

اصطناع استراتات بروبانول - 1 انطلاقاً من حمض الميريستيك وحمض الأوليك بوجود الأمبرلست -

15

إشراف الدكتورة: صبا ناصيف.

تقديم الطالبة: علا رياض البيريني.

الملخص

تلعب الاستراتات دوراً محورياً في العديد من التطبيقات الصناعية واليومية، نظراً لخصائصها الفيزيائية والكيميائية المميزة حيث تستخدم بشكل واسع في مجال المستحضرات الدوائية ومواد التجميل. يعد تحضير استراتات الأحماض الدسمة باستخدام تفاعل الأستر مع الكحولات من إحدى هذه الطرق الأساسية، وقد اعتمد البحث الحالي على هذه التقنية بطريقة مبتكرة تبتعد عن استخدام الحفازات الحمضية التقليدية التي تتسبب في مشاكل بيئية وتقنية. وتم بدلاً من ذلك، استخدام الحفاز Amberlyst-15 كبديل أكثر أماناً واستدامة، نظراً لسهولة فصله وإمكانية إعادة استخدامه. تم تحضير استراتات البروبانول-1 اعتماداً على حمض الميريستيك وحمض الأوليك باستخدام الحفاز Amberlyst-15. أظهرت النتائج أن الإستر الناتج من حمض الميريستيك يملك خصائص جيدة ومردود أعلى بلغ 72% بعد 7 ساعات من التفاعل عند درجة حرارة 80C⁰ ، في حين بلغ مردود الأستر من حمض الأوليك 69% بعد 12 ساعة. تم التأكد من بنية المركبات باستخدام تقنيات التحليل الطيفي مثل FT-IR و ¹H-NMR. كما تم حساب معامل التوازن بين الماء والزيت (HLB)، بالإضافة إلى دراسة الخصائص الحرارية باستخدام التحليل الحراري التفاضلي. أظهرت النتائج كفاءة الحفاز في تحضير استراتات البروبانول-1، كما تميز الأستر الناتج من حمض الميريستيك بخصائص حرارية مناسبة، مما يجعله مرشحاً واعداً للإستخدام في التطبيقات الصناعية، مقارنة بالإستر الناتج من حمض الأوليك.

الكلمات المفتاحية:

حمض الميريستيك - حمض الأوليك - أمبرلست 15 - الإستراتات الدسمة - معامل توازن الماء والزيت (HLB) - المسح الحراري التفاضلي DSC.

Synthesis of 1-propanol esters starting from myristic acid and oleic acid in the presence of amberlyst-15.

Abstract

The ester plays a central role in many industrial and everyday applications due to its distinctive physical and chemical properties. It is widely used in the pharmaceutical and cosmetic fields. The preparation of fatty acid esters through esterification with alcohols is one of the fundamental methods. In this study, this technique was adopted efficiently, by avoiding the use of traditional acidic catalysts, which pose environmental and technical problems. Instead, Amberlyst-15 catalyst was used as a safer and more sustainable alternative, owing to its ease of separation and reusability. Propanol-1 esters were synthesized based on myristic acid and oleic acid using the Amberlyst-15 catalyst. The results showed that the ester derived from myristic acid exhibited good properties, with a higher yield of 72% after 7 hours of reaction at 80°C, while the ester from oleic acid achieved a yield of 69% after 12 hours. The structures of the compounds were confirmed using spectroscopic analysis techniques such as ¹H-NMR and FT-IR. Additionally, the water-oil partition coefficient (HLB) was calculated, and the thermal properties were studied using Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results demonstrated the efficiency of the catalyst in preparing propanol-1 esters. The ester from myristic acid showed suitable thermal characteristics, making it a promising candidate for industrial applications, compared to the ester derived from oleic acid.

Keywords:

myristic acid, oleic acid, Amberlyst-15, fatty acid esters , hydrophilic-lipophilic balance (HLB) , thin-layer chromatography , differential scanning calorimetry.

1. المقدمة: (Introduction)

شهدت الصناعات الكيميائية في العقود الأخيرة تطوراً ملحوظاً، مما أتاح إنتاج العديد من المركبات ذات الأهمية في التطبيقات الصناعية واليومية. ومن أبرز هذه المركبات الإسترات الدسمة، التي تتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية مميزة مما يؤدي إلى استخدامها في الصناعات الدوائية ومواد التجميل وصناعة الأغذية، فضلاً عن دورها كمادة تشحيم وملدنات ومكونات أساسية للمستحلبات[1]. تُحضر هذه الإسترات من تفاعل الأحماض الدسمة مع الكحولات وفق أسترة فيشر[2]، تعاني تفاعلات الأسترة من انخفاض المردود بسبب وصولها إلى حالة التوازن الديناميكي الأمر الذي يحد من كفاءة الإنتاج، لذا لجأ الباحثين إلى استخدام حفازات متنوعة لتحسين المردود، حيث نالت الحفازات الحمضية الاهتمام الأكبر وكان حمض الكبريت الأكثر استخداماً لقدرته على سحب الماء ومنحه بروتونات للوسط التي تقوم ببرتنة المجموعة الكربوكسيلية وتسريع التفاعل للحصول على مردود أعلى كما أظهر كفاءة عالية ونسبة تحول تصل إلى 63.2% مقارنة بحمض كلور الماء وبارا تولوين حمض السلفونيك لإنتاج الأسيئات الإيثيلي[3] وفي ضوء أسترة الأحماض الدسمة والحصول على الأسترات الميتيلية للأحماض الدسمة بوجود حمض الكبريت تم الحصول على نسبة تحول تصل إلى 65% خلال زمن 100min [4]، كما دُرِس تفاعل الأسترة بين حمض الميريستيك مع عدد من الكحولات وتم الحصول على أعلى مردود بوجود بوتانول-1 وحمض الكبريت[5]. ورغم فعالية الحفازات الحمضية إلا أن استخدامها يرافقه تحديات متعددة منها التآكل وإنتاج نواتج ثانوية يصعب التخلص منها أو إعادة تدويرها[6]، لذا توجهت الأبحاث نحو الحفازات الصلبة غير المتجانسة التي تمتاز بسهولة الفصل وإمكانية إعادة الاستخدام، مما يجعلها أكثر أماناً وصداقة للبيئة. فقد تمت أسترة حمض البنوليك بوجود الزيوليت[7]. كما تم استخدام أكسيد الزنك المدعم بالزيوليت في أسترة الغليسيرول بالأحماض الدسمة وذلك عند درجات حرارة مرتفعة لزيادة المردود[8]. وأبدى التحفيز الأنزيمي في تفاعل أسترة الغليكويز مع الأحماض الدسمة كفاءة جيدة حيث تم الحصول على مردود عالٍ [9]. يُعدّ الحفاز Amberlyst-15، وهو راتنج تبادل أيوني قوي الحموضة، خياراً مثالياً لهذه التطبيقات، إذ يمتاز بقدرته العالية على تحفيز تفاعلات الأسترة، مع الحفاظ على كفاءته عبر عدة مرات حيث استخدم في عملية أسترة حمض الأوليك بوجود الإيثانول حيث تم الوصول إلى حالة الاتزان بعد حوالي 6 ساعات، مع تحقيق نسبة تحول تزيد عن 60% [10]. ومع ذلك، لم يتم العثور على أي دراسات تتناول أسترة البروبانول-1 مع حمض الأوليك وحمض الميريستيك بوجود Amberlyst 15 كمحفز. ويبين الجدول 1 عدد من الحفازات المستخدمة في أسترة الأحماض الدسمة في ظل ظروف تجريبية مختلفة من درجة حرارة وزمن تفاعل ومردود.

جدول 1: استخدام حفازات مختلفة ضمن شروط مختلفة لاصطناع أسترات أحماض دسمة

المواد المتفاعلة	الحفاز المستخدم	درجة الحرارة T(C°)	زمن التفاعل (min)	المردود	المرجع
Oleic acid/ 1-octanol	DBSA (dodecylbenzene sulfonic acid)	23	1440	98%	11
Oleic acid/ n-Butanol	Zr(SO ₄) ₂ . 4H ₂ O	120	480	94.5%	12
Palm fatty acid distillate (PFAD)/ Methanol	H ₂ SO ₄	120	70	99.4	13
Oleic acid/ Methanol	Amberlyst-46	100	120	98.6	14
1Oleic acid / Stigmasterol	Candida rugosa lipase	45	960	97.3	15

2. هدف البحث وأهميته (Research Aim and importance) :

- 1- يهدف البحث إلى تطوير منهجية فعالة وخضراء لتحضير استرات دسمة انطلاقاً من حموض دسمة مشبعة (الميريستيك) وأخرى غير مشبعة (الأوليك) وذلك بإجراء التفاعل في الطور السائل باستخدام الحفاز الصلب (Amberlyst-15) بدلاً من الطريقة التقليدية بالصهر الحمضي، حيث تتيح هذه الطريقة تحسين مردود التفاعل ضمن شروط معتدلة.
- 2- دراسة الاستقرار الحراري للاسترات المحضرة باستخدام المسح الحراري التفاضلي (DSC) لتحديد مدى ملاءمتها للتطبيقات الصناعية.

3. القسم العملي:

3.1 الأجهزة والأدوات المستخدمة:

1- ميزان تحليلي حساس بدقة تصل إلى 0.0001 gr

2- ميزان حرارة لمراقبة درجة حرارة التفاعل.

- 3- سخانة كهربائية مزودة بمحرك مغناطيسي.
- 4- فرن تجفيف كهربائي.
- 5- مضخة مائية موصولة بمكثف عكوس.
- 6- حوالة زجاجية ثنائية المأخذ سعة 100 ml
- 7- قمع فصل زجاجي سعة 100 ml
- 8- ديبين ستارك.
- 9- جهاز طيف الأشعة ماتحت الأحمر FT-IR -4100 ومن شركة Jasco اليابانية.
- 10- جهاز طيف الطنين النووي المغناطيسي بروتوني نموذج 400 MHZ من شركة Bruker السويسرية.
- 11- صفائح كروموتوغرافيا الطبقة الرقيقة من الألمنيوم مطلية بالسيليكا جل 60F254 قياس 20*20 من شركة Merck الألمانية.
- 12- ورق ترشيح من شركة Macherey-Nagel/ Germany ذو مسامات 110 mm (syringe filter) بمسام تساوي (0.45) ميكرو متر.
- 13- جهاز المسح الحراري التفاضلي - مخبر الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حمص.

3.2 المواد الكيميائية المستخدمة:

- 1- حمض الميريستيك بنقاوة 98% من إنتاج شركة Merck.
- 2- حمض الأوليك بنقاوة 99% من إنتاج شركة Merck.
- 3- البروبانول-1 بنقاوة 99.9% من إنتاج شركة Sigma Aldrich.
- 4- أمبرليست-15 عالي النقاوة من شركة Merck.

5- التولوين نقاوة 99% من شركة Sigma Aldrich.

6- الكلوروفورم بنقاوة 99% من شركة Sigma Aldrich.

7- كبريتات الصوديوم اللامائية نقاوة 98% من شركة Merck.

3.3 طريقة العمل:

حُضِر استر بروبييل حمض دسم، انطلاقاً من حمض الميريستيك وحمض الأوليك، بإذابة 0.05 مول أي 11.4gr من حمض الميريستيك و 14.12gr من حمض الأوليك في 10 مل من التولوين كمذيب للفاعل. وذلك في حوجلة كروية بسعة 100 مل مزودة بحمام زيتي ومبرد عكوس، وسخانة، ومحرك مغناطيسي، بالإضافة إلى جهاز ديين ستارك. بعد إذابة الحمض تماماً، يُضاف إلى المحلول 0.58 غرام من حفاز أمبرليست-15، ثم تُرفع درجة الحرارة إلى 80 درجة مئوية، ويُضاف البروبانول-1 بمقدار 0.05 مول كمتفاعل. يتم سحب الماء الناتج خلال التفاعل بواسطة جهاز ديين ستارك، مع تتبع التفاعل من خلال كروماتوغرافيا الطبقة الرقيقة باستخدام جملة جرف مكونة من (دي كلورو الإيثان- الهكسان). عند انتهاء التفاعل، يُترك المزيج ليبرد إلى درجة حرارة الغرفة، ثم يُرشح لإزالة الحفاز غير المتجانس، ويُبخّر المذيب بدرجة حرارة الغرفة. بعدها، يُحل البقايا في مذيب الكلوروفورم (20ml) ويُفصل باستخدام قمع فصل، حيث يتم جمع الطبقة العضوية المحتوية على المنتج، ثم تُغسل بكمية قليلة من الماء الساخن درجة حرارة 80 C^o لتؤثر على مذيب الكلوروفورم أربع مرات متتالية. عقب ذلك، يُجفف المنتج باستخدام كبريتات الصوديوم اللامائية وتُرشح للحصول على الاستر النقي. [16]

4. النتائج والمناقشة:

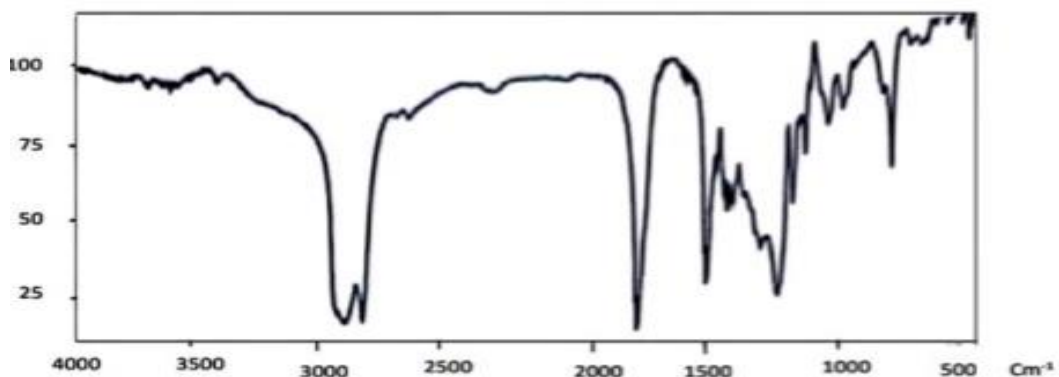
تُظهر النتائج الواردة في الجدول 2 أن عملية استرة حمض الميريستيك وحمض الأوليك مع البروبانول-1 أدت إلى تكوين الأسترات الموافقة ضمن نفس الظروف التجريبية. حيث لوحظ أن حمض الميريستيك بلغ حالة الاتزان بعد مدة زمنية قدرها سبع ساعات، مع مردود نسبته 72%، في حين استغرقت عملية استرة حمض الأوليك مدة أطول لتحقيق التوازن، إذ بلغت 12 ساعة مع مردود قدره 69%. يعكس هذا التباين في الزمن اللازم للوصول إلى الحالة متوازنة تفوق سرعة استرة حمض الميريستيك على حمض الأوليك، ويُعزى ذلك إلى الاختلاف في طول سلسلة الأحماض الدهنية، إذ يُعد طول السلسلة عاملاً مؤثراً على معدل التفاعل. فمن المتوقع أن يؤدي زيادة طول السلسلة إلى تقليل معدل التفاعل، بالإضافة إلى الإعاقة الفراغية الناجمة من وجود الرابطة المزدوجة، مما يُحد من سرعة التفاعل. كما أن سرعة التفاعل تختلف وفقاً لنوع الرابطة في الأحماض الدهنية. إذ تبين أن الأحماض المشبعة، التي تقتصر إلى روابط مزدوجة، تتفاعل بمعدلات أسرع مقارنة بالأحماض غير المشبعة التي تحتوي على

روابط مزدوجة. ويُعزى ذلك إلى أن وجود الرابطة المزدوجة يقلل من مرونة السلسلة، ويزيد من استقرار الحمض، مما يُبطئ من سرعة التفاعل. بالتالي، يمكن الاستنتاج أن وجود الرابطة المزدوجة يُؤثر سلبياً على معدل التفاعل، هذا يتوافق مع النتائج التي أظهرت أن استرة حمض الميريستيك (المشبعة) كانت أسرع من حمض الأوليك (غير المشبعة).

جدول 2: نتائج استرة حمض الميريستيك وحمض الأوليك مع البروبانول-1 ضمن نفس الشروط

رقم التجربة	الحمض الدسم	الغول المستخدم	الحفاز 5% وزناً من الحمض	درجة الحرارة	المذيب	زمن التفاعل	مردود التفاعل
1	حمض الميريستيك	البروبانول-1	أمبرليست-15	80°C	التولوين	7 hours	72%
2	حمض الاوليك	البروبانول-1	أمبرليست-15	80°C	التولوين	12 hours	69%

تم إثبات هوية الاسترات الناتجة باستخدام مطيافية ماتحت الأحمر حيث يبين الشكل (1) طيف ماتحت الأحمر لاستر ميريستات البروبيل وأهم ما يميز الطيف ظهور عصابة امتطاط عند (1215 cm^{-1}) العائدة لتشكّل الرابطة الاسترية. ويظهر الجدول 3 قيم أهم العصابات في الطيف.

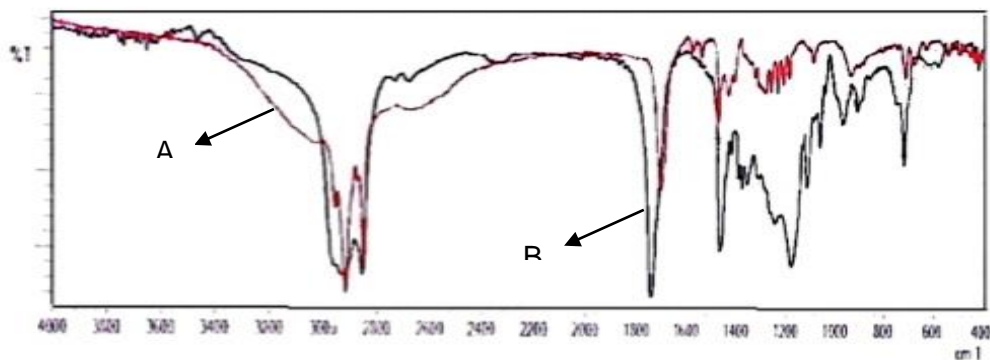


الشكل 1: طيف ماتحت الأحمر للاسترات الناتج ميريستات البروبيل.

جدول 3: أهم عصابات الامتصاص في طيف ماتحت الأحمر للاسترات ميريستات البروبيل.

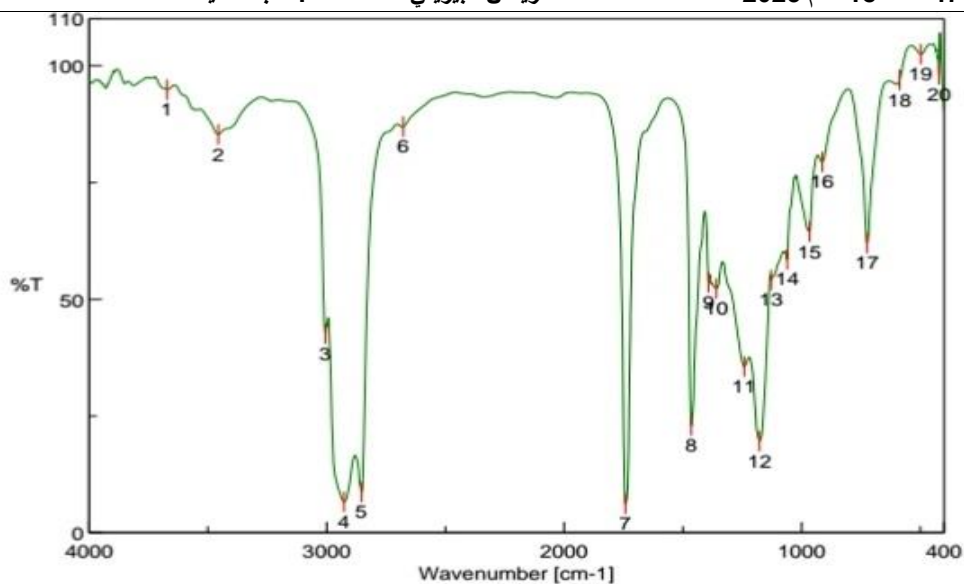
المجموعة الوظيفية	الإمتصاص الموافق cm^{-1}
C=O	1750
C-O	1215
$\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-H}$	2950

وبمقارنة طيف ماتحت الأحمر للاسترات الناتج ميريستات البروبيل مع طيف ماتحت الأحمر لحمض الميريستيك، نلاحظ انزياح عصابة الامتصاص العائدة للمجموعة الكربونيلية نحو الأعداد الموجية الأكبر دالاً على تشكل الإستر، واختفاء عصابة الإمتصاص التابعة لمجموعة OH الموجودة في الحمض وظهور عصابة جديدة عند 1215 cm^{-1} عائدة للرابطة الاسترية وهذا ما يوضحه الشكل 2.



الشكل 2: A طيف ماتحت الأحمر لحمض الميريستيك، B طيف ماتحت الأحمر للاسترات الناتج ميريستات البروبيل.

كما يبين الشكل (3) هوية الاسترات الناتج من تفاعل حمض الأوليك مع البروبانول-1 (أولييات البروبيل) أهم ما يميز الطيف ظهور عصابة امتصاص عند 1177 cm^{-1} عائدة لتشكيل الرابطة الاسترية، ويبين الجدول 4 أهم قيم عصابات الامتصاص في الطيف.



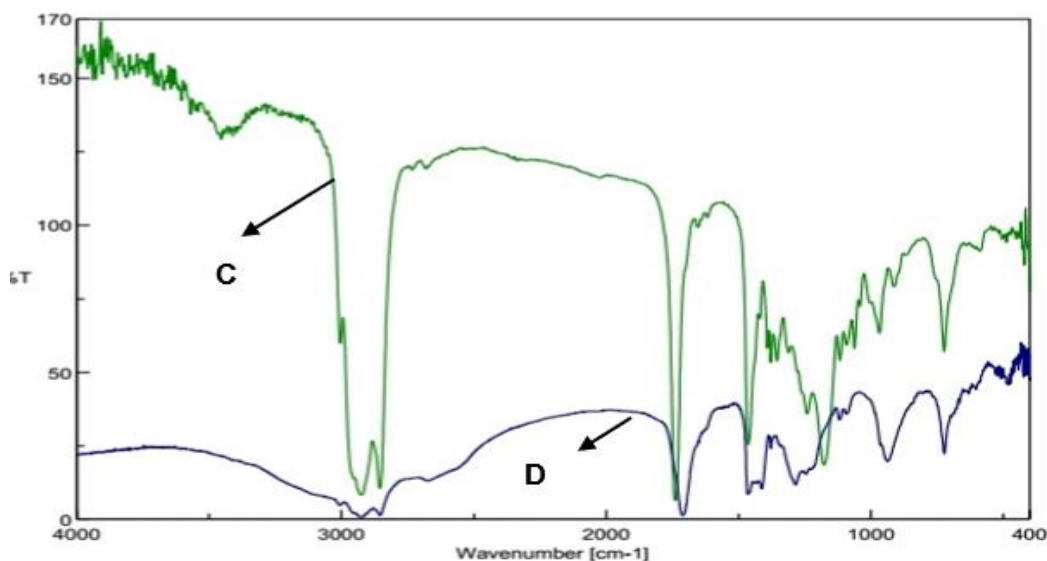
الشكل 3: طيف ماتحت الأحمر للاستر الناتج أوليات البروبيل.

جدول 4: أهم عصابات الامتصاص في طيف ماتحت الأحمر للاستر أوليات البروبيل.

الإمتصاص الموافق cm^{-1}	المجموعة الوظيفية
1741	C=O
1177	C-O
2926	$\text{C}_{\text{sp}^3}\text{-H}$
1612	C=C

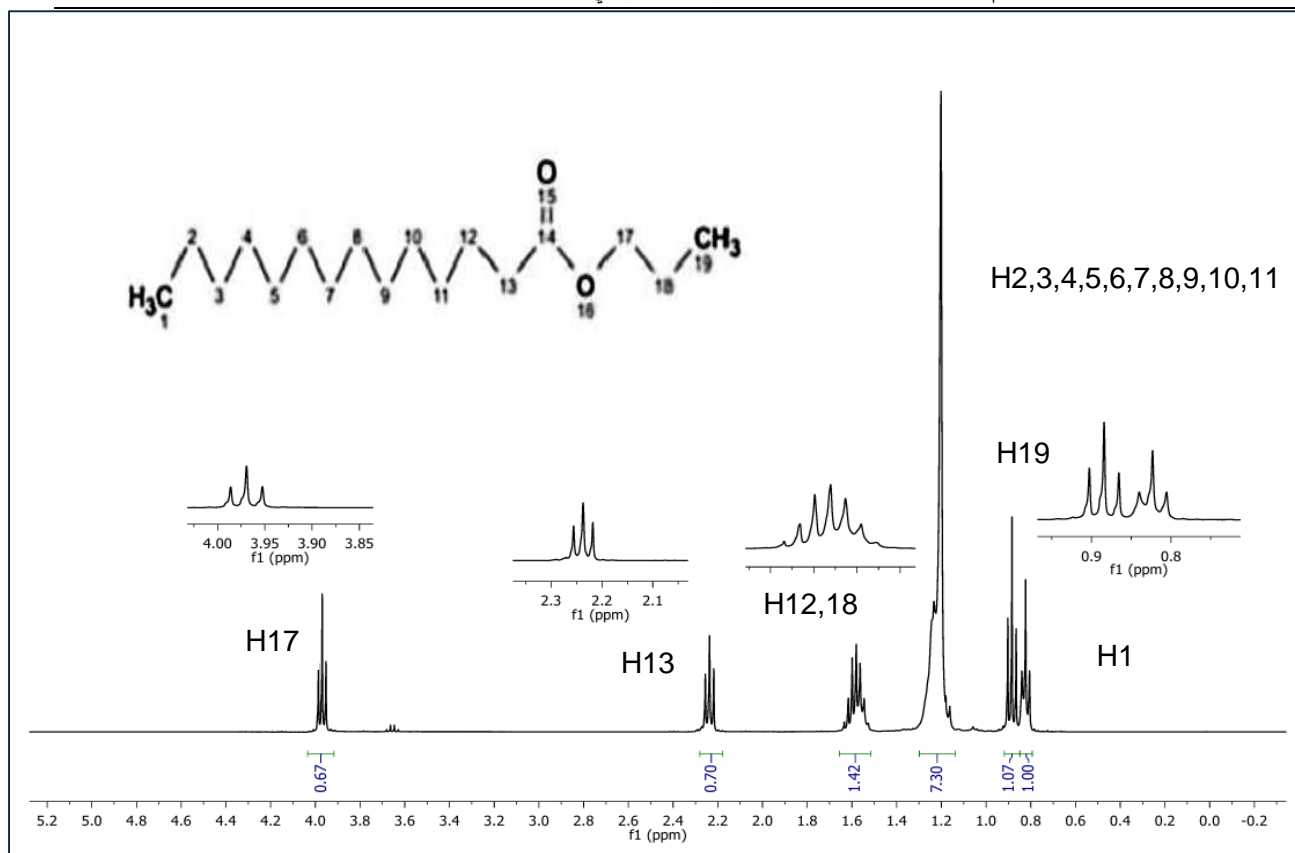
وبمقارنة طيف ماتحت الأحمر لمركب أوليات البروبيل مع طيف ماتحت الأحمر لحمض الأوليك في الشكل (4) نلاحظ انزياح عصابة الإمتصاص العائدة لمجموعة الكربونيل في أوليات البروبيل نحو الأعداد الموجية الأكبر مقارنة مع حمض الأوليك

واختفاء عصابة الإمتصاص التابعة لمجموعة OH الموجودة في الحمض وظهور عصابة امتصاص جديدة عائدة لتشكيل الرابطة الأسترية .



الشكل 4: طيف ماتحت الأحمر استر أوليات البروبيل، D طيف ماتحت الأحمر حمض الأوليك

كما تم الاعتماد على مطيافية الرنين النووي المغناطيسي في إثبات هوية الاسترات الناتجة حيث يبين الشكل (5) طيف الطنين النووي المغناطيسي البروتوني $^1\text{H-NMR}$ لمركب استر ميريسينات البروبيل بإستخدام مذيب الكلورفورم المديتر، حيث نلاحظ وجود (16) بيئة بروتونية، منها (10) بيئات بروتونية ظهرت كإشارة واحدة معقدة، وأهم مايميز الطيف وجود الإشارة عند 4 (ppm) عائدة لبروتونات الميثيلين OCH_2 واختفاء الإشارة العائدة لزمرة OH وهذا دليل على تشكيل الإستر. ويوضح الجدول 5 قيم الانزياحات للإشارات البروتونية.



الشكل 5: طيف الطنين النووي البروتوني $^1\text{H-NMR}$ لإستر ميريستات البروبيل.

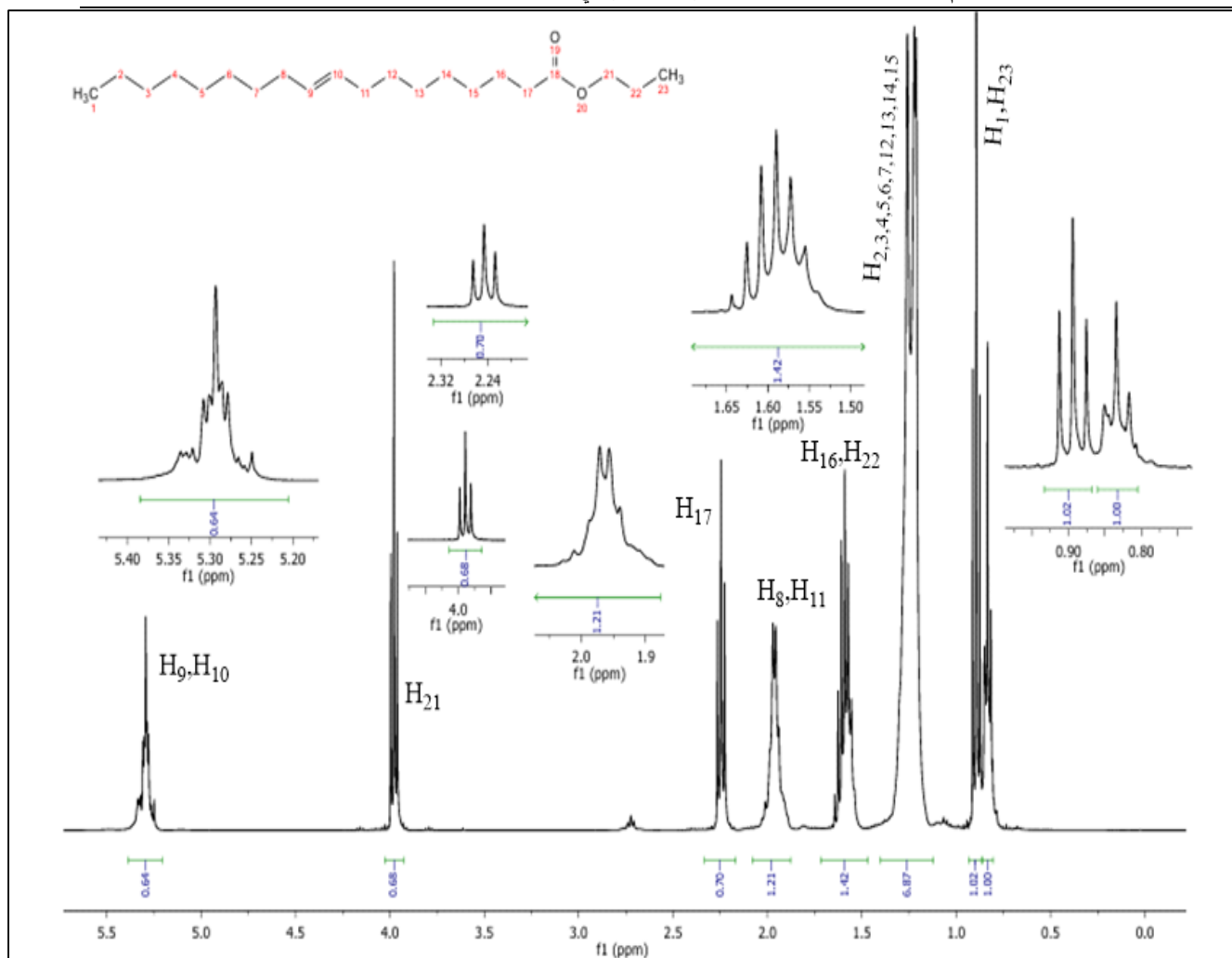
جدول 5: قيم الانزياحات الكيميائية للبروتونات للعائلة لإستر ميريستات البروبيل.

رقم ذرة الهيدروجين	الانزياح الكيميائي $^1\text{H-NMR}$	نوع ذرة الهيدروجين
1	0.8 (t-3H)	أليفاتية
19	0.9 (t-3H)	أليفاتية
13	2.3 (t-2H)	أليفاتية
17	4-4.3 (t-2H)	أليفاتية

اصطناع استرات بروبانول -1 انطلاقاً من حمض الميريستيك وحمض الأوليك بوجود الأمبرلست-15

أليفاتية	1.2-1.4 (m-20H)	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11
أليفاتية	1.5-1.7 (m-2H)	12
أليفاتية	1.6-1.7 (m-2H)	18

كما يبين الشكل رقم (6) طيف الطنين النووي المغناطيسي البروتوني $^1\text{H-NMR}$ لمركب استر أوليات البروبيل بإستخدام مذيب الكلورفورم المديتر، نلاحظ وجود (20) منها (10) بيئات بروتونية ظهرت كإشارة واحدة معقدة، وأهم مايميز الطيف وجود الإشارة عند (4 Ppm) عائدة لبروتونات الميثيلين OCH_2 واختفاء الإشارة العائدة لزمرة OH ، ويوضح الجدول (6) قيم الانزياحات الكيميائية العائدة لكل مجموعة بروتونية.



الشكل 6: طيف الطنين النووي البروتوني 1H-NMR لإستر أوليات البروبيل.

جدول 6 : قيم الانزياحات الكيميائية للبروتونات العائدة لإستر أوليات البروبيل.

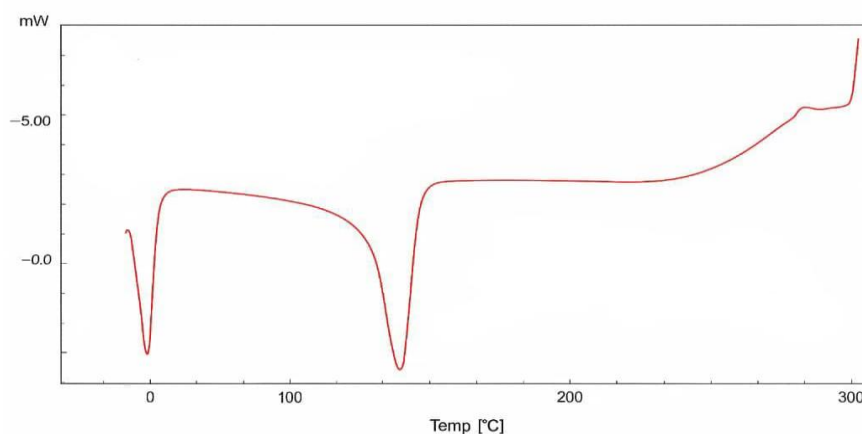
رقم ذرة الهيدروجين	الانزياح الكيميائي ¹ H-NMR	نوع ذرة الهيدروجين
1	0.89(t-3H)	أليفاتية
23	1 (t-3H)	أليفاتية
(2,3,4,5,6,7,12,13,14,15)	1.3(m-20H)	أليفاتية
(16,22)	1.6(m-4H)	أليفاتية
(8,11)	2(q-4H)	أليفاتية
17	2.3(t-2H)	أليفاتية
21	4.1(t-2H)	أليفاتية
(9,10)	5.4(m-2H)	أليفاتية

دراسة الخصائص الحرارية للإسترات المحضرة:

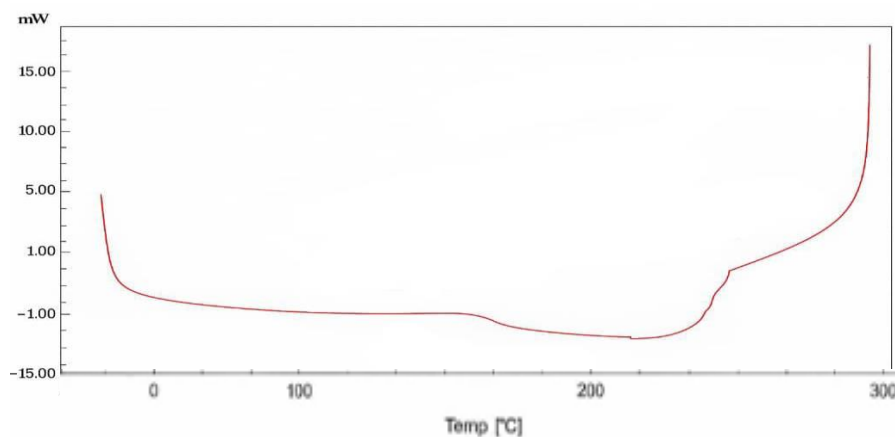
دُرِس السلوك الحراري لكل من إستر ميريسينات البروبيل وإستر أوليات البروبيل باستخدام المسح الحراري التفاضلي (DSC). وبمقارنة السلوك الحراري لكل من إستر ميريسينات البروبيل (الناتج من حمض الميريستيك) وإستر أوليات البروبيل (الناتج من حمض الأوليك)، لوحظ تباين واضح مرتبط بالبنية الكيميائية للأحماض الدهنية. فقد أظهر ميريسينات البروبيل قمة انصهار حادة ومحددة بوضوح في مجال ضيق من درجات الحرارة (~43-45°C)، مما يعكس انتظاماً في البنية الجزيئية وانتقالاً طورياً واضحاً بين الحالة الصلبة والسائلة وهذا ما يوضحه الشكل (7). هذا السلوك يُعزى إلى الطبيعة المشبعة لحمض الميريستيك، حيث تسمح الروابط الأحادية بتكدس جزيئي أكثر انتظاماً يؤدي إلى نقطة انصهار محددة، كما أنه حافظ على ثباته الحراري ضمن درجات حرارة مرتفعة دون تحلل واضح. بالمقابل، لم يُظهر أوليات البروبيل قمة انصهار واضحة في منحنى DSC كما هو موضح في الشكل (8)، وظل في الحالة السائلة ضمن مدى درجات الحرارة المدروسة. ويعود ذلك إلى وجود رابطة مزدوجة في البنية الكربونية، والتي تمنع الترتيب البلوري الكامل وتؤدي إلى انصهار تدريجي غير محدد. كما أن هذه البنية غير المشبعة تجعله أكثر عرضة للتغيرات الحرارية والأكسدة مقارنةً بميريسينات البروبيل.

وبذلك يمكن القول إن إسترات الأحماض الدهنية المشبعة (مثل ميريستات البروبيل) تُظهر خصائص حرارية أكثر وضوحًا وانتظامًا من إسترات الأحماض غير المشبعة (مثل أوليات البروبيل)، مما يعكس تأثير درجة التشبع على الثبات الحراري والسلوك الطوري. وهذا يفتح المجال أمام استخدام ميريستات البروبيل في تطبيقات تتطلب ثباتًا حراريًا وانتقالًا فيزيائيًا محددًا، بينما قد يكون أوليات البروبيل أكثر ملاءمة لتطبيقات تحتاج سيولة وخواص فيزيائية مرنة عند درجات حرارة الغرفة [16].

الشكل 8: منحنى المسح الحراري التفاضلي لمركب أوليات البروبيل.



الشكل 7: منحنى المسح الحراري التفاضلي لمركب ميريستات البروبيل.



حساب معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي (HLB):

تم حساب قيمة معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي (HLB) للمركبين الناتجين وفق طريقة Griffin:

$$HLB=20*Mh/M$$

M_h الكتلة الجزيئية للجزء المحب للماء من الجزيء.

M الكتلة الجزيئية للمركب بالكامل.

فكانت قيمة معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي لمركب استر ميريسينات البروبيل (4.36)، في حين قيمة معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي لمركب استر أوليات البروبيل (3.64). لوحظ أن قيمة معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي للمركبات الناتجة أقل من $HLB < 10$ وبالتالي فإن المركبات الناتجة قابلة للذوبان في الزيت وغير قابلة للذوبان في الماء ويعزى ذلك لزيادة طول السلسلة الكربونية.

5. الاستنتاجات:

- 1) -أظهرت نتائج الأسترة أن حمض الميريستيك المشبع يعطي مردوداً أعلى بالمقارنة مع حمض الأوليك غير المشبع من حيث سرعة التفاعل.
- 2) أظهرت تفاعلات الأسترة التي تم تنفيذها في الطور السائل فعالية أعلى ومردوداً أفضل مقارنة بالطريقة التقليدية بالصهر الحمضي، حيث أن العمل في الطور السائل أتاح توزيعاً أفضل للمتفاعلات وقلل من فرص حدوث تفاعلات جانبية أو تحلل حراري مما ساهم بالحصول على نواتج أنقى وتوفير بيئة تفاعلية أكثر كفاءة.
- 3) أبدى الحفاز المستخدم (Amberlyst-15) فعالية عالية في تحفيز تفاعل الأسترة، ويعد خياراً مثالياً لسهولة فصله وإمكانية إعادة استخدامه دون فقدان كفاءته مما يساهم في خفض التكاليف ويعزز الإستدامة الصناعية.
- 4) أظهرت الدراسة أن المركبات الناتجة تملك قيم معامل التوازن الهيدروفيلي-الهيدروفوبي ($HLB > 10$) مما يدل على ذوبانها العالي في الزيوت وانخفاض ذوبانها في الماء وهذا يمنحها خواصاً مميزة حيث أنه من الممكن استخدامها كمكونات فعالة في مستحضرات التجميل.
- 5) أظهرت نتائج دراسة المسح الحراري التفاضلي (DSC) للمركبات الناتجة أنها تمتلك استقراراً حرارياً جيداً مما يسمح بتطبيقها في مجالات تتطلب مقاومة للحرارة.

6. المراجع:

- 1 - Lesch J, editor. The German chemical industry in the twentieth century. Springer Science Business Media ; 2000 Aug 31.
- 2- Kastratović V, Bigović M. Esterification of stearic acid with lower monohydroxylic alcohols. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2018;24(3):283-91.
- 3 - Jyoti G, Keshav A, Anandkumar J, Bhoi S. Homogeneous and heterogeneous catalyzed esterification of acrylic acid with ethanol: reaction kinetics and modeling. International Journal of Chemical Kinetics. 2018 May;50(5):370-80.
- 4- Bakar SA, Yusup S, Ahmad MM, Quitain AT, Sasaki M, Goto M, Uemura Y, Ahmad J. Comparative study on two-step fatty acid methyl ester (FAME) production from high FFA crude palm oil using microwave technique and conventional technique. Advanced Materials Research. 2014 Jun 25;917:87-95.
- 5 -Kastratović V, Bigović M. Esterification of stearic acid with lower monohydroxylic alcohols. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2018;24(3):283-91.
- 6 -Blanco M, Castillo M, Beneyto R. Study of reaction processes by in-line near-infrared spectroscopy in combination with multivariate curve resolution: esterification of myristic acid with isopropanol. Talanta. 2007 Apr 30;72(2):519-25.
- 7 - Fawaz EG, Salam DA, Daou TJ. Esterification of linoleic acid using HZSM-5 zeolites with different Si/Al ratios. Microporous and Mesoporous Materials. 2020 Mar 1;294:109855.
- 8- Singh D, Patidar P, Ganesh A, Mahajani S. Esterification of oleic acid with glycerol in the presence of supported zinc oxide as catalyst. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013 Oct 23;52(42):14776-86.
- 9 - Yang Z, Huang ZL. Enzymatic synthesis of sugar fatty acid esters in ionic liquids. Catalysis Science & Technology. 2012;2(9):1767-75.
- 10 - Hykkerud A, Marchetti JM. Esterification of oleic acid with ethanol in the presence of Amberlyst 15. Biomass and Bioenergy. 2016 Dec 1;95:340-3.
- 11 - Gang L, Xinzong L, Eli W. Solvent-free esterification catalyzed by surfactant-combined catalysts at room temperature. New Journal of Chemistry. 2007;31(3):348-51.

- 12- Juan JC, Zhang J, Yarmo MA. Efficient esterification of fatty acids with alcohols catalyzed by Zr (SO₄)₂·4H₂O under solvent-free condition. *Catalysis letters*. 2008 Dec;126(3):319-24.
- 13- Chongkhong S, Tongurai C, Chetpattananondh P, Bunyakan C. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*. 2007 Aug 1;31(8):563-8.
- 14 - Ilgen O. Investigation of reaction parameters, kinetics and mechanism of oleic acid esterification with methanol by using Amberlyst 46 as a catalyst. *Fuel Processing Technology*. 2014 Aug 1;124:134-9.
- 15- Chang M, Zhang T, Feng W, Wang T, Liu R, Jin Q, Wang X. Preparation of highly pure stigmasteryl oleate by enzymatic esterification of stigmasterol enriched from soybean phytosterols. *Lwt*. 2020 Jun 1;128:109464.
- 16- Sarı A, Biçer A, Karaipekli A. Synthesis, characterization, thermal properties of a series of stearic acid esters as novel solid–liquid phase change materials. *Materials Letters*. 2009 May 31;63(13-14):1213-6.