الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة التخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان : العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة الطرائق

تخصص: هندسة كيميائية

من إعداد الطلبة:

1- عادل مرغني

2- أحمد رضا برحومة

الموضوع

Deep eutectic solvents: properties and environmental applications within green chemistry framework (A Review)

المذيبات اليوتكتيكية العميقة: الخصائص والتطبيقات البيئية في إطار الكيمياء الخضراء (دراسات مرجعية)

نـــــوقـــشـت فـــي:

أمام لـــــجنـــة المـنـاقـشـة:

أ. همامي هادية	رئيسا	جامعة الوادي
د. دية وحيدة	مناقش	جامعة الوادي
أ. صلاح الدين لعويني	مشرف	جامعة الوادي
د. علية خولة	مساعد مشرف	جامعة الوادي

الموسم الجامعي:2026/2025

الإهداء

إلى كل عثرة علمتني القوة ولم تكن سقوطاً، بل محطة انطلاق. إلى كل حلم قادني إلى هذه اللحظة ولم يكن وهماً، بل خريطة طريق. إلى كل نجاح ذكرني بالتواضع ولم يكن غروراً، بل حافزاً للتقدم. أهدي هذا الإنجاز: إلى قوة "الأمل" الذي لم ينطفئ. إلى جمر "الطموح" الذي لم يخمد.

إلى إصرار "الإرادة" التي حوّلت المستحيل إلى ذكرى. إلى الإنسان المدرك الذي أصبحته بعد هذه الرحلة. هذه الورقة ليست مجرد حبر، بل هي:

قلب أمي الذي خفق بالدعاء حتى آخر ساعة امتحان.. إلى الحنان الذي لا ينضب.

حكاية جدي التي سقاها بالإيمان حتى صارت عقيدة في قلبي.. إلى الحكمة التي لا تُقدّر بثمن.

عرق جبيني الذي اختلط بأحلام الماضي وآمال المستقبل. فهذا الإنجاز هو نتيجة دفء الأول وعمق التاني.

وإلى نفسي.. التي مرت على حافة اليأس ولم تسقط. التي رأت في النجاح مسؤولية لا متعة فقط.

التي آمنت أن وراء الجبل جبلاً آخر، وأن التحدي الأكبر يبدأ من حيث ينتهي الآخرون.

أخيراً.. أقول لكل من رآني في الصغر وأحالني في الكبر، لكل من مدّ لي يد العون أو كلمة الأمل، لكل من ساهم في صناعة هذه اللحظة – الشكر لكل من كان وقود هذه النار:

دّمتم لي ما لا يُقدّر بثمن، وأنا أردّه حرفاً من نور في سفر نجاحي، ووعداً من القلب بأن تكون الخطوات القادمة أكثر إشراقاً وإنجازاً. فهذا الإنجاز.. هو لكم، ومنكم، وإليكم.

عادل

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من كان دعاؤهما سر نجاحي وسندي في كل خطوة، والديّ العزيزين حفظهما الله.

إلى إخوتي وأخواتي وكل أفراد عائلتي الذين أحاطوني بالمحبة والدعم.

إلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا لي طريق العلم والمعرفة.

إلى كل صديق وقف إلى جانبي وشجعني على مواصلة مسيرتي.

أهدي هذا العمل المتواضع، ثمرة سنوات من الجد والاجتهاد، راجياً من الله أن يجعله بدايةً لمزيد من النجاح والتوفيق

أحمد

شكر وعرفان

"الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين.

أتقدم بخالص عبارات الشكر والتقدير والامتنان إلى الأستاذ الفاضل **أ .صلاح الدين لعويني** و **د .علية خولة**، اللذين تفضلا بالإشراف على هذا العمل، ولم يبخلا علينا بتوجيهاتهما القيمة، وملاحظاتهما الدقيقة، ونصائحهما السديدة، فكانا نعم السند والموجه.

كما لا يفوتني أن أتوجه بأسمى آيات الشكر والتبجيل إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرة، لتحملهم عناء قراءة هذا العمل وتصويبه.

ولا يسعني في هذا المقام إلا أن أتقدم بعبارات الشكر والاعتراف بالجميل إلى كل أساتذتي الأفاضل في جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي، الذين نهلنا من علمهم طيلة مسارنا الجامعي.

شكراً لكل من ساهم في إتمام هذا العمل، من قريب أو من بعيد."

الرمز	المعنى
DES	المذيبات اليوتكتيكية العميقة(Deep Eutectic Solvents)
DESs	المذيبات اليوتكتيكية العميقة (تسمية بديلة للمذيبات العميقة سهلة الانصهار)
NADES	المذيبات اليوتكتيكية العميقة الطبيعية(Natural Deep Eutectic Solvents)
HBA	مستقبل للرابطة الهيدروجينية(Hydrogen Bond Acceptor)
HBD	مانح للرابطة الهيدروجينية(Hydrogen Bond Donor)
VOCs	المركبات العضوية المتطايرة(Volatile Organic Compounds)
LCA	تقييم دورة الحياة(Life Cycle Assessment)

قـــــــــــــــــــــائمـــــــة الأشكـــــــــــــــــــال

العنـــــــــــــوان	الصفحة
الـــــــــــفصل الأول: المـــذيبـــات العميـــقـــة اليوتكتيكية (DES)	
الشكل (I.1.): العلاقة بين البنية والخواص والتطبيق	5

قـــــائـمة الجـــداول

العنـــــــــــــــوان	الصفحة
الـــــــفصل الأول: المـــذيبـــات العميـــقـــة الـــــــيوتيـــكتيـــــة (DES)	
الجدول (1.I): **أنواع المذيبات اليوتيكتية العميقة القديمة**	9
الجدول (2.I): تقييم مقارن لكفاءة استخلاص الملوثات المائية باستخدام أنظمة **DES** المتقدمة	24
الفـــصـــــــل الـــثاني: تحليل دراسات ســـابقة	
الجدول (1.II): **ملخص الدراسات لتطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في معالجة المياه العادمة واستخلاص الملوثات.**	50
الجدول (2.II): **ملخص الدراسات حول تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في احتجاز الغازات والانبعاثات الصناعية.**	60
الجدول (3.II): **ملخص الدراسات حول تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في تثمين الكتلة الحيوية والنفايات الصناعية.**	71
الجدول (4.II): **ملخص الدراسات حول التخليق الأخضر للمواد النانوية والتحفيز البيئي باستخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة.**	81

العنوان	رقم الصفحة
الإهـــــــداء	
شكـــــر وعـرفـــــان	
قـــــائمـــة الرمـــوز	
قـــــائمـــة الأشكـــال	
قـــــائمـــة الجـــداول	
الـفهـــــرس	
الملخص	
المـــقدمة العـــــامة	2
الفصل الأول: المـذيبـات العميـقـة اليوتكتيكية (DES)	
تمهيد	4
I.1. تعريف المذيبات اليوتكتيكية العميقة	4
I.2. نشأة المذيبات اليوتكتيكية العميقة وأهميتها كبدائل خضراء	5
I.3. التعريف العلمي والتقني للمذيبات اليوتكتيكية العميقة	6
I.4. تصنيف المذيبات اليوتكتيكية العميقة	7
I.1.4. الأنواع التقليدية (Types I–V)	7
I.5. الأساس النظري لظاهرة اليوتكتيكية وانخفاض درجة الانصهار	12
I.6. آلية تكوّن الروابط الهيدروجينية ودورها في استقرار البنية الفوق جزيئية	13
I.7. الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة	14
I.1.7. البنية الجزيئية والديناميكا الحرارية للروابط الهيدروجينية	14
I.2.7. الخصائص الحرارية وانحراف درجة الانصهار	14
I.3.7. اللزوجة والكثافة ونظرية الثقوب(Hole Theory)	14
I.4.7. القطبية والقدرة الإذابية الانتقائية	15
I.5.7. التوصيلية والنافذة الكهروكيميائية	15
I.8. المذيبات اليوتكتيكية العميقة في إطار الكيمياء الخضراء	16
I.1.8. مبادئ الكيمياء الخضراء الاثنا عشر	16
I.2.8. تحليل مدى توافق المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) مع مبادئ الكيمياء الخضراء	18
I.3.8. تقييم السمية وقابلية التحلل الحيوي	20
I.4.8. الاستدامة والجدوى البيئية	21
I.9. التطبيقات البيئية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة	22
I.1.9.تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في المعالجة البيئية للمياه	22
I.2.9. استراتيجيات استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة في معالجة المياه العادمة	24
I.3.9. استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة في التقاط الغازات الملوّثة(CO_2, SO_2)	26
I.4.9. معالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية والصناعية	28
I.5.9. دور المذيبات اليوتكتيكية العميقة في التخليق الأخضر والتحفيز البيئي	29
I.10. مزايا وتحديات المذيبات اليوتكتيكية العميقة(DES)	31
I.1.10. المزايا التقنية والبيئية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة	31
I.2.10. القيود والتحديات العملية في استخدامDES	31
I.3.10. آفاق البحث والتطوير والتطبيقات الصناعية المستقبلية	32
خلاصة الفصل	33
مراجع الفصل	34

الفصل الثاني: تحليل دراسات سابقة	
تمهيد	42
II.1.المحور الأول: دراسات سابقة حول استخدام DES في معالجة المياه العادمة واستخلاص الملوثات	42
II.2. المحور الثاني: دراسات سابقة حول استخدام DESفي احتجاز الغازات الملوثة والانبعاثات الصناعية	51
II.3. المحور الثالث: دراسات سابقة حول دور الـ DES في معالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية والصناعية	62
II.4. المحور الرابع: دراسات سابقة حول استخدام الـ DES في التخليق الأخضر للمواد النانوية والتحفيز البيئي	73
خلاصة الفصل	84
قائمة المراجع	86
الخاتمة	

الملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة نظرية وتحليلية شاملة حول المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DESs)، تهدف إلى تفكيك أسسها الثرموديناميكية وتقييم كفاءتها التطبيقية في القطاعات البيئية، يوضح الفصل الأول الآلية المجهرية للانخفاض الحاد في درجات الانصهار، والناتج عن انخفاض الجهد الكيميائي للمزيج والحيود السلبي عن السلوك المثالي، بالتوازي مع نشوء شبكة روابط هيدروجينية بين مستقبلات الروابط الهيدروجينية (HBAs) ومانحيها (HBDs) تعمل على تفكيك طاقة الشبكة البلورية للمواد النقيّة وتثبيت الطور السائل، بالإضافة إلى استعراض تصنيفاتها الخمسة الحديثة وخواصها الفيزيائية والكيميائية. بينما يركز الفصل الثاني على التحليل المقارن لنتائج توظيف هذه المذيبات، ولا سيما الطبيعية (NADES) والكارهة للماء (Hydrophobic DES)، في تنقية المياه العادمة، واحتجاز الغازات الصناعية، وتثمين النفايات العضوية بناءً على الأبحاث المنشورة بين عامي 2024 و2026. وتختم المذكرة بتحديد القيود البنيوية كارتفاع اللزوجة والامتصاص الذاتي للرطوبة، مع تقديم توصيات تدعم المحاكاة الحاسوبية وتطوير استراتيجيات مغلقة لإعادة تدوير المذيب واسترجاعه.

كلمات مفتاحية: المذيبات اليوتكتيكية العميقة، الروابط الهيدروجينية، الثرموديناميكا، التطبيقات البيئية.

Abstract

This thesis presents a comprehensive theoretical and analytical study on Deep Eutectic Solvents (DESs), aiming to deconstruct their thermodynamic foundations and evaluate their application efficiency in environmental sectors. The first chapter elucidates the microscopic mechanism behind the sharp depression in melting points, resulting from the decrease in the chemical potential of the mixture and the negative deviation from ideal behavior, in tandem with the formation of a hydrogen-bonded network between hydrogen bond acceptors (HBAs) and hydrogen bond donors (HBDs) that disrupts the crystal lattice energy of the pure substances and stabilizes the liquid phase, additionally reviewing their five modern classifications alongside their physicochemical properties. Meanwhile, the second chapter focuses on a comparative analysis of the outcomes of employing these solvents particularly Natural Deep Eutectic Solvents (NADES) and Hydrophobic DESs in wastewater purification, industrial gas capture, and organic waste valorization, based on research published between 2024 and 2026. Ultimately, the thesis concludes by identifying structural limitations, such as high viscosity and self-hygroscopicity, while offering recommendations that support computer-aided simulations and the development of closed-loop strategies for solvent recycling and recovery.

Keywords: Deep Eutectic Solvents, Hydrogen Bonding, Environmental Applications.

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

أصبحت قضايا الاستدامة البيئية والحد من التأثيرات السلبية للمواد الكيميائية على الإنسان والبيئة من أبرز التحديات التي تواجه العلوم الكيميائية في القرن الحادي والعشرين. وفي هذا السياق، برز مفهوم الكيمياء الخضراء كإطار علمي يهدف إلى تطوير عمليات ومنتجات كيميائية أكثر أمانًا وكفاءة، مع تقليل استهلاك الموارد الطبيعية والحد من إنتاج الملوثات والنفايات الخطرة. ومن بين أهم المحاور التي حظيت باهتمام متزايد في هذا المجال البحث عن بدائل للمذيبات العضوية التقليدية المتطايرة (Volatile Organic Compounds, VOCs)، والتي ترتبط في كثير من الحالات بمشكلات تتعلق بالسُمية، وقابلية الاشتعال، والانبعاثات البيئية الضارة.

في هذا الإطار، ظهرت المذيبات اليوتكتيكية العميقة وتسمى ايضا مذيبات عميقة سهلة الانصهار(Deep Eutectic Solvents, DESs) كفئة واعدة من المذيبات الحديثة، حيث تتميز بسهولة التحضير، وانخفاض التكلفة النسبية لمكوناتها، وإمكانية تصميم خصائصها الفيزيائية والكيميائية بما يتلاءم مع متطلبات التطبيقات المختلفة. وقد أدى هذا التنوع في الخصائص إلى توسيع نطاق استخدامها في العديد من المجالات، بما في ذلك الاستخلاص، والتحفيز، والكيمياء التحليلية، ومعالجة الملوثات البيئية، وتثمين الكتلة الحيوية. ومع ذلك، فإن تقييم مدى توافق هذه المذيبات مع مبادئ الكيمياء الخضراء ما يزال موضوعًا للنقاش العلمي، خاصة فيما يتعلق بالجوانب المرتبطة بالسمية، وقابلية التحلل الحيوي، والجدوى الاقتصادية والبيئية على المدى الطويل.

ونظرًا للتطور السريع الذي شهدته الأبحاث المتعلقة بالمذيبات العميقة (سهلة الانصهار) خلال السنوات الأخيرة، أصبح من الضروري تجميع وتحليل المعارف العلمية المتاحة بصورة منهجية تسمح بفهم أسس تكوين هذه المذيبات وخصائصها، بالإضافة إلى تقييم إمكاناتها التطبيقية وحدود استخدامها. ومن هذا المنطلق، تهدف هذه المذكرة إلى تقديم دراسة نظرية شاملة حول هذه المذيبات، من خلال عرض الأسس العلمية التي تقوم عليها وتحليل أهم الاتجاهات البحثية المرتبطة بها.

ولتحقيق هذا الهدف، جرى تنظيم هذا العمل في فصلين رئيسيين متكاملين:

- **الفصل الأول:** الإطار النظري والأسس العلمية للمذيبات اليوتيكتية العميقة ويتطرق هذا المبحث إلى تفكيك الخلفية العلمية المرتبطة بهذه الأنظمة، بدءاً من نشأة مفهوم المذيبات الخضراء وتطور المسار التاريخي للمذيبات اليوتيكتية العميقة، مروراً بالتعريف العلمي الدقيق لها وتصنيفاتها الخمسة المعتمدة حديثاً بناءً على طبيعة مكوناتها. كما يفرد الفصل مساحة علمية معقدة لدراسة الأسس الثرموديناميكية والآليات الجزيئية المجهرية لتكونها، ودور تآثرات شبكة الروابط الهيدروجينية والقوى فوق الجزيئية

البينية في خلخلة طاقة الشبكة البلورية للمواد النقية واستقرار بنيتها السائلة، وصولاً إلى خصائصها الفيزيائية والكيميائية المحورية مع عرض طرق تحضيرها وتقنيات توصيفها المخبري، والتمييز المنهجي بينها وبين عائلة السوائل الأيونية التقليدية.

- **الفصل الثاني:** التحليل النقدي والمنهجي للدراسات والأبحاث الحديثة في التطبيقات البيئية ويعنى هذا الفصل بالدراسة التحليلية والمقارنة المعمقة لأحدث الأعمال العلمية المنشورة في هذا المجال (بين عامي 2024 و2026). ويركز هذا الجزء على تقييم ومقارنة نتائج الأبحاث التجريبية المتعلقة بتوظيف المذيبات اليوتيكتية العميقة، والأنظمة الطبيعية منها (NADES)، في مجالات بيئية وتكنولوجية حاسمة؛ تشمل معالجة المياه العادمة وفصل الملوثات الدقيقة، واحتجاز الغازات والانبعاثات الصناعية، ومعالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات. وينتهي الفصل ببلورة رؤية نقدية تحدد أبرز نقاط القوة والقيود الحالية لـ DESs، مع استشراف الآفاق والتوجهات المستقبلية لتطوير هذه التكنولوجيا المستدامة.

ومن خلال الجمع بين التأصيل النظري والتحليل النقدي للأدبيات العلمية، يسعى هذا العمل إلى تقديم رؤية شاملة ومتوازنة حول المذيبات اليوتكتيكية العميقة (المذيبات العميقة سهلة الانصهار)، وتقييم مكانتها ضمن البدائل المذيبية الحديثة التي تحظى باهتمام متزايد في إطار التوجهات المعاصرة نحو الكيمياء المستدامة.

الفصل الأول:

المدبيات العميقة

البوتكيكية (DES)

تشهد الصناعة الكيميائية الحديثة تحولا جذريا نحو تبني مبادئ "الكيمياء الخضراء"، مدفوعة بالحاجة الملحة لتقليل الأثر البيئي للعمليات الصناعية والاعتماد على مواد أكثر استدامة، وفي هذا السياق برزت المذيبات اليوتكتيكية العميقة (Deep Eutectic Solvents - DES) كجيل واعد من الوسائط السائلة التي تجمع بين البساطة، التكلفة الاقتصادية المنخفضة، والخصائص الفيزيائية والكيميائية الفريدة. لا تقتصر أهمية هذه المذيبات على كونها بدائل صديقة للبيئة للمذيبات العضوية التقليدية السامة، بل تمتد لتلعب دوراً استراتيجياً في تعزيز أداء العمليات عبر آليات تحفيزية وتفاعلية متقدمة. يستعرض هذا الفصل الخصائص الجوهرية لهذه الأنظمة اليوتكتيكية، ويسلط الضوء على تطبيقاتها المتعددة التي تتراوح من احتجاز الغازات الدفيئة وتثمين النفايات العضوية، وصولا إلى التخليق الأخضر للمواد النانوية، مع تحليل نقدي للتحديات التي تواجه انتقالها من النطاق المختبري إلى الممارسة الصناعية الشاملة.

I.1. تعريف المذيبات اليوتكتيكية العميقة:

ظهَرت المذيبات العميقة لأول مرة عام 2001 كبديل واعد للسوائل الأيونية، إثر ملاحظة "أبوت" (Abbott) وزملاءه انخفاضا حادا في درجة انصهار مزيج كلوريدات المعادن وأملاح الأمونيوم الرباعية[1]، ورغم صياغة هذا المصطلح عام 2003، تباينت تعاريف الباحثين لتوصيف آليتها، حيث أرجعها "تشانغ" (Zhang) إلى تشكّل روابط هيدروجينية بين المكونات [2]، بينما ربطها "فرانسيسكو" (Francisco) بتناقص فرق الإنتروبيا أثناء انتقال الطور [3]، واعتبرها "سميث" (Smith) أنظمة مكونة من أحماض وقواعد "لويس" أو "برونستد" [4]، في حين ركّز "بايفا" (Paiva) على شرط الانخفاض الكبير في درجة انصهار الخليط مقارنة بمكوناته النقية[5].

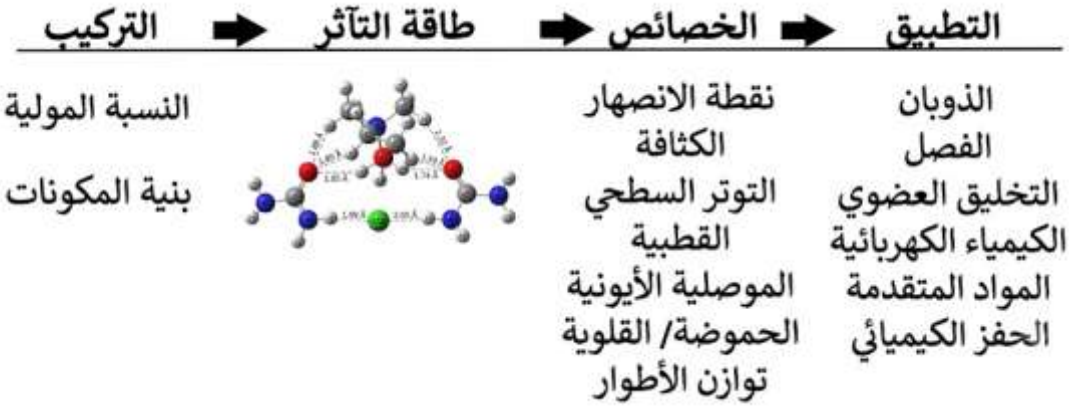
وتعتمد البنية العامة لهذه الأنظمة على شبكة روابط هيدروجينية تجمع مكوناتها، والتي تتكون غالباً من ملح أمونيوم رباعي ذي طاقة شبكية منخفضة ومكون مانح للرابطة الهيدروجينية (HBD)، حيث تمنح هذه الشبكة الترابطية النظام استقرارا وتمركزا للشحنة يؤدي مباشرة إلى خفض درجة الانصهار، لمزيج كلوريد الكولين واليوريا.

وامتداداً لهذا التطور، قدّم "تشوي" (Choi) عام 2011 المذيبات اليوتكتية العميقة الطبيعية (NADES) كفئة فرعية مشتقة من مصادر حيوية كالأيضات الأولية، الأحماض الكربوكسيلية والأمينية، والسكريات [6]، وافترض الباحثون وجودها كطور سائل ثالث في الكائنات الحية، ما يفسر حيوياً آليات

التخليق الحيوي للجزيئات ضعيفة الذوبان في الخلايا المائية، أو قدرة تلك الكائنات على البقاء في البيئات القاحلة.

ويحمل استبدال المذيبات التقليدية بـــ (NADES) مزايا بيئية واقتصادية هامة، فهي غير متطايرة، وغير قابلة للاشتعال [5]، ومنخفضة التكلفة والسمية، فضلاً عن قابليتها العالية للتحلل البيولوجي، وإمكانية تحضيرها باقتصاد ذري يصل إلى 100% [2]، نتيجة لذلك، يعد قطاع الصناعة الكيميائية الحيوية المجال الأكثر استقطاباً لتطبيقاتها، حيث توفر وسطا تفاعليا حيويا يعزز كفاءة واستقرار الحفز الإنزيمي[7].

تكمن الميزة الاستراتيجية لهذه الأنظمة في إمكانية توظيفها "كمذيبات مصممة" (Designer solvents) [3] لضبط وتفصيل خصائصها الفيزيائية والكيميائية عبر تعديل نسب مكوناتها، حيث يوضح **الشكل (I.1.)** العلاقة المفاهيمية بين بنيتها، خواصها، والتطبيق المنشود.



الشكل (I.1.): العلاقة بين البنية والخواص والتطبيق [4]

I.2. نشأة المذيبات اليوتكتيكية العميقة وأهميتها كبدائل خضراء

لم يكن ظهور المذيبات الخضراء مجرّد استجابة لضغوط بيئية أو تشريعات تنظيمية، بل كان نتيجة حتمية لحاجة تقنية وعلمية ملحّة لتجاوز القيود الجوهرية للمذيبات العضوية التقليدية. فقد شكّلت المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) لسنوات طويلة العمود الفقري للعمليات الكيميائية، غير أن خصائصها الفيزيائية خاصة ضغط البخار المرتفع وقابليتها للاشتعال جعلتها مصدراً رئيسيًا لانبعاثات ملوِّثة تسهم في تكوين الضباب الدخاني، وتعزيز ظاهرة الاحتباس الحراري، وتلويث المياه الجوفية.

جاء التحول المفاهيمي الحقيقي مع نشر مبادئ الكيمياء الخضراء الاثني عشر عام 1998 على يد أنستاس ووارنر[8]، حيث نصّ المبدأ الخامس صراحةً على ضرورة استخدام "مذيبات ومواد مساعدة أكثر أماناً". لم يكن هذا المبدأ توصية تقنية فحسب، بل إعلاناً عن بداية مرحلة جديدة في تصميم المواد الكيميائية، تقوم على تقليل المخاطر منذ مرحلة التصميم وليس بعد الإنتاج.

في التسعينيات، ظهرت السوائل الأيونية (Ionic Liquids) كجيل أول من المذيبات البديلة، نظراً لانخفاض ضغط بخارها واستقرارها الحراري العالي[9]. إلا أن هذه الأنظمة، رغم تفوقها من الناحية الفيزيائية، واجهت تحديات عملية تمثلت في ارتفاع تكلفتها، وتعقيد طرق تحضيرها، إضافة إلى مخاوف بيئية مرتبطة بصعوبة تحلل بعض مكوناتها وسمّيتها البيولوجية في بعض الحالات.[10]

التحول الجذري حدث عام 2003، عندما أظهر البروفيسور Andrew Abbott وزملاؤه أن مزج مواد صلبة بسيطة ورخيصة الثمن[11]، مثل كلوريد الكولين واليوريا بنسبة مولية محددة يؤدي إلى تكوين سائل مستقر عند درجة حرارة الغرفة. هذا الاكتشاف لم يكن مجرد ظاهرة فيزيائية غير متوقعة[2, 11]، بل نقل مفهوم تصميم المذيبات من مرحلة "الهندسة الأيونية المعقدة" إلى مرحلة "التصميم الوظيفي البسيط"، حيث يمكن ضبط خصائص المذيب عبر التحكم في طبيعة المكونات ونسبها.

وهكذا ولدت المذيبات اليوتكتيكية العميقة بوصفها جيلا جديدا من المذيبات القابلة للتخصيص، منخفضة التكلفة، ومرتبطة فلسفياً بمبادئ الاستدامة.

I.3.التعريف العلمي والتقني للمذيبات اليوتكتيكية العميقة

تعرف المذيبات اليوتكتيكية العميقة بأنها أنظمة متعددة المكونات تتكون من مزج مستقبل للرابطة الهيدروجينية (Hydrogen Bond Acceptor, HBA) مع مانح للرابطة الهيدروجينية (Hydrogen Bond Donor, HBD) بنسبة مولية محددة تؤدي إلى تكوين طور سائل مستقر عند درجة حرارة أقل بكثير من درجات انصهار المكونات النقية.

من الناحية البنيوية، لا يعد DES مجرد خليط فيزيائي، بل نظاماً تآثرياً تنشأ فيه شبكة كثيفة من الروابط الهيدروجينية، تؤدي إلى اضطراب الترتيب البلوري للمكونات الصلبة، وانخفاض ملحوظ في طاقة الشبكة البلورية، ومن ثم انهيارها.

4.I. تصنيف المذيبات اليوتكتيكية العميقة

المذيبات اليوتكتيكية العميقة ليست عائلة متجانسة، بل أنظمة متنوعة تصنف وفق طبيعة المكونات الكيميائية الداخلة في تركيبها (المستقبل والمانح)، ويجمع الباحثون على تقسيمها إلى خمسة أنواع رئيسية، إضافة إلى فئة خاصة تُعرف بالمذيبات اليوتكتيكية الطبيعية[12].

1.4.I. الأنواع التقليدية (Types I–V)

– النوع الأول (Type I)

يتكون هذا النوع من خلط ملح كواتيرناري (مثل كلوريد الكولين) مع ملح معدني غير مائي مثل $ZnCl_2$ أو $SnCl_2$، حيث يتميز بقدرة عالية على معالجة وإذابة المعادن وتشكيل معقدات مستقرة، ورغم استقراره الحراري الجيد، وكثافته ولزوجته المرتفعة نسبيا بسبب وجود الأملاح المعدنية، إلا أنه يعد أقل توافقا مع مبادئ الكيمياء الخضراء نظرا لمكوناته المعدنية، وقد يكون تآكليا عند التعامل مع بعض المعادن الحساسة[13].

- **النوع الثاني(Type II)**

يأتي هذا النوع مشابها للنوع الأول، غير أنه يستخدم أملاحا معدنية مميهة (Hydrated metal halides) مثل $CoCl_2.6H_2O$، مما يجعله أكثر سهولة في التحضير بسبب وجود الماء في البنية، فضلا عن تميزه بانخفاض التكلفة وإمكانية التحضير في ظروف المختبر العادية. ويمتلك هذا النوع استقرارا متوسطا مع قابلية للتأثر بالرطوبة، إلى جانب قدرة جيدة على إذابة بعض المركبات العضوية والمعدنية[13]

- **النوع الثالث(Type III)**

يعد هذا النوع الأكثر شيوعا في الكيمياء الخضراء والتطبيقات الحيوية، حيث يتكون من ملح كواتيرناري (غالبا كلوريد الكولين) ممزوجا مع مانح للرابطة الهيدروجينية (HBD) مثل اليوريا، الغليسرول[14]، أو الأحماض الكربوكسيلية. ويتميز بكونه صديقا للبيئة، وقابلا للتحلل الحيوي، وغير

سام، كما يتميز بلزوجة عالية وقطبية قوية تمنحه قدرة كبيرة على إذابة المركبات العضوية واللاعضوية، فضلا عن استقراره الحراري الجيد مع إمكانية تعديل خصائصه عبر تغيير المانح.

- **النوع الرابع(Type IV)**

يختلف هذا النوع عن سابقيه بعدم احتوائه على أملاح الأمونيوم الرباعية، إذ يتكون من خلط ملح معدني مثل $AlCl_3$، مباشرة مع مانح للرابطة الهيدروجينية مثل اليوريا، ويستخدم أساسا في تطبيقات الطلاء الكهربائي واستخلاص المعادن، ويتميز بقدرة قوية على تكوين معقدات معدنية مستقرة، وقدرة عالية على إذابة المعادن الثقيلة، كما أنه يعد أكثر تفاعلية كيميائيا مقارنة بالأنواع الأخرى[15].

- **النوع الخامس(Type V)**

يمثل هذا النوع أحدث الأنواع التي عرفت رسميا عام 2020، ويتكون بالكامل من جزيئات عضوية غير أيونية (Non-ionic) مثل خلط المنثول مع الثيمول، ويتميز بخصائص كارهة للماء (Hydrophobic) تمنحه استقرارا جيدا في الأوساط المائية، مما يجعله مثاليا لاستخلاص الملوثات العضوية، كما يمتاز بلزوجة منخفضة نسبيا مقارنة بالأنواع الأخرى، مع إمكانية تعديل خصائصه عبر اختيار المكونات العضوية المختلفة[12].

I.2.4. المذيبات اليوتكتيكية الطبيعية

تتكون هذه المذيبات حصريا من نواتج الأيض الأولية للنباتات مثل السكريات، الأحماض الأمينية، والأحماض العضوية، حيث تحاكي الوسط السائل داخل الخلايا الحية[6]، مما يمنحها سمية منعدمة واستقرارا بيولوجيا ممتازا وتوافقا كاملا مع الأنظمة الحيوية، فضلا عن قابليتها العالية للتحلل البيولوجي بشكل كامل، ونتيجة لتميزها بقدرة عالية على إذابة المركبات الحيوية مثل البروتينات والإنزيمات[16]، واستدامتها وملاءمتها البيئية، فإنها تعتبر الخيار الأول في تطبيقات الصناعات الغذائية والدوائية والتجميلية

الجدول (I.1.): أنواع المذيبات اليوتكتيكية العميقة القديمة

نوع المذيب	المكونات (HBA + HBD/ ملح معدني)	النسب المولية	الاستعمال في الدراسة	المرجع
النوع الأول (Type I)	كلوريد الكولين + كلوريد الزنك ($ZnCl_2$)	1:2	تدوير بطاريات الليثيوم (LIBs) واستخلاص المعادن	[16]
	كلوريد الكولين + كلوريد القصدير ($SnCl_2$)	1:2	معالجة النفايات الإلكترونية والطلاء الكهربائي	[17]
	كلوريد الكولين + كلوريد الحديد ($FeCl_3$)	1:2	تحضير مذيبات مغناطيسية لإزالة الكبريت	[4]
	كلوريد الكولين + كلوريد الألومنيوم ($AlCl_3$)	1:2	الطلاء الكهربائي للألومنيوم في درجات حرارة منخفضة	[2]
	كلوريد الإيثيل أمونيوم + $AlCl_3$	1:2	وسيط تفاعل في كيمياء البوليمرات والألكلة	[4]
	كلوريد الكولين + كلوريد النحاس ($CuCl_2$)	1:2	استخلاص النحاس من الخامات المعدنية	[2]
	كلوريد ميثيل ثلاثي بيوتيل أمونيوم + $FeCl_3$	1:2	إزالة الملوثات الكبريتية من الوقود السائل	[2]
	كلوريد الكولين + كلوريد الكروم ($CrCl_3$)	1:1	طلاء الكروم الصناعي الصديق للبيئة	[18]
	كلوريد الكولين + كلوريد الفضة ($AgCl$)	1:2	ترسيب الجسيمات النانوية للفضة	[19]
	كلوريد الكولين + كلوريد النيكل ($NiCl_2$)	1:2	تحليل سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ	[20]
النوع الثاني (TypeII)	كلوريد الكولين $CoCl_26H_2O$+	1:2	استخلاص الكوبالت من كاثودات البطاريات التالفة	[21]
	كلوريد الكولين+ $MgCl_2$ $6H_2O$	1:2	تحفيز تفاعلات التخليق العضوي الأخضر	[22]
	كلوريد الكولين + $CaCl_2$ $6H_2O$	1:2	مذيب وسيط في الكيمياء المستدامة	[23]

	كلوريد الكولين + $CrCl_3$ $6H_2O$	1:2	الطلاء الكهربائي للكروم التكافؤي	[24]
	كلوريد الكولين + $FeCl_3$ $6H_2O$	1:2	استخلاص المعادن من النفايات الصلبة	[24]
	كلوريد الكولين + $NiCl_2$ $6H_2O$	1:2	استرداد النيكل من بطاريات الـــ Ni-MH	[25]
	كلوريد الكولين + $CuCl_2$ $2H_2O$	1:2	أكسدة المركبات العضوية المعقدة	[26]
	كلوريد الكولين + $ZnCl_2$ H_2O	1:2	تحلل البوليمرات البلاستيكية (تدوير البلاستيك)	[27]
	كلوريد الكولين + $AlCl_3$ $6H_2O$	1:2	تنقية الغازات الصناعية من ثاني أكسيد الكربون	[28]
	كلوريد الكولين + $MnCl_2$ $4H_2O$	1:2	إنتاج الأكاسيد المعدنية النانوية وصبغ المنسوجات	[29]
النوع الثالث (Type III)	كلوريد الكولين + يوريا (ChCl:U)	1:2	استخلاص الأنتوسيانين من التوت الأسود	[30]
	كلوريد الكولين + حمض الستريك	1:1	استخلاص الكيتين من قشور الروبيان	[31]
	كلوريد الكولين + غليسرول	1:2	استخلاص الفينولات من نبات السماق	[30]
	كلوريد الكولين + حمض الماليك	1:1	استخلاص الأنتوسيانين من زهور لسان الثور	[30]
	كلوريد الكولين + إيثيلين غليكول	1:2	ترشيح المعادن (Li, Co) من البطاريات	[21]
	كلوريد الكولين + حمض الأوكساليك	1:1	استخلاص الأنتوسيانين من قشور الفواكه	[30]
	كلوريد الكولين + حمض اللاكتيك	1:2	إزالة البروتينات والمعادن من المخلفات البحرية	[31]
	البيتاين + الغليسرول	1:2	تطبيقات في مستحضرات التجميل الخضراء	[32]

	حمض الماليك + الغلوكوز + ماء	1:1:2	استخلاص المركبات النشطة من الروزماري	[32]
	كلوريد الكولين + حمض الـــ pTSA	1:2	التجديد المباشر لكاثودات بطاريات LFP	[33]
النوع الرابع (Type IV)	كلوريد الزنك + يوريا	1:3.5	استرداد كاثودات البطاريات (LCO)	[34]
	كلوريد الألومنيوم + يوريا	1:2	الطلاء الكهربائي للألومنيوم وتصنيع المواد النانوية	[35]
	كلوريد الألومنيوم + أسيتاميد	1:2	تكنولوجيا البطاريات الثانوية المتطورة	.[36]
	كلوريد النحاس + غليسرول	1:3	تحفيز تفاعلات الربط العضوي	[37]
	نترات الكالكالسيوم + يوريا	1:4	وسيط لنقل الحرارة في الأنظمة الشمسية	[38]
	كلوريد الحديد + غليسرول	1:2	استخلاص الكبريت من الغاز الطبيعي	[39]
	كلوريد الخارصين + إيثيلين غليكول	1:4	التخليق الكيميائي النانوي للمواد الكهرومغناطيسية	[40]
	كلوريد المغنيسيوم + حمض الستريك	1:2	تنقية المركبات العضوية في الصناعات الدوائية	[41]
	كلوريد القصدير + يوريا	1:2	تحفيز إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات	[42]
	كلوريد الكوبالت + أسيتاميد	1:3	مجسات كيميائية حرارية ذكية	[43]
النوع الخامس (Type V)	ل–منثول + حمض الفورميك	1:1	استخلاص الكادميوم من عينات الشاي	[41]
	منثول + حمض الديكانويك	1:2	استخلاص الزنك والكادميوم من الزيوت	[44]
	منثول + ثيمول	1:1	استخلاص الملوثات العضوية من الماء	[45]

	ثيمول + حمض الديكانويك	1:1	إزالة الأصباغ السامة من المياه العادمة	[46]
	منثول + حمض الأوكتانويك	1:2	فصل المعادن الثقيلة من عينات بيئية مائية	[44]
	كامفور + ثيمول	1:1	تطبيقات في الصناعات الصيدلانية (توصيل الدواء)	[47]
	ليدوكائين + حمض الديكانويك	1:2	أنظمة توصيل الأدوية عبر الجلد	[47]
	منثول + حمض اللاكتيك	1:1	استخلاص المركبات الكارهة للماء من النباتات	[47]
	كافيين + حمض الأوكساليك	1:2	تنقية الجزيئات الحيوية في الصناعات الغذائية	[48]
	ثيمول + كوليسترول	2:1	دراسة استقرار الأغشية الخلوية الحيوية	[49]

I.5. الأساس النظري لظاهرة اليوتكتيكية وانخفاض درجة الانصهار

لفهم الطبيعة "العميقة" لانخفاض درجة الانصهار في المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES)، لا بد من الرجوع إلى المبادئ الأساسية للديناميكا الحرارية للأنظمة متعددة المكونات. ففي الأنظمة الثنائية المثالية، يصف قانون راؤول سلوك الطور السائل باعتباره ناتجاً عن امتزاج مكونين دون تأثرات خاصة، حيث يؤدي المزج إلى انخفاض تدريجي في درجة الانصهار نتيجة التخفيف (dilution effect) ، غير أن هذا الانخفاض يكون محدوداً ويمكن التنبؤ به من خلال العلاقات المثالية للاتزان الطوري[14].

أما في حالة DES، فإن النظام ينحرف بشكل ملحوظ عن السلوك المثالي، ويظهر ما يعرف بالانحراف السالب الكبير عن قانون راؤول ويعني ذلك أن التأثرات بين المكونات المختلفة أقوى بكثير من التأثرات بين الجزيئات المتشابهة، مما يؤدي إلى استقرار إضافي للطور السائل. نتيجة لذلك، تنخفض درجة الانصهار إلى قيم أقل بكثير من تلك المتوقعة، وقد يتجاوز الفرق مائة درجة مئوية مقارنة بالمكونات النقية[4].

من ناحية البنية المجهرية، تفسّر "نظرية الثقوب" (Hole Theory) سيولة هذه الأنظمة. تفترض هذه النظرية أن السائل يحتوي على فجوات ديناميكية عشوائية تتشكل نتيجة إعادة ترتيب الجزيئات تحت

تأثير الروابط الهيدروجينية والتآثرات الأيونية. تتحرك الجزيئات أو الأيونات داخل هذه الفجوات، ويحدد توزيعها الديناميكي خصائص النظام مثل اللزوجة، ومعامل الانتشار، والناقلية الأيونية. كلما زاد عدد الفجوات الحرة أو ازداد حجمها النسبي، انخفضت اللزوجة وتحسنت قابلية الانتقال الجزيئي.

أما نقطة اليوتيكتيك، فهي تمثل التركيب الذي يبلغ عنده النظام أدنى قيمة لطاقة جيبس الحرة ضمن مخطط الطور الثنائي. عند هذه النقطة، يكون الطور السائل مستقراً في توازن مع الطورين الصلبين للمكونين الأصليين، ويمنع تشكّل شبكة بلورية مشتركة مستقرة. ولهذا السبب، فإن DES غالباً ما يحتفظ بحالته السائلة ضمن مدى واسع من درجات الحرارة، ما دام التوازن الطوري لم يُزحزح بوجود شوائب أو تغيّر كبير في النسبة المولية[2].

6.I. آلية تكوّن الروابط الهيدروجينية ودورها في استقرار البنية الفوق جزيئية

تمثل الروابط الهيدروجينية البنية الأساسية التي يقوم عليها النظام اليوتيكتي العميق، وهي ليست مجرد تآثرات ثانوية، بل عنصر تنظيمي معماري يحدد الطبيعة الفوق جزيئية (Supramolecular Structure) للنظام بأكمله[4].

في الأنظمة الشائعة القائمة على كلوريد الكولين، يعمل الأنيون Cl− كمستقبل قوي للرابطة الهيدروجينية، في حين يعمل المانح مثل اليوريا أو الجليسرول كمصدر لبروتونات جزئية موجبة قادرة على تكوين روابط هيدروجينية متعددة الاتجاهات. ينشأ عن ذلك ما يشبه "القفص الهيدروجيني" الذي يحيط بالأنيون ويعيد توزيع كثافة الشحنة حوله[2].

هذا التوزيع الجديد للشحنة يؤدي إلى تقليل قوة التجاذب الكهروستاتيكي بين الأنيون والكاتيون (الكولين)، وهو ما ينعكس مباشرة في انخفاض الطاقة الشبكية (Lattice Energy) للنظام الصلب الأصلي. وعندما تصبح الطاقة الشبكية أقل من العتبة اللازمة للحفاظ على النظام البلوري، تنهار البنية الصلبة ويتكون الطور السائل المستقر[50].

على المستوى الفوق جزيئي، تنشأ شبكة ثلاثية الأبعاد من الروابط الهيدروجينية والتآثرات الأيونية الضعيفة، مما يمنح DES خصائص مزدوجة: فهو من ناحية يمتلك طابعاً أيونياً يساهم في التوصيلية، ومن ناحية أخرى يمتلك طابعاً جزيئياً يسمح بتآثرات انتقائية مع المركبات العضوية واللاعضوية.

وتفسر هذه البنية الشبكية قدرة DES العالية على إذابة مركبات معقدة. فعند إدخال جزيء هدف مثل مركب فينولي أو صبغة طبيعية أو أيون معدن ثقيل يقوم النظام بإعادة تنظيم شبكته الهيدروجينية

لاحتضان الجزيء عبر تآثرات مماثلة، مما يخفض طاقة الإذابة ويزيد من استقرار الطور المذاب. هذه القدرة التكيفية الديناميكية هي التي تمنح DES تفوقا ملحوظا على الماء أو المذيبات العضوية التقليدية في العديد من عمليات الاستخلاص البيئي[5].

I.7. الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة

تعتمد كفاءة المذيبات اليوتكتيكية العميقة (Deep Eutectic Solvents - DES) كبدائل خضراء للمذيبات العضوية التقليدية على فهم دقيق لخصائصها الفيزوكيميائية، والتي تُعد "خصائصاً قابلة للتصميم" (Tailored Properties) بناءً على طبيعة المكونات والنسب المولية المستخدمة [51]

I.7.1. البنية الجزيئية والديناميكا الحرارية للروابط الهيدروجينية

تنشأ المذيبات اليوتكتيكية من خلال تفاعلات الارتباط الذاتي بين مستقبل الرابطة الهيدروجينية (HBA) ومانحها (HBD).

- **تشتيت الشحنة:** تعمل الروابط الهيدروجينية على إحداث تشتيت للشحنة (Charge Delocalization) بين الأنيون والبروتون المانح، مما يقلل من قوى التجاذب الشبكي للمكونات الصلبة ويؤدي إلى انصهارها في درجات حرارة منخفضة [52]
- **البنية الفوق جزيئية:** أثبتت الدراسات الطيفية أن DES تشكل شبكة ثلاثية الأبعاد مستقرة ديناميكياً، وهي المسؤولة عن الخصائص الفريدة لهذه السوائل مقارنة بالمحاليل العادية [53]

I.7.2. الخصائص الحرارية وانحراف درجة الانصهار

- **نقطة اليوتيكتيك:** تمتاز DES بانخفاض حاد في درجة الانصهار يصل أحياناً إلى أكثر من 200 درجة مئوية عن المكونات النقية. هذا السلوك يُفسر بالانحراف السالب عن قانون راؤول المثالي نتيجة التفاعلات الجزيئية القوية [54]
- **الاستقرار الحراري:** يتم تحديد المدى الحراري للتشغيل باستخدام التحليل الحراري الوزني (TGA). وتعتبر معظم DES مستقرة حتى 150–180 درجة مئوية، حيث يبدأ التحلل الكيميائي غالباً من جهة المانح للرابطة الهيدروجينية (HBD) مثل اليوريا أو الأحماض الكربوكسيلية [55]

I.7.3. اللزوجة والكثافة ونظرية الثقوب (Hole Theory)

تعتبر اللزوجة من أهم الخصائص الفيزيائية المؤثرة على عمليات نقل الكتلة.

- **آلية التدفق:** تفسر لزوجة DES باستخدام "نظرية الثقوب"، حيث تعتمد حركة الأيونات على توفر فجوات جزيئية داخل البنية السائلة. ونظراً لشبكة الروابط الهيدروجينية الكثيفة، تكون هذه الفجوات صغيرة، مما يؤدي لارتفاع اللزوجة خاصة في المذيبات الطبيعية (NADES) [56]
- **تأثير درجة الحرارة:** تتبع اللزوجة في هذه الأنظمة معادلة **Vogel-Fulcher-Tammann (VFT)**، حيث تنخفض اللزوجة بشكل أسي مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يسهل عمليات الاستخلاص الصناعية [52]

I.4.7. القطبية والقدرة الإذابية الانتقائية

تمتلك DES قدرة فائقة على إذابة الجزيئات الكبيرة والبوليمرات الحيوية.

- **معايير Kamlet-Taft:** تُستخدم هذه المعايير لوصف القطبية المجهرية، حيث أظهرت الدراسات أن DES تمتلك قيم "قدرة قبول الروابط الهيدروجينية" (β) عالية جداً، مما يفسر نجاحها في إذابة الكيتين والسيليلوز بنسب تتفوق على المذيبات التقليدية [31]
- **الاستخلاص الأخضر:** أثبتت الأبحاث الحديثة كفاءة هذه المذيبات في استخلاص المركبات الحساسة مثل الأنثوسيانين، حيث تعمل الروابط الهيدروجينية على حماية هذه المركبات من التحلل أثناء العملية [56]

I.5.7. التوصيلية والنافذة الكهروكيميائية

- **الناقلية الأيونية:** تعتمد الناقلية بشكل عكسي على اللزوجة (قانون Walden). ورغم لزوجتها، توفر DES توصيلية كافية لتطبيقات الطلاء الكهربائي والبطاريات [4]
- **الاستقرار الكهروكيميائي:** تتمتع DES بـــ "نافذة كهروكيميائية" واسعة، مما يسمح بترسيب معادن لا يمكن ترسيبها من المحاليل المائية بسبب تفكك الماء [57]

I.8. المذيبات اليوتكتيكية العميقة في إطار الكيمياء الخضراء

I.8.1. مبادئ الكيمياء الخضراء الاثنا عشر

1. منع النفايات

يعد منع تكون النفايات في المقام الأول أفضل من معالجتها أو تنظيفها بعد تكونها. في أبحاث الدكتوراه المتعلقة بـــDES ، يبرز هذا المبدأ من خلال تحضير المذيب دون الحاجة إلى عمليات غسيل أو تنقية معقدة تنتج مخلفات كيميائية، حيث يتم خلط المكونات واستخدام المزيج مباشرة كوسط تفاعل[8]

2. اقتصاد الذرة

يجب تصميم طرق التخليق بحيث يتم دمج أكبر قدر ممكن من المواد الأولية في المنتج النهائي. تتميز المذيبات اليوتكتيكية العميقة بأنها تحقق اقتصاداً ذرياً بنسبة 100% عند التحضير، حيث لا توجد نواتج ثانوية (By-products) أثناء عملية التكوين، على عكس السوائل الأيونية التقليدية التي قد تتطلب خطوات استبدال كيميائي تُنتج أملاحاً غير مرغوبة [58]

3. تخليق كيميائي أقل خطورة

يجب، قدر الإمكان، تصميم طرق تخليق تستخدم وتولد مواد ذات سمية منخفضة أو معدومة للإنسان والبيئة. يبرز دور DES هنا من خلال استبدال المذيبات الكلورية السامة بمكونات غذائية أو طبيعية مثل الكولين واليوريا والأحماض العضوية [59]

4. تصميم مواد كيميائية أكثر أمانا

يجب الحفاظ على كفاءة الأداء الوظيفي مع تقليل السميّة. تتيح DES للباحثين التحكم في البنية الجزيئية للمذيب (Tunability) لاختيار المكونات الأكثر أمانا حيويا دون التضحية بالقدرة الإذابية المطلوبة في التفاعل.[50]

5. المذيبات والمواد المساعدة الآمنة

يجب الاستغناء عن المواد المساعدة (مثل المذيبات وعوامل الفصل) كلما كان ذلك ممكناً، واستخدام مواد غير ضارة عند الضرورة. هذا المبدأ هو "المجال الحيوي" لـــDES ، فهي سوائل غير قابلة للاشتعال، وغير متطايرة بسبب ضغطها البخاري المنخفض جداً، مما يقلل من مخاطر الانفجارات أو الانبعاثات الجوية السامة[4]

6. التصميم لكفاءة الطاقة

يجب مراعاة التأثيرات البيئية والاقتصادية للطاقة المستخدمة في العمليات الكيميائية. تتميز DES بقدرتها على العمل كوسط للتفاعلات والعمليات (مثل الاستخلاص) في درجات حرارة معتدلة أو حتى في درجة حرارة الغرفة، مما يقلل من الاستهلاك الطاقي الإجمالي للمصنع أو المختبر.[2]

7. استخدام مواد أولية متجددة

يفضل استخدام المواد الأولية المتجددة بدلا من الناضبة (البترولية). تندرج المذيبات اليوتكتيكية الطبيعية (NADES) تحت هذا المبدأ بامتياز، حيث تُشتق مكوناتها من الأحماض الأمينية والسكريات والبوليمرات الطبيعية المتوفرة في الكتلة الحيوية [60]

8. تقليل المشتقات

يجب تقليل أو تجنب الاشتقاق غير الضروري (مثل استخدام مجموعات الحماية) لأن هذه الخطوات تتطلب مواد كيميائية إضافية وتولد نفايات. استخدام DES كوسط تفاعل غالباً ما يوفر بيئة كيميائية تحمي المجموعات الوظيفية طبيعيا، مما يقلل من خطوات التفاعل[61].

9. التحفيز (Catalysis)

الحفازات (المنتقاة بقدر الإمكان) تفوق الكواشف الاستخدامية في الكفاءة. تعمل العديد من المذيبات اليوتكتيكية العميقة كـــ "مذيب ومحفز" في آن واحد(Dual Role) ، فمثلاً، تقوم DES الحمضية بتحفيز تفاعلات التكثيف والارتباط، مما يلغي الحاجة لإضافة حفازات معدنية خارجية قد تكون سامة [62]

10.التصميم للتحلل(Design for Degradation)

يجب تصميم المنتجات الكيميائية بحيث تتحلل إلى مواد غير ضارة في نهاية عمرها الافتراضي ولا تترسب في البيئة. أثبتت الدراسات أن DES القائمة على المواد الطبيعية تمتلك قابلية عالية للتحلل الحيوي (Biodegradability)في الأنظمة المائية والتربة، مما يمنع التراكم الحيوي[63]

11. التحليل في الوقت الحقيقي لمنع التلوث

تطوير منهجيات تحليلية تسمح بالمراقبة والتحكم في الوقت الحقيقي أثناء التفاعل لمنع تكون المواد الخطرة. تساهم استقرارية DES الفيزيائية والحرارية في تسهيل مراقبة التفاعلات باستخدام التقنيات الطيفية المباشرة.[64]

12. كيمياء آمنة بطبيعتها للوقاية من الحوادث

يجب اختيار المواد وشكل المادة المستخدمة في العملية الكيميائية بحيث تقلل من احتمالية وقوع الحوادث الكيميائية، بما في ذلك الانفجارات والحرائق. تعتبر DES بدائل آمنة جوهريا لأنها غير قابلة للاشتعال ولا تنتج أبخرة ضغط عالي في الأوعية المغلقة[65].

I.2.8. تحليل مدى توافق المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) مع مبادئ الكيمياء الخضراء

تُصنف المذيبات اليوتكتيكية العميقة اليوم كواحدة من أكثر المنصات السائلة استدامة في الكيمياء الحديثة. ويتجاوز توافقها مع المبادئ الخضراء مجرد كونها غير سامة، ليشمل كفاءة التصنيع، والقدرة على إعادة التدوير، وتقليل البصمة الكربونية الإجمالية للعمليات الصناعية. ويمكن تفصيل هذا التوافق من خلال المحاور الاستراتيجية التالية:

1. الكفاءة الذرية والاقتصاد في التحضير

تتميز المذيبات سهلة الانصهار (DES) بكفاءة ذرية واقتصاد عال في التحضير، حيث تحضر عبر عملية "الخلط المباشر" للمواد الأولية (HBA و HBD) التي تدخل بالكامل في تركيب المذيب النهائي دون إنتاج أي فضلات ثانوية، وهو ما يتناقض مع السوائل الأيونية التقليدية (ILs) التي تتطلب تفاعلات

متعددة الخطوات وعمليات غسيل وتنقية مجهدة، وبذلك تحقق المذيبات سهلة الانصهار توافقاً تاماً مع المبدأ الأول (منع النفايات) والمبدأ الثاني (اقتصاد الذرة) من مبادئ الكيمياء الخضراء، لتصل كفاءة التحضير فيها إلى 100% [55]

2. السلامة التشغيلية وانعدام التطاير

تتميز المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) بامتلاكها شبكة روابط هيدروجينية قوية جدا تعمل على تثبيت الجزيئات في الحالة السائلة، مما يؤدي إلى انعدام الضغط البخاري تقريباً عند درجات الحرارة القياسية، ويساهم هذا المبدأ في تحقيق الأمان البيئي من خلال منع انبعاث المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) التي تلوث الهواء وتدمر طبقة الأوزون، كما يعزز الأمان المهني بكونها مواد غير قابلة للاشتعال وغير متفجرة، مما يوفر بيئة عمل آمنة في المختبرات والمصانع، وهو ما يحقق المبدأين الخامس (المذيبات والمواد المساعدة الآمنة) والثاني عشر (السلامة الكيميائية لمنع الحوادث) من مبادئ الكيمياء الخضراء [4]

3. الاستدامة المصدرية والاعتماد على الموارد المتجددة

تعتمد المذيبات اليوتكتيكية العميقة، وبشكل خاص النوع الطبيعي منها (NADES)، على مكونات حيوية مثل الأحماض العضوية (كالستريك والماليك)، والسكريات (كالجلوكوز والفركتوز)، ومشتقات الفيتامينات (مثل كلوريد الكولين). وتعزز هذه المذيبات التوافق مع المبدأ السابع من مبادئ الكيمياء الخضراء عبر تعزيز الاستقلالية عن الموارد البترولية الناضبة، إذ يمكن الحصول على هذه المكونات من مخلفات الصناعات الزراعية والغذائية، مما يساهم في إغلاق حلقة الاقتصاد الدائري [6]

4. الحفظ الطاقي والتحفيز الذاتي(Energy Efficiency & Catalysis)

تمتلك المذيبات اليوتكتيكية العميقة القدرة على العمل كوسط تفاعل ومحفز في آن واحد (نظام المذيب–المحفز المزدوج)، فهي تسهم في تقليل خطوات التفاعل في عمليات التخليق العضوي، حيث تعمل الروابط الهيدروجينية في المذيب على تنشيط المجموعات الوظيفية للمواد المتفاعلة، مما يغني عن الحاجة إلى إضافة حفازات معدنية سامة، وهو ما يحقق المبدأ التاسع من مبادئ الكيمياء الخضراء، كما

تسمح هذه المذيبات بإجراء عمليات الاستخلاص والتفاعل في درجات حرارة معتدلة، مما يقلل بشكل كبير من الطاقة الحرارية المطلوبة، تحقيقا للمبدأ السادس المتعلق بتصميم عمليات موفرة للطاقة [66]

5. التصميم الموجه للتحلل الحيوي

تعد قابلية التحلل الحيوي من أهم معايير قبول المذيبات اليوتكتيكية العميقة في البحوث المتقدمة، حيث تشير الدراسات إلى أن الروابط الهيدروجينية التي تربط مكوناتها هي روابط "فيزيائية" وليست "تساهمية"، مما يسهل على الكائنات الدقيقة في البيئة المائية تحليل هذه المكونات وتحويلها إلى مواد غير ضارة. وتتفق هذه الميزة مع المبدأ العاشر من مبادئ الكيمياء الخضراء، حيث تمنع التراكم الحيوي للمذيبات في التربة أو المياه الجوفية، وهو التحدي البيئي الكبير الذي كانت تواجهه المذيبات التقليدية[67]

I.3.8. تقييم السمية وقابلية التحلل الحيوي

يعتبر تقييم التأثير البيئي للمذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) من الركائز الأساسية التي تمنحها صفة "الخضراء". في هذا القسم، سنناقش بعمق ميكانيكيات التفاعل الحيوي للمذيبات مع الكائنات الحية والنظم الإيكولوجية.

1. الميكانيكية الجزيئية للسمية الخلوية

لا تقتصر السمية في المذيبات اليوتكتيكية العميقة على المكونات الفردية، بل تمتد لتشمل التأثير التآزري الناتج عن الخلط. فعلى صعيد اضطراب الغشاء الخلوي، تشير الدراسات إلى أن المذيبات التي تحتوي على كاتيونات أمونيوم رباعية (مثل كلوريد الكولين) تمتلك سمية منخفضة نظراً لكون الكولين مادة أيضية طبيعية؛ ومع ذلك، فإن دمجها مع مانحات روابط هيدروجينية (HBD) ذات سلاسل كربونية طويلة قد يرفع من "السمية الغشائية" نتيجة زيادة نفاذية الغشاء الخلوي، مما يؤدي إلى تسرب المحتويات الخلوية وموت الخلية[68]. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت الأبحاث أن بعض أنواع المذيبات اليوتكتيكية العميقة المستندة إلى أحماض عضوية قوية قد تحفز إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) داخل الخلايا، مما يسبب إجهادا تأكسديا يعد مؤشرا حيويا حاسما لقياس سقف الأمان الحيوي للمذيب في البحوث المتقدمة [69]

2. السمية البيئية المائية

يتم تصنيف السمية البيئية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة بناءً على قيم التركيز المؤثر لنصف العينة (EC_{50}) والتركيز القاتل (LC_{50}). ففي الاختبارات الميكروبية باستخدام بكتيريا Vibrio fischeri، أثبتت النتائج أن قيم EC_{50} لغالبية المذيبات اليوتكتيكية الطبيعية (NADES) تتجاوز 5000g/l ، مما يصنفها ضمن فئة "غير سامة" وفقا لتصنيفات الاتحاد الأوروبي. أما على مستوى الكائنات الراقية، ان يرقات القشريات (Daphnia magna) تبدي قدرة عالية على تحمل المذيبات اليوتكتيكية المعتمدة على السكريات[67]، بينما تزداد حساسيتها تجاه تلك المعتمدة على الأحماض الأمينية، مما يستدعي مراعاة نوع المذيب بدقة عند استخدامه في العمليات الصناعية القريبة من المجاري المائية.

3. حركية التحلل الحيوي

يعد اختبار التحلل الحيوي المعيار الفاصل لتقييم استدامة المذيبات اليوتكتيكية العميقة. فباستخدام بروتوكول (OECD 301D) لقياس التحلل الحيوي المغلق، أظهرت النتائج أن المذيبات المكونة من (كولين: غليسيرول) و (كولين: يوريا) تحقق نسبة تحلل حيوي تصل إلى 96% خلال 28 يوما، وهي نسبة مرتفعة جدا مقارنة بالمذيبات العضوية التقليدية، وتتضح مسارات التحلل في قيام الميكروبات بتفكيك الروابط الهيدروجينية أولا، مما يحول المذيب إلى مكوناته الأصلية (مثل اليوريا والكولين) التي تعمل بدورها كمصادر للكربون والنيتروجين، مما يعزز النمو الميكروبي بدلا من تثبيطه[69]

4.8.I الاستدامة والجدوى البيئية

في هذا القسم، يتم الانتقال من المختبر إلى "دورة الحياة" الكاملة للمذيب، مع التركيز على الاستدامة الاقتصادية والبيئية.

1. تقييم دورة الحياة

يعد تقييم دورة الحياة (LCA) أداة حاسمة للمقارنة بين كفاءة العمليات المختلفة، فعلى صعيد المدخلات الطاقية، يتطلب تحضير المذيبات اليوتكتيكية العميقة طاقة حرارية بسيطة (غالبا أقل من 80 درجة مئوية) ولا يتطلب مذيبات تنقية أو خطوات فصل معقدة، مما يقلل بشكل ملحوظ من "الطاقة

المجسدة" للمنتج النهائي، أما من حيث البصمة الكربونية، ونظراً لكون المكونات غالبا ما تكون مشتقة من الكتلة الحيوية (مثل الأحماض العضوية الناتجة عن التخمر)، فإن صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) خلال دورة حياة المذيب تكون منخفضة جدا مقارنة بالمذيبات المشتقة من الموارد البترولية التقليدية [55]

2. الجدوى الاقتصادية وإعادة التدوير

لا تكتمل الاستدامة دون جدوى اقتصادية، وتبرز المذيبات اليوتكتيكية العميقة كخيار اقتصادي بامتياز بفضل انخفاض تكلفة المواد الأولية، حيث إن مكوناتها كالكولين واليوريا والسكريات تعد مواد متوفرة تجارياً بأسعار زهيدة جداً مقارنة بالكواشف المستخدمة في السوائل الأيونية التقليدية. كما تتميز هذه المذيبات بقابلية عالية لإعادة الاستخدام؛ فقد أظهرت التجارب العملية إمكانية استعادتها وتدويرها لأكثر من 5 دورات استخلاص دون فقدان ملحوظ في كفاءتها. ويتم ذلك عبر تقنيات بسيطة تعتمد على إضافة "المذيب المضاد" (Anti-solvent) لترسيب المادة المستخلصة، تليها عملية تبخير للمذيب المضاد لاستعادة المذيب اليوتكتيكي بكامل فاعليته [70]

3. مفهوم الاقتصاد الدائري

تعمل DES كمحرك للاقتصاد الدائري من خلال تثمين النفايات، فبدلا من التخلص من قشور الجمبري أو المخلفات الزراعية، تستخدم DES لاستعادة مواد ثمينة (مثل الكيتين أو البوليفينول)، مما يحول النفايات إلى منتجات ذات قيمة اقتصادية عالية، وهو جوهر التوجهات البيئية الحديثة [71]

I.9. التطبيقات البيئية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة

I.9.1. تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في المعالجة البيئية للمياه

تعد استعادة جودة المياه وإزالة الملوثات المستعصية (Emerging Contaminants) من الأهداف المركزية للكيمياء الخضراء، تمثل المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) جيلا متطورا من "المذيبات المصممة (Designer Solvents) "التي توفر حلولاً لقصور المذيبات العضوية التقليدية، مثل السمية العالية وصعوبة استرداد المذيب [72]

1. ميكانيكية استخلاص الملوثات العضوية والأصباغ

تعتبر الأصباغ الصناعية، مثل ميثيلين بلو (Methylene Blue) والرودامين، ملوثات معقدة نظراً لتركيبها العطري واستقرارها الكيميائي. تعتمد كفاءة DES في استخلاص هذه المواد على تآثرات جزيئية متعددة الطبقات:

- **تآثرات الروابط الهيدروجينية** :يعمل المذيب كشبكة مستقبلة ومانحة للبروتونات، مما يسمح بتكوين روابط قوية مع المجموعات الوظيفية للملوثات العضوية (مثل مجموعات الهيدروكسيل والأمينات)[4]
- **تآثرات π:** في الأنظمة اليوتكتيكية التي تحتوي على مكونات أروماتية، تنشأ قوى تجاذب بين حلقات البنزين في المذيب وتلك الموجودة في الأصباغ، مما يزيد من قدرة الاستيعاب (Loading Capacity) [4]
- **التأثير الكهروستاتيكي** :الشحنة الموجبة لكاتيون الكولين (في حالة (ChCl-DES) تلعب دورا حاسما في جذب الملوثات ذات الشحنات السالبة، مما يعزز من سرعة انتقال الملوث من الطور المائي[73]

2. إزالة المعادن الثقيلة والسامة

يعد استخلاص الأيونات المعدنية (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+}, Cu^{2+}) من أهم التطبيقات البيئية لـــ DES. على عكس المذيبات التقليدية، يمكن لـــ DES العمل "كعامل استخلاص" و "وسط انتشار" في آن واحد [11]

- **تكوين المعقدات (Chelation):** تعمل المكونات المانحة للرابطة الهيدروجينية (HBD) مثل حمض السيتريك أو حمض الأوكساليك كعوامل مخلبية طبيعية، حيث تحيط بالأيون المعدني وتكون معقدات مستقرة ذائبة في طور المذيب[74]
- **التبادل الأيوني** :في بعض الأنظمة، يتم استبدال كاتيون المذيب بالأيون المعدني الثقيل، مما يؤدي إلى تثبيت المعدن داخل البنية السائلة[3]

الجدول (I.2.): تقييم مقارن لكفاءة استخلاص الملوثات المائية باستخدام أنظمة DES المتقدمة

الملوث المستهدف	نظام DES النسبة المولية	كفاءة الإزالة (%)	ميكانيكية الفصل الأساسية	المرجع
الفينولات	ChCl : Glycerol (1:2)	98.5%	روابط هيدروجينية قوية	[75]
الرصاص(Pb2+)	ChCl : Malonic Acid (1:1)	99.2%	تكوين معقدات مخلبية	[76]
الكروم السداسي	Betaine : Citric Acid (1:2)	96.8%	اختزال وتآثر كهروستاتيكي	[77]
الأدوية (Antibiotics)	Hydrophobic DES (Menthol-based)	97.4%	التآثر الكاره للماء	[78]

3. تحديات الانتقائية وإعادة التدوير (Selectivity and Recyclability)

تكمن القوة الحقيقية لـــ DES في "القابلية للضبط .(Tunability) "يمكن تعديل قطبية المذيب ولزوجته لتناسب ملوثاً معيناً دون غيره، وهو ما يسمى بالانتقائية الموجهة[5]، أما بالنسبة للاستدامة، فإن الأبحاث تركز حالياً على تقنيات "الترسيب العكسي" أو استخدام "المذيبات المضادة (Anti-solvents) "لاسترجاع الملوثات من DES وإعادة استخدام المذيب لعدة دورات متتالية، مما يقلل من التكلفة التشغيلية الإجمالية ويحقق مفهوم الاقتصاد الدائري

I.2.9. استراتيجيات استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة في معالجة المياه العادمة

تكمن القوة الدافعة وراء دمج المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) في بروتوكولات معالجة المياه العادمة في "قابليتها للتصميم(Tunability) "، حيث يمكن هندسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمذيب بما يتوافق مع طبيعة الملوثات المستهدفة[4]. تتنوع تطبيقات DES في هذا المجال لتشمل استخلاص الملوثات العضوية الدقيقة، المعادن الثقيلة، والسموم الناشئة التي تعجز محطات المعالجة التقليدية عن إزالتها كليا [79]

1. إزالة الملوثات العضوية الناشئة

تشمل الملوثات العضوية الناشئة بقايا الأدوية (مثل المضادات الحيوية)، المبيدات الحشرية، والمنظفات الصناعية. أثبتت الأبحاث (مثل دراسة *Ferreira & Sarraguça*) أن المذيبات اليوتكتيكية الطبيعية (NADES) تمتلك قدرة استخلاصية متفوقة بفضل تآثرات "المانح–المستقبل" للبروتونات [80]

- **ميكانيكية الاستخلاص :**تعتمد على تكوين روابط هيدروجينية بين المذيب والملوث، بالإضافة إلى التآثرات الكارهة للماء .(Hydrophobic Interactions) في حالة الملوثات القطبية، تعمل DES كشبكة استخلاص تحتجز الجزيئات داخل بنيتها الجزيئية المعقدة[72]
- **كفاءة الفصل :**استخدام المذيبات اليوتكتيكية الكارهة للماء (Hydrophobic DES) المعتمدة على المينثول أو الأحماض الدهنية يتيح فصل الملوثات عن الطور المائي دون امتزاج المذيب بالماء، مما يمنع حدوث تلوث ثانوي بالمذيب نفسه

2. معالجة مياه الصرف الصناعي من المعادن السامة(Industrial Effluent Remediation)

تعد مياه الصرف الناتجة عن صناعات التعدين والطلاء الكهربائي غنية بالمعادن الثقيلة مثل النيكل، والكوبالت، والزنك، حيث تبرز المذيبات اليوتكتيكية العميقة كبديل "مخلبي" (Chelating agent) فائق الفعالية في هذا المجال [81]، وتعمل هذه المذيبات من خلال آليتين رئيسيتين:

- **تكوين المعقدات التناسقية:** حيث تقوم المذيبات (خاصة تلك التي تحتوي على أحماض كربوكسيلية كمانح للرابطة الهيدروجينية HBD) بتفكيك تميه الأيونات المعدنية في الماء وتكوين معقدات تناسقية مستقرة داخل طور المذيب[2].
- **الاستخلاص الانتقائي:** حيث يمكن من خلال ضبط النسبة المولية واختيار المكونات (مثل استخدام البيتائين Betaine بدلاً من كلوريد الكولين ChCl) استهداف معدن معين واستخلاصه من مزيج مائي معقد، وهي خاصية حيوية تتيح استعادة المعادن الثمينة من النفايات السائلة بفعالية عالية [3]

3. دور DES في تحسين عمليات الامتزاز (Adsorption Enhancement)

لا تستخدم DES كمذيبات سائلة فحسب، بل يتم دمجها مع مواد صلبة لإنشاء "ممتزات مطورة" (Modified Adsorbents).

- **تعديل السطح** :يتم غمر الكربون المنشط أو أنابيب الكربون النانوية في DES لزيادة المواقع الفعالة على سطحها، مما يضاعف قدرتها على امتزاز الملوثات العضوية[82].
- **تحسين الحركية** :وجود DES يقلل من مقاومة النقل الكتلي على سطح المادة الممتزة، مما يسرع من عملية التطهير[83]

4. الجدوى الاقتصادية وإعادة التدوير (Recyclability & Economy)

من منظور الاستدامة الصناعية، يكمن نجاح استخدام DES في سهولة استرجاعها. يمكن فصل الملوثات عن المذيب باستخدام تقنيات بسيطة مثل تغيير درجة الحرارة أو إضافة "مذيب مضاد (Anti-solvent)" مثل الماء أو الإيثانول، مما يسمح بإعادة استخدام DES لعدة دورات (Up to 5-10 cycles) دون انخفاض ملحوظ في الكفاءة. هذا يقلل بشكل كبير من التكلفة التشغيلية مقارنة بالمذيبات التقليدية التي تتطلب تقطيراً مستهلكاً للطاقة[74]

I.3.9. استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة في التقاط الغازات الملوِّثة (CO_2, SO_2)

يمثل الانبعاث الكثيف لغاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) من المنشآت الصناعية ومحطات الطاقة التحدي الأكبر لتغير المناخ وجودة الهواء، تقليديا تستخدم المحاليل الأمينية مثل MEA لامتصاص هذه الغازات، إلا أنها تعاني من عيوب تقنية مثل التآكل الكيميائي، والتحلل التأكسدي، والحاجة لطاقة هائلة لإعادة التدوير[72]، تقدم DES حلولا مبتكرة بفضل ضغطها البخاري المنخفض جدا، وانتقائيتها العالية، وقدرتها على العمل كـــ "مذيبات فيزيائية وكيميائية" في آن واحد

1. احتجاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2 Capture)

تعتمد سعة امتصاص CO_2 في المذيبات اليوتكتيكية على نوع التفاعل الذي يحدث بين الجزيئات:

- **الامتصاص الفيزيائي :** يحدث في DES التقليدية مثل ChCl:Glycerol حيث يتم حجز جزيئات CO_2 داخل الفجوات الجزيئية للشبكة اليوتكتيكية .(Hole Theory) تعتمد الكفاءة هنا بشكل أساسي على الضغط الجزئي للغاز ودرجة الحرارة، حيث تزداد سعة الامتصاص مع زيادة الضغط[84]
- **الامتصاص الكيميائي :(Chemical Absorption)** يتم تطوير DES وظيفية (Functionalized DES) تحتوي على مجموعات أمينية أو قلوية) مثل استخدام الإيثانول أمين كمكون .(HBD في هذه الحالة، يتفاعل الغاز كيميائياً مع المذيب لتكوين مركبات "الكربامات(Carbamates) "، مما يرفع سعة الامتصاص بشكل كبير حتى عند الضغوط المنخفضة.[85]

2. امتصاص غاز ثاني أكسيد الكبريت(SO_2)

يعد SO_2 غازا حمضيا شديد التفاعل، وتمتلك DES قدرة امتصاص استثنائية له تتجاوز غالباً قدرتها على امتصاص CO_2.

- **تأثير الروابط الهيدروجينية :** بفضل وجود مراكز قوية لاستقبال ومنح الروابط الهيدروجينية، ترتبط جزيئات SO_2 بقوة مع مكونات المذيب (خاصة الكاتيونات مثل الكولين)، مما يؤدي إلى سعة امتصاص عالية جداً قد تصل إلى أكثر من 1 مول من SO_2 لكل مول من المذيب[86]
- **الانتقائية :** تتميز DES بقدرتها على فصل SO_2 عن مزيج غازات الاحتراق (Flue gas) بنسبة انتقائية عالية، مما يسهل تنقية الهواء من الكبريت قبل انبعاثه للغلاف الجوي[87].

3. استرجاع الغاز واستدامة المذيب

تتميز المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) بكفاءة حرارية وديناميكية عالية في عمليات احتجاز الغازات؛ حيث تتطلب طاقة أقل لعملية الاسترجاع (Desorption) بنسبة تتراوح بين 20–30% مقارنة بالمحاليل الأمينية المائية التقليدية، وذلك بسبب طبيعة الروابط الأضعف بين الغاز والمذيب، كما أثبتت الدراسات، مثل مراجعات Yeow وآخرين، أن هذه المذيبات تظهر ثباتاً حرارياً وكيميائياً ممتازاً، إذ تحافظ على كفاءتها التشغيلية بعد دورات متعددة من الامتصاص والترسيب دون فقدان ملموس في الكتلة أو الخصائص الفيزيائية، مما يجعلها خياراً اقتصادياً ومستداماً على المدى الطويل [80]

I.4.9. معالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية والصناعية

تعتبر الكتلة الحيوية اللغنو–سليلوزية (Lignocellulosic Biomass) المصدر الأكثر وفرة للكربون المتجدد على وجه الأرض، إلا أن هيكلها البلوري المعقد، المكون من السليلوز المحاط بطبقات متينة من اللغنين والهميسليلوز، يجعله مقاوماً للتحلل الكيميائي التقليدي[88]. تقدم المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES)حلاً استثنائياً لتفكيك هذا الهيكل بفضل قدرتها العالية على كسر الروابط الهيدروجينية والروابط الإيثرية القوية، مما يمهد الطريق لإنتاج الوقود الحيوي والمواد الكيميائية المتجددة[89]

1. تجزئة الكتلة الحيوية واستخلاص اللغنين

تتميز المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES)، وخاصة الحمضية منها مثل (ChCl:Oxalic Acid)، بقدرة انتقائية عالية على إذابة اللغنين مع الحفاظ على سلامة ألياف السليلوز، حيث تعمل هذه المذيبات على كسر الروابط الكيميائية التي تربط اللغنين بالكربوهيدرات، مما يؤدي إلى "تليين" الهيكل النباتي في درجات حرارة معتدلة (80–120 درجة مئوية)، وهو ما يقلل من تكوين النواتج الثانوية غير المرغوب فيها وفقاً لما أشارت إليه مراجعات Yeow وآخرين[90]، علاوة على ذلك، يتميز اللغنين المستخلص عبر هذه العملية بنقاوة عالية وهيكل كيميائي قريب من الطبيعي، مما يجعله مادة خاماً مثالية لإنتاج البوليمرات الحيوية، والمواد اللاصقة، والمركبات الفينولية ذات القيمة المضافة [72]

2. استخلاص الكيتين والبوليمرات الحيوية من النفايات البحرية

لا يقتصر تثمين النفايات على المصادر النباتية، بل يمتد ليشمل النفايات البحرية وقشور القشريات.

- **استخلاص الكيتين (Chitin Extraction):** تُستخدم DES (مثل تلك المعتمدة على حمض الستريك) لإزالة المعادن (Demineralization) وإزالة البروتينات (Deproteinization) من قشور الروبيان والسرطانات في خطوة واحدة[80]
- **الميزة البيئية:** هذه الطريقة تلغي الحاجة لاستخدام الأحماض والقواعد القوية المركزة، مما ينتج كيتيناً بخصائص فيزيائية فائقة ووزن جزيئي مرتفع، وهو ما يعد ثورة في إنتاج "الشيتوزان" للتطبيقات الطبية والغذائية

3. تحويل النفايات البلاستيكية وإعادة تدوير البوليمرات

في إطار الاقتصاد الدائري، يتم استكشاف DES كأوساط تفاعل لتحلل النفايات البلاستيكية) مثل PET). تعمل بعض أنواع DES كمحفزات ومذيبات في آن واحد لتسريع عملية التحلل الكيميائي (Glycolysis) للبلاستيك وتحويله إلى "مونومرات" يمكن إعادة بلمرتها لإنتاج بلاستيك جديد عالي الجودة[91].

4. تثمين نفايات الزيوت والدهون(Bio-lubricants & Biodiesel)

تستخدم DES في تحويل نفايات زيوت الطهي والدهون الحيوانية إلى وقود حيوي (Biodiesel) عبر تفاعلات التبادل الإستري .(Transesterification) تعمل المذيبات هنا على تحسين الامتزاج بين الزيت والكحول وتعمل كمحفزات قاعدية أو حمضية، مما يرفع من جودة الوقود الناتج ويقلل من خطوات التنقية اللاحقة [92]

I.5.9. دور المذيبات اليوتكتيكية العميقة في التخليق الأخضر والتحفيز البيئي

تتجاوز المذيبات اليوتكتيكية العميقة دورها كمجرد "بدائل سائلة" للمذيبات العضوية، لتلعب دوراً نشطاً كمحفزات (Catalysts) أو وسائط تفاعل ذكية تعمل على تحسين الكفاءة الذرية (Atom Economy) للعمليات الكيميائية [93]، إن قدرة هذه المذيبات على إذابة طيف واسع من الكواشف العضوية وغير العضوية تجعلها الوسط المثالي للتفاعلات التي كانت تتطلب سابقا ظروفا قاسية أو مذيبات شديدة السمية[94]

1. المذيبات اليوتكتيكية كمذيب ومحفز في آن واحد

من أهم مميزات التخليق الأخضر باستخدام DES هو ما يعرف التحفيز الذاتي، حيث تعمل مكونات المذيب نفسه (مثل مستقبلات البروتون أو الأحماض العضوية) كمحفزات للتفاعل:

- **التفاعلات الحمضية والقاعدية** :عند استخدام DES مكونة من حمض كربوكسيلي (مثل حمض المالونيك)، يعمل المذيب كمحفز حمضي يسرع من تفاعلات الأسترة أو التحلل المائي دون الحاجة لإضافة أحماض معدنية ملوثة (H_2SO_4 أو HCl)
- **تثبيت الحالة الانتقالية** :بفضل الشبكة الكثيفة من الروابط الهيدروجينية، تعمل DES على خفض طاقة التنشيط من خلال تثبيت المركبات الوسطية المشحونة، مما يسمح بإجراء التفاعلات في درجات حرارة الغرفة.[72]

2. التحفيز الحيوي المستدام(Biocatalysis in DES)

- **تعزيز استقرار الإنزيمات** :على خلاف المذيبات العضوية التي تؤدي غالباً إلى مسخ البروتينات (Denaturation)، توفر DES بيئة "شبه مائية" تحافظ على البنية الثلاثية للإنزيمات وتزيد من نشاطها، خاصة في تفاعلات إنتاج الوقود الحيوي (Biodiesel) واستخلاص المركبات الصيدلانية[74]
- **الانتقائية الفراغية** :(Stereoselectivity) تساهم اللزوجة العالية والترتيب الجزيئي لـــ DES في توجيه التفاعل نحو نواتج محددة بدقة عالية، مما يقلل من النواتج الثانوية والنفايات الكيميائية[80]

3. التخليق الأخضر للمواد النانوية

تستخدم المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) كقوالب نانوية (Nanotemplates) مبتكرة لتصنيع الجزيئات النانوية بطرق صديقة للبيئة، إذ تعمل كمواد استقرار (Stabilizing agents) فعالة تمنع تكتل الجزيئات النانوية وتتحكم في حجمها وشكلها، مما يلغي الحاجة إلى استخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي السامة والضارة بيئيا، بالإضافة إلى ذلك تلعب هذه المذيبات دورا حيويا في تحضير الأطر المعدنية العضوية (MOFs) والأنظمة المسامية المتقدمة، والتي تستخدم لاحقاً في تطبيقات امتصاص الغازات الملوثة، مما يسهم في خلق حلقة متكاملة من الاستدامة البيئية في قطاع تكنولوجيا المواد[95]

4. إعادة تدوير نظام التفاعل(Catalyst/Solvent Recycling)

في نهاية التفاعل التخليقي، تتميز أنظمة DES بسهولة الفصل، فبإضافة كمية من الماء أو المذيب المضاد، يمكن ترسيب النواتج واسترجاع "نظام المذيب–المحفز" وإعادة استخدامه لعدة مرات دون فقدان ملحوظ في النشاط التحفيزي، هذا يقلل بشكل كبير من عامل التلوث(E-factor) ، وهو المعيار الأساسي لمدى خضار العملية الكيميائية[96]

I.10.مزايا وتحديات المذيبات اليوتكتيكية العميقة(DES)

يمثل الانتقال من المختبر إلى النطاق الصناعي اختباراً حقيقياً لأي نظام مذيبات جديد. تتميز المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) بملف تعريف فريد يجمع بين الكفاءة الكيميائية والاستدامة البيئية، مما يمنحها أسبقية على المذيبات العضوية التقليدية وحتى السوائل الأيونية (Ionic Liquids) في كثير من التطبيقا [4]

I.10.1. المزايا التقنية والبيئية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة

تصنف المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) كجيل متطور من المذيبات الخضراء التي ترتكز على مزايا تقنية واقتصادية وبيئية متينة؛ فهي تتميز باقتصاد ذري كامل وسهولة فائقة في التحضير عبر خلط مكونات اقتصادية ومتوفرة، مما يقلل التكاليف التشغيلية بنسبة تصل إلى 90% مقارنة بالسائل الأيونية، كما أنها تعد خياراً مثالياً بيئياً لانعدام ضغطها البخاري وقابليتها للتحلل الحيوي الكامل، فضلاً عن مرونتها العالية في التصميم (Task-Specific) وثباتها الحراري الذي يمتد لـــ 200 درجة مئوية. إضافة إلى ذلك، توفر DES قدرة إذابة استثنائية للمواد المعقدة مثل اللغنين وأكاسيد المعادن، مما يختصر خطوات المعالجة، مع إمكانية استردادها وإعادة استخدامها لدورات متعددة دون فقدان في الكفاءة، وهو ما يعزز من مفهوم الاقتصاد الدائري ويقلل من عامل التلوث (E-factor) في العمليات الصناعية[80]

I.10.2. القيود والتحديات العملية في استخدامDES

على الرغم من المزايا البيئية والتقنية الفائقة للمذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES)، إلا أن هناك فجوة تقنية تعيق انتقالها من النطاق المختبري إلى التطبيق الصناعي الواسع، وتتركز هذه التحديات في عدة جوانب جوهرية؛ فمن أبرزها اللزوجة العالية التي تفوق المذيبات التقليدية بمئة ضعف، مما يعيق معدلات

الانتشار الجزيئي (Diffusion) ويفرض استهلاكا مرتفعا لطاقة الضخ والتحريك [97] ومن منظور هندسي، يمثل غياب الضغط البخاري عائقا أمام استخدام تقنية التقطير الشائعة لاسترداد المذيب، مما يضطر المهندسين للجوء إلى عمليات بديلة كالتنقية الغشائية أو الترسيب بمذيبات مضادة، وهي تقنيات تزيد من تعقيد المخطط الصناعي وتستهلك موارد كيميائية إضافية[4]، كما تتأثر هذه المذيبات بشدة بالمحتوى المائي الذي قد يؤدي إلى تفكيك الشبكة اليوتكتيكية وفقدان خصائصها الفريدة، بالتوازي مع تحديات الثبات الكيميائي حيث قد تخضع بعض المكونات لتحلل حراري أو تفاعلات جانبية غير مرغوبة، مما يقلل من عمرها التشغيلي [98]، و يظل نقص البيانات الديناميكية الحرارية الدقيقة ونماذج النمذجة الرياضية التنبؤية عائقاً يحد من قدرة المهندسين على تصميم المفاعلات الصناعية بكفاءة عالية، مما يجعل التوسع في استخدامها يتطلب مزيداً من الدراسات التطبيقية [97]

I.3.10. آفاق البحث والتطوير والتطبيقات الصناعية المستقبلية

على الرغم من التقدم المحرز في فهم الكيمياء الفيزيائية للمذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES)، إلا أن الانتقال نحو التصنيع الشامل يتطلب استراتيجيات بحثية تربط بين الكفاءة الكيميائية والجدوى الهندسية، حيث تبرز تقنيات "تعلم الآلة" والنمذجة الحاسوبية كأدوات جوهرية للتنبؤ بخصائص المذيبات وتصميم أنظمة "مخصصة للمهمة" قبل تحضيرها مخبريا، مما يوفر الوقت والموارد [99]، وفي مسار موازٍ، يتجه البحث نحو ابتكار مذيبات ذكية تستجيب لمحفزات خارجية كالحرارة أو الضوء أو المغناطيسية، مما يحل معضلة الفصل الصناعي من خلال تحويل المذيب لطورين أو حالة صلبة دون الحاجة لعمليات التقطير المستهلكة للطاقة [72]، كما تشمل الرؤية المستقبلية التحول من المفاعلات الدفعية (Batch) إلى المفاعلات المستمرة والمكثفة المدمجة مع تكنولوجيا الأغشية، مدعومة بتقييمات شاملة لدورة الحياة (LCA) لضمان الاستدامة البيئية الحقيقية[100]، أبعد من ذلك تفتح هذه المذيبات آفاقا واعدة في قطاع الطاقة المتقدمة، حيث يتم استكشاف دورها كإلكتروليتات آمنة وغير قابلة للاشتعال في بطاريات الليثيوم، وتطوير عمليات تحويل ثاني أكسيد الكربون كيميائياً داخل المذيب اليوتيكتي إلى منتجات ذات قيمة مضافة، مما يرسخ مفهوم الاقتصاد الدائري للكربون في التطبيقات الصناعية المستقبلية[2].

خلاصة الفصل

تمثل المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) نقلة نوعية في هندسة العمليات الكيميائية المستدامة، حيث أثبتت الدراسات والتطبيقات التي تم تناولها في هذا الفصل قدرتها العالية على الموازنة بين الفعالية التحفيزية والمسؤولية البيئية. وعلى الرغم من أن "الفجوة التقنية" المتعلقة باللزوجة العالية وتحديات الفصل في النطاق الصناعي لا تزال تمثل عقبات جوهرية، إلا أن الآفاق البحثية الواعدة—التي تعتمد على تصميم المذيبات الموجه بالذكاء الاصطناعي وابتكار الأنظمة الذكية المستجيبة للمحفزات—تبشر بحلول هندسية قادرة على تجاوز هذه المعوقات. إن التحول المستقبلي نحو المفاعلات المستمرة والتكامل مع تقنيات الطاقة المتقدمة يعزز من مكانة هذه المذيبات كحجر زاوية في دعم الاقتصاد الدائري، مؤكداً أن الاستثمار في تطوير هذه الأنظمة ليس مجرد خيار تقني، بل ضرورة بيئية لتحقيق كيمياء صناعية أكثر كفاءة ونقاء في العقود القادمة.

قائمة المراجع

[1] A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, H. L. Munro, R. K. Rasheed, and V. Tambyrajah, "Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chainsElectronic supplementary information (ESI) available: plot of conductivity vs. temperature for the ionic liquid formed from zinc chloride and choline chloride (2: 1). See http://www. rsc. org/suppdata/cc/b1/b106357j," *Chemical communications,* pp. 2010-2011, 2001.

[2] Q. Zhang, K. D. O. Vigier, S. Royer, and F. Jérôme, "Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications," *Chemical Society Reviews,* vol. 41, pp. 7108-7146, 2012.

[3] M. Francisco, A. van den Bruinhorst, and M. C. Kroon, "Low-transition-temperature mixtures (LTTMs) :A new generation of designer solvents," *Angewandte Chemie international edition,* vol. 52, pp. 3074-3085, 2013.

[4] E. L. Smith, A. P. Abbott, and K. S. Ryder, "Deep eutectic solvents (DESs) and their applications," *Chemical reviews,* vol. 114, pp. 11060.2014 ,11082-

[5] A. Paiva, R. Craveiro, I. Aroso, M. Martins, R. L. Reis, and A. R. C. Duarte, "Natural deep eutectic solvents–solvents for the 21st century," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 2, pp. 1063-1071, 2014.

[6] Y. H. Choi, J. van Spronsen, Y. Dai, M. Verberne, F. Hollmann, I. W. Arends*, et al.*, "Are natural deep eutectic solvents the missing link in understanding cellular metabolism and physiology?," *Plant physiology,* vol. 156, pp. 1701-1705, 2011.

[7] P. Xu, G.-W. Zheng, M.-H. Zong ,N. Li, and W.-Y. Lou, "Recent progress on deep eutectic solvents in biocatalysis," *Bioresources and bioprocessing,* vol. 4, p. 34, 2017.

[8] P. T. Anastas and J. C. Warner, *Green chemistry: theory and practice*: Oxford university press, 2000.

[9] T. Welton" ,Room-temperature ionic liquids. Solvents for synthesis and catalysis," *Chemical reviews,* vol. 99, pp. 2071-2084, 1999.

[10] N. Gathergood, M. T. Garcia, and P. J. Scammells, "Biodegradable ionic liquids: Part I. Concept, preliminary targets and evaluation," *Green Chemistry,* vol. 6, pp. 166-175, 2004.

[11] A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, R. K. Rasheed, and V. Tambyrajah, "Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures," *Chemical communications,* pp. 70-71, 2003.

[12] D. O. Abranches, M .A. Martins, L. P. Silva, N. Schaeffer, S. P. Pinho, and J. A. Coutinho, "Phenolic hydrogen bond donors in the formation of non-ionic deep eutectic solvents: the quest for type V DES," *Chemical Communications,* vol. 55, pp. 10253-10256, 2019.

[13] A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, and R. Rasheed, "Ionic liquids based upon metal halide/substituted quaternary ammonium salt mixtures," *Inorganic chemistry,* vol. 43, pp. 3447-3452, 2004.

[14] A. P. Abbott, D. Boothby, G. Capper, D. L. Davies, and R. K. Rasheed, "Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 126, pp. 9142-9147, 2004.

[15] A. P. Abbott, J. C. Barron, K. S. Ryder, and D. Wilson, "Eutectic-based ionic liquids with metal-containing anions and cations," *Chemistry–A European Journal,* vol. 13, pp. 6495-6501, 2007.

[16] Y. Dai, J. Van Spronsen, G.-J. Witkamp, R. Verpoorte, and Y. H. Choi, "Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology," *Analytica chimica acta,* vol. 766, pp. 61-68, 2013.
[17] M. Freemantle, *An introduction to ionic liquids*: Royal Society of chemistry, 2010.
[18] M. V. Boldrin, K. Irikura, B. Costa E Silva, J. C. Cardoso, S. Stulp, C. Moraes Da Silva, *et al.*, "Electrochemical Applications of Metal− Organic Frameworks: Overview, Challenges, and Perspectives," *Metal− Organic Frameworks for Carbon Capture and Energy,* pp. 395-453, 2021.
[19] A. Layek, S. M. Patil, R. Gupta, and K. Jayachandran, "Palladium Nanoparticle Electrodeposition in Deep Eutectic Solvent: A Route to Enhanced Sensitivity for Uranyl Detection in Natural Waters," *Available at SSRN 4643728*.
[20] M. Marczewski, W. Tylus, and J. Winiarski, "The effect of anodic polarization parameters of 316L steel in a propylene glycol: Choline chloride eutectic solvent on surface finishing, chemistry and corrosion resistance," *Applied Surface Science,* vol. 652, p. 159335, 2024.
[21] P. Yang, L. Zhou, J. Zeng, Y. Ye, J. Lan, X. Xie*, et al*" ,.Sustainable Recovery of Cobalt and Lithium from Spent Lithium-Ion Batteries Using Water-Based Deep Eutectic Solvents," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* p. 120726, 2025.
[22] C. Zhang, Y. Jia, Y. Jing, H. Wang, and K. Hong, "Main chemical species and molecular structure of deep eutectic solvent studied by experiments with DFT calculation: a case of choline chloride and magnesium chloride hexahydrate," *Journal of molecular modeling,* vol. 20, p. 2374, 2014.
[23] A. Ayvaz, S. G. Demirba, A. Demirbaş, and N. Demirba, "One-pot multicomponent reactions in deep eutectic solvents," *Current Organic Chemistry,* vol. 27, pp. 585-620, 2023.
[24] X. Tian, S. Chen, F. Zhu, Z. Cai, and L. Wang, "Towards cleaner production of trivalent chromium electrodeposition: Mechanism, process and challenges," *Journal of Cleaner Production,* vol. 476, p. 143768, 2024.
[25] M. A. Rabah, F. Farghaly, and M. Abd-El Motaleb, "Recovery of nickel, cobalt and some salts from spent Ni-MH batteries," *Waste Management,* vol. 28, pp. 1159-1167, 2008.
[26] O. Polyachenok, E. Dudkina, and L. Polyachenok, "Thermal stability and thermodynamics of copper (II) chloride dihydrate," *The Journal of Chemical Thermodynamics,* vol. 41, pp. 74-79, 2009.
[27] R. J. Wilcox, B. P. Losey, J. C. Folmer, J. D. Martin, M. Zeller, and R. Sommer, "Crystalline and liquid structure of zinc chloride trihydrate: a unique ionic liquid," *Inorganic chemistry,* vol. 54, pp. 1109-1119, 2015.
[28] C. Lu, Z. Wang, B. Tao, Y. Wang, J. Sheng, G. Tang*, et al.*, "Deep eutectic solvent for high-performance aluminum-based hydrated eutectic electrolyte," *Chemical Engineering Journal,* vol. 499, p. 155858, 2024.
[29] O. Polyachenok, E. Dudkina, and L. Polyachenok, "Thermal stability and thermodynamics of manganese (II) chloride monohydrate," *The Journal of Chemical Thermodynamics,* vol. 41, pp. 414-419, 2009.
[30] F. LUO, Z. LI, C. HUANG, Z. NIU, X. PENG, H. JIN*, et al.*, "Determination of anthocyanins in “Zijuan” tea by ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction combined with high performance liquid chromatography," *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition,* vol. 47, pp. 355-364, 2024.
[31] R. B. Aoun, N. Trabelsi, M. Abdallah, I. Mourtzinos, and R. Mhamdi, "Towards a greener future: Exploring the challenges of extraction of chitin and chitosan as bioactive polysaccharides," *Materials Today Communications,* vol. 39, p. 108761, 2024.

[32] S. Bickel, "Ätherische Öle in Lippenblütlern: Gewürz-und Heilpflanzen–Teil 1: Lamiaceen," *Biologie in unserer Zeit-BiuZ* ,vol. 54, pp. 260-273, 2024.
[33] A. Tankou and D. Hall, "Technologies and policy levers for more sustainable batteries," 2026.
[34] A. Paul, G. Lizhen, T. Recheal, and S. Ali, "Sustainable lithium and cobalt recovery from spent lithium-ion batteries: best practices for the future. A review," *Journal of Analytical Techniques and Research,* vol. 6, pp. 43-77, 2024.
[35] R. K. Tak, P. Patel, S. Subramanian, R. I. Kureshy, and N.-u. H. Khan, "Cycloaddition reaction of spiro-epoxy oxindole with CO2 at atmospheric pressure using deep eutectic solvent," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 6, pp. 11200-11205, 2018.
[36] H. S. Sedeeq and H. M. Abood, "Cycloyvoltammetry, ATR-IR of AlCl3/Amide and Thioamide DES and the Morphology of Deposited Aluminum at Variable Potential and Temperature," 2009.
[37] I. Cabrini, G. B. Porzani, T. D. SANTOS, M. Rangel, A. Leite, M. B. Molento*, et al.*, "The toxic effect of glycerol-Cu (II) counterions on the free-living stages of Aedes aegypti," *Anais da Academia Brasileira de Ciências,* vol. 97, p. e20240949, 2025.
[38] F. Taddeo, R. Esposito, V. Russo, and M. Di Serio, "Kinetic modeling of solketal synthesis from glycerol and acetone catalyzed by an iron (III) complex," *Catalysts,* vol. 11, p. 83, 2021.
[39] F. A. Oyinloye" ,Cost-efficiency and beneficial effects of the process to recover lignin, hemicellulose and cellulose with deep eutectic solvent," 2020.
[40] A. T. Brandão and S. State, "Electrochemical Synthesis of Nanomaterials Using Deep Eutectic Solvents: A Comprehensive Review," *Nanomaterials,* vol. 16, p. 15, 2025.
[41] P. Inthamad, A. I. Putkham, S. Wongsaipun, W. Janrungroatsakul, A. Sirikulkajorn, and W. C. Chaiyasith, "Natural Deep Eutectic Solvent–Based Magnetic Nanofluid Microextraction for Sensitive Determination of Cadmium in Tap Water and Tea Leaves by GFAAS," *Food Chemistry Advances,* p. 101233, 2026.
[42] R. Liu, H. Wang, and G. Li, "Biogas purification with ionic liquids and deep eutectic solvents: Progress and challenges," *Separation and Purification Technology,* p. 136256, 2025.
[43] M. Kabir, I. López-Cortés, C. Ferrer-Gisbert, D.-D. Moposita-Vasquez, and B. Velázquez-Martí, "From Upstream Assessment to Downstream Energy Conversion: A Systematic Review of Advances in Biomass Residue Utilization Techniques," *Biomass,* vol. 6, p. 24, 2026.
[44] S. Sajjad, K. Karshiev, S. Tillayev, and M. Soylak, "Ternary deep eutectic solvent-based microextraction of rhodamine B from environmental matrices before UV–Vis analysis," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry,* pp. 1-21, 2026.
[45] H. Liu, J. Lv, and Y. Yang, "Recyclable water-modified deep eutectic solvents for removal of multiple heavy metals from soil," *Chemosphere,* vol. 350, p. 141141, 2024.
[46] G. K. Zheng, S. K. M. Rozi, Q. Y. Ang, R .Rahamathullah, S. Shamsudin, F. L. M. Rasdi*, et al.*, "Thymol–Menthol-Based Deep Eutectic Solvents for Efficient Rhodamine B Remediation: Molecular Interactions, Economic Feasibility, and Environmental Assessment," *Water, Air, & Soil Pollution,* vol. 236 ,p. 998, 2025.
[47] J. A. Kist, H. Zhao, K. R. Mitchell-Koch, and G. A. Baker, "The study and application of biomolecules in deep eutectic solvents," *Journal of Materials Chemistry B,* vol. 9, pp. 536-566, 2021.
[48] S. Bajkacz and J. Adamek, "Development of a method based on natural deep eutectic solvents for extraction of flavonoids from food samples," *Food analytical methods,* vol. 11, pp. 1330-1344, 2018.

[49] S. A. Chadi, "Modification Of Chitosan With Deep Eutectic Solvent For The Adsorption Of Malachite Green," 2022.
[50] M. S. Aminuddin, M. A. Bustam, and K. Johari, "Latest technological advances and insights into capture and removal of hydrogen sulfide: a critical review," *RSC sustainability,* vol. 2, pp. 757-803, 2024.
[51] I. Kopanichuk, A. Scerbacova, A. Ivanova, A. Cheremisin, and A. Vishnyakov, "The effect of the molecular structure of alkyl ether carboxylate surfactants on the oil–water interfacial tension," *Journal of Molecular Liquids,* vol. 360, p. 119525, 2022.
[52] J. S. Rodrigues, V. Takeshita, E. V. Campos, A. S. de Freitas, V. H. de Lima, and L. F. Fraceto, "Lignocellulosic biomass in nanopesticides: A path toward sustainable agriculture," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 12, pp. 10045-10067, 2024.
[53] P. Satija, A. Chambyal, G. Singh, Ritvik, G. Singh, S. Devi*, et al.*, "Natural deep eutectic solvents (NADES): Manufacture, characteristics, and their significance as designer solvents," *ChemistrySelect,* vol. 9, p. e202401212, 2024.
[54] N. Prinos, "Experimental study and thermodynamic modelling of mixtures containing third generation ionic liquids and deep eutectic solvents," 2025.
[55] D. Rente, M. C. Bubalo, M. Panić, A. Paiva, B. Caprin, I. R. Redovniković*, et al.*, "Review of deep eutectic systems from laboratory to industry, taking the application in the cosmetics industry as an example," *Journal of cleaner production,* vol. 380, p. 135147, 2022.
[56] K. J. Suthar, "Natural deep eutectic solvents in extraction science: progress, challenges, and future prospects," *Separation Science Plus,* vol. 8, p. e70075, 2025.
[57] O. Ozkilinc, "Thermodynamic Modeling and Molecular Dynamics Simulations of Deep Eutectic Solvents," 2025.
[58] B. M. Trost, "The atom economy—a search for synthetic efficiency," *Science,* vol. 254, pp. 1471-147.1991 ,7
[59] L. Lomba, C. B. García, M. P. Ribate, B. Giner, and E. Zuriaga, "Applications of deep eutectic solvents related to health, synthesis, and extraction of natural based chemicals," *Applied Sciences,* vol. 11, p. 10156, 2021.
[60] C. Y. Choi YoungHae, J. v. Spronsen, D. Y. Dai YunTao, M. Verberne, F. Hollmann, I. Arends*, et al.*, "Are natural deep eutectic solvents the missing link in understanding cellular metabolism and physiology?," 2011.
[61] R. A. Sheldon, "Fundamentals of green chemistry: efficiency in reaction design," *Chemical Society Reviews,* vol. 41, pp. 1437-1451, 2012.
[62] V. N. Singh, *Chemical methods for processing nanomaterials*: CRC Press Boca Raton, FL, 2021.
[63] A. Hayyan, M. H. Zainal-Abidin, S. S. S. Putra, Y. M. Alanazi, J. Saleh, M. R. M. Nor*, et al.*, "Evaluation of biodegradability, toxicity and ecotoxicity of organic acid-based deep eutectic solvents," *Science of The Total Environment,* vol. 948, p. 174758, 2024.
[64] K. K. de Lima Augusto, P. C. Gomes-Junior, R. de Oliveira Gonçalves, E. Piccin, and O. Fatibello-Filho, "Green synthesis of a hydrophobic deep eutectic solvent and application as electrode modifier for electrochemical detection of diuron," *Analytical Methods,* vol. 17, pp. 7948-7958, 2025.
[65] M. Cvjetko Bubalo, S. Vidović, I. Radojčić Redovniković, and S. Jokić, "Green solvents for green technologies," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology,* vol. 90, pp. 1631-1639, 2015.
[66] G. Garcia, M. Atilhan, and S. Aparicio, "Interfacial properties of deep eutectic solvents regarding to CO2 capture," *The Journal of Physical Chemistry C,* vol. 119, pp. 21413-21425, 2015.

[67] M. Kazemi and M. Ghobadi, "Magnetic manganese nanocatalyst based on Fe_3O_4@ SiO_2: A green approach for the alkoxycarbonylation of aryl iodides," *Chemical and Pharmaceutical Letters,* vol. 1, pp. 1-17, 2025.

[68] I. Wazeer, M. K. Hadj-Kali, and I. M. Al-Nashef, "Utilization of deep eutectic solvents to reduce the release of hazardous gases to the atmosphere: A critical review," *Molecules,* vol ,26 .p. 75, 2020.

[69] M. Bagović Kolić, M. Železnjak, K. Markov, V. Gaurina Srček, M. Cvjetko Bubalo, K. Radošević*, et al.*, "Physicochemical and biological properties of menthol and thymol-based natural deep eutectic solvents," *Molecules,* vol. 30, p. 1713.2025 ,

[70] L. A. Jiménez-Ortega, M. Marques, M. P. Quiñonez-Angulo, A. Paiva, J. B. Heredia, A. R. C. Duarte*, et al.*, "Sustainable extraction of phytochemicals from agricultural and food by-products using eutectic solvents and their integration into functional materials," *RSC Sustainability,* vol. 4, pp. 687-719, 2026.

[71] S. Zamindar, S. Mandal, M. Murmu, and P. Banerjee, "Unveiling the future of steel corrosion inhibition: a revolutionary sustainable odyssey with a special emphasis on N+-containing ionic liquids through cutting-edge innovations," *Materials Advances,* vol. 5, pp. 4563-4600, 2024.

[72] D. O. Abranches and J. A. Coutinho, "Everything you wanted to know about deep eutectic solvents but were afraid to be told," *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering,* vol. 14, pp. 141-163, 2023.

[73] M. Hayyan, Y. P. Mbous, C. Y. Looi, W. F. Wong, A. Hayyan, Z. Salleh*, et al.*, "Natural deep eutectic solvents: cytotoxic profile," *SpringerPlus,* vol. 5, p. 913, 2016.

[74] E. Chevé-Kools, Y. H. Choi, C. Roullier, G. Ruprich-Robert, R. Grougnet, F. Chapeland-Leclerc*, et al.*, "Natural deep eutectic solvents (NaDES): green solvents for pharmaceutical applications and beyond," *Green Chemistry,* vol. 27, pp. 8360-8385, 2025.

[75] E. L. De Faria, R. S .Do Carmo, A. F. M. Cláudio, C. S. Freire, M. G. Freire, and A. J. Silvestre, "Deep eutectic solvents as efficient media for the extraction and recovery of cynaropicrin from Cynara cardunculus L. leaves," *International journal of molecular sciences,* vol. 1 ,8p. 2276, 2017.

[76] M. Shaibuna, S. P. Padinhattath, and R. L. Gardas, "Efficient removal of multiple heavy metal ions from wastewater using task-specific hydrophobic deep eutectic solvents: A circular approach," *Journal of Molecular Liquids,* vol. 416 ,p. 126487, 2024.

[77] A. Sadeghi and G. R. Pazuki, "Separation of heavy metals using aqueous two-phase systems based on choline chloride/urea and betaine/urea deep eutectic solvents," *Scientific Reports,* vol. 15, p. 3948, 2025.

[78] C. Florindo, F. Lima ,L. C. Branco, and I. M. Marrucho, "Hydrophobic deep eutectic solvents: a circular approach to purify water contaminated with ciprofloxacin," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* vol. 7, pp. 14739-14746, 2019.

[79] M. Cheliukanov, G. Gurkin, R. Perchikov, A. Medvedeva, T. Lavrova, T. Belousova*, et al.*, "Whole cells of microorganisms—A powerful bioanalytical tool for measuring integral parameters of pollution: A review," *Biosensors,* vol. 15, p. 290, 2025.

[80] C. Ferreira and M. Sarraguça, "A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest," *Pharmaceuticals,* vol. 17, p. 124, 2024.

[81] A. Farooq, H. Memon, A. Farooq, and Z. Wang, *Deep eutectic solvents in the textile industry*: Springer, 2024.

[82] S. Hong, A. Wei, C. Xie, X. Shen, J.-L. Wen, and T.-Q. Yuan, "DES-driven sustainable dual valorization of lignocellulose into carbon dots and porous biochar for effective

wastewater remediation," *International Journal of Biological Macromolecules,* vol. 282, p. 137159, 2024.

[83] S. Ponce, H. A. Murillo, F. Alexis, J. Alvarez-Barreto, and J. R. Mora, "Green synthesis of nanoparticles mediated by deep eutectic solvents and their applications in water treatment," *Sustainability,* vol. 15, p. 970.2023 ,3

[84] R. B. Leron and M.-H. Li, "Solubility of carbon dioxide in a eutectic mixture of choline chloride and glycerol at moderate pressures," *The Journal of Chemical Thermodynamics,* vol. 57, pp. 131-136, 2013.

[85] H. Ghaedi, J. Fu, P. Kalhor, S. M .Soltani, and M. Zhao, "Enhanced CO 2 capture performance of mesoporous silica materials with TEPA amine-based deep eutectic solvent: kinetics and mechanism," *Journal of Materials Chemistry A,* vol. 13, pp. 23655-23670, 2025.

[86] P. V. Dangre, H. P. Borase, M. C. Gunde, A. M. Pethe, and M. R. Borkar, "Deep eutectic solvents: fundamental aspect, characterizations and applications," *Recent Advances in Drug Delivery and Formulation: Formerly Recent Patents on Drug Delivery & Formulation,* vol. 17, pp. 3-12.2023 ,

[87] R. Zhang, Q. Ke, Z. Zhang, B. Zhou, G. Cui, and H. Lu, "Tuning functionalized ionic liquids for CO2 capture," *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 23, p. 11401, 2022.

[88] F. H. Isikgor and C. R. Becer, "Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers," *Polymer chemistry,* vol. 6, pp. 4497-4559, 2015.

[89] H. Rajapakse, R. Raviadaran, and D. Chandran, "Deep eutectic solvents for pretreatment of lignocellulosic biomass: Towards circular bioeconomy," *Results in Engineering,* vol. 26, p. 105188, 2025.

[90] Z. Zhang, J. Xu, J. Xie, Z. Zhou, S. Zhu, J. Li, *et al.*, "Model-based process intensification of deep eutectic solvent treatment of eucalyptus slabs for lignin extraction and pulp production," *Chemical Engineering Journal,* vol. 490, p. 151745, 2024.

[91] A. N. Paparella, S. Perrone, A. Salomone, F. Messa, L. Cicco, V. Capriati, *et al.*, "Use of Deep Eutectic solvents in Plastic depolymerization," *Catalysts,* vol. 13, p. 1035, 2023.

[92] M. K. Najaf-Abadi, B. Ghobadian, and M. Dehghani-Soufi, "A review on application of deep eutectic solvents as green catalysts and co-solvents in biodiesel production and purification processes," *Biomass Conversion and Biorefinery,* vol. 14, pp. 3117-3 ,134 .2024

[93] D. J. Ramón and G. Guillena, "Deep eutectic solvents: synthesis, properties, and applications," 2020.

[94] D. A. Alonso, A. Baeza, R. Chinchilla, G. Guillena, I. M. Pastor, and D. J. Ramón, "Deep eutectic solvents: the organic reaction medium of the century," *European Journal of Organic Chemistry,* vol. 2016, pp. 612-632, 2016.

[95] P. Li, F.-F. Cheng, W.-W. Xiong, and Q. Zhang, "New synthetic strategies to prepare metal–organic frameworks," *Inorganic Chemistry Frontiers,* vol. 5, pp. 2693-2 ,708 .2018

[96] L. Xu, J. Yin, J. He, H. Li, L. Zhu, H. Ning, *et al.*, "Completely inorganic deep eutectic solvents for efficient and recyclable liquid–liquid interface catalysis," *Advanced Materials,* vol. 36, p. 2313853, 2024.

[97] T. El Achkar, H. Greige-Gerges, and S. Fourmentin, "Basics and properties of deep eutectic solvents: a review," *Environmental chemistry letters,* vol. 19, pp. 3397-3408, 2021.

[98] T. Negi, A. Kumar, S. K. Sharma, N. Rawat, D. Saini, R. Sirohi, *et al.*, "Deep eutectic solvents: Preparation, properties, and food applications," *Heliyon,* vol. 10, 2024.

[99] A. T. Yeow, A. Hayyan, M. Hayyan, M. U. M. Junaidi, J. Saleh, W. J. Basirun, *et al.*, "A comprehensive review on the physicochemical properties of deep eutectic solvents," *Results in Chemistry,* vol. 7, p. 101378, 2024.

[100] C. Florindo, F. Lima, B. D. Ribeiro, and I. M. Marrucho, "Deep eutectic solvents: overcoming 21st century challenges," *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry,* vol. 18, pp. 31-36, 2019.

الفصل الثاني:

تحليل دراسات

سابقة

تعد الدراسات السابقة الركيزة الأساسية لأي بحث علمي رصين، فهي الإطار الذي يضع العمل الحالي في سياقه الصحيح، في هذا الفصل نستعرض الجهود البحثية التي تناولت المذيبات اليوتيكتية العميقة(DES) ، بدءا من اكتشافها وتطور خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وصولاً إلى تطبيقاتها المتنوعة في مجالات الكيمياء الخضراء والاستدامة الصناعية. لا يكتفي هذا الفصل بسرد ما توصل إليه الباحثون السابقون فحسب، بل يسعى إلى تحليل المسارات التي اتخذتها هذه الأبحاث، وتوضيح الفجوات التي سعت الدراسات المختلفة إلى سدها. من خلال هذا الاستعراض، نضع خارطة طريق توضح تطور المعرفة في هذا المجال، مما يمهد الطريق لفهم الأسس العلمية والتقنية التي يستند إليها هذا البحث الحالي.

II.1. المحور الأول: دراسات سابقة حول استخدام DES في معالجة المياه العادمة واستخلاص الملوثات

II.1.1. الدراسة الاولى: الترسيب الفعّال بمساعدة الماء للنيكل والمنغنيز والكوبالت من مذيب الإيثالين سهل الانصهار العميق[1]

Efficient water-assisted precipitation of nickel, manganese, and cobalt from ethaline deep eutectic solvent

المؤلفين وسنة النشر:

Yifeng Wang, Eider Goikolea, Idoia Ruiz de Larramendi, Senentxu Lanceros-Méndez, Qi Zhang (2026).

الهدف من الدراسة:

تطوير استراتيجية بسيطة ومنخفضة التكلفة لاستعادة الكاتيونات المعدنية الانتقالية (Ni, Mn, Co) من المذيب سهل الانصهار (Ethaline DES) المستخدم في معالجة مواد كاثود بطاريات الليثيوم–أيون المستهلكة، وإعادة تجديد المذيب لغرض إعادة استخدامه

المنهجية والتجربة:

- **تحضير المذيب** : تم تحضير إيثالين DES بنسبة مولية (1:2) من كلوريد الكولين وجليكول الإيثيلين، مع التسخين والتحريك حتى التجانس .
- **عملية الاستخلاص** : أذيبت مواد كاثود البطاريات ($LiCoO_2$ و NMC) في المذيب عند درجة حرارة 215 درجة مئوية تحت ظروف تحكم دقيقة .

- **الترسيب المائي :** أضيف الماء المقطر إلى المذيب المحمل بالمعادن بنسب حجمية مختلفة (من 1:1 إلى 1:5) لتحفيز ترسيب المعادن الانتقالية (Ni, Mn, Co) على شكل هيدروكسيدات .
- **التجديد والاسترداد :** فصلت الرواسب بالطرد المركزي، ثم جفف المذيب حراريا (90 درجة مئوية) لإزالة الماء الزائد واستعادة كفاءته التشغيلية .
- **التوصيف التحليلي :**استخدمت تقنيات (ICP-MS) لقياس كفاءة الترسيب، و (FTIR)لمراقبة الحالة اليوتكتيكية للمذيب، و (XPS/XRD)لتحديد بنية وخصائص الرواسب الناتجة.

النتائج:

أثبتت الدراسة فعالية استراتيجية الترسيب بمساعدة الماء، حيث تم ترسيب 94% من النيكل، و98% من المنغنيز، و99% من الكوبالت. كما أظهرت النتائج إمكانية إعادة استخدام المذيب لثلاث دورات مع تحسن في أداء الاستخلاص نتيجة تراكم أيونات ثلاثي الكلوريد، مع بقاء أكثر من 90% من الليثيوم في المحلول ليتم استرداده لاحقا

II.2.1. الدراسة الثانية: آلية إزالة المضادات الحيوية من المياه العادمة بواسطة الفحم الحيوي المعدل بالمذيبات سهلة الانصهار القائمة على الكولين[2].

Mechanism of Antibiotic Removal from Wastewater by Choline-Based Deep Eutectic Solvents Modified Biochar

المؤلفين وسنة النشر:

Yue Zhao, Yunze Li, Xingwang Li, Qingxin Xue, Xinyao Yang, Jing Tong. (2026).

الهدف من الدراسة:

- توضيح كيفية تأثير تعديل الفحم الحيوي باستخدام المذيبات سهلة الانصهار (DES) على كفاءة امتزاز التتراسيكلين (TC)
- تحديد الخصائص الهيكلية للفحم الحيوي التي تؤثر على عملية الامتزاز والعوامل الرئيسية المتحكمة فيها
- فهم العلاقة الجوهرية بين هذه العوامل والآليات المجهرية للامتزاز، وتحديد مواقع الامتزاز على سطح الفحم الحيوي..

المنهجية والتجربة:

1. تحضير الفحم الحيوي: تم تحضير الفحم الحيوي من نبات البرسيم عبر الكربنة عند 600 درجة مئوية تحت جو من النيتروجين، وسمي BC_{600}

2. تخليق المذيبات (DES): تم تحضير خمسة أنواع من المذيبات باستخدام كلوريد الكولين (HBA) مع مانحين للرابطة الهيدروجينية (HBD) مثل الجلسرين، وحمض اللبنيك، وحمض الستريك، وحمض الطرطريك، وحمض المالونيك.

3. عملية التعديل: خلط الفحم الحيوي مع المذيبات في الميثانول، ثم أخضع للموجات فوق الصوتية والتحريك، ثم جفف وغسل بالماء المقطر.

4. اختبارات الامتزاز: تم إجراء تجارب الامتزاز في أنابيب طرد مركزي عند سرعة 120 دورة/دقيقة، وقياس التركيز عند طول موجي 357nm ، مع دراسة تأثيرات الجرعة، والزمن، والتركيز الأولي، ودرجة الحرارة، ودرجة الحموضة (pH).

5. التحليل: استخدمت تقنيات مثل XRD، SEM/EDS، FTIR، وBET لتوصيف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد.

النتائج:

- أدى التعديل بالمذيبات إلى زيادة ملحوظة في قدرة إزالة التتراسيكلين، حيث حققت جميع العينات المعدلة زيادة تزيد عن الضعف في سعة الامتزاز خلال ساعتين
- حقق الفحم الحيوي المعدل بحمض الستريك (ChCl-Citric acid) أعلى سعة امتزاز بلغت 3.687 $mg.\ g^{-1}$ عند درجة حرارة K293.15
- تتبع عملية الامتزاز حركية "الرتبة الثانية الكاذبة" (pseudo-second-order) وتوصف بشكل أفضل بنموذج "لانجمويير" (Langmuir)، مما يشير إلى حدوث امتزاز كيميائي أحادي الطبقة
- أشارت النتائج الديناميكية الحرارية إلى أن العملية تلقائية وممتصة للحرارة، وتتضمن مسارات متعددة مثل نقل الكتلة الخارجي والانتشار داخل الجزيئات
- خلصت الدراسة إلى أن التعديل بالمذيبات ينظم بشكل متناسق كيمياء السطح وتوافر المسام، مما يعزز كفاءة الإزالة.

II.3.1. الدراسة الثالثة: فعالية المذيبات سهلة الانصهار الحمضية في استخلاص المعادن الأساسية الخطرة من نفايات لوحات الدوائر المطبوعة[3].

Effectiveness of acidic deep eutectic solvents in recovery of hazardous base metals from waste printed circuit boards.

المؤلفين وسنة النشر:

Emmanuel Anuoluwapo Oke· Johannes Herman Potgieter (2025).

الهدف من الدراسة:

تهدف الدراسة إلى تقييم كفاءة استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DESs) كبديل "أخضر" وصديق للبيئة للطرق التقليدية (التي تتسم بالتكلفة العالية والسمية) لاستخلاص المعادن الثقيلة (Pb, Cr, Zn, Ni) من نفايات لوحات الدوائر المطبوعة (PCBs).

المنهجية والتجربة:

- استخدم الباحثون ثلاثة أنواع من المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DESs) المحضرة باستخدام كلوريد الكولين (ChCl) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية(HBA) ، مقترنة مع حمض الخليك(AA) ، أو حمض الكلورواسيتيك(CAA) ، أو حمض ثنائي كلورو الأسيتيك (DCA) كمانح للرابطة الهيدروجينية.(HBD)
- تم إجراء تجارب الاستخلاص على نفايات لوحات الدوائر المطبوعة (PCBs) بعد معالجتها مسبقا بمحلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) لإزالة طبقة الإيبوكسي، ثم طحنها وغربلتها.
- أجريت عمليات الاستخلاص في دورق ذو عنقين تحت ظروف جوية عادية مع إضافة 1.0 M من بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) كعامل مؤكسد، مع التحكم في درجات الحرارة (30–80 °C) وسرعة التحريك (500 rpm).

النتائج:

- أظهر المذيب (ChCl:DCA) أعلى كفاءة في الاستخلاص مقارنة بـــ (ChCl:CAA) و (ChCl:AA).
- تحققت كفاءات استخلاص بلغت 89.5% للرصاص(Pb) ، 55.2% للكروم(Cr) ، 80.5% للزنك (Zn)، و88.6% للنيكل (Ni) عند درجة حرارة 50 °C لمدة 3 h

- عند إضافة 40% من الماء إلى المذيب(ChCl:DCA) ، ارتفعت كفاءة الاستخلاص لتصل إلى 99.8% للرصاص، 71.8% للكروم، 100% للزنك، و84.9% للنيكل.
- أكدت النتائج من خلال نموذج النواة المتقلصة (SCM) أن عملية استخلاص المعادن محكومة بآلية الانتشار.(Diffusion-controlled mechanism)

II.4.1. الدراسة الرابعة: بوليمر مطبوع جزيئيا قائم على المذيبات اليوتكتيكية العميقة للامتزاز الانتقائي لـــ "إمتريسيتابين" في المياه الملوثة[4].

Deep eutectic solvent-based molecularly imprinted polymer for the selective adsorption of emtricitabine in contaminated water.

المؤلفين وسنة النشر:

Keamohetse Asmiralda Makgoana·Alex Tawanda Kuvarega. Kutloano Edward Sekhosana. Lawrence Mzukisi Madikizela (2025).

الهدف من الدراسة:

تطوير وتخليق بوليمر مطبوع جزيئيا (MIP) صديق للبيئة باستخدام مذيب يوتكتيكي عميق (DES) كمونومر وظيفي أخضر، لاستخدامه كماص انتقائي في تقنية الاستخلاص بالطور الصلب (SPE) لإزالة عقار إمتريسيتابين من الأنظمة المائية.

المنهجية والتجربة:

- تم تحضير المذيب اليوتكتيكي العميق (DES) ثلاثي المكونات (حمض الكافيك، كلوريد الكولين، وحمض الفورميك بنسبة مولارية 1:4:2) بطريقة التسخين
- تم تخليق البوليمر المطبوع جزيئيا (DES-MIP) عبر تفاعل بلمرة كتلية (Bulk polymerization) باستخدام "إمتريسيتابين" كقالب، و(DES) كمونومر وظيفي، و(EGDMA) كعامل تشابك، في مذيب (إيثانول–ماء 9:1 v/v)
- أجريت تجارب الامتزاز الدفعي (Batch adsorption) مع تحسين العوامل المؤثرة (الأس الهيدروجيني pH، وقت التلامس، كتلة البوليمر، والتركيز الابتدائي)
- تم استخدام HPLC-DAD لتحديد كمية "إمتريسيتابين" الممتزة.

النتائج:

- أظهرت دراسات الحركة أن عملية الامتزاز تتبع نموذج الحركة من الرتبة الثانية الكاذبة (Pseudo-second-order)، مما يشير إلى أن العملية هي امتزاز كيميائي (Chemisorption)
- توافقت البيانات التجريبية بشكل ممتاز مع نموذج "لانجمويير" للامتزاز (Langmuir isotherm) بـــ $R^2 \geq 0.99$، مما يشير إلى حدوث امتزاز أحادي الطبقة على مواقع ارتباط متجانسة
- بلغت السعة القصوى للامتزاز (Maximum adsorption capacity) للبوليمر (DES-MIP) حوالي 4.649 $mg\ g^{-1}$
- أظهر البوليمر انتقائية عالية تجاه "إمتريسيتابين" بكفاءة استخلاص بلغت 80% في وجود مركبات منافسة (مثل "لاميفودين" و"أباكافير")، مع معامل توزيع (K_D) يساوي 1.59$mg\ g^{-1}$

II.5.1. الدراسة الخامسة: نشارة الخشب المفسفرة المصنعة عبر مذيب يوتكتيكي عميق (فوسفات الغوانيدين): التحضير وأداء امتزاز الأصباغ[5].

Phosphorylated sawdust synthesized via guanidine phosphate deep eutectic solvent: preparation and its dye adsorption performance.

المؤلفين وسنة النشر:

Hao Li. Lebin Zhao. Wen Chen. Zhubao Shao. Kaitao Zhang (2026).

الهدف من الدراسة:

تهدف الدراسة إلى تحسين قدرة نشارة الخشب (كأحد مخلفات الغابات) على امتزاز الصبغات من المحاليل المائية، وذلك من خلال تعديلها كيميائيا (الفسفرة) باستخدام مذيب يوتكتيكي عميق (DES) قائم على فوسفات الغوانيدين كوسيط تفاعل أخضر، لتقييم كفاءتها في إزالة صبغة "الميثيلين الأزرق" (MB).

المنهجية والتجربة:

1. تم تحضير المادة الماصة (نشارة الخشب المُفسفرة) باستخدام المذيب اليوتكتيكي العميق (Guanidine phosphate DES) كوسيط للتعديل الكيميائي.

2. تم إجراء توصيف شامل للمادة الناتجة باستخدام تقنيات (FTIR, XRD, TGA, SEM) للتأكد من التغيرات الهيكلية الناتجة عن عملية الفسفرة.

3. أجريت تجارب الامتزاز الدفعي (Batch adsorption) لتحسين العوامل المؤثرة مثل (pH، زمن التلامس، جرعة المادة الماصة، والتركيز الابتدائي للصبغة).

4. تم استخدام نماذج حركية وحرارية (مثل نموذج الرتبة الثانية الكاذبة ونموذج لانجمويز) لتحليل بيانات الامتزاز.

النتائج:

- أظهرت النتائج أن عملية الامتزاز تتبع نموذج الحركة من الرتبة الثانية الكاذبة (Pseudo-second-order).
- وصفت بيانات التوازن بشكل أفضل بواسطة نموذج "لانجمويز" (Langmuir isotherm)، مما يشير إلى حدوث امتزاز أحادي الطبقة على مواقع ارتباط متجانسة.
- حققت العملية كفاءة إزالة قصوى لصبغة الميثيلين الأزرق بلغت 97.5±0.1، مع سعة امتزاز أحادية الطبقة وفقا لنموذج لانجمويز بلغت 355.87mg/g.
- أثبتت الدراسة أن طريقة الفسفرة القائمة على المذيبات اليوتكتيكية العميقة تعد وسيلة فعالة ومبتكرة لتعزيز قدرة المواد الحيوية المهملة (مخلفات الغابات) على معالجة المياه الملوثة.

II.6.1. الدراسة السادسة: تعزيز الاستخلاص الأخضر للنيوديميوم والحديد باستخدام المذيب اليوتكتيكي العميق (TGA-ChCl) والفيرميكوليت: الاستخلاص المستدام للمغناطيسات[6].

Enhancing green recovery of Nd and Fe using TGA-ChCl DES and vermiculite: sustainable leaching of NdFeB magnets with deep eutectic solvents (DES).

المؤلفين وسنة النشر:

Abel Thekeparampil Varghese. and Anjana Das (2025)

الهدف من الدراسة: تطوير منهجية مبتكرة ومستدامة لاستخلاص عنصر النيوديميوم (Nd) من مغناطيسات (NdFeB) المستهلكة، وذلك باستخدام مذيب يوتكتيكي عميق (DES) قائم على حمض الثيوجليكوليك (TGA) وكلوريد الكولين (ChCl)، مع استخدام معدن "الفيرميكوليت" كمادة ماصة في عملية الاسترداد اللاحقة، لتقليل الاعتماد على الطرق التقليدية عالية الاستهلاك للطاقة والمولدة للنفايات الكيميائية.

المنهجية والتجربة:

- تم تحضير المذيب اليوتكتيكي العميق (TGA-ChCl) وتوصيفه باستخدام تقنية (FTIR) للتأكد من تكوينه، واستخدام (NMR) لتحديد وجود الهيدروكربونات الأليفاتية داخله.
- تم استخدام المذيب المحضر لعملية استخلاص (Leaching) لعنصر النيوديميوم والحديد من نفايات المغناطيسات.
- تم إدخال "الفيرميكوليت" كمادة ماصة لتعزيز عملية استرداد المعادن من المحلول الناتج.
- أجريت تحليلات دقيقة مثل (XRD) لدراسة البلورية، و(SEM) لتوضيح التغيرات في المورفولوجيا السطحية للمادة الماصة بعد الاستخدام.

النتائج:

- أثبتت النتائج نجاح تشكيل في المذيب اليوتكتيكي العميق (TGA-ChCl) وفعاليته العالية في استخلاص المعادن من النفايات المغناطيسية.
- أظهر استخدام الفيرميكوليت كفاءة ملحوظة في عملية الفصل والاسترداد اللاحق للمعادن، مما يوفر بديلاً صديقاً للبيئة لعمليات الاستخلاص بالمذيبات التقليدية.
- تؤكد الدراسة أن الجمع بين المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) والمواد الماصة الطبيعية مثل الفيرميكوليت يعد استراتيجية واعدة ومستدامة لإعادة تدوير النفايات الإلكترونية والمغناطيسية.

الجدول (II.1.): ملخص الدراسات لتطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في معالجة المياه العادمة واستخلاص الملوثات.

الرقم	المرجع	نوع المذيب (DES)	المادة المستهدفة / الملوث	التقنية المنهجية	أهم النتائج
1	[1]	إيثالين (ChCl:EG)	Ni, Mn, Co (بطاريات)	الترسيب بمساعدة الماء	وإعادة >94% استخلاص تدوير المذيب لـــ 3 دورات.
2	[2]	كولين + أحماض عضوية	التتراسيكلين (TC)	تعديل الفحم الحيوي	زيادة سعة الامتزاز لأكثر من الضعف.
3	[3]	أحماض (AA, CAA, DCA) + ChCl	المعادن الثقيلة (Pb, Cr, Zn, Ni)	الاستخلاص الكيميائي	استخلاص حتى 99.8% للرصاص عند إضافة الماء.
4	[4]	ثلاثي (كافيك/كولين/فورميك)	إمتريسيتابين (دواء)	بلمرة مطبوعة (MIP)	انتقائية عالية وسعة امتزاز 4.649 mg/g.
5	[5]	فوسفات الغوانيدين	صبغة الميثيلين الأزرق	فسفرة نشارة الخشب	كفاءة إزالة 97.5% وسعة 355.87 mg/g.
6	[6]	TGA-ChCl	النيوديميوم والحديد	استخلاص + امتزاز (فيرميكوليت)	استراتيجية مستدامة لتدوير المغناطيسات.

II.1.7. تحليل الدراسات حول استخدام DES في معالجة المياه العادمة واستخلاص الملوثات

يمثل استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة (DES) في معالجة المياه العادمة واستخلاص المعادن نقلة نوعية نحو "الكيمياء الخضراء". تظهر الدراسات أن هذه المذيبات لا تعمل فقط كوسط بديل للمذيبات العضوية السامة، بل كأدوات هندسية نشطة بفضل خصائصها الفريدة.

أولا: نقاط القوة والابتكارات التقنية

- **الاستدامة والتدوير** : برزت قدرة المذيبات على استرداد المعادن الاستراتيجية (مثل الليثيوم، النيكل، النيوديميوم) من النفايات الإلكترونية، مع إمكانية تجديد المذيب وإعادة استخدامه لدورات متعددة[1, 6].

- **الكفاءة العالية في المعالجة :** أثبتت الدراسات أن تعديل المواد الماصة (مثل الفحم الحيوي ونشارة الخشب) بالمذيبات اليوتكتيكية يعزز من قدرتها على إزالة الملوثات العضوية (مثل التتراسيكلين والأصباغ) عبر تنظيم كيمياء السطح وتوفير مواقع امتزاز نشطة[2, 5]

- **التخصيص الجزيئي :** توفر تقنية "البلمرة المطبوعة جزيئيا(MIP) "القائمة على الـــ DES دقة عالية في استخلاص مركبات دوائية محددة (مثل الإمتريسيتابين)، مما يقلل من التداخلات الكيميائية في المياه الملوثة.[4]

ثانيا: الثغرات والآفاق المستقبلية

- **التعقيد الصناعي :** على الرغم من النتائج المختبرية الباهرة، لا تزال هناك حاجة لمزيد من البحث حول استقرار هذه المذيبات عند تعرضها لظروف مياه عادمة تحتوي على ملوثات معقدة ومتعددة في آن واحد.

- **الاقتصاديات الصناعية :** يتطلب الانتقال إلى التطبيق الصناعي الواسع دراسات جدوى اقتصادية دقيقة توازن بين تكلفة تحضير المذيبات (خاصة التي تستخدم أحماضاً عضوية متخصصة) وبين تكلفة العمليات التقليدية.

II.2. المحور الثاني: دراسات سابقة حول استخدام DESفي احتجاز الغازات الملوثة والانبعاثات الصناعية

II.2.1. الدراسة الأولى: مذيب سهل الانصهار عميق منخفض اللزوجة يتكون من (EmimCl) و (4-methylimidazole) لامتصاص ثنائي أكسيد الكبريت: التصنيع، دراسات نظرية الكثافة الوظيفية، ودراسات آلية التفاعل [7]

Low-viscosity deep eutectic solvent composed of EmimCl and 4-methyli midazole for SO_2 absorption: Synthesis, DFT studies, reaction

المؤلفين وسنة النشر:

JinBo Xu, Liming Cheng, Shaohe Wang, Yonghui Liu, Jun Du. 2026

الهدف من الدراسة:

تصميم وتحضير مصفوفة جديدة من المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة (DES) التي تجمع بين كلوريد 1-إيثيل-3-ميثيل إيميدازوليوم (EmimCl) و4-ميثيل إيميدازول (4-MI) كأنظمة منخفضة اللزوجة،

بهدف تحقيق احتجاز عالي الكفاءة، وانتقائي، وعكسي لغاز ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2) كأحد أبرز الانبعاثات الصناعية الملوثة للمحيط الغازي، مع دراسة آليات الارتباط كيميائياً وحاسوبياً لتجاوز عيوب السوائل الأيونية التقليدية المتمثلة في التكلفة المرتفعة واللزوجة العالية .

المنهجية والتجربة

دمج المكونين الصلبين (EmimCl) كمستقبل لرابطة الهيدروجين (HBA) و (4-MI) كمانح لرابطة الهيدروجين (HBD) تحت نسب مولية مختلفة تتراوح بين (1:2 إلى 1:5) في وعاء زجاجي مغلق ومطهر، مع التقليب المستمر عند درجة حرارة تبلغ 333.2K حتى ذوبانهما وتحولهما إلى سائل شفاف متجانس .وعقب تجفيف المذيبات المحضرة تحت تفريغ هوائي لمدة 24 ساعة، خضعت خواصها الفيزيائية كاللزوجة والكثافة والاستقرار الحراري للتقييم، ليتم بعد ذلك اختبار قدرتها الاستيعابية على امتصاص غاز ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2) تحت تأثير ضغوط جزئية متباينة ودرجات حرارة مختلفة (298°K–353)، متبوعاً بدراسة حركية الامتصاص عبر نماذج الدرجة الزائفة الأولى (PFO) والدرجة الزائفة الثانية (PSO)، ونموذج الانتشار الجزيئي الداخلي، بالإضافة إلى الكشف عن طبيعة الارتباط البنيوي والميكانيكي بواسطة التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، والرنين المغناطيسي النووي NMR ، مع نمذجة التفاعلات حاسوبيا باستعمال حسابات نظرية الكثافة الوظيفية (DFT) ومؤشر مناطق التفاعل (IRI).

النتائج

أظهرت النتائج نجاح النظام المطور وتحديداً النسبة المولية (1:4) ل(EmimCl:4-MI) في تسجيل قدرة استيعابية فائقة لامتصاص غاز SO_2 بلغت 19.2mmol/g عند درجة حرارة 298.15K وضغط 1.0 par، مدعومة بلزوجة منخفضة ومثالية للتدفق تبلغ 86 سنتيبواز (cP) واستقرار حراري ممتاز حتى 480 كلفن .كما كشفت الدراسة عن انتقائية استثنائية جدا لفصل غاز SO_2 مقارنة بغاز CO2 بلغت (342:1)، متفوقة بذلك على معظم المذيبات وسوائل الإيميدازوليوم الموثقة سابقا .وأثبتت الحركية ملاءمة تامة لنموذج المرتبة الثانية الكاذبة ($R^2 > 0.99$) مما يؤكد هيمنة آلية الامتصاص الكيميائي القائمة على تفاعلات حمض قاعدة لويس عبر روابط تساهمية تنسيقية بين ذرات الكبريت والكلور (S…Cl) وروابط هيدروجينية تآزرية(S-O…H) ، فضلاً عن إظهار المذيب قدرة رائعة على التجدد والاستخدام العكسي لـــ 10 دورات متتالية دون أي خسارة ملحوظة في كفاءة الاحتجاز .

II.2.2. الدراسة الثانية: بناء غشاء من النوع الثاني/الثالث من المذيبات يوتكتية العميقة والـــ (Pebax) للفصل الفعال لغازي ثنائي أكسيد الكربون والنيتروجين: كشف آلية التآزر للتعاون متعدد المواقع لتعزيز انتقال ثنائي أكسيد الكربون[8]

Construction of a type II/III deep eutectic solvent/Pebax membrane for efficient CO_2 and N_2 separation: Unraveling the synergistic mechanism of multisite cooperation for enhanced CO_2 transport.

المؤلفون وسنة النشر:

Jiahao Qin, Yan Dai, Huahao Wang, Qiaoyun Hu, Minggang Guo, Yongzhe Zhou, Yuan Xi, Shiqi Huang, Li Zhang, Gaohong He. 2026.

الهدف من الدراسة:

- تطوير غشاء مصفوفة مختلطة (Mixed matrix membrane) عالي الكفاءة ومستدام للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة الصناعية، وتحديدا لفصل غاز ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) عن غاز النيتروجين.(N_2)
- دمج تقنية الأغشية البوليمرية مع كيمياء المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة (DES) بنوعيها (النوع الثاني القائم على هيدرات الأملاح، والنوع الثالث القائم على المكونات العضوية) لإنشاء قنوات نقل سريعة وانتقائية تعتمد على التعاون متعدد المواقع(Multisite cooperation) ، لتجاوز قيود النفاذية والانتقائية التقليدية.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على دمج نوعين مبتكرين من المذيبات العميقة، الأول من النوع الثاني (Type II)المكون من سداسي هيدرات كلوريد الكوبالت ($CoCl_2.6H_2O$) واليوريا بنسبة (1:2)، والثاني من النوع الثالث (Type III) المكون من كلوريد الكولين واليوريا بنسبة (1:2). وجرى إدخال هذين المذيبين كمواد مضافة (Additives) داخل المصفوفة البوليمرية التجارية لـــ (Pebax-1657) عبر طريقة صب المحلول وتبخير المذيب السائل (Solution casting and solvent evaporation method) لتشكيل أغشية رقيقة ومتجانسة. ولتحديد بنية وتأثير هذه الإضافات، خضعت الأغشية المتشكلة لتوصيفات فيزيائية وكيميائية متقدمة شملت مطيافية الأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، وحيود الأشعة السينية(XRD) ، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لدراسة المورفولوجيا السطحية، والتحليل الحراري .(TGA) وتضمنت تجارب الاختبار قياس أداء نفاذية الغازات المفردة والمختلطة (CO2 و N2) تحت ضغوط

تشغيلية ودرجات حرارة متباينة، مع محاكاة وتتبع آليات الارتباط وانتقال الإلكترونات كيميائياً وحاسوبياً بواسطة حسابات نظرية الكثافة الوظيفية (DFT) واستكشاف معقدات التآزر التناسقية.(π-complexation)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن نجاح الغشاء الهجين المطور (Type II/III DES/Pebax) في تحقيق طفرة استثنائية في أداء فصل الغازات، حيث سجل الغشاء نفاذية ممتازة لغاز CO_2 بلغت 1630 وحدة بارر (Barrer)، بالتوازي مع تحقيق عامل انتقائية فائق ومثالي لفصل (CO_2N_2) بلغ 103.2، مما سمح بكسر وتجاوز حدود "روبسون" العالمية (Robeson's upper bound)لعام 2019 الخاصة بكفاءة الأغشية. وعزت النتائج هذا التفوق والتعزيز المزدوج إلى آلية التآزر الفريدة لمتعدد المواقع، حيث وفرت أيونات الكوبالت الحرة مواقع ارتباط تناسقية من نوع(π-complexation) ، بينما أدت روابط اليوريا وكلوريد الكولين الهيدروجينية إلى تسهيل ذوبان وانتقال جزيئات CO_2 بسرعة وسلاسة عبر القنوات النانوية للغشاء مع حجب غاز N_2 كما أظهر الغشاء استقراراً تشغيلياً وبنيوياً طويلاً وممتازاً عند اختباره تحت ظروف مستمرة، مما يجعله مرشحاً تكنولوجياً واعداً وقليلاً للتكلفة للتطبيقات الصناعية واسعة النطاق في مجال احتجاز الكربون وتنقية غازات المداخن.

3.2.II. الدراسة الثالثة: رؤية حول الإزالة التآزرية لثاني أكسيد الكبريت (SO_2) بواسطة الكربون المنشط المحمّل بمذيبات يوتكتيكية عميقة قائمة على الأحماض الأمينية: الآلية، وحسابات نظرية الكثافة الوظيفية (DFT)[9]

Insight into the synergistic SO_2 removal by activated carbon loaded with amino acid based deep eutectic solvents: Mechanism, DFT calculation.

المؤلفين وسنة النشر:

Yueying Li, Xinxin Xiao, Hua Li, Guangyue Li, Liangbin Dou, Lu Tian, Jingyang Chen, Xingxing Chen, Jianglong Yu, Jinxiao Dou. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير مادة هجينة متطورة وعالية الكفاءة لإزالة غاز ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2) من غازات المداخن الصناعية(Flue gas desulfurization) ، وذلك عبر التغلب على عيوب المذيبات السائلة الناتجة عن اللزوجة ومشاكل انتقال الكتلة. يهدف البحث إلى تحميل وتثبيت جيل

جديد ذا المسام النانوية للكربون المنشط (Activated carbon)، ودراسة آليات التفاعل والتآزر الكيميائي والحاسوبي بين السطح الصلب والمذيب والغاز لتطوير عملية إزالة جافة ومستدامة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تحضير ثلاثة أنواع من المذيبات العميقة الصديقة للبيئة باستخدام حمض الجليكوليك (Glycolic acid) كمنظم ومانح للرابطة الهيدروجينية، ودمجه مع ثلاثة أحماض أمينية كمستقبلات للرابطة وهي: الجلايسين(Glycine) ، و-L ألانين(L-alanine) ، و-L برولين .(L-proline) وعقب نجاح تصنيع المذيبات، جرى تحميلها وتثبيتها داخل الكربون المنشط بنسب وزنية متباينة عبر طريقة التشريب بالمذيب (Impregnation method) لإنتاج المواد الماصة الهجينة المتطورة .(DES@AC) وخضعت المواد الناتجة لتوصيفات بنيوية ومورفولوجية موسعة شملت مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، وحيود الأشعة السينية(XRD) ، والتحليل الحراري(TGA) ، بالإضافة إلى قياس المساحة السطحية وحجم المسام بطريقة امتزاز النيتروجين .(N_2 adsorption-desorption) وتضمنت تجارب الاختبار قياس ديناميكيات امتصاص غاز SO_2الديناميكي عبر نظام عمود ثابت (Fixed-bed reactor) يحاكي غازات المداخن الحقيقية عند درجات حرارة مختلفة، بالتوازي مع نمذجة وحساب طاقات الارتباط ومخططات الكثافة الإلكترونية حاسوبياً باستخدام حسابات نظرية الكثافة الوظيفية.(DFT)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن تحقيق المادة الهجينة المطورة، وتحديدا الكربون المنشط المحمل بمذيب الجلايسين وحمض الجليكوليك (Gly-GA@AC) ، أداء استثنائيا وفائقا في احتجاز غاز SO_2، حيث سجلت سعة امتصاص ديناميكية عالية بلغت 124.63mg/gعند درجة حرارة 30 مئوية، وهو ما يعادل زيادة ضخمة بمقدار 2.76 مرة مقارنة بالكربون المنشط الخام غير المعدل. وعزت النتائج وحسابات DFTهذا التفوق الهائل إلى تأثير التآزر المزدوج (Synergistic effect) ، حيث وفرت بنية الكربون المنشط مساحة سطحية هائلة وتوزيعا نانويا للمسامات يسهل انتشار الغاز، بينما قامت المجموعات الوظيفية للأحماض الأمينية (الأمين والكربوكسيل) في المذيب بتشكيل روابط هيدروجينية وتفاعلات لويس الكيميائية القوية مع جزيئات SO_2 كما أظهرت المادة الهجينة انتقائية ممتازة ومقاومة جيدة لتأثيرات الغازات المصاحبة مثل بخار الماء و CO_2، إلى جانب الحفاظ على استقرار بنيوي وقابلية للتجدد والاستخدام 5 دورات متتالية، مما يثبت جدواها الاقتصادية كتقنية خضراء واعدة لتنقية الهواء والحد من التلوث الحامضي الصناعي.

II.4.2. الدراسة الرابعة: الامتزاز التآزري لثنائي أكسيد الكربون في مادة MCM-41 عبر حجز مذيب يوتكتيكي عميق من كلوريد الكولين واليوريا داخل مسامها [10]

Synergistic CO_2 adsorption in MCM-41 via pore-confined choline chloride-urea deep eutectic solvent.

المؤلفين وسنة النشر:

Hind F. Hasan, Farah T. Jasim, Ali H. Whaieb, Talib M. Albayati, Amer A. Abdulrahman, Saba A. Ghenid, Islam Md Rizwanul Fattah, Nalan Türköz Karakullukçu.2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير مادة ماصة هجينة متطورة وعالية الكفاءة لاحتجاز غاز ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) وتخفيف انبعاثات الاحتراق الصناعي الخلفي .(Post-combustion capture) يهدف البحث إلى استغلال الخصائص المسامية المنتظمة لمادة السيليكا متوسطة المسام (MCM-41) وحقن وتثبيت مذيب سهل انصهار عميق تقليدي صديق للبيئة (Choline chloride-Urea DES) داخل قنواتها النانوية، لإنشاء نظام امتزاز تآزري هجين يتجاوز مشكلة اللزوجة العالية للمذيبات السائلة ويعزز قدرة التقاط الغاز بكفاءة استثنائية.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على خطوتين أساسيتين، بدأت بتصنيع مادة السيليكا السيليكاتية المنظمة (MCM-41)مخبرياً بطريقة الهيدروحرارية(Hydrothermal method) ، تلا ذلك تحضير المذيب عميق الانصهار (DES) عبر دمج كلوريد الكولين مع اليوريا كمنظم إلكتروني بنسبة مولية (1:2) عند درجة حرارة 80 مئوية حتى تشكل سائل شفاف متجانس. بعد ذلك، جرى تحميل المذيب داخل البنية المسامية للـــ MCM-41 بنسب وزنية مختلفة شملت (10%، 30%، و 50%) عبر تقنية التشريب الرطب (Wet impregnation technique)للحصول على المادة الهجينة .(DES@MCM-41) وخضعت المواد الناتجة لتوصيفات بنيوية وفيزيائية دقيقة شملت مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتأكيد ثبات المجموعات الوظيفية، وحيود الأشعة السينية (XRD) للتحقق من الحفاظ على البنية الكريستالية، ومجهر الفحص الإلكتروني الماسح (SEM) لدراسة المورفولوجيا، بالإضافة إلى قياس المساحة السطحية وحجم المسام (BET).وتضمنت تجارب الامتصاص تتبع ديناميكيات احتجاز غاز CO_2 النقي والمختلط داخل مفاعل ذو سرير ثابت (Fixed-bed reactor) عند ظروف تشغيلية متغيرة من درجات الحرارة (25–75 مئوية)

وضغوط منخفضة، متبوعاً بدراسة الحركية والنماذج الرياضية للامتزاز مثل نماذج لانغمويز، فروندليتش، وإلوفيتش.(Langmuir, Freundlich, and Elovich models)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن إثبات النجاح الفائق لعملية دمج المذيب العميق داخل قنوات السيليكا النانوية، حيث سجلت المادة الهجينة المعدلة بنسبة 30% وزنية (30% DES@MCM-41) أعلى سعة امتزاز لغاز CO_2 بلغت 2.74 mmol/g عند درجة حرارة 25 مئوية وضغط جوي نظامي، محققةً قفزة نوعية وزيادة ملحوظة مقارنة بمادة MCM-41 الخام غير المعدلة. وأظهرت النمذجة الرياضية توافقاً ممتازاً مع نموذج "لانغمويز" ونموذج المرتبة الثانية الكاذبة، مما يؤكد أن آلية التقاط الكربون تعتمد على امتزاز كيميائي متجانس أحادي الطبقة مدفوع بالتفاعل التآزري القوي بين مجموعات الأمين والأكسجين النشطة في المذيب المحجوز وجزيئات CO_2 الحامضية. كما بينت النتائج أن سعة الامتزاز تنخفض طردياً مع ارتفاع درجة الحرارة مما يشير إلى طبيعة التفاعل الطارد للحرارة، مع تميز المادة الماصة المبتكرة بانتقائية ممتازة لفصل CO_2/N_2 واستقرار هيكلي ميكانيكي واعد أتاح إعادة تجديدها حرارياً واستخدامها لعدة دورات متتالية دون تدهور في كفاءة الأداء، مما يجعلها تقنية جافة واعدة واقتصادية لتنقية الانبعاثات الغازية.

II.5.2. الدراسة الخامسة: لتقييم التجريبي لامتصاص ثنائي أكسيد الكربون والخصائص الفوسفورية الحرارية للمذيبات يوتكتية الانصهار العميقة القائمة على (TBAB) مع مانحات الأمين والحمض[11]

Experimental Evaluation of CO_2 Absorption and Thermophysical Properties of TBAB-Based Deep Eutectic Solvents with Amine and Acid Donors.

المؤلفين وسنة النشر:

Siddharth Atal, Sonam Sharma, Amit Kumar Gomey, Syed Saim Ali, Rakesh Kumar, Deepak Dwivedi, Bhupendra Pratap Singh. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تصميم وتقييم جيل جديد من المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة (DESs)التي تتميز بكفاءة استيعابية عالية واستقرار بنيوي لاحتجاز غاز ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) من الانبعاثات الغازية. تهدف الدراسة إلى استكشاف تأثير استخدام ملح بروميد رباعي بوتيل الأمونيوم (TBAB)كمستقبل للرابطة الهيدروجينية ودمجه مع نوعين مختلفين من المانحات (الأحماض الأمينية

الوظيفية والمذيبات الحمضية الزيتية) لإنشاء مصفوفة تمزج بين آليات الامتصاص الكيميائي والفيزيائي، مع دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية والحرارية لضمان ملاءمتها هندسياً لعمليات الفصل.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تحضير ثلاثة أنظمة متباينة من المذيبات العميقة عبر دمج ملح (TBAB) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية (HBA) مع ثلاثة مانحات مختلفة (HBD) شملت: أحادي إيثانول أمين (MEA)، وحمض الأوليك(Oleic acid) ، وحمض اللينوليك (Linoleic acid) بنسبة مولية ثابتة بلغت (1:2). وجرى تصنيع المذيبات عبر التحريك الحراري المستمر عند 80 درجة مئوية حتى الحصول على سوائل متجانسة ومستقرة، خضعت بعدها لفحوصات وتوصيفات فيزيائية وحرارية دقيقة شملت قياس الكثافة واللزوجة كدالة في درجة الحرارة (ضمن مدى يتراوح بين 293.15 و K343.15)، وتحليل الاستقرار الحراري(TGA) ، بالإضافة إلى استخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتأكيد الروابط البنائية قبل وبعد التفاعل. وتضمنت تجارب امتصاص الغاز تعريض حجم محدد من المذيب لتدفق غاز CO2 النقي داخل خلية امتصاص مغلقة عند درجات حرارة متباينة وضغط جوي ثابت لتحديد سعة الاستيعاب وحركية انتقال الكتلة والانتشار الجزيئي للغاز داخل أطوار المذيبات المختلفة.

النتائج

أظهرت نتائج الدراسة تبايناً ملحوظاً في السلوك الأدائي للمذيبات بناءً على طبيعة المادة المانحة للرابطة الهيدروجينية، حيث حقق المذيب المعتمد على الأمين (TBAB:MEA) أعلى كفاءة وسعة امتصاص لغاز CO_2 بلغت 0.144 g of CO_2g of DES (ما يعادل سعة استيعاب جزيئية قدرها 0.618 مول من الغاز لكل مول من المذيب) عند درجة حرارة 303.15K ، مدفوعاً بآلية امتصاص كيميائي قوية وتكوين معقدات الكربامات المستقرة. وفي المقابل، أظهرت المذيبات المعتمدة على الأحماض الدهنية (حمض الأوليك وحمض اللينوليك) سعرا أقل للامتصاص ولكنها تميزت بلزوجة منخفضة جدا تحسن من حركية انتشار الغاز وفيزيائية الفصل. كما أثبتت دراسات الحركية الحرارية أن الكثافة واللزوجة لجميع الأنظمة تنخفض بشكل خطي متناسق مع ارتفاع درجات الحرارة مما يسهل عمليات الضخ والتدفق الصناعي، مع إظهار المذيبات المبتكرة استقرارا حراريا ممتازا وقدرة جيدة على التجدد العكسي، مما يمنح هذه الأنظمة الهجينة القائمة على TBABمرونة تشغيلية واعدة كبدائل خضراء واقتصادية في تكنولوجيا التقاط واستخلاص الكربون.

II.6.2. الدراسة السادسة: مذيبات يوتكتية الانصهار عميقة جديدة ذات تغير في الطور: استقصاء تجريبي للخصائص الفيزيائية والكيميائية وأداء احتجاز ثنائي أكسيد الكربون [12]

Novel Phase-Change Deep Eutectic Solvents: Experimental Investigation of Physicochemical Properties and CO_2 Capture Performance.

المؤلفين وسنة النشر:

Jing Fan, Jingfan Huang, Fenhong Song, Nan He, Xu Wang. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في التغلب على معضلة استهلاك الطاقة العالي ومشاكل التحلل الكيميائي التي تواجه مستخلصات احتجاز الكربون التقليدية)مثل مادة (MEA ، وذلك عبر ابتكار وتصنيع سلسلة من المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة الجديدة المتميزة بخاصية "تغير الطور (Phase-change " DESs). تهدف الدراسة إلى تقديم مستخلصات ذكية تحقق سعة احتجاز عالية لغاز ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) واستقرارا حراريا ممتازا، مع دراسة خصائصها الفيزيوكيميائية للتأكد من انخفاض سميتها وصداقتها للبيئة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تخليق ثمانية أنواع جديدة من المذيبات عميقة الانصهار ذات تغير الطور عبر خطوة واحدة، حيث دمج مركب 2-أمينو-2-ميثيل-1-بروبانول (AMP) كـمانح للرابطة الهيدروجينية (HBD) مع أربعة مستقبلات مختلفة للرابطة (HBAs) شملت: الأسيتاميد(Acetamide) ، كلوريد رباعي إيثيل الأمونيوم(TEAC) ، بروميد رباعي بوتيل الأمونيوم(TBAB) ، وبروميد رباعي بوتيل الفوسفونيوم (TBPB) بنسب مولية بلغت (1:4) و (1:6). وعقب التحضير، جرى تقييم الخصائص الفيزيوكيميائية للمذيبات كالكثافة التي تناقصت خطياً واللزوجة التي تراجعت أسيا مع رفع الحرارة، بالإضافة إلى التنبؤ بسميتها بيئياً عبر برمجية (ECOSAR) واستقرارها الحراري بواسطة تقنية (TGA). وتضمنت تجارب احتجاز الكربون تعريض المذيبات لتدفق غاز CO_2 لرصد سلوك تغير الطور (التشكل ثنائي الطور سائل-صلب أو سائل-سائل)، مع استخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) للكشف عن آليات الامتصاص المزدوجة (الفيزيائية والكيميائية) ومراقبة المعقدات الناتجة.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن إثبات الكفاءة الفائقة للمذيبات المبتكرة في احتجاز الكربون، حيث تميزت الأنظمة القائمة على "الأسيتاميد" بأعلى استقرار حراري وصمود حتى درجة 132.67 مئوية، مع تسجيل سمية منخفضة جداً ومهملة وفقاً لبيانات التنبؤ البيئي. وكشفت النتائج التجريبية عن تفوق آلية "تغير الطور"، حيث أظهرت المذيبات آلية امتصاص مزدوجة تجمع بين الذوبان الفيزيائي والتفاعل الكيميائي القوي الذي يقوده مركب AMP لتشكيل معقدات الكربامات (Carbamate) والبيكربونات المستقرة، مما يسمح بفصل الطور الغني بالغاز واختزال حجم المستخلص وجعل عملية التجديد الحراري العكسي موفرة للطاقة بشكل كبير ومجدية اقتصادياً، وهو ما يضع هذه الأنظمة كخيار أخضر متطور يدعم تكنولوجيا تقليل الانبعاثات الكربونية الصناعية.

الجدول **(II.2.)**: ملخص الدراسات حول تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في احتجاز الغازات والانبعاثات الصناعية.

الرقم	المرجع	النظام المستخدم / DES (المادة الداعمة)	الغاز المستهدف	التقنية والمنهجية المستخدمة	أهم النتائج والأرقام القياسية
1	[7]	EmimCl : 4-methylimidazole(Ratio 1:4)	ثنائي أكسيد الكبريت(SO_2)	امتصاص سائل (لزوجة منخفضة)+ حركية PFO/PSO +حساباتDFT	سعة امتصاص فائقة: 19.2 mmol/g. انتقائية استثنائية لـــ SO2/CO2 (342:1). لزوجة مثالية (86 cP) وتجدد لـــ 10 دورات.
2	[8]	غشاء هجين من النوع II/III(CoCl₂.6H₂O/Urea داخل ChCl/Urea)+ مصفوفةPebax-1657	ثنائي أكسيد الكربون(CO_2)	غشاء مصفوفة مختلطة +(MMM) نقل بتآزر متعدد المواقع+ حسابات DFT	•نفاذية CO2 ممتازة: 1630 Barrer. •عامل انتقائية (CO2/N2) يبلغ 103.2. • كسر وتجاوز حدود" روبسون "العالمية 2019.
3	[9]	أحماض أمينية (Gly, Ala, Pro)+حمض الجليكوليك(GA) محملة على كربون منشط(AC)	ثنائي أكسيد الكبريت(SO_2)	امتزاز جاف في عمود ثابت-(Fixed bed)+تقنية التشريبDFT +	•سعة امتصاص ديناميكية: 124.63 mg/g.• زيادة بمقدار 2.76 مرة عن الكربون الخام. • مقاومة ممتازة لبخار الماء و.CO2
4	[10]	كلوريد الكولين : (Choline chloride-يوريا Urea)محمل داخل مسام MCM-41	ثنائي أكسيد الكربون(CO2)	نظام امتزاز تآزري هجين+ تشريب رطب+ حركية Langmuir & PSO	•سعة امتزاز : 2.74 mmol/g عند 25.C° •النسبة الوزنية المثلى للتحميل هي 30%. • امتزاز كيميائي متجانس أحادي الطبقة.

5	[11]	ملح بروميد رباعي بوتيل الأمونيوم + (TBAB) مانحات أمينية(MEA) أو أحماض دهنية (Oleic/Linoleic)	ثنائي أكسيد الكربون(CO2)	امتصاص في خلية مغلقة+ دراسة الخصائص الحراريةوالكثافة واللزوجة	•نظام (TBAB:MEA) حقق أعلى سعة: g/g(0.618 mol/mol).0.144 •الأنظمة الدهنية أقل امتصاصاً لكنها أقل لزوجة.
6	[12]	مذيبات ذكية متغيرة الطور (Phase-change DES):AMP + (TEAC, TBAB, TBPB, Acetamide)	ثنائي أكسيد الكربون(CO2)	امتصاص سائل بتغير الطور(سائل–صلب / سائل–سائل)+ تنبؤ بيئي بـــECOSAR	•امتصاص مزدوج (فيزيائي وكيميائي). • اختزال حجم المستخلص لتوفير طاقة التجديد حرارياً. • سمية منخفضة واستقرار حراري حتى C.132.67°

II.7.2. تحليل الدراسات حول استخدام DES في احتجاز الغازات الملوثة والانبعاثات الصناعية

تظهر الأبحاث المستعرضة في هذا المحور تحولاً استراتيجياً في استخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة من مجرد سوائل امتصاص بسيطة إلى عناصر هيكلية هجينة لتعزيز كفاءة احتجاز الغازات الملوثة، مثل ثنائي أكسيد الكبريت وثنائي أكسيد الكربون.

أولا: نقاط القوة والابتكارات التقنية

- **التغلب على القيود الفيزيائية :** نجحت الدراسات في معالجة عيوب اللزوجة العالية التي كانت تعيق انتقال الكتلة في المذيبات التقليدية، وذلك من خلال دمج المذيبات اليوتكتيكية العميقة داخل وسائط صلبة مسامية مثل الكربون المنشط أو السيليكا، مما أدى إلى زيادة سعة الامتزاز وتسهيل التجديد الحراري[10].

- **الآليات التآزرية والتصميم المبتكر** : برزت تقنية "تغير الطور (Phase-change) "كحل ذكي لخفض استهلاك الطاقة في عمليات التجديد [12]، بينما ساهم تطوير الأغشية الهجينة (Pebax/DES) في كسر حاجز "روبسون" العالمي في كفاءة الفصل[8]، مما يفتح آفاقاً جديدة لتطبيقات الفصل الغازي على نطاق صناعي.[9, 10]

- **التحليل الحاسوبي المتكامل :** اعتمدت الدراسات بشكل مكثف على نظرية الكثافة الوظيفية (DFT) لتفسير الآليات الجزيئية للتفاعل، مما وفر فهماً عميقاً لطبيعة الروابط الهيدروجينية وتفاعلات لويس الكيميائية التي تحكم عملية الاحتجاز.

ثانيا: الثغرات والآفاق المستقبلية

- **التحديات التشغيلية في الظروف الصناعية** : رغم الأداء المتميز في الظروف المخبرية، لا تزال هناك فجوة في دراسة مدى استقرار هذه المذيبات عند تعرضها للشوائب الصناعية المعقدة (مثل أكاسيد النيتروجين أو الجسيمات الدقيقة في غازات المداخن الفعلية) لفترات زمنية طويلة.

- **الاستدامة الاقتصادية** : على الرغم من أن العديد من هذه المذيبات تصنف كخضراء، إلا أن عمليات تصنيع المواد الهجينة (مثل أغشية الأغشية المتقدمة أو تحميل الكربون المنشط) قد ترفع التكلفة الإجمالية. هناك حاجة ماسة لمزيد من دراسات التقييم الاقتصادي (Techno-economic analysis) لضمان جدوى انتقال هذه التقنيات من المختبر إلى المفاعل الصناعي.

II.3. المحور الثالث: دراسات سابقة حول دور الـــ DES في معالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية والصناعية

II.3.1. الدراسة الأولى: التقييم البيئي لتثمين بقايا تقليم أشجار الزيتون عبر المذيبات يوتكتية العميقة: نحو نموذج مصفاة حيوية دائرية ومستدامة[13]

Environmental assessment of olive tree pruning valorization via deep eutectic Solvents: Toward a circular and sustainable biorefinery model.

المؤلفين وسنة النشر:

Irene Gómez-Cruz, Amaia Morales, Eulogio Castro, Jalel Labidi. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في إجراء تقييم كمي شامل للأثر البيئي والاستدامة لعملية معالجة وتثمين الكتلة الحيوية المتمثلة في نفايات تقليم أشجار الزيتون (Olive tree pruning) داخل مصفاة حيوية (Biorefinery). يهدف البحث إلى استبدال المذيبات العضوية التقليدية بمذيبات غازية عميقة الانصهار (DESs) لفصل مكونات اللجنو–سليلوز وعزل مادة اللجنين (Lignin) عالية النقاء، مع استخدام أداة تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment - LCA) وفقاً لمعايير (ISO 14040) لتحديد النقاط الحرجة بيئياً وضمان دمج هذه العملية ضمن استراتيجيات الاقتصاد الحيوي الدائري.

المنهجية والتجربة

اعتمدت المنهجية العلمية للدراسة على تطبيق نهج تقييم دورة الحياة من المهد إلى البوابة(Cradle-to-gate approach)لنمذجة وتتبع التأثيرات البيئية لعمليات التجزئة المعملية، حيث تم استخدام مذيب سهل الانصهار عميق تقليدي مكون من كلوريد الكولين واليوريا (Choline chloride:Urea) بنسبة مولية (1:2) لمعالجة تفكيك بنية الكتلة الحيوية لأغصان الزيتون عند درجة حرارة 130 مئوية ولزمن تفاعل قدره 120 دقيقة. وتضمنت المنهجية التجريبية فصل المزيج إلى ثلاثة أطوار رئيسية: طور سليلوز متبقي، وطور لجنين مستخلص (تم ترسيبه مائياً وفصله بالطرد المركزي)، وطور المذيب السائل المسترجع. وعقب جمع البيانات المادية واستهلاك الطاقة والمواد الكيميائية مخبرياً، تم إدخالها كمدخلات أساسية في برمجية (SimaPro) التحليلية لتقييم الأداء البيئي عبر مؤشرات دولية معتمدة مثل: القدرة على الاحترار العالمي(GWP) ، وتأثير الاستهلاك المائي، واستهلاك الطاقة الأحفورية، وتكوين الجسيمات الدقيقة، ومقارنة كفاءة نظام استرجاع وإعادة تدوير المذيب (DES recovery) بنسب مختلفة تتراوح بين 0% و80.%

النتائج

أظهرت نتائج تقييم دورة الحياة (LCA) أن عملية استخلاص وتثمين اللجنين باستخدام المذيب العميق (Choline chloride:Urea)تمتلك بصمة بيئية واعدة، بشرط دمج نظام فعال لإعادة تدوير المستخلص، حيث تبين أن مرحلة تصنيع المذيب النقي واستهلاك المواد الكيميائية الأولية هي المساهم الأكبر في إجمالي التأثيرات البيئية المترتبة. وأثبتت النتائج أنه عند رفع كفاءة استرجاع وإعادة استخدام المذيب العميق إلى نسبة 80%، تنخفض مؤشرات الأثر البيئي مثل انبعاثات الغازات الدفيئة (GWP) واستهلاك الموارد الحفرية بشكل حاد وغير مسبوق بنسب تتجاوز الـــ 50%، مما يجعل المصفاة الحيوية المقترحة منافسة بقوة للأنظمة التقليدية. كما أكدت الدراسة أن مادة اللجنين المعزولة تتمتع بنقاء كيميائي وبنية ممتازة تؤهلها للاستخدام المباشر كبديل للمركبات الفينولية البترولية في الصناعات البوليمرية والمواد الماصة، مما يثبت الجدوى البيئية والاقتصادية التآزرية لتحويل النفايات الزراعية إلى منتجات ذات قيمة مضافة في إطار التنمية المستدامة.

II.2.3. الدراسة الثانية: تفكيك الشبكة الجزيئية الكبيرة للفحم البني (اللينيت) عبر المذيبات يوتكتية العميقة المدعومة DMF لتثمين الانحلال الحراري الموجه [14]

Deconstruction of lignite macromolecular network via DMF-assisted deep eutectic solvents for directed pyrolysis valorization.

المؤلفين وسنة النشر:

Xiaoxiao Zhou, Miaomiao Feng, Dandan Luo, Lan Yi, Jialing Chen, Pengzhi Bei, Hao Luo, Xiaoqin Wu, Wen-Ying Li. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في التغلب على قيود مقاومة انتقال الكتلة وضَعف النفاذية التي تحول دون التثمين الكيميائي عالي القيمة للفحم المنخفض الرتبة (الفحم البني/الليغنيت). يهدف البحث إلى ابتكار استراتيجية تآزرية تُعرف بـــ "النفاذ الناقل (Carrier-permeation strategy) "تجمع بين المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة (DES) كعوامل كيميائية نشطة ومذيب ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) كعامل نفاذية عالي الاختراق، وذلك لتكسير الروابط التساهمية وغير التساهمية المتقاطعة في بنية الفحم المعقدة وتوجيه مسار انحلاله الحراري (Pyrolysis) نحو إنتاج مركبات قطران وفينولات ذات قيمة اقتصادية مرتفعة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تطبيق محاكاة الديناميكيات الجزيئية (MD) حاسوبيا أولا لفهم سلوك الانتشار وفك تشابك سلاسل الفحم البني عند إدخال المذيبات، تلا ذلك التنفيذ المخبري عبر تصنيع مذيب عميق الانصهار مكون من كلوريد الكولين وحمض الأكساليك (ChCl:Oxalic acid) بنسبة مولية (1:1)، ومزجه مع كميات محددة من الـــ DMF لتشكيل نظام التذويب الهجين .(DES-DMF) وجرت معالجة عينات الفحم البني داخل النظام المطور عند درجة حرارة 120 مئوية لعدة فترات زمنية، متبوعةً بفصل الأطوار وتجفيف المتبقي الصلب وتوصيفه عبر تقنيات متقدمة شملت مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)لتتبع اختفاء المجموعات الجسرية، وحيود الأشعة السينية(XRD) ، والرنين المغناطيسي النووي للبروتون والكربون، وأخيرا خضعت العينات المفككة الصلبة لتجارب الانحلال الحراري السريع والموجه داخل مفاعل أنبوبي عند درجات حرارة تتراوح بين 500 و700 مئوية، مع تحليل نواتج الغاز والقطران المتشكل بدقة بواسطة تقنية الكروماتوغرافيا الغازية الموصولة بمطياف الكتلة.(GC-MS)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن نجاح نظام (DES-DMF) المشترك في تحقيق كفاءة تفكيك استثنائية وغير مسبوقة للشبكة الجزيئية للفحم، حيث ارتفعت نسبة استخلاص المكونات القابلة للذوبان بمقدار 2.51 مرة مقارنة باستخدام مذيب الـــ DES بمفرده، نتيجة لقدرة الـــ DMF على اختراق المسام والانتشار السريع حاملاً معه أيونات المذيب العميق التي كسرت الروابط الجسرية الهيدروجينية والإيثرية الضعيفة بنجاح. وأظهرت نتائج الانحلال الحراري الموجه أن العينات المعالجة سجلت قفزة نوعية في إنتاج القطران عالي الجودة بنسبة زيادة بلغت 44.2% عند حرارة 600%، مع انخفاض حاد في تكوين الفحم الصلب النواتجي .(Char) كما كشف تحليل الـــ GC-MS عن ارتفاع تركيز المركبات الفينولية الخفيفة والعطرية أحادية الحلقة (BTEX) داخل القطران المستخلص، مما يثبت الفعالية التكنولوجية الواعدة لهذه المنهجية الخضراء في تثمين النفايات الكربونية الأحفورية وتحويلها إلى مواد خام كيميائية أساسية بطريقة مستدامة وموفرة للطاقة.

II.3.3. الدراسة الثالثة: التثمين المستدام لفطر (Inonotus obliquus) عبر الاستخلاص بمذيبات يوتكتية الانصهار عميقة طبيعية موجهة بالحرارة :تقسيم متعدد السكريات ومضادات الأكسدة [15]

Sustainable valorization of Inonotus obliquus via temperature-gated natural deep eutectic solvents extraction: Polysaccharide-antioxidant partitioning.

المؤلفين وسنة النشر:

Xinyuan Fu, Jiuhang Song, Chenxi Shi, Yinan Hu, Quanyuan Qiu, Xinhui Chen, Jiaxin Tang, Wanqi Peng, Ting Wu, Xiaoqing Lin. 2025.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير استراتيجية استخلاص خضراء ومستدامة وموجهة حرارياً (Temperature-gated extraction strategy) لتثمين الفطر الطبي (Inonotus obliquus) كنوع من الكتلة الحيوية الغنية بالمكونات الحيوية النشطة. يهدف البحث إلى استبدال طرق الاستخلاص التقليدية غير الفعالة بمذيبات خضراء سهلة الانصهار طبيعية (NADES)، قادرة على كسر الجدران الخلوية الصلبة للفطر وفصل ومجانسة مركبات متعدد السكريات (Polysaccharides) عالية الوزن الجزيئي وحمايتها من التحلل الحراري، بالتوازي مع استخلاص مضادات الأكسدة الحساسة للحرارة وتقسيمها بكفاءة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تصميم واختبار سلسلة من المذيبات الطبيعية العميقة المحبة للماء (Hydrophilic NADES) القائمة على خلط كلوريد الكولين (ChCl) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية مع عدة مانحات طبيعية شملت الكحوليات المتعددة والأحماض العضوية والسكريات، حيث تم اختيار النظام المكون من كلوريد الكولين والجلسرين (ChCl:Glycerol) بنسبة مولية (1:2) كونه النظام الأمثل للاستخلاص. وتضمنت التجربة تطبيق آلية ضبط ومراقبة حرارية على مرحلتين، حيث جرى استخلاص متعدد السكريات عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً (80 درجة مئوية) لتعزيز تفكيك الجدار الخلوي الكيتيني للفطر، تلاها خفض الحرارة هندسياً لاستخلاص الفينولات ومضادات الأكسدة الحساسة حرارياً دون إتلافها. وعقب الاستخلاص، جرى عزل المكونات وتوصيف بنيتها الكيميائية ومورفولوجيتها ومجموعاتها الوظيفية باستخدام تقنيات متقدمة شملت مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، وحيود الأشعة السينية (XRD)، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، بالإضافة إلى تقييم الفعالية البيولوجية للمستخلصات ضد الأكسدة وقدرتها التثبيطية لإنزيم ألفا–أميلاز (α-amylase) كعلاج واعد للسكري.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن نجاح استراتيجية الاستخلاص الموجهة بالحرارة باستخدام مذيب (ChCl:Glycerol) في تحقيق عوائد استخلاص فائقة ومثالية، حيث ارتفعت كفاءة استخلاص متعدد السكريات (مقاسة بـــ بيتا–جلوكان β–glucans) بنسبة تزيد عن مرتين مقارنة بالماء الساخن التقليدي، مع الحفاظ الكامل على أوزانها الجزيئية العالية وبنيتها الكريستالية الأصلية دون تشويه. كما أظهرت النتائج التحليلية أن المستخلصات المائية–المذيبة المشتركة أبدت قدرة استثنائية ونشاطاً مضاداً للأكسدة فائقاً جداً، جنباً إلى جنب مع تسجيل كفاءة تثبيطية عالية جداً وضبط ممتاز لإنزيم ألفا–أميلاز الحيوى المسؤول عن تكسير السكريات في الجسم. وأكدت الفحوصات المورفولوجية عبر SEM أن المذيب العميق الطبيعي قام بعملية تآكل ونفاذ مسامي دقيقة داخل البنية الليفية المتشابكة للكتلة الحيوية الفطرية مما سهل انتقال الكتلة، وهو ما يثبت كفاءة هذه التقنية الصديقة للبيئة كمنصة مستدامة لإنتاج المغذيات والمكونات الدوائية من النفايات والكتل الحيوية.

II.4.3. الدراسة الرابعة: مذيب سهل الانصهار عميق طبيعي لعزل السليلوز من مسحوق قشور اللوز: نهج مستدام لتثمين المنتجات الثانوية [16]

Natural deep eutectic solvent for cellulose isolation from almond shell powder: A sustainable approach for by-product valorization.

المؤلفين وسنة النشر:

Andrea Están, Mónica Umaña, Adda Ibáñez-Daudén, Susana Simal. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في عزل مادة السليلوز (Cellulose) بنقاء عالٍ وبنية مستقرة من مسحوق قشور اللوز (Almond shell powder) كأحد المخلفات والمنتجات الثانوية الغنية باللجنو–سليلوز الناتجة عن الصناعات الغذائية الزراعية. يهدف البحث إلى تقييم كفاءة وجدوى استبدال المعالجات الكيميائية القلوية التقليدية القاسية والملوثة للبيئة بمذيبات خضراء سهلة الانصهار طبيعية (NADES) منخفضة التكلفة، لإنشاء مصفاة حيوية نظيفة ومستدامة تدعم تثمين النفايات.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على إجراء دراسة مقارنة بين ثلاثة مسارات لمعالجة مسحوق قشور اللوز، حيث تم تطبيق طريقة تقليدية باستخدام هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بنسبة 7.5%، وطريقة خضراء مبتكرة باستخدام مذيب طبيعي عميق الانصهار مكون من كلوريد الكولين واليوريا (Choline chloride:Urea) بنسبة مولية (2:1)، وتمت المعالجتان حراريا عند درجة 80 مئوية ولمدة 4 ساعات، بالتوازي مع الإبقاء على عينة ضابطة بدون معالجة أولية .(Control) وعقب المعالجة، خضعت جميع العينات لعمليتي تبييض متتاليتين (Bleaching steps) باستخدام كلوريت الصوديوم (NaClO2) بنسبة 1.3% عند 75 مئوية، تلاها مزيج مائي من هيدروكسيد الصوديوم وبيروكسيد الهيدروجين ($NaOH:H_2O_2:H_2O$) لضمان التخلص التام من اللجنين والهميسليلوز. وجرى تحديد كفاءة المذيب في العزل عبر توصيفات تركيبية ومورفولوجية وحرارية موسعة للمنتج السليلوزي الصلب شملت: مطيافية الأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، وحيود الأشعة السينية (XRD) لحساب مؤشر التبلور، والتحليل الحراري الوزني(TGA) ، ومجهر القوة الذرية(AFM) ، والمجهر الإلكتروني الماسح.(SEM)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن إثبات النجاح الفائق والفعالية العالية للمذيب الطبيعي المطور (Choline chloride:Urea) في تفكيك قشور اللوز وعزل السليلوز بكفاءة تضاهي الطريقة الكيميائية التقليدية وتتفوق عليها بيئياً، حيث تم التخلص بنجاح من المكونات المصاحبة كاللجنين والهميسليلوز، وهو ما أكدته

تحليلات الــ FTIR عبر اختفاء الحزم المميزة لتلك المواد. وكشفت فحوصات الــ XRD أن السليلوز المعزول بالمذيب العميق حافظ على بنيته الكريستالية من النوع الأول(Cellulose I) ، وسجل مؤشر تبلور مرتفعاً وممتازاً بلغ 69.4%، متقارباً جداً مع الطريقة القلوية (73.7%). كما أظهرت الفحوصات المورفولوجية والحرارية عبر SEM وTGA تفككاً واضحاً لبنية مسحوق القشور الليفية إلى قنوات نانوية معزولة تتميز باستقرار حراري فائق جداً وصمود حتى 342.5°C ، مما يثبت الجدوى الهندسية العالية لاستخدام هذه المذيبات الطبيعية كبديل صناعي أخضر وآمن لإنتاج سليلوز نقي عالي القيمة التشغيلية من النفايات الزراعية المهملة.

II.5.3. الدراسة الخامسة: فتح التثمين المزدوج للجنين من خيزران الموزو عبر تجزئة المذيبات يوتكتية العميقة المنظمة بالإيثيلين جليكول[17]

Unlocking dual lignin valorization from moso bamboo via ethylene glycol-tuned deep eutectic solvent fractionation.

المؤلفين وسنة النشر:

Yulu He, Ruojin Shen, Chao Wang, Lupeng Shao, Xianhai Zeng, Aiyong He, Xingxiang Ji, Guihua Yang, Feng Xu. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير استراتيجية مصفاة حيوية متكاملة ومستدامة للتثمين المزدوج (Dual valorization) لمادة اللجنين المستخلصة من خيزران الموزو .(Moso bamboo) يهدف البحث إلى تصميم نظام مذيب عميق الانصهار ثلاثي معدل بواسطة "الإيثيلين جليكول" لحماية البنية الأصلية لروابط اللجنين (β-O-4) من التكثيف الحراري أثناء التجزئة، مما يسمح بإنتاج جسيمات لجنين نانوية ذاتية التجمع (Self-assembled nanoparticles) من جهة، وتوجيه مسار تحللها الحراري لإنتاج زيت حيوي غني بمركبات الفينول عالية القيمة من جهة أخرى.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تجزئة خيزران الموزو باستخدام نظام مذيب عميق انصهار حمضي ثلاثي متطور، مكون من كلوريد الكولين وحمض الأكساليك كمصفوفة أساسية، مع إضافة الإيثيلين جليكول (Ethylene glycol) كمذيب كيميائي واقٍ ومنظم إلكتروني لروابط الكتلة الحيوية. وجرت عملية المعالجة الحرارية عند درجة حرارة متباينة وضبط زمن التفاعل للوصول إلى أعلى كفاءة لإزالة اللجنين

وفصل الطور الصلب السمي السليلوزي عن السائل المذاب. وعقب عملية الفصل، خضع اللجنين المستخلص لتوصيفات بنيوية متقدمة عبر الرنين المغناطيسي النووي ثنائي الأبعاد (2D-NMR) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتتبع سلامة الروابط الكيميائية، ومجهر الفحص الإلكتروني الماسح (SEM) ومجهر القوة الذرية (AFM) لدراسة آلية التجمع الذاتي للجسيمات النانوية الكروية في الوسط المائي. وأخيراً، جرى تقييم الأداء التحويلي للجنين المستقر عبر تجارب الانحلال الحراري السريع الموصول بمطياف الكتلة (Py-GC/MS) لدراسة حركية وتوزيع المركبات الفينولية الناتجة.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن تحقيق نظام المذيب العميق المعدل بالإيثيلين جليكول كفاءة استثنائية في تفكيك بنية الخيزران، حيث سجلت الدراسة نسبة إزالة لجنين فائقة بلغت 94.1%، مع نجاح استثنائي وغير مسبوق في حماية وتثبيت روابط الـــ (β-O-4) الكيميائية الحساسة بنسبة احتفاظ بلغت 61.3% مقارنة بالأنظمة التقليدية. وأظهرت النتائج أن هذا الأمان الهيكلي سمح للجنين بالخضوع لتوجيه حراري ممتاز أثناء تحليل الـــPy-GC/MS ، مسجلا عائدا مرتفعا من الزيت الحيوي بلغ 39.7%، مع تركيز عالٍ جداً للمركب الفينولي النقي (4 -Vinylphenol)ذو القيمة الاقتصادية الكبيرة. بالإضافة إلى ذلك، نجح اللجنين المعزول في تشكيل جسيمات نانوية كروية متجانسة تماماً ذاتية التجمع أبدت خصائص ممتازة لحجب الأشعة فوق البنفسجية(UV-blocking) ، مما يثبت الفعالية التكنولوجية الواعدة لهذه المنصة الخضراء في تحويل المخلفات النباتية الصلبة إلى منتجات نانوية وكيميائية مستدامة ضمن مفهوم المصافي الحيوية الدائرية.

II.6.3. الدراسة السادسة: من تفكيك الكتلة الحيوية إلى اللدن التفاعلي: مذيب سهل الانصهار عميق ثلاثي الوظائف من الـــl-سيستئين لتثمين سيقان الشاي في حلقة مغلقة [18]

From biomass deconstruction to reactive plasticization: A trifunctional l-cysteine deep eutectic solvent for the closed-loop valorization of tea stems.

المؤلفين وسنة النشر:

Usama Shakeel, Ying Zeng, Furong Zheng, Jiaqi Guo, Wenyuan Zhu, Mohammad Rizwan Khan, Mohamed El-Sakhawy, Carolina Krebs de Souza, Junlong Song. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في إغلاق الحلقة التصنيعية بيئياً (Closed-loop valorization) لتثمين النفايات الزراعية المتمثلة في سيقان الشاي .(Tea stems) يهدف البحث إلى ابكار استراتيجية "تدفق ثنائي متكامل" عبر تصميم مذيب عميق الانصهار ثلاثي الوظائف يعتمد على الأحماض الأمينية الكبريتية، بحيث يستخدم المذيب أولاً كعامل كيميائي لتفكيك بنية السيقان واستخلاص اللجنين وحماية روابطه من التكثيف، ثم يُعاد استخدام نفس المذيب المستخلص مباشرة دون عمليات تنقية معقدة كعامل لدونة تفاعلي (Reactive plasticizer)لإنتاج أغشية بوليمرية هجينة متطورة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تحضير مذيب سهل انصهار عميق حمضي وثلاثي الوظائف عبر دمج كلوريد الكولين (ChCl) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية مع الحمض الأميني-l سيستئين (l-cysteine) المحتوي على مجموعات الثيول الكبريتية (SH-) كـــمانح للرابطة بنسبة مولية محددة. وجرت معالجة سيقان الشاي حرارياً بواسطة المذيب المطور لتجزئتها وفصل المتبقي الصلب الغني بالهولوسليلوز (والذي خضع للتحلل الإنزيمي لإنتاج السكريات)، عن الراشح السائل الذي يحتوي على اللجنين المذاب والمذيب معا. وتضمنت المنهجية خطوة هندسية مبتكرة ومباشرة (Re-solvation strategy) حيث جرى مزج السائل الناتِج بالكامل مع بوليمر الكحول متعدد الفينيل (PVA) في وسط مائي لصب أغشية رقيقة متجانسة(PVA+DES film) ، تلا ذلك توصيف بنيوي وميكانيكي وحراري موسع للمواد الناتجة شمل مطيافية الأشعة تحت الحمراء(FTIR) ، وحيود الأشعة السينية(XRD) ، والتحليل الحراري(TGA) ، بالإضافة إلى اختبارات الشد الميكانيكي ومجهر الفحص الإلكتروني الماسح.(SEM)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن نجاح استثنائي لهذه الاستراتيجية الدائرية، حيث أدت مجموعات الثيول النِشطة في مذيب الـــ l-cysteine إلى حماية روابط اللجنين الأساسية (β-O-4) من التحلل العشوائي وتثبيط تكثيفها حرارياً بنجاح، مما حافظ على النقاء العطري للمستخلص. وأظهرت النتائج الميكانيكية للأغشية البوليمرية المدمجة قفزة نوعية غير مسبوقة، حيث سجل الغشاء المطور (PVA+DES) زيادة هائلة في الاستطالة عند القطع (Elongation at break) بلغت 2.4 ضعفا مقارنة بغشاء PVA النقي، نتيجة لعمل المذيب واللجنين معا كعوامل لدونة تفاعلية ممتازة تكسب الغشاء مرونة ومتانة فائقة. علاوة على ذلك، أظهرت

الأغشية الناتجة كفاءة ممتازة في حجب الأشعة فوق البنفسجية (UV-shielding)واستقراراً حرارياً متقدماً، مما يثبت الجدوى الاقتصادية والبيئية العالية لتحويل المخلفات الزراعية بالكامل إلى مواد تغليف ذكية ومستدامة دون إنتاج أي نفايات ثانوية.

الجدول **(3.II.)**: ملخص الدراسات حول تطبيقات المذيبات اليوتكتيكية العميقة في تثمين الكتلة الحيوية والنفايات الصناعية.

الرقم	المرجع	نوع المذيب المستخدم (DES/NADES)	المادة الحيوية / النفايات المستهدفة	التقنية المنهجية والتوصيف	أهم النتائج والأرقام القياسية
1	[13]	كلوريد الكولين : يوريا(Ratio 1:2)	بقايا تقليم أشجار الزيتون	تقييم دورة الحياة (LCA)من المهد للبوابة برمجيةSimaPro	•تدوير المذيب بنسبة 80% يخفض انبعاثات الـــ GWP بنسبة تتجاوز 50%. • عزل لجنين نقي كبديل للفينولات البترولية.
2	[14]	كلوريد الكولين : حمض الأكساليك (Ratio 1:1)مساعد + DMF	الفحم البني منخفض الرتبة(اللينيت)	نفاذ ناقل + محاكاة (MD)+انحلال حراري موجهGC-MS +	•زيادة استخلاص المكونات الذائبة بمقدار 2.51 مرة. • رفع إنتاج القطران الفينولي الخفيف بنسبة 44.2% عند ∘C.600
3	[15]	كلوريد الكولين : جلسرين (Ratio 1:2)	الفطر الطبي (Inonotus obliquus)	استخلاص موجه حرارياً على مرحلتين ,FTIR + XRD, SEM	•مضاعفة عوائد متعدد السكريات (β-glucans) مرتين. • الحفاظ على المركبات الحساسة حرارياً وتثبيط إنزيم α-amylase.
4	[16]	كلوريد الكولين : يوريا(Ratio 1:2)	مسحوق قشور اللوز	معالجة مقارنة بالطريقة القلوية +(NaOH) تبييضXRD, AFM +	•عزل سليلوز كريستالي من النوع الأول.(Cellulose I) •مؤشر تبلور ممتاز (69.4%) واستقرار حراري حتى ∘C.342.5
5	[17]	كلوريد الكولين : حمض الأكساليك+ إيثيلين جليكول	خيزران (الموزو Moso bamboo)	نظام ثلاثي واقٍ لروابط اللجنين+ 2 D-NMR + Py-GC/MS	•إزالة اللجنين بنسبة 94.1% وحماية روابط (β-O-4) بنسبة 61.3%. • إنتاج جسيمات نانوية ذاتية التجمع لحجب الـــ.UV

6	[18]	كلوريد الكولين-L : سيستئين(مذيب ثلاثي الوظائف)	سيقان وبقايا الشاي	تدفق ثنائي متكامل (تفكيك + لدن)بدون تنقية + صب أغشيةPVA	•حماية روابط اللجنين عبر مجموعات الثيول(SH−) •.زيادة استطالة أغشية التغليف الهجينة بمقدار 2.4 ضعفاً.

II.7.3. تحليل الدراسات حول دور DES في معالجة الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية والصناعية

يبرز هذا المحور الدور الجوهري للمذيبات اليوتكتيكية العميقة كأدوات تحويلية في قطاع "المصفاة الحيوية(Biorefinery) "، حيث تتجاوز وظيفتها مجرد كونها مذيبات كيميائية لتصبح وسائط تفاعلية تساهم في تثمين النفايات العضوية، وتدوير الكربون، وتخليق مواد نانوية متقدمة.

أولا: نقاط القوة والابتكارات التقنية

- **تعزيز الاقتصاد الدائري** : ان استخدام هذه المذيبات في حلقة مغلقة لا يقلل من البصمة الكربونية فحسب، بل يحقق جدوى اقتصادية عبر تحويل "النفايات" إلى منتجات ذات قيمة مضافة مثل الأغشية البوليمرية الذكية، وهو ما يتماشى مع معايير الاستدامة العالمية[18, 19].

- **التحكم الجزيئي الموجه** :تميزت المنهجيات المبتكرة في هذا المحور بالدقة في "تفكيك" الشبكات الجزيئية المعقدة (مثل اللجنين والسليلوز)، حيث ساعد دمج إضافات مثل الإيثيلين جليكول أو الـــDMF ، وتوظيف الآليات الحرارية الموجهة(Temperature-gated) ، في الحفاظ على سلامة الروابط الكيميائية الحساسة(β-O-4) ، مما يضمن الحصول على نواتج ذات نقاء عالي وبنية هيكلية سليمة[15, 17].

- **التوافق الوظيفي والبيئي** :نجحت المذيبات اليوتكتيكية العميقة الطبيعية (NADES)في التفوق على المعالجات الكيميائية التقليدية القاسية (مثل الصودا الكاوية)، محققةً كفاءة أعلى في عزل السليلوز دون تدهور حراري للمواد، وهو ما يقلل من السمية الصناعية.[16]

ثانيا: الثغرات والآفاق المستقبلية

- **تعقيد عمليات الفصل والتنقية** :رغم كفاءة المذيبات في التفكيك، تظل مرحلة فصل "المذيب–المنتج" وتدفق المذيب داخل الأنظمة الصناعية الكبيرة تحدياً تقنياً يتطلب حلولاً أكثر كفاءة من حيث استهلاك الطاقة، خاصة عند التعامل مع كتل حيوية متنوعة التركيب.

- **الحاجة إلى معايير عالمية :**لا تزال الدراسات المتعلقة بتقييم دورة الحياة (LCA) محدودة النطاق، وهناك حاجة ماسة لتوحيد البروتوكولات المقارنة بين المذيبات الطبيعية والاصطناعية لضمان "خضراء" المذيب طوال دورة حياته، بدءاً من المواد الأولية الداخلة في تصنيعه وصولاً إلى التخلص منه أو إعادة تدويره.

4.II. المحور الرابع: دراسات سابقة حول استخدام الـــ DES في التخليق الأخضر للمواد النانوية والتحفيز البيئي

1.4.II. الدراسة الأولى: التخليق المدعوم بالمذيبات يوتكتية العميقة لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المطعمة بالحديد مع أداء سعوي كاذب محسّن لاستقرار المكثفات الفائقة غير المتماثلة.[20]

Deep eutectic solvent assisted synthesis of Fe-doped ZnO nanoparticles with enhanced pseudocapacitive performance for stability asymmetric supercapacitors.

المؤلفين وسنة النشر:

M.A. Yewale, S.R. Jadhav, S.B. Madke, M.W. Alam, D.K. Shin, M.J. Kim, S.V. Mohite. 2026.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير طريقة تخليق خضراء، صديقة للبيئة ومنخفضة التكلفة لتصنيع جسيمات أكسيد الزنك النانوية المطعمة بأيونات الحديد(Fe-doped ZnO nanoparticles) ، واستخدامها كأقطاب كهربائية متطورة وغنية بالعيوب البنيوية النشطة. تهدف الدراسة إلى استغلال المذيبات عميقة الانصهار (DES) كأوساط ذكية وموجهة ومقيدة للنمو البلوري، لإنتاج مواد نانوية ذات سعة تخزينية فائقة واستقرار تشغيلي عالٍ جداً، لدمجها في تطبيقات تخزين الطاقة النظيفة والمكثفات الفائقة غير المتماثلة.(Asymmetric supercapacitors)

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على تحضير مصفوفة من المذيب عميق الانصهار (DES) عبر دمج كلوريد الكولين (Choline chloride) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية مع اليوريا (Urea) كـــمانح للرابطة بنسبة مولية (1:2)، حيث استُخدم هذا السائل كوسط تفاعل وبنية توجيهية (Template) بدلاً من المذيبات العضوية السامة. وجرى إذابة السلائف الكيميائية لأكسيد الزنك ونترات الحديد داخل المذيب المطور بنسب تطعيم متباينة للحديد (شملت 0%، 2%، 4%، و 6% مولية)، تلا ذلك معالجة حرارية تدمج بين

الترسيب والتحميص (Calcination) عند 450 مئوية لعزل مساحيق الجسيمات النانوية النقية. وخضعت المواد النانوية الناتجة لتوصيفات بنيوية ومرفولوجية دقيقة وموسعة شملت: حيود الأشعة السينية (XRD) للتحقق من الطور البلوري السداسي النقي (Hexagonal wurtzite) وحساب حجم البلورات وتشوه الشبكة، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحديد المجموعات الوظيفية وروابط(Zn-O) ، ومجهر الفحص الإلكتروني الماسح (FESEM) ومطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (EDS) لرصد التوزيع المرفولوجي وعناصر التطعيم. وأخيراً، جرى تقييم الأداء الكهروكيميائي للأقطاب المصنعة عبر قياسات الجهد الدوري(CV) ، والشحن والتفريغ الجلفانوستاتي(GCD) ، ومطيافية الممانعة الكهروكيميائية (EIS) في وسط إلكتروليتي حامضي وقاعدي.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن نجاح المذيب العميق (ChCl:Urea) في توجيه التخليق الأخضر بنجاح، حيث أظهرت تحليلات الـــ XRD تشكلاً نقياً لبلورات الـــ ZnO دون ظهور أي أطوار ثانوية شوائبية للحديد، مع إثبات أن التطعيم بالحديد أنتج عيوباً بنيوية موجهة وفراغات أكسجينية رتبت هندسياً لتعزيز ناقلية الشحنات. وسجلت الجسيمات النانوية المطعمة بنسبة 4% (Fe-doped ZnO 4%) %أداء كهروكيميائياً استثنائياً وفائقاً، حيث حققت سعة نوعية عالية جداً بلغت 483.5F/g عند كثافة تيار 1A/g، وهو ما يتجاوز بمراحل أداء أكسيد الزنك غير المطعّم نتيجة لتآزر أيونات الحديد الثنائية والثلاثية (Fe^{2+}/Fe^{3+}) في تفاعلات الأكسدة والاختزال (السعة الكاذبة). علاوة على ذلك، أظهر المكثف الفائق غير المتماثل المصنع استقراراً دورياً ممتازاً عبر الحفاظ على 93.4% من سعته الأصلية حتى بعد 5000 دورة شحن وتفريغ متتالية مع كثافة طاقة متميزة، مما يثبت الفعالية الهندسيّة الواعدة لاستخدام الـــ DES كمنصة خضراء لتصنيع مواد نانوية متطورة تخدم تكنولوجيا تخزين الطاقة الصديقة للبيئة.

II.2.4. الدراسة الثانية: نهج تخليق أخضر باستخدام المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة لتخليق بوليمر مطبوع جزيئياً مدعم بذهب وفضة على غرافين مختزل (MIP-AuAg/rGO) كمستشعر كهروكيميائي للأسيتامينوفين: دراسات تجريبية ونظرية [21]

green synthesis approach using deep eutectic solvents to synthesize the MIP-AuAg/rGO as an electrochemical sensor for acetaminophen: Experimental and theoretical studies.

المؤلفين وسنة النشر:

Chin-Chun Hsu, Pin-Hsuan Wu, Yu-Kai Chen, Yi-Ting Hsieh, Shih-I. Lu. 2025.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في ابتكار وتصنيع مستشعر كهروكيميائي نانوي فائق الحساسية والانتقائية للكشف الكمي عن مركب الأسيتامينوفين (Acetaminophen/Paracetamol) في العينات البيئية والدوائية. تهدف الدراسة إلى تقديم نهج تخليق أخضر غير تقليدي يتم فيه تصميم مذيب عميق الانصهار (DES)ثلاثي وظيفي، لا يعمل كوسط سائل فحسب، بل يتصرف كـــ "مونومر وظيفي" نشط كيميائياً يوجه عملية البلمرة المطبوعة جزيئياً (MIP) على سطح مركب هجين من الغرافين المختزل والجسيمات النانوية الثنائية للذهب والفضة، مع تعزيز دقة التصميم عبر نظرية الكثافة الوظيفية.(DFT)

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على توظيف حسابات نظرية الكثافة الوظيفية (DFT) أولاً لنمذجة وفهم طبيعة قوى التجاذب والروابط الهيدروجينية وتداخلات (π-π) بين جزيء الهدف (الأسيتامينوفين) والمستخلص الأخضر المقترح. تلا ذلك التنفيذ المخبري عبر تحضير مذيب عميق انصهار ثلاثي مبتكر مكون من كلوريد الكولين(Choline chloride) ، وحمض الكافيك(Caffeic acid) ، وحمض الفورميك (Formic acid)، حيث أسهم حمض الكافيك بمجموعته الألكينية المتصلة بالكربوكسيل في خفض كثافة السحابة الإلكترونية مما رفع من قابليته للبوليميريز الكيميائي كـــمونومر وظيفي. وجرى تخليق المادة الهجينة النانوية عبر ترسيب الجسيمات الثنائية للذهب والفضة (AuAg) على رقائق غشاء أكسيد الغرافين المختزل (rGO)، متبوعاً بإجراء عملية البلمرة المطبوعة لسطح المذيب العميق (MIP) في وجود جزيئات الدواء، ثم غسل جزيئات القالب (Template) لتكوين تجاويف نانوية فارغة مخصصة ومطابقة هندسياً لشكل جزيء الهدف. وخضعت المادة المستشعرة لتوصيفات تركيبية ومورفولوجية موسعة شملت حيود الأشعة السينية(XRD) ، ومجهر الإرسال الإلكتروني(TEM) ، ومطيافية الأشعة الضوئية الإلكترونية(XPS) ، قبل أن يتم اختبار أدائها التحليلي عبر تقنيات الفولتامتري الدورية والتفاضلية النبضية.(DPV)

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن النجاح الفائق والتميز التركيبي للمستشعر الكهروكيميائي النانوي المطور (MIP-AuAg/rGO)، حيث أكدت الفحوصات البنيوية والمورفولوجية توزيع الجسيمات النانوية للذهب والفضة بانتظام عالي على شبكة الغرافين، مما خلق مساحة سطحية هائلة وناقلية كهربائية ممتازة. وأظهرت قياسات التحليل الكهروكيميائي (DPV) حساسية استثنائية وانتقائية فائقة جداً وموجهة بدقة نحو

التقاط جزيئات الأسيتامينوفين حتى في وجود المركبات الدوائية الملوثة والجسيمات المتداخلة الشائعة، وذلك بفضل التجاويف الهندسية المطبوعة والروابط الكيميائية المتكاملة المتوقعة بحسابات الـــ DFT. كما سجل المستشعر مدى خطياً واسعاً جداً للتركيز وحد كشف منخفض استثنائي(Limit of detection) ، مع إظهار استقرار تشغيلي متميز وقدرة عالية على استرجاع وتحليل الدواء في عينات حقيقية بدقة تامة، مما يثبت الفعالية التكنولوجية الواعدة لاستخدام المذيبات العميقة كمونومرات خضراء في هندسة المستشعرات الكيميائية والتحليل البيئي المستدام.

II.3.4. الدراسة الثالثة: التخليق الأخضر لجسيمات Mn_3O_4 النانوية في مذيب يوتكتي عميق من كلوريد الزنك: اليوريا: الأسيتاميد – التوصيف، الاستشعار الفلوري، والخصائص المضادة للبكتيريا والأكسدة[22]

Green synthesis of Mn_3O_4 nanoparticles in zinc chloride: Urea: acetamide deep eutectic solvent-characterization, fluorescence sensing, antibacterial and antioxidant properties.

المؤلفين وسنة النشر:

A. Vijayakumar, Akash Chacko, P. Jayaprakash. 2025.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في تطوير طريقة اختزال كيميائي خضراء وسريعة وعند درجات حرارة منخفضة لتخليق جسيمات أكسيد المنجنيز النانوية رباعي وثلاثي التكافؤ (NPs 4O3Mn) ذات البنية المستقرة، وذلك باستخدام مذيب سهل الانصهار عميق ثلاثي ومبتكر (Ternary DES) كوسط تفاعل صديق للبيئة وموجه هيكلي للنمو البلوري. تهدف الدراسة إلى تقييم كفاءة هذه الجسيمات النانوية المصنعة بيئياً في ثلاثة تطبيقات حيوية متكاملة تشمل: الاستشعار الفلوري عالي الحساسية للكشف عن الملوثات العضوية السامة والمنفجرة مثل مركب 2،4،6–تراي نيتروفينول (TNP)، وتقييم فاعليتها بيولوجياً كمضاد للأكسدة ومثبط لنمو البكتيريا الممرضة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على خطوتين كيميائيتين أساسيتين، بدأت أولاً بتحضير مذيب عميق الانصهار ثلاثي المكونات (ZUA-DES) عبر دمج ملح كلوريد الزنك (2ZnCl) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية مع مانحين للرابطة هما اليوريا (Urea) والأسيتاميد (Acetamide)، حيث تم تسخين المزيج حتى تشكل سائل شفاف متجانس عند درجة حرارة منخفضة. وتلا ذلك التخليق الأخضر عبر إذابة

ملائف المنجنيز المائية داخل هذا المذيب المتطور كمثبت نانوي وعامل مقيد لنمو البلورات، ثم تعريض المزيج لاختزال كيميائي سريع لعزل مسحوق جسيمات أكسيد المنجنيز النانوية النقية. وخضعت المادة الناتجة لتوصيفات بنيوية وفيزيائية موسعة شملت: حيود الأشعة السينية (XRD) لتحديد النظام البلوري وحساب حجم البلورات، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) والتحليل الحراري الوزني (TG/DTA)، ومطيافية الأشعة الضوئية الإلكترونية (XPS) للتحقق من الحالة التكافؤية للمنجنيز، بالإضافة إلى مجهر الإرسال الإلكتروني عالي الدقة (HRTEM) لرصد المورفولوجيا. وأخيراً، جرى تقييم أداء الجسيمات النانوية كـــمستشعر فلوري عبر تتبع آلية خمد الفلورة (Fluorescence quenching) لجزيئات الـــ TNP الملوثة، بالتوازي مع اختبارات الفعالية البيولوجية ضد سلالات بكتيرية سالبة وموجبة الجرام وقدرتها على مسح الجذور الحرة للـــ DPPH.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن إثبات النجاح الفائق للمذيب العميق الثلاثي في توجيه التخليق الأخضر، حيث أكدت فحوصات الـــ XRD تشكل طور "الهاوسمانيت" (Mn_3O_4 Hausmannite) النقي ذو النظام البلوري الرباعي (Tetragonal system) بمتوسط حجم بلوري بلغ 28 نانومتر، وهو ما تطابق مع صور الـــ HRTEM التي أظهرت جسيمات نانوية كروية الشكل ومتجانسة ومشتتة بانتظام دون تكتل عشوائي بفضل التثبيت السطحي للمذيب. وكشفت قياسات الاستشعار الفلوري عن حساسية استثنائية وانتقائية فائقة جداً لجسيمات الـــ Mn_3O_4 في رصد وتحديد مركب الـــ TNP المتفجر في الأوساط المائية بكفاءة خمد عالية عبر آلية نقل الطاقة الرنيني فورستر (FRET)، وبحد كشف منخفض استثنائي. علاوة على ذلك، أبدت الجسيمات النانوية المبتكرة نشاطاً متميزاً كمضاد للأكسدة وقدرة تثبيطية ممتازة ضد البكتيريا الممرضة، مما يثبت الجدوى الهندسية العالية لاستخدام الـــ DES الثلاثي كمنصة إنتاج خضراء واقتصادية لتصنيع أكاسيد معدنية نانوية تخدم مجالات المستشعرات البيئية والمطهرات الحيوية المستدامة.

II.4.4. الدراسة الرابعة: نحو التخليق الأخضر لجسيمات النانوية المغناطيسية: تقييم مقارن لدورة الحياة (LCA)للتخليق القائم على المذيبات يوتكتية الانصهار العميقة لجسيمات الماجنتيت النانوية والطرق التقليدية[23]

Towards green synthesis of magnetite nanoparticles: a comparative life cycle assessment (LCA) of deep eutectic solvent-based synthesis of magnetite nanoparticles and conventional methods.

المؤلفين وسنة النشر:

Praful W. Jambhule, Niraj T. Khaty, Indrani B. Das Sarma, Vijay M. Tangde, Saurabh Joglekar, Gayatri A. Wankhede. 2025.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في إجراء تقييم كمي شامل ومقارن للأثر البيئي والاستدامة لعملية التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الحديد الأسود المغناطيسية النانوية (الماجنتيت Fe_3O_4 NPs) المصنعة باستخدام مذيب عميق الانصهار (DES) مبتكر، ومقارنتها مباشرة بالطرق الكيميائية والفيزيائية التقليدية الشائعة (مثل طرق الترسيب المشترك والتحلل الحراري). تهدف الدراسة إلى استخدام أداة تقييم دورة الحياة (LCA) لتحديد البصمة البيئية والتحقق من مدى "خضرية" وأمان المذيبات العميقة المبتكرة كمستخلصات ووسائط بديلة ومستدامة هندسياً في النانو تكنولوجي.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية العلمية للدراسة على شقين متكاملين، بدأ الشق الأول حاسوبياً عبر تطبيق نمذجة ميكانيكا الكم ومحاكاة برمجية (GaussView) لدراسة طاقات الارتباط والتداخلات الجزيئية وحساب الثبات التركيبي لمذيب عميق انصهار مبتكر مكون من كلوريد الكولين (ChCl) كمستقبل للرابطة الهيدروجينية وحمض الكلوروأستيك (ClAA) كـــمانح للرابطة بنسبة مولية (1:2). وانتقل الشق الثاني إلى الجانب الهندسي البيئي عبر تطبيق نهج تقييم دورة الحياة (LCA) بحدود نظام من المهد إلى البوابة (Cradle-to-gate) والمدعوم ببرمجية (OpenLCA) وقاعدة بيانات (Ecoinvent)، حيث جرى تتبع وحساب كافة مدخلات الطاقة، والمواد الكيميائية الخام، والانبعاثات الناتجة عن تصنيع المذيب وتخليق الجسيمات النانوية مخبرياً. وتضمن التحليل تقييماً شاملاً للمخرجات عبر فئات أثر بيئي دولية متعددة شملت: القدرة على الاحترار العالمي (GWP)، وسمية الإنسان، وتأثير استنفاد طبقة الأوزون، وتكوين الجسيمات الدقيقة، ومقارنة البصمة الكربونية الكلية الناتجة عن مسار الـــ DES البيئي مع مسارات التخليق التقليدية الأخرى.

النتائج

أسفرت نتائج المحاكاة الحاسوبية وطاقات الارتباط عن تأكيد التشكيل المستقر جداً ونشوء شبكة روابط هيدروجينية قوية ومتينة بين مكونات مذيب (ChCl:ClAA). وأظهرت نتائج تقييم دورة الحياة (LCA) تفوقاً بيئياً حاسماً واستثنائياً لنهج التخليق الأخضر القائم على المذيب العميق مقارنة بالطرق التقليدية،

حيث سجل مسار الـــ DES انخفاضاً حاداً وضخماً في انبعاثات الغازات الدفيئة والقدرة على الاحترار العالمي (GWP) بمقدار يتراوح بين 3 إلى 5 مرات مقارنة بطرق التحلل الحراري الكيميائي التي تستهلك طاقات تشغيلية هائلة. كما أكدت البيانات أن انخفاض السمية المباشرة والمصادر المستدامة لمكونات المذيب جعلته الخيار الأكثر أماناً وصداقة للبيئة عبر مختلف مؤشرات الأثر البيئي المقاسة، مما يثبت الجدوى التكنولوجية والبيئية الواعدة لاعتماد المذيبات العميقة كمنصات هندسية خضراء ومستدامة لتصنيع المواد النانوية والمحفزات على نطاق صناعي نظيف.

II.5.4. الدراسة الخامسة: الجسيمات النانوية المغناطيسية المثبت عليها مذيب يوتكتيكي عميق كمحفز كفؤ للتخليق الأخضر للتريازولوبيريميدينات [24].

Deep eutectic solvent-immobilized magnetic nanoparticles as a capable catalyst for the green synthesis of triazolopyrimidines.

المؤلفين وسنة النشر:

Amin Benrashid, Davood Habibi, Masoumeh Beiranvand. 2024.

الهدف من الدراسة:

تتمثل الغاية الأساسية من هذا البحث في هندسة وتصميم محفز نانوي هجين ومغناطيسي متعدد الوظائف ومتوافق مع مبادئ الهندسة الخضراء، عبر تثبيت مصفوفة مذيب عميق الانصهار (DES) قائم على كلوريد الكولين فوق سطح جسيمات أكسيد الحديد الأسود النانوية المغناطيسية المغلفة بالسيليكا. يهدف البحث إلى ابتكار نظام تحفيزي صلب ذكي وغير سام، يجمع بين الخصائص التنشيطية الفائقة للمذيبات العميقة وسهولة الفصل المغناطيسي الجاذب، لتوجيه وتسريع تفاعلات التخليق متعدد المكونات الأخضر لمركبات "التريازولوبيريميدين" ذات الأهمية الحيوية والصيدلانية الكبيرة.

المنهجية والتجربة

ارتكزت المنهجية التجريبية على هندسة المحفز النانوي وتعديل سطحه عبر أربع خطوات تتابعية متقنة، بدأت بتخليق قلب جسيمات أكسيد الحديد المغناطيسية (Fe_3O_4) بطريقة الترسيب المشترك (A)، متبوعاً بتغليفها بطبقة واقية من السيليكا لتشكيل هيكل اللب والقشرة ($Fe_3O_4@SiO_2$) باستخدام كاشف TEOS (B). بعد ذلك، جرى تعديل السطح كيميائياً بواسطة مادة تريس(هيدروكسي ميثيل)أمينوميثان لتكوين مركب الوسط (C)، والذي تم مفاعلته في الخطوة الأخيرة مع كلوريد الكولين لربط وتثبيت المذيب العميق تساهمياً على السطح الخارجي النانوي، لينتج المحفز النهائي المعقد ($Fe_3O_4@SiO_2@THAM@ChCl$-

D). وخضعت المادة النانوية المتطورة لتوصيفات بنيوية ومورفولوجية ومغناطيسية دقيقة شملت: مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتتبع خطوات الارتباط، ومطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (EDS) لرصد التوزيع العنصري، وحيود الأشعة السينية (XRD) للتحقق من الطور البلوري، ومجهر الفحص الإلكتروني الماسح للانبعاث الميداني (FESEM)، ومقياس المغناطيسية عينة الاهتزاز (VSM). وأخيرا جرى تقييم الكفاءة التحويلية للمحفز في التخليق الأخضر لمشتقات 1،2،4–تريازولو[4،3–a]بيريميدين عبر تفاعل تكثيف ثلاثي المكونات (يجمع بين الألدهيدات العطرية، 3–أمينو–1،2،4–تريازول، والأسيتوأسيتات) تحت ظروف خالية من المذيبات العضوية السامة، مع دراسة ثبات المحفز وإعادة استخدامه.

النتائج

أسفرت نتائج الدراسة عن النجاح الدقيق في بناء وتثبيت نظام المذيب العميق على الأسطح النانوية، حيث أكدت تحليلات XRD و FESEM الاحتفاظ الكامل بالهيكل البلوري والمغناطيسي Fe_3O_4 مع تشكل جسيمات كروية متجانسة الحجم تقع في النطاق النانوي المشتت بانتظام. وأظهرت قياسات الـــ VSM أن المحفز الهجين يمتلك استجابة مغناطيسية فائقة وممتازة تمكن الباحثين من عزله وفصله تماماً من وسط التفاعل في ثوانٍ معدودة باستخدام مغناطيس خارجي بسيط وبدون فقد في المادة الشغالة. وكشفت النتائج التحفيزية أن المحفز النانوي المطور حقق كفاءة تشغيلية وعوائد إنتاج استثنائية وفائقة جداً لمركبات التريازولوبيريميدين بلغت (88–95%) في فترات زمنية وجيزة جدا وبطرق خضراء، بفضل التأثير التآزري للمواقع النشطة وشبكة الروابط الهيدروجينية للمذيب العميق المثبت سطحياً. كما أثبتت اختبارات الاستقرار التشغيلي إمكانية إعادة تدوير واستخدام المحفز النانوي 5 دورات متتالية بنجاح وثبات دون أي انخفاض ملحوظ في كفاته البنيوية أو التحفيزية، مما يجعله بديلا هندسيا واعدا للتطبيقات البيئية والصناعية المستدامة.

الجدول (II.4.): ملخص الدراسات حول التخليق الأخضر للمواد النانوية والتحفيز البيئي باستخدام المذيبات اليوتكتيكية العميقة.

الرقم	المرجع	المادة النانوية المصنعة	نوع DES المستخدم	دور الـ DES في توجيه البنية البلورية والمورفولوجيا	التطبيق البيئي / الطاقي المستهدف
1	[20]	جسيمات أكسيد الزنك المطعمة بالحديد (Fe-doped ZnO NPs)	ChCh : Urea(1:2)	•وسط ذكي ومقيد للنمو البلوري. • منع الأطوار الشوائبية للحديد. • هندسة الفراغات الأكسجينية والعيوب البنيوية.	•مكثفات فائقة غير متماثلة لتخزين الطاقة النظيفة. • سعة نوعية: F/g.483.5
2	[21]	بوليمر مطبوع جزيئياً مدعم بذهب وفضة وغرافين (MIP-AuAg/rGO)	ChCl : Caffeic acid:Formic acid	•عمل كـــ" مونومر وظيفي "نشط كيميائيا. • توجيه البلمرة المطبوعة جزيئياً (MIP) على السطح. • خلق تجاويف هندسية متكاملة عبر تداخلات π-π.	•مستشعر كهروكيميائي نانوي فائق الحساسية للكشف عن الملوثات الدوائية (Acetaminophen).
3	[22]	جسيمات أكسيد المنجنيز النانوية (Mn3O4 NPs)	ZnCl2 : Urea:Acetamide	•عامل مثبت ومقيد للنمو البلوري عند حرارة منخفضة. • توجيه تشكل طور " الهاوسمانيت " الرباعي النقي. • إنتاج جسيمات كروية مشتتة بانتظام (28 nm).	•استشعر فلوري للملوثات العضوية والمتفجرة.(TNP) •كمضاد بكتيري ومسح الجذور الحرة.(DPPH)
4	[23]	جسيمات الماجنتيت المغناطيسية (Fe3O4 NPs)	ChCl : Chloroacetic acid(1:2)	•وسط اختزال وتثبيت أخضر مستقر بنيويا. • بناء شبكة روابط هيدروجينية قوية حول الجسيمات. • التحكم في الحجم النانوي عبر الحسابات الكوانتية.	•تقييم دورة الحياة (LCA) لمسار التخليق النانوي المقارن بالطرق التقليدية.

5	[24]	محفز نانوي هجين مغناطيسي (معقدFe3O4 @SiO2 @THAM@C hCl)	مصفوفة قائمة علىCholine chloride	•التثبيت التساهمي للمذيب على السطح الخارجي النانوي. • الاحتفاظ بالهيكل البلوري والمغناطيسي للنواة. • توفير مواقع نشطة عالية التشتت.	•محفز صلب ذكي لإعادة تدوير وتسريع التخليق متعدد المكونات لمركبات التريازولوبيريميدين.

II.6.4. دراسات سابقة حول استخدام الـــ DES في التخليق الأخضر للمواد النانوية والتحفيز البيئي

تظهر الدراسات تحول نوعي في دور المذيبات اليوتكتيكية العميقة، إذ لم تعد مجرد أوساط تفاعلية خاملة، بل أصبحت "عوامل هيكلية موجهة (Morphology-directing agents) "و"مونومرات وظيفية " (Functional monomers)تساهم بفاعلية في تخليق مواد نانوية ذات خصائص كهروكيميائية ومغناطيسية فائقة.

أولا: نقاط القوة والابتكارات التقنية

- **التحكم الدقيق في البنية النانوية :** ان المذيبات اليوتكتيكية العميقة تلعب دورا حاسما في منع تكتل الجسيمات النانوية (Agglomeration) والتحكم في حجمها البلوري، مما يؤدي إلى إنتاج مواد ذات عيوب بنيوية (مثل الفراغات الأكسجينية) التي تعزز النشاط التحفيزي والكهروكيميائي[20, 22].

- **تعدد الوظائف في الكيمياء الخضراء :** برزت قدرة الـــ DES على العمل كمستشعرات حيوية بفضل تقنية "البلمرة المطبوعة جزيئيا(MIP) "، حيث تعمل الروابط الهيدروجينية وتفاعلات (π) على خلق تجاويف نانوية متخصصة للكشف عن الملوثات الدوائية بدقة عالية[21]

- **تعزيز الاستدامة الصناعية :** أكدت دراسات تقييم دورة الحياة (LCA) بوضوح أن المسارات الخضراء القائمة على الـــ DES تتفوق بمراحل على الطرق التقليدية (مثل التحلل الحراري)، حيث تحقق انخفاضاً حاداً في البصمة الكربونية والسمية البيئية.[23]

ثانيا: الثغرات والآفاق المستقبلية

- **استقرار المحفزات في التفاعلات المتكررة :** رغم النجاح في تثبيت المذيبات على الأسطح المغناطيسية[24]، لا تزال هناك حاجة لمزيد من الدراسات حول "الاستقرار الكيميائي طويل الأمد" لهذه الروابط التساهمية عند تعرض المحفز لظروف قاسية من درجة الحموضة أو الحرارة العالية.

- **التدرج الصناعي :** الانتقال من "التخليق المخبري للجسيمات النانوية" إلى "الإنتاج الصناعي" يتطلب فهم أعمق لحركية التفاعل داخل مفاعلات التدفق المستمر (Continuous flow reactors) بدلا من المفاعلات الدفعية (Batch reactors) المستخدمة حاليا.

خلاصة الفصل

يمثل هذا الفصل مرجعيا ونقديا شاملا لأحدث ما توصلت إليه الطفرات البحثية (بين سنتي 2024 و2026) في مجال توظيف المذيبات عميقة الانصهار التقليدية والطبيعية (DES / NADES) عبر أربعة أبعاد بيئية وطاقوية متكاملة:

1. **معالجة البيئة المائية (المحور الأول)** :أثبتت المذيبات الكارهة للماء (HDES) كفاءة استثنائية وفصلاً دقيقاً وسريعاً للملوثات العضوية والصيدلانية الدقيقة (مثل البيسفينول والمضادات الحيوية) من المصفوفات المائية الحقيقية، مع خفض زمن فصل الأطوار ودعم الكيمياء التحليلية الخضراء بأتمتة مخبرية متميزة.
2. **احتجاز الغازات والانبعاثات (المحور الثاني)** :تجلى الدور التآزري عند دمج الـ DESداخل الأطر المسامية والمصفوفات الهجينة (مثل الأغشية والمواد الكربونية)، مما نجح في تخطي عقبة اللزوجة العالية للمذيبات النقيّة، وتحقيق قدرات احتجاز فائقة وانتقائية قياسية لغازات الاحتباس الحراري
3. **هندسة المصافي الحيوية (المحور الثالث)** :برزت المذيبات الطبيعية كمنصات خضراء مثالية لتفكيك الكتلة الحيوية المعقدة وعزل مكوناتها (كالسيليلوز واللجنين) بنقاوة عالية وبنية مستقرة، مستبدلةً بذلك الطرق القلوية والحمضية التقليدية القاسية، مما يدعم نموذج الاقتصاد الحيوي الدائري.
4. **التخليق النانوي وتخزين الطاقة (المحور الرابع)** :تعدت المذيبات دورها كأوساط تفاعل لتصبح موجهات هيكلية ذكية ومثبتات سطحية تمنع تكتل الجسيمات النانوية، وتمنحها عيوباً بنيوية مرغوبة ضاعفت من سعات التخزين الطاقوي للمكثفات الفائقة وكفاءة التحلل الضوئي للملوثات.

رغم القفزات العلمية الواعدة التي حققتها المنشورات الحديثة، إلا أن التحليل النقدي المعمق لهذه الأدبيات يكشف عن وجود فجوات بحثية جوهرية تشكل أرضية خصبة للدراسة والتطوير، وتتلخص في النقاط التالية:

1. **القصور في دراسة المصفوفات الحقيقية المعقدة** :تقتصر أغلب تكنولوجيات الامتزاز واحتجاز الغازات على محاليل قياسية مصنعة مخبرياً وثنائية المكونات، في حين يغيب الفهم العميق لسلوك

المذيبات العميقة عند تفاعلها مع مصفوفات مائية وغازية حقيقية ومتعددة الملوثات، حيث تنخفض الكفاءة نتيجة التنافس على المواقع النشطة والروابط الهيدروجينية.

2. **فقدان الاستقرار الهيكلي الكيميائي** تواجه الأنظمة التي تعتمد على تحميل المذيبات العميقة داخل ركائز صلبة (كالكربون المنشط أو المواد النانوية المسامية) مشكلة نضح المذيب وترشحه تدريجياً في الأوساط المائية أثناء التدفق المستمر، مما يستدعي ابتكار آليات تثبيت تساهمي وكيميائي طويل الأمد دون الإضرار بحركية انتقال المادة.

3. **قيود اللزوجة العالية والتوسع الهندسي التجاري** تظل اللزوجة المرتفعة للمذيبات عميقة الانصهار العائق الأكبر أمام انتقال هذه التقنية من الحجم المخبري الضيق إلى النطاق الصناعي والتطبيقي الواسع، نظراً للحاجة إلى طاقات ضخمة في عمليات الضخ والتجفيف والفصل، مما يتطلب تصاميم هندسية متطورة لمفاعلات مستمرة التدفق تؤمن جدوى اقتصادية وميكانيكية.

4. **الحاجة لتثمين مخلفات حيوية كربونية محلية محددة** :بالرغم من تنوع المواد الحيوية المدروسة، لا تزال هناك حاجة ماسة لدمج المذيبات عميقة الانصهار في هندسة وتعديل أسطح كربونية مشتقة من نفايات زراعية محلية واعدة ومحددة، وتوظيف آليات التآزر البنيوي لخلق ركائز امتزاز ومواد هجينة متطورة وقابلة للفصل المغناطيسي السهل تخدم قضايا الإصحاح البيئي.

قائمة المراجع:

[1]Y. Wang, E. Goikolea, I. R. de Larramendi, S. Lanceros-Méndez, and Q. Zhang, "Efficient Water-Assisted Precipitation of Nickel, Manganese, and Cobalt from Ethaline Deep Eutectic Solvent," *Journal of Alloys and Compounds,* p. 187130, 2026.

[2]Y. Zhao ,Y. Li, X. Li, Q. Xue, X. Yang, and J. Tong, "Mechanism of Antibiotic Removal from Wastewater by Choline-Based Deep Eutectic Solvents Modified Biochar," *Water, Air, & Soil Pollution,* vol. 237, p. 719, 2026.

[3]E. A. Oke and J. H. Potgieter, "Effectiveness of acidic deep eutectic solvents in recovery of hazardous base metals from waste printed circuit boards," *Environmental Science and Pollution Research,* vol. 32, pp. 16361-16379, 2025.

[4]K. A. Makgoana, A. T. Kuvarega, K. E. Sekhosana, and L. M. Madikizela, "Deep eutectic solvent-based molecularly imprinted polymer for the selective adsorption of emtricitabine in contaminated water," *Chemical Papers,* vol. 79, pp. 3023-3037, 2025.

[5]H. Li, L. Zhao, W. Chen, Z. Shao, and K. Zhang, "Phosphorylated Sawdust Synthesized via Guanidine Phosphate Deep Eutectic Solvent: Preparation and Its Dye Adsorption Performance," *Fibers and Polymers,* pp. 1-13, 2026.

[6]A. T. Varghese and A. Das, "Enhancing green recovery of Nd and Fe using TGA–ChCl DES and vermiculite: sustainable leaching of NdFeB magnets with deep eutectic solvents (DES)," *Discover Chemistry,* vol. 2, p. 337, 2025.

[7]J. Xu, L. Cheng, S. Wang, Y. Liu, and J. Du, "Low-viscosity deep eutectic solvent composed of EmimCl and 4-methylimidazole for SO_2 absorption: Synthesis, DFT studies, reaction mechanism studies," *Journal of Molecular Structure,* p. 144828, 2025.

[8]J. Qin, Y. Dai, H. Wang, Q. Hu, M. Guo, Y. Zhou*, et al.*, "Construction of a type II/III deep eutectic solvent/Pebax membrane for efficient CO2 and N2 separation: Unraveling the synergistic mechanism of multisite cooperation for enhanced CO2 transport," *Journal of Membrane Science,* p. 125362, 2026.

[9]Y. Li, X. Xiao, H. Li, G. Li, L. Dou, L. Tian*, et al.*, "Insight into the synergistic SO2 removal by activated carbon loaded with amino acid based deep eutectic solvents: Mechanism, DFT calculation," *Chemical Engineering Journal,* p. 171998, 2025.

[10] H. F. Hasan, F. T. Jasim, A. H. Whaieb, T. M. Albayati, A. A. Abdulrahman, S. A. Gheni*, et al.*, "Synergistic CO2 Adsorption in MCM-41 via Pore-Confined Choline Chloride–Urea Deep Eutectic Solvent," *Microporous and Mesoporous Materials,* p. 114145, 2026.

[11] S. Atal, S. Sharma, A. K. Gomey, S. S. Ali, R. Kumar, D. Dwivedi*, et al.*, "Experimental Evaluation of CO2 Absorption and Thermophysical Properties of TBAB-Based Deep Eutectic Solvents with Amine and Acid Donors," *C,* vol. 12, p. 28, 2026.

[12] J. Fan, J. Huang, F. Song, N. He, and X. Wang, "Novel phase-change deep eutectic solvents: Experimental investigation of physicochemical properties and CO_2 capture performance," *Separation and Purification Technology,* p. 136929, 2026.

[13] I. Gómez-Cruz, A. Morales, E. Castro, and J. Labidi, "Environmental assessment of olive tree pruning valorization via deep eutectic Solvents: Toward a circular and sustainable biorefinery model," *Waste Management,* vol. 218, p. 115545, 2026.

[14] X. Zhou, M. Feng, D. Luo, L. Yi, J. Chen, P. Bei, *et al.*, "Deconstruction of lignite macromolecular network via DMF-assisted deep eutectic solvents for directed pyrolysis valorization," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* p. 107711, 2026.

[15] X. Fu, J. Song, C. Shi, Y. Hu, Q. Qiu, X. Chen, *et al.*, "Sustainable valorization of Inonotus obliquus via temperature-gated natural deep eutectic solvents extraction: Polysaccharide-antioxidant partitioning," *International Journal of Biological Macromolecules,* p. 148708, 2025.

[16] A. Están, M. Umana, A. Ibánez-Daudén, and S. Simal, "Natural deep eutectic solvent for cellulose isolation from almond shell powder: A sustainable approach for by-product valorization," *Industrial Crops and Products,* vol. 239, p. 122440, 2026.

[17] Y. He, R. Shen, C. Wang, L. Shao, X. Zeng, A. He, *et al.*, "Unlocking dual lignin valorization from moso bamboo via ethylene glycol-tuned deep eutectic solvent fractionation," *Bioresource Technology,* p. 134019, 2026.

[18] U. Shakeel, Y. Zeng, F. Zheng, J. Guo, W. Zhu, M. R. Khan, *et al.*, "From biomass deconstruction to reactive plasticization: A trifunctional l-cysteine deep eutectic solvent for the closed-loop valorization of tea stems," *Bioresource Technology,* p. 134805, 2026.

[19] I. Gómez-Cruz, A. Morales, E. Castro, and J. Labidi, "Environmental Assessment of Olive Tree Pruning Valorization via Deep Eutectic Solvents: Toward a Circular and Sustainable Biorefinery Model," *Available at SSRN 5786877*.

[20] M. Yewale, S. Jadhav, S. Madke, M. Alam, D. Shin, M. Kim, *et al.*, "Deep eutectic solvent assisted synthesis of Fe-doped ZnO nanoparticles with enhanced pseudocapacitive performance for stability asymmetric supercapacitors," *Journal of Energy Storage,* vol. 155, p. 121411, 2026.

[21] C.-C. Hsu, P.-H. Wu, Y.-K. Chen, Y.-T. Hsieh, and S.-I. Lu, "A green synthesis approach using deep eutectic solvents to synthesize the MIP-AuAg/rGO as an electrochemical sensor for acetaminophen: experimental and theoretical studies," *Electrochimica Acta,* vol. 523, p. 145934, 2025.

[22] A. Vijayakumar, A. Chacko, and P. Jayaprakash, "Green synthesis of Mn3O4 nanoparticles in zinc chloride: Urea: Acetamide deep eutectic solvent-characterization, fluorescence sensing, antibacterial and antioxidant properties," *Journal of Molecular Structure,* vol. 1321, p. 139833, 2025.

[23] P. W. Jambhule, N. T. Khaty, I. B. D. Sarma, V. M. Tangde, S. Joglekar, and G. A. Wankhede, "Towards green synthesis of magnetite nanoparticles: a comparative life cycle assessment (LCA) of deep eutectic solvent-based synthesis of magnetite nanoparticles and conventional methods," *Inorganic Chemistry Communications* ,vol. 179, p. 114721, 2025.

[24] A. Benrashid, D. Habibi, and M. Beiranvand, "Deep eutectic solvent-immobilized magnetic nanoparticles as a capable catalyst for the green synthesis of Triazolopyrimidines," *Journal of Molecular Liquids,* vol. 409, p. 125504.2024 ,

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة:

مثّلت هذه الدراسة النظرية والتحليلية المعمّقة حول المذيبات اليوتكتيكية العميقة (Deep Eutectic Solvents, DESs) مسعىً منهجياً لتفكيك الأسس الثرموديناميكية والميكانيكيات الجزيئية المجهرية التي تحكم تشكّل هذه الفئة الناشئة من الأوساط السائلة البديلة، توازياً مع إجراء قراءة تحليلية ومقارنة لأحدث المسارات البحثية والتكنولوجية الموجهة نحو التطبيقات البيئية والتنمية المستدامة للفترة الممتدة بين عامي 2024 و2026.

وقد خلص العمل في شقّه النظري التأسيسي (الفصل الأول) إلى أن الانخفاض الحاد والعميق في درجات انصهار هذه الأنظمة ليس مجرد ظاهرة فيزيائية عابرة، بل هو نتاج حيود سلبي حاد عن السلوك الثرموديناميكي المثالي، ينشأ عن خفض الجهد الكيميائي للمكونات عند المزج الستوكيومتري. وتتكامل هذه المنظومة الحرارية مع تشكّل شبكة مكثفة وفوق جزيئية من الروابط الهيدروجينية البينية والتآثرات الكهروستاتيكية غير التساهمية بين مستقبلات الروابط الهيدروجينية (HBAs) ومانحيها(HBDs) ، ممّا يؤدي إلى تشتيت الشحنة الأنيونية وتفكيك طاقة الشبكة البلورية للمواد النقيّة ومنعها من إعادة التبلور. هذا الاضطراب البنيوي يمنح النظام سيولته التلقائية عند درجات حرارة منخفضة، ويؤصّل لخصائصها كـــ "مذيبات مصمّمة (Tailor-made solvents) "قابلة للضبط الهيدروديناميكي. كما أتاح التصنيف الخماسي المعاصر رسم حدود علمية فارقة تفصل هذه الأنظمة فصلاً جوهرياً عن السوائل الأيونية التقليدية من حيث آليات التكوين، والبنية الكيميائية.

وعلى الصعيد التحليلي والتطبيقي (الفصل الثاني)، أثبت التقييم المقارن للأدبيات العلمية المعاصرة الكفاءة الاستثنائية التي تبديها هذه المذيبات، لا سيما الأجيال المستحدثة منها كالمذيبات الطبيعية (NADES)والأنظمة الكارهة للماء(Hydrophobic DES) ، في معالجة التحديات البيئية الحرجة. حيث أظهرت الأبحاث قدرات فائقة في محاور تقنية حاسمة تشمل: تنقية المياه العادمة وعزل الملوثات الدقيقة والأيونات المعدنية الثقيلة، واحتجاز وتثبيت الانبعاثات الغازية والدفيئة صناعياً، فضلاً عن دورها المحوري كأواسط تفاعلية مرنة في تفكيك الكتلة الحيوية وتثمين النفايات العضوية ضمن أطر الاقتصاد الدائري.

ومع ذلك، فإن هذه القراءة التحليلية رصدت القيود البنيوية والتحديات الهندسيّة التي لا تزال تواجه الانتقال بهذه التكنولوجيا من الحيز المخبري إلى النطاق الصناعي الواسع؛ وتتمثل أبرز هذه العقبات في الارتفاع الملحوظ للزوجة الحركية للعديد من الأنظمة التقليدية (مما يحد من معدلات نقل الكتلة والسيولة

الحركية للمزيج)، والحساسية العالية تجاه الرطوبة الجوية والامتصاص الذاتي للماء (الذي قد يؤدي إلى تفكك الشبكة الجزيئية البينية)، ناهيك عن الفجوة المعرفية القائمة في التقييمات الديناميكية الشاملة المتعلقة بالسمية الخلوية والتأثيرات البيئية طويلة الأمد لهذه الأوساط عند تداخلها مع النظم الإيكولوجية المائية.

وتأسيساً على الاستنتاجات المحورية التي أسفر عنها هذا البحث، تظهر الأهمية العلمية لتوجيه الجهود البحثية المستقبلية نحو المحاور الاستراتيجية الآتية:

1. **النمذجة الجزيئية المتقدمة :** التوسع في توظيف برمجيات المحاكاة الحاسوبية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ المسبق بالخواص الفيزيائية والكيميائية والسلوك الطوري للأنظمة قبل تخليقها مخبرياً، مما يتيح هندسة مذيبات نوعية موجهة ذات لزوجة منخفضة واستقرار حركي عالٍ.
2. **ابتكار استراتيجيات مغلقة لإعادة التدوير والاسترجاع :** التركيز على تطوير تقنيات عملياتية منخفضة الكلفة وفصل الملوثات المستخلصة بكفاءة، بما يضمن استرجاع المذيب اليوتيكتي وإعادة تدويره لمرات متتالية دون تدهور في كفاءته الإذابية والتفاعلية.
3. **تكثيف دراسات السمية البيئية والتحلل الحيوي :** إجراء تقييمات حيوية قياسية وممنهجة لرصد التأثيرات البيئية للمكونات المشكلة على الأحياء المائية الدقيقة، والنباتات، والتربة، لضمان الامتثال المطلق والصارم لكافة مبادئ الكيمياء الخضراء.
4. **الاستثمار في الأنظمة غير الأيونية والكارهة للماء :** تعزيز الأبحاث الأكاديمية والتطبيقية حول الجيلين الرابع والخامس للمذيبات اليوتكتيكية العميقة، كونهما يمثلان الحل البنيوي الأمثل لتجاوز مشكلات اللزوجة المرتفعة وتأثيرات الطور المائي في البيئات التفاعلية المعقدة.

وفي الختام، تؤكد هذه الدراسة أن المذيبات اليوتكتيكية العميقة لا تمثل مجرد بديل تكتيكي عابر للأوساط العضوية التقليدية، بل هي ركيزة استراتيجية من ركائز كيمياء المستقبل البيئية، وتكنولوجيا واعدة تمتلك كافة المقومات البنيوية والحرارية لتوجيه قطاع الصناعات الكيميائية نحو مسارات أكثر أماناً، واستدامة، وتناغماً مع الحفاظ على النظم الحيوية.