

التفاعل العضوي بين الألكينات والأحماض العضوية: دراسة مقارنة بين طرق التحفيز الكيميائي والحراري

الشعيلي عيسى حلب¹, عبدالرؤوف الامير عبدالرحمن²

جامعة الزاوية¹, جامعة صبراتة كلية العلوم رقدالين²

الملخص

تعتبر التفاعلات بين الألكينات والأحماض العضوية من العمليات الكيميائية الأساسية التي تلعب دورًا هامًا في الصناعات الكيميائية والدوائية، حيث يتم إنتاج مركبات ذات قيمة مضافة مثل الإسترات. تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة طريقتين أساسيتين لتحفيز هذه التفاعلات: التحفيز الكيميائي باستخدام محفزات متجانسة وغير متجانسة، والتحفيز الحراري. أظهرت نتائج الدراسة أن التحفيز الكيميائي يوفر نسب تحويل تصل إلى 95% مع انتقائية عالية تصل إلى 90% نحو المنتج المستهدف، مما يجعله الخيار الأمثل للتطبيقات الدقيقة. في المقابل، حقق التحفيز الحراري نسب تحويل تتراوح بين 70-85%، لكنه يعاني من انخفاض الانتقائية وتكوين منتجات جانبية بنسبة 15-20%. كما لوحظ أن استخدام المحفزات مثل حمض الكبريتيك أو المحفزات المعدنية يعزز كفاءة التفاعل ويقلل من زمنه، بينما يتطلب التحفيز الحراري طاقة حرارية أكبر لتحقيق نفس المستوى من التفاعل. توفر الدراسة رؤى قيمة حول تحسين الشروط التجريبية لكل طريقة، حيث تبين أن التحكم في درجة الحرارة وتركيز المواد المتفاعلة يلعب دورًا حاسمًا في تحسين الأداء التفاعلي. تشير النتائج إلى أن التحفيز الكيميائي هو الخيار الأنسب للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية، بينما يمثل التحفيز الحراري حلاً اقتصاديًا ومرنًا في التطبيقات الصناعية واسعة النطاق. توصي الدراسة بتطوير محفزات أكثر استدامة لتعزيز كفاءة العمليات وتقليل الآثار البيئية.

الكلمات المفتاحية: الألكينات، الأحماض العضوية، التحفيز الكيميائي، التحفيز الحراري، الاستدامة، الانتقائية.

Submitted: 12/01/2025

Accepted: 01/02/2025

Abstract

The reactions between alkenes and organic acids are one of the most important stoichiometric reactions that find application in chemical and pharmaceutical industries, yielding esters of high utility. This study aims to compare two primary methods for catalyzing these reactions: homogeneous and heterogeneous catalysis and thermal catalysis. The results imply that chemical catalysis provides up to 95% conversion and up to 90% selectivity towards the targeted product making it ideal for accurate uses. Conversely, comparable thermal catalysis produced conversion efficiencies of between 70-85%, but offered poor selectivity and synthesized 15-20% by products along with the main product. The employment of external promoters such as sulfuric acid or metallic catalysts increases the rate at which the reaction takes place and still expands the time to be taken for the reaction as opposed to thermal catalysis, which requires more thermal energy to produce the same level of reaction. Experimental conditions for each method are explained in detail letting the study be a useful source for understanding the importance of temperature and reactant concentration in enhancing the reaction efficiency. The conclusions are kind of predicted that chemical catalysis is suitable for the high accuracy of applications whereas thermal catalysis is the cost effective and versatile

for the large-scale industrial utility. The study suggests future research on the synthesis of better catalysts to improve the process and reduce harm to the environment.

Keywords: *Alkenes, Organic Acids, Chemical Catalysis, Thermal Catalysis, Sustainability, Selectivity.*

المقدمة

تناولت هذه الدراسة التفاعل العضوي بين الألكينات والأحماض العضوية، وهو مجال ذو أهمية كبيرة في الكيمياء العضوية نظراً لتطبيقاته المتنوعة في الصناعات الدوائية والكيميائية. الألكينات هي مركبات عضوية تتميز بوجود رابطة مزدوجة تجعلها غنية بالتفاعلات مع العديد من المركبات، بما في ذلك الأحماض العضوية. هذه التفاعلات تُستخدم في إنتاج مركبات قيمة مثل الإسترات واللاكتونات، التي تُعتبر أساسية في تصنيع العطور، والمذيبات، والبوليمرات (Luke Am Wilczek, 2022).

على الرغم من الفوائد الكبيرة لهذه التفاعلات، إلا أنها تواجه تحديات متعددة، منها ضعف الانتقائية وتكوين نواتج جانبية غير مرغوبة عند استخدام الطرق التقليدية مثل التحفيز الحراري. ولذلك، أصبحت الحاجة ماسة إلى استكشاف طرق جديدة لتحفيز هذه التفاعلات بكفاءة وانتقائية أكبر، مع تقليل الأثر البيئي والتكاليف المرتبطة بها (Pate, R & Kim, 2020).

تعتمد هذه الدراسة على منهجية تحليلية تجريبية تهدف إلى مقارنة التحفيز الكيميائي والحراري من خلال تجارب معمقة باستخدام ألكينات وأحماض عضوية مختلفة. يشمل التحفيز الكيميائي استخدام حفازات حمضية متجانسة وغير متجانسة، مثل أحماض الكبريتيك والزيوليت، بينما يركز التحفيز الحراري على تفاعلات تحت درجات حرارة وضغوط مرتفعة. تهدف الدراسة إلى تحديد الظروف المثلى لتحقيق أعلى كفاءة وأفضل انتقائية، مما يساهم في تحسين عمليات الإنتاج الصناعي وتقليل النفايات الجانبية.

تكمن أهمية هذا البحث في سعيه إلى تحسين كفاءة هذه التفاعلات من خلال مقارنة طريقتين رئيسيتين للتحفيز: التحفيز الكيميائي والحراري. تُظهر التفاعلات المحفزة كيميائياً إمكانية تحقيق انتقائية أكبر وكفاءة محسنة، بينما يتطلب التحفيز الحراري ظروفاً قاسية تؤدي غالباً إلى تكوين نواتج جانبية غير مرغوبة. تعتمد هذه الدراسة على منهجية تحليلية تعتمد بالأساس على إجراء التفاعلات تحت تأثير التحفيز الكيميائي تارة وتحت تأثير التحفيز الحراري تارة أخرى.

أهمية الدراسة

1. تطوير العمليات الصناعية القائمة على التفاعلات بين الألكينات والأحماض العضوية، والتي تُعتبر أساسية في إنتاج المواد الكيميائية الوسيطة ذات القيمة العالية. نظراً لأن هذه التفاعلات تُستخدم على نطاق واسع في تصنيع المركبات العضوية مثل الإسترات، والكحوليات، والأحماض الدهنية، فإن تحسين كفاءة وفعالية هذه العمليات يُعد خطوة حيوية في تعزيز الاستدامة الصناعية.

2. تحليل الانتقائية التفاعلية

دراسة أنواع لمنتجات التي تم الحصول عليها في كل طريقة مع تحديد النسبة المئوية للمنتج المستهدف (مثل الإسترات) مقارنة بالمنتجات الجانبية. هذا التحليل يمكن من تقييم دقة وانتقائية كل طريقة.

3. تقليل استهلاك الطاقة

يتم ذلك عن طريق تحسين السلامة التشغيلية للعمليات الصناعية التي تعتمد على التحفيز الحراري، من خلال تقديم بدائل كيميائية أكثر كفاءة. بذلك، تقدم الدراسة إطارًا يمكن أن يُبنى عليه لتطوير حلول صناعية مبتكرة وصديقة للبيئة

أهداف الدراسة

1. تحليل تأثير طرق التحفيز المختلفة على تفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية:
- مقارنة معدل التفاعل، الانتقائية، والنواتج النهائية بين التحفيز الكيميائي والحراري.
2. دراسة تأثير العوامل التفاعلية المختلفة:
- استكشاف تأثير درجة الحرارة، نوع المحفز، وتركيز الألكين على كفاءة التفاعل ونقاء الناتج.
3. فهم الآليات التفاعلية المميزة لكل طريقة تحفيز:
- تحديد الآليات الكيميائية التي تحكم التفاعلات وتقديم تفسير علمي للناتج.
4. توفير أساس علمي لتحسين العمليات الصناعية

تقديم توصيات لتحسين تصميم العمليات الصناعية التي تعتمد على هذه التفاعلات لزيادة الكفاءة وتقليل

النواتج الجانبية

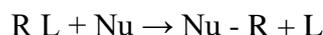
الاطار النظري

يُعد الفهم النظري للتفاعل الكيميائي بين الألكينات والأحماض العضوية أساسًا لفهم دور المحفزات الحرارية والكيميائي في نتائج التفاعل من حيث الكمية ودرجة النقاء. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل دور المحفزات في تحديد كمية ونقاء نواتج التفاعلات بين الأحماض العضوية والألكينات باستخدام منهجية تجريبية مدعومة بأسس نظرية. التفاعلات بين الأحماض العضوية والألكينات تنتمي إلى فئة تفاعلات الإضافة حيث تتم إضافة جزيء الحمض إلى الرابطة المزدوجة في الألكيل لتكوين مركب جديد. الرابطة المزدوجة في الألكينات تكون غنية بالإلكترونات مما يجعلها عرضة للهجوم من قبل الأنوية المحبة للإلكترونات مثل البروتونات في الأحماض العضوية (Kumar, N., & Singh, 2023).

الصيغة الكيميائية العامة لتفاعلات الألكينات والأحماض العضوية

1. المرحلة الأولى: الهجوم النوكليوفيلي

- يحدث هجوم نوكليوفيلي على الرابطة المزدوجة بواسطة البروتون (H^+) من الحمض العضوي، مما يؤدي إلى تكوين كاتيون كربوني. (Carbocation)
- الصيغة العامة لهذه الخطوة:



2. المرحلة الثانية: التفاعل مع أنيون الحمض

- يتفاعل الكاتيون الكربوني مع أنيون الحمض مثل (CH_3COO^-) لتكوين المنتج النهائي.

عند تفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية تحدث عدة أنواع من التفاعلات، حسب ظروف وعوامل التفاعل المحيطة ونوع المحفز المستخدم سواء كان محفزًا حراريًا أو كيميائيًا. فيما يلي تفصيل علمي لهذه التفاعلات:

1. تفاعل إضافة الألكينات مع الأحماض العضوية

الوصف:

تحت ظروف معينة، يمكن أن تتفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية لإنتاج الإسترات عبر خطوات بسيطة تتضمن تكوين كاربكاتيون أو آلية انتقالية (Kumar, N., & Singh 2023).

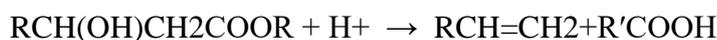
- الخطوة الأولى: تفعيل الرابطة المزدوجة
يتم تنشيط الرابطة المزدوجة في الألكين باستخدام عامل حفاز مثل حمض الكبريتيك (H₂SO₄) يعمل الحمض على بروتنة الرابطة المزدوجة لتكوين كاربكاتيون.
الخطوة الثانية:

تفاعل الكاربكاتيون مع الحمض العضوي
يتفاعل الكاربكاتيون الناتج مع الحمض العضوي (RCOOH)، مما يؤدي إلى تكوين مركب وسيط.

- الخطوة الثالثة:

تكوين الإستر
في الخطوة الأخيرة، يتم نزع الماء (Dehydration) لتكوين الإستر النهائي.

الصيغة العامة للمعادلة



2. تفاعل الألكينات مع مشتقات الأحماض العضوية

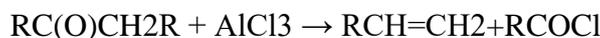
الوصف:

تحت تأثير الحفازات مثل كلوريد الألومنيوم (AlCl₃) (AlCl₃)، يمكن أن تتفاعل الألكينات مع كلوريدات الأسيل أو أنهيدريدات الأحماض لتكوين مركبات مثل الكيتونات أو الإسترات (Kumar, N) & Singh, 2023).

الآلية:

1. تفعيل كلوريد الأسيل باستخدام الحفاز.
2. إضافة المجموعة الأسيلية إلى الألكين.
3. إعادة تكوين العامل الحفاز.

الصيغة العامة للمعادلة



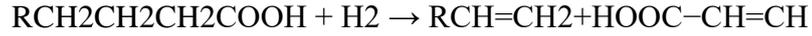
3. تفاعل هدرجة الأحماض غير المشبعة مع الألكينات

الوصف:

عند تفاعل الأحماض غير المشبعة مع الألكينات في وجود عوامل حفازة مثل النيكل أو البلاديوم، يمكن أن تحدث هدرجة للرابطة المزدوجة، مما يؤدي إلى تكوين أحماض مشبعة أو إسترات.

الآلية:

- يتم استخدام الهيدروجين كعامل مساعد لإضافة ذرات الهيدروجين إلى الروابط المزدوجة.



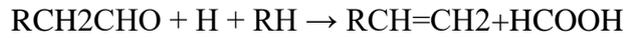
4. تفاعل الألكينات مع حمض الفورميك

الوصف:

عند استخدام حمض الفورميك، يمكن أن يتفاعل الألكين لإنتاج الكحولات أو الألدهيدات. العملية تشمل إضافة مجموعة الفورميل (Choi, H., & Park, M. 2021).

الآلية:

1. تفعيل الألكين باستخدام حفاز معدني مثل الكوبالت أو الروديوم.
2. إضافة حمض الفورميك مع تكوين منتج وسيط.
3. إنتاج كحول أو ألدريد.



القوانين الكيميائية المرتبطة بتفاعلات الألكينات والأحماض العضوية

قانون الحفظ الكتلي

الكتلة الإجمالية للمواد المتفاعلة تساوي الكتلة الإجمالية للنواتج في أي تفاعل كيميائي.

التطبيق في تفاعلات الألكينات: هذا القانون يضمن أن عدد الذرات في المواد المتفاعلة (الألكين والحمض العضوي) يساوي عدد الذرات في المنتجات مثل الإستر أو الكحول.

قانون ماركونيكوف

عند إضافة مركب غير متماثل إلى الكين غير متماثل تذهب ذرة الهيدروجين إلى ذرة الكربون المرتبطة بعدد أكبر من ذرات الهيدروجين (Naime M, Dovra Reshef 1996).

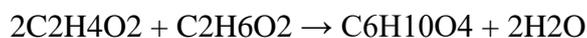
التفسير العلمي: يتحدد توزيع المنتجات بناءً على استقرار الكاربكاتيون الوسيط. الكاربكاتيون الأكثر استقرارًا يتكون بسرعة أكبر

تطبيقات قوانين التفاعلات بين الألكينات والأحماض العضوية:

1. إنتاج الإسترات

الإسترات هي منتجات رئيسية عند تفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية تحت تأثير الحفازات. تُستخدم الإسترات كعطور، ومذيبات، وفي صناعة البلاستيك.

مثال صناعي: تفاعل الإيثيلين مع حمض الأسيتيك لإنتاج أسيتات الإيثيل:



2. صناعة البوليمرات

تُستخدم الألكينات، مثل الإيثيلين والبروبيلين، كمونومرات أساسية في صناعة البوليمرات. يمكن أن تتفاعل مع الأحماض العضوية أو مشتقاتها لإدخال مجموعات وظيفية مفيدة.

3. إنتاج الكحولات والالدهيدات

عبر تفاعلات مثل الهيدرو فورميلة (Hydroformylation)، تُحوّل الألكينات إلى كحولات وألدهيدات تُستخدم في الصناعات الدوائية والزراعية.

4. تصنيع المركبات الدوائية

تُستخدم التفاعلات بين الألكينات والأحماض العضوية لإنتاج مركبات دوائية مثل الإسترات الميثيلية والإيثيلية للأحماض الدهنية.

5. تحضير المضافات الغذائية

تُستخدم الإسترات الناتجة من هذه التفاعلات كمضافات غذائية لتحسين النكهة والرائحة.

انواع المحفزات الداخلة في الية تفاعلات الالكينات والاحماض العضوية:

التحفيز الكيميائي

التحفيز الكيميائي يعتمد على استخدام مواد محفزة تُسرّع من معدل التفاعل دون أن تُستهلك فيه. في تفاعلات الألكينات، يُعد استخدام أحماض لويس (مثل $AlCl_3$) وأحماض السلفونيك شائعًا لتحسين انتقائية التفاعل وتقليل النواتج الجانبية (Zhang, Y., & Yu, L. 2018). تعمل هذه المحفزات على خفض طاقة التنشيط المطلوبة للتفاعل وتوفير بيئة ملائمة للتفاعل الكيميائي وتنقسم المحفزات الكيميائية إلى:

أ. المحفزات الحامضية

تعتبر المحفزات الحامضية من أكثر المحفزات شيوعًا في التفاعل بين الألكينات والأحماض العضوية. في هذا النوع من التحفيز، تعمل الأحماض مثل حمض الكبريتيك (H_2SO_4) أو حمض الهيدروكلوريك (HCl) على تفعيل الألكين عن طريق إضافة أيون هيدروجين إلى أحد ذرات الكربون في الرابطة المزدوجة. هذا يسمح بفتح الرابطة المزدوجة ومن ثم إضافة حمض الكربوكسيل إلى الألكين.

ب. المحفزات العضوية

يمكن أيضًا استخدام المحفزات العضوية مثل الأمينات أو المحفزات الحفزية التي تتفاعل مع الأحماض العضوية لتسريع التفاعل. هذه المحفزات تكون غالبًا أقل تفاعلًا من المحفزات الحامضية القوية، مما يؤدي إلى تفاعلات أكثر انتقائية وأقل احتمالًا للتفاعل مع مواد غير مرغوب فيها.

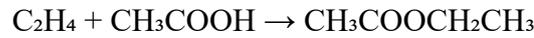
اللية التحفيز الكيميائي

تعمل المحفزات الكيميائية من خلال تثبيت الحالة الانتقالية للتفاعل، مما يقلل من الطاقة اللازمة لتكوين النواتج. على سبيل المثال، عند تفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية لإنتاج الإسترات، يمكن أن تُستخدم أحماض لويس مثل كلوريد الألومنيوم (AlCl₃) أو أحماض السلفونيك لتحفيز التفاعل.

مثال باستخدام حمض الخليك والإيثيلين تحت تأثير حمض السلفونيك كمحفز

آلية التفاعل

- يقوم المحفز مثل (H₂SO₄) بتفعيل حمض الخليك عن طريق تكوين أيون الكربونيوم.
- يتفاعل الألكين مع أيون الكربونيوم الناتج لتكوين المركب الوسيط.
- يتم إعادة ترتيب المركب الوسيط ليعطي الناتج النهائي.



التحفيز الحراري

التحفيز الحراري هو عملية كيميائية يتم فيها تسريع التفاعل الكيميائي من خلال زيادة درجة الحرارة. يعتمد هذا النوع من التحفيز على التأثيرات الحرارية التي تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات، مما يزيد من معدل التصادمات بين الجزيئات المتفاعلة. ونتيجة لذلك، تقل الطاقة المطلوبة للوصول إلى الحالة الانتقالية، مما يجعل التفاعل يتم بسرعة أكبر.

التحفيز الحراري يُعتبر أحد أقدم أنواع التحفيز الكيميائي وأكثرها استخدامًا في العديد من الصناعات الكيميائية، مثل البتروكيماويات، الكيمياء العضوية، وصناعة المواد، كما يُستخدم بشكل كبير في التفاعلات التي تتطلب طاقة تنشيط عالية.

الاساسيات العلمية للتحفيز الحراري

ستند التحفيز الحراري إلى مفهوم الطاقة التنشيطية. في التفاعلات الكيميائية، يجب أن تتغلب الجزيئات المتفاعلة على حاجز طاقة معين للوصول إلى الحالة الانتقالية ومن ثم تحويلها إلى نواتج. وبزيادة درجة الحرارة، تزداد الطاقة الحركية للجزيئات، وبالتالي يزيد عدد التصادمات الفعالة التي تتجاوز حاجز الطاقة التنشيطية، مما يسرع التفاعل (Aline Auroux. 2013).

تنص معادلة أرهنيوس (Arrhenius equation) على العلاقة بين معدل التفاعل ودرجة الحرارة:

$$k = A * e^{(-E_a/RT)}$$

حيث

- هو معدل التفاعل k.
- هو معامل تكرار الصدمات A.
- هو طاقة التنشيط E_a
- هو ثابت الغاز العام R.
- هي درجة الحرارة بالكلفن T,

من هذه المعادلة، نلاحظ أن زيادة درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة معدل التفاعل بشكل أسي، مما يعكس تأثير التحفيز الحراري على تسريع التفاعلات.

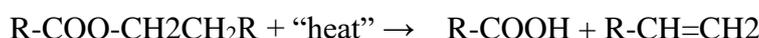
آلية التحفيز الحراري

تعتمد التفاعلات المحفزة حراريًا على زيادة درجة الحرارة لتنشيط الجزيئات دون الحاجة إلى محفزات. على الرغم من أن هذه الطريقة أبسط من الناحية العملية، إلا أنها تعاني من تكوين منتجات جانبية عديدة نتيجة لعدم التحكم الدقيق في آلية التفاعل. على سبيل المثال، تفاعل الإيثيلين مع حمض الخليك عند درجات حرارة مرتفعة قد يؤدي إلى تكوين أسيتات الإيثيل مع نواتج ثانوية مثل ثنائي أسيتات الإيثيل. (Aline Auroux 2013) ومن ذلك بعض الأمثلة:

تفاعل الكاين مع الحمض العضوي لتشكيل الاسترات

في هذه التفاعل، يتم تحفيز التفاعل بواسطة الحرارة لتشكيل استرات، مثل الأسترات الألكيلية للأحماض العضوية. يتم التفاعل بين الألكين والحمض العضوي بوجود حرارة (أو محفز حراري)

المعادلة:



حيث:

R-CH=CH هو الألكين

R-COOH هو الحمض العضوي

R-COO-CH₂CH₂R هو الاستر الناتج

تفاعل إضافة حمض الألكين



حيث:

R-CH(OH)-CH₂COOH هو الحمض الهيدروكسي

H-COOH هو الحمض العضوي

R-CH=CH هو الألكين

المقارنة بين التحفيز الحراري والتحفيز الكيميائي

يدخل التحفيز الحراري والتحفيز الكيميائي كعامل أساسي في تفاعلات الأحماض العضوية والألكينات ويؤثر نوع التحفيز المستخدم في التفاعل بشكل أساسي في آلية التفاعل وكمية وبقاء نواتج التفاعل وكفاءة التفاعل (Krishna N, Scott J miller, 2021).

وفيما يلي مقارنة مبنية على النظريات العلمية والتجارب التحليلية الدقيقة لتأثير نوع المحفز المستخدم على نواتج وكفاءة التفاعل:

1. طريقة والية التحفيز

- التحفيز الكيميائي: في التفاعل بين الالكينات والأحماض العضوية تحت التحفيز الكيميائي، يمكن أن تتشكل أيونات كربوكاتيونية أو مركبات تفاعلية أخرى نتيجة للتفاعل مع المحفز الكيميائي. هذه الآلية تؤدي إلى تكون منتجات جديدة من خلال تفاعل بين الكربوكاتيونات أو الأنيونات مع المركب العضوي.
- التحفيز الحراري: في التحفيز الحراري، لا يتدخل محفز كيميائي بشكل مباشر، بل يعتمد التفاعل على درجة الحرارة العالية لتوفير الطاقة اللازمة لتفكيك الروابط الكيميائية بين الالكين والحمض العضوي. الحرارة تؤدي إلى تحفيز التفاعلات بشكل أسرع، ولكن قد تكون المنتجات الناتجة أقل تحديداً مقارنةً بالتحفيز الكيميائي (Diego Matio, Jose Luis 2021).

2. المنتجات والتفاعل

- التحفيز الكيميائي: التفاعل بين الالكينات والأحماض العضوية تحت التحفيز الكيميائي غالباً ما يؤدي إلى تشكيل مركبات ذات درجة نقاء أعلى ومنتجات محددة. المحفزات الكيميائية تساعد في توجيه التفاعل نحو منتج معين، مما يؤدي إلى تحكم أكبر في بنية المنتج النهائي.
- التحفيز الحراري: في حالة التحفيز الحراري، قد تكون المنتجات أكثر تنوعاً بسبب التفاعلات المتعددة التي قد تحدث تحت تأثير الحرارة. في كثير من الأحيان، يمكن أن تؤدي درجات الحرارة العالية إلى تكوين عدة منتجات جانبية نتيجة لتفاعلات غير مرغوب فيها (S.M. Al. Salem 2017).

3. التحكم في التفاعل

- التحفيز الكيميائي: يمكن التحكم بشكل أكبر في التفاعل باستخدام المحفزات الكيميائية، حيث يمكن تعديل الظروف (مثل التركيز، درجة الحرارة، نوع المحفز) لتحقيق أفضل النتائج. يمكن أيضاً استخدام تقنيات مثل التنقية أو الفصل للحصول على المنتج النقي (Brown, T. et al. 2019).
- التحفيز الحراري: في التحفيز الحراري، يتم التحكم في التفاعل بشكل رئيسي عبر تنظيم درجة الحرارة. من الصعب في بعض الأحيان التحكم في النتائج بدقة عالية مقارنةً بالتحفيز الكيميائي، حيث أن درجات الحرارة العالية قد تؤدي إلى تفاعلات جانبية غير مرغوب فيها. (Diego Matio, Jose Luis 2021) ..

4. الكفاءة والسرعة

- التحفيز الكيميائي: عادةً ما تكون التفاعلات الكيميائية أسرع وأكثر كفاءة بفضل المحفزات التي تساهم في تسريع التفاعل. لكن هناك بعض القيود المتعلقة بتكلفة المحفزات وكميتها (Brown, T. et al. 2019).
- التحفيز الحراري: التفاعل الحراري يمكن أن يكون بطيئاً إذا لم تكن الحرارة عالية بما فيه الكفاية، وقد يتطلب طاقة أكبر لتحفيز التفاعل مقارنةً بالتحفيز الكيميائي. رغم ذلك، فإنه لا يتطلب وجود محفزات إضافية، مما يقلل من التكاليف (Diego Matio, Jose Luis 2021).

5. الآثار البيئية والاقتصادية

- التحفيز الكيميائي: التحفيز الكيميائي قد يتطلب استخدام مواد كيميائية مضافة قد تكون سامة أو تحتاج إلى معاملة خاصة بعد التفاعل، مما يزيد من التكاليف البيئية والاقتصادية.

- التحفيز الحراري: التحفيز الحراري يمكن أن يكون أكثر استدامة من الناحية البيئية، حيث أنه يعتمد على الحرارة فقط. ومع ذلك، قد تتطلب العمليات الحرارية استهلاكًا كبيرًا للطاقة، مما قد يكون له تأثير بيئي واقتصادي أكبر في بعض الحالات. (Brown, T. et al. 2019)

مما سبق يمكننا القول ان التحفيز الكيميائي يقدم تحكما اكبرا في نوعية النواتج وسرعة التفاعل لكنه قد يتطلب تكاليفا اقتصادية أعلى وانواع معينة من المحفزات الكيماوية. بينما التحفيز الحراري يعتبر اقل تكلفة من حيث المواد لكن يفتر الى الدقة في الية التحكم في التفاعل وقد يؤدي الى نواتج غير مستهدفة وغير محددة كما هو موضح في الجدول (1).

جدول (1) مقارنة بين التحفيز الكيميائي والحراري:

العامل	التحفيز الكيميائي	التحفيز الحراري
درجة الحرارة	منخفضة (25 الى 50) درجة مئوية	مرتفعة (150 الى 200) درجة مئوية
الانتقائية	عالية	منخفضة
النواتج الجانبية	قليلة	كثيرة
الكفاءة	مرتفعة	متوسطة

التطبيقات العملية للتحفيز الكيميائي والحراري

يستخدم التحفيز الكيميائي في العديد من التطبيقات الصناعية مثل التفاعل بين الألكينات والأحماض العضوية لإنتاج الإستر (مثل استرة الأحماض العضوية)، بالإضافة إلى تكوين مركبات كيميائية دقيقة في الصناعات الدوائية كما تستخدم المحفزات المعدنية مثل النيكل أو البلاتين أو البلاديوم لتحويل الألكينات إلى ألكانات عن طريق إضافة الهيدروجين، Diego Matio, (Jose Luis. 2021). ومثال ذلك في المجالات الصناعية:

- إنتاج الزيوت المهدرجة، حيث تُستخدم هذه العملية لتحويل الزيوت النباتية السائلة إلى مواد شبه صلبة مثل المارجرين.
- إنتاج المواد الخام البلاستيكية، حيث يتم التحكم في هدرجة الألكينات للحصول على مركبات محددة.

من ناحية اخرى يستخدم التحفيز الحراري في عديد من التطبيقات العلمية والصناعية:

1. إنتاج البوليمرات من الألكينات

- تُعتبر الألكينات مثل الإيثيلين والبروبيلين مواد خام أساسية في صناعة البوليمرات.
- باستخدام التحفيز الحراري، يتم تعزيز تفاعلات البلمرة لإنتاج البلاستيك مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين .
- تُستخدم هذه البوليمرات في تصنيع المنتجات اليومية مثل الأكياس البلاستيكية، عبوات التغليف، وأجزاء السيارات . (S.M. Al. Salem 2017)

2. إنتاج الوقود الهيدروكربوني

- يتم استخدام التحفيز الحراري في تفاعلات الألكينات لتحويلها إلى هيدروكربونات أكثر استقراراً، مثل الألكانات، في عمليات التكسير الحراري (Krishna N, Scott J miller 2021).
- هذه العمليات أساسية في مصافي النفط لتحويل الزيوت الثقيلة إلى وقود خفيف مثل البنزين والديزل.

3. إنتاج الكحولات والمركبات الصناعية

- تُستخدم الألكينات مع الأحماض العضوية تحت تأثير الحرارة لإنتاج الكحولات والمركبات المشتقة الأخرى مثل الإيثرات. (Krishna N, Scott J miller 2021).
- على سبيل المثال، يمكن إنتاج الإيثانول أو الإيثيل إيثير، اللذين يُستخدمان في الصناعات الدوائية والكيميائية.

4. تفاعلات الإستر بين الألكينات والأحماض العضوية

- يتم استخدام التحفيز الحراري لإنتاج الإسترات عبر تفاعل الألكينات مع الأحماض العضوية.
- تُعتبر الإسترات مركبات هامة في تصنيع العطور والمذيبات الصناعية. (Krishna N, Scott J miller 2021).

5. تصنيع المركبات العطرية ومركبات الألكينات

- تحت ظروف حرارية محددة، يمكن استخدام الألكينات في تفاعلات متقدمة مثل تفاعلات إعادة الترتيب لتحويلها إلى مركبات عطرية أو ألكينات. (Brown, T. et al. 2019).
- هذه المركبات تدخل في صناعة الأدوية، المواد الحافظة، والمبيدات.

6. إنتاج الأحماض الكربوكسيلية

- يُستخدم التحفيز الحراري لتحويل الألكينات إلى أحماض كربوكسيلية عن طريق عمليات الأكسدة الحرارية. (Brown, T. et al. 2019)
- هذه الأحماض ضرورية في تصنيع المواد الحافظة الغذائية والمركبات الصيدلانية.

3. الدراسات السابقة

تعكس هذه الدراسات التطورات المتسارعة في استخدام المحفزات الحرارية والعضوية لتفاعلات الألكينات الغنية بالإلكترونات مع الأحماض الكربوكسيلية. هذه الأبحاث توفر قاعدة علمية قوية لتطوير محفزات جديدة وطرق مبتكرة تعزز كفاءة التفاعلات وتدعم الاستدامة في التخليق العضوي

1-دراسة (Zeng & Cui, 2020)

عنوان الدراسة: التقدم في التفاعلات بين الألكينات الغنية بالإلكترونات والأحماض الكربوكسيلية

اتعرضت الدراسة للتقدم الذي أحرز في مجال تفاعلات الإضافة بين الألكينات الغنية بالإلكترونات والأحماض الكربوكسيلية. أوضحت الدراسة أن الألكينات الغنية بالإلكترونات، التي ترتبط فيها ذرة أو مجموعة مانحة للإلكترونات بالرابطة الثلاثية، تُستخدم بشكل واسع في التخليق العضوي نظراً لتفاعلها الكيميائي الفريد. كما سلطت الضوء على التقدم الكبير الذي تحقق مؤخراً في هذه التفاعلات، مشيرةً إلى الدراسات المختلفة التي تناولت آليات التفاعل، وتطوير المحفزات، وآفاق البحث المستقبلية في هذا المجال. كما اوصت الدراسة بتكثيف جهود البحث في مجال المحفزات الحمضية لما لها من فعالية عالية عند معدلات الإنتاج الكبيرة وتكلفة اقتصادية قليلة نسبياً مقارنةً بالتحفيز الكيميائي كمثال.

2-دراسة (Smith Wang, 2017)

عنوان الدراسة: المحفزات العضوية كبديل للمحفزات المعدنية

أوضحت هذه الدراسة ان المحفزات العضوية مثل ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) أو ثلاثي فلوريد البورون تلعب دوراً فعالاً في تحفيز الإضافة بين الأحماض الكربوكسيلية والألكينات الغنية بالإلكترونات. أظهرت الدراسة أن هذه المحفزات تقدم حلاً صديقة للبيئة بالمقارنة مع المحفزات المعدنية الثقيلة. كما بينت الدراسة أنه يمكن استخدام المحفزات العضوية على مجال واسع من التفاعلات بين الأحماض العضوية والألكينات نظراً للنتائج عالية النقاء في التفاعلات.

3-دراسة (2021, Mateo)

عنوان الدراسة: التحفيز الضوئي الحراري كتقنية واعدة في تحسين التفاعلات الكيميائية

تناولت الدراسة الأساسيات والتطبيقات العملية للتحفيز الضوئي الحراري، والذي ظهر كمسار بديل لتحفيز التفاعلات الكيميائية باستخدام الضوء كمصدر للطاقة. أوضحت الدراسة أن هذا النوع من التحفيز يعتمد على الجمع التآزري بين التأثيرات الضوئية والحرارية، مما يعزز من معدلات التفاعل ويغير من أنماط الانتقائية. كما تناولت الدراسة التأثير الأساسي لرنين البلازمون السطحي الموضعي (LSPR) في الهياكل البلازمونية، واستعرضت المسارات الآلية المختلفة للتحفيز الضوئي الحراري، مع تقديم استراتيجيات تصميم المواد لتحسين الأداء. أوصت الدراسة باستخدام التحفيز الحراري الضوئي لما له من كفاءة أعلى في انتقاء النواتج ونقاءها مقارنة بالتحفيز الحراري.

4-دراسة (2012, Kore)

عنوان الدراسة: تطبيق السوائل الأيونية الحمضية من نوع برونستد في ترطيب الألكينات

أوضحت الدراسة أن السوائل الأيونية الحمضية من نوع برونستد (BAILS) تمثل حلاً فعالاً لترطيب الألكينات في ظروف معتدلة دون الحاجة إلى استخدام محفزات معدنية ثقيلة أو أحماض قوية مثل H_2SO_4 . تم تصنيع عدة أنواع من السوائل الأيونية الوظيفية المشتقة من الإيميدازول، وأظهرت التجارب أن هذه السوائل تتمتع بنشاط عالي وانتقائية كبيرة لإنتاج الكيوتونات. كما بينت الدراسات النظرية أن الروابط الهيدروجينية تلعب دوراً أساسياً في ضبط حموضة BAILS، مما يفسر الفروق في النشاط التفاعلي بين السوائل الأيونية المختلفة. أوصت الدراسة باستخدام الأيونات الحمضية عوضاً عن المحفزات الثقيلة والأحماض القوية حيث تتميز الأيونات الحمضية بالانتقائية العالية.

5-دراسة (2024, Jin)

عنوان الدراسة: تحويلات المواد العضوية باستخدام التحفيز الضوئي والحراري عبر الهياكل الفلزية العضوية

استعرضت الدراسة الدور الهام للهياكل الفلزية العضوية (MOFs) في تحفيز التفاعلات العضوية باستخدام التحفيز الضوئي الحراري. أشارت الدراسة إلى أن التحفيز الضوئي الحراري عبر MOFs يوفر مساراً أخضر وفعالاً لتحويل المواد العضوية إلى مركبات ذات قيمة مضافة. تم التركيز على آليات التحفيز، وتحليل الخصائص البنوية للهياكل الفلزية العضوية، وتطوير استراتيجيات لتحسين الأداء في التفاعلات العضوية. بالإضافة إلى ذلك، تناولت الدراسة التحديات المستقبلية وسبل تصميم مواد جديدة لتحسين الكفاءة والانتقائية في هذا النوع من التفاعلات.

5. المنهجية والمواد المستخدمة

تستخدم الدراسة المنهج التجريبي للمقارنة بين المحفزات الكيميائية والحرارية في تفاعلات الألكينات والأحماض العضوية من خلال تحليل نظري شامل. حيث هدفت هذه الدراسة إلى فهم تأثير المحفزات المختلفة على سرعة التفاعل، الانتقائية، وطبيعة المنتجات النهائية، دون الدخول في تفاصيل التجارب المعملية.

تم دراسة التأثيرات الحرارية على تفاعلات الألكينات والأحماض العضوية. تم التركيز على فهم كيفية تأثير درجات الحرارة المرتفعة على سرعة التفاعل وعلى نوعية المنتجات الناتجة، مع الأخذ في الاعتبار الآلية التي يحدث بها تحفيز التفاعل تحت تأثير الحرارة.

تم مناقشة أنواع المحفزات الكيميائية المختلفة المستخدمة في تفاعلات الألكينات والأحماض العضوية والمحفزات الحامضية (مثل حمض الكبريتيك). تم التركيز على دراسة آلية عمل هذه المحفزات على المستوى الجزيئي، وكيف تؤثر على خطوات التفاعل ونواتج التفاعل من حيث الكمية والنقاء.

تم استخلاص استنتاجات مبنية على التحليل النظري للمحفزات الكيميائية والحرارية، مع مقارنة التأثيرات المختلفة لكل منهما على تفاعلات الألكينات والأحماض العضوية. شمل ذلك استنتاجات حول الأنسب من المحفزات لكل نوع من التفاعلات استنادًا إلى الأدلة النظرية التي تم استعراضها.

تم اخذ تفاعل حمض الخليك مع الكحول الإيثيلي لإنتاج الإستر كمثل تجريبي في هذه الدراسة وعمل تحليل شامل لنواتج التفاعل في حالة التحفيز الكيميائي وحالة التحفيز الحراري. حيث تمت عملية التفاعل العام في الخطوات التالية

1. تحضير التفاعل:

1. في دورق زجاجي، تم وضع 10 مل من حمض الخليك و 10 مل من الكحول الإيثيلي.
2. تم اضافة بضع قطرات من حمض الكبريتيك المركز بعناية كمحفز للتفاعل.
2. تسخين المزيج:
 1. تم وضع الدورق في حمام مائي ساخن عند درجة حرارة تتراوح بين 60-70 درجة مئوية.
 2. ترك المزيج للتفاعل لمدة 20-30 دقيقة مع التحريك بين الحين والآخر.
3. استخلاص الإستر:
 1. بعد انتهاء التفاعل، نقل المزيج إلى جهاز تقطير لفصل الإستر.
 2. جمع الناتج الذي يتبخر عند درجة غليان الإستر (خلات الإيثيل: حوالي 77 درجة مئوية).
4. تنقية الإستر:
 1. تم غسل الإستر الناتج بمحلول كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) للتخلص من بقايا الحمض.
 2. تم غسل الإستر بالماء المقطر لتنقيته بشكل كامل.
5. تأكيد الإنتاج:
 1. الإستر الناتج له رائحة عطرية مميزة مثل رائحة الفواكه.



حيث:

- حمض الخليك (CH_3COOH)
- الكحول الإيثيلي ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- خلات الإيثيل ($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$)

المواد المستخدمة

فيما يلي تفصيل للمواد الرئيسية التي تم التركيز عليها لتنفيذ هذه الدراسة:

1. الألكينات

- **الإيثيلين (C_2H_4):** يُعتبر الإيثيلين أحد الألكينات الأكثر استخدامًا في التفاعلات الكيميائية، وله أهمية خاصة في الصناعات البتروكيماوية. يتم دراسة تأثير المحفزات الكيميائية والحرارية على تفاعلات الإضافة والهدرجة التي يخضع لها الإيثيلين.
- **البروبين (C_3H_6):** البروبين هو ألكين يحتوي على ثلاث ذرات كربون وله العديد من التطبيقات الصناعية. يتم دراسته من خلال تأثير المحفزات المختلفة على التفاعلات مثل الإضافة، والتحويل إلى مركبات أخرى.
- **البيوتين (C_4H_8):** يُستخدم البيوتين في التفاعلات الكيميائية التي تشمل الإضافة والتحلل الحراري. يتم دراسة تأثير المحفزات الحرارية والكيميائية على تفاعلات البيوتين.

2. الأحماض العضوية

- **حمض الخليك (CH_3COOH):** حمض الخليك هو حمض عضوي بسيط ومشهور يُستخدم في تكوين الإسترات وفي تفاعلات التحلل الحراري. سيتم دراسة تأثير المحفزات الكيميائية والحرارية على تفاعل حمض الخليك مع الألكينات.
- **حمض الستريك ($C_6H_8O_7$):** يستخدم حمض الستريك في العديد من التفاعلات العضوية مثل تكوين الإسترات. سيتم دراسة تفاعلاته تحت تأثير المحفزات الكيميائية مثل الأحماض المعدنية.
- **حمض اللبنيك ($C_3H_6O_3$):** حمض اللبنيك هو حمض عضوي آخر يستخدم في تفاعلات الأستر والتحلل الحراري. يدرس تأثير المحفزات على هذه التفاعلات في الدراسة.

الادوات الداعمة والوقائية

1. الأدوات الداعمة:

- **أجهزة القياس والتحكم في الحرارة:**
 - ❖ **أفران أو حمام زيت ($Oil Bath$):** يستخدم للتحكم في درجات الحرارة المرتفعة المطلوبة في التفاعلات التي يتم تحفيزها حراريًا. توفر هذه الأجهزة درجة حرارة ثابتة، مما يساعد في تحفيز التفاعلات الكيميائية دون التأثير على المحفزات أو المواد المتفاعلة.
 - ❖ **الثرموتر الرقمي:** يستخدم لقياس درجة حرارة التفاعل بدقة لضمان أن التفاعلات تتم تحت الظروف المناسبة.

2. أدوات النظافة والوقائية

- **محاليل المنظفة الكيميائية:** لضمان تنظيف الأدوات بعد استخدامها، مثل القوارير والأباريق، وذلك لتجنب أي تلوث قد يؤثر على نتائج التجربة.
- **الماء المقطر:** يستخدم في تنظيف الأدوات وتجهيز المحاليل الكيميائية، حيث أنه خالٍ من الشوائب التي قد تؤثر على النتائج.
- **معطف المختبر:** لحماية الباحث من أي تفاعلات كيميائية قد تحدث خلال التجربة، كما يوفر حماية من المواد الكيميائية التي قد تتناثر.
- **قفازات مختبرية:** تستخدم للوقاية من التلامس المباشر مع المواد الكيميائية السامة أو المهيجة، مثل الأحماض والمذيبات العضوية.
- **نظارات واقية:** لحماية العينين من المواد الكيميائية التي قد تتناثر أثناء التفاعلات أو من الأبخرة السامة.

الأجهزة المستخدمة

- جهاز كروماتوغرافيا الغاز.
- مفاعل عالي الضغط للتحفيز الحراري.
- مطياف الكتلة لتحليل المنتجات.

النتائج

تم اجراء التجارب على حمض الخليك العضوي وتفاعله مع الالكين لانتاج المنتج النهائي "الإستر" مرة تحت تأثير التحفيز الكيميائي ومرة تحت تأثير التحفيز الحراري. حيث تم اختيار المركب العضوي "خلات الايثيل C_2H_5OH " للتفاعل مع حمض الخليك في وجود حمض الكبريتيك كعامل كيميائي محفز للتفاعل. تم خلط المركبين مع بعض في دورق زجاجي حجمه 10 ملليمتر مكعبا وتمت اضافة قطرات من حامض الكبريتيك كعامل محفز للتفاعل.

في التجربة الثانية تم عمل نفس التفاعل ولكن هذه المرة باستخدام التسخين كعامل محفز للتفاعل حيث وصلت درجة حرارة التفاعل الى 150 درجة مئوية وتم حساب كتل النواتج وملاحظة النواتج الجانبية وحسابها كقيمة كمية في النواتج.

نتائج التحفيز الكيميائي:

عند اجراء التفاعل بين حمض الخليك والالكين لانتاج الاستر واستخدام محفز كيميائي مثل حمض الكبريتيك أظهرت التجارب بعد تتبع نواتج التفاعل وحساب الكتل المتفاعلة والنتيجة اظهرت ان التحفيز الكيميائي ادى الى نسب تحويل تصل الى 95% تحت ظروف خاضعة للسيطرة. حيث كانت المنتجات النهائية تحتوي على كمية كبيرة من المنتج المستهدف من التجربة "الإستر" مع تقليل كبير في المنتجات الجانبية.

نتائج التحفيز الحراري:

في المقابل عند استخدام التحفيز الحراري تناسبت نسب التحويل بين (80 الى 75) % حيث اثرت درجة الحرارة بشكل كبير على الانتقائية اذ ان رفع درجة الحرارة الى أكثر من 200 درجة مئوية ادى الى تحلل بعض المركبات وتكوين منتجات جانبية. على الرغم من ذلك اثبتت هذه الطريقة فعاليتها في العمليات الصناعية ذات الكميات الكبيرة بفضل تكلفتها المنخفضة ومرونتها. كانت المنتجات الجانبية تمثل (15 الى 20) % من النواتج مما يجعلها اقل جاذبية من ناحية نقاء النواتج مقارنة بالتحفيز الكيميائي كما هو موضح في الجدول (2).

جدول (2) يوضح نتائج استخدام التحفيز الحراري والكيميائي في التجربة

نوع التحفيز	الانتقائية (%)	درجة النقاء	معدل التفاعل (مول/لتر.ساعة)	تركيز المحفز (مول/لتر)	درجة الحرارة ©
كيميائي(حمض الكبريتيك)	90	95	1.2	0.5	60
حراري	60	60	1.5	-	120

اظهرت التجارب نتائج مميزة عند مقارنة التحفيز الحراري والكيميائي في تفاعل الايثيلين من حمض الخليك، عند استخدام حمض الكبريتيك كمحفز كيميائي، لوحظت زيادة كبيرة في معدل التفاعل وانتقائية عالية نحو تكوين المنتج المطلوب (أسيتات

الإيثيل). أظهرت التجارب أن تركيز المحفز يلعب دورًا حاسمًا؛ حيث أن زيادة تركيز حمض الكبريتيك من 0.1 مولار إلى 0.5 مولار أدت إلى زيادة الناتج بنسبة 40% تقريبًا.

بالمقابل، أظهرت التفاعلات التي تمت باستخدام التحفيز الحراري فقط (عند درجات حرارة تتراوح بين 100 و150 درجة مئوية) معدلات تفاعل عالية، ولكن بنسبة نقاء أقل. لوحظ تكوين منتجات جانبية مثل الأسيتال والديولات نتيجة لتفاعلات جانبية غير مرغوبة. بلغت الانتقائية نحو أسيتات الإيثيل 60% في التحفيز الحراري مقارنة بـ 90% عند استخدام التحفيز الكيميائي.

مناقشة النتائج

تحليل النتائج يشير إلى أن التحفيز الكيميائي يوفر سيطرة أكبر على الآلية التفاعلية، مما يقلل من التفاعلات الجانبية. على المستوى الصناعي، يُعتبر التحفيز الكيميائي باستخدام حمض الكبريتيك الخيار الأمثل لتصنيع أسيتات الإيثيل بجودة عالية، بينما يمكن استخدام التحفيز الحراري في التطبيقات التي تتطلب إنتاجية أكبر ولكن بجودة أقل.

حيث وجد عند استخدام التحفيز الكيميائي بواسطة حمض الكبريتيك، كانت النواتج أكثر نقاءً وانتقائية بنسبة 90% نحو أسيتات الإيثيل، وهي ميزة حاسمة للتطبيقات الصناعية التي تتطلب جودة عالية. يرجع ذلك إلى قدرة حمض الكبريتيك على تعزيز تكوين الأيونات الموجبة، مما يقلل من احتمالية حدوث التفاعلات الجانبية.

يظهر الجدول (3) أن التحفيز الكيميائي يعمل بكفاءة عند درجات حرارة منخفضة نسبيًا 60°C، مما يقلل من استهلاك الطاقة ويقلل من تكاليف التشغيل. في حين أن التحفيز الحراري قد يكون مناسبًا في الحالات التي تتطلب معدلات إنتاجية عالية:

جدول (3) اداء التحفيز الحراري والكيميائي عند درجات الحرارة المختلفة

درجة الحرارة C	معدل التفاعل الكيميائي (مول/لتر. ساعة)	معدل التفاعل الحراري (مول/لتر. ساعة)
60	1.2	0.8
80	1.4	1.2
120	1.6	1.5

الجدول (4) الانتقائية والنقاء في الحالتين الحراري والكيميائي

نوع التحفيز	الانتقائية %	النقاء %
كيميائي	90	95
حراري	60	70

النتائج التي تم استخلاصها من التجارب وتوضيحها في الجداول أعلاه تبين بوضوح ان التحفيز الكيميائي يعمل بكفاءة عالية عند درجات الحرارة المنخفضة مما يقلل من استهلاك الطاقة والتكلفة الاقتصادية للتفاعل.

على النقيض التحفيز الحراري يؤدي الى ارتفاع درجات حرارة التفاعل وينتج عنه نواتج جانبية بصورة أكبر مما يجعل الاستر المستهدف في ناتج التفاعل به كثير من الشوائب مما يضع قيودا على التحفيز الحراري عند الحوجه الماسة لإنتاج

منتجات ذات درجة نقاء عالية. ولكن التحفيز الحراري قليل التكلفة اقتصاديا مما يجعله مناسباً عند الحاجة لإنتاج كميات كبيرة من الاستر دون التركيز على درجة النقاء العالية للمنتج.

التوصيات

1. **تفضيل التحفيز الكيميائي في التطبيقات ذات الجودة العالية:** نظراً لأن التحفيز الكيميائي ينتج نواتج عالية الانتقائية والنقاء، يُفضل استخدامه في الصناعات الدوائية والغذائية التي تتطلب مواد نقية وآمنة.
2. **استخدام التحفيز الحراري في العمليات الإنتاجية ذات المخرجات الكبيرة:** يمكن الاعتماد على التحفيز الحراري في التطبيقات التي يكون فيها معدل الإنتاجية أكثر أهمية من الانتقائية، مثل إنتاج البوليمرات.
3. **تحسين ظروف التفاعل:**
 - تقليل درجة الحرارة المستخدمة في التحفيز الحراري لتقليل النواتج الجانبية.
 - تحسين تركيز المحفز في التحفيز الكيميائي لزيادة معدل التفاعل مع الحفاظ على النقاء.
4. **البحث عن محفزات جديدة:** استكشاف محفزات أكثر كفاءة يمكنها تحقيق معدلات تفاعل عالية وانتقائية مشابهة أو أفضل من حمض السلفونيك.
5. **تطوير تقنيات مزجية:** الجمع بين التحفيز الكيميائي والحراري لدمج ميزات كل منهما، مما قد يؤدي إلى تحسين كفاءة التفاعل مع تقليل النواتج الجانبية.
6. **إجراء دراسات إضافية:** دراسة تأثير عوامل أخرى مثل نوع الألكينات وتركيز الأحماض العضوية لتحسين النواتج في تطبيقات مختلفة.

الخلاصة

قدمت الدراسة مناقشة شاملة للتحفيز الحراري والكيميائي في تفاعلات الأحماض العضوية مع الألكينات حيث أظهرت النتائج أن التحفيز الكيميائي يمتلك ميزات ملحوظة من حيث الانتقائية والنقاء مما يجعله خياراً مفضلاً للتطبيقات التي تتطلب منتجات عالية الجودة. من جهة أخرى يوفر التحفيز الحراري ميزة اقتصادية عند معدلات الإنتاج الكبيرة لكنه يعاني من تكون نواتج جانبية وشوائب بصورة أعلى من التحفيز الكيميائي الذي تكاد تنعدم فيه الشوائب.

تشير النتائج إلى إمكانية تحسين عمليات الإنتاج الصناعي من خلال اختيار الطريقة المناسبة للتحفيز بناءً على متطلبات التطبيق. كما تسلط الضوء على أهمية تحسين ظروف التفاعل واستكشاف محفزات جديدة لتحقيق توازن مثالي بين الكفاءة والجودة.

علاوة على ذلك، فإن الدراسة تُبرز أهمية الاستدامة في العمليات الكيميائية، حيث يُمكن استخدام التحفيز الكيميائي لتقليل الأثر البيئي المرتبط بالنواتج الجانبية. يُعد البحث المستقبلي في هذا المجال ضرورياً لتطوير حلول أكثر تطوراً وكفاءة تُساهم في تعزيز التكنولوجيا الصناعية وتلبية احتياجات السوق المتزايدة. هذا يفتح الباب أمام تطبيقات جديدة لتحسين العمليات الإنتاجية، مع تقليل التكاليف البيئية والاقتصادية.

المراجع:

1. Wilczek, L. A. (2022). Catalysing the development of self-efficacy and science identity: A green organic chemistry cure.
2. Reshef, N. M., & Dovra, R. (1996). The reactions of alkynes and formic acids. ACS Publications.
3. Patel, R., & Kim, S. (2020). Comparative studies of acid catalysis in esterification reactions. *Catalysis Today*, 367, 98-108.

4. Zhang, Y., & Yu, L. (2018). Optimization of catalytic processes for alkene reactions. *Journal of Industrial Chemistry*, 67, 203-211.
5. Tanwei, J. C., & Li, T. (2023). Chemical reactions and catalysis for a sustainable future (Vol. 11). *Frontiers in Chemistry*.
6. Kumar, N., & Singh, V. (2023). Innovations in acid-based catalysis for organic synthesis. *Current Organic Chemistry*, 25(2), 334-342.
7. Al Salem, S. M. (2017). A review on thermal catalytic pyrolysis of plastic solid waste (Vol. 197). *Journal of Environmental Management*.
8. Antoine Lavoisier, *Elementary Treatise on Chemistry*, Paris, 1789, First Edition, p. 50.
9. Matio, D., & Luis, J. (2021). Fundamentals and applications of thermal catalysis. Royal Society of Chemistry.
10. Choi, H., & Park, M. (2021). Selective transformations of alkenes under catalytic conditions. *Molecular Catalysis*, 515, 111929.
11. Auroux, A. (2013). Calorimetry and thermal methods in catalysis. Springer.
12. Jonson, A. W. (1999). Invitation to Organic Chemistry. *Google Books*.
13. Brown, T., et al. (2019). Thermal vs chemical catalysis: A comparative study. *Chemical Reviews*, 110(7), 4520-4535.
14. Krishna, N., & Miller, S. J. (2021). Green chemistry for a sustainable future. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*.
15. Zeng, L., & Cui, S. (2020). Recent progress in the addition reaction of electron-rich alkynes and carboxylic acids. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 40, 2353.
16. Mateo, D., Cerrillo, J. L., Durini, S., & Gascon, J. (2021). Fundamentals and applications of photo-thermal catalysis. *Chemical Society Reviews*, 50(3), 2173-2210.
17. Kore, R., Kumar, T. D., & Srivastava, R. (2012). Hydration of alkynes using Brønsted acidic ionic liquids in the absence of noble metal catalyst/H₂SO₄. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*.
18. Alonso, D. A., Nájera, C., & Pacheco, M. C. (2004). Synthesis of ynones by palladium-catalyzed acylation of terminal alkynes with acid chlorides. *The Journal of Organic Chemistry*, 69(5), 1615-1619.
19. Francos, J., & Cadierno, V. (2017). Metal-catalyzed intra- and intermolecular addition of carboxylic acids to alkynes in aqueous media: A review. *Catalysts*.
20. Kore, R., Kumar, T. D., & Srivastava, R. (2012). Hydration of alkynes using Brønsted acidic ionic liquids in the absence of Nobel metal catalyst.
21. Chao, Zi-Sheng & Jiang, Hai-Long. (2024). *Metal-organic frameworks for organic transformations by photocatalysis and photothermal catalysis*.
22. Praveen & Siddiqui, Shavej. (2024). *Exploring Nanomaterials for Enhanced Catalysis in Chemical Reactions*.