

## تقنية التخثير الكهربائي

أ.م.مصعب عبدالجبار عبد الباقي  
آية ثامر ابراهيم  
جامعة الموصل / كلية الهندسة / قسم الهندسة المدنية

تم في هذه الدراسة إزالة العكورة من الماء باستخدام تقنية التخثير الكهربائي. إذ تم تشغيل نظام تخثير كهربائي ذو جريان مستمر يتكون من حوض التخثير الكهربائي بحجم ثابت (2 لتر) وحوض التليد وحوض الترسيب بأحجام مختلفة، تبعا لتغير التصريف الناتج من تغير زمن التخثير الكهربائي. إذ استخدمت (3) (4) ( لقطب السالب من مادة الألمنيوم لكلا القطبين، وكانت أبعاد الصفيحة (17x8) سم وتم تثبيت المسافة بين (1) ( 25 درجة مئوية.

كما تم دراسة تأثير بعض العوامل التشغيلية على كفاءة الإزالة ومن هذه العوامل التيار الكهربائي المار، إذ تم قيم للتيار تتراوح بين (0.1) أمبير فضلا عن أربعة أزمنة للتخثير الكهربائي (1 5 10 20) دقيقة وأربعة مستويات للعكورة الابتدائية المصنعة من إضافة طين الكاولين إلى ماء الاسالة مقدارها (10 25 100 300)

لتجارب العملية أن العكورة المتبقية تقل مع زيادة كمية التيار الكهربائي المار ولجميع مستويات العكورة الابتدائية. كما بينت النتائج أيضا أن العكورة المتبقية تقل مع زيادة زمن التخثير الكهربائي ولجميع مستويات العكورة الابتدائية. ويظهر ذلك واضحا عند التيارات الـ (0.1 0.25 0.5) أمبير، أما عند زيادة التيار (1.0 1.5 2) أمبير فإن مدى التغير بالعكورة المتبقية قليل جدا وخاصة عند زمن التخثير الكهربائي بين (10 20) دقيقة. كما لوحظ أيضا زيادة العكورة المتبقية مع زيادة التركيز الابتدائي للعكورة.

### ABSTRACT

This study search's the removal of turbidity from water by electrocoagulation technique. Bench scale with continuous flow system was designed the system consists of electrocoagulation reactor with volume (2 L), flocculation basin and sedimentation basin with volumes change due to the change in detention time of electrocoagulation. Aluminum plates (17x8) cm were used (3 plates) as the anode and (4 plates) as the cathode, the spacing between plates was taken (1 cm) and the temperature of water was kept at (25°C).

The study investigates the effects of some operating parameters such as, electrical current that ranging from (0.1 – 2) A, detention time of electrocoagulation (1 , 5 , 10 , 20) minutes and initial turbidity variety of the raw water (10 , 25 , 100 , 300) ntu upon the residual turbidity.

Experiment result shows that the residual turbidity decrease with increase value of the electrical current for all values of initial turbidity. Also, the residual turbidity decrease with increase time of electrocoagulation for all values of initial turbidity specially in (0.1 , 0.25 , 0.5) A, when the electrical current increase to (1 , 1.5 , 2) A , the change in residual turbidity was small specialty in time between (10 – 20) minutes. The results also proved that increasing the initial turbidity lead to increase the residual turbidity.

:

جسيمات عالقة فيه مثل دقائق التربة والرمل والطين والمواد العضوية واللاعضوية، كما يمكن أن تكون بسبب وجود كائنات حية دقيقة ونباتات طافية، وتعتبر إزالة عكورة الماء من الأهداف الرئيسية لمعظم محطات الإسالة، فهي فضلا عن كونها تحسن من مظهر الماء فإنها تساعد أيضا على التخلص من شوائب أخرى مثل المعادن الثقيلة والأحياء المجهرية على اختلاف أنواعها التي تستقر عادة على سطوح هذه الجسيمات

تستخدم الكثير من المواد المخثرة في الرومان فضلا عن أملاح الحديد مثل كبريتات الحديدوز ( $FeSO_4$ ) وكلوريد الحديدك ( $FeCl_3$ ) والغاية من إضافة هذه المواد الى الماء هو تحرير ايونات الألمنيوم والحديد المسؤولة عن حدوث عملية التخثير. يتطرق البحث الى دراسة عملية التخثير بأسلوب جديد فبدلا من إضافة المخثرات بشكل مادة كيميائية (أملاح المعادن المخثرة) مباشرة الى الماء لتحرير ايون المعدن والتي قد تسبب إضافة ملوثات أخرى ناتجة عن الشد مع المعدن، يتم اللجوء الى إضافة ايون المعدن المطلوب عن طريق الأكسدة الكهربائية أو التحلل الكهربائي باستخدام أقطاب كهربائية من الألمنيوم أو الحديد وهذه العملية تسمى بالتخثير الكهربائي ولها محاسن كثيرة عن التخثير التقليدي [1]. يعتبر التخثير الكهربائي أحد التطبيقات الرئيسية في تقنيات المفاعلات الكهروكيميائية لـ وهي عملية معقدة تتضمن عمليات فيزيائية وكيميائية باستخدام أقطاب كهربائية من الحديد أو الألمنيوم تقوم بتوفير الأيونات اللازمة لعملية التخثير. وخلال نهاية القرن التاسع عشر طبقت عملية التخثير الكهربائي في عدد كبير من محطات تصفية الماء في لندن، بينما قامت بعض محطات الـ في أجزاء مختلفة من الولايات المتحدة وفي وقت مبكر سنة 1911 بمعالجة الحمأة الناتجة عن العملية [2]، وخلال العشر سنوات الأخيرة بدأ استخدام هذه التقنية على نحو متزايد في أمريكا الشمالية والجنوبية وأوربا لمعالجة المطروحات الصناعية الحاوية على معادن [3].

### نظرية التخثير الكهربائي:

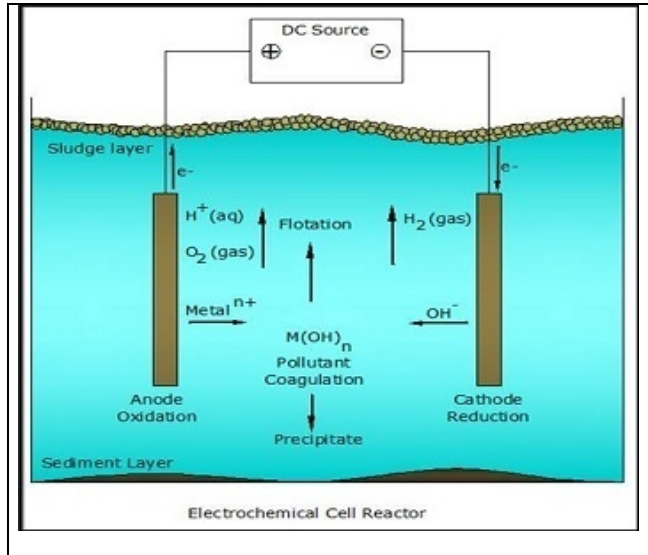
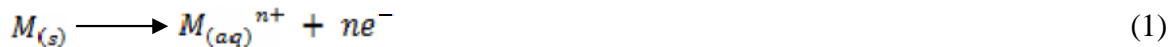
تتضمن عملية التخثير الكهربائي امرار تيار كهربائي مستمر بين أقطاب معدنية مغمورة في الماء الملوث، التيار الكهربائي المار يسبب ذوبان أو انحلال للأقطاب المعدنية في الماء وتحرير أيونات المعدن التي يمكن أن تشكل مدى واسع من المركبات وهيدروكسيد المعدن التي تنتقل بالجسيمات الغروية الموجودة في الماء الى حالة اللااستقرار اللبادات الدقيقة التي يتم زيادة حجمها فيما بعد في حوض التليد، وعادة يكون الترسيب هو الخيار الشائع في عملية التخثير الكهربائي لازالة اللبادات، أما التعويم فيتم بوجود غاز الهيدروجين الناتج عند القطب السالب وغاز الاوكسجين عند القطب الموجب أو عن طريق حقن الهو [4].

يمكن أن يكون مفاعل التخثير الكهربائي حاوي على أزواج متعددة من الأقطاب الكهربائية الموجبة والسالبة والتي تكون بشكل صفائح أو صفائح مثقبة أو أنابيب ومن تشمل الحديد والألمنيوم والحديد المقاوم للصدأ والتيتانيوم، كما يمكن أن تكون سلسلة من المفاعلات وكل منها بأقطاب كهربائية من مواد مختلفة [5].

### ميكانيكية التخثير الكهربائي:

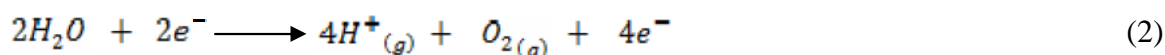
تعتمد التقنية على تكوين المخثرات من تحلل القطب الموجب عند مرور التيار الكهربائي إذ يتحرر أيون المعدن ويتكون الهيدروكسيد ونواتج التحلل الأخرى لأيون المعدن. بصورة عامة وعلى اعتبار أن القطب الموجب يتكون من المادة [6] :

In anode:



(1): يوضح التفاعلات التي تحصل بعملية التخثير الكهربائي [2].

## زالة عكوره الماء باستخدام تقنية التخثير الكهربائي :



In cathode:

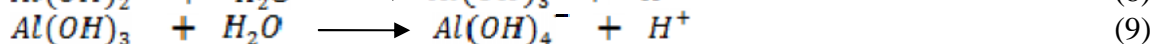
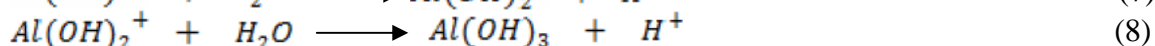
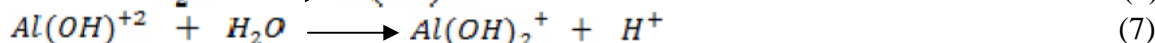
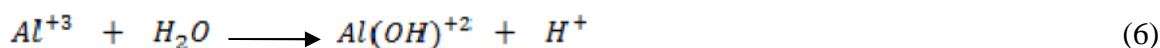


فبعد استخدام أقطاب كهربائية من الألمنيوم وخلال مرور التيار الكهربائي تحدث تفاعلات رئيسة تتحرر خلالها أيونات الألمنيوم ( $Al^{3+}$ ) وأيونات الهيدروكسيد ( $OH^-$ ) (4 5):

In anode:



فضلا عن حدوث تفاعلات ثانوية عند القطب الموجب أهمها انبعاث غاز الاوكسجين (معادلة 2). أيضا تحدث سلسلة من التفاعلات يتكون خلالها هيدروكسيد الألمنيوم وكالاتي: [7]



وفضلا عن ذلك ونتيجة التحلل المائي ومن خلال (معادلة 6 7 8) يكون القطب الموجب أقرب الى الحامضي، عكس القطب السالب والذي يكون أقرب الى القاعدي نتيجة لانبعاث غاز الهيدروجين (معادلة 4) [4].

### أهداف البحث:

- 1) دراسة تأثير مستوى العكورة الإبتدائية للماء الخام على العكورة المتبقية.
- 2) دراسة تأثير تغاير زمن تسليط التيار الكهربائي على العكورة المتبقية.
- 3) دراسة تأثير تغاير شدة التيار الكهربائي على العكورة المتبقية.

:

[8] (EL-MASRY et al., 2004) ببحث تأثير عملية التخثير الكهربائي على تنقية المياه السطحية

تخدام لوحين من الألمنيوم المسافة بينهما 2 (10.2, 6.2, 0.1)

(Batch reactor). وفي حوض التخثير الكهربائي عند إمرار التيار تتم عملية المزج بسرعة (100) (1 دقيقة)

(40) (15 دقيقة)، وبعد قطع التيار تبدأ عملية الترسيب والتي تستغرق (45 دقيقة). وكانت أفضل

قيمة لكثافة التيار (0.6325) ملي أمبيراً<sup>2</sup>.

والفوسفات والكبريتات الموجودة في الماء بنسب (77.5% 83.3% 20.0%)

مصنع من الحليب لدراسة تأثير عملية التخثير الكهربائي (Ni'am et al., 2007) [9] أيضا

على إزالة كل من المتطلب الكيميائي للأوكسجين COD من هذا النموذج أقطاب كهربائية من الحديد

بمساحة فعالة مقدارها (142.40<sup>2</sup>). إذ كانت القيمة الأولية للمتطلب الكيميائي للأوكسجين (1140 \ )

(491) وحدة عكورة. وكانت كثافة التيار تتراوح بين (3.51 5.62) ملي أمبيراً<sup>2</sup> وزمن التماس بين (30 50) دقيقة

(2 لتر). كانت أعلى كفاءة إزالة تم الحصول عليها للمتطلب الكيميائي للأوكسجين تتجاوز (65%)

(95%) عند كثافة تيار (5.62) ملي أمبيراً<sup>2</sup> ومسافة بين الألواح مقدارها (50).

[10] (Kilic et al., 2009) مقارنة بين عملية التخثير الكهربائي باستخدام أقطاب كهربائية موجبة من

الألمنيوم وأقطاب كهربائية سالبة من الحديد المقاوم للصدأ مع عملية التخثير التقليدي باستخدام كبريتات الألمنيوم على

عكورة مصنعة من دقائق الكوارتز إذ استخدم مفاعل ذا مرحلة واحدة ودرس عدة متغيرات مؤثرة على كفاءة التخثير منها

قيمة pH للمحلول وكثافة التيار الكهربائي وزمنه وتركيز الألمنيوم وغيرها. فبعد استخدام التخثير الكهربائي وجد أن كفاءة

(92%) عند كثافة تيار (87 أمبيراً<sup>2</sup>). أما عند استخدام التخثير التقليدي فإن كفاءة الإزالة

(93%) (15 AI \ لتر). كما وجد أيضا أن كفاءة إزالة كل من التخثير الكهربائي والتخثير

التقليدي تكون متشابهة عند ذات الكمية من الألمنيوم وذات العوامل التشغيلية.

ولمعرفة تأثير بعض المتغيرات مثل قيمة pH وكثافة التيار والتوصيلية الكهربائية للمحلول والتركيز الابتدائي للشائبة والمسافة بين الأقطاب الكهربائية ومدة التماس على عملية التخثير الكهربائي (Merzouk et al., 2010) [11] عكورة مصنعة من مادة السيليكا باستخدام مفاعل من نوع (batch rector) وأقطاب كهربائية من الألمنيوم (17 27) (1 89%) يمكن الحصول عليها عند كثافة تيار (11.55) مبيبراً<sup>2</sup> وقيمة pH ابتدائية (7.6) وتوصيلية كهربائية للمحلول مقدارها (2.1) (اسم) ومسافة بين الأقطاب مقدارها (1 سم) ومدة تماس كهربائي مقداره (10 دقيقة). وعند تطبيق هذه الظروف التشغيلية على المطروحات الناتجة من صناعة النسيج وجد أن أعلى كفاءة إزالة تم الحصول عليها كانت كالآتي:

$$85.5\% = 76.2\% = \text{BOD}_5 = 88.9\% = \text{COD} = 79.7\% = 93\% >$$

(Kilic and Hosten, 2010) [10] بدراسة عملية إزالة جزيئات طين الكاولين من محلول محضر صناعياً من إضافة طين الكاولين إلى الماء المقطر بواسطة عملية التخثير الكهربائي والتخثير الكيميائي التقليدي لمعرفة تأثير العوامل التشغيلية مثل (قيمة pH الأولية وتركيز المخثر والفولتية المجهزة وكثافة التيار والزمن) على العملية إذ استخدم مفاعل ذا مرحلة واحدة. أشارت النتائج أن التخثير الكيميائي التقليدي يكون أكثر فعالية ضمن مدى أوسع من pH بين (5 8) إذ كانت كفاءة الإزالة للعكورة تتراوح بين (88 93) %، بينما عملية التخثير الكهربائي تكون فعالة عند قيمة pH (9) أي تكون ضمن مدى ضيق وكانت كفاءة إزالة العكورة (87%) . كما لاحظ أيضاً أن كلتا عمليتي التخثير الكهربائي والتخثير الكيميائي التقليدي تعطي نفس الإزالة للعكورة عندما تكون كمية الألمنيوم داخل المحلول ذاتها في كلتا الحالتين.

### الثوابت والمتغيرات:

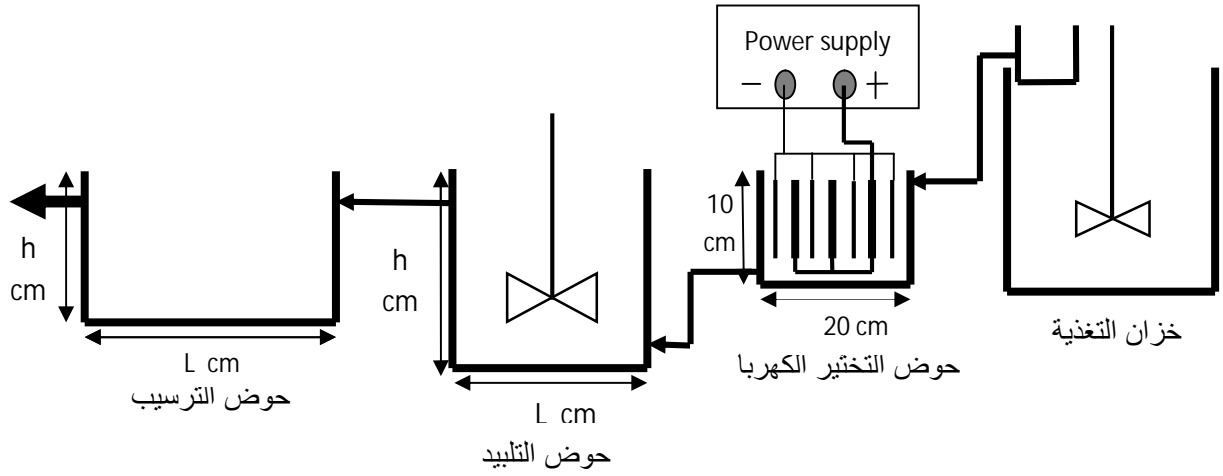
لكثرة العوامل التي تؤثر على عملية التخثير الكهربائي في إزالة العكورة فقد تم تثبيت المتغيرات الآتية:

1. تثبيت درجة حرارة الماء (25) ° .
  2. تم اعتماد قيمة الأس الهيدروجيني المعتدلة لماء الإزالة والتي تراوحت بين (8.13 8.78).
  3. نوع النظام المستخدم هو الجريان المستمر (Continuous reactor).
  4. حوض التخثير الكهربائي ذو سعة (2) (10x10x20) سم، يليه حوضي التليد والترسيب بابعاد متغيرة اعتماداً على زمن التخثير الكهربائي وذلك للمحافظة على ابعاد ثابتة لحوض التخثير الكهربائي مع تغير التصريف.
  5. تم استخدام أربعة أقطاب كهربائية للقطب السالب وثلاثة أقطاب كهربائية للقطب الموجب الألمنيوم لكل القطبين لة لهذه الأقطاب هي (816 2) وأبعاد الصفحة الواحدة المغمورة (17x8) وبذلك تكون نسبة المساحة السطحية للأقطاب إلى الحجم (40.8 3 2) وهي تقع ضمن الحدود (6.9 43) 3 2 [12].
  6. تثبيت المسافة بين الأقطاب الكهربائية مقدارها (1) (10) .
- أما بالنسبة للمتغيرات التي تم دراسة تأثيرها خلال البحث هي:
1. أربعة أزمنة للتخثير الكهربائي (1 5 10 20) دقيقة.
  2. تغيير مستوى العكورة الابتدائي (10 25 100 300)
  3. استخدام ست قيم للتيار الكهربائي في عملية التخثير الكهربائي (0.1 0.25 0.5 1 1.5 2) أمبير.
- وتم تقييم كفاءة الإزالة من خلال قياس العكورة المتبقية

نظراً للمدى الضيق لتغاير عكورة ماء نهر دجلة تم تعديل العكورة الطبيعية لماء الإزالة إلى مستويات العكورة المطلوبة بإضافة طين الكاولين الذي يستخدم في كثير من الدراسات لهذا الغرض حصول على أربعة مستويات [11]. كما تم استخدام ألواح الألمنيوم بنقاوة 98 تقريباً في الأقطاب الكهربائية الموجبة والسالبة في حوض التخثير الكهربائي التي توفر أيونات الألمنيوم نتيجة لمرور التيار الكهربائي وحصول عملية التأين (تحلل القطب الموجب).

تم تصميم أربع منظومات مؤلفة من حوض التخثير الكهربائي بحجم ثابت (2 لتر) وحوض التليد وحوض الترسيب التي تكون بأبعاد مختلفة مصممة حسب زمن التخثير الكهربائي ويتم تغذية الماء إلى هذه الأحواض من خلال حوض التغذية إذ يتم فيه المحافظة على عملية المزج لمنع ترسب جسيمات الطين والحفاظ على العكورة الابتدائية الداخلة للمنظومة أما الشحنة فتم المحافظة عليها من خلال حوض الطفح الذي يرتبط مع خزان التغذية وكما موضح في شكل (2).

: زالة عكوره الماء باستخدام تقنية التختير الكهربائي



(2): يوضح مخطط المنظومة المختبرية

تم اعتماد أربعة تصاريح حسب زمن التختير الكهربائي و تمت عملية تصميم حوض التلييد بالاعتماد على قيمة  $G = 46^{-1}$  [13] وتصميم حوض الترسيب بالاعتماد على قيمة  $SOR = 20 \times 10^3$  (أيوم) طبقاً للمعايير التصميمية (20 33) إيوم [14]. كما تم حساب رقم رينولد ( $Re < 20000$ ) ورقم فرويد ( $Fr > 10^{-5}$ ) [15]. وي المعتمدة على الترتيب.

(1): يوضح أبعاد وتفاصيل أحواض التلييد.

(cm)	N (rpm)	P (W)	h (cm)	w (cm)	L (cm)	زمن التلييد t (.min)	التصريف Q (cm <sup>3</sup> /s)	زمن التختير الكهربائي (.min)
3x18	30	0.08074	35	35	35	21.44	33.3	1
1.7x10	45	0.01506	20	20	20	20	6.667	5
1.4x8	52	0.00771	16	16	16	20.48	3.333	10
1x7	53	0.00414	13	13	13	22	1.667	20

(2): يوضح أبعاد وتفاصيل أحواض الترسيب.

رقم فرويد Fr	رقم رينولد Re	h (cm)	w (cm)	L (cm)	الترسيب (min.)	التصريف Q (cm <sup>3</sup> /s)	من التختير الكهربائي (min.)
$1.0173 \times 10^{-3}$	77.76	15	18	80	10.8	33.33	1
$1.436 \times 10^{-3}$	33.85	7	8	36	5	6.667	5
$1.586 \times 10^{-3}$	23.33	5	6	24	3.6	3.33	10
$2.03 \times 10^{-3}$	16.92	3.5	4	18	2.52	1.667	20

تم ضبط التصريف عند كل زمن تخثير كهربائي كما وتم ضبط عدد دورات المزج في حوض التلييد ودرجة (25)°م بعد ذلك يتم إتباع الخطوات الآتية عند كل تجربة:

يتم إضافة طين الكاولين إلى حوض التغذية للوصول إلى مستوى العكورة المطلوب مع المحافظة على عملية المزج داخل هذا الحوض طيلة مدة التجربة لمنع الترسيب داخل الحوض.

تربط صفائح الألمنيوم على التوالي إلى مصدر تيار مستمر وكما موضح بالشكل (3) ويتم إمرار التيار الكهربائي وحسب القيم المثبتة وتؤخذ قيم الفولتية من الجهاز عند كل تيار.

بعد انتهاء المدة الزمنية التي تشمل (زمن التخثير الكهربائي + زمن التلييد + زمن الترسيب) وبعد حصول حالة الاستقرار يتم قياس العكورة النهائية للماء الناتج بعد المعاملة، ثم يتم معاملة الصفائح بحامض الهيدروكلوريك HCl المخفف بنسبة حجمية (5%) (15) دقيقة لغرض إزالة الترسبات الموجودة على الصفائح قبل البدء بالتجربة التالية [16].

تعاد الخطوات على قيمة أخرى للتيار الكهربائي وهكذا في بقية التجارب.

عند الانتهاء من جميع قيم التيار المثبتة لمستوى عكورة معين يتم تغيير مستوى العكورة إلى مستوى آخر وتعاد الـ ذاتها. تم إعادة كل عملية معالجة ثلاث مرات وأخذ المعدل.

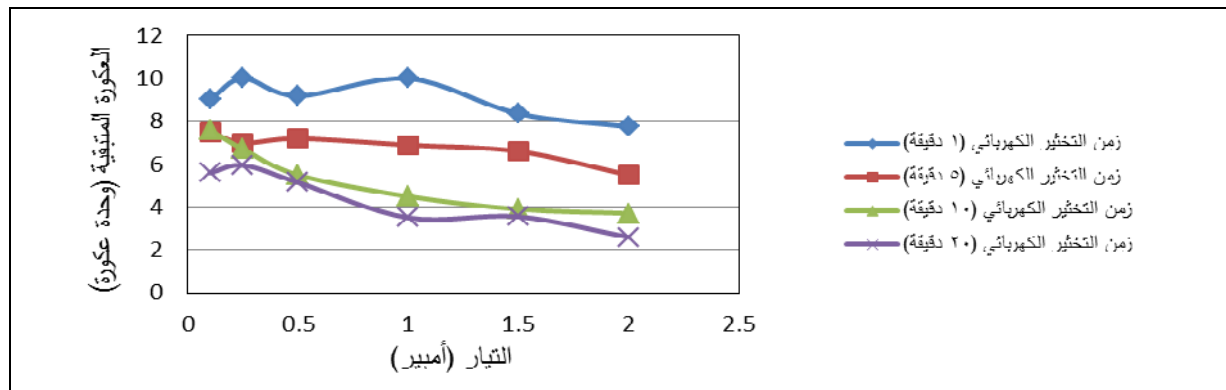


(3):

1) تأثير تغاير التيار الكهربائي على العكورة المتبقية:

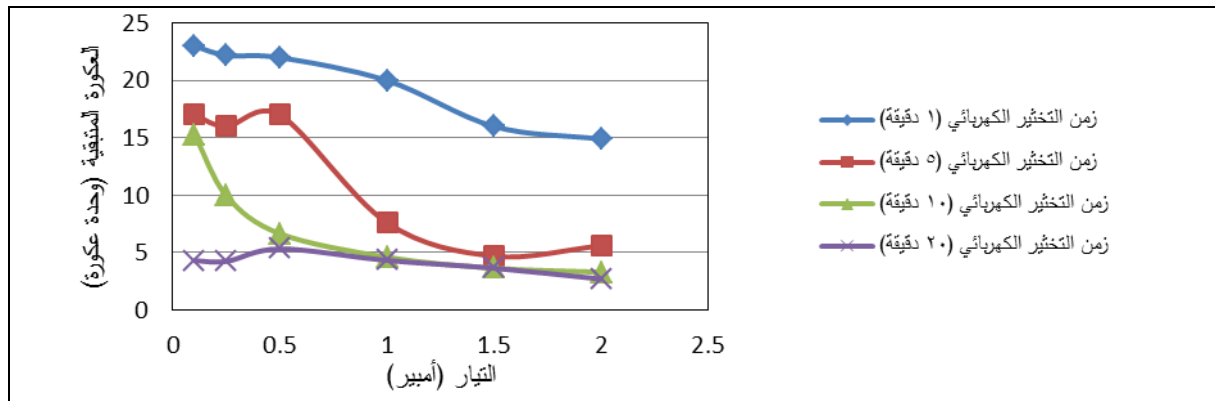
يعتبر التيار الكهربائي من العوامل المهمة المؤثرة على عملية التخثير الكهربائي، ولمعرفة تأثير تغاير التيار على العكورة تم اعتماد قيم مختلفة للتيار تتراوح بين (0.1 2) أمبير.

يوضح الشكلين (4) (5) العلاقة بين التيار الكهربائي المار خلال الاقطاب والعكورة المتبقية لمستوى عكورة (10 25) وحدة عكورة على التوالي ولأربعة أزمنة للتخثير الكهربائي.



(4): تغاير العكورة المتبقية مع التيار الكهربائي لمستوى عكورة ابتدائية (10 وحدة عكورة) ولأربعة أزمنة للتخثير الكهربائي.

## زلة عكوره الماء باستخدام تقنية التخثير الكهربائي :

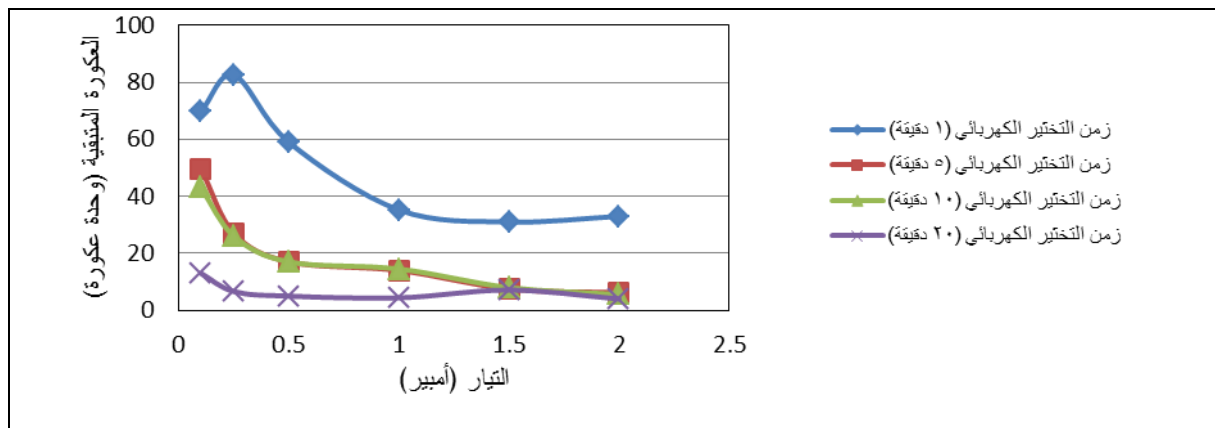


(5): تغاير العكورة المتبقية مع التيار الكهربائي لمستوى عكورة ابتدائية (25) للتخثير الكهربائي.

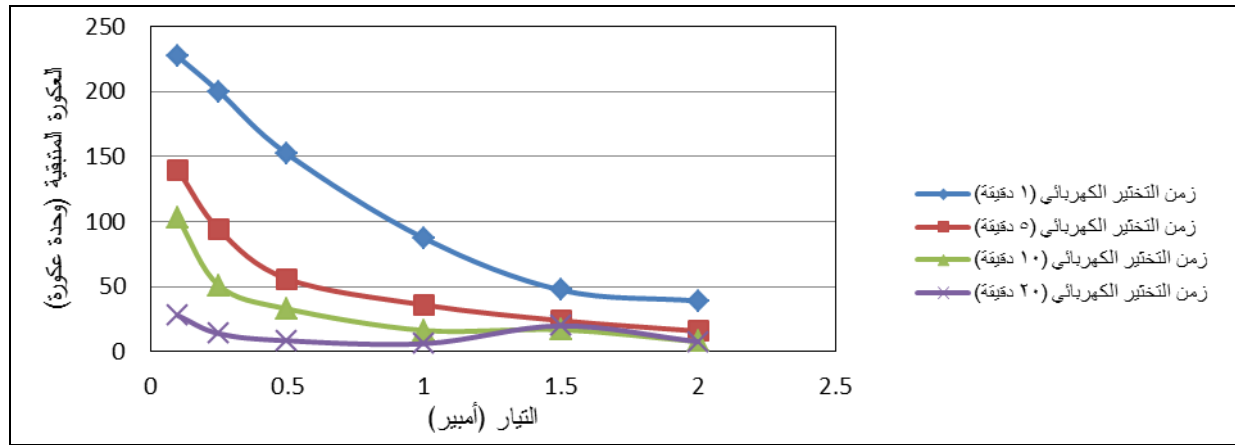
يلاحظ من هذه الأشكال أنه مع زيادة التيار الكهربائي تقل العكورة المتبقية، إذ كانت أقل عكورة متبقية تم الحصول عليها لمستوى العكورة الابتدائية (10 وحدة عكورة) مقدارها (2.6 وحدة عكورة) عند التيار (2 أمبير) ولزمن تخثير كهربائي (20 دقيقة)، أما مستوى العكورة الابتدائية (25 وحدة عكورة) فكانت أقل عكورة متبقية تم الحصول عليها (2.7 وحدة عكورة) عند تيار كهربائي (2 أمبير) وزمن تخثير كهربائي (20 دقيقة). ويعود السبب في انخفاض العكورة عند زيادة التيار إلى زيادة تركيز أيونات الألمنيوم المتحررة من الأقطاب الكهربائية الموجبة أنها تتناسب طردياً مع كمية التيار حسب قانون فراداي [11] وبالتالي تكون هيدروكسيد الألمنيوم الذي يعتبر المسؤول عن إزالة العكورة للمستويات الواطنة من العكورة حسب ميكانيكية الكسح ويلاحظ ذلك واضحاً من خلال الشكل (4) لمستوى العكورة الابتدائية (10) ومن خلال تذبذب العكورة المتبقية مع زيادة التيار [17].

كما يمكن أيضاً ملاحظة زيادة العكورة المتبقية مع زيادة التيار ثم تعود للتناقص، هذه الزيادة تعود إلى تأثير تراكم هيدروكسيد الألمنيوم [10] إذ أن زيادة التيار تسبب إعادة الاستقرار للغرويات مع تكون كميات كبيرة من هيدروكسيد الألمنيوم بشكل مخثر والتي تزيد من العكورة المتبقية [18].

يوضح الشكلين (6) (7) العلاقة بين العكورة المتبقية والتيار الكهربائي لمستوي (100 300 عكورة) ولأربعة أزمنة للتخثير الكهربائي إذ يلاحظ أن العكورة المتبقية تقل مع زيادة التيار الكهربائي المار خلال الأقطاب، ويعود السبب في ذلك إلى زيادة كمية أيونات الألمنيوم المنبعثة من الأقطاب الموجبة وإزالة العكورة من خلال ميكانيكية إنضغاط الطبقة الأيونية المزدوجة المحيطة بالجسيمة الغروية العالقة [17].



(6): تغاير العكورة المتبقية مع التيار الكهربائي لمستوى عكورة ابتدائية (100) للتخثير الكهربائي.



(7): تغير العكورة المتبقية مع التيار الكهربائي لمستوى عكورة ابتدائية (300 وحدة عكورة) ولأربعة أزمنة للتخثير الكهربائي.

## (2) تأثير تغير زمن التخثير الكهربائي على العكورة المتبقية:

تم خلال البحث دراسة تأثير تغير زمن التخثير الكهربائي على كفاءة إزالة العكورة، إذ تم اعتماد أربعة أزمنة للتخثير الكهربائي (1 5 10 20) دقيقة مع تغيير التركيز الابتدائي للعكورة وتغيير التيار الكهربائي المار. إذ يلاحظ (4) (7) أن العكورة المتبقية تقل مع زيادة زمن التخثير الكهربائي ولجميع مستويات العكورة الابتدائية ويعود السبب في ذلك إلى زيادة كمية أيون الألمنيوم المنبعث من القطب الموجب مع زيادة زمن التخثير الكهربائي حسب قانون فراداي، ويعتبر أيون الألمنيوم المسؤول الرئيسي عن عملية إزالة العكورة خاصة عند مستويات العكورة الابتدائية.

كما يلاحظ أن العكورة المتبقية تقل مع زيادة زمن التخثير الكهربائي وبشكل ملحوظ عند التيارات (0.1 0.25 0.5) أمبير. أما عند التيارات العالية فإن العكورة المتبقية لا تتغير بشكل كبير عند زيادة زمن التخثير الكهربائي، فعند التيارات بين (0.5 2) أمبير تقل العكورة المتبقية مع زيادة زمن التخثير الكهربائي إلى حد (10 دقيقة) وبعد هذا الزمن يكون التغير بالعكورة المتبقية قليلاً جداً أي بين (10 20) دقيقة والسبب يعود إلى أن زمن التفاعل يقصر مع زيادة التيار بسبب زيادة انحلال القطب الموجب فيزداد أيون الألمنيوم المتحرر عند كثافة التيار العالية [11].

## (3) تأثير تغير مستوى العكورة الابتدائية على العكورة المتبقية:

تم دراسة تأثير تغير التركيز الابتدائي للعكورة على العكورة المتبقية بعملية التخثير الكهربائي، إذ تم أخذ أربعة مستويات ابتدائية للعكورة (10 25 100 300) وحدة عكورة مع متغيرات أخرى هي زمن التخثير الكهربائي والتيار الكهربائي المار.

يشير الشكلين (8) (9) إلى العلاقة بين مستوى العكورة الابتدائية والعكورة المتبقية لسنة قيم للتيار الكهربائي وعند زمن تخثير كهربائي (1 دقيقة) و(5 دقيقة) على الترتيب.

يلاحظ من خلال هذين الشكلين أن العكورة المتبقية تزداد مع زيادة التركيز الابتدائي للعكورة، فمثلاً من خلال شكل (8) وعند زمن تخثير كهربائي (1 دقيقة) تزداد العكورة المتبقية من (7.75 39.1) د زيادة التركيز

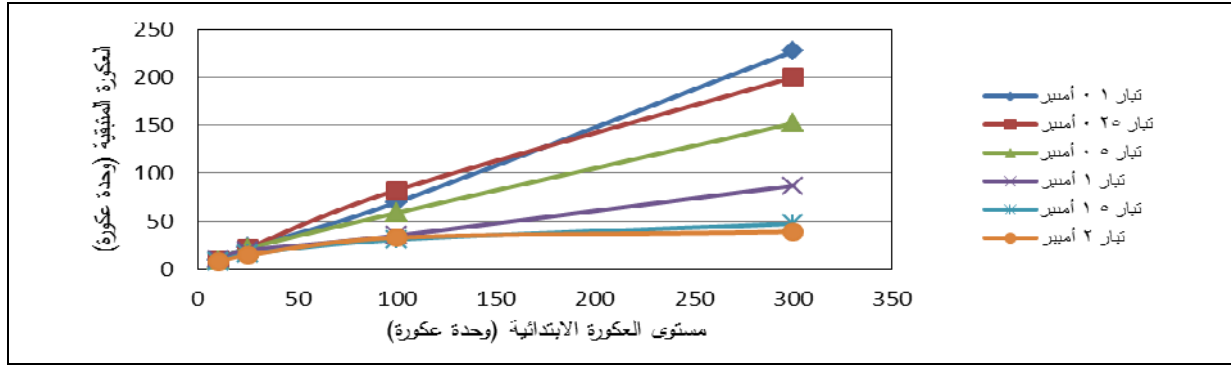
(10 300) وحدة عكورة عند تيار كهربائي (2 أمبير)، وتنطبق الحالة ذاتها على شكل (9)

زمن تخثير كهربائي (5 دقيقة) والتيار الكهربائي (2 أمبير) نلاحظ زيادة العكورة المتبقية من (5.5 16)

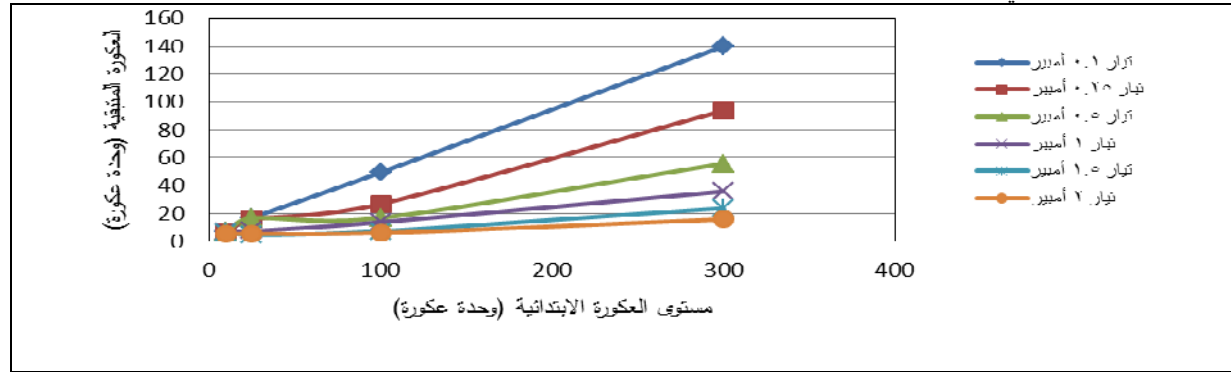
تغير العكورة الابتدائية من (10 300)



## زالة عكوره الماء باستخدام تقنية التخثير الكهربائي :

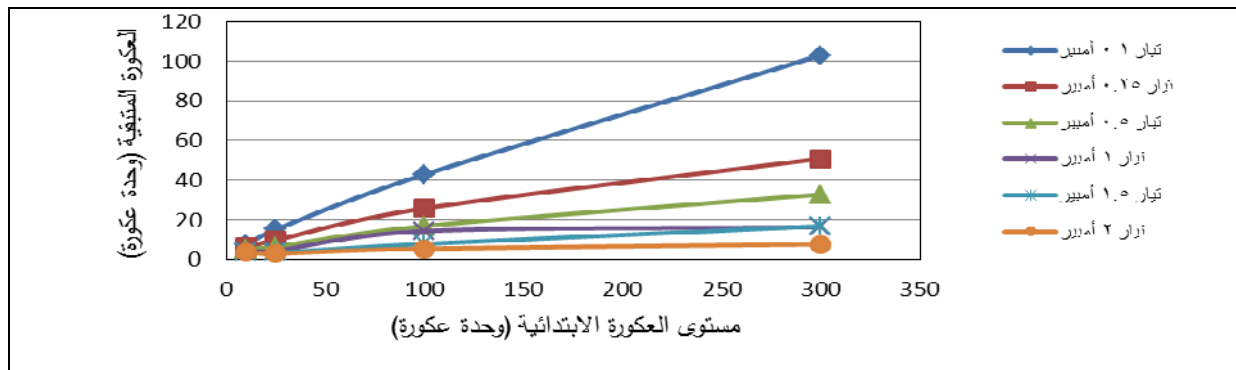


(8): تغير العكورة المتبقية مع مستوى العكورة الابتدائية عند زمن تخثير كهربائي (1 دقيقة) ولست قيم للتيار الكهربائي.

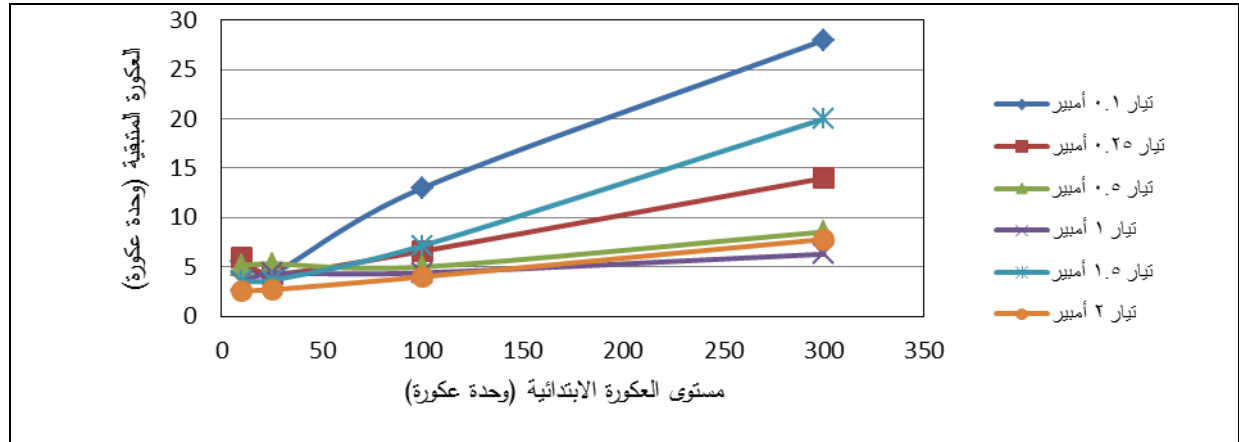


(9): تغير العكورة المتبقية مع مستوى العكورة الابتدائية عند زمن تخثير كهربائي (5 دقيقة) ولست قيم للتيار الكهربائي.

يوضح الشكلين (10) (11) العلاقة بين مستوى العكورة الابتدائية والعكورة المتبقية لست قيم للتيار الكهربائي وعند زمن تخثير كهربائي (10 دقيقة) و(20 دقيقة) على الترتيب. من خلال هذين الشكلين يتبين أن العكورة المتبقية تزداد مع زيادة التركيز الابتدائي للعكورة، فعند زمن التخثير الكهربائي (10 دقيقة) تزداد العكورة المتبقية من (3.7 7.85) وحدة عكورة عند زيادة التركيز الابتدائي للعكورة من (10 300) وحدة عكورة وعند تيار كهربائي (2 أمبير)، أما عند زمن التخثير الكهربائي (20 دقيقة) ولتيار كهربائي (2 أمبير) نلاحظ زيادة العكورة المتبقية من (2.6 7.8) وحدة عكورة عند تغير العكورة الابتدائية من (10 300) عكورة. كما يلاحظ أيضا أن قيم العكورة المتبقية الناتجة عن مستوى العكورة الابتدائية (100 300) متقاربة أي بفارق قليل مع اختلاف كمية التيار الكهربائي.



(10): تغير العكورة المتبقية مع مستوى العكورة الابتدائية عند زمن تخثير كهربائي (10 دقيقة) ولست قيم للتيار الكهربائي.



(11): تغيّر العكورة المتبقية مع مستوى العكورة الابتدائية عند زمن تخثير كهربائي (20 دقيقة) ولست قيم للتيار الكهربائي.

مما سبق وبشكل عام يلاحظ زيادة العكورة المتبقية مع زيادة التركيز الابتدائي للعكورة عند جميع أزمنة التخثير الكهربائي ولكل قيم التيار المار ويمكن تعليل ذلك الى استخدام نفس قيمة التيار وزمن التخثير الكهربائي عند التراكيز العالية والواطئة لذلك فإن كمية أيون الألمنيوم الناتجة تكون غير كافية لازالة في حالة التراكيز العالية للعكورة [19] [20] كما لوحظ أيضا أن زيادة التيار الكهربائي تنتج تغيّر قليل بالعكورة المتبقية بينما زيادة زمن التخثير الكهربائي تؤدي إلى تغيّر كبير بالعكورة وخاصة عند مستويات العكورة العالية. نستنتج من ذلك أن تأثير زمن التخثير الكهربائي يكون أكبر من تأثير التيار الكهربائي على العكورة المتبقية.

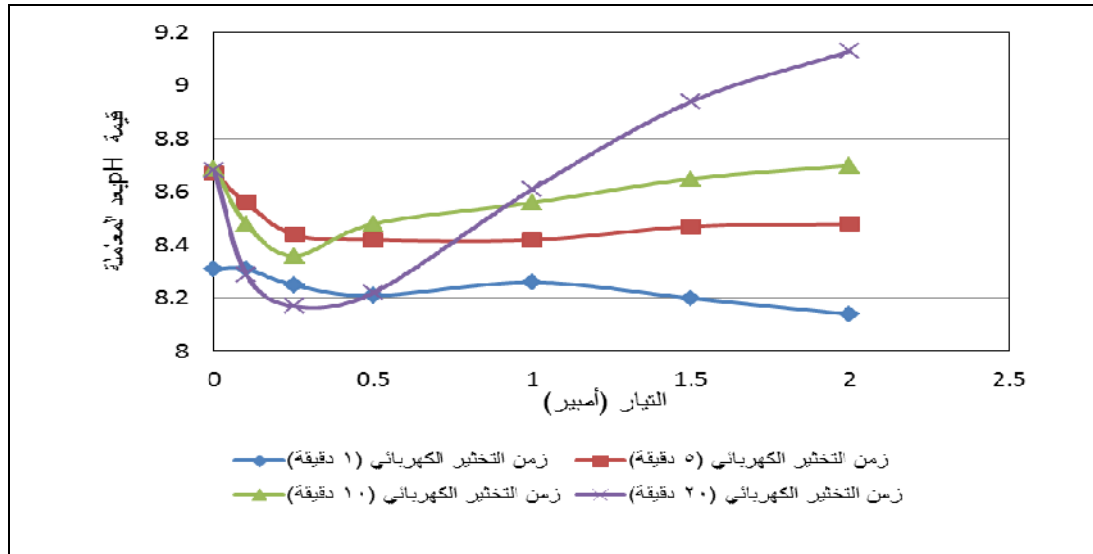
#### (4) زمن التخثير والتيار الكهربائي المثالي :

(4 5 6 7) يلاحظ أن زمن التخثير الكهربائي المثالي هو (10 دقيقة) والتيار الكهربائي (1.5 أمبير) لمستوي العكورة الابتدائية (10) (25) (60%) على التوالي لهذين المستويين. بينما يلاحظ أن الزمن المثالي هو (5 دقيقة) والتيار الكهربائي المثالي (1.5 أمبير) العكورة الابتدائية (100) الذي يعطي كفاءة ازالة مقدارها (90%).  
الابتدائية (300 وحدة عكورة) فيكون الزمن المثالي هو (5 دقيقة) عند تيار مقداره (2 أمبير) إذ وصلت كفاءة الازالة الى (93%). إذ يلاحظ ان انخفاض العكورة بعد هذه الأزمنة والتيارات غير ذات اهمية.

#### (5) تأثير الاس الهيدروجيني بعملية التخثير الكهربائي:

يوضح (12) تغيّر معدل الاس الهيدروجيني مع تغيّر ازمة التخثير والتيارات المشمولة في الدراسة للماء يلاحظ قيم الاس الهيدروجيني تبدأ بالانخفاض تدريجياً مع زيادة التيار (0.25) امبير عند الأزمنة (5 10 20) دقيقة هذه القيم بالازدياد مع زيادة التيار أما عند الزمن (1) دقيقة فإن الانخفاض في الاس الهيدروجيني يستمر مع زيادة التيار حتى (1) امبير ليبدأ بالارتفاع ويعود السبب الى أن كمية الهيدروكسيد قليلة تستنفذ في تكوين هيدروكسيد الألمنيوم [21]، بالإضافة الى إنبعاث غاز الهيدروجين عند القطب السالب والذي يعمل على خفض قيمة الاس الهيدروجيني [9]، ولكنها تبدأ بالازدياد تدريجياً عند التيارات العالية؛ ويعود سبب ذلك الى زيادة تكون أيونات الهيدروكسيد (OH<sup>-</sup>) وتراكمها في المحلول المائي مما يعمل على زيادة قيمة pH .

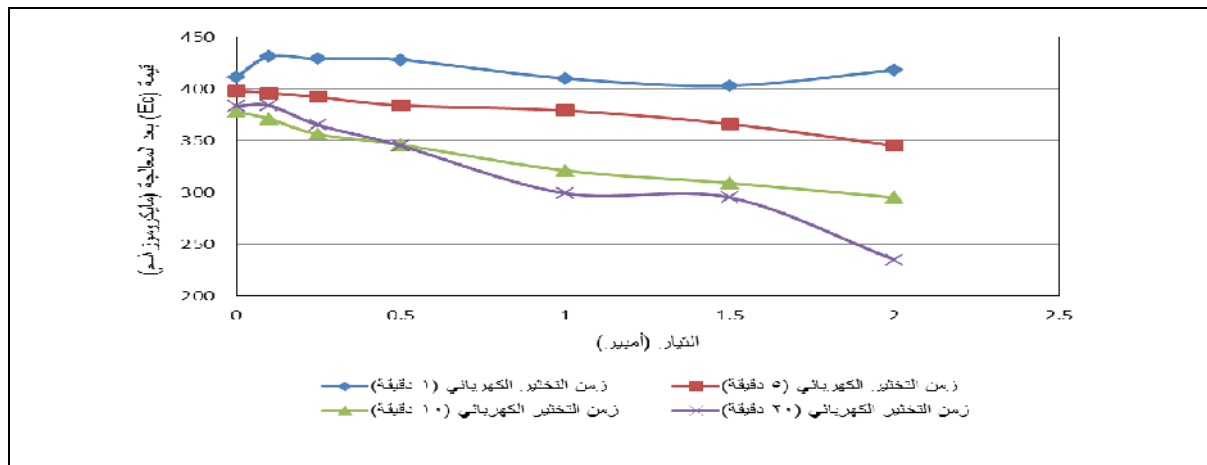
## زلة عكوره الماء باستخدام تقنية التخثير الكهربائي :



(12): تأثير التيار وزمن التخثير الكهربائي على معدل قيم الاس الهيدروجيني.

### (6) تأثير التوصيلية الكهربائية بعملية التخثير الكهربائي:

يلاحظ من الشكل (13) أن قيمة التوصيلية الكهربائية (Ec) تتخفض تدريجياً مع زيادة قيمة التيار الكهربائي المار، فمثلاً عند زمن التخثير الكهربائي (1 دقيقة) كانت قيمة Ec الطبيعية للماء (411 مايكروموزاسم)، فعند تيار (0.1 أمبير) نلاحظ أنها ازدادت إلى (431 مايكروموزاسم) وذلك يعود إلى زيادة في تكوين أيونات الألمنيوم الناتجة من عملية التخثير الكهربائي مما يؤدي إلى زيادة قابلية الماء على حمل التيار وبذلك زيادة التوصيلية الكهربائية، ولكن مع زيادة التيار الكهربائي تبدأ قيمة Ec بالانخفاض التدريجي إلى أن تصل (403 مايكروموزاسم). أما عند زمن التخثير الكهربائي (5 دقيقة) كانت قيمة Ec (398 مايكروموزاسم) ثم بدأت بالانخفاض تدريجياً مع زيادة التيار الكهربائي إلى أن (345 مايكروموزاسم) عند تيار (2 أمبير). وكذلك الحال عند زمني التخثير الكهربائي (10 20 دقيقة) حيث انخفضت قيمة Ec (383 378) مايكروموزا (295 235) مايكروموزاسم على الترتيب وعند تيار (2 أمبير). كما يلاحظ من الشكل أيضاً أن قيمة التوصيل الكهربائي تتخفض مع زيادة زمن التخثير الكهربائي. إن سبب الانخفاض في قيمة Ec ربما يعود إلى ترسب بعض الشوائب الموجودة في الماء مثل أيونات العسرة وغيرها من خلال عملية التخثير الكهربائي وكما لوحظ ذلك من خلال الدراسات السابقة عن قابلية هذه العملية في إزالة شوائب مختلفة وبذلك تقل قابلية الماء على حمل التيار الكهربائي وبالتالي خفض التوصيلية الكهربائية للماء.



(13): تأثير التيار وزمن التخثير الكهربائي على معدل قيم التوصيلية الكهربائية.

:

1. أثبتت عملية التخثير الكهربائي كفاءتها في إزالة العكورة من الماء، إذ وجد أن كفاءة إزالة العكورة تعتمد على زمن التخثير الكهربائي وكمية التيار الكهربائي المار والمستوى الابتدائي للعكورة.
2. أظهرت النتائج أن العكورة المتبقية تتناسب عكساً مع كمية التيار الكهربائي المار عند جميع مستويات العكورة الابتدائية.
3. أظهرت النتائج أن العكورة المتبقية تتناسب عكساً مع زمن التخثير الكهربائي وبشكل ملحوظ عند التيارات (0.1 0.25 0.5) أمبير، ويلاحظ عند زيادة التيار الكهربائي عن (0.5 أمبير) فإن العكورة المتبقية لا تتغير بشكل كبير، فعند التيارات بين (0.5 2) أمبير تقل العكورة المتبقية مع زيادة زمن التخثير الكهربائي إلى حد (10 دقيقة) وبعد هذا الزمن أي ضمن الفترة بين (10 20) دقيقة يكون التغير بالعكورة المتبقية قليل جداً.
4. يلاحظ أن مستوى العكورة الابتدائية تآً واضحاً على العكورة المتبقية إذ تزداد العكورة المتبقية مع زيادة يقل الزمن اللازم لعملية التخثير الكهربائي لتحقيق إزالة معينة مع زيادة التيار الكهربائي.
6. أعلى كفاءة إزالة تم الحصول عليها كانت (98%) عند زمن تخثير كهربائي (20 دقيقة) والتيار الكهربائي (1 أمبير) ومستوى عكورة ابتدائية (300).
7. متبقية (2.6) عند زمن تخثير كهربائي (20 دقيقة) والتيار الكهربائي (2) أمبير) ومستوى عكورة ابتدائية (10).
8. لوحظ أن تأثير زيادة زمن التخثير الكهربائي يكون أكبر من تأثير زيادة التيار الكهربائي على العكورة المتبقية.
9. أظهرت النتائج تأثير قيمة الأس الهيدروجيني بعملية التخثير الكهربائي، إذ أنها تتغير بين زيادة ونقصان مع تغير التيار الكهربائي وعند جميع أزمنة التخثير الكهربائي. أما التوصيلية الكهربائية فإنها تنخفض مع زيادة التيار الكهربائي المار.

#### التوصيات:

1. دراسة تأثير عملية التخثير الكهربائي على إزالة ملوثات أخرى وباستخدام متغيرات أخرى.
2. استخدام أقطاب كهربائية من مواد أخرى كالحديد وغيره وعمل مقارنة بينها من خلال كفاءتها في عملية التخثير الكهربائي.
3. دراسة عملية الأتولالتعويم عن طريق الفقاعات الناتجة عن عملية التخثير الكهربائي ومدى كفاءتها، فضلاً عن دراسة إمكانية وضع الأقطاب الكهربائية السالبة بشكل أفقي لزيادة كفاءة عملية التعويم.

:

1. Kilic M.G., Hosten C. and Demirci S. (2009). "A parametric comparative study of electrocoagulation and coagulation using ultrafine quartz suspensions". *Journal of Hazardous Materials*, 171, 247-252.
2. Rincon G. (2011). "Kinetics of the electrocoagulation of oil and grease". University of New Orleans, Theses and Dissertations, Paper 131.
3. Siringi D.O., Home P., Chacha J.S. and Koehn E. (2012). "Is electrocoagulation (EC) a solution to the treatment of wastewater and providing clean water for daily use". *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 7, NO. 2.
4. Tabash T.M.S. (2013). "Nitrate removal from groundwater using continuous flow electrocoagulation reactor". M.Sc. thesis, The Islamic University-Gaza.
5. The Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) (2010). "ELECTROCOAGULATION".
6. Malakootian M. and Yousefi N. (2009). "The efficiency of electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water". *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, Vol. 6, No. 2, pp. 131-136.

7. Azarian GH, Mesdaghinia AR, Nabizadeh R and Nematollahi D (2007). "Algae removal by electro-coagulation process, application for treatment of the effluent from an industrial wastewater treatment plant". Iranian J. public health, Vol.36, No.4, pp. 57-64.
8. EL-MASRY M.H., SADEK O.M. and MEKHEMER W.K. (2004). "Purification of raw surface water using electro-coagulation method" J. Water, Air and Soil pollution 158: 373-385.
9. Ni'am M.F., Othman F., Sohaili J. and Fauzia Z. (2007). "Removal of cod and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique". The Malaysian Journal of Analytical Sciences, Vol 11, No 1, 198-205.
10. Kilic M.G. and Hosten C. (2010). "A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders". Journal of Hazardous Materials, 176, 735-740.
11. Merzouk B., Madani K. and Sekki A. (2010). "Using electrocoagulation-electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies". J. Desalination 250, 573-577.
12. Holt P. (2002). "Electrocoagulation: unravelling and synthesising the mechanisms behind a water treatment process". D.Ph. thesis, University of Sydney.
13. Crittenden J.C., Trussell R.R., Hand D.W., Howe K.J., Tchobanoglous G. and Borchardt J.H. (2012). "MWH's Water Treatment". John Wiley & Sons, Inc.
14. Steel E.W. and McGhee T.J. (1979). "Water supply and sewerage". McGRAW-HILL KOGAKUSHA, LTD.
15. DavisMackenzie L. (2010). "Water and wastewater engineering". The McGraw-Hill Companion.
16. Phalakornkule C., Mangmeemak J., Intrachod K. and Nuntakumjorn B. (2010). "Pretreatment of palm oil mill effluent by electrocoagulation and coagulation". Science Asia 36 : 142-149.
17. Alley E.R. (2007). "Water quality control handbook". Second Edition, Water Environment Federation Alexandria, Virginia.
18. Den W. and Huang C. (2005). "Electrocoagulation for removal of silica nano-particles from chemical-mechanical-planarization wastewater". J. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 254, 81-89.
19. Aber S., Ghadim A.R.A. and Mirzajani V. (2009). "Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network". Journal of Hazardous Materials, 171, 484-490.
20. Wan W. (2010). "Arsenic removal from drinking water by electrocoagulation". M.Sc. Electronic Theses and Dissertations, University in St. Louis. Paper 511.
21. Hussen A.A. (2005). "Water purification by electrocoagulation process". A thesis submitted to the department of Environmental Engineering of College of Engineering, University of Baghdad.

تم اجراء البحث في كلية الهندسة =