشاكل الفصل والتآكل والسمية والمشكلات البيئية، لكن معدل التفاعل يكون أبطأ [319]. كما هو موضح سابقاً، سيتم تحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى وقود حيوي عن طريق الأسترة الحمضية المباشرة ويحتاج الماء إلى إزالته. إذا كانت القيمة الحمضية للزيوت أو الدهون عالية جداً، فإن المعالجة المسبقة للأسترة بخطوة واحدة قد لا تقلل الأحماض الدهنية الخالية من الدهون بكفاءة بسبب المحتوى العالي من الماء المنتج أثناء التفاعل. في هذه الحالة، يمكن إضافة خليط من الكحول وحمض الكبريتيك إلى الزيوت أو الدهون ثلاث مرات (الأسترة المسبقة بثلاث خطوات). الوقت اللازم لهذه العملية هو حوالي ساعتين ويجب إزالة الماء بواسطة قمع الفصل قبل إضافة الخليط إلى الزيوت أو الدهون من أجل الأسترة مرة أخرى [321]. علاوة على ذلك، يقوم بعض الباحثين بتقليل النسبة المئوية للأحماض الدهنية الحرة باستخدام راتنجات التبادل الأيوني الحمضية التجارية القوية لأسترة *FFA* في نفايات زيوت الطهي ولكن فقد النشاط الحفاز قد يكون مشكلة، [322]، [323].

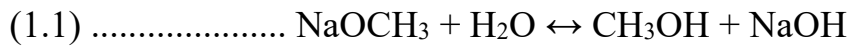
يتمثل أحد الأساليب البديلة لتقليل الأحماض الدهنية الخالية من الدهون في استخدام اليود كمحفز لتحويل الأحماض الدهنية الحرة إلى وقود ديزل حيوي. من المزايا الواضحة لهذا النهج أنه يمكن إعادة تدوير المحفز (اليود) بعد تفاعل الأسترة. من خلال الاختبارات المتعمدة، لي وآخرون [324] وجدوا أنه في ظل الظروف المثلى (أي كمية اليود 1.3% بالوزن من الزيوت؛ درجة حرارة التفاعل 80 درجة مئوية؛ نسبة الميثانول إلى الزيوت: 1:1.75؛ وقت التفاعل: 3 ساعات) يمكن لمحتوى الأحماض الدهنية الأحيائية تنخفض إلى أقل من 2% [324].

هناك طريقة جديدة أخرى للمعالجة المسبقة وهي إضافة الجلسرين إلى خام التغذية الحمضي وتسخينه إلى درجة حرارة عالية تبلغ حوالي 200 درجة مئوية، عادةً باستخدام محفز مثل كلوريد الزنك. سيتفاعل الجلسرين مع FFA لتشكيل أحادي الجليسرید وثنائي الجليسرید. ثم يصبح مستوى الأحماض الدهنية الحرة منخفضًا ويمكن إنتاج وقود الديزل الحيوي باستخدام طريقة الاسترة التبادلية المحفزة بالقلويات. تتمثل ميزة هذا النهج في عدم الحاجة إلى الكحول أثناء المعالجة المسبقة ويمكن تبخير الماء المتكون من التفاعل على الفور وتنقيته من الخليط. ومع ذلك، فإن عيوب هذه الطريقة هي متطلبات درجة الحرارة المرتفعة ومعدل التفاعل البطيء نسبيًا [325].

2.1. النموذج العددي لإنتاج الديزل الحيوي باستخدام المحفزات القلوية:

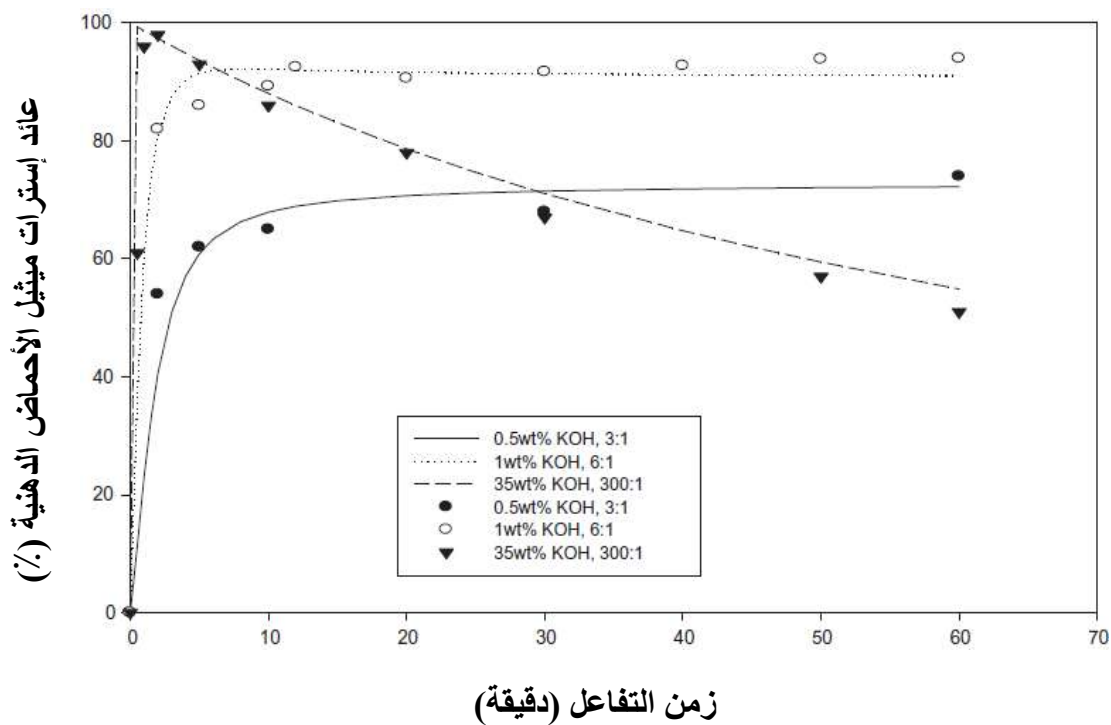
يوضح الشكل 1.1. أنه مع 1.53% بالوزن FFA و 0.12% بالوزن من الماء في نفايات زيت الطهي، فإن إنتاج وقود الديزل الحيوي المتجانس المحفز القلوي كان له إنتاجية أقل من وقود الديزل الحيوي بنسبة 6:1 ميثانول إلى نفايات زيت الطهي مقارنة بنسبة 12:1 أو 18:1. كان الحد الأقصى لإنتاج وقود الديزل الحيوي عند نسبة 6:1 $M1$ وتركيزات المحفز البالغة 3% بالوزن و 1.8% حوالي 93% بعد حوالي دقيقتين و 5 دقائق من مرات التفاعل، على التوالي. أدت الزيادة الإضافية في وقت التفاعل عند نسبة 6:1 $M1$ إلى انخفاض إنتاج الديزل الحيوي، على سبيل المثال، من الحد الأقصى للإنتاجية من 93% إلى 81% عند 3% بالوزن من المحفز، وإلى 88% عند 1.8% بالوزن. بالنسبة للتفاعل عند نسبة 6:1 $M1$ ومحفز 0.6% بالوزن، استمر مردود الديزل الحيوي في الزيادة بمرور الوقت، حيث وصل إلى 86% عند 60 دقيقة من وقت التفاعل. كان معدل التفاعل البطيء في هذه الحالة ناتجًا عن استهلاك بعض $NaOCH_3$ عبر التحديد باستخدام FFA [268].

يُعزى الانخفاض التدريجي في محصول وقود الديزل الحيوي مع زيادة أخرى في وقت التفاعل بنسبة 6:1 $M1$ و $3-1.8\%$ بالوزن إلى زيادة معدلات تصبن الديزل الحيوي عند محتوى محفز مرتفع. يوجد توازن بين محفز $NaOCH_3$ والمياه في نفايات زيت الطهي الخام التي تنتج هيدروكسيد الصوديوم كما هو موضح في المعادلة (1.1) أدناه. زيادة تركيز هيدروكسيد الصوديوم في خليط التفاعل يؤدي إلى تصبن كل من الدهون الثلاثية والديزل الحيوي [268].



من الواضح أن النسبة المولية الأعلى للميثانول مطلوبة لتحويل تفاعل التوازن نحو تكوين $NaOCH_3$. لذلك، كان للزيادة في نسبة الميثانول المولية تأثير إيجابي كبير على تحويل وقود الديزل الحيوي. زاد العائد الأقصى المتوقع للديزل الحيوي من 93% عند نسبة مولارية 6:1 ميثانول إلى نسبة مولارية لزيت الطهي، إلى حوالي 98% بنسب 12:1 و 18:1 $M1$ لـ 3% بالوزن $NaOCH_3$. كانت تأثيرات الهيدروكسيد على تفاعلات تصبن وقود الديزل الحيوي أقل وضوحًا عند زيادة النسب المولية للميثانول إلى

نفايات زيت الطهي. لوحظ انخفاض بنسبة 6% في إنتاج وقود الديزل الحيوي بنسبة 12:1 M ، ولكن بنسبة 1.5% فقط عند نسبة 18:1 M بعد 60 دقيقة. عند تركيزات المحفز المنخفضة (0.6% بالوزن)، كانت تحويلات وقود الديزل الحيوي أكبر من 97% بنسب 12:1 و 18:1 M دون أي دليل على تصبن وقود الديزل الحيوي. لقد وجد أن معدلات التفاعل لمخلفات زيت الطهي كانت أبطأ من تلك الخاصة ببذور اللفت البكر، ربما بسبب تداخل بعض الشوائب الأخرى في نفايات زيت الطهي. وبالتالي، كانت ثوابت معدل التفاعل أقل بحوالي 0.2 مرة من تلك المبلغ عنها لزيت بذور اللفت البكر في الجدول 1 [268]. كان معدل التفاعل المنخفض الملحوظ لمخلفات زيت الطهي متسقاً مع الدراسات الأخرى [326].



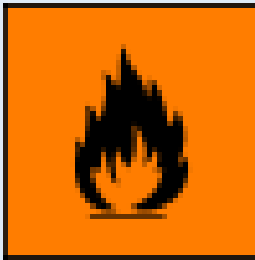
الشكل 1.1. استرة متجانسة محفزة بالقلويات لزيت بذور اللفت عند 60 درجة مئوية وكثافة خلط 600 دورة في الدقيقة: (1) نسبة الميثانول 3:1 النسبة المولية لزيت بذور اللفت و 0.5% بالوزن KOH ؛ (2) نسبة الميثانول 6:1 النسبة المولية لزيت بذور اللفت و 1% بالوزن KOH و (3) نسبة الميثانول 300:1 النسبة المولية لزيت بذور اللفت و 35% بالوزن KOH (النقاط: البيانات التجريبية؛ الخطوط: نتائج النمذجة) [268].

الملحق 02


جدول 1: مواصفات EN 14214 و ASTM D 6751-02 لوقود الديزل الحيوي B100 [20].

EN 14214		ASTM D 6751		الخصائص
الطريقة	المجال	الطريقة	المجال	
EN ISO 3675	860–900 kg/m ³	ASTM D4052-91	870–890 kg/m ³	الكثافة عند 15 م°
EN ISO 3679	>101 °C (minimum)	ASTM D93	130 °C minimum	نقطة الوميض
EN ISO 3140	3.5–5.0 mm ² /s	ASTM D445	1.9–6.0 mm ² /s	اللزوجة @ 40 م°
EN ISO 3987	0.02% m/m (maximum)	ASTM D874	0.020% m/m maximum	رماد كبريتي
EN ISO 23015	Based on national specification	ASTM D2500	Report to customer	نقطة السحابة
EN ISO 2160	Class 1 rating	ASTM D130	Class 3 maximum	تآكل قطاع النحاس
EN ISO 5165	51 (minimum)	ASTM D613	47 (minimum)	رقم سيتان
EN ISO 12937	500 mg/kg (maximum)	ASTM D2709	0.050 (%v) maximum	محتوى الماء والرواسب
EN 14104	0.50 mg KOH/g (maximum)	ASTM D664	0.50 mg KOH/g maximum	رقم الحمض
EN 1405/14016	0.02% (m/m) (maximum)	ASTM D6584	0.02% (m/m) maximum	الجلسرين الحر
EN 14105	0.25% (m/m)	ASTM D6548	0.24% (m/m) maximum	إجمالي الجلسرين
EN 14110	0.20% (m/m) (maximum)	EN 14110	0.20% (m/m) maximum	محتوى الميثانول
EN 14107	10.0 mg/kg (maximum)	ASTM D4951	10 mg/kg maximum	الفوسفور
–	–	ASTM D1160	360 °C	درجة حرارة التقطير
EN 14108, EN 14109	5.00 mg/kg (maximum)	EN 14538	5.00 ppm maximum	الصوديوم والبوتاسيوم
EN ISO 14112	6 h (minimum)	EN ISO 14112	3 h minimum	استقرار الأكسدة
EN OSO 10370	0.30%(m/m) (maximum)	ASTM D 4530	0.05 maximum wt%	بقايا الكربون
EN 14538	5 ppm (maximum)	EN 14538	5 ppm maximum	الكالسيوم والمغنيسيوم
EN 14111	120 g/100 g (maximum)	–	–	عدد اليود


الجدول 2: الخصائص الرئيسية إيثانول.

نموذج الضمان	القيمة	الخصائص
	C ₂ H ₅ OH	الصيغة الكيميائية
	46,07	الكتلة المولية
	- 114 °C	نقطة الانصهار
	78,5 °C	نقطة الغليان
	0,789	الكثافة
	1,59	كثافة البخار


الجدول 3: الخصائص الرئيسية للميثانول.

نموذج الضمان	القيمة	الخصائص
 H225, H301, H311, H331, H370	CH ₃ OH	الصيغة الكيميائية
	-97.8°C	درجة حرارة الانصهار
	64.5°C	درجة حرارة الغليان
	0.791 g/cm ³	الكثافة (d ₂₀)
	464°C	درجة حرارة الاشتعال الذاتي
	32.04 g/mol	الكتلة المولية
	1.70 ± 0.02D	لحظة ثنائية القطب

الجدول 4: الخصائص الرئيسية لهيدروكسيد الصوديوم.

نموذج الضمان	القيمة	الخصائص
 H314	NaOH	الصيغة الكيميائية
	39,9971 g/mol	كتلة مولية
	318 °C	درجة حرارة الانصهار
	1 090 g. l-1	الذوبان في الماء عند 20 م°
	2,1 g. cm-3	الكتلة الحجمية

الجدول 5: الخصائص الرئيسية لهيدروكسيد البوتاسيوم.

نموذج الضمان	القيمة	الخصائص
 C Xi	KOH	الصيغة الكيميائية
	1320	نقطة الغليان °C
	56.10564	الكتلة المولية جم / مول
	2.044	الكثافة جم / مول

جدول 6: الكتلة المولية والصيغ الحمضية الدهنية بتصرف [327].

موضع الرابطة المزدوجة	حامض دهني	لكتلة المولية (جم/مول)	الصيغة الإجمالية	درجة انصهار (م°)
مشبعة				
C4 : 0	butyrique	88.10	C ₄ H ₈ O ₂	-7.9
C6 : 0	Caproïque	116.16	C ₆ H ₁₂ O ₂	-3.4
C8 : 0	Caprylique	144.21	C ₈ H ₁₆ O ₂	16.7
C10 : 0	Caprique	172.26	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	31.6
C12 : 0	laurique	200.31	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	44.2
C14 : 0	myristique	228.36	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	54.4
C16 : 0	palmitique	256.42	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	62.9

69.6	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284.47	stéarique	C18 : 0
75.4	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	312.52	arachidique	C20 : 0
80.0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	340.57	béhénique	C22 : 0
84.2	C ₂₄ H ₄₈ O ₂	368.62	lignocérique	C24 : 0
غير المشبعة				
- (1)		198.29	Laurooléique	C12 : 1
- (1)	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	226.34	Myristoléique	C14 : 1
- (1)	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	254.39	Palmitoléique	C16 : 1
- (1)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282.44	Oléique	C18 : 1
- (1)		310.50	Gadoléique	C20 : 1
- (1)	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	338.55	Érucique	C22 : 1
- (1)		366.60	Sélacholéique	C24 : 1
- (1)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	280.43	Linoléique	C18 : 2
- (1)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	278.41	α-linolénique	C18 : 3
- (1)	C ₂₀ H ₃₂ O ₂	304.45	Arachidonique	C20 : 4

جدول 7: تركيب الأحماض الدهنية في الزيوت النباتية كما حددها التحليل الكروماتوغرافي للغاز السائل من عينات حقيقية (محسوب كنسبة مئوية من إجمالي الأحماض الدهنية) [328].

الأحماض الدهنية	زيت الفول السوداني	زيت جوز الهند	زيت بذور القطن	زيت الذرة	زيت النخيل
C6 : 0	ND	ND-0.7	ND	ND	ND
C8 : 0	ND	4.6-10	ND	ND	ND
C10 : 0	ND	5.0-8.0	ND	ND	ND
C12 : 0	ND-0.1	45.1-53.2	ND-0.2	ND-0.3	ND-0.5
C14 : 0	ND-0.1	16.8-21.0	0.6-1.0	ND-0.3	0.5-2.0
C16 : 0	5.0-14.0	7.5-10.2	21.4-26.4	5.6-16.5	39.3-47.5
C16 : 1	ND-0.2	ND	ND-1.2	ND-0.5	ND-0.6
C17 : 0	ND-0.1	ND	ND-0.1	ND-0.1	ND
C17 : 1	ND-0.1	ND	ND-0.1	ND-0.1	ND
C18 : 0	1.0-4.5	2.0-4.0	2.1-3.3	ND-3.3	3.5-6.0
C18 : 1	35.0-80	5.0-10.0	14.7-21.7	20.0-42.2	36.0-44.0
C18 : 2	4.0-43.0	1.0-2.5	46.7-58.2	34.0-65.6	9.0-12.0
C18 : 3	ND-0.5	ND-0.2	ND-0.4	ND-0.2	ND-0.5
C20 : 0	0.7-2.0	ND-0.2	0.2-0.5	0.3-1.0	ND-1.0
C20 : 1	0.7-3.2	ND-0.2	ND-0.1	0.2-0.6	ND-0.4
C20 : 2	ND	ND	ND-0.1	ND-0.1	ND
C22 : 0	1.5-4.5	ND	ND-0.6	ND-0.5	0.2-2.5
C22 : 1	ND-0.6	ND	ND-0.3	ND-0.3	ND
C22 : 2	ND	ND	ND-0.1	ND	ND
C24 : 0	0.5-2.5	ND	ND-0.1	ND-0.5	ND
C24 : 1	ND-0.3	ND	ND	ND	ND

جدول 8: الخصائص الفيزيائية للمذيبات الأكثر شيوعًا [327].

الخطورة	الكثافة غ/مل	الكتلة المولية غ/مول	نقطة الغليان °م	الصيغة الكيميائية	المذيب
	0.655	86.18	69	C ₆ H ₁₄	هكسان
	1.498	119.38	61	CHCl ₃	كلوروفورم
-	1.000	-	100	H-O-H	خصائص الماء
	1.049	60.05	118	C ₂ H ₄ O ₂	حمض الخل
	2.044	56.10564	1320	KOH	هيدروكسيد البوتاسيوم
(T) سام (C) أكل	1.477	36.46	85.1	HCl	كلوريد الهيدروجين
-	2.16	58.44	1465	NaCl	كلوريد صوديوم
	0.791	58.08	-	C ₃ H ₆ O	اسيتون
F Xi	1.28	318.323	-	C ₂₀ H ₁₄ O ₄	فينول فتالين



الشكل 2: جهاز كروماتوغرافيا الغاز GC-MS، من طراز GC-7890A/MS-5975C، اجيلنت لتكنولوجيات، سانتا كلارا، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية.



الشكل 3: صورة للمطحنة الكهربائية.



الشكل 4. صورة لحاضنة مخبر (Etuves).

الملحق 03







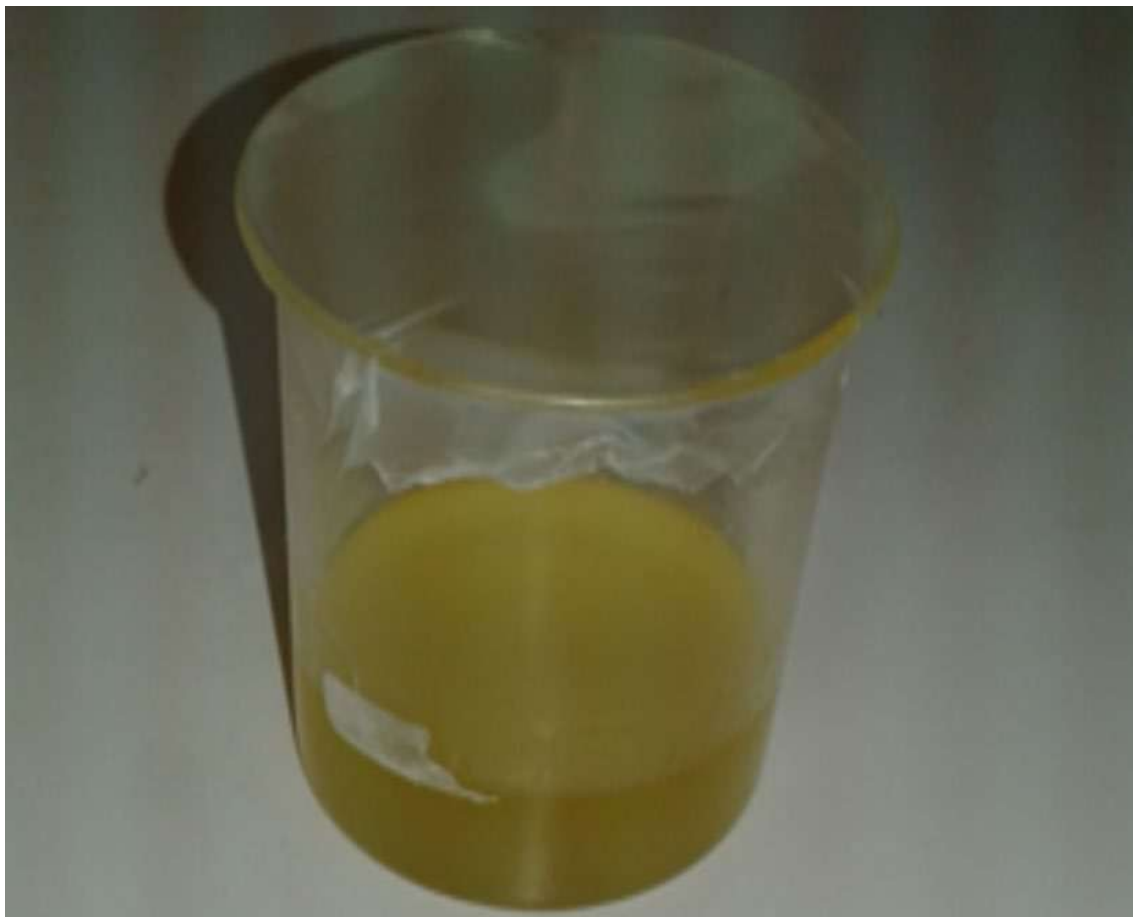


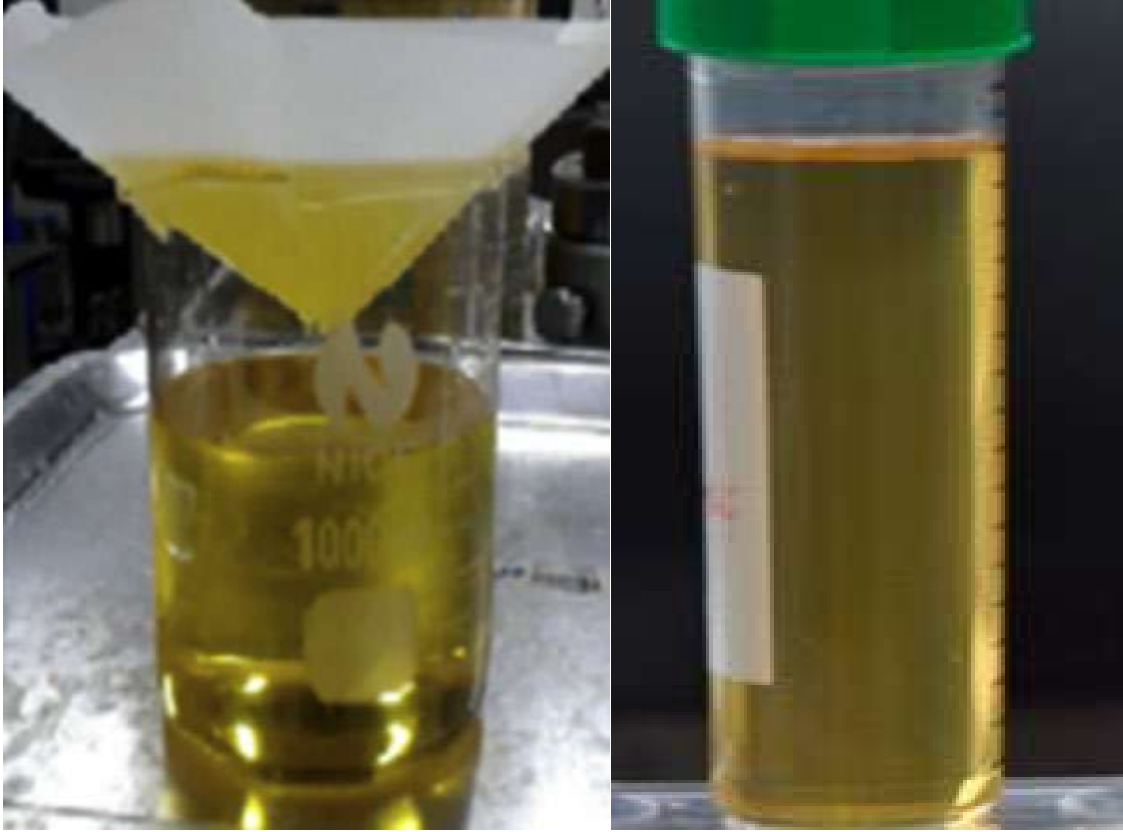
الصورة 1: مجموعة من الصور تبرز ما مدى نجاح نبتة الجاتروفا كركاس في مكان الدراسة.





الصورة 2: الصور الأولى تمثل فاكهة الجاتروفا كركاس وهي جافة وثانية بذورها.





الصورة 3: الصور الأولى تمثل الزيت وثانية وقود الجيزل الحيوي المنتج من زيت بذور الجاتروفا كركاس.

الملخص

ارتفع الطلب على الزيوت النباتية للاستخدام المنزلي والصناعي بشكل كبير مع نمو سكان العالم. تم اكتشاف الزيوت النباتية المشتقة من النباتات على أنها ذات قيمة غذائية وصناعية كبيرة. بسبب ارتفاع الأحماض الدهنية الأحادية غير المشبعة والمكونات المفيدة، فإن الجاتروفا كركاس هي واحدة من البذور الزيتية التي تحتوي على نسبة عالية من الزيت. يشكل حمض اللينوليك والأحماض الثانوية الأخرى مثل حامض دهني وحمض الأوليك غالبية الأحماض الدهنية، مما يجعله مناسباً لمجموعة واسعة من الاستخدامات. استخدمت هذه الدراسة طريقة استخلاص Soxhlet لوصف الزيت النباتي المستخرج من جاتروفا كركاس، والذي تم زراعته لأول مرة في منطقة الواد جنوب شرق الجزائر، باستخدام الهكسان العادي كمذيب عند 60 درجة مئوية لمدة 8 ساعات. كان ناتج الزيت من الوزن الجاف إلى الوزن 63.15%. كان الزيت المستخرج سائلاً في درجة حرارة الغرفة، طيب الرائحة ذو لون أبيض مائل للصفرة. أظهرت الخصائص الفيزيائية والكيميائية أن زيت البذور له مستوى رطوبة 5.58٪، وكثافة 0.915، ولزوجة 49.85 مم²/ثا، ومؤشر بيروكسيد 1.1 ملي مكافئ / كجم، وقيمة حمضية 2.9٪، ومؤشر يود لـ 96.3 ملغ/غ، معامل انكسار 1.458 ومؤشر تصبن 202.87 مجم KOH / جم. أظهر التحليل الكروماتوغرافيا للغاز حامض دهني (8.5٪)، حمض البالمتيك (11.2٪)، وحمض الأوليك (65.9٪). علاوة على ذلك، أظهرت الخصائص الفيزيائية والكيميائية للديزل الحيوي المنتج: اللزوجة، الكثافة، نقطة الوميض، قيمة الحمض والقيمة الحرارية لتكون 4.38 مم²/ثانية، 870 كغ/م³، 128.5 م°، 0.29 ملغ KOH/غ من الزيت و39.74 ميغا جول/كجم، على التوالي. يمكن استخدام وقود الديزل الحيوي المنتج في المزج مع الديزل التجاري والمساهمة في اقتصاد الوقود في الجزائر.

كلمات مفتاحية: جاتروفا كركاس؛ توصيف الزيت الخصائص الفيزيائية والكيميائية، تقنيات الاستخلاص، الديزل الحيوي.

Abstract

The demand for vegetable oils for domestic and industrial use has risen significantly as the world's population has grown. Vegetable oils derived from plants have been discovered as having great nutritional and industrial value. Because of its high monounsaturated fatty acid content and beneficial components, *Jatropha curcas* is one of the oilseeds with high oil content. Linoleic acid and other minor acids like stearic, palmitic, and oleic acid make up the majority of its fatty acid profile, making it suitable for a wide range of uses. This study employed the Soxhlet extraction method to describe the phyto-oil recovered from *Jatropha curcas* L., which was planted for the first time in the El Oued region of southeastern Algeria, using normal hexane as the solvent at 60 °C for 8 hours. The dry weight-to-weight oil yield was 63.15%. The extracted oil was liquid at room temperature, pleasant in smell and a yellowish-white hue. The physicochemical properties showed that the seed oil has a moisture level of 5.58 %, a density of 0.915, a viscosity of 49.85 mm²/s, a peroxide index of 1.1 mEq/kg, an acid value of 2.9 %, and an iodine indicator of 96.3 mg/g, a refractive index of 1.458, and a saponification index of 202.87 mg KOH/g. Gas chromatographic analysis showed stearic acid (8.5%), palmitic acid (11.2%), and oleic acid (65.9%). Furthermore, the physical and chemical properties of the biodiesel produced are shown: viscosity, density, flash point, acid value, and calorific value were found to be 4.38 mm²/s, 870 kg/m³, 128.5 °C, 0.29 mg KOH/g of oil, and 39.74 MJ/Kg, respectively. The produced biodiesel can potentially be used in blending with commercial diesel and contribute to the fuel economy of Algeria.

Keywords: *Jatropha curcas* L.; Oil Characterization; Physicochemical Properties; Biodiesel.