

استخدام المواد الممتزة من المخلفات الزراعية والصناعية في معالجة الملوثات: استدامة بيئية واقتصادية

Utilization of Adsorbent Materials from Agricultural and Industrial Waste in Pollution Treatment: Environmental and Economic Sustainability

غربية عبد العالي¹

¹ قسم العلوم التقنية، كلية التكنولوجيا ، جامعة عمار تليجي ، الأغواط. (الجزائر)، abdelali98111@yahoo.fr

تاريخ النشر: جوان/2025

تاريخ القبول: 2025/05/13

تاريخ الإرسال: 2024/03/24

الملخص: (Abstract)

الامتزاز هو تقنية فعّالة لمعالجة ملوثات المياه والهواء باستخدام مواد ممتزة منخفضة التكلفة مثل المخلفات الزراعية والصناعية. تتمتع هذه المواد بكفاءة عالية في إزالة الملوثات مثل المعادن الثقيلة والمركبات العضوية. في بعض الأحيان، تكون هذه المواد فعّالة جدًا في إزالة الملوثات، خاصة عندما يتم معالجتها كيميائيًا أو فيزيائيًا. تعتمد كفاءة عملية الامتزاز على عوامل مثل نوع المادة الممتزة، تركيز الملوثات، درجة الحرارة، ودرجة حموضة الوسط. تُستخدم تقنيات مختلفة لتحليل الممتزات، مثل قياس المساحة السطحية، تحليل XRD ، واختبار pH_{pzc} ، والتي تساعد في تحسين تصميم المواد الممتزة وزيادة فعاليتها. تُستخدم أنظمة الامتزاز الثابتة أو الديناميكية بناءً على نوع الملوثات يُعزّز تجديد الممتزات من كفاءتها ويقلل التكاليف، على الرغم من وجود تحديات مثل التكاليف العالية وفقدان الكفاءة مع الاستخدام المتكرر. تُعد هذه التقنية خيارًا مستدامًا بيئيًا واقتصاديًا.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، المواد الممتزة، تجديد الممتزات، أنظمة الامتزاز، الاستدامة البيئية.

Abstract:

Adsorption is an effective technique for treating water and air pollutants using low-cost adsorbent materials such as agricultural and industrial waste. These materials have high efficiency in removing pollutants like heavy metals and organic compounds. In some cases, these materials are very effective in removing contaminants, especially when treated chemically or physically. The efficiency of the adsorption process depends on factors such as the type of adsorbent material, pollutant concentration, temperature, and the pH of the medium. Various techniques are used to analyze adsorbents, such as surface area measurement, XRD analysis, and pH_{pzc} testing, which help improve the design of adsorbent materials and increase their effectiveness. Fixed or dynamic adsorption systems are used based on the type of pollutants. Adsorbent regeneration enhances its efficiency and reduces costs, although challenges like high costs and decreased efficiency with repeated use can arise. This technique is an environmentally and economically sustainable option.

Key word : Adsorption, adsorbent materials, adsorbent regeneration, adsorption systems, environmental sustainability.

1. مدخل (Introduction)

تعتبر المواد الممتزة منخفضة التكلفة من الحلول الفعّالة بيئياً واقتصادياً في معالجة المياه والهواء والتطبيقات الصناعية التي تتطلب إزالة الملوثات. تتميز هذه المواد بقدرتها العالية على امتزاز الجزيئات الضارة مثل المعادن الثقيلة، المركبات العضوية، الأصباغ، والغازات السامة، مما يجعلها مناسبة للمشاريع ذات الميزانيات المحدودة. تتمثل إحدى مزايا هذه المواد في توافرها بسهولة، إذ يمكن تحضيرها من مصادر طبيعية أو نفايات صناعية وزراعية، مما يقلل من تكاليف الإنتاج ويعزز استخدامها في مختلف التطبيقات^{2,1}. من بين المواد الممتزة منخفضة التكلفة التي أثبتت فعاليتها نجد مثل المخلفات الزراعية والصناعية . كط يُعتبر الكربون الحيوي الناتج عن تحلل المواد العضوية من بقايا النباتات من الحلول الفعّالة في إزالة المعادن الثقيلة والغازات السامة. إضافة إلى ذلك، تُستخدم نفايات الخشب لإزالة الملوثات من المياه بتكلفة منخفضة، وكذلك الفحم الذي يُستخدم بفعالية في إزالة المعادن الثقيلة والمركبات العضوية. تعد المواد الممتزة المستخلصة من الكتلة الحيوية والنفايات الزراعية والصناعية خياراً مستداماً وفعّالاً اقتصادياً لمعالجة التلوث. فمثلاً، قشور جوز الهند وخشب الأشجار هي مصادر وفيرة يمكن معالجتها لإزالة الملوثات مثل المعادن الثقيلة والأصباغ على سبيل المثال، بينت دراسة نُشرت في عام 2024 أن المخلفات الناتجة عن حصاد الأرز يمكن أن تمتز بشكل فعال المعادن الثقيلة مثل الرصاص، النيكل، الكوبالت، الكروم والكاديوم من المياه الملوثة. كما نشرت دراسة أخرى في عام 2025 استخدمت كوز الذرة لتحضير فحم منشط قادر على إزالة صبغة الأزرق الميثيلين. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت دراسة

نشرت في نفس العام إمكانية امتزاز مضاد حيوي من المياه باستخدام مخلفات ناتجة عن حصاد القمح³ 5،4. بالإضافة إلى النفايات الزراعية، يتم استخدام النفايات الصناعية مثل رماد الفحم والرواسب في تطبيقات الامتزاز البيئي، مما يساعد في تقليل تكاليف التخلص منها ومعالجة التلوث في نفس الوقت^{6،7}. يعد استخدام هذه المواد الممتازة خطوة هامة نحو الاستدامة البيئية والاقتصادية، حيث تساهم في تقليل التلوث وحماية الموارد الطبيعية، فضلاً عن توفير حلول مبتكرة وفعّالة من حيث التكلفة للعديد من الصناعات والمجتمعات^{8،7}.

2. المواد الممتازة

2. 1. الفحم المنشط

يعد الفحم المنشط من أكثر المواد الممتازة استخداماً نظراً لمساحته السطحية الكبيرة وبنيته المسامية، مما يجعله فعالاً جداً في امتصاص الملوثات العضوية وغير العضوية من الهواء والمياه العادمة. وقدرته الكبيرة على إزالة السموم والأصبغ والمعادن الثقيلة وغيرها من المواد الضارة جعلت منه خياراً شائعاً في التطبيقات البيئية والصناعية. يمكن الحصول على الفحم المنشط من مصادر غنية بالكربون مثل قشور جوز الهند والخشب والفحم، ويتم تفعيله من خلال معاملة حرارية أو كيميائية لزيادة قدرته على الامتزاز^{9،10}.

2.2 المواد الممتازة منخفضة التكلفة غير التقليدية

في السنوات الأخيرة، أصبح التركيز يتجه نحو تطوير مواد ممتازة غير تقليدية ومنخفضة التكلفة كبديل للمواد الأكثر تكلفة مثل الفحم المنشط. تقدم هذه المواد، التي يتم الحصول عليها من مصادر طبيعية أو نفايات، مزايا كبيرة من حيث الجدوى الاقتصادية والتوافر والاستدامة البيئية. وقد ثبت فعالية هذه المواد في إزالة مجموعة متنوعة من الملوثات من المياه والهواء، مما يجعلها خياراً جذاباً للتطبيقات الصناعية والبيئية^{11،12}.

2.2. 1. المواد الطبيعية

أظهرت المواد الطبيعية، بما في ذلك المواد النباتية والمعادن، نتائج واعدة كمواد ممتازة منخفضة التكلفة، تتميز هذه المواد بتوفرها بسهولة، وغالباً بكميات كبيرة، ويمكن معالجتها بمتطلبات طاقة منخفضة. ومن الأمثلة على هذه المواد الطين، الرمال، الزيولايت الطبيعي، وكذلك المخلفات الزراعية التي تم استخدامها لامتزاز الملوثات مثل المعادن الثقيلة والأصبغ والمركبات العضوية^{13،14}.

2.2.2 المواد البيولوجية الممتازة

تعتبر المواد البيولوجية الممتازة، المشتقة من مصادر بيولوجية مثل الطحالب والفطريات والبكتيريا والمخلفات الزراعية، من الخيارات المميزة نظراً لطبيعتها الصديقة للبيئة وقابليتها للتحلل الحيوي. هذه المواد قادرة على امتزاز مجموعة واسعة من الملوثات، بما في ذلك المعادن والمركبات العضوية والمواد

الكيميائية السامة. يتيح استخدام المواد البيولوجية الممتزة اتباع نهج مستدام للتحكم في التلوث، حيث يمكن إنتاجها من موارد متجددة وغالباً ما تكون أكثر اقتصادية من المواد الممتزة التقليدية^{16,15}.

2.2.3. النفايات والمنتجات الثانوية من الزراعة والصناعة

تستخدم نفايات المواد الزراعية والصناعية بشكل متزايد كمواد ممتزة، مما يوفر حلاً مستداماً لإدارة النفايات والتحكم في التلوث. من المواد المستخدمة في ذلك قشور الفواكه، الأصداف، وكذلك المنتجات الثانوية الصناعية مثل رماد الفحم والرواسب، التي تم استخدامها بنجاح في امتصاص الملوثات من المياه والهواء. توفر هذه المواد المشتقة من النفايات بديلاً منخفض التكلفة للمواد الممتزة التجارية وتقلل من العبء البيئي المرتبط بالتخلص منها^{18,17}.

4. الملوثات ولاامتزاز

تعد عملية الامتزاز من أبرز التقنيات المستخدمة في معالجة الملوثات المائية، حيث أظهرت فعاليتها في إزالة مجموعة متنوعة من الملوثات. من أهم الملوثات التي يتم معالجتها باستخدام هذه التقنية هي المعادن الثقيلة مثل الزئبق، الرصاص، الكاديوم، النحاس، والكروم، التي تعتبر سامة وتضر بالبيئة والصحة العامة، وتتم إزالتها بواسطة المواد الممتزة مثل الفحم المنشط كما أن المركبات العضوية مثل المبيدات الحشرية، المذيبات العضوية، والمركبات البترولية، التي قد تلوث المياه الجوفية والسطحية، يمكن امتزازها وإزالتها باستخدام المواد الممتزة. تُستخدم أيضاً المواد الممتزة لمعالجة المياه الملوثة بالأصباغ الصناعية في صناعات النسيج والطباعة، حيث تمتاز الأصباغ بشكل فعال. إلى جانب ذلك، تساعد بعض المواد الممتزة في تقليل تركيز الغازات السامة مثل الأمونيا و ثاني أكسيد الكربون في المياه، مما يساهم في تنقيتها كما تُستخدم الممتزات لإزالة المركبات الفينولية السامة التي توجد في مياه الصرف الصناعي، مما يجعلها خياراً مثالياً لضمان توفير مياه نقية وصالحة للاستخدام^{20,19}.

5. اهم العوامل المؤثرة على الامتزاز

تتأثر عملية الامتزاز بعدد من العوامل التي تحدد فعاليتها وكفاءتها في إزالة الملوثات من السوائل أو الغازات. من أهم هذه العوامل نوع المادة الممتزة، حيث تختلف قدرة المواد الممتزة على امتصاص الملوثات حسب خصائصها الفيزيائية والكيميائية مثل المسامية و السطح الفعّال كذلك، تركيز الملوثات في الوسط المحيط يعد من العوامل الحاسمة؛ فكلما زاد تركيز الملوثات، زادت قدرة المواد الممتزة على الامتزاز حتى الوصول إلى حالة التوازن. درجة الحرارة لها دور كبير في زيادة أو تقليل كفاءة الامتزاز، حيث يمكن أن تؤدي زيادة درجات الحرارة إلى تسريع عملية الامتزاز في بعض الحالات. بالإضافة إلى ذلك، الرقم الهيدروجيني (pH) للوسط يعتبر عاملاً مؤثراً، حيث أن التفاعلات بين المادة الممتزة والملوثات تتغير بتغير الـ pH، مما يؤثر على قدرة الامتزاز. من العوامل الأخرى المهمة الوقت، حيث تحتاج بعض المواد الممتزة إلى فترات طويلة لتحقيق الامتزاز الكامل للملوثات. وأخيراً، الوجود المشترك لملوثات متعددة

في الوسط قد يؤثر على قدرة الممتزات على امتصاص كل ملوث بشكل منفصل، حيث يمكن أن يحدث تداخل بين الملوثات ويقلل من كفاءة العملية^{21,22}.

6. التحليلات الفيزيائية والكيميائية للممتزات

لدراسة الممتزات وتقييم فعاليتها في امتصاص الملوثات، يجب إجراء مجموعة من التحليلات الفيزيائية والكيميائية التي تساعد في فهم خصائصها وسلوكها. من التحليلات الفيزيائية الأساسية هي قياس المساحة السطحية (Surface Area) باستخدام طريقة (BET Method) حيث تُظهر هذه التحليلات مدى توفر السطح لامتزاز الملوثات كما يُقاس حجم المسام (Pore Volume) وتوزيع المسام (Pore Size Distribution) بالإضافة إلى استخدام تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) في دراسة الممتزات لتحديد التركيب البلوري للمادة الممتزة وهيكلها البلوري. يساعد هذا التحليل في فهم ترتيب الذرات أو الجزيئات داخل المادة الممتزة، مما يوفر معلومات قيمة حول المسامية، توزيع المسام، وحجمها. من خلال تحليل XRD، يمكن الكشف عن العناصر المعدنية أو المعادن الموجودة في الممتزات، مثل المعادن الطبيعية أو المواد المضافة التي قد تعزز قدرة الامتزاز و هو عامل حاسم في تحديد مدى فعاليتها في إزالة الملوثات. وبناءً على هذه المعلومات، يمكن تحسين تصميم المواد الممتزة للحصول على كفاءة أكبر في عمليات الامتزاز. أما بالنسبة للتحليلات الكيميائية، فإن تحليل التركيب الكيميائي للمادة الممتزة باستخدام تقنيات مثل التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء (FTIR) يساعد في تحديد الروابط الكيميائية والوظائف السطحية التي قد تؤثر على قدرة المادة في التفاعل مع الملوثات. بالإضافة إلى ذلك، يُجرى اختبار الرقم الهيدروجيني (pH) للوسط الذي يُستخدم فيه الممتز، حيث أن التفاعل بين المادة الممتزة والملوثات يتأثر بشكل كبير بتغيرات الـ pH. أيضاً يُستخدم تحليل الـ pH_{pzc} (Point of Zero Charge) هو قيمة الرقم الهيدروجيني التي يتساوى فيها الشحنات الموجبة والسالبة على سطح المادة الممتزة، pH_{pzc} لدراسة الخواص السطحية للممتزات، حيث يساعد في تحديد التفاعلات بين المادة الممتزة والملوثات في ظروف مختلفة من الرقم الهيدروجيني. عند تحديد pH_{pzc} للمادة الممتزة، يمكن التنبؤ بكيفية تفاعل المادة مع الأيونات الموجبة أو السالبة في المحاليل المائية تحت ظروف pH مختلفة. إذا كان الرقم الهيدروجيني للمحلول أقل من pH_{pzc}، فسيكون السطح ممتلئاً بشحنات سالبة، مما يساهم في جذب الأيونات الموجبة مثل المعادن الثقيلة. أما إذا كان الرقم الهيدروجيني أعلى من pH_{pzc}، فسيكون السطح ممتلئاً بشحنات موجبة، مما يساهم في جذب الأيونات السالبة مثل الأنيونات العضوية. يُستخدم هذا التحليل لتحديد فعالية الممتزات في إزالة الملوثات في نطاقات معينة من الرقم الهيدروجيني، مما يساعد في تحسين أداء عملية الامتزاز في التطبيقات البيئية والصناعية. كما يتم تحديد سعة الامتزاز (Adsorption Capacity) من خلال التجارب المخبرية لتحديد كمية الملوثات التي يمكن للممتز امتزازها عند توازن العملية. تساعد جميع هذه التحليلات في تحسين اختيار وتصميم المواد الممتزة المثلى لعمليات المعالجة البيئية والصناعية^{23,24}.

7. أهم الأنظمة المستخدمة في عملية الامتزاز

تتوزع الأنظمة المستخدمة في عملية الامتزاز وفقاً للملوثات المستهدفة وطبيعة المادة الممتزة. من أبرز الأنظمة المستخدمة أنظمة الامتزاز الثابت (Fixed-bed Adsorption Systems)، حيث يتم تمرير السائل أو الغاز الملوث عبر عمود أو حوض يحتوي على المادة الممتزة، وتتم عملية الامتزاز أثناء مرور الملوثات عبر المادة. هذا النظام شائع في معالجة المياه والصرف الصناعي. أما أنظمة الامتزاز الديناميكي (Dynamic Adsorption Systems)، فتستخدم في التطبيقات التي تتطلب معالجة مستمرة لكميات كبيرة من الملوثات، حيث يتم تحريك المادة الممتزة أو تدفق السائل الملوث بطريقة مستمرة لتحفيز التفاعل بين الملوثات والمادة الممتزة. بالإضافة إلى ذلك، هناك أنظمة الامتزاز باستخدام الأعمدة (Column Adsorption Systems)، وهي تعتمد على عمود يحتوي على مادة ممتزة يتم من خلاله تمرير السائل أو الغاز الملوث لإزالة الملوثات. تعتبر هذه الأنظمة فعالة في إزالة المعادن الثقيلة والمركبات العضوية. كما تُستخدم أنظمة الامتزاز باستخدام الأسطح السائلة (Liquid-Surface Adsorption Systems) في بعض التطبيقات، حيث يتم امتزاز الملوثات بواسطة الأسطح السائلة المحتوية على مادة ممتزة. من جهة أخرى، يعتمد النظام الحراري (Thermal Adsorption System) على تسخين المادة الممتزة لزيادة قدرتها على امتصاص الملوثات، مما يعزز من كفاءة العملية. وأخيراً، هناك أنظمة الامتزاز البيولوجي (Bio-adsorption Systems) التي تستخدم المواد البيولوجية مثل الكائنات الدقيقة أو المواد النباتية لامتزاز الملوثات، وبعد هذا النظام من الحلول المستدامة في معالجة الملوثات البيئية. تقدم هذه الأنظمة حلولاً متنوعة وفعالة في معالجة الملوثات بدءاً على خصائص المادة الممتزة والملوثات المراد إزالتها^{25,26}.

8. التجديد / إعادة التدوير للمواد الممتزة

تعد عملية تجديد المواد الممتزة من العمليات الحيوية التي تسهم بشكل كبير في تحسين كفاءة استخدامها وتقليل التكاليف البيئية والاقتصادية المرتبطة بعلاج الملوثات. فعندما تنتهي عملية الامتزاز وتستهلك المواد الممتزة في إزالة الملوثات من الغازات أو السوائل، تصبح الحاجة ملحة إلى تجديد هذه المواد لضمان قدرتها على العمل بكفاءة في العمليات المستقبلية. تساعد هذه العملية في تقليل النفايات الناتجة عن المواد الممتزة المستهلكة، مما يساهم في تعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية.

تتنوع الطرق المستخدمة في تجديد المواد الممتزة، ويختلف اختيار الطريقة المناسبة وفقاً لنوع الملوثات والمادة الممتزة. من أكثر الطرق شيوعاً هي استخدام الأحماض القوية مثل حمض النيتريك (HNO_3)، حيث تساعد هذه الأحماض على إزالة المعادن الثقيلة والملوثات غير العضوية من سطح المادة الممتزة عن طريق تفكيك الروابط بينها وبين الملوثات. كما تُستخدم القواعد القوية مثل هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) في تجديد الممتزات التي تحتوي على ملوثات عضوية، حيث تعمل هذه القواعد على

تفكيك الملوثات بفعالية. بالإضافة إلى ذلك، يُعد الإيثيلينديامين نترات أسيتات (EDTA) من العوامل المعقدة المستخدمة لإزالة المعادن الثقيلة، حيث يشكل معقدات مع هذه المعادن ويبسر إزالتها من المادة الممتزة.

كما يمكن تجديد الممتزات باستخدام المذيبات الخفيفة التي تعتبر من الطرق الفعّالة لتجديد المواد الممتزة المستهلكة. يتم ذلك عن طريق غسل الممتزات بمذيبات منخفضة القوة مثل الماء أو الكحوليات لإزالة الملوثات الممتزة. تساعد هذه الطريقة في استعادة قدرة الممتزات على الامتزاز دون الحاجة لاستخدام مواد كيميائية قوية، مما يجعلها خياراً اقتصادياً وصديقاً للبيئة. المذيبات الخفيفة تتفكك الملوثات العضوية والغير عضوية بسهولة، ما يعزز من فعالية المادة الممتزة ويطيل عمر استخدامها في المعالجة. من ناحية أخرى، يُعد التجديد الحراري من الخيارات الفعّالة لإعادة تنشيط الممتزات المستهلكة. في هذه العملية، يتم تسخين المادة الممتزة إلى درجات حرارة مرتفعة في بيئة خالية من الأوكسجين، مما يؤدي إلى تفكيك الملوثات العضوية والغازات المتطايرة التي تم امتزازها. يساعد هذا على إعادة قدرة الممتزات على الامتزاز، مما يطيل من عمر استخدامها. هذه الطريقة تعدّ فعّالة بشكل خاص في المواد التي تحتوي على ملوثات عضوية، وتساهم في تقليل التكاليف البيئية والاقتصادية عبر إعادة استخدام الممتزات في عمليات المعالجة المستقبلية.

على الرغم من الأهمية الكبيرة لتجديد الممتزات في معالجة الملوثات، إلا أن هناك بعض المساوئ التي قد تترافق هذه العملية. من أبرز هذه المساوئ هي التكاليف المرتفعة التي قد تتطلب استخدام مواد كيميائية أو معدات متخصصة، مما يزيد من التكاليف الإجمالية للعملية. كما أن فقدان الكفاءة مع تكرار عمليات التجديد يعد من العوامل المؤثرة، حيث يمكن أن تفقد الممتزات قدرتها على الامتزاز بمرور الوقت، مما يقلل من فعاليتها ويجعلها أقل كفاءة. بالإضافة إلى ذلك، قد تؤدي بعض عمليات التجديد مثل استخدام الأحماض أو القواعد القوية إلى تلوث بيئي في حال لم تتم معالجة الملوثات الثانوية الناتجة بشكل مناسب. التعقيد في الإجراءات أيضاً يعتبر من المساوئ، حيث تتطلب بعض الطرق مثل استخدام مذيبات قوية وقتاً طويلاً أو خطوات معقدة قد تكون غير عملية في بعض التطبيقات. وأخيراً، الاعتماد على المواد الكيميائية في بعض الأحيان قد يكون غير مستدام بيئياً، خاصة إذا تم استخدامها بشكل مفرط أو إذا لم تتم معالجتها بشكل آمن بعد العملية^{28:27}.

9. آلية الامتزاز

تتوزع آلية الامتزاز إلى نوعين رئيسيين: الامتزاز الفيزيائي و الامتزاز الكيميائي. في الامتزاز الفيزيائي، تلتصق الجزيئات السائلة أو الغازية على سطح المادة الممتزة بفعل القوى فاندر فالاس (Van der Waals) أو القوى الكهربائية، وهي تفاعلات ضعيفة، مما يجعل هذا النوع من الامتزاز قابلاً للعكس بسهولة. أما في الامتزاز الكيميائي، فيحدث تفاعل كيميائي بين الجزيئات الممتزة والمادة الممتزة، مما يؤدي إلى تكوين روابط قوية، مثل الروابط التساهمية أو الأيونية، ويجعل العملية غير قابلة للعكس بشكل

سهل. عند استخدام مواد ممتزة مثل الفحم المنشط أو المواد الطبيعية مثل النفايات الزراعية أو الصناعية، يمكن أن يعتمد الامتزاز على خصائص سطح المادة الممتزة، مثل المسامية، المساحة السطحية، وشحنة السطح^{30,29}.

الخلاصة:

تعتبر عملية الامتزاز من التقنيات الفعّالة في معالجة الملوثات المائية والهواء، وتتميز باستخدام المواد الممتزة منخفضة التكلفة، مثل الفحم المنشط، والطين، التي تساهم في إزالة مجموعة واسعة من الملوثات مثل المعادن الثقيلة، المركبات العضوية، الأصباغ، والغازات السامة. تمثل المواد الممتزة المستخلصة من المصادر الطبيعية والنفايات الزراعية والصناعية خياراً مستداماً وفعالاً اقتصادياً لمعالجة التلوث وتقليل الأثر البيئي. وقد ثبت أن المواد البيولوجية الممتزة تقدم حلاً مبتكرة وصديقة للبيئة في معالجة الملوثات.

تتأثر عملية الامتزاز بعدد من العوامل مثل نوع المادة الممتزة، تركيز الملوثات، درجة الحرارة، pH الوسط، والوقت، وهي عوامل حاسمة في تحديد كفاءة العملية. كما أن هناك أنظمة متنوعة لعملية الامتزاز مثل أنظمة الامتزاز الثابتة والديناميكية التي تُستخدم حسب نوع الملوثات وخصائص المواد الممتزة.

أحد الجوانب المهمة هو تجديد المواد الممتزة، التي يتم من خلال استخدام تقنيات مثل الأحماض القوية، القواعد، المذيبات الخفيفة، والتجديد الحراري. على الرغم من فوائد هذه العمليات في تقليل التكاليف البيئية والاقتصادية، إلا أن هناك بعض المساوئ مثل التكاليف العالية وفقدان الكفاءة مع تكرار العمليات. بناءً على ذلك، يمثل استخدام المواد الممتزة منخفضة التكلفة حلاً مستداماً وفعالاً في معالجة الملوثات، مما يساهم في حماية البيئة وتحقيق استدامة اقتصادية في الصناعات والمجتمعات.

Références

- 1-Al-Degs, Y. S., et al. (2009). Removal of organic pollutants from water using low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 1332-1340.
- 2-Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2324.
- 3- Murthy, G. N., & Sahu, U. K. (2025). Methylene blue dye removal from aqueous solution using activated carbon prepared from corn cob stem: Kinetics, isotherms, and mechanism studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 104789.
- 4- Mazher, F., Ghaffar, A., Arooj, A., & Iqbal, M. (2025). Biosorption of heavy metals from contaminated soil using rice straw: A comprehensive study. *Chemosphere*, 375, 144252.
- 5 -Alawa, B., Singh, S., Chakma, S., Kishor, R., Lundborg, C. S., & Diwan, V. (2024). Development of novel biochar adsorbent using agricultural waste biomass for enhanced removal of ciprofloxacin from water: Insights into the isotherm, kinetics, and thermodynamic analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 127818.
- 6-Mohan, D., & Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents – A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 1-53.
- 7-Ayub, M. A. S., et al. (2022). Removal of pollutants from wastewater using agricultural wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 4615-4633.
- 8-Sohi, S. P., et al. (2010). Biochar and its application to the management of contaminated water and air. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1-3), 1-12.
- 9-Ghosh, M. K., & Ng, W. J. (2000). Effect of surface chemistry of activated carbon on its adsorption capacity. *Journal of Environmental Engineering*, 126(9), 797-803.
- 10-Figueiredo, J. L., & Ferreira, M. (2001). Surface properties of activated carbons. *Carbon*, 39(2), 445-453.
- 11- Shukla, S. S., & Wang, J. (2002). Adsorption of lead and copper from aqueous solutions using activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 92(1-2), 31-39.
- 12-Vasudevan, S., & Ramasamy, P. (2015). Sustainable adsorbents for the removal of contaminants from aqueous systems. *Environmental Chemistry Letters*, 13(4), 575-585.
- 13- Singh, A. K., & Thakur, M. (2016). Natural adsorbents for water treatment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), 8863-8880.
- 14-Chen, J., & Zhang, Z. (2018). The use of zeolite and clay in environmental remediation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(2), 415-426.
- 15-Volesky, B. (2007). Bioadsorption and biosorption processes. In *Biosorption of Heavy Metals* (pp. 13-31). Springer.
- 16- Gupta, V. K., & Ali, I. (2004). Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as adsorbents for the removal of heavy metals. In *Waste Materials in Advanced Materials* (pp. 147-170). Springer.
- 17-Moussavi, G., & Moussavi, M. (2009). Utilization of industrial waste and agricultural residues as adsorbents for removal of pollutants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 238-243.
- 18-El-Hendawy, A. A., & Allam, S. (2015). Use of agricultural waste for heavy metal removal: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14), 10607-10620.

- 19-Zhang, J., & Chen, H. (2013). Removal of heavy metals from aqueous solutions by adsorption: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6), 4382-4398.
- 20-Alharbi, O. H., & Khan, M. A. (2019). Adsorption of heavy metals and organic pollutants from wastewater using biosorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103119.
- 21- Zhu, L., & Zhang, W. (2016). Factors affecting adsorption of heavy metals by activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 45(1), 41-52.
- 22- Sharma, P., & Bhattacharyya, D. (2019). Effect of temperature, pH, and contact time on the adsorption of pollutants from aqueous solution. *Journal of Environmental Engineering*, 145(3), 04018093.
- 23-Singh, N., & Pant, D. (2019). Characterization and analysis of adsorbents: Techniques and applications. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100346.
- 24-Koh, H. L., & Lim, Y. P. (2003). Characterization of adsorbent materials: Surface area, porosity, and functional group analysis. *Journal of Applied Surface Science*, 227(1-4), 58-67.
- 25-Goswami, M., & Das, D. (2015). Fixed bed adsorption system for environmental pollutants removal: Design and modeling. *Chemical Engineering Journal*, 278, 198-209.
- 26-Sahu, O., & Bhunia, B. (2012). Dynamic adsorption systems: A review of application and design. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(4), 577-586.
- 27- Jahan, M. S., & Amin, S. M. (2017). Regeneration of adsorbents in wastewater treatment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 15(4), 589-602.
- 28-Chakraborty, M., & Bhattacharya, S. (2020). Regeneration of adsorbents: Techniques, challenges, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 258, 109926.
- 29-Mckay, G., & Ho, Y. S. (1999). The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sorbents. *Process Safety and Environmental Protection*, 77(1), 43-49.
- 30-Baker, D., & Hixson, M. (2017). *Environmental Applications of Activated Carbon for Removal of Pollutants from Water and Air*. *Environmental Chemistry*, 14(4), 1-11.