مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies – engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

تحسين ثبات زيت بذور الكتان باستخدام تقنية التمحفظ الدقيق بطريقة التجفيف بالإرذاذ

محمد العظم *

وسيم عبد الواحد **

ريم خليل ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/٢٢ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٤/٢٣)

□ ملخّص □

تم إجراء هذا البحث في مخابر جامعة حلب، بهدف تحسين ثبات زيت بذور الكتان باعتباره غذاءً وظيفياً هاماً عن طريق تمحفظه ضمن محافظ دقيقة باستخدام تقنية التجفيف بالإرذاذ، بهدف حمايته من عوامل التخرّب الحراري والأكسدة أثناء المعالجة والتخزين. حيث تم تحضير مستحلب مكوّن من زيت بذور الكتان مع مزيج من المالتوديكسترين ومعزول بروتين الصويا، وبوليمر الإيدراجيت (Eudragit L100)، وبعد تجانسه تم تحويله إلى رذاذ داخل حجرة التجفيف للجهاز. خلال هذه العملية، ترتفع درجة حرارة القطرات بشكل طفيف، بينما ينخفض محتواها المائي تدريجياً، مما يؤدي إلى تكوين مسحوق جاف عالي الجودة يتمتع بخواص وظيفية مستقرة. مما أدى إلى تقليل قيمة البيروكسيد للكبسولات الدقيقة ١٣,٣٣% وتقليل قيمة الحموضة بنسبة ٢٥,٣٨% نتيجة فعالية طبقة التغليف في تحسين ثباته التأكسدي والحراري، كما ارتفعت قيم البيروكسيد إلى ٣,٠٣ ($meqO_2/Kg$) والحموضة إلى ٣,٧ (mg KOH/g) عند تعريض الكبسولات لوسط قلوي يحاكي الأمعاء الدقيقة (pH 8.4)، نتيجة لانحلال مادة التغليف.

الكلمات المفتاحية: زيت بذور الكتان، التجفيف بالإرذاذ، التمحفظ الدقيق، إيدراجيتL100 ، المالتوديكسترين، معزول بروتين الصويا.

* مدرس في قسم تقانات الهندسة الغذائية، كلية الهندسة التقنية، جامعة حلب.

** أستاذ مساعد في قسم الصيدلانيات والتكنولوجيا الصيدلية، كلية الصيدلة، جامعة حلب.

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم تقانات الهندسة الغذائية، كلية الهندسة التقنية، جامعة حلب

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

Improving the Stability of Flaxseed Oil Using Microencapsulation Technology via Spray Drying

Mohammad AL-Azem *
Waseem Abd AL-wahed **
Reem Khalil ***

(Received 22/10/2025 . Accepted 23/4/2026)

□ ABSTRACT □

This study was conducted at the laboratories of the University of Aleppo with the objective of improving the oxidative and thermal stability of flaxseed oil, a nutritionally valuable functional lipid, through microencapsulation using spray-drying technology. An oil-in-water emulsion was formulated by homogenizing flaxseed oil with a wall matrix composed of maltodextrin, soy protein isolate, and Eudragit L100 polymer. The emulsion was subsequently atomized into a spray-drying chamber, where the droplets underwent mild thermal exposure and progressive moisture evaporation, resulting in the formation of a high-quality dry powder with enhanced functional stability. The encapsulation process led to a reduction in peroxide value by 13.33% and acid value by 25.38%, indicating the effectiveness of the encapsulating matrix in mitigating oxidative and hydrolytic degradation. Upon exposure to (pH 8.4), the microcapsules exhibited a release of encapsulated oil, as evidenced by an increase in peroxide value to

3.03 (meq O_2/kg) and acid value to 3.7 (mg KOH/g). These findings reflect the controlled release behavior of the system and the protective role of the encapsulating layer under gastrointestinal conditions.

Keywords: Flaxseed oil, spray drying, microencapsulation, maltodextrin, soy protein isolate, Eudragit L100

*Lecturer, Department of Food Engineering Technologies, Faculty of Technical Engineering, University of Aleppo.

** Assistant Professor in the Department of Pharmaceutics and Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmacy, University of Aleppo.

***Postgraduate student (M.Sc), Department of Food Engineering Technologies, Faculty of Technical Engineering, University of Aleppo.

المقدمة:

تم تسجيل أول براءة اختراع تتعلق بالتمحفظ الدقيق (التغليف الدقيق) Microencapsulation Technique للزيوت في الأغذية عام ١٩٩٩. ومنذ ذلك الحين وحتى عام ٢٠١٤، لم يشهد عدد البراءات المُسجلة ضمن هذه التقنية تطوراً يذكر. ليزداد نموها بشكل كبير انطلاقاً من عام ٢٠١٥ (de Jesus Freitas et al. 2021). وهذه التقنية تُعتبر وسيلة لتغليف المكونات السائلة أو الصلبة من خلال تشكيل حاجز فعال ضد التفاعلات البيئية والكيميائية الخارجية، حتى يتم تحريرها في الزمان والمكان المطلوبين (Carmo, Fernandes, and Borges, 2015). وذلك إما بفعل الحرارة، أو تغير درجة الحموضة (pH)، أو النشاط الإنزيمي، أو غيرها من المؤثرات الخارجية (Mehta et al., 2022).

مما يتيح توسيع نطاق استخدام المادة المُغَلّفة (مادة اللب) (Gouin 2004). وأظهرت تقنية التمحفظ الدقيق العديد من المزايا في مجال الأغذية أهمها التحكّم في تحرير المواد الفعالة ضمن الجهاز الهضمي، وتقليل الآثار الجانبية لها مثل إخفاء الطعم المر، والقابض، والرائحة غير المرغوبة للمواد المُراد تغليفها (Mehta et al., 2022). وتعتبر تقنية التجفيف بالإرذاذ من أكثر الطرق شيوعاً لإنتاج الكبسولات الدقيقة والتي أثبتت فعاليتها في تحسين الاحتفاظ بالمركبات الحيوية المختلفة (مثل الأصباغ، والفينولات، وحمض الأسكوربيك، ومضادات الأكسدة)، وكذلك في تعزيز ثباتها أثناء التخزين (Delshadi et al., 2020)، وتتضمن هذه التقنية تغليف المواد الصلبة، أو قطرات السوائل (مادة اللب) بأغلفة بوليمرية رقيقة تشُكل جسيمات صغيرة تسُمى كبسولات دقيقة، تتراوح أحجامها بين (٠,٢ –٥٠٠٠) µm. ويتم تعريف المادة المُغلِّفة أو مادة السطح على أنها مادة جدارية wall material أو Coating material (Díaz-Montes, 2023)، بينما المادة المُغَلَفة تُعرف باللب أو النواة Core material ، تتمثل الوظيفة الرئيسية للجدار في إطالة عمر اللب (Fang and Bhandari, 2010). ومن هنا برزت أهمية التمحفظ الدقيق لزيت بذر الكتان الذي يُعد من الزيوت غير المستقرة كيميائياً. وعند تعرضه للأوكسجين أو الضوء أو الحرارة أو الرطوبة يتأكسد مما يقُلل من جودته (Bakry et al. 2016)، وذلك بسبب محتواه العالي من الأحماض الدهنية غير المشبعة الكلية (بنسبة تتراوح بين ٨٧,٨% و٨٩,٨%) أهمها حمض ألفا-اللينولينيك (C18:3، ω3)، وحمض اللينوليك (C18:2، ω6)، وحمض البالمتيك (C16:0)، وحمض الستيريك (C18:0) (Mueed et al., 2022) فهو من الزيوت الجفوفة التي تتكون بشكل رئيسي من مزيج من ثلاثي الغليسريدات، (إسترات ناتجة عن اتحاد جزيء واحد من الغليسرول مع ثلاثة جزيئات من أحماض دهنية خطية متنوعة). ترتبط قدرة هذه الزيوت على الجفاف مباشرةً بالنشاط الكيميائي الذي تمنحه الروابط المزدوجة لجزيئات ثلاثي الغليسريد، مما يُمكّنها من التفاعل مع الأكسجين في الهواء ومع بعضها البعض لتكوين شبكة بوليمرية (Serfert, Drusch, and Schwarz, 2010)، يمتص الزيت كميات كبيرة من الأكسجين، مما يؤدي إلى تكوين مركبات بيروكسيدية. وترتبط هذه الأكسدة بوجود الروابط المزدوجة (Tonon, Brabet, and Hubinger, 2008). كما أن زيت بذر الكتان الطازج له رائحة لاذعة، ويُعرف بطعمه غير المرغوب، وعندما يتأكسد يكتسب طعماً مرّاً (Topnikova, Pirogova, and Danilova, 2022). وبما أن الخصائص الحسية من العوامل الحاسمة في قبول المستهلك للمنتجات الغذائية (Baker et al. 2022) تم اقتراح تقنية التمحفظ الدقيق التي تحافظ على خصائص الزيوت أثناء عمليات المعالجة والتخزين والنقل، كما تسُهلّ دمجها في الأغذية

المصُنّعة الأخرى

(Corrêa-Filho, Moldão-Martins, and Alves, 2019) (Timilsena et al., 2017).

التمحفظ الدقيق باستخدام تقنية التجفيف بالإرذاذ هي عملية تتضمن تشتيت الزيت ضمن محلول بوليمري، ثم تحويله إلى رذاذ ضمن حجرة التجفيف (da Silva et al. 2014)، بالتالي الحصول على زيوت مغلَفة (كبسولات دقيقة) على شكل مسحوق ثابت، يسهل تعليقه في الماء ودمجه في الغذاء (Yuan et al., 2022). ويمكن استخدام الكبسولات الدقيقة للزيوت في تطوير منتجات جديدة وفي قطاعات أخرى مثل صناعة الأدوية. وفي العقود الأخيرة، أحدثت البوليمرات الطبيعية أو الصنعية فرقاً كبيراً في مجالات تغليف المواد الغذائية وأهم هذه البوليمرات الصنعية هو Eudragit L100 (الإيدراجيت L100) بوليمر قابل للذوبان في الوسط القاعدي (pH > 6)، ويستخدم بشكل شائع في التغليف المعوي للأدوية، يتكون من حمض الميثاأكريليك ومثيل ميثاأكريلات، مما يجعله غير قابل للذوبان في الوسط الحمضي (مثل المعدة)، لكنه يذوب في وسط الأمعاء الدقيقة (Burapapadh et al., 2024). وهذا ما جعله يُستخدم في مجال الأغذية.

ومن البوليمرات الطبيعية الأخرى المستخدمة المالتوديكسترين (MD) الذي حظي بمكانة واسعة كغلاف بوليمري حيوي مسُتخدمَ على نطاق واسع بفضل تكلفته ولزوجته المنخفضة، وقدرته على الحماية من الأكسدة (Gharsallaoui et al., 2007). كما أن معزول بروتين الصويا (SPI) خياراً قليل التكلفة ويوفر استقراراً تأكسدياً عالياً للنكهات والمواد التي يتم تغليفها (Rascón et al., 2011). وتُستخدم عادةً البوليمرات مثل الكربوهيدرات، والبروتينات، أو مزيج منهما كمادة غلاف في عمليات التغليف الدقيق (Perez-Palacios et al., 2022). وتم إثبات أن هذه التركيبة من المواد المُغلِفة خياراً مفضلاً لتحقيق حماية أفضل، وثبات تأكسدي أعلى، وخصائص تجفيف محسّنة (Augustin, Sanguansri, and Bode, 2006).

أهمية البحث

• تكتسب هذه الدراسة أهميتها من القيمة التغذوية العالية لزيت بذور الكتان الذي يحتوي على كمية كبيرة من الأحماض الدهنية المتعددة غير المشبعة، والتي تكون عرضة للتزنخ خلال مراحل التخزين والمعالجة؛ فضلاً عن رائحته ونكهته غير المقبولة.

• إيجاد آليات لتقليل الأكسدة وإطالة مدة الصلاحية وإخفاء الخصائص الحسية غير المرغوبة لزيت بذور الكتان باستخدام تقنية التجفيف بالإرذاذ

• تصنيع كبسولات دقيقة من زيت بذر الكتان باستخدام مزيج من المالتوديكسترين وبروتين الصويا والإيدراجيت L100 الذي يضمن تحرر الكبسولات في الأمعاء.

هدف البحث

- إنتاج كبسولات دقيقة لزيت بذر الكتان باستخدام تقنية التجفيف بالإرذاذ.
- ضمان ثبات زيت بذر الكتان بعد التغليف بمواد مقاومة للأوساط الخارجية.
- استخدام مواد حاملة للزيت تسمح بتحرره فقط عند قيمة pH مرتفعة.

مواد وطرائق العمل

مكان وتاريخ البحث:

تم إنجاز هذا البحث في مخبر التحليل الآلي للأغذية بكلية الهندسة التقنية بجامعة حلب ومخابر الصيدلة الصناعية بكلية الصيدلة في جامعة حلب وذلك خلال الفترة الواقعة بين بداية شهر تشرين الأول عام ٢٠٢٣ ونهاية شهر تشرين الثاني ٢٠٢٤.

المواد والمحاليل المستخدمة:

تم شراء بذور الكتان من الأسواق المحلية لمدينة حلب، كما استعملت مجموعة من المواد الكيميائية الهندية النقية لإنجاز هذا البحث وهي هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، ومشعر فينول فتالئين (C20H14O4)، والمالتوديكسترين (C6H10O5)، وكلوروفورم (CHCl3)، حمض الخل (CH3COOH)، يوديد البوتاسيوم(KI)، كحول إيتيلي (C2H5OH)، هكسان (C6H14)، هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، ثيوسلفات الصوديوم (Na2S2O3)، بيكربونات الصوديوم (Na2HCO3)، الإيدراجيتL100 ألماني المنشأ، معزول بروتين الصويا الدنماركي.

الأجهزة والأدوات المستخدمة:

استُخدم في هذا البحث الأجهزة الآتية:

- جهاز التجفيف بالإرذاذ إنتاج شركة (Shanghai Pilotech Instrument &equipment) الصينية.
- عصارة كهربائية لاستخلاص الزيت من شركة (Leyisi Co., Ltd) الصينية.
- جهاز استخلاص الزيت (سوكسليت) من شركة (Sibata Scientific Technology Ltd,) اليابانية.
- ميزان بدقة 0.01 g إنتاج شركة (AND) الصينية.
- خلاط كهربائي مغناطيسي إنتاج شركة (Lab Tech) الصينية.
- عبوات زجاجية عاتمة.

طرائق العمل:

- باستخدام عصّارة كهربائية كما هو موضح في الشكل (١) تم عصر بذور الكتان، والحصول على الكسبة (بقايا عصر البذور) وزيت بذور الكتان
- تحديد نسبة الزيت في كل من البذور والكسبة باستخدام جهاز الاستخلاص السوكسوليت الموضّح في الشكل (٢).



الشكل (١) عصارة كهربائية ماركة Leyisi Co., Ltd الصينية



الشكل (٢) جهاز السوكسليت لاستخلاص الزيت

• عُصرت بذور الكتان باستعمال عصّارة كهربائية ميكانيكية، والحصول على الكسبة (بقايا عصر البذور) المبينة في الشكل (٣) مع زيت بذور الكتان.

• وبعد استخلاص الزيت من البذور تم حفظه في عبوات عاتمة زجاجية كما هو مبين في الشكل (٤) ثم قياس نسبة حموضة وقيمة بيروكسيد الزيت بعد العصر مباشرةً.



الشكل (٣) الكسبة الناتجة عن عصر بذور الكتان



الشكل(٤) العبوات العاتمة التي تم تخزين الزيت فيها بعد عصر بذور الكتان

تحضير محافظ زيت بذور الكتان

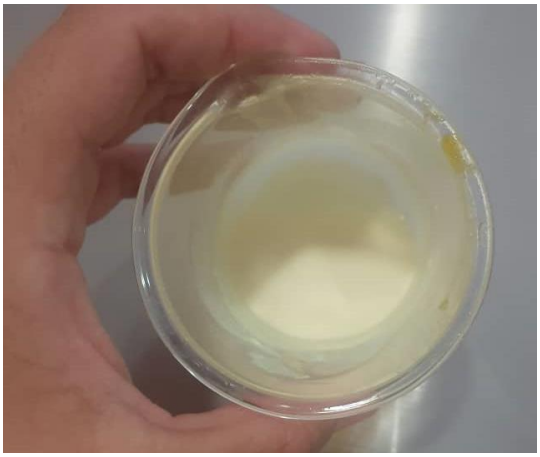
تم العمل وفق خمس تجارب

بدايةً في التجربة الأولى: تم تحضير المستحلب من 30g زيت و٤٥g ماء بوجود 2.5g ليسيتين الصويا و5g من الإيدراجيت L100 مع التسخين في حمام مائي والتحريك المستمر، حتى تمام تشكيل المستحلب ثم إدخاله على جهاز التجفيف بالإرذاذ الموضح في الشكل (٥) عند درجة حرارة دخول قدرها ١٥٠ ° C عند سرعة تدفق٢٠rpm وضغط ١٠ bar كما كانت درجة حرارة الخروج ٩٥° C وفق طريقة (Nile et al., 2024)



الشكل (٥) جهاز التجفيف بالإرذاذ إنتاج شركة Shanghai الصينية Pilotech Instrument &equipment

• في التجربة الثانية تم تحضير المستحلب بنفس مكونات التجربة الأولى مع إضافة 20g من الصمغ العربي وتثبيت بارامترات الجهاز.



الشكل(٦) المستحلب المحضّر من زيت بذور الكتان والصمغ العربي والإيدراجيت L100 بوجود ليسيتين الصويا

• في التجربة الثالثة تم تحضير نفس المستحلب في التجربة الثانية كما في الشكل (٦) مع تعديل بارامترات الجهاز لتكون درجة حرارة دخول جهاز التجفيف بالإرذاذ ١٣٠C° عند تدفق8rpm وضغط ١٠ bar كما كانت درجة حرارة الخروج ٩٥C° وفق (Nile et al., 2024) مع بعض التعديلات في البارامترات.

في التجربة الرابعة تم تحضير المستحلب بوجود 10g من زيت بذور الكتان و٥٠ g ماء و٣g من المالتوديكسترين و ١٥g من الإيدراجيت مع التسخين في حمام مائي والتحريك المستمر، حتى تمام تشكيل



الشكل(7) المستحلب الذي تم تشكيله من الزيت والمالتوديكسترين وبروتين الصويا والإيدراجيت L100 بوجود الماء

المستحلب ثم إدخاله على جهاز التجفيف بالإرذاذ عند درجة حرارة دخول قدرها C ° ١١٠ عند تدفقrpm٥ وضغط bar ٨ كما كانت درجة حرارة الخروج C ° ٩٥.

• أما في التجربة الخامسة فقد تمت عملية التجفيف بوضع g١٠ زيت بذور الكتان وml٧٥ من الماء مع التسخين ثم تم وضع g٧ المالتوديكسترين وg٥ بروتين الصويا وg١٥ من الإيدراجيت L100 حتى تمام تشكيل المستحلب الموضح بالشكل (٧) ثم إدخاله على جهاز التجفيف بالإرذاذ عند درجة حرارة دخول قدرها C ° ١٠٥ عند تدفقrpm٥ وضغط 8bar كما كانت درجة حرارة الخروج C ° ٩٥.

• أجريت الاختبارات اللازمة لتحديد أهم الخصائص الكيميائية قيمة بيروكسيد وحموضة للمحافظ بعد الانتهاء من عملية التجفيف وتم ذلك على مرحلتين:

١) الأولى تم حل المحافظ في الماء وإجراء التحاليل.

٢) الثانية تمت معاملة المحافظ في وسط درجة حموضته ٨,٤ لمعرفة مدى تحلل الزيت في هذا الوسط.

الاختبارات:

١) قياس قرينة البيروكسيد لزيت بذور الكتان: قيست قيمة البيروكسيد لزيت بذر الكتان ($meqO_2/Kg$) وفق طريقة(Beema et al., 2023)

٢) قياس قرينة الحموضة للزيت: تم قياس كمية الأحماض الدهنية الحرة في الزيت (mg KOH/g) وفق طريقة (Beema et al., 2023)

٣) التحليل الإحصائي: نُفِّذت التجارب وفق تصميم القطاعات العشوائية الكاملة بمعدل ثلاث مكررات تم دراسة قوة الاختبار باستخدام الحزمة الإحصائية Minitab 16 وقد كانت قيمة قوة الاختبار 0.84 وبالتالي نقبل بحجم العينة الكافي لإجراء الاختبارات الإحصائية، تمَّ استخدام الحزمتين الإحصائيتين

Minitab 16 و SPSS 25 لإجراء التحاليل الإحصائية، كما تم استعمال اختبار Sidak لدراسة الفروق المعنوية الثنائية متوسطات الحموضة والبروكسيد بين المجموعات المدروسة مثنى مثنى، حيث كانت قيمة P-value<0.05

النتائج والمناقشة

بلغت نسبة الزيت المستخلصة من بذور الكتان ٣٤,٩٧%، وهي نسبة مرتفعة نسبياً تعكس غنى البذور بالزيت. ومع ذلك، أظهرت الكسبة الناتجة عن العصر احتواءها على ٩,٨١% من الزيت، مما يشير إلى أن العصر الميكانيكي لا يحقق استخلاصاً كاملاً، وهو ما يتوافق مع ما أشار له (Zeng et al., 2022)

لقد أظهرت نتائج التجربة الأولى بقاء الزيت سائل في السيكلون الأخير كما هو موضح في الشكل (٨) بسبب عدم قدرة الإيدراجيت L100 وحده على تغليف الزيت.



الشكل(٨) السيكلون بعد تمرير مستحلب التجربة الأولى في جهاز التجفيف بالإرذاذ

أما التجربة الثانية بوجود الصمغ العربي تم ملاحظة التصاقات على جدران حجرة التجفيف كما في الشكل(٩)



الشكل(٩) حجرة التجفيف بعد تمرير مستحلب التجربة الثانية في جهاز التجفيف بالإرذاذ

في التجربة الثالثة عند تعديل البارامترات تم ملاحظة أن الصمغ العربي يلتصق على جدران جهاز التجفيف مع ورود زيت سائل في السيكلون النهائي كما في الشكل(١٠).



الشكل (١٠) نواتج تمرير مستحلب التجربة الثالثة في جهاز التجفيف بالإرذاذ

وبالتجربة الرابعة تم الحصول على مسحوق نهائي ممزوج مع الزيت
أي لم يتم التغليف بشكل كامل كما في الشكل(١١).



الشكل(١١) نواتج تمرير مستحلب التجربة الرابعة في جهاز التجفيف بالإرذاذ

أما في التجربة الخامسة كان ضبط البارامترات بوجود المالتوديكسترين وبروتين الصويا مع الإيدراجيت L100 مناسباً لعملية الكبسلة الدقيقة كما في الشكل(١٢).



الشكل (١٢) مسحوق زيت بذور الكتان بعد تمرير مستحلب التجربة الخامسة في جهاز التجفيف بالإرذاذ

يوضح الجدول (١) بلغت قيمة بيروكسيد للزيت الطازج بعد العصر مباشرة ٢,٤ ($meqO_2/Kg$)، وحموضة قدرها ١,٣ (mg KOH/g)، وهي قيم تقع ضمن الحدود المقبولة للزيوت غير المؤكسدة، مما يدل على أن ظروف العصر والتخزين الأولية كانت مناسبة ولم تؤدِ إلى تدهور ملحوظ في جودة الزيت. ويُعزى ذلك جزئياً إلى استعمال عبوات عاتمة، والتي تحد من تأثير الضوء كمحفز للأكسدة. وهذا ما يتوافق مع (Tomaszewska-Gras et al., 2021) والذي أشار إلى أن قيمة البيروكسيد للزيت تتراوح بين (١,٢١ -٦,٩) (meq O_2/Kg) أما قيم الحموضة وتراوحت بين (٠,٤ -١,٦) (mg KOH/g). أظهرت المحافظ الدقيقة الناتجة عن تجفيف مستحلب التجربة الخامسة والمعاملة بالماء انخفاضاً واضحاً في قيمة البيروكسيد ٠,٣٢ ($meqO_2/Kg$) أي كان هناك فروقاً معنوية عند مستوى ثقة $p<0,05$ كما ورد في الجدول (١)، مما يدل على فعالية المواد المُغلِّفة (المالتوديكسترين، بروتين الصويا، الإيدراجيت L100) في حماية الزيت من الوسط الخارجي أي عدم تحللها وتحرر الزيت، وهذا ما يتوافق مع (Xiaolu et al., 2025) إذ أكدت التجارب التي أجراها الباحثون فعالية

الجدول (١) قرينة الحموضة والبيروكسيد لزيت بذور الكتان والمحافظ

المؤشر	زيت بذر الكتان الطازج بعد العصر	محافظ زيت بذور الكتان المُعاملة بالماء	محافظ زيت بذور الكتان المُعاملة بوسط قلوي
قرينة الحموضة(mg KOH/g)	١,٣ ± ١,٠٤	1.04± ٠,٣٣	1.04± ٣,٧
قرينة البيروكسيد($meqO_2/Kg$)	1.46± ٢,٤	٠,٣٢ ± 1.46	1.46± ٣,٠٣

التحرر الموجّه للزيت باستعمال الإيدراجيت L100، كما أن خليط البروتينات والكربوهيدرات يُنتج مادة تغليف ذات خصائص مميزة تحد من نفاذية الأوكسجين لمحتوى المحافظ وهذا يحد من معدل أكسدة الدهون للزيت المغلف.

كما تمت ملاحظة وجود فروق معنوية عند مستوى ثقة $p<0,05$ عند معاملة المحافظ بوسط قلوي(pH 8.4)، فقد لوحظ ارتفاع في قيمة البيروكسيد إلى ٣,٠٣ ($meqO_2/Kg$)، ووصلت قيمة الحموضة إلى٣,٧ mg (KOH/g). ويُفسر ذلك بانحلال مادة الإيدراجيت L100 في الوسط القلوي، مما أدى إلى تحرر الزيت وتعرضه للبيئة الخارجية، وبالتالي حدوث تفاعلات أكسدة. مما يدل على أن التغليف أدى وظيفته في حماية الزيت حتى وصوله إلى البيئة المعوية، وهو ما يتوافق مع (Burapapadh et al., 2024) الذي أكد أن استعمال Eudragit L100 يتيح تحريراً موجّهاً في الأمعاء كما يمنع تعرضه للأكسجين والرطوبة. وهذا ما يتوافق مع (Xiaolu et al., 2025) الذين أكدوا فعالية الإطلاق الموجّه للزيت، إذ تم تحقيق حماية مِعدية جيدة. لكن عند معاملة المحافظ بوسط قلوي (pH 8.4)، كما أكد (Hakanen et al., 2025) على فعالية مزيج المالتوديكسترين وبروتين الصويا في التغليف.

الاستنتاجات

- أظهرت بذور الكتان محتوى زيتي مرتفع نسبياً، إلا أن العصر الميكانيكي لا يحقق استخلاصاً كاملاً
- ظروف العصر والتخزين الأولية المناسبة مهمة للحفاظ على جودة الزيت.
- أدى التمحفظ الدقيق باستخدام تقنية التجفيف بالإرذاذ إلى تقليل قيمة البيروكسيد للكبسولات الدقيقة بنسبة ١٣,٣% وتقليل نسبة الحموضة بنسبة ٢٥,٣٨% مما يعكس فعالية المواد المُغلِّفة (المالتوديكسترين وبروتين الصويا والإيدراجيت L100) في حماية الزيت من الأكسدة.
- ارتفعت قيم البيروكسيد إلى ٣,٠٣ ($meqO_2/Kg$) ووصلت قيمة الحموضة إلى ٣,٧ mg KOH/g عند تعريض الكبسولات لوسط قلوي (pH 8.4) ، نتيجة الانحلال مادة التغليف، مما يثبت تحرر الزيت في الأمعاء وضمان الاستفادة من القيمة الغذائية للزيت.

المقترحات

- تدعيم الأغذية بزيت بذور الكتان للحصول على أغذية وظيفية مهمة.
- ضبط معايير عملية التجفيف بالإرذاذ مثل درجة حرارة وسرعة الهواء الساخن في الجهاز قدر الإمكان لتحسين جودة المنتج النهائي.
- استخدام المحافظ الدقيقة المحضّرة من الإيدراجيت L100 في الأغذية الحمضية مثل عصائر الحمضيات.
- دراسة مواد حاملة إضافية للحفاظ قدر الإمكان على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمنتجات.
- اعتماد مبدأ التمحفظ الدقيق بكافة تقنياته للحصول على منتجات غذائية جديدة ذات قيمة غذائية عالية.

المراجع:

1) AUGUSTIN, M, LUZ S, and ORTWIN B.2006, "Maillard Reaction Products as Encapsulants for Fish Oil Powders." *Journal of Food Science* 71(2).

2) BAKER, T., PENG L, JEAN A. PARRELLA, and HOLLI L.2022, "Consumer Acceptance toward Functional Foods: A Scoping Review." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(3).

3) BAKRY, M., SHABBAR, A, BARKAT A, HAMID M, MOHAMED, A, AHMED M, and LI L.2016, "Microencapsulation of Oils: A Comprehensive Review of Benefits, Techniques, and Applications." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15(1):143–82.

4) BEEMA, N, NAGARAJU M, SRINIVAS M, RAVINDER T, THIRUPATHI A, and KIRAN K.2023, "Comparative Analysis of Physico-Chemical Properties and Fatty Acid Composition of Linseed (Linum Usitatissimum L.) Oils of Indian Accessions." *Journal of Applied Biology and Biotechnology* 11(1):80–87.

5)BURAPAPADH, K, PAWANDA W, SANPHAT R, and PHENNAPHA S.2024, "Development of Enteric Diclofenac Sodium Microparticles Through a Spray-Drying Process Facilitated by Different Aqueous Dispersion Systems." *Journal of Current Science and Technology* 14(3).

6)CARMO, E, REGIANE V, and SORAIA V.2015, "Microencapsulação Por Spray Drying, Novos Biopolímeros e Aplicações Na Tecnologia de Alimentos." *Journal of Chemical Engineering and Chemistry* 1(2):30–44.

7)CORRÊA-FILHO, L, MARGARIDA M, and VITOR, D.2019, "Advances in the Application of Microcapsules as Carriers of Functional Compounds for Food Products." *Applied Sciences (Switzerland)* 9(3).

8)DELSHADI, R, AKBAR B, ABOLFAZL G, FRANCISCO J, and LEONARD. W.2020, "Micro and Nano-Encapsulation of Vegetable and Essential Oils to Develop Functional Food Products with Improved Nutritional Profiles." *Trends in Food Science and Technology* 104(May):72–83.

9)DÍAZ-MONTES, E. 2023, "Wall Materials for Encapsulating Bioactive Compounds via Spray-Drying: A Review." *Polymers* 15(12). doi:10.3390/polym15122659.

10) FANG, Z, and BHESH. B.2010, "Encapsulation of Polyphenols - A Review." *Trends in Food Science and Technology* 21(10):510–23.

11) GHARSALLAOUI, A, GAËLLE R, ODILE C, ANDRÉE V, and RÉMI S.2007, "Applications of Spray-Drying in Microencapsulation of Food Ingredients: An Overview." *Food Research International* 40(9):1107–21.

12) GOUIN,S.2004,"Microencapsulation:Industrial Appraisal of Existing Technologies and Trends." *Trends in Food Science and Technology* 15(7–8):330–47.

13) HAKANEN, S, ANNELIE D, DOROTA O, ANNALISA S, WALDEMAR B, OSKAR L, MAŁGORZATA T, and KAISA M.2025, "Sensory Profiles and Oxidative Stability of Linseed Oil Microencapsulated with Pea, Soy, and Whey Proteins in High-Fat Food Models." *LWT* 216.

14) DE JESUS FREITAS, T, LARISSA S, VANESSA S, TAINARA S, ISMARA C, BRUNA A, ITACIARA L, DEBORAH M, and CAMILA D.2021, "Prospective Study on Microencapsulation of Oils and Its Application in Foodstuffs." *Recent Patents on Nanotechnology* 16(3):219–34.

15) MEHTA, N, PAVAN. K, AKHILESH. V, PRAMILA U, YOGESH K, OM PRAKASH M, AWIS Q, RUBÉN D, and JOSÉ M.2022, "Microencapsulation as a Noble Technique for the Application of Bioactive Compounds in the Food Industry: A Comprehensive Review." *Applied Sciences (Switzerland)* 12(3):1–34.

16) MUEED, A, SAHAR, SAMEH A, PHILIPPE M, TUBA E, and ZEYUAN D.2022. "Flaxseed Bioactive Compounds: Chemical Composition, Functional Properties, Food Applications and Health Benefits-Related Gut Microbes." *Foods* 11(20).

17) NILE, G., VIKRAM P, KAILAS J, VILAS A, and SHUBHANGI G. 2024, “Recent Studies on Optimization of Oil Encapsulation Process for Spray Drying : A Comprehensive Review.” 8(2):8–12.

18) PEREZ-PALACIOS, T,RUIZ-CARRASCAL , J, JUAN C, DE-LA-HABA. F, ABRAHAM P, and TERESA A.2022, “Recent Developments in the Microencapsulation of Fish Oil and Natural Extracts: Procedure, Quality Evaluation and Food Enrichment.” *Foods* 11(20).

19) RASCÓN, M, CÉSAR. B, HUGO. G, and MARCO. S. 2011, “Carotenoid Retention and Storage Stability of Spray-Dried Encapsulated Paprika Oleoresin Using Gum Arabic and Soy Protein Isolate as Wall Materials.” *LWT* 44(2):549–57.

20) SERFERT, Y., DRUSCH, S, and SCHWARZ, K.2010, “Sensory Odour Profiling and Lipid Oxidation Status of Fish Oil and Microencapsulated Fish Oil.” *Food Chemistry* 123(4):968–75.

21) DA SILVA, P, LEADIR L, RAGAGNINE DE MENEZES, C. AUGUSTO T, SCHWAN, É WIGMANN, J DE OLIVEIRA B, and DE BONA DA SILVA, C.2014, “Microencapsulação: Conceitos, Mecanismos, Métodos e Algumas Aplicações Em Tecnologia de Alimentos.” *Ciencia Rural* 44(7):1304–11.

22) TIMILSENA, Y PRASAD, B, RAJU A, and BENU A.2017, “Advances in Microencapsulation of Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs)-Rich Plant Oils Using Complex Coacervation: A Review.” *Food Hydrocolloids* 69:369–81.

23) TOMASZEWSKA-GRAS, J, MAHBUBA I, LILIANA GRZECA, A, and EMILIA F.2021, “Comprehensive Thermal Characteristics of Different Cultivars.” *Molecules* 26:1–20.

24) TONON, R, BRABET. C, and HUBINGER. M.2008, “Influence of Process Conditions on the Physicochemical Properties of Açai (Euterpe Oleraceae Mart.) Powder Produced by Spray Drying.” *Journal of Food Engineering* 88(3):411–18.

25) TOPNIKOVA, E. V., E. N. PIROGOVA, AND E. S. DANILOVA.2022, “Quality Assessment of Linseed Oil.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1052(1).

26) XIAOLU, P, ZHANG Y, LIANG Z, YU R, Li Xu, Z Wei, Ji Y, GAO SHAN, S Q, and ZHU H.2025, “UNUBLISHED”

27) YUAN, Q, FAN X, WEI H, MEI H, QILU Y, ZEMOU C, YAN Z, and LI L.2022, “The Review of Alpha-Linolenic Acid: Sources, Metabolism, and Pharmacology.” *Phytotherapy Research* 36(1):164–88.

28) ZENG, J, TING X, XINGGANG N, TENG W, XIAORU L, ZE Yu, and JING L.2022, “The Comparative Analysis of Different Oil Extraction Methods Based on the Quality of Flaxseed Oil.” *Journal of Food Composition and Analysis* 107(December 2021):104373.