جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي
جامعة ميسان - كلية العلوم
قسم الكيمياء

عنوان البحث : الكيمياء الخضراء

بحث مقدم لنيل درجة البكالوريوس

علوم في الكيمياء من قبل الطالبتين

خولة سعد عبد الرحيم زينب حسين محيسن

بإشراف : د.م. أسماء بدر سبتي

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا ﴾

(سورة طه : 114)

الإهداء

إلى النور الذي لا يُطفأ، والرحمة التي عمّت العالمين،

إلى سيدنا محمد، صلوات ربي وسلامه عليه،

وإلى آله الأطهار، من أحيوا القلوب بعد موات،

وكانوا للحق حُجّةً، وللصبر عنوانًا.

إلى الشهداء الذين لم يكتفوا بالكلمات،

فقدّموا أرواحهم قرابين عزّة،

وتركوا لنا المجد يُروى بدمائهم،

سلامٌ على أرواحهم الطاهرة، وسلامٌ على كل أمٍّ أنجبت بطلاً.

إلى من علّماني أول الحروف،

ورافقاني بالدعاء والخوف والمحبة،

إلى والديّ، ركني الثابت في الحياة.

وإلى عائلتي الحبيبة،

أنتم الدفء حين يبرد القلب، والسند حين يثقل الطريق،

أهدي هذا البحث المتواضع،

محفوفًا بالشكر، مكلّلاً بالامتنان،

ومُثقلاً بدعائي أن أكون عند حسن ظنّ من أحبّوني،

وأن يجعل الله هذا الجهد في ميزان حسناتهم قبلي

شكر وتقدير

الحمد لله الذي أتمّ علينا نعمته، ووفقنا لإتمام هذا البحث.

أودّ أن أتقدّم بأسمى آيات الشكر والامتنان إلى مشرفتي الكريمة، الدكتورة أسماء، على توجيهها السديد، ودعمها المتواصل الذي كان له الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل العلمي.

كما أخص بالشكر والديَّ العزيزين، اللذين كانا لي سندًا وملاذًا طوال مسيرتي التعليمية، ولعائلتي الغالية التي كانت دائمًا مصدر الدعم والحب في كل لحظة.

وأخيرًا، أتوجه بالشكر لكل من قدم لي العون والمساعدة، سائلًا الله أن يجزيهم عني خير الجزاء

الـخــلاصــة :

- **يتناول هذا البحث موضوع الكيمياء الخضراء كأتجاه علمي حديث يهدف إلى جعل العمليات الكيميائية أكثر أماناً للإنسان والبيئة. ظهرت هذه الفكرة استجابةً لتزايد مشكلات التلوث الصناعي و الانبعاثات السامة، وتطورت لتصبح مجالاً قائماً بذاته يُعرف أيضًا باسم "الكيمياء المستدامة".**

- **يركز البحث على توضيح كيف يمكن تصميم المواد والتفاعلات بحيث تقلل من استخدام المواد الخطرة، وتنتج نفايات أقل، وتستهلك طاقة أقل. كما يوضح العلاقة بين الكيمياء الخضراء والتنمية المستدامة، حيث تسهم بشكل مباشر في حماية الموارد وتحسين جودة الحياة.**

- **استعرضنا في هذا البحث التقنيات المستخدمة في الكيمياء الخضراء مثل الطاقة المتجددة (الشمسية، الحيوية، المائية...)، والتقنيات الحاسوبية لتصميم التفاعلات. كما تم التطرق إلى تطبيقات عملية مثل تصنيع شرائح الحاسوب بطرق نظيفة، وإنتاج بلاستيك قابل للتحلل، وتطوير دهانات غير ضارة.**

- **ويختتم البحث بالإشارة إلى التحديات التي تواجه انتشار الكيمياء الخضراء، مثل التكلفة العالية والقيود التكنولوجية، مؤكدًا في الوقت نفسه على أهمية هذا المجال كوسيلة علمية متطورة لتحقيق بيئة أكثر أماناً واستدامة.**

قائمة المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
الآية القرآنية	
الاهداء	
الشكر والتقدير	
الخُلاصة	I
قائمة المحتويات	II
الفصل الاول	
المقدمة	1
تعرف الكيمياء الخضراء	2
مفهوم الكيمياء الخضراء	2
الكيمياء الخضراء والتنمية المستدامة	3
اهمية الكيمياء الخضراء في التنمية المستدامة	3
لماذا يتعاظم الاهتمام بالكيمياء الخضراء	4
آليات الكيمياء الخضراء	7
الفصل الثاني	
تقنيات الكيمياء الخضراء	10
طرائق استخدام التقنيات الخضراء	12
فوائد استخدام الكيمياء الخضراء	12
تطبيقات الكيمياء الخضراء	13
التحديات التي يمكن مواجهتها في تطبيق الكيمياء الخضراء	15
فوائد تطبيقات الكيمياء الخضراء	15
مبادئ الكيمياء الخضراء	16
امثلة من الكيمياء الخضراء	17
دور الثورة التكنولوجية	19
قائمة المصادر	25

الفصل الأول

الكيمياء الخضراء

وأهميتها في التنمية المستدامة

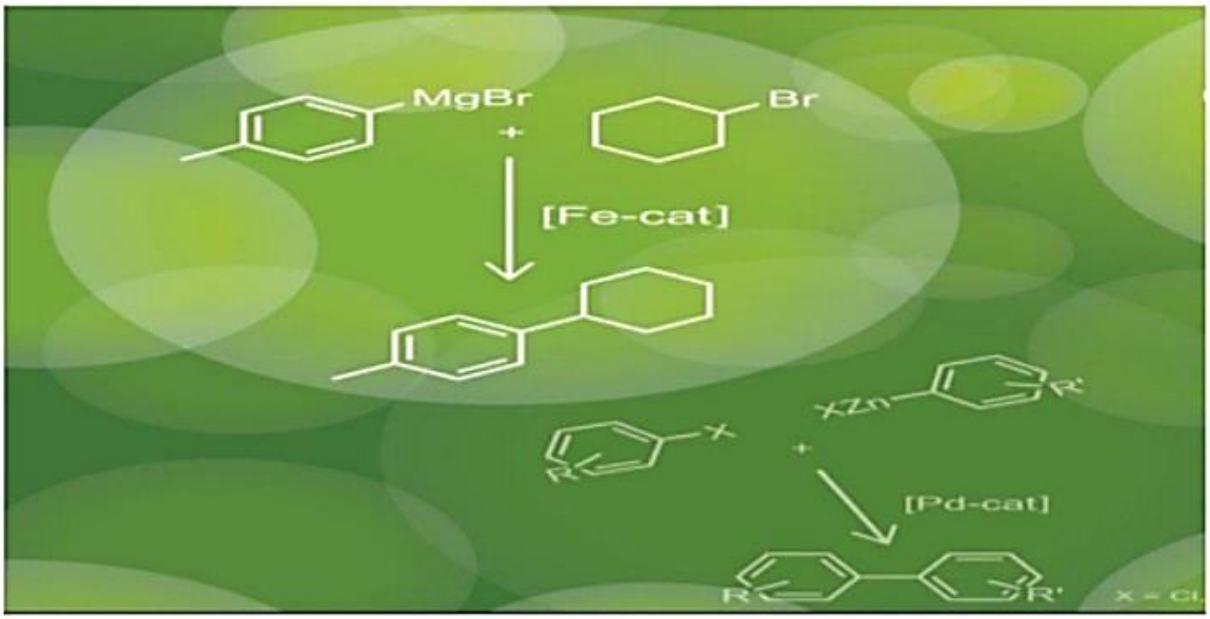
1-1 المقدمة

بدأ استخدام الكيمياء الخضراء في الولايات المتحدة عام 1990 بعد توقيع قانون منع التلوث والذي يهدف إلى حماية البيئة عن طريق تخفيض الانبعاثات الضارة من التفاعلات الكيميائية. وبموجب القانون قامت حكومة الولايات المتحدة بتقديم منح لتطوير المنتجات الكيميائية من خلال المعاهد والجامعات المختلفة لتقليل مخاطر تلك المواد. وتطورت أهداف المنح المقدمة لإنتاج مواد كيميائية تعمل على تقليل التلوث ووضع بدائل للمواد الكيميائية التي تؤدي عمليات استخلاصها لتلوث البيئة. فالكيمياء الخضراء تسعى لجعل علم الكيمياء علماً متكاملاً عن طريق تقليل التلوث الذي تسببهُ الصناعات الدوائية والصيدلانية وصناعات البترول والبلاستيك [1].

بالإضافة إلى ذلك شكل التلوث البيئي والزيادة السريعة في عدد السكان والاحتباس الحراري وتغير المناخ وتدمير النباتات الطبيعية وموارد الأرض وانخفاض المساحات الزراعية والموارد المائية لكل فرد وتدمير طبقة الأوزون وانخفاض التنوع البيولوجي أهم المشكلات البيئية اليوم[2] . ومن المعروف أن الأنشطة التعليمية لها دور كبير في التعامل مع المشكلات البيئية وإيجاد الحلول لها وخاصة في مجالات الكيمياء والفيزياء والأحياء[3].

1-2 تعريف الكيمياء الخضراء:

هي فرع حديث من فروع علم الكيمياء يهدف إلى تقليل الانبعاثات الناتجة عن عمليات التصنيع الكيميائي إلى أقل مدى ممكن كما يهدف إلى ابتكار مواد كيمياوية جديدة تعود بالخير على البيئة ومواد كيميائية تعمل كبدائل عن المواد الكيمياوية الأخرى التي تعود عمليات تصنيعها بنتائج سلبية على البيئة أو تعمل كبدائل عن المواد الكيمياوية المستخلصة من الأنواع الحية المهددة بالانقراض مثل الزيوت الكبدية التي تهدد عمليات استخلاصها من الحيتان واسماك القرش بانقراض تلك الأنواع بشكل تام خلال عقود قليلة [4].



شكل رقم (1) مركبات كيميائية خضراء

وتعرف الكيمياء الخضراء، التي تمتلك مجالاً متعدد من التخصصات أيضاً باسم الكيمياء المستدامة . وبعبارة أخرى تساهم الكيمياء الخضراء في ضمان الاستدامة للاستخدامات المتجددة لمصادر الطاقة وعن طريق استبدال التقنيات الملوثة ببدائل آمنة [5].

وهي مجال من علم الكيمياء والهندسة الكيمياوية تهتم بتصميم المنتجات والعمليات بحيث تقلل استخدام وإنتاج المواد الخطيرة . في حين أن الكيمياء البيئية تهتم بالآثار الناتجة عن الملوثات الكيميائية على الطبيعة أما الكيمياء الخضراء تركز على النهج التكنولوجية لمنع التلوث وتقليل استهلاك المصادر غير المتجددة وبالتالي فإن الكيمياء الخضراء تساعد في تحسين جودة الحياة للأفراد والمجتمعات [6].

1-3 مفهوم الكيمياء الخضراء

هنالك العديد من العلماء والباحثين من يطلق على مسمى الكيمياء الخضراء تسميات مختلفة منهم من يطلق عليها الكيمياء الآمنة أو الكيمياء المستدامة أو الكيمياء النظيفة أو الكيمياء صديقة للبيئة أو الكيمياء غير الضارة أو الكيمياء الحميدة والتي جميعها تشير إلى مصطلح واحد تجتمع عليه الكتابات العربية والأجنبية هو

الكيمياء الخضـراء (Green Chemistry) فان مفهوم الكيمياء الخضـراء هي تصـميم المواد الكيميائية والمنتجات والعمليات لتقليل أو القضـاء على استخدام وتوليد المواد الخطرة . تعمل الكيمياء الخضـراء على تطبيق حلول علمية مبتكرة للمشاكل البيئية وتعمل على تقليل الآثار السلبية للمنتجات والعمليات الكيميائية على صحة الإنسان والبيئة ، تطبق الكيمياء الخضـراء عبر حياة المنتج الكيميائي ، بما في ذلك تصـميمه وتصـنيعه واستخدامه والتخلص النهائي منهُ [7].

1-4 الكيمياء الخضراء والتنمية المستدامة

تهدف الكيمياء الخضـراء إلى جعل الكيمياء أكثر كفاءة في استخدام الطاقة وتقليل التخلص من النفايات وإنتاج منتجات مبتكرة باسـتهلاك أقل للموارد الطبيعية وتصـميم العلميات البديلة ومسارات التفاعل ، كما يتم تطوير مواد ومنتجات جديدة تساهم في تلبية احتياجاتنا اليومية ، لكن مع الاهتمام أكثر بمصالح الأجيال القادمة [8].

1-5 أهمية الكيمياء الخضراء في التنمية المستدامة

تعمل التقنيات والحلول التي تقدمها الكيمياء الخضـراء على تطوير وسائل الإنتاج وإدارتها للحفاظ على الموارد البيئية ولتحقيق التنمية المستدامة أما عن أهمية الكيمياء الخضـراء في هذا المجال فهي كالآتي :

1- تصميم الموارد الكيميائية القابلة للتحلل.

حيث يتم تصـميم المنتجات الكيميائية لتتحلل إلى مواد غير ضـارة بعد استخدامها حتى لا تتراكم في البيئة .

2- التقليل من احتمالية وقوع الحوادث.

عن طريق تصـميم المواد الكيميائية وأشكالها الفيزيائية (الصلبة أو السائلة أو الغازية) لتقليل احتمالية وقوع الحوادث الكيميائية بما في ذلك الانفجارات والحرائق والاطلاقات في البيئة .

3- تقليل مستوى التلوث.

تصميم منتجات كيميائية فعالة تماماً ولكنها قليلة السمية أو معدومة .

4- استخدام مذيبات وظروف تفاعل أكثر اماناً.

يجب استخدام المذيبات أو عوامل الفصل أو المواد الكيميائية المساعدة، وفي حال استخدامها يجب اللجوء إلى المواد الأقل ضرر وسمية .

5- تقليل النفايات.

تفتقر معظم عمليات الإنتاج الكيميائي الحالية إلى الكفاءة في استخدام المواد الأولية وتنتج كمية كبيرة من النفايات، إن العلميات والتقنيات النظيفة والموفرة للطاقة هي أدوات أساسية لتحقيق هدف تعظيم الكفاءة وتقليل النفايات.

6- تقليل استخدام المذيبات العضوية السامة.

من خلال تقليل استخدامها في العمليات الكيميائية لتحضير المواد الكيميائية ، غالباً ما يتم إطلاق حوالي 20 مليون طن من المذيبات العضوية في الغلاف الجوي كل عام، مما يؤدي إلى نفايات المذيبات وتلوث البيئة [9].

6-1 لماذا يتعاظم الاهتمام بالكيمياء الخضراء

للإجابة على هذا السؤال يجب ان يكون لدينا اولاً فهم لطبيعة المشكلة ؟

يوجد جدل واسع حول طبيعة المواد الخطرة على البيئة نتيجة لإطلاق المركبات الكيميائية المصنعة في البيئة وهنالك شك قليل لدرجة عدم اليقين في المعلومات حول السمية والتأثير البيئي وحتى طرق التحليل للمواد الكيميائية وهل ترجع مظاهر الاخطار التي نلاحظها هي مجرد قضاء وقدر ولذلك فهناك اختياران للمجتمع العلمي:

الاختبار الأول: اما ان يسمح لهذا الشك المشار اليه ان يستمر في شل حركة المعادلات الهادفة للحفاظ على صحة الأنسان وسلامة البيئة .

والاختبار الثاني : الذي يتبناه الفرع الجديد وهو الكيمياء الخضراء وذلك بقبول الحقيقة بأن إطلاق المواد الكيميائية في البيئة بسبب بعض الزيادات الإضافية في المخاطر على صحة الأنسان والبيئة ويمكن تجنب هذه المخاطر تماماً من خلال استخدام طرق في التصنيع تكون فنياً واقتصادياً قابلة للتطبيق بواسطة المجتمع العلمي الكيميائي .

وكما هي حقيقة في الكيمياء الخضراء وكل فروع العلم فأن العالم يستخدم الوضع الحالي للمعرفة في تقليل مخاطر المواد الكيميائية إلى الحد الأدنى.

لماذا يجب على الكيميائيين السعي لتحقيق أهداف الكيمياء الخضراء؟

المقولة الشهيرة التي تعود الي روبرت كيندي مقولة جميلة جداً: **(يرى البعض الأشياء كما هي ويسألون لماذا؟ ولكني أرى الأشياء كما يجب ان تكون اسأل ام لا ؟)**

ومن اهم الأسباب الفلسفية لوجوب محاولة الكيميائيين لجعل العمل الذي يمارسه والمواد التي يستخدموها غير ضارة على قدر المستطاع على البيئة. هو انهم يستطيعون ذلك بالفعل لأنهم يعرفون كيفية تداول وتحويل المركبات الكيميائية والمخاطر الممكن حدوثها وبالتالي يكون لديهم القدرة على تقليل أو أزاله المخاطر لأنفسهم وللمجتمع .

ويعرف طليعة العلماء المجددين في هذا الفرع الجديد من الكيمياء ان هذه الأهداف يمكن تحقيقها من المفترض انه لا يمكن لأي نشاط ان يكون خاليا تماماً من المخاطرة، فأن الأهداف التي تم التوصل اليها لآليات الكيمياء الخضراء أدت إلى تقليل المخاطر البيئة والاضرار الصحية بإتباع طرق جديدة سواء على مستوى المعامل البحثية أو العلميات الصناعية .

وهناك سبب آخر لتطبيق الكيمياء الخضراء بواسطة المجتمع الكيميائي بشكل مكثف وهو أن هذه الكيمياء مبنية على العلوم الجزيئية الأساسية كطريق لحل مشاكل البيئة ، لا تعالج المشاكل بطريقة التضميد او الترقيع لتقليل المخاطر .

وطريقة تقليدية التي اتبعها المجتمع والصناعة من خلال السياسات البيئية هي تقليل المخاطر عن طريق تقليل زمن التعرض للمواد الكيميائية عند تثبيت خطورة المواد باستخدام البيانات الخاصة بسمية المواد وبمعرفة فاعلية التحكم في زمن التعرض المستخدمة فأنه يمكن المناورة حتى الوصول بالمخاطرة إلى حد معين وعلى مستوى مقبول .

وهذا المستوى المقبول بالضرورة سيكون كيفياً(وليس كميا) حيث أن السؤال هو مقبول لمن ؟

فحين تكون مخاطر الإصابة بالسرطان عند التعرض لمستوى معين من مادة ما هو الا 1:1000000 والذي حدد بواسطة المجتمع في القوانين المنتظمة للبيئة فأنه بالتأكيد ليس مقبولاً أن تكون أنت الوحيد في النسبة

1000000:1 وأحد المأخذ الأخرى في إمكانية التحكم في زمن التعرض لتقليل المخاطر ، ان الاستخدام او انطلاق المركب الكيميائي قد يؤثر على الافراد الذين لا يستخدمون هذه الوسائل في التحكم .

فمثلاً قد يلبس العاملون قفازاً او نظارة واقية..... الخ وذلك لحماية انفسهم من التعرض لمستويات عالية لمادة معروفاً لها تأثير خطر ولكن الوضع مختلف لتعرض الافراد الأمنيين الذين يتواجدون في اتجاه مجرى النهر او الريح الناقلة لهذه المادة الخطرة والذين لا يملكون طرق الحماية من ضوابط التعرض .

ونظراً لعدم التيقن من التأثيرات المزمنة وتأثير التراكم البيولوجي وتأثيرات المتداخلة العالية جداً لعدد كبير جداً من المركبات في ظل معلوماتنا الحالية فأن استخدام التحكم في زمن التعرض لتقليل المخاطر على المجتمع وهو محل تساؤل الآن .

والسبب الأخير لمعدومية التحكم في زمن التعرض هو ان هذا التحكم قد لا ينجح فلا يوجد نظام واقي للوجه او أجهزة تنفس او نظارات وقفازات او ملابس واقية لها صفة الكمال.

وحيث ان هذه المعدات التي تستخدم في تخفيض زمن التعرض قد تفشل في أداء مهمتها وبالتالي يتعرض الافراد المستخدمين لها للحد الأقصى من الخطورة نتيجة التعامل مع هذه المواد الخطرة .

وعلى النقيض فأن تقليل المخاطرة من خلال الكيمياء الخضراء باستخدام الإجراءات المناسبة لا يمكن أن تواجهه احتمالات الفشل، فأن استخدام التقنيات المتنوعة والطرق التي ستناقش في هذا البحث (استخدام مواد بادئة آمنة وعوامل حفر بديلة ومذيبات بديلة....) فأن خطورة المركبات ستقل وبالتالي فأن استخدام المواد غير الضارة لن يكون لها سمية محتملة وبذلك لن تؤثر سلباً على صحة الأنسان او البيئة .

وفي الكيمياء الخضراء نستبعد مفهوم المستوى المقبول من الخطورة كهدف ويحل محله الهدف الأفضل وهو بيئة نظيفة (غير ضارة) ومن الطبيعي انه من الناحية الاقتصادية يكون من الأفضل تجنب التكلفة العالية لاستخدام وسائل التحكم في التعرض للمواد الخطرة وتتميز الكيمياء الخضراء انه بتناولها لحل تقليل المخاطر تجنى مكاسب اقتصادية وذلك عن طريق تخفيض تكلفة المواد البادئة للإنتاج وتقليل زمن التفاعلات الكيميائية وزيادة نسبة التحول الكيميائي المطلوب والانتقالية العالية وسرعة فصل المركبات وكذلك تخفيض الطاقة المستخدمة [10].

1-7 آليات الكيمياء الخضراء

لقد أصبح من المؤكد تأثر صحة الإنسان والبيئة بالكيمياويات وبمراحل تصنيعها المختلفة. وأصبحت الكيمياء الخضراء مسؤولة عن إيجاد الحلول المناسبة لحل كل مشاكل التصنيع القديمة وذلك بإيجاد الحلول البديلة لكل السلبيات السابقة .

وهناك عدة نقاط أساسية ترتكز عليها الكيمياء الخضراء في تنفيذ أسلوبها وهي :

1. **مواد بادئة بديلة .**
2. **كواشف بديلة .**
3. **مذيبات بديلة .**
4. **تغيير هدف المنتج .**
5. **عوامل حفز بديلة .**
6. **طرق تحليل كيميائي متطورة .**

1-7-1 المواد البادئة البديلة:

تعتمد طريقة التحضير الكيميائي إلى حد كبير على طبيعة ونوع وخواص المواد البادئة للتفاعل، واختيار مادة أولية معينة لا يعتمد فقط على كفاءتها الكيميائية بل لابد من الأخذ في الاعتبار الأبعاد البيئية والصحية عند تداولها، بمعنى الأخطار التي تواجه الموردين الذين يجهزون هذه المادة والأخطار التي يمكن أن تواجه العاملين أثناء تداولها ، والأخطار المحتملة أثناء نقلها .

ومن المفيد أن نعرف أن 98% من جميع المركبات العضوية المنتجة في الولايات المتحدة مثلاً يبدأ تحضيرها من البترول ويستهلك تحضير هذه المركبات 15% من جملة الطاقة المستخدمة في الولايات المتحدة. وتزداد هذه الكمية من الطاقة حالياً لأن مصانع التكرير تستخدم خامات بترولية أقل جودة من الخامات السابقة. ولا يخفى علينا خطورة الاعتماد شبه الكلي على البترول في معظم الصناعات الكيميائية لأننا نعرف انه مصدر على وشك النفاذ في وقت قريب بجانب المخاطر البيئية العديدة التي تصاحب تحضير هذه المركبات من البترول. فعملية الأكسدة التي تجرى على المنتجات البترولية لتحضير بعض المركبات العضوية المهمة اعتبرت تاريخياً أكثر العلميات إحداثاً للتلوث من كل عمليات التحضير الأخرى على الإطلاق.

لذا تقدم الكيمياء الخضراء المنتجات الزراعية كالقمح والبطاطس والصويا والمولاس كمواد أولية بديلة للبترول لتحضير العديد من المنتجات الصناعية مثل الأنسجة والنايلون.....الخ .

وقدمت الكيمياء الخضراء بديلاً آخر للمنتجات الزراعية كمواد أولية وهو المخلفات الزراعية والكتلة الحيوانية التي تتكون أساساً من مواد ليجنوسليولوزية عديدة .

ومن البدائل الأخرى التي استخدمتها الكيمياء الخضراء كمدخلات في عمليات التصنيع هو الضوء. فمثلاً تستخدم الفلزات الثقيلة عادة في عمليات أكسدة المواد البترولية وهي مواد ذات سمية شديدة ومسببة للسرطان كما تدمر الجهاز العصبي. وقد حل الضوء المرئي كبديل لهذه المواد ليحدث نفس التفاعلات المطلوبة .

1-7-2 الكواشف البديلة

عند تحويل المادة الأولية إلى المنتج المقصود يختار الكيميائي الكواشف المطلوبة لإجراء التغيير المطلوب في تركيب بنية الجزيء الأولي. ويجب أن يقيم الكيميائي الكاشف المستخدم من حيث كفاءته ووفرته بجانب أمانه البيئي .

وتحدد طريقة إجراء التفاعل سواء بالنسبة المتكافئة أو باستخدام عوامل حفز أو باقتصاد الذرة ونوع المخلفات التي تخرجها أي طريقة مما سبق اختيار افضل الكواشف التي تحقق له التحول المطلوب في ضوء الاعتبارات السابقة .

1-7-3 المذيبات البديلة

اسند إلى الكيمياء الخضراء مساحة هامة جداً للبحث عن الوسط المناسب الذي يمكن أن تتم فيه التفاعلات بالكفاءة المطلوبة، وذلك لما سببته المذيبات المعتادة وهي غالباً مركبات عضوية متطايرة من سلبيات بيئية متعددة مثل الضباب الدخاني وغيره . وقد وصل العلماء إلى بدائل كثيرة تحافظ على الهواء النظيف .

1-7-4 تغيير هدف المنتج

تركزت أبحاث الكيمياء الصيدلية في كيفية إنتاج مركبات على أعلى درجة من الكفاءة وأقل قدر من السمية أو الآثار الجانبية وهي تتوافق في ذلك مع أهداف الكيمياء الخضراء ، إلا أن أبحاث الكيمياء الخضراء بدراستها الدقيقة لبنية الجزيء المستهدف تعمل على تجنب الجزء المسؤول عن أي آثار جانبية غير مرغوبة في الجزيء المستهدف . وفي جميع الحالات هناك تحد للمواءمة بين التداخل في فاعلية الجزيء ومدى سميته .

1-7-5 عوامل حفز بديلة

حققت الكيمياء الصناعية ازدهاراً كبيراً باستخدام عوامل حفز متنوعة وتعددت البحوث لاختيار أنواع الحوافز ودراسة خواصها وفاعليتها الكيميائية إلا أنه في الجانب الآخر لم يحظ التأثير البيئي لهذه الحوافز بالاهتمام الكافي . وكانت الفلزات الثقيلة هي أكثر عوامل الحفز المستخدمة والتي تبين بعد ذلك سميتها الشديدة وتأثيرها المدمر على الإنسان والبيئة لذا اتجهت الأبحاث إلى إيجاد بدائل جديدة مثل الضوء أو الإنزيمات أو غيرها .

1-7-6 طرق التحليل الكيميائي

يقصد بطرق التحليل الكيميائي رصد الوقت الحقيقي لقياس وتقدير المكونات أثناء سير التفاعل مع إمكانية تغيير مسار التفاعل حسب نواتج التحليل . مثال على ذلك بفرض أن المادة (س) مادة ملوثة وباستخدام طرق التحليل وجدنا زيادة تركيزها بكمية كبيرة أثناء سير التفاعل الذي يجرى تحت ضغط عالٍ ودرجة حرارة مرتفعة . فيمكننا بتغيير الضغط ودرجة الحرارة ومع استمرار التحليل أثناء سير التفاعل التحكم في أحسن الظروف التي تقلل أو تمنع تكوين هذه المادة الملوثة .

وهناك حالياً كثير من البحوث في هذا الاتجاه وخاصة في مجال التكنولوجيا الحيوية حيث تكون التفاعلات شديدة التعقيد وقيمة الناتج مرتفعة لذا تتضح الأهمية الاقتصادية لهذه الطريقة [11].

الفصل الثاني

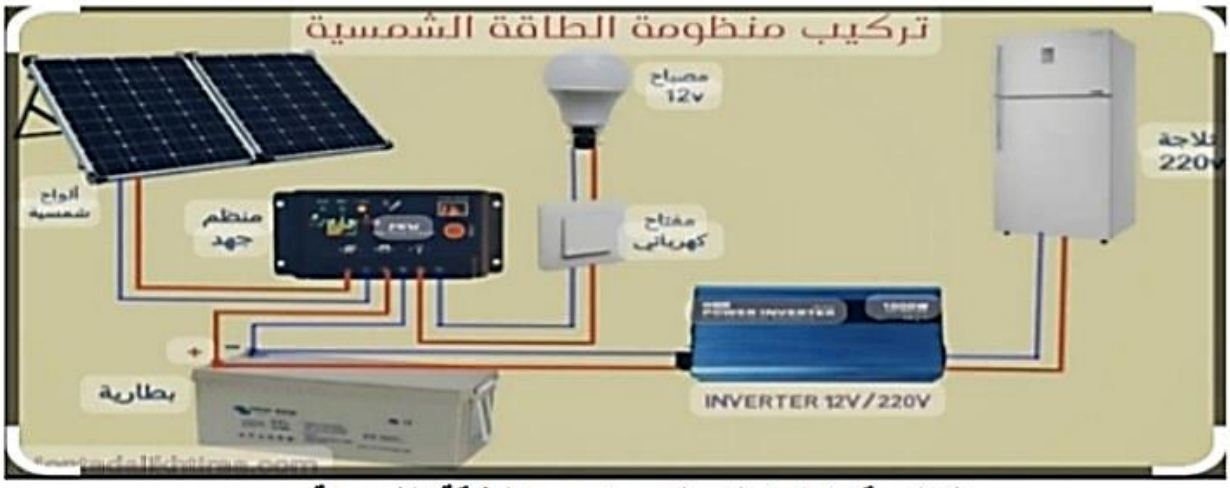
تقنيات ومبادئ الكيمياء الخضراء

2-1 تقنيات الكيمياء الخضراء

أصبحت تقنيات الطاقة الخضراء والمستدامة متاحة ومستخدمة على نطاق واسع في الصناعات الحديثة ومن بين الأنواع الرئيسية للتقنيات الخضراء هي:

أولاً: الطاقة الشمسية

تستخدم لتوليد الكهرباء من خلال الخلايا الشمسية، وتُستخدم في الإضاءة وتشغيل الأجهزة الكهربائية .



شكل رقم (2) توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية

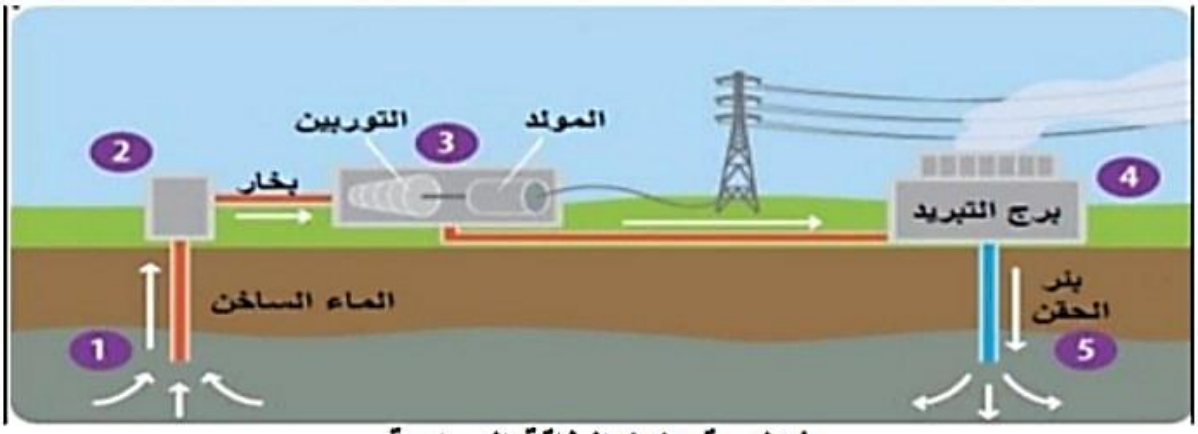
ثانياً: طاقة الرياح :

تستخدم لتوليد الكهرباء من خلال توربينات الرياح، ويمكن استخدامها في المشاريع الصناعية والمدنية.

شكل رقم (3) توربينات طاقة الرياح

ثالثاً: الطاقة الحرارية

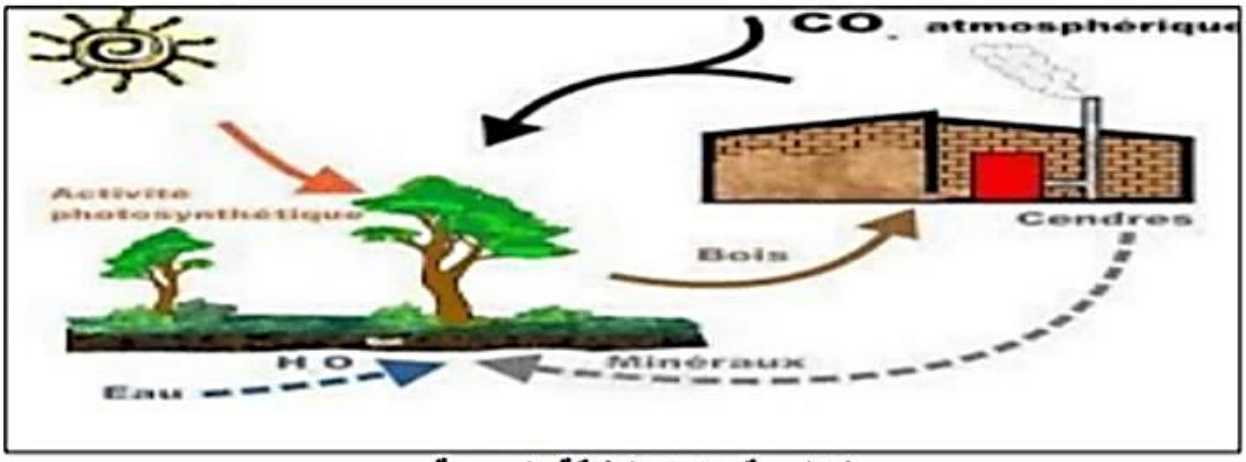
يتم استخدامها في الصناعات لتوليد الطاقة الحرارية والكهربائية وتشغيل تقنيات التسخين الشمسي والطاقة الحرارية المتجددة .



شكل رقم (4) الطاقة الحرارية

رابعاً: الطاقة الحيوية

تستخدم لتوليد الطاقة من النفايات العضوية ، ويمكن استخدامها لتوليد الكهرباء وتدفئة المنازل .



شكل رقم (5) الطاقة الحيوية

خامساً: الطاقة المائية

تستخدم لتوليد الطاقة من خلال المياه الجارية ويمكن استخدامها في المشاريع الزراعية والمدنية لتوليد الكهرباء وتوفير المياه .

شكل رقم (6) الطاقة المائية

2-2 طرائق استخدام التقنيات الخضراء :

1. **تركيب الأنظمة الخضراء :** يمكن تركيب أنظمة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في المباني والمنازل والمدارس لتوليد الطاقة الكهربائية .

2. **استخدام السيارات الكهربائية:** يمكن استخدام السيارات الكهربائية التي تعتمد على البطاريات للحد من انبعاث الكربون وتلوث الهواء .

3. **تحسين كفاءة استخدام الطاقة:** يمكن تحسين كفاءة استخدام الطاقة عن طريق الاستثمار في تقنيات الطاقة الخضراء والمستدامة وكذلك العمل على تشجيع سلوكيات الاستدامة مثل تقليل استخدام المياه والكهرباء وتحسين العزل الحراري في المنازل والمباني ويمكن أيضا توفير دورات تدريبية وورش عمل لتوعية المجتمع بأهمية الحفاظ على البيئة .

2-3 فوائد استخدام الكيمياء الخضراء

1- **الاقتصاد:** يمكن أن يؤدي استخدام الكيمياء الخضراء إلى توفير منتجات وعمليات آمنة وفعالة ومستدامة بيئياً.

2- **البيئة :** يمكن للكيمياء الخضراء أن تقلل من التأثير البيئي للعمليات والمنتجات الكيميائية. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي استخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي القابلة للتحلل في منتجات التنظيف

إلى تقليل كمية المواد الكيميائي الضـارة التي يتم إطلاقها في البيئة مما يؤدي على تحسين جودة المياه وتقليل التلوث البيئي .

3- **الصحة:** يمكن للكيمياء الخضراء أيضاً تحسين الصحة العامة عن طريق الحد من استخدام المواد الكيميائية الخطرة على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي استخدام الكيمياء الخضراء في إنتاج المستحضرات الصيدلانية إلى تقليل كمية النفايات الخطرة المتولدة مما يؤدي إلى تحسين الصحة العامة [12].

2-4 تطبيقات الكيمياء الخضراء[13]

يعتبر توظيف الكيمياء الخضراء وتطبيقاتها من التحديات التي يمكن أن يواجهها الكيميائيون في الوقت بسبب تعاظم مصادر الخطورة والتلوث في البيئة وتأثيرها المباشر على حياة الإنسان .

2-4-1 الشرائح الحاسوبية Computer chips

تحتاج صناعة الشرائح الحاسوبية إلى الكثير من الكيمياويات و كميات كبيرة من المياه والطاقة، طبقاً لدراسة أُجريت عام 2003، فإن صناعة شريحة حاسوبية واحدة تتطلب استهلاك للكيمياويات والوقود الحفري كالبترول بما يعادل 630 مرة قدر وزنها من هذه المواد، وهي كمية كبيرة جداً ولهذا لعبت الكيمياء الخضراء دوراً في حل هذه المشكلة، فقد استطاع مجموعة من العلماء في المعمل القومي بلوس الاموس The Los Alamos Natinol Laboratory من تطوير طريقة جديدة باستخدام ثاني أوكسيد الكاربون في الحالة السائلة فائقة الحرج dioxide Supercritical carbon من خلال إحدى خطوات التصنيع وقد نجحت هذه الطريقة بشكل كبير في تقليل كميات الكيمياويات والطاقة والمياه المستخدمة لإنتاج تلك الشرائح .

كما استطاع أيضاً ريتشارد وول من إيجاد طريقة لاستخدام ريش الدجاج في صناعة الشرائح الحاسوبية ، لما تحتويه من مواد بروتينية تسمى كرياتين ليتم تعديلها وإنتاج نسيج خفيف الوزن وذو صلابة عالية في نفس الوقت ، يستطيع تحمل الضغوطات الميكانيكية والحرارية، لتكون النتيجة أن الشرائح الحديثة تعمل بكفاءة أكثر مرتين مقارنة بالشرائح القديمة .

2-4-2 المواد البلاستيكية القابلة للتحلل الحيوي

تعمل العديد من الشركات على إنتاج أنواع متجددة من البلاستيك وقابلة للتحلل بشكل طبيعي، في ولاية مينيسونا الأمريكية تنتج شركة {Nature Work of Minnetonka} حاويات للطعام مصنعة من بوليمر يدعى حمض البولي لاكتيك، كما اخترع العلماء ناتشروركس طريقة تستطيع تحويل نشار الذرة إلى مادة صمغية صلبة باستخدام أنواع من الكائنات الدقيقة، ووجدوا أن هذه المادة لا تقل صلابة عن البلاستيك المصنع من المواد البترولية، والذي يستخدم حالياً في صناعة زجاجات المياه وعلب الزبادي وكذلك تعمل الشركة على تحويل المخلفات الزراعية إلى مصادر للمواد الخام .

2-4-3 مواد الطلاء والدهانات

تطلق مواد الطلاء الزيتية كميات كبيرة من المركبات العضوية الطيارة من الطلاء أثناء جفافه فيما بعد وأن هذه المواد لها تأثيرات سلبية على البيئة .

استطاعت شركة شيروين ويليامز الأمريكية((Williams–Sherwin شركة أمريكية كبرى تعمل في صناعة مواد البناء، تطوير مواد طلاء أكريليكيّة مصنوعة من الماء وتحتوي على كميات قليلة من المواد العضوية الطيارة والتي يُمكن تصنيعها بسهولة باستخدام زجاجات المياه الغازية البلاستيكية مُعادة التدوير والمواد الأكريليكية وزيت فول الصويا، حيث تتميز هذه الدهانات بالجمع بين فوائد اداء الدهانات التقليدية مع كمية أقل من المركبات العضوية الطيارة في محتويات المواد الأكريليكية [13].

2-4-4 تطبيقات الكيمياء الخضراء في مجال الزراعة

1. البدء باختيار المواد الأولية المتجددة وغير سامة.
2. تصميم إجراءات تركيبية آمنة وفعالة من حيث الطاقة
3. توليد منتجات جيدة وغير سامة.
4. ضمان التحليل الطبيعي لجميع المنتجات والمنتجات الثانوية.
5. تصنيع الكيمياويات الزراعية التي ليس لها تأثير على صحة الإنسان والبيئة [14].

2-5 التحديات التي يمكن مواجهتها في تطبيق الكيمياء الخضراء

2-5-1 التكلفة: في بعض الأحيان، قد تكون التقنيات الخضراء مكلفة للتنفيذ والصيانة، مما يتطلب توفير موارد مالية كافية لتطبيقها. ومع ذلك، يمكن أن تكون هذه التكلفة أقل على المدى الطويل، حيث يمكن توفير الموارد الطبيعية والطاقة والماء والموارد الكيميائية.

2-5-2 قيود التكنولوجيا: يمكن أن توجه التقنيات الخضراء بعض القيود التكنولوجية، مما يتطلب بعض الأبحاث والتطوير لتحسين الكفاءة والاستدامة .

2-5-3 احتياج السوق: يجب تقييم حجم السوق المحتمل للمنتج أو الخدمة التي يقدمها مشروع الكيمياء الخضراء، وتحديد ما إذا كان هناك طلب كافي لها ومنافسة المنتجات الأخرى المتاحة.

2-6 فوائد تطبيقات الكيمياء الخضراء

1- تحسين جودة الهواء والماء: تطبيق الكيمياء الخضراء يساعد في تقليل الانبعاثات الضارة والملوثات في الهواء والماء مما يحسن جودتها.
2- توفير الموارد الطبيعية: يعمل الكيميائيون على تصميم المنتجات والعمليات بطريقة تحد من استهلاك الموارد الطبيعية مثل المياه والنفط والغاز.
3- تحسين السلامة: تطبيق الكيمياء الخضراء يساعد في تقليل خطر التعرض للمواد الكيميائية الضارة وبالتالي تحسين السلامة في العمل.
4- تشجيع الابتكار: يتطلب تطبيق الكيمياء الخضراء الابتكار والابداع في تصميم المنتجات والعمليات الكيميائية وهذه يمكن أن يشجع على الابتكار والتطوير في هذا المجال.
5- دعم التنمية المستدامة: يعمل تطبيق الكيمياء الخضراء على تحقيق التنمية المستدامة وتوفير الرعاية للبيئة والمجتمع[12].

2-7 مبادئ الكيمياء الخضراء

يتلخص تعريف الكيمياء الخضراء " **بداية لأضرار**" وهو المعنى الحقيقي للكيمياء الخضراء الذي لا يُعرف الكيمياء الخضراء فقط وإنما يتضمن أيضا المجال الذي تعمل فيه والمدى الذي ستصل إليه مستقبلاً وقد وضع الرواد لهذا العلم اثنتا عشر مبدأ يتأسس عليها وتوضح اتجاهاته المستقبلية .

مبادئ الكيمياء الخضراء الاثنا عشر[15]:

1. يفضل منع تكوين المخلفات عن معالجتها أو التخلص منها بعد تكوينها .
2. يجب أن تصمم طرق التحضير بحيث تندمج معظم المتفاعلات لتكون المنتج النهائي .
3. يجب أن تصمم طرق التصنيع بحيث تكون المواد البادئة للتفاعل والناتجة لها أقل قدر من السمية أو تكون غير خطيرة إطلاقاً على صحة الإنسان وسلامة البيئة .
4. يجب أن يتميز المنتج الكيميائي بأعلى درجة من الكفاءة الوظيفية وأقل قدر من السمية .
5. يفضل إجراء التفاعلات بدون استخدام مواد إضافية مثل المذيبات أو مواد الفصل وإذا لزم الأمر يجب أن تكون هذه المواد غير خطيرة .
6. يجب الأخذ في الاعتبار احتياج الطاقة نظراً لتكلفتها وتأثيرها البيئي لذا يكون استخدامها في أضيق الحدود ويفضل تصميم تفاعلات تجرى في درجة الحرارة المعتادة .
7. يجب أن تكون الخامات التي تحتوي على المواد البادئة، مواد متجددة بدلاً من استنزاف الخامات غير المتجددة .
8. يجب ما أمكن تجنب العمليات الكيميائية والفيزيائية غير الضرورية مثل اشتقاق مجموعات بعينها أو إجراء تعديلات مؤقتة في الجزيئات .
9. يفضل استخدام عوامل حفز متخصصة عن الاكتفاء باستخدام النسب المتكافئة من التفاعلات .
10. يجب أن تصمم المنتجات بحيث لا تستقر في البيئة بعد أداء وظيفتها ويجب أن تكون قابلة للتحلل في البيئة إلى مواد بسيطة غير ضارة بها .
11. يجب تطوير طرق التحليل الكيميائي لتواكب سير التفاعل لحظياً . بحيث تراقب وتسيطر على التفاعل قبل تكوين أي مواد خطرة .

12. يجب اختيار المواد الكيميائية الآمنة من حيث النوع والتركيب بحيث تقلل بقدر الإمكان احتمال حدوث الحوادث الكيميائية من انطلاق الغازات أو الانفجارات أو الحرائق .

2-8 أمثلة من الكيمياء الخضراء

أمثلة المواد البادئة الخضراء

ظهرت كثير من الإنجازات في مجال استخدام المواد البادئة الخضراء أي الصديقة للبيئة لتصنيع منتجات كيميائية متنوعة والتي صُنعت من قبل بالطرق التقليدية من مواد بادئة إما قابلة للاستنفاذ أو تحمل أخطار بيئية عديدة من خلال تقنيات كيميائية تحمل في طياتها العديد من احتمالات التلوث سواء من استخدام المذيبات العضوية أو العوامل المساعدة أو استهلاك الطاقة وغيرها .

ومع التقدم في علوم التكنولوجيا الحيوية والتحفيز الحيوي والتخليق الحيوي اتجهت البحوث إلى استخدام المواد البادئة الحيوية كبديل للبترول في تخليق العديد من المركبات العضوية .

2-8-1 بوليمرات عديد التسكر

يتميز استخدام بوليمرات عديد التسكر كمواد بادئة بأنها مواد متجددة ومستمرة باستمرار حياة البشر كما لا توجد أي بيانات تشير إلى خطورة استخدامها على الإنسان أو البيئة بجانب أنها قابلة للتحلل البيولوجي ويتضح ذلك في أبحاث جروس وآخرون Gross et.Al في اتباعه التخليق الحيوي لتحضير العديد من المركبات العضوية مستخدماً بوليمرات عديدة التسكر كمواد بادئة [16].

2-8-2 الجلوكوز كمادة بادئة بدلاً من البنزين

تمكن فورست من استخدام الجلوكوز كمادة بادئة لتحضير العديد من المركبات الأروماتية مثل الهيدروكوينون والكاتيكول وحمض الاديبيك وهي مركبات مهمة تحتاجها الصناعة بكميات كبيرة . وذلك من خلال طرق التخليق الحيوي وباستخدام الماء كمذيب وهذه المواد كانت تحضر من البنزين وباستخدام مذيبات عضوية وفلزات ثقيلة كعوامل مساعدة [17].

2-8-3 تحويل الكتلة الحيوية إلى منتجات كيميائية

تمكن الباحثون في جامعة A&M في تكساس من الوصول إلى مجموعة من التقنيات التي تحول نفايات الكتلة الحيوية إلى علف حيواني و كيمياويات صناعية – ومواد للوقود.

ومخلفات الكتلة الحيوية هي عبارة عن مخلفات القمامة الصلبة ومياه المجاري والمخلفات الزراعية. وهي تمثل عبئاً بيئياً خطيراً وتكلفة اقتصادية كبيرة للتخلص منها. وتتلخص طرق المعالجة لهذه النفايات لتحويلها إلى مواد مهمة في الآتي :

1. العلف الحيواني: بمعالجة الكتلة الحيوية بالجير يتحول القش ولباب قصب السكر المتبقي بعد العصر إلى علف للحيوانات المجترة.
2. مواد كيميائية: الكتلة الحيوية المعالجة بالجير يمكن وضعها في جهاز تخمر لاهوائي حيث تحولها الكائنات العضوية الدقيقة إلى أملاح للأحماض الدهنية المتطايرة مثل اسيتات وبروبيونات وبيوتيرات الكالسيوم التي تحول إلى الأحماض الدهنية عند معالجتها بحمض غير عضوي كما يمكن تسخين املاح الأحماض الدهنية المتطايرة لتعطي كيتونات مثل الاسيتون والمثيل ايثيل كيتون وثنائي ايثيل كيتون. كما يمكن أيضاً هدرجة الكيتونات إلى كحولات مثل الازوبروبانول و الايزوبيوتانول والايزوبنتانول .

ويلاحظ أن هذه التقنيات الجديدة تلعب دوراً مهماً في الحفاظ على البيئة من الملوثات بل وتحول هذه الملوثات إما إلى علف حيواني يحل محل محصول الذرة الذي يذهب حوالي 88% من إنتاجه إلى الأعلاف بجانب أنه يوفر مساحات من الأرض لزراعات اخرى ويوفر الأسمدة والمبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب التي تشكل تلوثاً إضافياً للبيئة كما أن إنتاج الكيمياويات من هذا المصدر يخفف العبأ على استخدام زيت البترول كما يقلل من تلوث البيئة.

والوقود الناتج من نفايات الكتلة الحيوية أنظف في حرقه ولا يضيف إلى صافي ثاني أكسيد الكربون في البيئة وبالتالي يقلل من العوامل التي تساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري [18].

2-9 دور الثورة التكنولوجية في مجال الكمبيوتر في تصميم طرق لتخليق المركبات الكيميائية صديقة البيئة

يعتبر تخليق المركبات الكيميائية من أهم مصادر التلوث حيث أن الكثير من المواد البادئة والمذيبات المستخدمة والنواتج الثانوية ذات سمية كبيرة ، ونظراً لارتفاع تكلفة التعامل مع تلك الملوثات . بدأ الكيميائيون في البحث عن طرق جديدة للحد والتحكم في تلوث البيئة الناتج عند تخليق المركبات الكيميائية من مركبات صديقة للبيئة بدلاً من المركبات السامة التي كانت تستخدم لتحضيرها من قبل .

ولقد بدأ استخدام الكمبيوتر في عام 1967 حيث تمكن كورى Cory وزملائه من تخليق العديد من المركبات الكيميائية ومنذ ذلك الوقت وحتى الآن تم تحديث وتطوير أكثر من خمسة وأربعين برنامجاً لهذا الغرض . وهذه البرامج تساعد الكيميائيين على استخدام طرق آمنة لتخليق المركبات المستخدمة وتسلك تلك البرامج احد الطريقين :

الأول : تحضير المركبات التي سبق تحضيرها من قبل من مواد صديقة للبيئة غير التي استخدمت لتحضيرها من قبل .

والثاني : يعتمد على التخليق المباشر للمركبات من خلال التعرف على المواد البادئة وظروف التفاعل . وفي هذه الطريقة يمكن تحديد الظروف المناسبة بالإضافة إلى النواتج الرئيسية والثانوية المتحمل تكوينها من التفاعل ونظراً لوجود أكثر من خمسة وأربعون برنامجاً لهذا الغرض فإن اختيار القرص اللين المناسب يعتمد على ما يلي :

1- أمكانية تطبيقه على عدد كبير من التفاعلات المختلفة للحصول على المركبات العضوية المستهدفة .

2- استعداد الباحثون لنشر هذا الجهد وذلك بإتاحة نسخ من القرص اللين الذي تم تطبيقه للاستفادة منه .

3- مدى مناسبة القرص اللين لمكونات الحاسوب وإمكانياته لوكالة حماية البيئة International Protection Agency (EPA hard ware) ويعتبر هذا أهم شروط نجاح البرنامج وبالتالي نجاح الطريقة البديلة لإنتاج مركبات صديقه للبيئة بطرق غير تقليدية .

وهذا الشرط أدى إلى استخدام ثلاثة برامج معروفة في هذا المجال وهي :

a. (CAMEO)

Computer Assisted Mechanistic Evaluation of Organic reactions .

b. (LHASA)

Logic and Heutristics Applied to Synthesis Anylysis .

c. (SYNGEN)

Synthetic Generators

وتستخدم تلك البرامج الثلاثة طرقاً مختلفة لترجمة المعلومات الكيميائية إلى الأغراض التخليقية .

حيث يحتاج مستخدمو البرنامج الأول (CAMEO) إلى المواد البادئة وتراكيب النواتج ويقوموا بتطبيق سلسلة من القواعد المصممة لتحديد التركيب والنشاط والفاعلية . بينما يعتمد مستخدموا برنامجي SYNGEN&LHASA على إعادة تخليق المركبات التي سبق تحضيرها حيث يقوموا بوضع المركب المستهدف ويحصلون على المواد البادئة كمخرجات من هذا البرنامج .

وبالإضافة إلى ذلك يعتمد LHSAS على رسم معلومات لأكثر من ألف تفاعل لاقتراح الطريقة المناسبة التي تستخدم لتحضير المركب المطلوب .

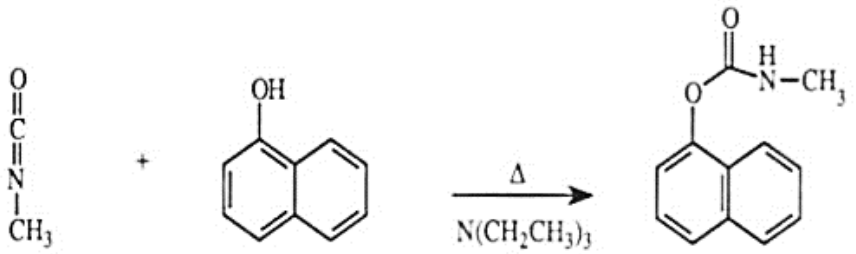
أما برنامج SYNGEN فيستخدم طرقاً رياضية لتخزين التركيب الكيميائي وظروف التفاعل الكيميائي للحصول على أفضل طريقة للتحضير في عملية واحدة .

وفيما يلي عرض لبعض الأمثلة التي نجحت فيها تلك البرامج في تخليق مركبات عضوية صديقة للبيئة .

ظهرت قدرة نظام (CAMEO) في تخليق عدد من المركبات من تفاعلات معروفة ومنها :

أ- تحضير الكاربايل التجاري (1-naphthyl-N-methyl carbamate) من تفاعل المثيل مع ايزوسيانات مع 1-نافثول

Synthesis of Carbaryl (3); Reaction of Methyl Isocyanate (1) with 1-Naphthol (2)



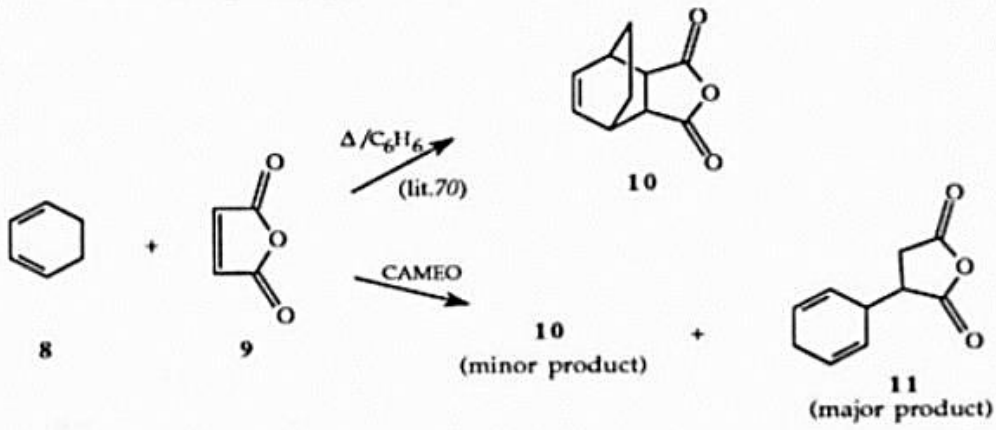
1 2 3

وباستخدام نظام (CAMEO) لم تظهر أي نواتج ثانوية لهذا التفاعل على البيئة .

ب- تفاعل 1،3-سايكلوهكساداايين مع انهيدريد حمض الماليك

ففف

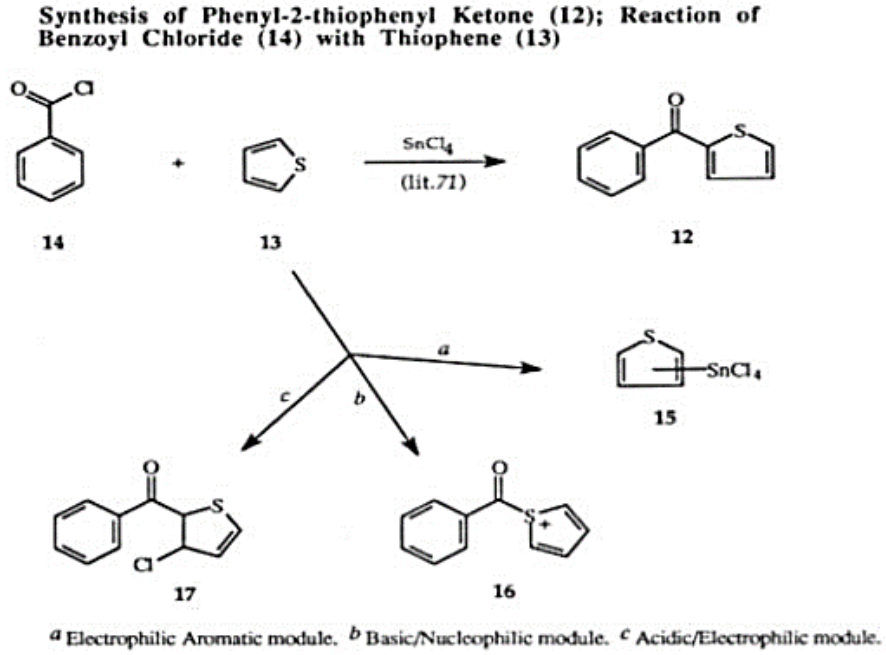
Synthesis of *endo*-Bicyclo[2.2.2]oct-5-ene-2,3-dicarboxylic Anhydride (10); Reaction of 1,3 Cyclohexadiene (8) with Maleic Anhydride (9)



8 9

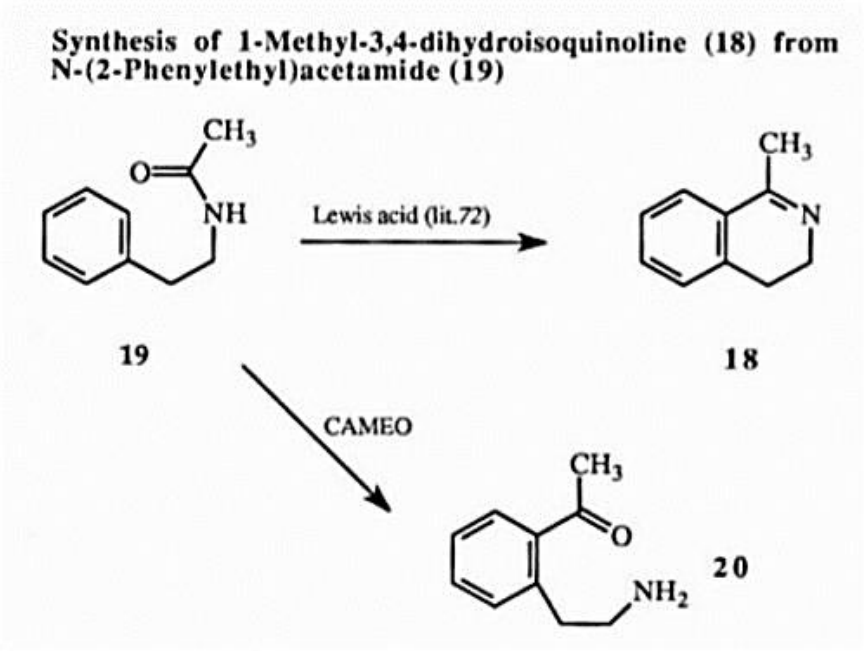
في الظروف العادية التقليدية ينتج المركب 10 باسم التفاعل المعروف باسم ديلز الدر بينما استخدام البرنامج CAMEO تكون المركب 10 ولكنه ليس المركب الأساسي بينما المركب الرئيسي الناتج هو المركب 11 الذي ليس له أي تأثير ضار على البيئة .

جـ- تفاعل الثيوفين مع كلوريد البنزويل :

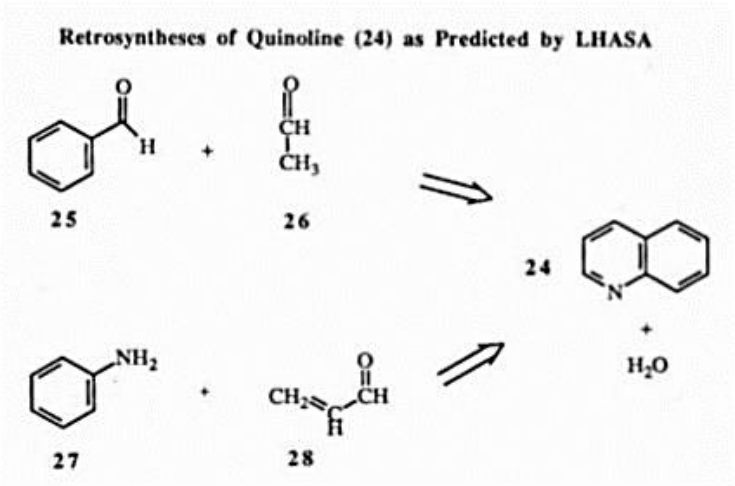


لم ينجح برنامج CAMEO في تفسير تكوين المركب 12 والمعروف أنه ينتج بتفاعل فريدل كرافتس الشهير ولكنه توقع عدة مركبات أخرى مثل 15،16،17 وهي مركبات صديقة للبيئة .

د- تسخين N(2-فينيل ايثيل) اسيتاميد في وجود حمض لويس .

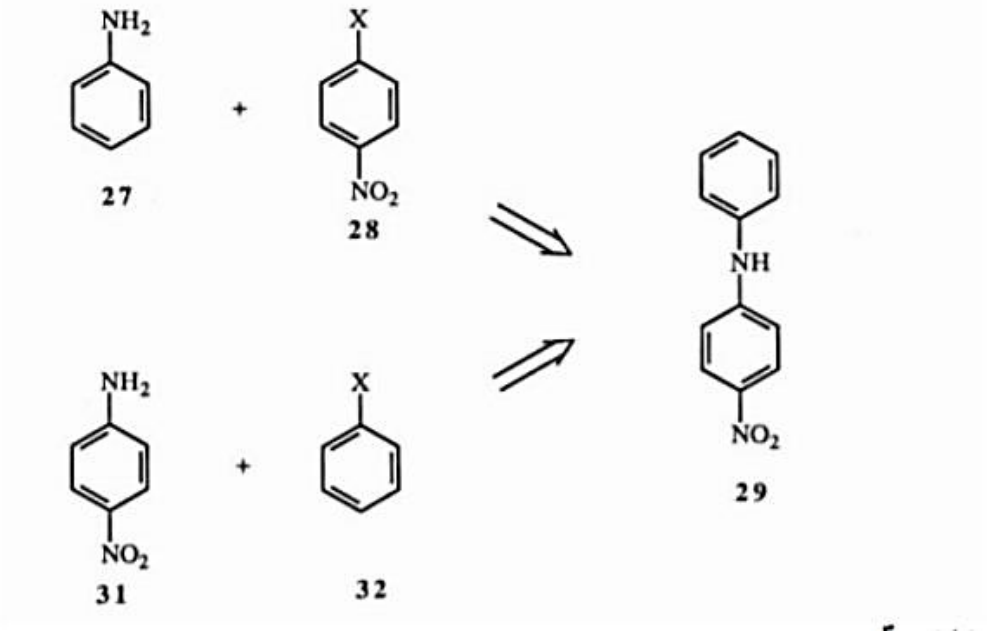


فسر برنامج CAMEO تكوين المركب 20 ولكن لم ينجح في تفسير تكوين المركب 18 توقعت LHASA نواتج تفاعلين للحصول على الكينولين من تكاثف 2–امينوبنزالديهايد مع الاسيتالديهايد والثاني بالإضافة النيوكلوفيلية للاثيلين إلى الاكرولين .



وتوقعتSYNGEN طريقتين فعالتين للحصول على 4–نيتروثنائي فينيل أمين (وتم استبعاد 135 طريقاً آخر) الأول تفاعل الاثيلين مع باراهالونيتروبنزين والثاني بتفاعل بارانيترواثيلين مع هالوبنزين .

Retrosyntheses of 4-Nitrodiphenylamine (29) as Predicted by SYNGEN.



الخلاصة :

لقد ساعدت الأقراص اللينة الخاصة بالكيمياء التخليقية مثل CAMEO,LHASA,SYNGEN على استنتاج التراكيب الكيميائية الصحيحة للمركبات الناتجة صديقة للبيئة فضلاً عن أنها درست ميكانيكيات التفاعلات الكيميائية والتنبأ بالخواص الفيزيائية للمركبات المستهدفة . بالإضافة إلى ذلك نجحت في تصميم طرق التفاعلات الكيميائية التي تؤدي إلى تقليل تلوث البيئة بمعنى أنها ساعدت في الحد من التلوث التي نادت به وكالة حماية البيئة (EPA) .

المصادر

1- Woodhouse E. J. , Breyman S. (2005). "Green chemistry as social movement", Science Technology & Human Values,2,222–199 .

2- Günter, T., and Alpat. S. K. 2017. “The Effects of Problem-Based Learning (PBL) on the Academic Achievement of Students Studying Electrochemistry” ,Chemistry Education Research and Practice ,18 (1), 78–98.

3- Graham, K. J., T. N. Jones, C. P. Schaller, and E. J. McIntee, (2014), “Implementing a Student-Designed Green Chemistry Laboratory Project in Organic Chemistry.” Journal of Chemical Education, 91 (11), 1895–1900.

4- Sheldon R. A., Arends I. W. C. E. ,Hanefeld U. (2007). "Green Chemistry and Catalysis" ,John Wiley & Sons.

5- Karpudewan M. Ismail Z. , Mohamed N. ,(2011), " Greening a chemistry teaching methods course at the school of educational studies", Universiti Sains Malaysia, Journal of Education for Sustainable Development, 5(2), 197-214

6- Clark J. H . ,Luque R., Matharu A. S. (2012). "Green Chemistry, Biofuels, and Biorefinery". Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering , 3,207–183 .

7- "Basics of Green Chemistry", EPA, United states of environmental protection agency.

8- Eilks, I., & Rauch, F. (2012). Sustainable development and green chemistry in chemistry education. Chemistry Education Research and Practice, 13(2), 57-58.

9- Song, J., & Han, B. (2015)," Green chemistry: a tool for the sustainable development of the chemical industry", National Science Review, 2(3), 255-256..

10- Carlson, R. (1962). Silent spring. Houghton Mifflin Co., New York.

11- Browner, C. M. EPA Journal (1993), 19, pp 6-8. Browner, C. M. EPA Journal (1993), 19, pp 6-8.

12 - منى أحمد عبد القادر الزغول (2023) , "الكيمياء الخضراء واستخدامها في مشاريع المجتمع المحلي والبلديات ", مجلة العلوم الإنسانية و الطبيعية , 4(3) , 709-713 .

13- Valavanidis, A. (2016), "Green chemistry and new technological developments", New Avenues for the Green Economy and Sustainable Future of Science and Technology, 1, 1-33.

14- Gujral. S.S, Sheela. M.A, Khattri S., Singhla R.K. "A Focus and Review on the Advancement of Green Chemsitry", Indo Global Journal of Pharmaceutical Science, 2012; 2(4): 397-408.

15- الطاهر الثابت (2019), الكيمياء الخضراء - المخلفات الطبية , كلية التقنية الطبية جامعة طرابلس - ليبيا.

16- Gross, R. A., et. Al. Am. Chem. Soc. (1994), 34 (2), pp 22-9.

17- Forst, J. W., J. Mm. Chem. Soc. (1991) 113, pp. 9361-3.

18- Chang, V. S. et. Al. Appl. Biochem. Biotechnol. (1997) 63-5, 3-19.