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 الطالبتين:

قدار هديل

بوعنان هيبة الرحمان

الموضوع

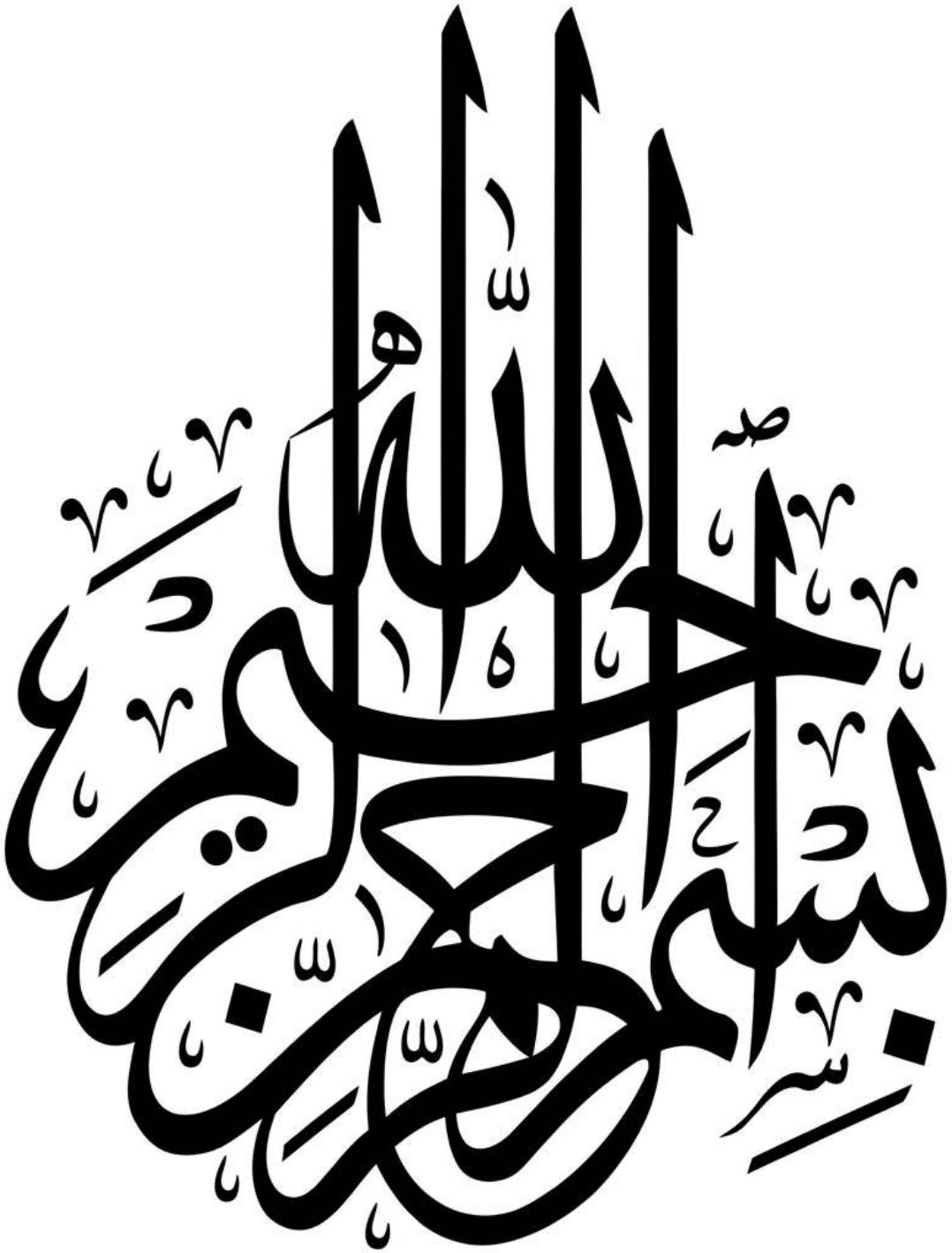
معالجة المياه بالالكتروكوقيليشن: دراسة كهروكيميائية

نـــــوقـــشـت فـــي: 13/06/2026

أمام لـــــجنـــة المـنـاقـشـة:

د. رواحنة نور الدين	أستاذ محاضر	رئيسا	جامعة الوادي
د. بن عمارة حسن	أستاذ	مناقش	جامعة الوادي
د. شعبية ناصر	أستاذ محاضر	مشرف ومقررا	جامعة الوادي

الموسم الجامعي:2026/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

الإهداء:

﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

الحمدُ للهِ الذي يسَّر لنا البدايات، وبلَّغنا النهايات بفضله وكرمه، وما تحقَّقت الغاياتُ إلا بتوفيقه.

﴿وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا﴾

إلى فقيدة روحي جدتي العزيزة: مسعودة بوحامد

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامهم إلى سندي وقوتي بعد الله فخري واعتزازي, والديا مهم عبرتمن كلمات لن أوفي حقكما الكبير علي, شكرا لكما على كل تضحية ودعم وحب أسال الله أن يحفظكما ويبارك لي فيكما ويجزيكم خير الجزاء.

إلى عزوتي ومن شديت بهم عضدي ونعمة الله التي منحني إياها أخواتي أسال الله أن يدفع عنكم كل سوء ويرزقكم الصحة والعافية ويديم محبتنا.

إلى من وقفوا بجانبي في هذا الرحلة إلى صديقتي رانيا وشريكة الفرح والذكريات وأصدقاءالسنين إلى من هون الدرب وطول الطريق ولكل روح عانقتني بالحب والدعوات ومن استندت عليهم ولكل من علمني كلمة أو حرفا شكرا لكم.

فرحة الوصول ولذة الإنجاز الطموح اليوم طويت الصفحة الأخيرة من مسيرتي الدراسية, هذه اللحظة لا تورب ولا تشترى لقد دفعت ثمنها عمري ودموعي وصبري وسهري ومثابرتي.

اللهم لا تجعله أخر عهدي من العلم واجعلها خير بداية لطريق أعظم بحولك وقوتك

اللهم بارك لنا في علمنا وانفعنا بما علمتنا وأنفع به عبادك.

قدار هديل

الإهداء

من قال أنا لها " نالها "

وأنا لها، إن أَبَتْ، رغماً عنها أتيتُ بها.

. لم تكن الرحلة قصيرة، ولا ينبغي لها أن تكون. ولم يكن الحلم قريبًا، ولا كان الطريق محفوفًا بالتسهيلات، لكنني فعلتُها ونلتُها.

وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَن الحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ العَالَمِينَ. أصابت سهامنا هذه المرة ولم تُخطئ، ولَمَعَت أَعيننا من فرط الانتصار

كُتِبَ في نهاية سطورنا أننا نلنا ما صَبَرنا لأجله، فالحمد لله حبًا وشكرًا وامتنانا.

2026

إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل... منذ صغري، كنت أنت السند الذي لا يميل، واليد التي تمسك بيدي لتضعني على أول الطريق, من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحه العلم والمعرفة داعمي الاول في مسيرتي وسندي وقوتي وملاذي بعد الله.... إلى فخري واعتزازي "ابي"

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضنني قلبا قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي

"امي" إلى من أكرمني وأعزني, إلى مَن قيل فيهم: {سَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ}, إخوتي، لم أصل لولا دعمكم وعطاؤكم بلا مقابل. فأنتم قوتي وملاذي بعد الله، أدامكم الله ضلعا ثابتا لي.

وأخيرا، ما بَيْنَ الصَّبرِ والعِوض، أشكر نفسي على الصبر, فقد كانت أهلا للمصاعب، وكان فضل الله عليها عظيمًا، وعوضه يَليقُ بعِزَّتِه وجلاله.

وها أنا أختم كل ما مررت به فالحمدُ للهِ مِن قَبْلُ ومِن بعد، راجيا من الله تعالى أن يَنفَعَني بما عَلَّمَني، وأن يُعلِّمَني ما أجهل، ويجعلها حُجَةً لي لا عليا.

B.H

الشكر والعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى **الأستاذ شعبية ناصر** على إشرافه القيم، وتوجيهاته السديدة، ومتابعته المستمرة طوال مراحل إنجاز هذه المذكرة، وعلى ما قدمه من نصائح علمية ومنهجية كان لها الأثر الكبير في إتمام هذا العمل.

كما أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى **الأستاذ المساعد** على دعمه ومرافقته وتقديمه للمساعدة والتوجيه كلما دعت الحاجة، مما ساهم في إنجاز هذه الدراسة في أحسن الظروف.

وأتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى السادة أعضاء لجنة المناقشة لتفضلهم بقبول مناقشة هذه المذكرة.

كما أتوجه بالشكر إلى مخبر كلية العلوم الدقيقة الذي احتضن الجانب التطبيقي لهذه الدراسة، وإلى جميع الأساتذة والباحثين والعاملين به على ما قدموه من تسهيلات وإمكانيات علمية وتقنية ساعدت على إنجاز هذا العمل.

LABORATORY

مخبر الكيمياء التطبيقية والبيئة

الملخص

Résume:

Cette étude vise à évaluer l'efficacité de la technique d'électrocoagulation pour le traitement des eaux contaminées par le colorant bleu de méthylène (BM) à l'aide d'électrodes en aluminium (Al). Les résultats expérimentaux ont démontré que les paramètres opératoires, notamment l'intensité du courant électrique, le temps de traitement, le pH et la nature de l'électrolyte, influencent de manière significative l'efficacité du traitement. Le rendement d'élimination a atteint 97 % pour le chlorure de sodium (NaCl), contre 88 % pour le sulfate de sodium (Na_2SO_4), ce qui s'explique par la conductivité électrique plus élevée des ions chlorure et leur rôle dans la promotion de la dissolution anodique de l'aluminium. En conclusion, cette étude démontre que l'électrocoagulation constitue une technique efficace et écologiquement durable pour le traitement des eaux industrielles contaminées par les colorants.

Mots-clés : Électrocoagulation, Traitement des eaux, Bleu de méthylène, Électrodes en aluminium, Chlorure de sodium, Sulfate de sodium.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم فعالية تقنية التخثير الكهربائي في معالجة المياه الملوثة بصبغة أزرق الميثيلين (BM) باستخدام أقطاب الألومنيوم (Al). حيث أظهرت النتائج أن العوامل التشغيلية مثل شدة التيار الكهربائي، زمن المعالجة، نوع الإلكتروليت، الأس الهيدروجيني تؤثر على كفاءة المعالجة والمردود، ومنه نستنتج أن تقنية التخثير الكهربائي تعد خيارا فعالا وصديقا للبيئة في معالجة المياه الملوثة بالأصباغ.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه، التخثير الكهربائي، الدراسة الكهروكيميائية، أزرق الميثيلين، أقطاب الألومنيوم، المياه الملوثة.

جدول المحتويات

الفهرس

الإهداء..... I
الشكر والعرفان... III
الملخص..... IV
جدول المحتويات..... VI
الفهرس VII
قائمة الأشكال XI
قائمة الجداول XIII
قائمة الاختصارات..... XIV
المقدمة العامة... 1

الفصل الأول: تلوث المياه والأصباغ العضوية

تمهيد..... 5
I.1. تعريف المياه وأهميتها 5
I.2. تعريف تلوث المياه 5
I.3. مصادر تلوث المياه..... 6
I.4. أنواع تلوث المياه 6
I.4.1. التلوث الكيميائي..... 7
I.4.2. التلوث الحراري..... 7
I.4.3. التلوث البيولوجي 7
I.4.4. التلوث الفيزيائي (الطبيعي) 7
I.5. تعريف معالجة المياه 8

I.6. طرق معالجة المياه 8
I.6.1. المعالجة الفيزيائية 8
I.6.2. المعالجة الكيميائية 9
I.6.3. المعالجة الالبيولوجية 9
I.6.4. معالجة كهروكيميائية 10
I.7. الأصباغ العضوية 11
I.7.1. تعريف 11
I.7.2. تصنيف الأصباغ 11
I.7.2.1. التصنيف الكيميائي 11
I.7.2.2. حسب تطبيقها 12
I.7.3. أنواع الأصبغة 13
I.7.3.1. الأصباغ الطبيعية 13
I.7.3.2. الأصباغ الاصطناعية 13
I.7.4. دراسة صبغة أزرق الميثيلين (BM) 13
I.7.4.1. تعريف 13
I.7.4.2. خصائص الفيزيائية والكيمائية 14
I.7.4.3. استعمالات الميثيلين الأزرق 14

الفصل الثاني: التخثير الكهربائي والجزء التجريبي

تمهيد 17
II.1. التخثير الكهربائي (Electrocoagulation) 17
II.1.1. نبذة تاريخية 17

2.1.II. تعريف تقنية التخثير الكهربائي 18
3.1.II. مبدأ عمل تقنية التخثير الكهربائي 18
4.1.II. القوانين الأساسية للتحليل الكهربائي 19
5.1.II. العوامل المؤثرة على كفاءة عملية التخثير الكهربائي EC 21
1.5.1.II. تأثير مادة القطب الكهربائي 21
2.5.1.II. تأثير الرقم الهيدروجيني 21
3.5.1.II. تأثير شدة التيار الكهربائي 22
4.5.1.II. تأثير الألكتروليت الداعم 22
6.1.II. مزايا والعيوب تقنية التخثير الكهربائي 24
7.1.II. تطبيقات التخثر الكهربائي 24
2.II. الجزء التجريبي 25
1.2.II. المواد الكيميائية والأجهزة المستعملة 25
2.2.II. وصف الخلية التحليلية 28
2.2.II. تحضير المحاليل 29
3.2.II. تحديد طول الموجة الأقصى للامتصاص λ_{max} 32
4.2.II. المعالجة الرياضية 32

الفصل الثالث: النتائج التجريبية ومناقشة

تمهيد 35
1.III. دراسة تحليلة أزرق الميثيلين 35
1.1.III. تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين بدلالة الزمن 35
2.III. تغير الامتصاصية بدلالة الزمن 43

3.III. تغير المردودية بدلالة الزمن 48

4.III. دراسة الحركية 53

5.III. دراسة تأثير نوع الإلكتروليت 57

1.5.III. تأثير $Na2SO4$ 57

2.5.III. تأثير $NaCl-$ 58

2.5.III. تأثير مسافة بين الأقطاب 58

الخاتمة العامة... 59

قائمة المراجع..... 61

الملاحق..... 69

قائمة الأشكال

الشكل I–1: صورة تلوث المياه.....6
الشكل I–2: بنية الكيميائية للأزرق الميثيلين. 14
الشكل II–1: مبدأ عملية التخثير الكهربائي بإستعمال أقطاب الألمنيوم. 19
الشكل II–2: الأقطاب الألومنيوم المستعملة قبل التشغيل. 28
الشكل II–3: تركيب تجريبي لنظام كهروكيميائي للقطبين. 29
الشكل II–4: تحضير محلول أزرق الميثيلين. 30
الشكل II–5: تحضير محلول كبريتات الصوديوم إلكتروليتي داعم $(Na2SO4)$. 30
الشكل II–6: تحضير محلول كلوريد الصوديوم إلكتروليتي داعم $(NaCl-)$. 31
الشكل II–7: طيف الامتصاص للأزرق الميثيلين المحصل عليه بواسطة (UV-VIS). 32
الشكل III–1: تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن....35
الشكل III–2: تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن. 37
الشكل III–3: تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن.....38
الشكل III–4: تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن. 40
الشكل III–5: تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن. 41
الشكل III–6: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة زمن.....43
الشكل III–7: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود كلوريد الصوديوم بدلالة زمن.....44
الشكل III–8: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين (C،B،A) في وجود كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة زمن.....45
الشكل III–9: تغير الامتصاصية للأزرق الميثلين في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز بدلالة زمن. ...46
الشكل III–10: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين في وجود كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة زمن.....47
الشكل III–11: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن معالجة.....48
الشكل III–12: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن المعالجة. 49
الشكل III–13: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن المعالجة. 50

الشكل III–14: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن المعالجة. 51
الشكل III–15: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن المعالجة. 52
الشكل III–16: تطور قيمة $LN(C0/Ct)$ في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن. 53
الشكل III–17: تطور قيمة $LN(C0/Ct)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن. 54
الشكل III–18: تطور قيمة $LN(C0/Ct)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف. 55
الشكل III–19: تطور قيمة $LN(C0/Ct)$ في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن 56
الشكل III–20: تطور قيمة $LN(C0/Ct)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن. 57

قائمة الجداول

الجدول I–1: تصنيف الكيميائي للأصباغ. 11

الجدول I –2: مجموعة من الأصباغ المصنفة وفقا استخدامها أو تطبيقها. 13

الجدول I–3: خصائص الفيزيائية والكيميائية للأزرق الميثيلين. 14

الجدول II–1: المواد الكيميائية. 25

الجدول II–2: الأجهزة. 26

الجدول II–3: الأدوات المخبرية. 27

الجدول III–1: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(A ،B،C) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن..35

الجدول III–2: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين (A ،B،C) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن. 36

الجدول III–3: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين (A،B،C) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن..... 38

الجدول III–4: قيم التركيز المتبقي للأزرق في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن..... 39

الجدول III–5: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن. 41

قائمة الاختصارات

الاختصارات	التسمية باللغة الفرنسية	التسمية باللغة العربية
CI Name	Nom de Colour lndex	نظام التسمية
BM	Bleu de mèthylène	أزرق الميثيلين
λ_{max}	Longueur d'onde maximale	طول الموجة الأعظمي
EC	Électrocoagulation	تقنية التخثر الكهربائي
DCO	Demand Chimique en Oxygène	الطلب الكيمائي للأكسجين
DBO	Demande Biologique en Oxygène	الطلب البيولوجي الأكسجين
COT	Carbone Organique Total	الكربون العضوي الكلي
MES	Matières en Suspension	الركام المعلق
ABS	absorbance de sortie	تصبغ المرتبط بامتصاصية المخرج
TDS	Matières solides dissoutes totals	معدل المواد الصلبة الذائبة
TAC	Titre Alcalimètrique Complet	عنوان القلوية الكامل
TS	Matières Solides totals	المواد الصلبة الكلية
pH	potentiel hydrogène	الأس الهيدروجيني
PK_a	Logarithme dècimal negative de la constant de dissociation (Ka)	اللوغريتم العشري السالب لثابت التفكك الحمضي
UV-Vis	Spectroscopie ultraviolet- visible (UV-Visible)	مطيافية الأشعة المرئية وفوق البنفسجية
$(Na_2SO_4^{2-})$	Sulfate de Sodium	كبريتات الصوديوم
$(NaCl^-)$	Chlarure de sodium	كلوريد الصوديوم
R(%)	Rendement d'èlimination	نسبة الإزالة

المقدمة العامة

يشكل الماء الموارد الطبيعي الأكثر حيوية لاستمرار الكائنات الحية والحفاظ على التوازن البيئي، فهو الركيزة الأساسية للحياة وعصبها الجوهري، ونعمة إلهية كبرى تضمن بقاء واستدامة الأنظمة الحيوية على وجه الأرض، ويثبت ذلك في قوله تعالى: {وجعلنا من الماء كل شيء حي أفلا يومنون}. [الأنبياء:30]. (1)

يشهد العالم في الوقت الحاضر تزايد ملحوظ في مشكلة تلوث المياه، وذلك نتيجة لتطور الثورة الصناعية بسبب تصريف المياه الصناعية المحملة بالمواد الكيميائية الناتجة عن الأنشطة البشرية. وتستخدم هذه المواد الكيميائية في العديد من الصناعات، مثل صناعة المنظفات والأدوية ومستحضرات التجميل، إضافة إلى استعمالها في المجال الزراعي وغيرها من التطبيقات المختلفة. ونظرا لاحتواء هذه المياه على تراكيز مرتفعة من الملوثات الكيميائية، كالأصباغ المستعملة في صناعة النسيج، فإنها تنتشر على نطاق واسع وتساهم بشكل كبير في تلوث المسطحات المائية، مما يجعلها مصدرا رئيسيا للتلوث البيئي. (2) (3)

تصنف الأصباغ الصناعية ضمن أعقد الملوثات البيئية وأكثرها تأثيرا على الأوساط المائية، ويعود ذلك أساسا إلى الحجم الهائل من المياه الصناعية المستهلكة في العمليات الإنتاجية والتي تطرح لاحقا كمياه صناعية محملة بهذه المركبات. وتشير الإحصائيات العلمية إلى أن الحجم العالمي لإنتاج الأصباغ يقرب سبعمائة ألف طن سنويا، وتحتل الملونات العضوية بنوعيها الطبيعي والاصطناعي الصدارة من حيث الاستخدام والشيوع في هذا القطاع نظرا لثباتها وخصائصها التركيبية. (4)

في الآونة الأخيرة، تم اقتراح العديد من التقنيات لمعالجة المياه الصناعية بهدف إعادة استخدامها، مع التركيز بشكل خاص على تقليل النفايات الناتجة عن عمليات المعالجة، من خلال تحسين كفاءة العمليات واسترجاع المواد الناتجة وغيرها من الأساليب. كما تهدف هذه التقنيات إلى معالجة النفايات الخطرة الناتجة عن بعض الصناعات، مثل صناعات المعالجة السطحية وتفكيك المذيبات العضوية وغيرها. وتعتمد بعض هذه العمليات على الدمج بين الكيمياء والكهرباء، وتُعرف بالتقنيات الكهروكيميائية. وعلى الرغم من وجود تطبيقات معروفة لهذه التقنيات في مجال معالجة المياه، فإن الأبحاث الحديثة ساهمت في توسيع مجالات استخدامها بشكل كبير، مع ظهور آفاق مستقبلية واعدة في هذا المجال. (5)

تصنف تقنية التخثير الكهربائي (Electrocoagulation) كإحدى العمليات الكهروكيميائية المتقدمة والمستخدمة في معالجة المياه الصرف الصحي والصناعي من مختلف الملوثات كالأصباغ العضوية. وفي

هذا السياق تبرز المشكلة في مدى قدرة هذه التقنية على تحقيق فعالية عالية في إزالة الملوثات من المياه، وكذا تحديدا الظروف التشغيلية المثلى التي تسمح برفع كفاءة المعالجة وتحسين مردودها.

ولتحقيق الأهداف هذه الدراسة، تم تنظيم هذا العمل في ثلاثة فصول متكاملة:

- ✓ **الفصل الأول**: عموميات حول تلوث المياه والأصباغ.
- ✓ **الفصل الثاني**: ينقسم إلى جزأين: يخصص الجزء الأول أهم المفاهيم والمبادئ الأساسية حول تقنية التخثير الكهربائي بينما الجزء الثاني لتقديم المواد والطرق المستعملة.
- ✓ **الفصل الثالث:** النتائج التجريبية المتحصل عليها ومناقشتها.

الفصل الأول

تلوث المياه والأصباغ العضوية

تمهيد:

يعد الماء عنصر ضروري للحياة، غير أنه أصبح الحفاظ عليه أمر أكثر صعوبة مع تلوث المتزايد بسبب الأنشطة البشرية والصناعية مما يؤدي إلى أحداث أضرار بالبيئة وصحة الأنسان. ينقسم تلوث المياه إلى عدة أنواع بما في ذلك تلوث المياه تلوث الكيميائي، التلوث الفيزيائي، التلوث البيولوجي. فضلا عن التلوث المادي المرتبط بتراكم النفايات الصلبة. ضمن الملوثات الكيميائية الأكثر انتشار هي الأصباغ الصناعية المستخدمة على نطاق واسع في مختلف الصناعات والمسؤولين عن تدهور نوعية المياه وتدهورها النظم البيئية. تم إطلاق تحذيرات دولية حول المخاطر التي تهدد أنظمة البيئية ومجتمع، مما يبرز الحاجة الماسة للحفاظ على هذا المورد الثمين الأجيال القادمة. (6)

1.I. تعريف المياه وأهميتها:

بما أن الماء هو أكثر مذيب عرفناه وتحديدا لامتلاكه قطبية كيميائية عالية، فإن أهميته الصناعية تكمن في كونه الوسط المثالي لحمل وتسهيل التفاعلات الكيميائية. فهو القادر على إذابة وتفكيك كميات من جميع المواد الكيميائية والأملاح والأصباغ، مما يجعله عنصرا لا غنى عنه في صناعات النسيج، والجلود والمستحضرات الكيميائية. (7)

أن المياه النقية تماما غير موجودة في الطبيعة بسبب شراهتها لإذابة الشوائب (حتى الزجاج والمعادن تذوب فيها بنسب ضئيلة)، تعني أن فصل الملوثات عن جزيئات H_2O بالطرق التقليدية أمر غاية في الصعوبة. ومن هنا تبرز الأهمية العلمية والعملية لتطوير تقنيات معالجة كهروكيميائية متطورة (مثل التخثير الكهربائي) لكسر هذه الروابط القوية وفصل المواد الذائبة والعالقة. (8)

2.I. تعريف تلوث المياه:

هو أي تغيير فيزيائي أو كيميائي يطرأ على جودة المياه، سواء بشكل مباشر أو غير مباشر. والذي يؤدي إلى تغير يضر بالكائنات الحية، أو يجعل الماء غير صالح للاستخدامات مطلوبة. وتلوث الماء يؤثر بقوة على حياة الفرد وعلى الأسرة وعلى المجتمع لأن الماء يعتبر حاجة أساسية جداً للإنسان ولكل المخلوقات الحية. لدرجة أن الماء الملوث قد يصبح السبب الرئيسي في إنهاء الحياة على الأرض. (9)

كما يمكن تعريف تلوث المياه هو اختلاط المياه الطبيعية (المياه الجوفية البحيرات والأنهارو المحيطات) بالمواد ناتجة عن الأنشطة المختلفة للإنسان (صناعية وزراعية) مؤديا إلى إطلاق مواد سامة مثل المواد الكيميائية أو العضوية أو الكائنات الحية الدقيقة الممرضة، قد يشمل تلوث المياه إنتشار

الطاقة، في شكل نشاط إشعاعي أو حرارة، في المسطحات المائية مما يؤدي إلى إختلال التوازن البيئي.(10)

الشكل **I–1:** صورة تلوث المياه

3.I. مصادر تلوث المياه (11) (12):

هناك عديد من المصادر التي تؤدي إلى تخريب الموارد المائية وتؤثر جودة المياه ويمكن تقسيمها إلى:

- **مصادر طبيعية:** تشمل الجو، المعادن الذائبة، تحلل المواد النباتية، والجريان السطحي للأملاح والكمياويات والزلازل والبراكين.
- **مصادر زراعية:** وتشمل الانجراف المائي للتربة، مخلفات حيوانية (مزارع الانتاج الحيواني والدواجن، أسمدة كيمياوية ومبيدات، مياه الري).
- **مياه الصرف:** وتشمل الصرف الصحي والصرف الصناعي، مركبات البحرية والحوادث البحرية.
- **مصادر أخرى مثل:** أنشطة البناء والمناجم المياه تحت الأرض الجوفي وأماكن تجمع القمامة، أماكن إنتاج الإسمنت .... إلخ.

4.I. أنواع تلوث المياه

ويمكن تقسيم أنواع التلوث إلى:

I.4.1. التلوث الكيميائي:

وينتج هذا النوع من التلوث عن وجود كميات زائدة من الأملاح الذائبة والأحماض الفلوريدات والمعادن والمواد العضوية والأسمدة والمبيدات الحشرية. المعادن قابلة للذوبان في الغالب في الماء إلى حد ما، بما في ذلك بعض المواد السامة، مثل الباريوم والكادميوم والرصاص والزئبق. (13)

I.4.2. التلوث الحراري:

عادة يحدث عند تواجد محطات توليد الطاقة الكهربائية والمصانع التي تستخدم الماء للتبريد، إذا تضيف هذه المنشات إلى المسطحات المائية ماء ذا درجة حرارة مرتفعة، وهو ما يسبب في كثير من الأحيان أضرار للحياة النباتية والحيوانية أكثر مما تسببه المواد الملوثة التي تقذفها المصانع ذاتها، فكل زيادة عن درجة الحرارة الطبيعية في الكتل المائية تخل بالتوازن الطبيعي. (14)

I.4.3. التلوث البيولوجي:

وينتج هذا التلوث عن ازدياد الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض مثل: البيكتريا والطفيليات والفيروسات والطحالب في المياه وتنتج عن هذه الملوثات في الغالب عن اختلاط فضلات الإنسان والحيوان بالماء بطريقة مباشرة، عن طريق صرفها مباشرة، في مسطحات المياه العذبة أو المالحة أو عن طريق غير مباشر عن اختلاطها بماء صرف الصحي أو زراعي ويؤدي وجود هذا النوع من التلوث، إلى الإصابة بالعديد من الأمراض. (15)

I.4.4. التلوث الفيزيائي (الطبيعي):

وينتج عنه تغيير المواصفات القياسية للماء عن طريق تغير درجة حرارته أو ملوحة أو ازدياد المواد العالقة به، سواء كانت من أصل عضوي أو غير عضوي. وينتج عن ازدياد ملوحة الماء غالبا عن ازدياد كمية التبخر الماء البحيرة أو الأنهار في الأماكن الجافة دون تجديد لها. كما أن التلوث الفيزيائي الناتج عن ارتفاع درجة الحرارة يكون في غالب الأحوال نتيجة صب مياه تبريد المصانع والمفاعلات النووية بالقرب من المسطاحات المائية أوفيها، مما ينتج عنه ازدياد درجة الحرارة ونقص الأكسجين، وهذا ما يؤدي إلى موت الكائنات الحية في هذه الأماكن. (16) (17)

5.I. تعريف معالجة المياه:

هي العمليات والتقنيات المتوفرة لتقنية المياه الملوثة وطرقها عديدة ومتنوعة ومصنفة للغاية. الهدف الاساسي لمعالجة المياه هو ضمان حماية المستهلك منها الكائنات الحية المسببة للأمراض الضارة بالصحة. (18) (19)

6.I. طرق معالجة المياه:

يتم إجراء معالجة المياه الملوثة وفق عمليات فيزيائية، وكيميائية، وبيولوجية، يحدث فيها إزلة المواد الصلبة والمركبات العضوية والغير عضوية الموجودة في المياه وذلك من اجل ضمان حصول على تنقية المياه وفقا للمعاير. ويمكن أن تختلف هذا تقنيات باختلاف ماهية الملوثات الموجودة داخلل الوسط المائي. تتمثل طرق المعالجة في:

1.6.I. المعالجة الفيزيائية:

وهي أول مراحل إستخدام في المعالجة المياه حيث تعتمد على قوى الطبيعية والفيزيائية وتضم عديد من عمليات أهمها الغريلة، الترشيح، الترسيب. (20)

- **الغربلة:** تعمل هذا المرحلة على تنقية المياه بإعتماد على المبادئ الفيزيائية وذلك من أجل تخليص المياه من النفايات الضخمة الحجم أولا والتي تعتبر غالبا من مواد الصلبة الغير قابلة للتفكك وتحلل الحيوي فتمر عبر شبكة تتكون من حواجز المعدنية العمودية أو المقوسة أو المنحنية والتي تسمى بالسياج القضباني. (21) (12)

- **الترشيح:** الترشيح هو عملية فصل يتم من خلالها تمرير خليط صلب– سائل عن طريق مسامي (مرشح) يمنع مرور جزيئات صلبة ويسمح بمرور السائل فقط. (22)

- **الترسيب:** الهدف من العملية ترسيب هو ترسيب بكمية كبيرة ممكنة من مواد العالقة عن طريق الجاذبية وتنتقل هذا المياه عبر أحواض ترسيب أولية كما يتيح هذا الترسيب بفصل 50% من مكونات الصلبة للمياه الصرف و40%–60% من الجزيئات الثقيلة الصلبة. (21)

2.6.I. المعالجة الكيميائية:

وتتمثل طرق معالجة الكيميائية في إضافة المواد كيمائية والتي تساهم على حدوث تفاعلات كيميائية بهدف إزالة أو تحويل الملوثات إلى مواد يسهل عزلها عن بعضها، وتوجد العديد من عمليات للقيام بمعالجة الكيميائية كالترسيب الكيمائي، الأكسدة الكيميائية، التحليل الكهربائي، وكذالك إضافة كلور للمياه الملوثة ومن أبرزها التخثرو التلبد، الأكسدة الكيميائية. (23) (24) (25)

- **التخثيروالتلبد:** هو عملية فيزوكيميائية يمكن تعرف التخثر على أنه عامل اختزال قوي التنافر الكهربائي على مستوى سطح الجزيئات عن طريق إضافة المخثر الكيميائي مثل الشبة وكلوريد الألومنيوم، كما أن للتخثر الكهربائي هدف رئسي وهو زعزعت استقرار الجسيمات الدقيقة العالقة مما يسهل عملية تكتلها، بينما التبلد هو مرحلة مزج خفيف تزيد من حجم الجسيمات من ندف دقيقة تحت المجهرية إلى جزيئات عالقة مرئية لا غموض بها. إذ تقام خلال تجمع الجسيمات التي أحدثت اضطرابا فيها عن طريق اصدمها ببعضها البعض مما يسبب في زيادة حجم التكتل وإنخفاض تركيز الجزيئات في المحلول. (23) (26) (27)
- **الأكسدة الكيميائية :** هي عملية تعتمد على نقل الإلكترونات من كاشف المؤكسد إلى الأنواع الكيميائية المؤكسدة. وأي استعمال كواشف المؤكسدة مثل بيروكسيد الهيدروجين، وثاني أكسيد الكلور، والأزون. ولتقليل من مركبات العضوية في هندسة المياه والصرف تستعمل الأكسدة الكيميائية كما لها خاصية إزالة الملوثات وتخلص من مخلفات المحاليل الملحية. (28) (29)

3.6.I. المعالجة الالبيولوجية:

ويتم فيها التخلص من المادة العضوية قابلة لتفكك من طرف الكائنات الحية الدقيقة وهذا بوجود الهواء حيث تعمل على امتصاص المواد العضوية الملوثة (التحلل البيولوجي الهوائي يعتمد على نشاط الهوائي) للبكتيريا والتي تتمثل في: حمأة المنشطة، معالجة بيكتيريا. (20)

- **حمأة المنشطة:** هي الطريقة الأكثر فعالية في معالجة البيولوجية وتعد من الأكثر شيوعا في الوقت الحالي لتنقية المياه الصرف الصحي في المجتمع وهو نظام يتيميز بوجود الكائنات الحية الدقيقة الملامسة للمياه التي تحتوي على مواد قابلة لتفكك لفترة زمنية مع الحفاظ بهذا المجموعات البيولوجية. (30)

- **الأسرة البيكتيرية:** تتشكل من طبقات تتدرج من جزيئات ضخمة الحجم مثل الأحجار وكذلك الجزيئات الدقيقة، وتتدفق المياه نحوه وتتغطى أسطح هذا المياه بطبقة غشائية لزجة تضم الكائنات الحية المختلفة وتؤكسد المادة العضوية. (31)

4.6.I. معالجة كهروكيميائية:

هي تقنيات متقدمة نسبيا تعمل على إزالة المواد الصلبة العالقة وتتمثل هذا تقنيات في التخثير الكهربائي، الأكسدة الكهربائية، التعويم الكهربائي، التحليل الكهربائي. (32)

- **التحليل الكهربائي:** هو التحلل الكهربائي أو تفكك المواد العضوية وغير العضوية بواسطة تدفق كهربائي عن طريق تيار كهربائي ويعتبر من أقدم عمليات المعالجة مياه الصرف الصحي فيعمل على التخلص الروائح وتطهير. (33)
- **التخثير الكهربائي:** وتعتبر حل بديل لمعالجة المياه حيث تعتمد على تيار كهربائي. خلال تطبيق عملية التجلط الكهربائي ويتم استعمال الأقطاب الكهربائية المضحية كأنود(في معظم الأحيان يذوب الألومنيوم أو الحديد) بشكل تدريجي في الماء المطلوب معالجته أثناء تطبيق التيار الكهربائي، ويؤدي هذا الذوبان إلى تحرير أيونات في المحلول التي تعمل كمواد التخثر مثال على ذلك عند استعمال أنود الحديد تؤدي أكسدته إلى إطلاق أيونات Fe^{2+} في الوسط تفاعلي(- E^0 =0.44V/SHE). وفي الوقت نفسه عند الكاثود تتشكل أيونات OH^- وانبعاث H_2 (- E^0=0.83V/SHE). (34)
- **لأكسدة الكهربائية:** تعمل الأكسدة الكهروكيميائية على تحطيم وإزالة المركبات العضوية السامة الموجودة في المياه. وتبرز ميزة هذا التقنية في قدرتها على العمل على مستويين فيما يخص الملوثات العضوية. فإن هذه القدرة تمنحها ميزة واضحة على غيرها.تنتج بواسطة التفريغ الأنودي لجزيء الماء، مما يؤدي إلى توليد الجذور الحرة (OET) على القطب الكهربائي. (35)
- **تعويم الكهربائي:** وهي تقنية فصل بين المواد الصلبة والسائلة أو المائية الزيتية والتي تتكون من تجمع المواد على سطح وتكون كثافتها منخفضة أو متوسطة وقد تكون منخفضة جدا أكبر من الماء. تعتمد هذا الطريقة على استخدام الفقاعات غاز صغيرة يتم توليدها في الجزء السفلي من الخزان للسائل المطلوب معالجته. (32)

I.7. الأصباغ العضوية:

I.7.1. تعريف:

تعد الأصباغ مركبات كيميائية عضوية ذات تركيب معقد، تتميز بقدرتها على امتصاص الضوء وعكسه عند أطوال موجية تقع ضمن المجال المرئي للطيف الكهرومغناطيسي والتي تتراوح بين 380 و750 نانوميتر. كما تعرف بأنها مواد ملونة قد تكون طبيعية أو صناعية تمتلك قابلية الارتباط بالألياف أو الأسطح المراد تلوينها مما يمنحها لونا ثابتا. وتتميز الأصباغ بخاصيتين أساسيتين هما اللون والقدرة على الثبات على الدعامات الصلبة مثل المنسوجات سواء باستعمال تقنيات الصباغة أو الطباعة. (36) (37) (38) (39)

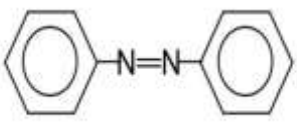
I.7.2. تصنيف الأصباغ:

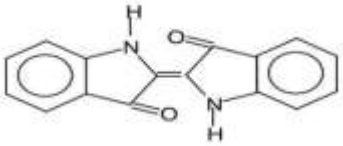
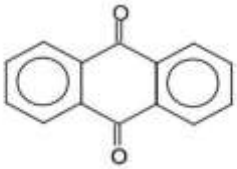
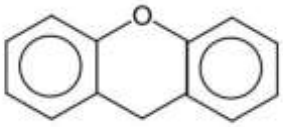
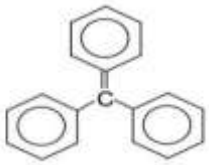
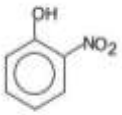
تم تصنيف الأصباغ لأول مرة من طرف Society of Dyers and Colourists حيث قامت هذه المؤسسة بالتعاون مع American Association of Textile Chemists and Colorists بنشر أول إصدار من فهرس الألوان سنة 1924 والذي أصبح مرجعا رسميا معتمدا للأصباغ. ويعتمد التصنيف الأساسي للأصباغ على معيارين رئيسيين هما التركيب الكيميائي وطريقة التطبيق أو الاستعمال. وبناء على ذلك خصص لكل صبغة نظام تصنيف رقمي يعرف بـــ (CICN) أو رقم اللون (Colour Index Number) ويعبر عن الطبيعة الكيميائية للصبغة، إضافة إلى نظام تسمية يعرف بـــ (CI Name) يوضح مجال استعمالها وطريقة استخدامها.

I.7.2.1. التصنيف الكيميائي:

تتوزع الأصباغ كيميائيا إلى فئات متنوعة من أصناف التي يبينها الجدول الآتي (40):

الجدول **I–1:** تصنيف الكيميائي للأصباغ.

الصبغة	الصيغة الكيميائية للصبغة
أصباغ الازو	

أصباغ النيلي	
أصباغ الأنثراكينون	
أصباغ الزانثين	
أصباغ ثلاثي فينيل ميثان	
أصباغ النيتروست والنيتروساتيد	

I.2.2.7. حسب تطبيقها:

يحدد هذا النوع من التصنيف اعتمادا على المجموعات الأوكسوكرومية (Auxochromes) وتكتسي هذه الطريقة أهمية كبيرة لدى الصباغين الذين يفضلون تصنيف الأصباغ حسب مجالات استخدامها. ورغم اختلاف طرق تطبيق الصبغات فإنه من الضروري في جميع الحالات أن تكون الصبغة قابلة للذوبان في الماء في مرحلة معينة من عملية الصباغة باعتبار أن الماء يعد الوسط العام لعمليات الصباغة. فبعض الأصباغ تذوب بسهولة في الماء في حين يتطلب البعض الآخر تعديلات كيميائية لزيادة قابليته للذوبان. وبناء على ذلك، تقسم الأصباغ إلى فئات مختلفة وفق طريقة تطبيقها المناسبة لعملية الصباغة. (41) (42) الموضحة في الجدول التالي:

الجدول I –2: مجموعة من الأصباغ المصنفة وفقا استخدامها أو تطبيقها.

ذائب في الماء	غير ذائب في الماء
الأصباغ الحمضية (Les colorants acides)	الأصباغ الأحواض(Les colorants de cuve)
الأصباغ القاعدية (Les colorants basiques)	الأصباغ الكبريتية(Les colorants au soufre)
الأصباغ التفاعلي(Les colorants réactifs)	الأصباغ المشتتة (Les colorants disperses)

I.3.7. أنواع الأصبغة:

I.1.3.7. الأصباغ الطبيعية:

منذ حوالي 1500 قبل الميلاد عرف المصريون القدماء استعمال عدد من الأصباغ مثل الزعفران (الأصفر) والوسمة (الأزرق) والفوة (الأحمر) والنيلة والأرجوان. ومنذ ذلك الوقت كانت معظم الأصباغ المستخدمة ذات مصدر طبيعي، إذ استخرجت من النباتات والأشجار والزهور، أو من مصادر حيوانية مثل الحشرات كالقرمز، أو من الرخويات مثل صبغة الأرجوان، وأحيانا من الكائنات الحية الدقيقة أيضا. (41)

I.2.3.7. الأصباغ الاصطناعية:

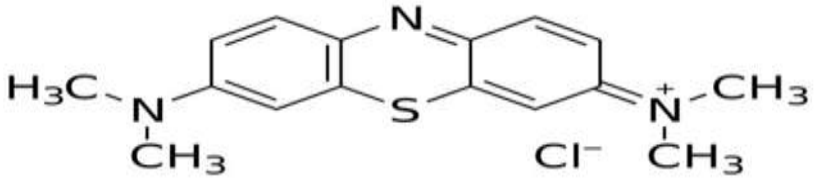
بدأت صناعة الأصباغ الاصطناعية سنة 1856 على يد الكيميائي الإنجليزي William Henry Perkin وذلك أثناء محاولته تحضير دواء الكينين المستخدم في علاج الملاريا. إلا أنه حصل بالصدفة على مادة ذات لون مزرق تمتلك خصائص صباغة مميزة، عرفت لاحقا باسم البنفسجي الأنيليني أو الأرجواني (وهو من الأصباغ الأساسية). وبعد هذا الاكتشاف تتابعت التطورات في مجال الأصباغ الاصطناعية وظهرت أنواع جديدة في الأسواق. ونتيجة لذلك ومع بداية القرن العشرين أصبحت الأصباغ الاصطناعية تحلّ محل الأصباغ الطبيعية بشكل شبه كامل. (43) (44)

I.4.7. دراسة صبغة أزرق الميثيلين (BM):

I.1.4.7. تعريف:

يعد أزرق الميثيلين، المعروف أيضا بكلوريد الميثيل ثيونينيوم مركبا عضويا يحمل في التسمية النظامية اسم 7،3–بيس (ثنائي ميثيل أمينو) فينازاثيونيوم. ويتميز هذا المركب بقابليته العالية للذوبان في الماء كما يذوب بدرجة أقل في الكحول. وقد تم تحضيره لأول مرة سنة 1876 على يد الكيميائي Heinrich Caro.

ويصنف أزرق الميثيلين ضمن الأصباغ الكاتيونية حيث يستخدم في العديد من المجالات والتطبيقات المختلفة. كما يعد من أكثر الملوثات شيوعا في المياه العادمة الناتجة عن الصناعات الصباغية. (45)



الشكل I–2: بنية الكيميائية للأزرق الميثيلين.

I.2.4.7. خصائص الفيزيائية والكيمائية (46) (47):

الجدول I–3: خصائص الفيزيائية والكيميائية للأزرق الميثيلين.

الاسم الشائع	Bleu de mèthylène
الصيغة الكيميائية	$C_{12}H_{18}ClN_3S$
الكتلة المولية	g/mol 319.86
الذوبانية	1 g / 25 Ml
λ_{max}	664

I.3.4.7. استعمالات الميثيلين الأزرق:

- يعد أزرق الميثيلين (BM) من المركبات المهمة ذات الخصائص المتعددة مما يجعله واسع الاستخدام في المجالات الطبية والصناعية. وقد استخدم منذ أواخر القرن التاسع عشر كأول دواء اصطناعي مضاد للملاريا، كما استعمل في علاج بعض الحالات المرضية مثل فقر الدم والميثيموغلوبينات الدم (اضطراب دموي يتميز بارتفاع مستوى الميثيموغلوبين) والتهابات المسالك البولية. ويستخدم أيضا في الطب البشري والبيطري ضمن العديد من الإجراءات التشخيصية والعلاجية. (48) (49) (50) (51)
- ويمتلك أزرق الميثيلين خصائص ضوئية مميزة لذلك يستخدم في العلاج الضوئي الديناميكي للسرطان، كما يعمل كمحسس ضوئي لتعطيل بعض الفيروسات. وتشير دراسات حديثة إلى إمكانية مساهمته في تحسين الذاكرة والتخفيف من أعراض مرض الزهايمر. (52) (53) (54)

- صناعيا يعتبر أزرق الميثيلين من أكثر الأصباغ استعمالا في صناعة النسيج، حيث يمتاز بقدرته العالية على الالتصاق بألياف القطن وثباته على الأقمشة. كما يدخل في صناعات الورق والطباعة والدهانات والأغذية والأدوية. (55) (56) (57) (58)
- إضافة إلى ذلك يستخدم في الكيمياء التحليلية كمؤشر للأكسدة والاختزال، وفي التحاليل الكيميائية الدقيقة إلى جانب تطبيقات حديثة في الخلايا الشمسية وأجهزة الاستشعار والمكثفات وخلايا الوقود الميكروبية. (59) (60) (61) (62) (63)

الفصل الثاني: التخثير الكهربائي والجزء التجريبي

تمهيد:

شهدت المعالجات الكهروكيميائية إنتشار واسع في معالجة المياه المزودة بالمواد العضوية لأنها تشكل فائدة جيدة على التطهير بواسطة طاقة نظيفة مثل الكهرباء. كما أنها تتميز بسهولة التحكم وإمكانية دمجها مع تقنيات المعالجة أخرى، مما يساهم في تطورها، ويزداد الاهتمام بهذه التقنيات نظرا لمحدودية بعض المعالجة البيولوجية التقليدية في إزالة بعض من المركبات المقاومة أو غير قابلة للتحلل الحيوي.وتعتبر تقنية التخثر الكهربائي المستعملة في هذا الدراسة من أبرز التقنيات الكهروكيميائية الحديثة والتي تندرج ضمن إطار التنمية المستدامة. (64)

1.II. التخثير الكهربائي (Electrocoagulation):

1.1.II. نبذة تاريخية (65) (66):

تصنف هذا الوثيقة ضمن أول الدراسات والتي تشير إلى استخدام التخثير الكهربائي(EC) للنفايات السائلة، وتمثل براءة اختراع أمريكية تم تسجيلها في عام 1880 بواسطة ويبستر (مرجع) باستعمال أقطابا حديدية لمعالجة المياه الملوثة. وفي نفس العام تم إنشاءمحطة معالجة المياه الصرف الصحي على أساس براءة الاختراع هذه في سالفورد(بريطانيا العظمى) لمعالجة المياه الملوثة في المناطق الحضرية.

وفي عام 1909، قام هاريس بتسجيل براءة اختراع جديدة لهذه العملية ولقد كانت الأنودات في تلك الفترة مصنوعة من ألواح الحديد والألمنيوم. كما شهدعام 1912 إنشاء محطتين علاجيتين أخريين تم بناء مياه الصرف الصحي على هذا المبدأ في الولايات المتحدة. برغم من ذلك فإن عملهم تم إيقافه بعد عدة سنوات(1930) بسبب التكلفة التي كانت تكلف أعلى بمرتين من العلاج التقليدي.

وفي عام 1946، قام ستيوارت بدراسة العملية بشكل أكثر دقة باستخدام مفاعل مجهز بأقطاب كهربائية الألمنيوم. وأجراء مقارنة عملية التخثر الفيزيائية والكميائية والعملية كهروكيميائية، حيث لاحظ أن الظاهر التخثر تبدو أسرع من الطريقة الكهروكيميائية.

لقد شهدت التقنية التخثر الكهربائي أهمية كبيرة بسبب فعاليتها بشكل عام المتفوقة على التقنيات الأخرى، وللقضاء على أشكال تلوث المختلفة مدرجة حسب المؤشرات التالية:

- الطلب الكيمائي الأكسجين: DOC
- الطلب الأكسجين البيولوجي: DBO
- الكربون العضوي الكلي: COT
- الركام المعلق: MES
- معدل المواد الصلبة الذائبة: TDS
- عنوان القلوية الكامل: TAC
- الفلزات الثقيلة
- تصبغ المرتبط بامتصاصية المخرج: ABS

2.1.II. تعريف تقنية التخثير الكهربائي:

التخثر الكهربائي هو تقنية فصل بديلة للتخثر والترسيب الكيميائي، تؤدي إلى تشكيل الكاتيونات المعدنية في الموقع عبر الذوبان الكهربائي للأنود المعدني القابل للذوبان نتيجة مرور التيار. ثم تتجمع الجسيمات الغروية في المنطقة القريبة من القطب الأنود. والتي تسمح بحدوث تفاعل الكاتيونات المخثرة والهيدروكسيدات المعدنية مع الجسيمات الغروية أيونات. والتي تساهم في تحييد شحنتها وتسريع عملية التخثر. (67)

3.1.II. مبدأ عمل تقنية التخثير الكهربائي (68) (69):

تستند آلية التخثير الكهربائي (EC) إلى حدوث تفاعلات كهروكيميائية متزامنة عند سطحي الأنود والكاثود، كما أن التفاعلات المحلول تلعب أيضا دوراً مهما في العملية، كما هو موضح التفاعلات (1) و(3).

- **التفاعل عند الأنود:**

$$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3e^- \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

- **التفاعل عند الكاثود:**

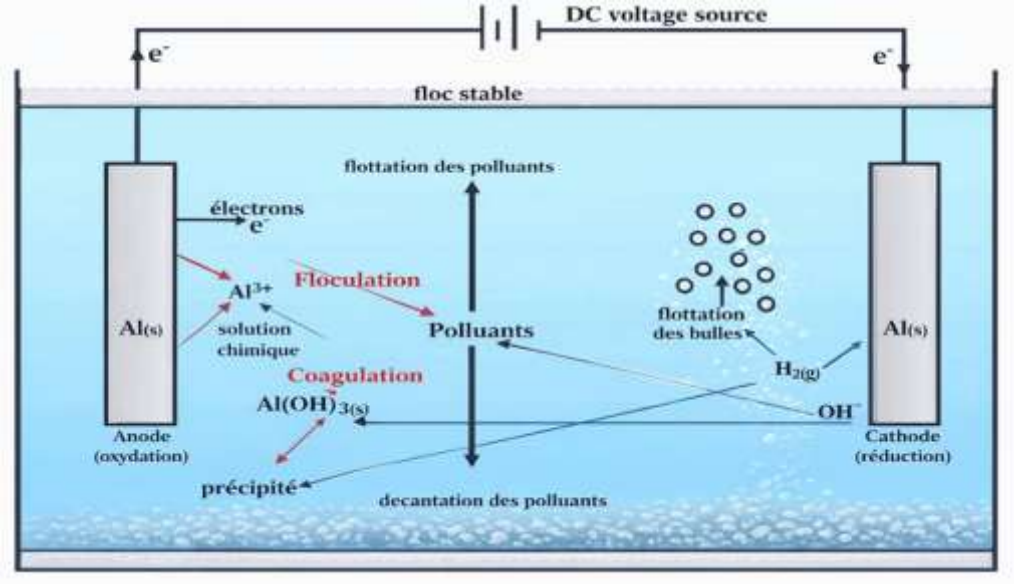
$$2H_2O + 2e^- \rightleftharpoons 2OH^- + H_2 \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

- **معادلة الأجمالية للأنود والكاثود:**

$$Al^{3+} + 3OH^- \rightleftharpoons AL(OH^-)_3 \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

تتلخص الميكانيكية التشغيلية لعملية التخثير الكهربائي في ثلاث مراحل أساسية: (1) الأكسدة الأنودية التي يتم خلالها تحرير الكاتيونات المعدنية (Al^{3+} أو Fe^{3+})، (2) ويتم الإرجاع الكاثود للماء الذي يؤدي لانطلاق غاز الهيدروجين وتوليد أيونات الهيدروكسيد (OH^-)، (3) تفاعلات المحلول حيث تتحد الأيونات المعدنية مع الـ OH^- لتشكيل معقدات (مركبات) هيدروكسيدية تعمل كعوامل ممتزة للملوثات، مكونة كتلا هلامية (خثارة) تفصل لاحقا بعمليات الترسيب أو الطفو.

وبناء على ذلك، يصنف مفاعل التخثير الكهربائي كمنظومة حقن كهروكيميائية دقيقة يتم فيه التحكم في جرعات المعادن المحفزة لتشكيل تجمعات غروانيا (تتكون من جزيئات مجتمعة على شكل جسيمات صغيرة مشحونة بشحن كهربائية) تزداد نموا وتكتلا بمرور الوقت. وتلعب كثافة التيار المطبق دورا حاسما في تحديد آلية الفصل، ففي مستويات التيار المنخفضة تنخفض كمية الفقاعات الغازية المتولدة مما يرجح كفة الترسيب، بينما تؤدي التيارات المرتفعة إلى تكثيف إنتاج الفقاعات، مما يجعل التعويم (الطفو) هو الآلية السائدة لإزالة الخثارة المتشكلة.



الشكل **II–1:** مبدأ عملية التخثير الكهربائي بإستعمال أقطاب الألمنيوم.

4.1.II. القوانين الأساسية للتحليل الكهربائي :

تعتمد عملية التخثير الكهربائي على مجموعة من الظواهر المختلفة، مثل التفاعلات الكيميائية بين الأيونات، والتفاعلات الكهروكيميائية من نوع الأكسدة والاختزال، إضافة إلى ظواهر فيزيائية تتعلق بانتقال الشحنة عند السطح الفاصل بين القطب والمحلول. كما تشمل هذه العملية الامتزاز الفيزيائي أو

الكيميائي بين الهيدروكسيدات والملوثات، والامتزاز الكيميائي بين الأيونات المعدنية والمواد الملوثة، إلى جانب التأثيرات الهيد وديناميكية في الفراغ بين الأقطاب، والتفاعلات بين الطورين الغازي والسائل الناتجة عن الغازات المتولدة داخل المحلول. (70) (32)

يتم فهم جميع هذه الظواهر من خلال الإلمام بالقوانين التالية:

- **حركية الانتقال:** تتحكم حركية انتقال الشحنة أو المادة عند الواجهة بين القطب والمحلول في منحنيات التيار–الجهد. ويمكن تمييز عدة مراحل أساسية في التفاعل، تتمثل في انتقال النوع A من داخل المحلول نحو سطح القطب، ثم امتصاصه فيزيائيا أو كيميائيا على السطح حسب طبيعته، يليه انتقال الشحنة بين سطح، القطب والنوع الممتص مما يؤدي إلى تكون النوع B ثم تحرر هذا الأخير من السطح وانتقاله مجددا إلى المحلول الإلكتروليتي.
- **قانون فاراداي:** تحسب كمية المادة المتكونة أو المستهلكة خلال التفاعل الكهروكيميائي وفق قانون فاراداي، حيث تعتمد على مدة العملية Δt وشدة التيار الكهربائي.

$$m=\frac{I.\Delta t.M}{n.F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

- **m:** كتلة المعدن المذاب أو الغاز المتكون (g)
- **I:** شدة التيار المفروض (A)
- **t:** زمن التحليل الكهربائي (S)
- **M:** الوزن الجزيئي للعنصر المدروس *(g.mol)*
- **F:** ثابت فاراداي ($96500\ C.mol^{-}$)
- **n:** عدد الإلكترونات المشاركة في التفاعل المدروس

- **فرق الجهد في الخلية الكهربائية:** عند مرور التيار داخل خلية كهروكيميائية، يترتب عن ذلك ارتفاع في الجهد الكهربائي. ويمكن تحليل هذا الجهد إلى عدة مكونات مختلفة:

- الجهد التوازني القابل للعكس عند الأنود E_o،a.
- الجهد الزائد الناتج عن التنشيط عند الأنود η_{Aa}، والذي يعتمد على كثافة التيار الكهربائي.
- الجهد الزائد الناتج عن الانتشار عند الأنود η_{Da}، وينتج عن اختلاف تركيز النوع A بين سطح الأنود والمحلول الإلكتروليتي بسبب بطء ظواهر الانتشار والحمل.

- الهبوط الأومي داخل المحلول، حيث يتحول جزء من الطاقة الكهربائية المزودة إلى طاقة حرارية بفعل تأثير جول.
- الجهد الزائد الناتج عن الانتشار عند الكاثود η_{Dc}، والمتولد بسبب تدرج التركيز بالقرب من سطح الكاثود.
- الجهد الزائد الناتج عن التنشيط عند الكاثود η_{Ae}، والمرتبط بالتفاعل الكهروكيميائي الحاصل عنده.
- الجهد التوازني القابل للعكس عند الكاثود E_{oe}.

II.5.1. العوامل المؤثرة على كفاءة عملية التخثير الكهربائي EC :

تتحكم عدة عوامل تشغيلية في كفاءة عملية التخثير الكهربائي وقدرتها التحليلية على إزالة الملوثات من المياه العادمة. ويستعرض هذا القسم تحليلا معمقا لأبرز هذه المتغيرات وأكثرها تأثيرا والتي تتمثل في

II.5.1.1. تأثير مادة القطب الكهربائي :

تعد مادة الأقطاب من أهم المعلمات التشغيلية التي تحدد كفاءة عملية التخثير الكهربائي (EC) وجدواها الاقتصادية. وتؤثر طبيعة المادة مباشرة على معدل الذوبان الأنودي وكمية الخثرات المتولدة، وهو ما ينعكس على نسبة إزالة الملوثات. (71)

وينصح في الدراسات العلمية استخدام معادن ذات تكافؤ أيوني مرتفع (مثل الألمنيوم والحديد) لقدرتها العالية على ضغط "الطبقة المزدوجة الكهربائية" مما يعزز تكتل الملوثات. وتظل هذه المواد هي الأكثر شيوعا في تطبيقات معالجة المياه نظرا لتوفرها وانخفاض تكلفتها، ومعدلات ذوبانها الكهروكيميائي المرتفعة. (72)

II.5.1.2. تأثير الرقم الهيدروجيني:

يعد الرقم الهيدروجيني (pH) عاملا أساسيا يؤثر في البنية الكيميائية للملوثات من خلال عمليات البرتنة ونزع البروتون للمجموعات الوظيفية، وذلك اعتمادا على قيمة التفكك الحمض (pK_a). وتتحكم

هذه التغيرات في الشحنة الصافية للملوثات والتفاعلات الكهروستاتيكية، مما يؤثر مباشرة على استقرار الطبقة المزدوجة وتكوين التكتلات. (32) (73) (74) (75) (76) (73)

ومن ناحية أخرى، يلعب pH دورا وسيطا في تحديد سلوك الأيونات الأخرى الموجودة في مصفوفة المياه حيث تتأثر الشحنة الظاهرية للأنيونات بالرقم الهيدروجيني، مما يؤثر على قدرتها في حجب الطبقة المزدوجة أو ممارسة دورها المؤكسد. بناء عليه، يعد ضبط pH عاملا حرجا يجب تحسينه بما يتوافق مع طبيعة الملوث المست وخصائص التدفق المائي. (78) (79) (80)

II.3.5.1. تأثير شدة التيار الكهربائي:

تتحكم كثافة التيار المطبق في حركية التفاعلات الكهروكيميائية بما في ذلك معدل ذوبان المصعد، وتوليد الغازات وعملية الطفو الكهربائي، مما يحدد في النهاية استهلاك الطاقة الكلي للعملية. وعلى الرغم من الاعتماد الواسع على التيار المستمر (DC) في عمليات التخثير الكهربائي إلا أنه يؤدي غالبا إلى ظاهرة الخمول، حيث تتكون طبقة أكسيد عازلة على سطح القطب تزيد من المقاومة الأومية وتخفض كفاءة الإزالة مع رفع التكاليف التشغيلية كبديل تقني. يبرز استخدام التيار المتردد لقدرته على منع تراكم هذه الطبقات الخاملة عبر التغيير المستمر في القطبية، مما يطيل العمر التشغيلي للأقطاب ويحافظ على استقرار كفاءة المعالجة.

II.4.5.1. تأثير الألكتروليت الداعم:

تعد الإلكتروليتات المساندة عنصرا حرجا لرفع توصيلية المحلول وتقليل استهلاك الطاقة، إلا أن تأثيرها يتجاوز ذلك ليؤثر في حركية ذوبان الأقطاب وتكوين "الندف". (81)

أولا: تأثير الأنيونات (العامل الأكثر جوهريا):

تتحكم نوعية الأنيونات في نمط تآكل الأقطاب وكفاءة المعالجة كما يلي (82) (83) (84):

- **الكلوريدات** (Cl^-): هي الأفضل على الإطلاق، لقدرتها العالية على اختراق طبقات الخمول وتوليد تآكل نقري، مما يقلل الجهد المطلوب. كما أنها تنتج أنواعا من "الكلور النشط" تساهم في أكسدة المواد العضوية. (85) (86)

- **الكبريتات** (SO_4^{2-}): تؤدي إلى خمول أقطاب الألمنيوم عبر تشكيل معقدات تعزل السطح، مما يتطلب جهدا أعلى. بينما لا تؤثر سلبا على أقطاب الحديد. (87) (88)
- **النترات** (NO_3^-): تعيق الذوبان الأنودي لكل من الحديد والألمنيوم. وتؤدي اختزالها عند المهبط إلى رفع pH المحلول وتشكيل طبقات أكسيد غير ذائبة تسبب "تآكل الشقوق". (89)

ثانيا: تأثير الكاتيونات:

بينما يعتبر دور الصوديوم والبوتاسيوم محايدا، يبرز الأمونيوم (NH_4^+) كعامل إيجابي، خاصة مع أقطاب الألمنيوم حيث يعمل كمنظم لل pH، مما يحافظ على الظروف المثالية لتشكل الخثرات ويزيد من كفاءة الإزالة. (90) (91)

- **مفاعلات التخثير الكهربائي**:

تؤثر هندسة المفاعل بشكل مباشر على كفاءة المعالجة، وسهولة التشغيل، وقابلية التوسع الصناعي. وتصنف التصاميم الأكثر شيوعا كالتالي:

- **المفاعل الدفعي التقليدي:** يتميز ببساطته، حيث تعتمد الأقطاب فيه على شكل ألواح متوازية مغمورة مع تقليب ميكانيكي لضمان التجانس. (92) (93) (94)
- **المفاعلات الأسطوانية:** وتعتمد على ترتيب أقطاب متمركزة، مما يوفر توزيعا مختلفا للتيار الجهد الكهربائي. ومن تطويراتها استخدام دافعة دوارة كمهبط لتعزيز الخلط ومنع ترسب الجسيمات. (95)
- **مفاعل ضاغط المرشح:** أثبت كفاءة إزالة أعلى للملوثات المعدنية والعضوية مقارنة بالمفاعلات الدفعية التقليدية. (96) (97)
- **المفاعلات المستمرة ذات الأقطاب اللولبية:** تصميم ابتكاري يضمن توزيعا منتظما لسرعة تدفق السائل حول المصعد، مما يحسن من كفاءة التفاعل في الأنظمة المستمرة. (98) (99)

II.6.1. مزايا والعيوب تقنية التخثير الكهربائي (100) :

- مزيا:

- يستخدم في تنقية مياه الشرب ومعالجة مياه الصرف (المستعملة).
- يجمع بين الأكسدة والتخثير والترسيب في آن واحد (مما يحقق كفاءة اقتصادية قصوى).
- يقلل من الاستهلاك الكيميائي عبر الاستعاضة عنها بأقطاب مضحية وطاقة كهربائية.
- تتميز العملية بـ نفقات تشغيلية منخفضة.
- الحد من المخاطر التلوث الثانوية.

- **العيوب :**

- لاستهلاك التدريجي للأقطاب المضحية.
- الاحتياج لتوصيلية كهربائية مرتفعة.
- غياب النمذجة القياسية لتصميم المفاعلات.

II.7.1. تطبيقات التخثر الكهربائي (101) :

برهنت تقنية التخثير الكهربائي على كفاءتها في معالجة أنواع متعددة من المياه الملوثة وإزالة الملوثات:

- **مياه صرف الصناعية:** تتميز التقنية بفعالية استثنائية في معالجة التدفقات السائلة الناتجة عن قطاعات صناعية معقدة، وفي مقدمتها صناعة النسيج (لإزالة الأصباغ المستعصية)، والصناعات النفطية، والتحويل الغذائي.
- **تنقية المياه الصالحة للشرب:** تعد خيارا ناجحا في معالجة وتصفية المياه الصالحة للشرب ومصادرها الطبيعية (كمياه السدود والآبار)، حيث تساهم في إزالة العكارة، واللون، والتخلص من الكائنات الدقيقة والممرضة.
- **مخلفات قطاع المناجم:** تثبت التقنية كفاءة عالية في معالجة مياه الصرف المنجمية الحامضية، بالإضافة إلى قدرتها الفائقة على ترسيب وإزالة المعادن الثقيلة والسامة.
- **مياه الجريان الزراعية:** امتلاك القدرة على تصفية مياه الصرف الزراعي من بقايا المبيدات الحشرية، والأسمدة الكيميائية، والمواد العالقة والترسبات.

- **مياه المصاحبة لإنتاج النفط والغاز:** تستعمل بفعالية لمعالجة المياه المستخرجة أثناء عمليات الحفر وضخ البترول، حيث تعمل على فصل الهيدروكربونات المستحلبة، والزيوت، والمواد الصلبة الذائبة.
- **عصارة مراكز ردم النفايات:** تعتبر من الحلول الناجعة لمعالجة هذه العصارة شديدة التلوث والسمية، بفضل قدرتها على الإزالة الملوثات ذات طبيعة العضوية المعقدة وغير العضوية.

II.2. الجزءالتجريبي:

II.2.1. المواد الكيميائية والأجهزة المستعملة

الجدول **II–1:** المواد الكيميائية.

كلوريد الصوديوم($NaCl^-$)	كبريتات الصوديوم $\left(Na_2SO_4^{2-}\right)$	ماء مقطر
ورقpH	أزرق الميثيلين (BM)	

الجدول II–2: الأجهزة.

الجهاز	الاسم	الاستعمال
	مزود الطاقة مستمر DC (Power supply yx-305d)	ترسيب المعادن كهربائيا. تشغيل مقومات ودوائر. تجربة قانون أوم:V=R*I.
	محرك تحريك مغناطيسي مع صفيحة تسخين (Magenetic stirrer hot plate)	تحضير محاليل الكيميائية المتجانسة. تسريع التفاعلات الكيميائية. إذابة المواد الصلبة.
	جهاز uv-vis	قياس امتصاصية المحاليلA. تحديد تركيز الصبغة. طول المسار الضوئي (cm).
	جهاز الطرد المركزي (centrifuge).	فصل المكونات المحاليل حسب الكثافة. تنقية العينات.

	ميزان إلكتروني	قياس الكتل المواد في التحاليل الكيمائية. تحضير محاليل معيارية بدقة. تحليل الكمي.

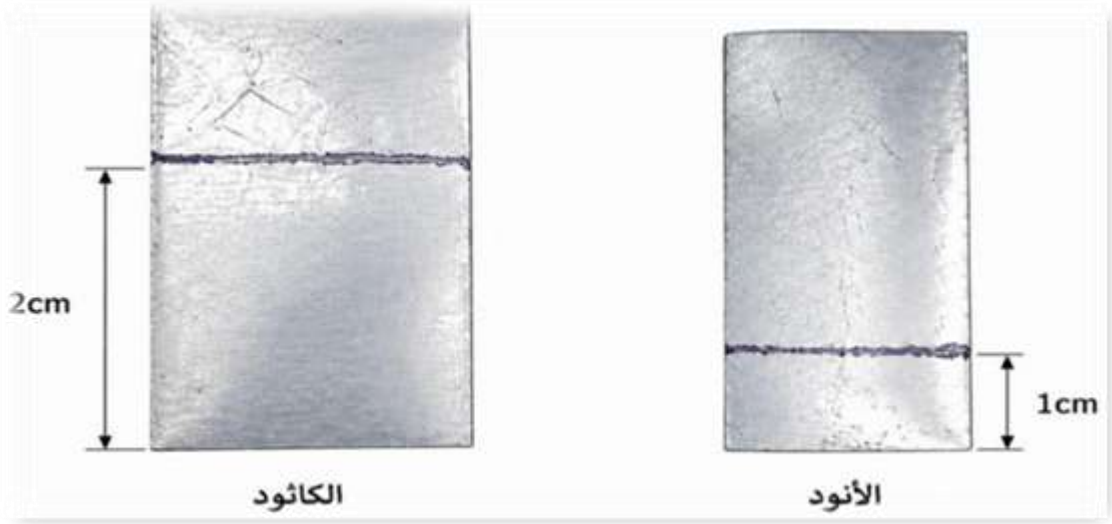
الجدول **II–3:** الأدوات المخبرية.

أنبوب لطرد المركزي	أنابيب أخذ العينات
صفائح ألمنيوم	اسطوانة مدرجة
بيشر مختلف أحجام	ماصة دقيقة (micropipette)

أنابيب ترسيب تجربة	ملعقة

2.2.II.وصف الخلية التحليلية

في إطار هذا الدراسة خلية كهروكيميائية تم استعمال أقطاب كهربائية على شكل صفائح من الألمنيوم (Al) ذات نقاوة عالية تقدر ب99%. إذا يؤدي أحد القطبين دور أنود والآخر دور كاثود، وقد تم تثبيتهما بشكل متوازي داخل الوسط التفاعلي بمسافة قدرها 2cm من أجل الحصول على توزيع متجانس للمجال الكهربائي، حيث تم إدخال الأنود بعمق 1cmوالكاثود بعمق 2cm، وقد جرى ربط الأقطاب بمصدر تيار مستمر باستخدام أسلاك توصيل مع تشغيله عند جهد قدره V8.



الشكل II–2: الأقطاب الألومنيوم المستعملة قبل التشغيل.

الشكل **II–3:** تركيب تجريبي لنظام كهروكيميائي للقطبين.

II.2.2. تحضير المحاليل

في نطاق دراسة معالجة المياه بتقنية التخثر الكهربائي، تم تحضير المحاليل ولقد تم إنجاز هذا العمل مخبريا :

- **تحضير المحلول أزرق الميثيلين (الصبغة):**

من أجل إنشاء وسط تفاعلي مائي ملوث يتكون من ملوثات عضوية، تم إعتماد صبغة أزرق الميثيلين كوسط تجريبي لكثرة استعماله الواسع في الصناعات النسيجية وامتلاكه درجة عالية من ثبات الكيمائي وصعوبة تحلله في المحيط الطبيعي.

تم تحضير المحلول الملوث عن طريق إذابة 35mg من أزرق الميثيلين في 109ml من ماء المقطر، وخضعه هذا المحلول لعملية للتحريك باستخدام محرك تحريك مغناطيسي لمدة زمنية مناسبة من أجل ضمان تجانسه بشكل كامل.

بعد ذلك مباشرة تم قياس الأس الهيدروجيني الأبتدائي pH_0.

الشكل II–4: تحضير محلول أزرق الميثيلين.

- **تحضير الأوساط التجريبية:**

تم اعتماد نفس البروتوكول التجريبي للأوساط الثلاثة الأولى. حيث تم أخذ 150ml من محلول كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4) بعد ذلك وزعت على ثلاثة أوساط تفاعلية كل منها يحتوي على50ml ثم أضيفت تركيز مختلفة من محلول أزرق الميثيلين للعينات :

- تركيزA: $9.98*10^{-6}$ mol/L
- تركيزB: $1.96*10^{-5}$mol/L
- تركيزC: $3.84*10^{-5}$ mol/L

- **محلول كبريتات الصوديوم Na_2SO_4:**

تم إذابة 2.5gمن إلكتروليت داعم كبريتات الصوديوم في 500ml مع الماء المقطر ونقوم بعملية التحريك المستمر إلى غاية الحصول على محلول متجانس بالتوازي.

الشكل II–5: تحضير محلول كبريتات الصوديوم إلكتروليتي داعم (Na_2SO_4).

- **المحلول كلوريد الصوديوم($NaCl^-$):**

تم إذابة 5.85g من كلوريد الصوديوم داخل500ml من الماء المقطر. وبعدها يتم عملية التحريك لمدة مناسبة لتجانس المحلول.

الشكل **II–6:** تحضير محلول كلوريد الصوديوم إلكتروليتي داعم ($NaCl^-$).

- **محلول كلوريد الصوديوم المخفف ($NaCl^-$):**

تم إعداد محلول مخفف بإضافة 250ml من الماء المقطر إلى250ml من محلول كلوريد الصوديوم. بعد ذلك تم اعتماد نفس خطوات تنفيذ.

- **محلول كبريتات الصوديوم عالي التركيز(Na_2SO_4):**

تم مزج 40ml من محلول الكبريتات الصوديوم مع 10ml من محلول أزرق الميثيلين.

- **محلول كلوريد الصوديوم عالي التركيز($NaCl^-$):**

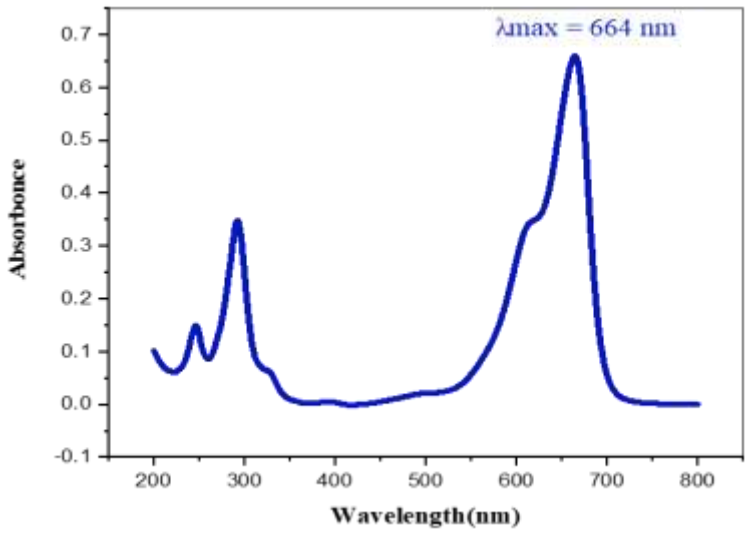
أعيدت التجربة وفق نفس الشروط وخطوات السابقة بواسطة محلول كلوريد الصوديوم ($NaCl^-$) بدلا من محلول كبريتات الصوديوم(Na_2SO_4).

بعد إنتهاء من تحضير هذا المحاليل والأوساط التفاعلية، تم تنفيذ عملية التخثر الكهربائي ضمن خلية كهروكيميائية تحتوي على قطبين من الألمنيوم مرتبطين بمصدر تيار كهربائي مستمر. وقبل البدء وبعد إجراء هذا العملية يتم قياس قيمة الأس الهيدروجيني (pH) للمحاليل بواسطة ورق (pH)، وكذلك تحديد كتلة الأنود باستعمال ميزان إلكتروني.

بعد ذلك تم تشغيل للبدأ وعند بدأ بكل أجراء عملية يتم تغير الأنود لكل تجربة تتم.

II.3.2. تحديد طول الموجة الأقصى للامتصاص λ_{max}

يتم تحديد الطول الموجي الأقصى للامتصاص λ_{max} ل(BM) لاستخدامه في الدراسة ولتحديد قيمة λ_{max}، تم أخذ 1ml من محلول الأم للصبغة وتم خفيفه قليلا بالماء المقطرو تمريره على مطياف (UV-Vis) لقراءة قيمة λ_{max} ، حيث وجدنا أن طول الموجة الأعظمي قدره 595.0 نانومتر، والذي يمثل الحد الأقصى لامتصاص الصبغة وكذلك تم قياس pH.



الشكل II–7: طيف الامتصاص للأزرق الميثيلين المحصل عليه بواسطة (UV-Vis).

II.4.2. المعالجة الرياضية:

تم حساب التركيز المتبقي استنادا إلى قيم الامتصاصية من خلال علاقة بير–لامبرت:

$$C_t = C_0 \times \frac{A_t}{A_0} \quad \text{..... (5)}$$

- C_t: التركيز عند الزمن t.
- C_0: التركيز الابتدائي (قبل المعالجة).
- A_t: الامتصاصية عند الزمن t.
- A_0: الامتصاصية الابتدائية.

كما حساب مردود الإزالة اعتماد على العلاقة التالية:

$$R_{(\%)}=\frac{C_0-C_t}{C_0}\times 100 \quad \text{..... (6)}$$

- R(%): نسبة الإزالة.
- C_t: التركيز عند الزمن t.
- C_0: التركيز الابتدائي (قبل المعالجة).

وكذلك دراسة الحركية وفق علاقة التالية :

$$K=\frac{\ln(\frac{C_0}{C_t})}{t} \text{ ..... (7)}$$

- K: ثابت السرعة
- T: الزمن.
- ln : اللوغاريتم الطبيعي.
- C_t: التركيز عند الزمن t.
- C_0: التركيز الابتدائي (قبل المعالجة).

الفصل الثالث: النتائج التجريبية ومناقشة

تمهيد:

يهدف هذا الجزء إلى مناقشة النتائج التجريبية المتعلقة بإزالة الملوث العضوي بواسطة التخثر الكهربائي، من خلال تتبع التغير في الامتصاص والتركيز بدلالة الزمن. وتفسير إزالة الملوث بواسطة التفاعلات الكهرو كيميائية والعوامل المتحكمة في مردود وفعالية المعالجة.

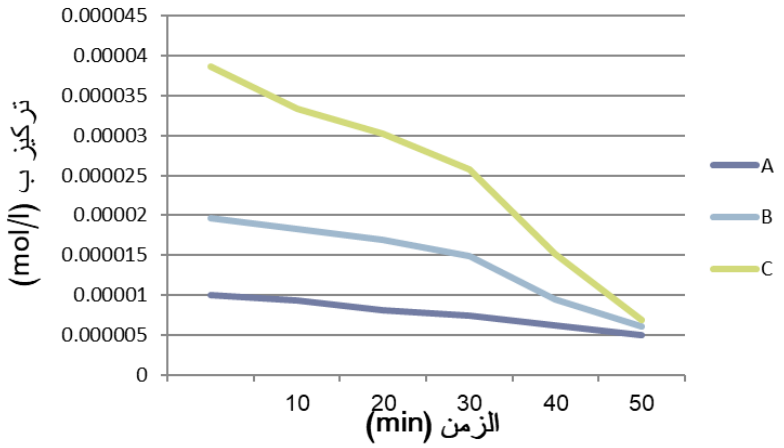
1.III. دراسة تحليلة أزرق الميثيلين:

1.1.III. تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين بدلالة الزمن:

- **محلول كبريتات الصوديوم:**

الجدول III–1: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(A ،B،C) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن.

الزمن(min)		10	20	30	40	50
التركيز A mol/L	$9.94.10^{-6}$	$9.31.10^{-6}$	$8.07.10^{-6}$	$7.45.10^{-6}$	$6.21.10^{-6}$	$4.97.10^{-6}$
التركيز B mol/L	$1.97.10^{-5}$	$1.83.10^{-5}$	$1.7.10^{-5}$	$1.49.10^{-5}$	$9.5.10^{-6}$	$6.1.10^{-6}$
التركيز C Mol/L	$3.86.10^{-5}$	$3.33.10^{-5}$	$3.03.10^{-5}$	$2.57.10^{-5}$	$1.51.10^{-5}$	$6.81.10^{-6}$



الشكل III–1: تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن.

- **مناقشة**

يوضح الشكل تطور تركيز صبغة أزرق الميثيلين(A، B ، C) بدلالة زمن المعالجة في وجود كبريتات الصوديوم ($Na_2SO_4^{2-}$) كإلكتروليت داعم. حيث نلاحظ تناقص تدريجي ومستمر في تركيز الصبغة مع زيادة زمن المعالجة، ولقد سجل التركيز الابتدائي الأعلى (C) قيمة قدرها 3.86×10^{-5} mol/L، ثم انخفض بشكل سريع ليصل إلى 6.81×10^{-6} mol/L بعد 50 دقيقة من المعالجة، في حين سجل التركيز (A) أدنى قيمة خلال فترة المعالجة.

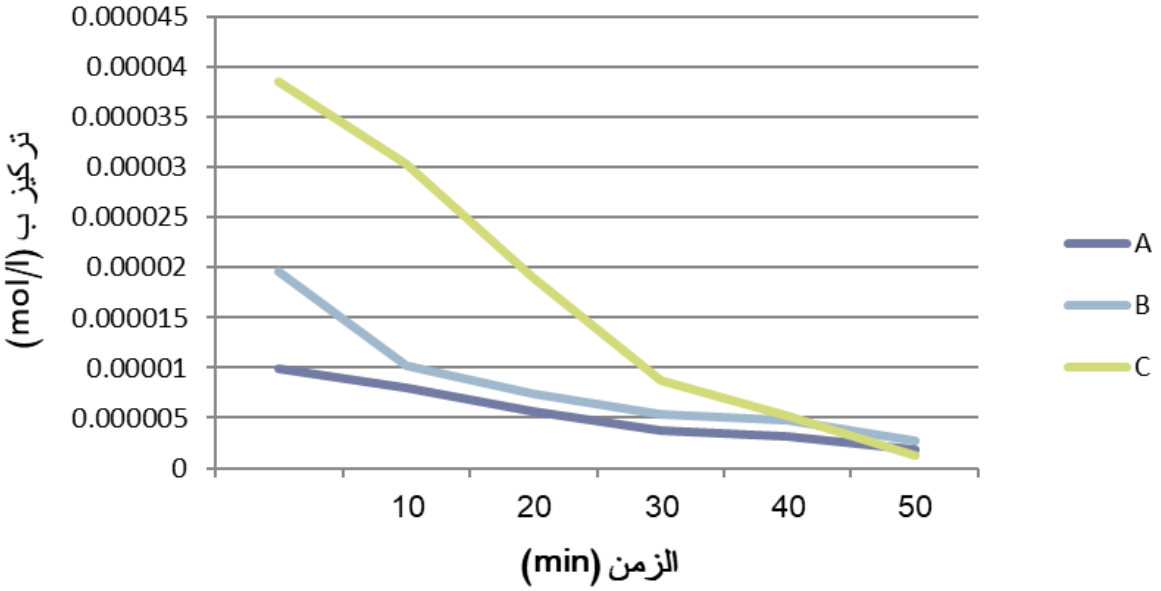
ويتبين من خلال هذه النتائج أن سرعة تناقص تركيز الصبغة تتناسب طرديا مع التركيز الابتدائي، كلما زاد التركيز الأولي للصبغة، كانت سرعة الإزالة أسرع في المراحل الأولى من المعالجة، مما يعكس مدى فعالية العملية الكهروكيميائية في إزالة أزرق الميثيلين من المحلول المائي.

ويمكن تفسير هذه النتائج بالدور الذي تلعبه كبريتات الصوديوم في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، مما يعزز التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن انحلال الأنود وتوليد هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة. كما يلاحظ أن كفاءة الإزالة تزداد بزيادة زمن المعالجة حتى الوصول إلى حالة التوازن.

محلول كلوريد الصوديوم $NaCl^-$:

الجدول **III-2:** قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين (A ،B،C) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن.

الزمن(min)		10	20	30	40	50
التركيزA (mol/L)	$9.94.10^{-6}$	$6.52.10^{-6}$	$4.51.10^{-6}$	$3.11.10^{-6}$	$2.37.10^{-6}$	$2.08.10^{-6}$
التركيزB (mol/L)	$1.97.10^{-5}$	$1.29.10^{-5}$	$8.7.10^{-6}$	$6.3.10^{-6}$	$5.52.10^{-6}$	$5.1.10^{-6}$
التركيزC (mol/L)	$3.86.10^{-5}$	$2.6.10^{-5}$	$1.74.10^{-5}$	$1.20.10^{-5}$	$1.12.10^{-5}$	$1.00.10^{-5}$



الشكل **III–2:** تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن.

- **مناقشة:**

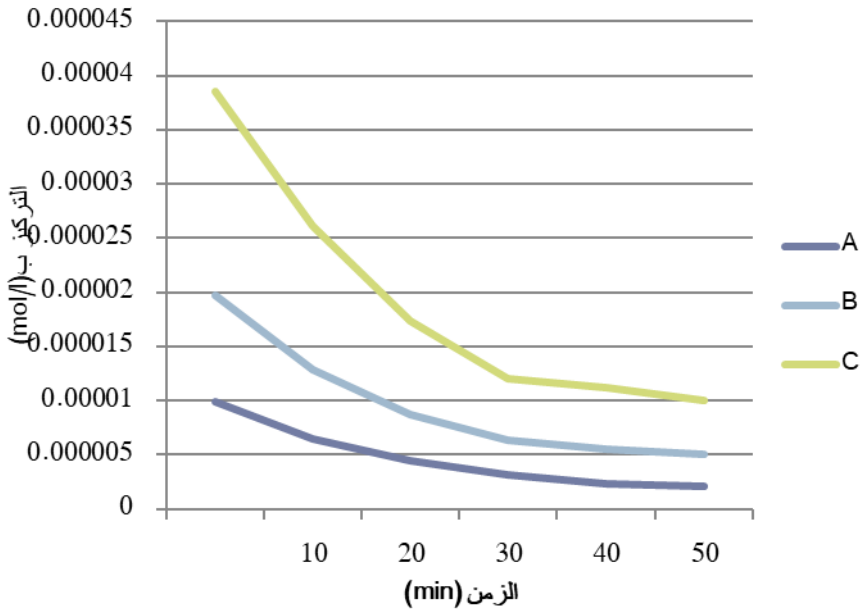
بين الشكل الحركي لتطور تركيز أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وسط كلوريد الصوديوم، انخفاضا مستمرا في تركيز الصبغة مع مرور الوقت. وقد سجل التركيز الابتدائي الأعلى ($C=2\times 10^{-4}mol/L$)انخفاضا سريعا ليصل إلى ($3.10\times 10^{-6}mol/L$)، محققا نسبة إزالة تقارب 99.35%، بينما أظهر التركيز (A) أدنى قيمة خلال فترة المعالجة.

ومن الملاحظ تقارب التراكيز الثلاثة نحو قيمة واحدة، مما يدل على بلوغ النظام حالة التوازن. وتعكس هذه النتائج فعالية التخثير الكهروكيميائي في إزالة الصبغة، حيث تتناسب سرعة الإزالة طرديا مع التركيز الابتدائي. ويرجع ذلك إلى دور كلوريد الصوديوم في توفير وسط غني بالأيونات يسهل انتقال التيار الكهربائي، مما يعزز التفاعلات الكهروكيميائية ويزيد من كفاءة الإزالة مع زيادة زمن المعالجة.

- **محلول كلوريد الصوديوم $NaCl^-$ المخفف:**

الجدول III–3: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين (A،B،C) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن.

الزمن(min)		10	20	30	40	50
التركيز A (mol/L)	$9.94.10^{-6}$	$8.06.10^{-6}$	$5.68.10^{-6}$	$3.76.10^{-6}$	$3.22.10^{-6}$	$1.88.10^{-6}$
التركيز B (mol/L)	$1.97.10^{-5}$	$1.02.10^{-5}$	$7.46.10^{-6}$	$5.43.10^{-6}$	$4.75.10^{-6}$	$2.71.10^{-6}$
التركيز C (mol/L)	$3.86.10^{-5}$	$3.04.10^{-5}$	$1.91.10^{-5}$	$8.67.10^{-6}$	$5.2.10^{-6}$	$1.3.10^{-6}$



الشكل III–3: تغير تركيز المتبقي للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور تركيز صبغة أزرق الميثيلين(C، B،A) بدلالة زمن المعالجة في وجود كلوريد الصوديوم المخفف (NaCl) كإلكتروليت داعم. وتكشف النتائج عن تناقص تدريجي ومستمر

في تركيز الصبغة مع زيادة زمن المعالجة، حيث سجل التركيز الابتدائي الأعلى (C) قيمة قدرها 3.86×10^{-5} mol/L، ثم انخفض بشكل ملحوظ ليصل إلى 1×10^{-5} mol/L بعد فترة المعالجة، محققا نسبة إزالة تقارب 74%، ويعود هذا الانخفاض إلى تكوين المادة المخثرة التي تلتقط جزيئات الصبغة. في المقابل ذلك سجل التركيز (A) أدنى قيمة خلال فترة المعالجة.

ومن الملاحظ تقارب التراكيز الثلاثة(A،B,C)تدريجيا واتجاهها نحو حالة التوازن والتشبع. ويتضح من خلال هذه النتائج أن سرعة تناقص تركيز الصبغة تتناسب طرديا مع التركيز الابتدائي، إذ كلما زاد التركيز الأولي للصبغة، كانت سرعة الإزالة أسرع في المراحل الأولى من المعالجة، مما يعكس مدى فعالية العملية الكهروكيميائية في إزالة أزرق الميثيلين من المحلول المائي.

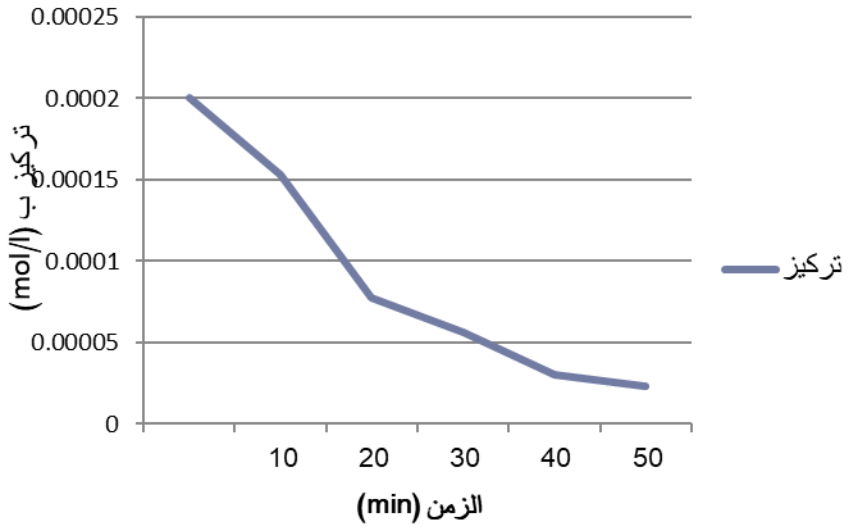
ويمكن تفسير هذه النتائج بالدور الذي تلعبه كلوريد الصوديوم المخففة في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، فعند ذوبانها تتفكك إلى أيونات الصوديوم (Na^+) وأيونات الكلوريد(Cl^-) ، مما يزيد من عدد الأيونات الحرة في الوسط ويعزز التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن انحلال الأنود وتوليد هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة. ومع ذلك، يلاحظ أن تأثيرها يبقى أقل مقارنة بمحلول كلوريد الصوديوم بتركيزه العادي، ويعود ذلك إلى قلة عدد الأيونات المتاحة في الوسط المخفف. كما يلاحظ أن كفاءة الإزالة تزداد بزيادة زمن المعالجة حتى الوصول إلى حالة التوازن.

2.1.III. تأثير تركيز عالية:

1.2.1.III. محلول كبريتات الصوديوم Na_2SO_4 عالي التركيز:

الجدول III–4: قيم التركيز المتبقي للأزرق في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن.

الزمن(min)		10	20	30	40	50
التركيز(mol/L)	2.10^{-4}	$1.53.10^{-4}$	$7.76.10^{-5}$	$5.65.10^{-5}$	$3.06.10^{-6}$	$2.35.10^{-6}$



الشكل III–4: تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور تركيز صبغة أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وجود كبريتات الصوديوم عالية التركيز ($Na_2SO_4^{2-}$) كإلكتروليت داعم. وتكشف النتائج عن انحدار حاد وتناقص مستمر في تركيز الصبغة مع زيادة زمن المعالجة، حيث سجّل التركيز الابتدائي قيمة قدرها (2×10^{-4} mol/L)، ثم انخفض بشكل سريع ليصل إلى (2.35×10^{-5} mol/L) خلال فترة المعالجة، محققاً نسبة إزالة تقارب 88%.

ويتضح من خلال هذه النتائج أن سرعة تناقص تركيز الصبغة تتناسب طرديا مع التركيز الابتدائي، إذ كلما زاد التركيز الأولي للصبغة، كانت سرعة الإزالة أسرع في المراحل الأولى من المعالجة، مما يعكس مدى فعالية العملية الكهروكيميائية في إزالة أزرق الميثيلين من المحلول المائي.

ويمكن تفسير هذه النتائج بالدور الذي تلعبه كبريتات الصوديوم عالية التركيز في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، ويرجع ذلك إلى تفككها وفق المعادلة التالية:

$$Na_2SO_4^{2-} \rightarrow 2Na + SO_4^{2-}$$

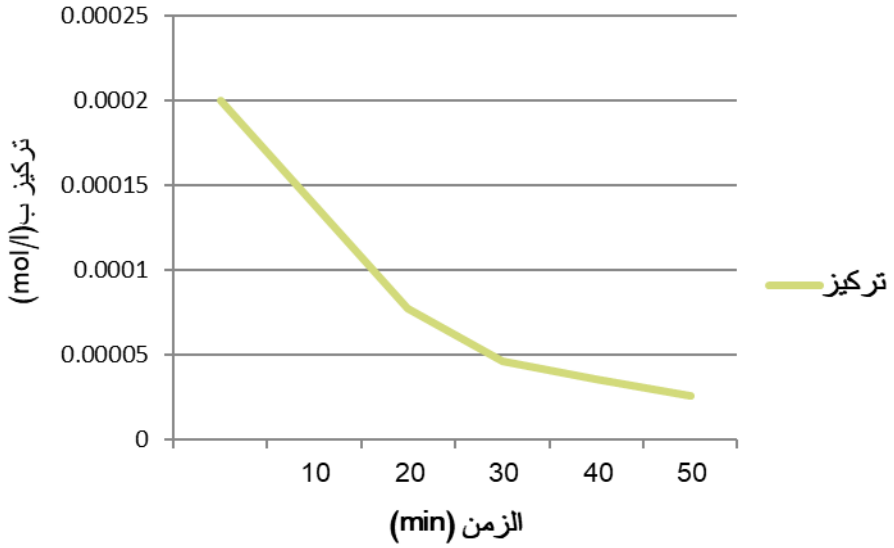
مما يؤدي إلى ارتفاع عدد الأيونات الحرة في الوسط، فيسهّل انتقال التيار الكهربائي داخل الخلية الكهروكيميائية ويعزز التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن انحلال الأنود وتوليد هيدروكسيدات

الألمنيوم المخثرة. كما يلاحظ أن كفاءة الإزالة تزداد بزيادة زمن المعالجة حتى الوصول إلى حالة التوازن الديناميكي.

- **محلول كلوريد الصوديوم $NaCl^-$ عالي التركيز:**

الجدول III–5: قيم التركيز المتبقي للأزرق الميثلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن.

الزمن(min)		10	20	30	40	50
التركيز (mol/L)	2.10^{-4}	$1.38.10^{-4}$	$7.96.10^{-5}$	$4.62.10^{-5}$	$3.59.10^{-5}$	$2.56.10^{-5}$



الشكل III–5: تغير التركيز المتبقي للأزرق الميثيلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور تركيز صبغة أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وسط كلوريد الصوديوم $(NaCl^-)$ عالي التركيز. وتكشف النتائج عن تناقص تدريجي ومستمر في تركيز الصبغة مع زيادة زمن المعالجة، حيث سجل التركيز الابتدائي قيمة قدرها 2×10^{-4} mol/L، ثم انخفض بشكل ملحوظ ليصل إلى 2.56×10^{-5} mol/L خلال فترة المعالجة، محققاً نسبة إزالة تقارب 87.2%، ويعود هذا الانخفاض إلى تكوين المادة المخثرة التي تلتقط جزيئات الصبغة.

ومن خلال ذلك يتضح أن سرعة تناقص تركيز الصبغة تتناسب طرديا مع التركيز الابتدائي، إذ كلما زاد التركيز الأولي للصبغة، كانت سرعة الإزالة أسرع في المراحل الأولى من المعالجة، مما يعكس مدى فعالية العملية الكهروكيميائية في إزالة أزرق الميثيلين من المحلول المائي.

ويرجع هذا الانخفاض إلى تكوين أيونات المعدن عند الأنود نتيجة التفاعلات الكهروكيميائية، والتي تتحول في المحلول المائي إلى هيدروكسيدات معدنية ذات كفاءة عالية في امتزاز جزيئات أزرق الميثيلين وإزالة اللون من المحلول.

وتساهم كلوريد الصوديوم عالية التركيز في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، فعند ذوبانها تتفكك وفق المعادلة التالية:

$$NaCl \rightarrow Na^{+} + Cl^{-}$$

مما يؤدي إلى ارتفاع عدد الأيونات الحرة في الوسط، فييسّر انتقال التيار الكهربائي ويعزز التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن الإزالة. ومع ذلك، فإن الإفراط في التركيز يؤدي إلى استهلاك أقطاب الألمنيوم بشكل أسرع.

- **طريقة الطرد المركزي (centrifuge):**

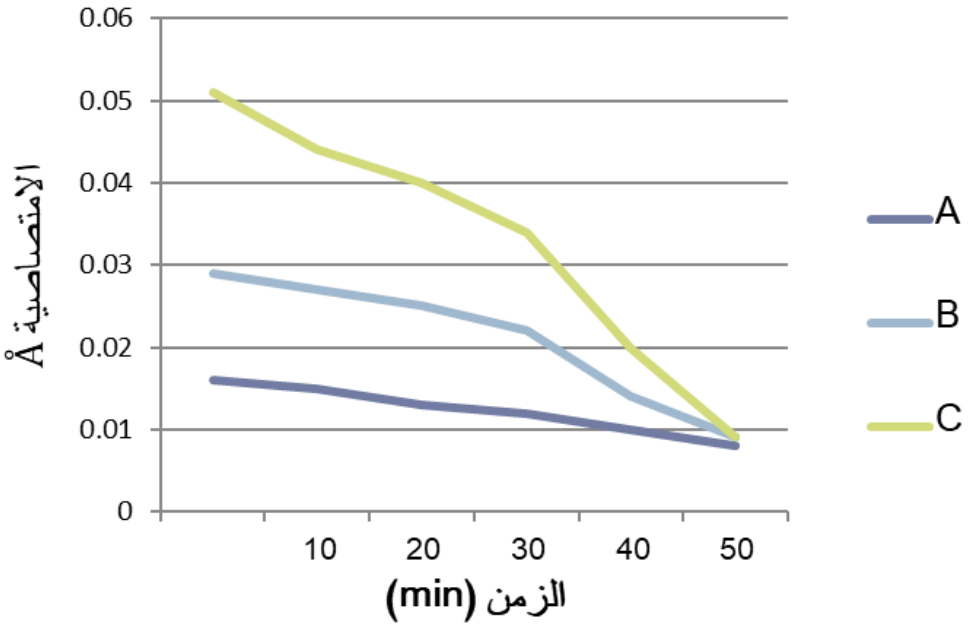
في كل مرة يتم سحب 2ml من العينة عند أزمنة مختلفة ووضعها في أنبوب اختبار مع الحفاظ على ثبات حجم العينة ثم نخضها لعملية الطرد المركزي لمدة 10 دقائق لفصل الرواسب العالقة وتحصل على الراسب.

- **طريقة قياس الأمتصاصية:**

بعد حصول على فصل، تم تشغيل الجهازUV-Vis وبرمجته عند الطول الموجي الأقصى للامتصاص λ_{max} ثم وضع الماء المقطر في خلية القياس بعد تنظيفها من الخارج بواسطة قماش ناعم ونضعه في الجهاز ونضغط على zreo ونقوم بالتصفير بعد ذلك سحب من الطبقة العلوية الرائق للعينة باستخدام ماصة الدقيقة مع حذر سحب من جزء المترسب ثم تنظيف أنبوب من خارج في كل مرة بقماش ناعم من أجل ضمان على نتائج دقيقة.

2.III. تغير الامتصاصية بدلالة الزمن:

- **محلول كبريتات الصوديوم Na_2SO_4:**



الشكل **III–6:** تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين(A،B،C) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة زمن.

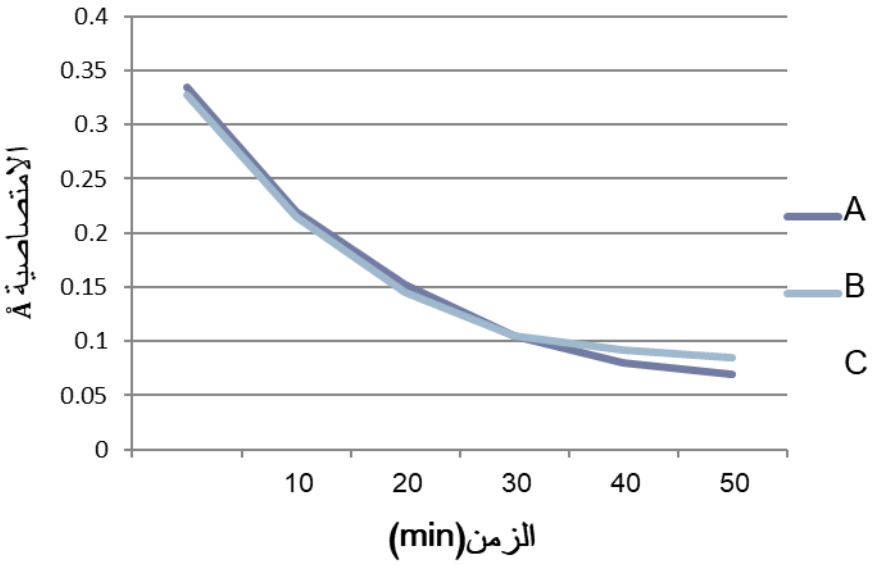
- **مناقشة:**

يبين الشكل تطور امتصاصية أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وسط كبريتات الصوديوم، حيث يلاحظ انخفاض تدريجي ومستمر في قيم الامتصاصية للتراكيز(A، B ، C) مع زيادة زمن التشغيل. ويتوافق هذا السلوك مع قانون بير–لامبرت، مما يعكس فعالية التخثير الكهروكيميائي في إزالة الصبغة.

وقد سجل التركيز (C) أعلى امتصاصية ابتدائية مقدارها 0.05 لتصل إلى0.009 بعد المعالجة، بينما انخفضت امتصاصية (B) من 0.029إلى 0.009 بعد 50 دقيقة، بنسبة انخفاض أكبر مقارنة بـــ (A)

ويرجع هذا انخفاض الامتصاصية إلى دور كبريتات الصوديوم في توفير وسط غني بالأيونات يسهل انتقال التيار الكهربائي، مما يعزز انحلال الأنود وتكوين هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة. وتثبت النتائج أن استعمال كبريتات الصوديوم يساهم بشكل فعال في رفع مردودية المعالجة.

- محلول كلوريد الصوديوم $NaCl^-$:



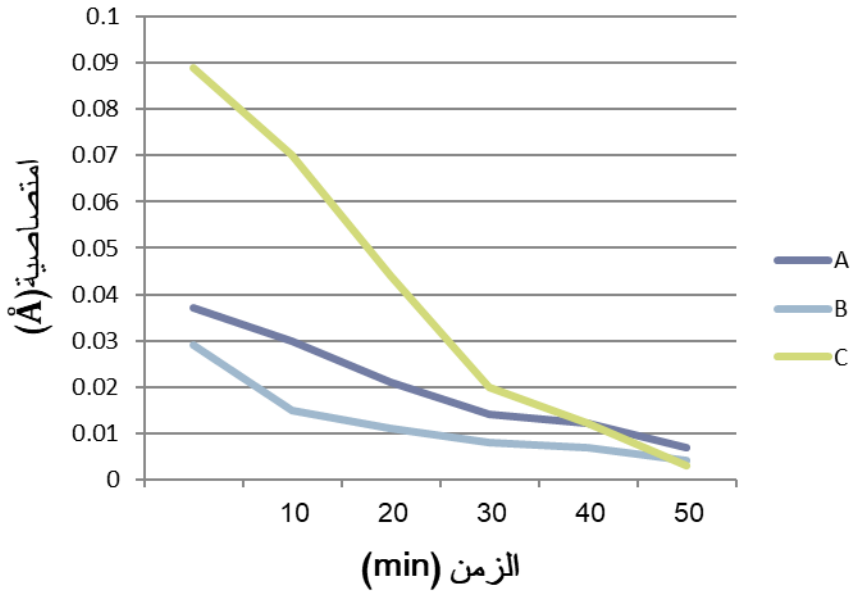
الشكل III–7: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود كلوريد الصوديوم بدلالة زمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور امتصاصية أزرق الميثيلين بدلالة الزمن، خلال عملية التخثير الكهربائي في وسط محلول كلوريد الصوديوم. حيث يتبين انخفاضا تدريجيا ومستمرا في قيم الامتصاصية للتركيز(A,B,C) مع زيادة زمن التشغيل، مما يسبب في انخفاض تركيز الصبغة أزرق الميثيلين في المحلول بفضل فعالية عملية التخثير الكهربائي. ونلاحظ أن C سجل قيمة ابتدائية للامتصاصية مقدارها 0.331، ثم ينخفض بصورة واضحة ليصل إلى 0.086 بعد المعالجة، وفي مقابل نلاحظ انخفاض Bو A من 0.333 إلى 0.084 بعد 50دقيقة من معالجة. وفي نهاية المعالجة تتقارب نحو قيمة الامتصاصية صغرى لتبلغ حالة التوازن.

وبإضافة إلى أيونات الكلوريد التي تعمل على انتاج أنواع مؤكسدة ذات كفاءة عالية لتفكيك جزيئات الصبغة. وتؤكد هذا النتائج أن استعمال كبريتات الصوديوم يساعد في تحسين أداءعملية التخثير الكهربائي.

- محلول كلوريد الصوديوم $NaCl^-$مخفف:



الشكل III–8: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين (A،B،C) في وجود كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة زمن.

- **مناقشة:**

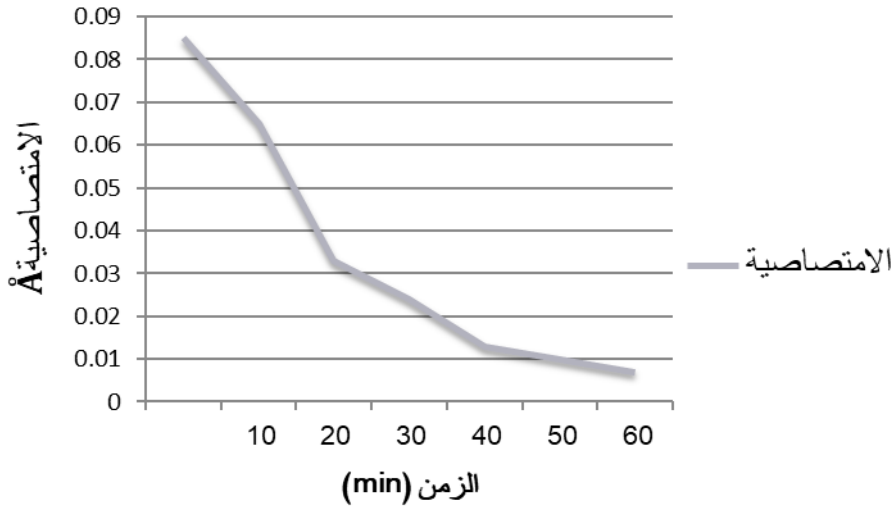
يوضح الشكل تطور امتصاصية صبغة أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة خلال عملية التخثير الكهروكيميائي في وسط كلوريد الصوديوم المخفف ($NaCl^-$) وتبين النتائج عن انخفاض تدريجي ومستمر في قيم الامتصاصية للتراكيز (A ,B,C) مع زيادة زمن التشغيل، مما يؤدي إلى انخفاض مستمر في تركيز الصبغة بالمحلول، ويعكس فعالية عملية التخثير الكهروكيميائي في إزالة الصبغة.

وقد سجل التركيز (C) أعلى قيمة ابتدائية للامتصاصية مقدارها 0.089، ثم انخفضت بصورة واضحة لتصل إلى 0.005 بعد المعالجة. وفي المقابل، نلاحظ انخفاض امتصاصية العينة (B) بشكل أكبر نسبيا مقارنة بـــ(A) ، حيث انتقلت من0.037 إلى 0.004 بعد 50 دقيقة من المعالجة. وفي نهاية المعالجة، تتقارب القيم الثلاث نحو قيمة امتصاصية صغرى، مما يدل على بلوغ النظام حالة التوازن.

ويفسر هذا الانخفاض المستمر في الامتصاصية بانخفاض تركيز الصبغة في المحلول نتيجة إزالتها عبر تكوين الندف المخثرة. وعلى الرغم من استخدام محلول كلوريد الصوديوم المخفف، إلا أنه

ساهم في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، وإن كان ذلك ينتج عنه شدة تيار أقل ومعدل منخفض لتكوّن الأيونات مقارنة بمحلول كلوريد الصوديوم بتركيزه العادي، مما يفسر الفارق في كفاءة الإزالة بين الوسطين.

- **محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز:**



الشكل **III–9:** تغير الامتصاصية للأزرق الميثلين في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز بدلالة زمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور امتصاصية صبغة أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وسط كبريتات الصوديوم ($Na_2So_4^{2-}$) عالي التركيز. وتكشف النتائج عن انخفاض حاد وسريع في قيم الامتصاصية مع زيادة زمن التشغيل، مما يؤدي إلى انخفاض مستمر في تركيز الصبغة بالمحلول، ويعكس فعالية عملية التخثير الكهروكيميائي في إزالة الصبغة.

وقد بلغت الامتصاصية الابتدائية قيمة تقارب 0.085 عند بدء المعالجة، ثم انخفضت بصورة واضحة لتصل إلى 0.006 بعد 60 دقيقة من المعالجة، محققةً نسبة إزالة تقارب 92.9% وفي نهاية المعالجة، تتقارب القيم نحو حد أدنى واحد يدل على بلوغ النظام حالة التوازن الديناميكي.

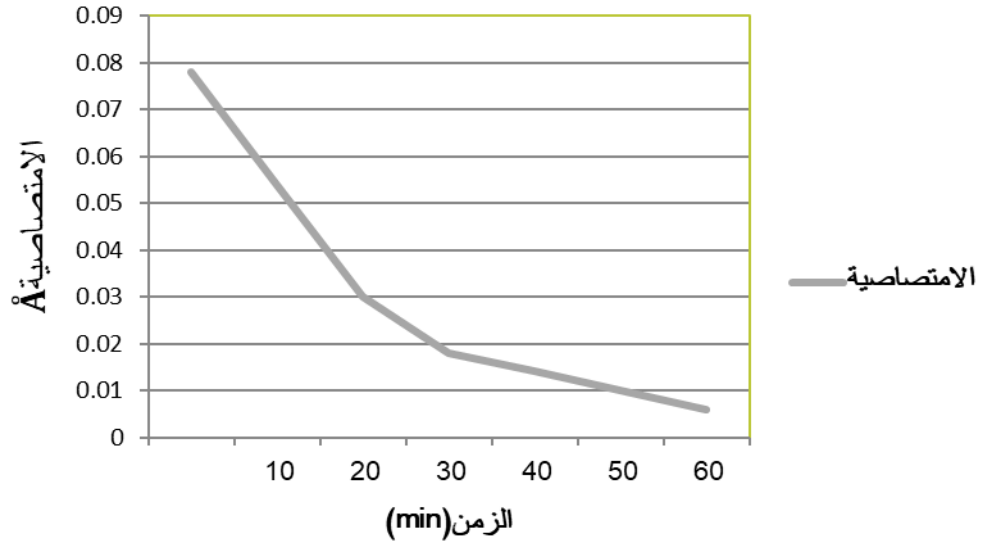
ويفسر هذا الانخفاض الحاد في الامتصاصية بالعلاقة الطردية بينها وبين تركيز الصبغة وفقا لـــقانون بير–لامبرت (Beer-Lambert):

$$A = \varepsilon . l . C$$

حيث (A) هي الامتصاصية، و (ε) معامل الامتصاص المولي، و (l) مسار الضوء، و (C) التركيز.

كما يرجع الانخفاض إلى دور كبريتات الصوديوم عالية التركيز في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول، بفضل ارتفاع عدد الأيونات الحرة(Na^+) و(SO_4^{2-})، مما يعزز انحلال الأنود وتوليد هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة المسؤولة عن إزالة الصبغة بكفاءة عالية.

- **محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز:**



الشكل III–10: تغير الامتصاصية للأزرق الميثيلين في وجود كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة زمن.

- **مناقشة:**

يوضح الشكل تطور امتصاصية صبغة أزرق الميثيلين بدلالة زمن المعالجة في وسط كلوريد الصوديوم ($NaCl^-$) عالي التركيز. وتكشف النتائج عن انخفاض حاد وسريع في قيم الامتصاصية مع

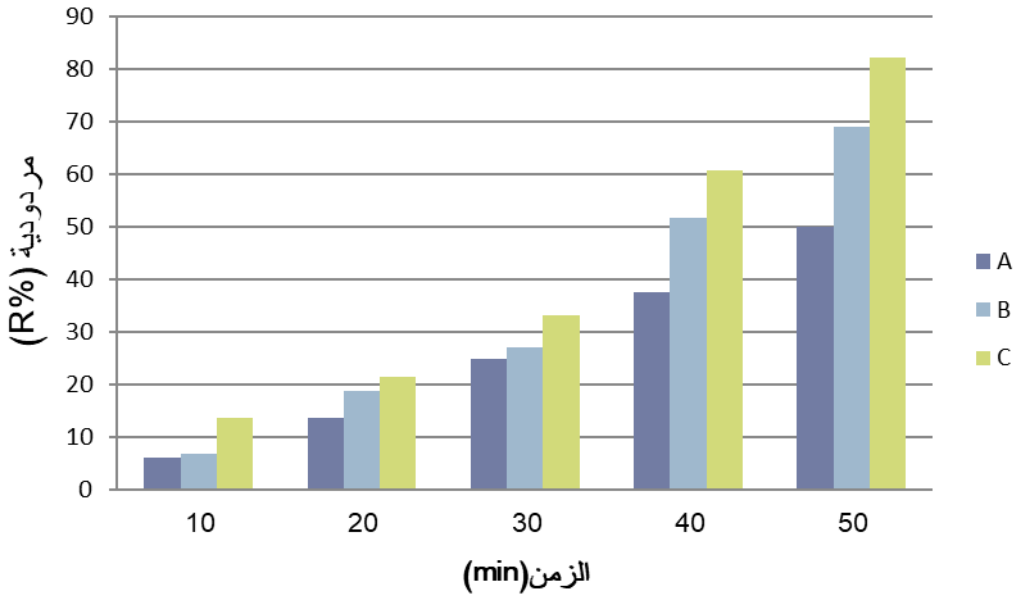
زيادة زمن التشغيل، مما يؤدي إلى انخفاض مستمر في تركيز الصبغة بالمحلول، ويعكس فعالية عملية التخثير الكهروكيميائي في إزالة الصبغة.

وقد بلغت الامتصاصية الابتدائية قيمة تقارب 0.078 عند بدء المعالجة، ثم انخفضت بصورة واضحة لتصل إلى 0.006 بعد ساعة من إتمام المعالجة، محققة نسبة إزالة تقارب 92.3%. وفي نهاية المعالجة، تتقارب القيم نحو حد أدنى واحد يدل على بلوغ النظام حالة التوازن الديناميكي.

ويفسر هذا الانخفاض الحاد في الامتصاصية بالعلاقة الطردية بينها وبين تركيز الصبغة وفقا لـــقانون بير–لامبرت (Beer-Lambert).

3.III. تغير المردودية بدلالة الزمن:

- **محلول كبريتات الصوديوم:**



الشكل III–11: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن معالجة.

- **مناقشة:**

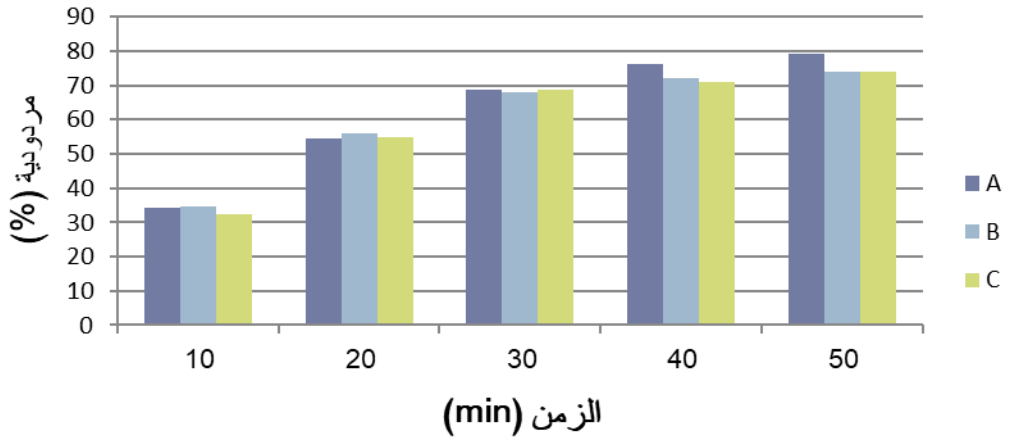
يبين الشكل تطور مردودية إزالة صبغة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كبريتات الصوديوم ($Na_2SO_4^{2-}$) كإلكتروليت داعم خلال عملية التخثير الكهروكيميائي. وتكشف النتائج عن ارتفاع تدريجي ومستمر في مردودية الإزالة مع زيادة زمن المعالجة.

فقد سجلت المردودية خلال الفترة الأولى من المعالجة (من 0 إلى 20 دقيقة) قيما متدنية نسبيا تراوحت بين 6% و 14%، ويعود ذلك إلى حاجة العملية لفترة زمنية كافية لإنتاج كميات ذات كفاءة عالية من المواد المخثرة هيدروكسيدات الألمنيوم.

لتشهد بعد ذلك ارتفاعا معتبرا خلال الفترة الممتدة من 30 إلى 50 دقيقة، حيث سجلت في نهاية المعالجة أعلى قيم للمردودية، إذ بلغت 50% للعينة (A) ، و 70% للعينة (B) ، و 80% للعينة.(C)

ويتضح من خلال هذه النتائج أن التركيز (C) سجل أعلى نسبة إزالة مقارنة بـــ(A) و(B)، وهو ما يعكس أن التغير في التركيز الابتدائي للصبغة يؤثر تأثيرا مباشرا على كفاءة الإزالة، فضلا عن دور كبريتات الصوديوم في تسهيل مرور التيار الكهربائي عبر المحلول. وتؤكد النتائج في مجملها أن زمن المعالجة يشكل عاملا أساسيا في رفع مردودية العملية.

- **محلول كلوريد الصوديوم:**



الشكل III–12: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة مع الزمن المعالجة.

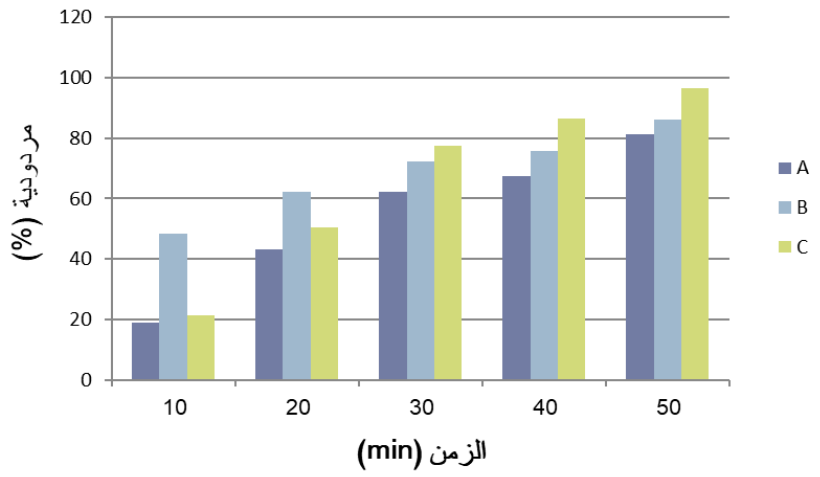
- **مناقشة:**

يبين الشكل تطور مردودية إزالة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كلوريد الصوديوم كإلكتروليت داعم في عملية التخثير الكهربائي. تظهر نتائج ارتفاعا تدريجيا في مردودية

مع زيادة زمن المعالجة. حيث سجلت في بداية معالجة عند 10 دقائق قيم متقاربة تتراوح بين 32% و35%، لتشهد بعد ذلك ارتفاعا مستمر حيث بلغت عند 20 دقيقة مابين 54% و56%، وعند 30 دقيقة تراوحت بين 68% و69%، لتصل عند قيم مرتفعة عند 40 دقيقة بين 71% و76%، وبعد ذلك تستقر عند 50 دقيقة وتسجل عند نهاية معالجة أعلى قيم بلغت ما بين 74% و79 %.

كما يتضح من خلال نتائج أنA أعلى نسبة إزالة مقارنة بـC وB، ويرجع هذا التحسن لكفاءة النظام الكهروكيميائي مع زيادة الزمن. وأن استخدام كلوريد الصوديوم يؤدي سهولة انتقال تيار كهربائي.

- **محلول كلوريد الصوديوم المخفف:**

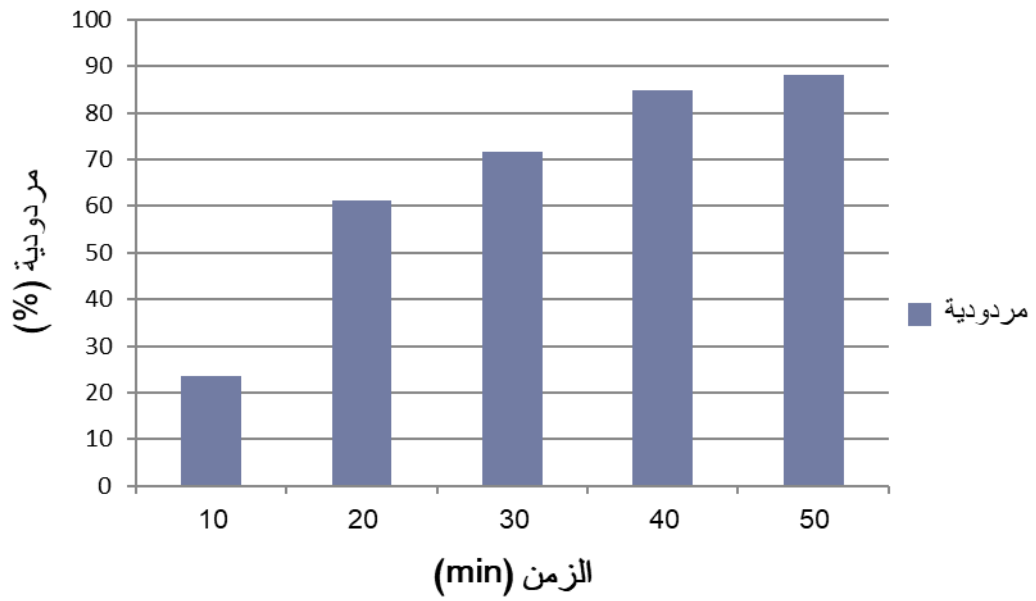


الشكل III–13: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين(C،B،A) في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف بدلالة الزمن المعالجة.

- **مناقشة:**

يبين الشكل تطور مردودية إزالة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كلوريد الصوديوم المخفف كإلكتروليت داعم في عملية التخثير الكهربائي. تبين نتائج ارتفاعا تدريجيا في مردودية مع زيادة زمن المعالجة ما يلاحظ زيادة في المردودية في بداية معالجة، ثم تواصل الارتفاع، حيث سجل C أعلى مردودية عند نهاية معالجة بلغت 93% بعد 50دقيقة من زمن معالجة وبلغت B 83% وA 78%ويرجع ذلك ألى زيادة تركيز الصبغة، يرجع هذا زيادة في المردودية إلى وجود إلكتروليت الكلوريد وزمن المعالجة.

- **محلول كبريتات الصوديوم عالي تركيز:**



الشكل III–14: تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين في وجود كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن المعالجة.

- **مناقشة :**

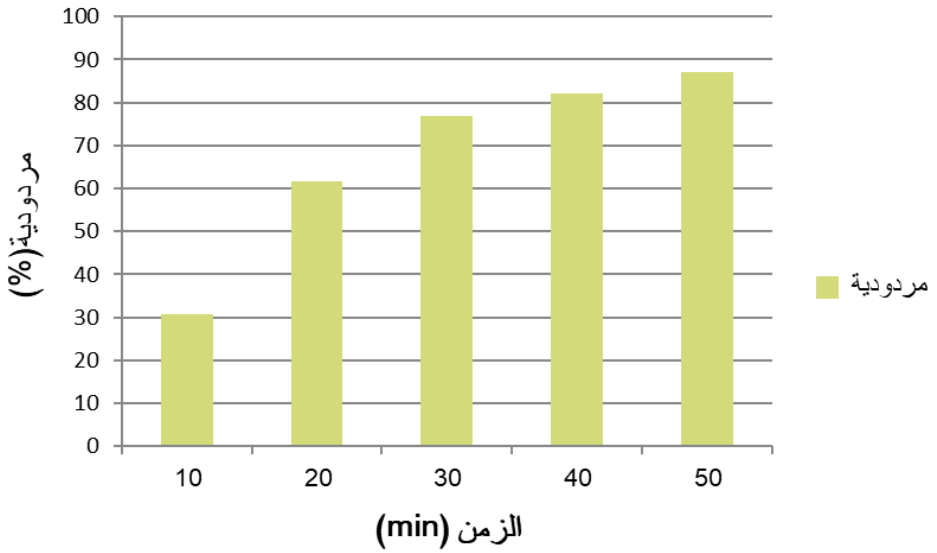
يبين الشكل تطور مردودية إزالة صبغة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كبريتات الصوديوم ($Na_2SO_4^{2-}$) عالي التركيز كإلكتروليت داعم. وتكشف النتائج عن ارتفاع تدريجي ومستمر في مردودية الإزالة مع زيادة زمن المعالجة، حيث بلغت المردودية 24%

عند 10 دقائق، ثم ارتفعت لتصل إلى 61% عند 20 دقيقة، و 72%عند 30 دقيقة، و85% عند 40 دقيقة، لتستقر عند 88% بعد 50 دقيقة من المعالجة.

ويدل هذا الارتفاع المستمر في المردودية مع الزمن إلى الزيادة التراكمية في كمية هيدروكسيدات الألمنيوم $(Al(HO)_3)$المتكونة عند الأنود، والتي تعمل كمواد مخثرة فعّالة في التقاط جزيئات الصبغة وإزالتها من المحلول.

وتشير النتائج إلى أن الزمن الأمثل للمعالجة يتراوح بين 40 و50 دقيقة، حيث تتحقق في هذه الفترة مردودية مرتفعة تفوق 85%، مع ملاحظة أن الزيادة في المردودية بعد 40 دقيقة تكون طفيفة (من 85% إلى 88%)، مما يدل على اقتراب النظام من حالة التوازن الديناميكي.

- **محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز:**



الشكل **III–15:** تطور نسبة لإزالة أزرق الميثيلين في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن المعالجة.

- **مناقشة :**

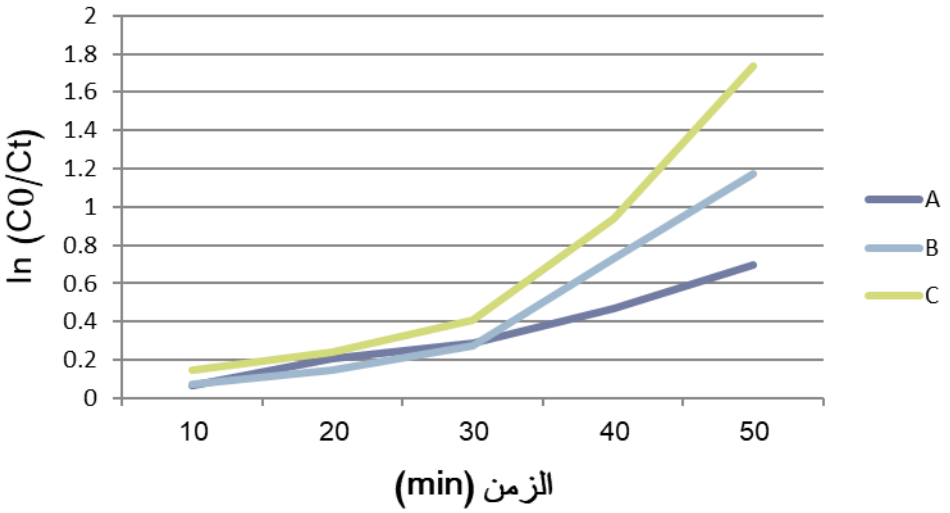
يوضح الشكل تطور مردودية إزالة صبغة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كلوريد الصوديوم $(NaCl^-)$عالي التركيز كإلكتروليت داعم خلال عملية

التخثير الكهروكيميائي. وتكشف النتائج عن ارتفاع تدريجي ومستمر في مردودية الإزالة مع زيادة زمن المعالجة، حيث بلغت المردودية 30% عند 10 دقائق، ثم ارتفعت لتصل إلى62% عند 20 دقيقة، و 78%عند 30 دقيقة، و 81%عند 40 دقيقة، لتستقر عند 89% بعد 50 دقيقة من المعالجة.

ويعود هذا الارتفاع المستمر في المردودية مع الزمن إلى ارتفاع التوصيلية الكهربائية للمحلول الناتج عن التركيز العالي لكلوريد الصوديوم، مما يسهم في تسهيل مرور التيار الكهربائي وزيادة شدته داخل الخلية الكهروكيميائية، وبالتالي تعزيز الانحلال الأنودي للألمنيوم وتوليد كميات أكبر من هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة $(Al(HO)_3)$ التي تلتقط جزيئات الصبغة وتزيلها من المحلول

III.4. دراسة الحركية:

- **محلول كبريتات الصوديوم(Na_2SO_4) :**



الشكل III-16: تطور قيمة $\ln(C_0/C_t)$ في وجود محلول كبريتات الصوديوم بدلالة الزمن.

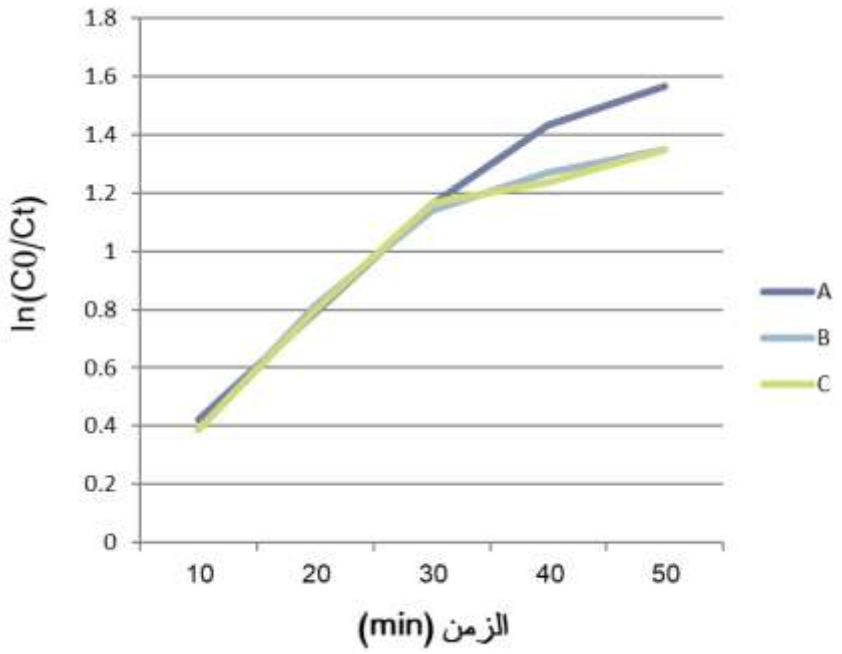
- **مناقشة:**

يبين الشكل تطور مردودية إزالة صبغة أزرق الميثيلين (R) بدلالة زمن المعالجة الكهروكيميائية في وجود كلوريد الصوديوم $(NaCl^-)$ عالي التركيز كإلكتروليت داعم خلال عملية التخثير الكهروكيميائي. وتكشف النتائج عن ارتفاع تدريجي ومستمر في مردودية الإزالة مع زيادة زمن

المعالجة، حيث بلغت المردودية 30% عند 10 دقائق، ثم ارتفعت لتصل إلى 62% عند 20 دقيقة، و 78%عند 30 دقيقة، و 81% عند 40 دقيقة، لتستقر عند 89% بعد 50 دقيقة من المعالجة.

ويرجع هذا الارتفاع المستمر في المردودية مع الزمن إلى ارتفاع التوصيلية الكهربائية للمحلول الناتج عن التركيز العالي لكلوريد الصوديوم، مما يسهم في تسهيل مرور التيار الكهربائي وزيادة شدته داخل الخلية الكهروكيميائية، وبالتالي تعزيز الانحلال الأنودي للألمنيوم وتوليد كميات أكبر من هيدروكسيدات الألمنيوم المخثرة $(Al(OH)_3)$ التي تلتقط جزيئات الصبغة وتزيلها من المحلول. كما تلعب أيونات الكلوريد (Cl^-) دورا محوريا في منع تكوين طبقة الأكسيد العازلة على سطح الأنود، مما يضمن الانحلال المستمر للألمنيوم ويحافظ على كفاءة العملية طوال فترة المعالجة.

- **محلول كلوريد الصوديوم$(NaCl^-)$:**



الشكل III–17: تطور قيمة $\ln(C_0/C_t)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم بدلالة الزمن.

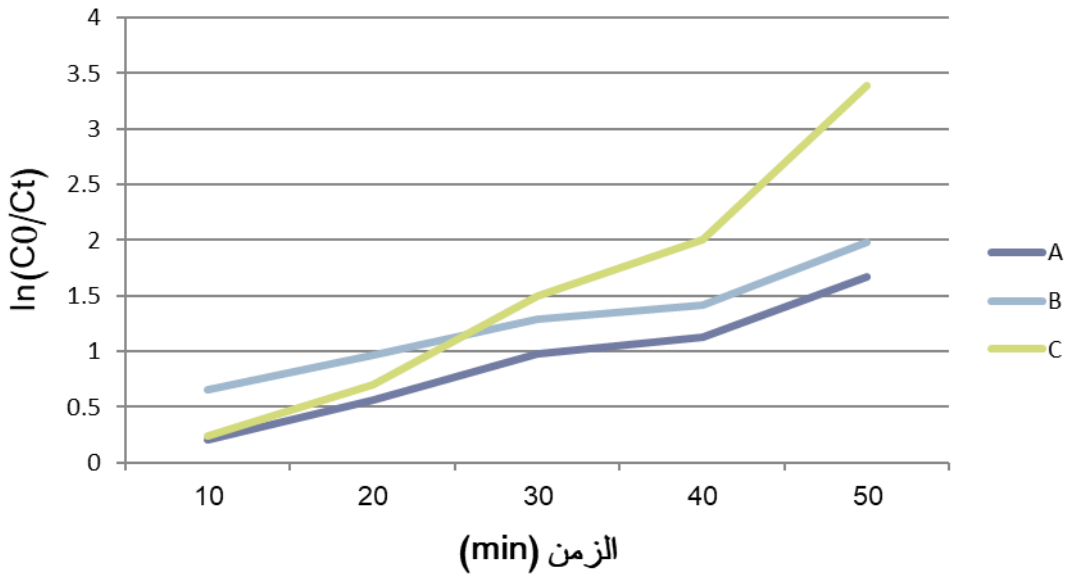
- **مناقشة :**

يمثل الشكل تطور الدالة الحركية بدلالة الزمن عند استعمال محلول كلوريد الصوديوم كاداعم في عملية التخثير الكهربائي وظهور سلوك حركيا متقارب للغاية مما يشير إلى توافق العملية مع نموذج

الحركية من الرتبة الأولى.كما يتضح أن قيم $\ln(C_0/C_t)$ تتزايد بشكل خطي وتقارب واضح في نتائج التجربة لكل من (A,B,C) مع زيادة في زمن المعالجة مع انحراف طفيف لها. مما يدل على ارتباطه الطردي بين معدل الإزالة والتركيز المتبقي للصبغة وفق العلاقة: $Kt = \ln(C_0/C_t)$.

ويعود تفسير هذا زيادة الملحوظة طوال فترة المعالجة بين 10و40 دقيقة إلى توفر شدة تيار مستقرة ومعدل انحلال أنودي ثابت للألمنيوم عند استخدام كبريتات الصوديوم، وتؤكد نتائج أن زمن معالجة يعتبر عامل أساسي في رفع كفاءة وتحسين إزالة الصبغة.

- **محلول كلوريد الصوديوم المخفف($NaCl^-$):**



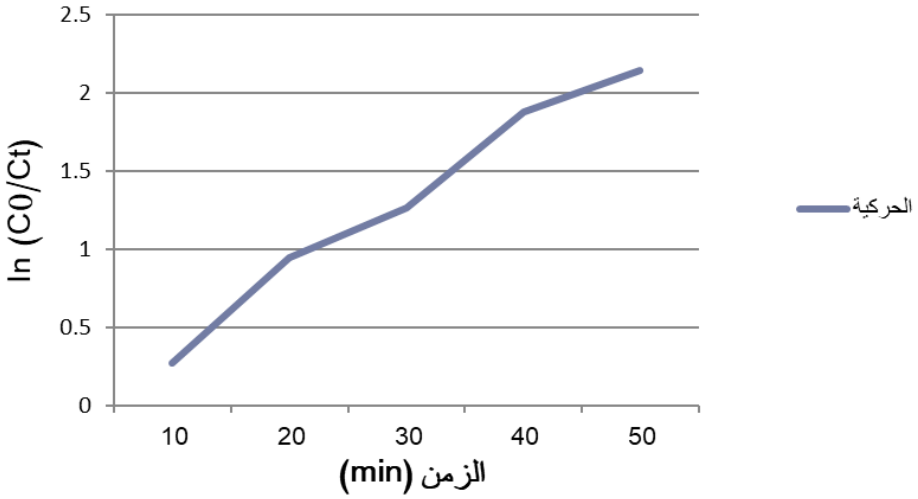
الشكل III–18: تطور قيمة $\ln(C_0/C_t)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم المخفف.

مناقشة:

يمثل الشكل تطور دالة الحركية بدلالة زمن المعالجة في وجود كلوريد الصوديوم المخفف كإلكتروليت داعم خلال عملية التخثير الكهروكيميائي، ويظهر سلوكا حركيا يتوافق مع نموذج الرتبة الأولى الظاهرية وتكشف النتائج عن تزايد ملحوظ في قيم$\ln(C_0/C_t)$ التراكيز الثلاثة (A,B,C) مع زيادة زمن المعالجة، مما يدل على وجود ارتباط طردي بين معدل الإزالة والتركيز المتبقي للصبغة وفق العلاقة الحركية التالية:

$$ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k.t \ \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

- **محلول كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4)عالي تركيز:**



الشكل III-19: تطور قيمة $\ln(C_0/C_t)$ في وجود محلول كبريتات الصوديوم عالي التركيز بدلالة الزمن

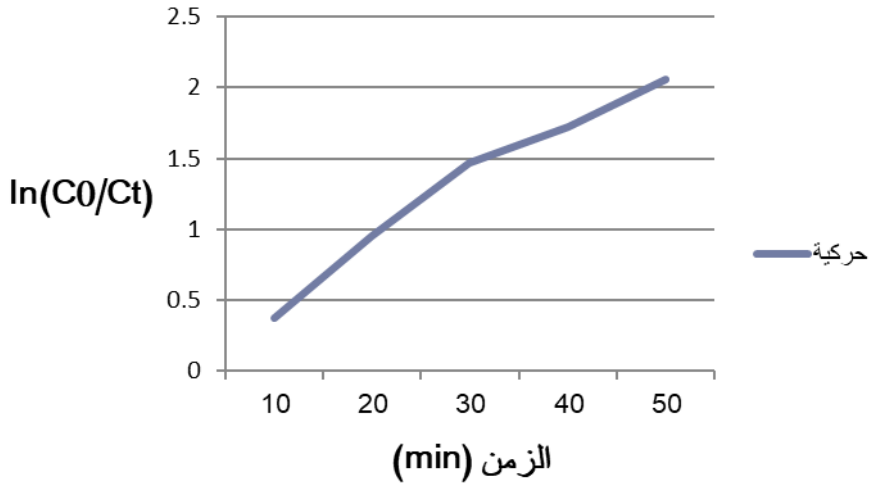
- **مناقشة:**

يمثل الشكل تطور لدالة الحركية بدلالة الزمن عند استعمال محلول كبريتات الصوديوم عالى تركيز كاداعم في عملية التخثير الكهربائي وظهور سلوك حركيا مما يشير إلى توافق العملية مع نموذج الحركي من الرتبة الأولى. حيث نلاحظ تزايد بشكل شبه خطي في قيم $\ln(C_0/C_t)$ مع زيادة في المعالجة عند 50 دقيقة. مما يدل على ارتباطه الطردي بين معدل الإزالة والتركيز المتبقي للصبغة وفق العلاقة:

$$Kt = \ln(C_0/C_t).$$

ويعود تفسير هذا زيادة إلى كمية الهيدروكسيد المعدنية المتشكلة كهربائيا نتيجة استخدام كبريتات الصوديوم عالي تركيز، وأن كل زيادة في قيم الحركية يؤدي إلى تحسين كفاءة إزالة الصبغة.

- محلول كلوريد الصوديوم ($NaCl^-$) عالي تركيز:



الشكل III–20: تطور قيمة $\ln(C_0/C_t)$ في وجود محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز بدلالة الزمن.

- مناقشة :

يمثل الشكل تطور لدالة الحركية بدلالة الزمن عند استعمال محلول كلوريد الصوديوم عالى تركيز كاداعم في عملية التخثير الكهربائي وظهور سلوك حركيا يعكس توافق حركي مع الرتبة الأولى. حيث نلاحظ تزايد بشكل شبه خطي في قيم $\ln(C_0/C_t)$ مع زيادة في المعالجة. مما يدل على ارتباطه الطردي بين معدل الإزالة والتركيز المتبقي للصبغة وفق العلاقة:

$$Kt = \ln(C_0/C_t).$$

ويعود هذا سلوك خطي مستقر لناقلية الكهربائية عالية لمحلول كلوريد الصوديوم مركز إلى ضبط شدة تيار ومعدل انحلال أنودي للألمنيوم.

5.III. دراسة تأثير نوع الإلكتروليت:

1.5.III. تأثير Na_2SO_4:

على الرغم من أن أنيونات الكبريتات عوامل غير فعالة على الأسطح الألمنيوم. (102) الذي يحافظ الطبقة الأكسيدية وهو الذي يعقد تكوين كاتيونات الألمنيوم المتخثرة، (103) أن أغلب دراسات تستخدمه لتوفير موصلية إلا أنه يتسبب باستهلاكها. (104)

2.5.III. تأثير $NaCl^{-}$:

من مؤكد عند إضافة كلوريد الصوديوم يخفض الجهد U بين الأقطاب الكهربائية عند كثافة تيار ثابتة، ويرجع ذلك الانخفاض مقاومة المياه الملوثة. (105) وعليه ينبغي أن ينخفض استهلاك الطاقة ليتناسب مع الجهد المطبق بين الأقطاب. وقد تم اختيار كلوريد الصوديوم إلى أنه أيونات الكلوريد تقلل من الآثار الغير مرغوبة فيها. (106)

2.5.III. تأثير مسافة بين الأقطاب:

- يوضح خلال عملية التخثير كلما كانت مسافة بين الأقطاب الكهربائية صغيرة. (107) تصبح كثافة التيار عالية جدا ويمكن أن تسبب تلامس كهربائي بين بعضه البعض. لذلك يوصي العديد من المؤلفين بمسافة 2 سم بين هذا الأقطاب. (108)
- أن المسافة بين الأقطاب الكهربائية تكون مرتبطة ارتباطًا قويا بالموصلية وبالقطب. (109) في الجهاز توضع الأقطاب الكهربائية بشكل متوازي. (110)

الخاتمة العامة

الخاتمة:

في هذا الدراسة تم استخدام الصبغة أزرق الميثيلين كملوث نموذجي لتقييم مدى فعالية تقنية التخثير الكهربائي في معالجة المياه وإزالتها باستعمال أقطاب الألمنيوم.

ويمكن تلخيص أهم نتائج هذا الدراسة كما يلي:

- ✓ أظهرت الدراسة أن طبيعة الإلكتروليت تلعب دورا جوهريا في تحسين الناقلية وارتفاع فاعلية التخثير الكهربائي.
- ✓ بينت الدراسة مردودية إزالة أزرق الميثيلين بلغت 88% عند استخدام كبريتات الصوديوم كإلكتروليت داعم، و92% عند استخدام كلوريد الصوديوم، مما يدل على فعالية عملية التخثير الكهربائي مع تفوق كلوريد الصوديوم في تحسين عملية الإزالة.
- ✓ كما أظهرت الدراسة أن فعالية عملية التخثير الكهربائي تتأثر بعدة عوامل تشغيلية، أهمها شدة التيار، زمن المعالجة، تركيز الإلكتروليت، ودرجة الحموضة، حيث يؤدي التحكم الجيد في هذه المعايير إلى رفع نسبة إزالة الصبغة وتقليل استهلاك الطاقة الكهربائية.

وتؤكد هذه الدراسة أن تقنية التخثير الكهربائي باستعمال أقطاب الألمنيوم تعد طريقة فعالة، وبسيطة وصديقة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة بالأصباغ، كما أنها تحقق مردودا عالي. وتتيح هذه النتائج إلى إجراء دراسات مستقبلية تهدف إلى تحسين ظروف التشغيل وتوسيع تطبيق هذه التقنية لمعالجة أنواع مختلفة من الملوثات الصناعية.

قائمة المراجع

1. وهدان أيمن غازي الأمن المائي، دار أمجد للنشر والتوزيع، عمان، 2014.

2. محمد عبد الكريم قعدان الحياة الخضراء، التلوث، الطبعة العربية الأولى العبيكان للنشر، 2016.

3. et al. Adsorption du benzo (a) pyrene sur du charbon GNONSORO.

4. "Adsorption O. S. Omer، and A. Mgaidi،M. A. Hussein B. H. Hussein .

5. M. Al-Amshawee،Umar & ،. M. J. K، Bashir، M.، Aziz، M. S.، Yusoff،S. .

6. A — 251-273. ALI H. (2010). Biodégradation of SyntheticDyes، 213(1)،Soil Pollution& ،Air Review. Water.

7. J. J. (1996). Aquatic Chemistry: Chemical Stumm،Morgan & ،.W .

8. Crittenden & ،. K. J، Howe، D. W.، Hand، R. R.، Trussell،J. C..

9. التلوث البيئي وباء عصر العولمة، وكالة الصحافة العربية، الجيزة جمهورية العربية،. مصر 2019 سيد عبد النبي محمد.

10. February 15). Water pollution. In Encyclopædia Britannica. Nathanson،J. A. (2026 .

11. 2007، تحليل وتقويم جودة المياه. جورجي نسيم ماهر.

12. معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية. ابراهيم العابد 2015.

13. southern Iraq. Egypt. J. ، 2017. Water quality index for Al-Gharraf river، S.A.، Abed،S.H. http://dx.doi.org/10.1016/j. ejar.201703001 Ewaid .122– 117،Aquatic Res. 43 (2).

14. كلية التربية البنات–كلية العلوم، جامعة تكريت– بغداد، العراق ص 64-67 ماي 2017 قسم علوم الحياة–قسم التقنيات الإحيائية.

15. كتاب الماء بين العلم والإيمان، الطبعة الأولى دار زهرات للنشر والتوزيع ص 308-307-306. هاني عبد القادر عمارة 2011.

16. ص 6. أبو سعد نجيب إبراهيم التلوث البيئي ودور الكائنات الدقيقة ايجابياوسلبيا دار الفكر العربي القاهرة 2000.

17. أساسيات علم البيئة والتلوث، دار البازوري العلمية، عمان2006. السعدي حسين علي.

18. 2014 ، vers un proced fenton heterogene pour le traitement en continu d'eau polluee par des pollunts pharmaceutiques، doctorat université de Toulouse V.FILIPA ALEKSANDORA p.226.

19. 2014–eau de la ’physico-chimique et bactériologique de l étude de la qualité’l à Contribution » source de la source’chimique et bactériologique de l étude de la qualité’l à Contribution » source (Attar « H étude de la qualité’l à Tlemcen Contribution SARI.

20. structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared ،Ni doping effect on the electronic by Co-precipitation route، Optical Materials، 128 (2022)، R. Amari et al. p. 112398 .

21. M. SATIN و B. 1995: Guide technique de l'assainissement: Evacuation des eaux usées et pluviales épuration des eaux et protection de l'environnement ، conception et composant des réseaux، exploitation et gestion des systèmes d'assainissement. SELMI.

22. 2005، 9 Tomel. Mémento technique de l'eau DEGREMANT 6p ème.

23. Environmental Pollution،December 2017، Al-Balqa' Applied University، ResearchGate Abdal kareem M.A Dawagreh.

24. التلوث البيئي وطرق معالجته–سيكولوجية الألوان وتأثيرها في بيئة العمل، مديرية الجودة والسلامة المهنية والبيئة، الشركة العامة لمصفاة حمص. سمير خالد.

25. ط.إسماعيل كاخيا.كتاب معالجة مياه للأغراض الصناعية وغيرها ص 10.

26. كلية التربية العلوم الصرفة، جامعة بصرة 2، مجلة أبحاث البصرة) العمليات(، العدد40، ا ع.ك.جحيل الحميداوي ون.م. علي وادي العبيدي.استخدام مستخلص أوراق الكونوكاربس كمخثر طبيعي أو مساعد للتخثير مع الشبة وكلوريد الحديديك في إزالة عكارة المياه 2013.قسم الكيمياء.

27. MRWA (2003): Coagulation and Flocculation Process Fundamentals. MRWA: Minnesota Rural Water Association URL [Accessed:26.04.2026].

28. Physicochemical treatment processes،Humana Press، Handbook of Enviromnmental Engineering، New Jersey،Totowa . Volume 3 Lawrence K.Wang et al.

29. Pages 185-267. Shahryar ، Elsevier 2017،Petroleum Waste Treatment and Pollution Control Jafarinejad.

30. Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales. Tomes I: La collecte،H. Guerre ، 512 p C. Gomella، 1983،Edition: Eyrolles. Paris .

31. KONE.D و2002. macrophytes en afrique à Epuration des usées par lagunage a microphytes et épuration et critères de dimensionnement. Thèse de l'Ouest et de centre: Etat des lieux performances Lausanne. EPFL. pp 17-30-31 .°2653N.

32. G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Chen.

33. Humana Press، Handbook of Enviromnmental Engineering،Physicochemical treatment processes، Volume 3 Lawrence K.Wang et al، New Jersey،Totowa .

34. 2015. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic ، C.A.، Martínez-Huitle،E. dyes by electrochemical methods. An updated review. Appl. Catal. B Environ. 166، 167–603، 643. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016 Brillas.

35. 4-، P. Péringer et C. Comninellis (1994) Electrochemical detoxication of a 1،N. Adler benzoquinone solution in wastewater treatment. Water Res.، 28(4)، Pulgarin C، 887-893 .

36. VALORISATION DU NOYAU D'ABRICOT DANS LA Mr. ABBAS M.

37. Adsorptive Removal of Methylene Blue from Enenebeaku. K،et al .

38. Arthur. D Broadbent Université،Basic Principles of Textile Coloration.

39. بلال عبد الوهاب رفاعي، كيمياء وتقنيات الصباغة والطباعة النسيجية، الجزء الأول، جامعة.

40. Elimination de deux colorants de l'industrie textile par Men our Zahira.

41. Etude de la degradation photocatalytique d'un MC BENAISSA A.

42. Les colorants organiques utilizes en Regardant Set William B.

43. Étude de dégradation des colorants de textile parles Hammami.S.

44. van Wageningen Frank P. van der Zee،Anaerobic azo dye reduction .

45. B.H. Hameed Chitosan-clay composite as highly effective M. Auta.

46. F. M. Gheada، A. Shokrollahi، M. Montazerozohori،H. Hosseinian .

47. P.V. Vijay Babu. Studies on the adsorption of Brilliant Venkat S. Mane.

48. C. Hou، B. Hu و J. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Zhu.

49. G. Lu، وآخرون.

50. M. Oz، وآخرون.

51. M. Marimuthu، وآخرون.

52. M.K. Uddin و A. Decolorization of Basic Dyes Solution by Nasar.

53. B. Saha، وآخرون.

54. R.H. Schirmer، وآخرون.

55. D. Balarak، وآخرون.

56. S. Parakala، S. Moulik و S. Effective separation of methylene Sridhar.

57. A.H. Mijinyawa، G. Durga و A. A sustainable process for Mishra.

58. H. Koyuncu و A.R. Removal of methylene blue dye from aqueous Kul.

59. R.C. Dante، وآخرون.

60. G. De Crozals، وآخرون.

61. N. Zaghari، A. Hafiane و M. Separation of methylene blue Dhahbi.

62. G. López-Carballo، وآخرون.

63. A.A. Hoffmann، وآخرون.

64. Belevstev A.N. (1985). Electrochemical treatment of industrial wastewater. Effluent Water Treatment Journal، 25 (7) Cenkin V.E، p. 243-247 .

65. à application'électrodes en vue de l étude des réactions aux'l à T. Picard. Contribution électrocoagulation. Thèse de doctorat. Universités de Limoges (2000'L).

66. France (2007). M. Bennajah، institut national polytechnique de Toulouse،Thèse de doctorat .

67. Matteson et al 1995، Parga et al 2005 و2007. Ofir et al.

68. C. E. Barrera-Díaz، and B. Bilyeu،P. Balderas-Hernández .

69. BENNAJAH.M. treatment des rejects industrials liquid par.

70. étude experimental et théorique du procédés ZONGO.I.

71. Historical use and future development of chemicals for M.J. Pearse.

72. A review on chemical A.K. Verma، P. Bhunia،R.R. Dash .

73. C. Barrera-Díaz ، M. Palomar-Pardavé، E. Campos،F. Ureña-Nuñez.

74. Adv. J. Gregory، Coagulation by hydrolyzing metal salts،J. Duan .

75. Decolorization of disperse and T.H. Kim، S. Kim، E.B. Shin،Ch. Park .

76. Decolorization of aqueous reactive M. Kobya، M. Sözbir،E. Demibras .

77. A review on application of C.S. Lee، M.F. Chong،J. Robinson .

78. K. Dermentzis، Removal of nickel، E. Valsamidou،A. Christoforidis .

79. W. Wan، D.E. Giammar، S. Chaudhari، T. Banerji،T.J. Pepping .

80. Two-step mineralization of A. Thiam، I. Sirés، E. Brillas،M. Zhou .

81. C.J. Izquierdo، G. Valentin، J.P. Leclerc، M.A. Rodrigo،P. Canizares .

82. Investigation of process W.L. Chou، K.Y. Huang،C.T. Wang .

83. High concentration of arsenate removal C.Y. Hu، W.H. Kuan،S.L. Lo .

84. Electrocoagulation treatment of U.D. Patel، M.U. Patel،J.P. Ruparelia .

85. Effect of co-existing anions on fluoride C.Y. Hu، W.H. Kuan،S.L. Lo .

86. A study on the initiation of pitting B. Lin، C. Lin، Y. Li، C. Ye،R. Hu .

87. On the crucial influence of some J.L. Trampette،H. Vergnes .

88. Effect of anions on electrochemical C.H. Huang، C.L. Yang،L. Chen .

89. E. Bocos، I. Electrocoagulation، I. Sires، M.A. Sanromán،E. Brillas .

90. Enhanced electrocoagulation J.L. Trampette، C. Coufort،H. Vergnes .

91. Pure Appl. J. Gregory، Hydrolyzing metal salts as coagulants،J. Duan .

92. Electrocoagulation of P. Nuñez، C. Maureira، S. Aguirre،H.K. Hansen .

93. removal from T.M. Zewail (+3Cr & + Chromium ions (Cr6،N.S. Yousef.

94. Comparative study of D. Lakshmanan، G. Samanta،D.A. Clifford .

95. Fluoride removal from water T.U. Un، U.B. Ogutveren،A.S. Koparal .

96. E. Lacasa، M.A. Rodrigo، F.J. Fernández، C. Sáez،P. Cañizares .

97. C.A. M.M.S.G. Eiband، J.V.D. Melo، K. Gama، A. Trindade،K.C. De .

98. Continuous T.U. Un، S.E. Ocal، N. Erginel،A. Kandemir .

99. Characterization of the removal of S.S. Hamdan،M.H. El-Naas .

100. "Electrocoagulation D. Ghernaout، and B. Ghernaout،A. Alghamdi .

101. https://fr.genesiswatertech.com/article-de-ce-blog/électrocoagulation-l%27avenir-de-la-technologie-de-traitement-de-l%27eau/.

102. ، Adsorption of sulfate and chloride ions on aluminum، A. Wieckowski،J.C. Polkinghorne
.A. Kolics 2618–Electrochim. Acta 43 (1998) 2605

103. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation ، W.H. Kuan،S.L. Lo
.C.Y. Hu 4523– Water Res. 37 (2003) 4513،process using aluminum electrodes

104. Electrocoagulationofvegetableoilrefinery wastewater using ،U.B.Ogutveren،A.S.Koparal
. J. Environ. Manage. 90 (2009) 428 433. U.T.Un،aluminum electrodes

105. .épuration physico- chimique des eaux. Editions Cebedoc'Liège. Edeline F. (1996). L

106. Sozbir M. (2004). Operating cost analysis of Electrocoagulation of textile ، Can O.T.،Kobya M.
. 117- 125 Bayramoglu M،dye wastewater. Separation and Purification Technology

107. .(1998). Defluoridation of ،Bariou & ،. H، Grib، D.، Belhocine، H.، Lounici، A.R.، Yeddou،N.
septentrional Sahara water of north Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium
.electrods. Water Ressource 1604-1612. Mameri

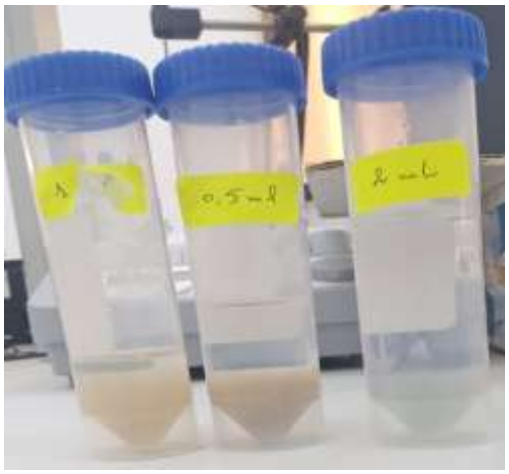
108. S. (2004). Separation of pollutants from tannery effluents by ،Prabhaskar & ،. R، Bhaskar،M.
.electroflotation. Separation and Purification Technology. 69-75. Murugananthan

109. .A. (2003). Decolourization of Daneschvar،Tizpar & ،. H، Ashassi-Sorkhabi،N.

110. F. (2009). ،Lapicque & ،. G، Paternotte، J.P.، Leclerc، G.، Valentin،J. ، Wéthé، A.H.، Maiga،I.
Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes compared
. turbidity and absorbance. Journal Zongo،variation of COD levels

الملاحق

1. **صور العينات تم الحصول عليهم بعد المعالجة:**



الشكل 1: عينات تمثل أوساطا تجريبية بعد معالجة أزرق الميثيلين.

الشكل 2: عينات تمثل أوساطا تجريبية بعد معالجة أزرق الميثيلين.

الشكل 3: عينات تمثل أوساطا تجريبية بعد معالجة أزرق الميثيلين.

الشكل 4: عينة تم حصول عليها بعد معالجة أزرق الميثيلين.

الشكل 5: عينة تم حصول عليها بعد معالجة محلول كلوريد الصوديوم عالي تركيز

قبل المعالجة

بعد المعالجة

الشكل 6: الأقطاب الألمنيوم قبل وبعد معالجة.