

## Performance Comparison of Activated Sludge Systems at Mesophilic and Thermophilic Modes in Treating Dairy Wastewater

**Dr.Kossay K. Al-Ahmady**

College of Engineering Department, University of Mosul/ Mosul

Email: thamr55nuri@yahoo.com

**Mohamed Sameer Ghanim**

College of Engineering Department, University of Mosul/ Mosul

Received on: 9/5/2011 & Accepted on: 3/5 /2012

### ABSTRACT

In this research, two activated sludge experimental laboratory plants were constructed and operated using dairy wastewater. One of these plants were operated at high temperatures of (40 – 60 °C) "Thermophilic microorganisms reactors", whereas the other one were operated at constant temperature of (25 °C) "Mesophilic reactor". The results showed that the organic removal efficiency of "Mesophilic reactor" was more than the "Thermophilic reactors" and it decreased with increasing the temperature. The kinetic parameters for the both mode of operations were also calculated. The value of the substrate removal rate constant (k) for the "Mesophilic, 25°C" reactor was (0.017 day<sup>-1</sup>) and it was greater than others for the thermophilic reactors. (k) and (Y) decreased with increasing the temperature. The values of (K<sub>s</sub>), (U<sub>max</sub>), and (K<sub>d</sub>) in the thermophilic reactors were more than the corresponding values in the mesophilic reactor and increased with increasing the temperature.

**Keywords:** Thermophilic, Mesophilic, Activated sludge, Kinetic parameters, Dairy waste

مقارنة أداء أنظمة الحمأة المنشطة ذات الحرارة المعتدلة والمحبة  
للحرارة في معالجة مطروحات مياه الألبان

الخلاصة

تم في هذا البحث إنشاء وتشغيل منظومتين مختبريتين تعملان بطريقة الحمأة المنشطة لمعالجة مياه الصرف الصناعية المطروحة من معامل الألبان، إذ تم تشغيل المنظومة الأولى عند درجات حرارة (٤٠ - ٦٠ م°) وبوجود الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) بينما تم تشغيل المنظومة الأخرى عند درجة حرارة ثابتة (٢٥ م°) بوجود الأحياء المحببة لتلك الدرجة من الحرارة (Mesophilic). أثبتت نتائج البحث أن نظام درجات الحرارة المعتدلة ذو كفاءة إزالة مواد عضوية أكبر من نظام درجات الحرارة المرتفعة وتقل الكفاءة مع ازدياد درجة الحرارة. كذلك تم خلال البحث حساب المعاملات الحركية للمنظومتين حيث كانت قيمة ثابت معدل الإزالة النوعي (k) تساوي  $0.017 \text{ d}^{-1}$  لمفاعل نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة وهي أكبر من مثيلاتها في مفاعلات نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة كما انخفضت قيم ثابت الإزالة النوعي (k) ومعامل إنتاج الحمأة (Y) مع ازدياد درجة الحرارة النظام. كما تزداد قيم كل من تركيز المنتصف (Ks)، معامل الإزالة القصوى ( $U_{max}$ )، ومعامل انحلال الحمأة ( $K_d$ ) مع زيادة درجة الحرارة في مفاعلات الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة وتكون أكثر من مثيلاتها في مفاعلات الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة.

#### المقدمة

تمتلك مدينة الموصل العديد من الصناعات التي تساهم مطروحاتها في زيادة تلوثها بجذلة، ومن هذه الصناعات صناعة الألبان، حيث بالإضافة إلى ارتفاع المحتوى العضوي فيها تمتاز مياه مطروحات الألبان بأنها ذات درجة حرارة عالية نسبياً مما يجعل معالجتها ضمن نظام درجات الحرارة المرتفعة (Thermophilic) احد الخيارات المتاحة. تعد المعالجة البيولوجية لكل من مياه الصرف او الحمأة الصناعية عن طريق استخدام المفاعلات البيولوجية التي تعمل عند درجات حرارة مرتفعة (Thermophilic) احد الاساليب التي تساعد في هضم الاحمال العضوية بسرعة عالية وبالتالي تقليل كمية الحمأة الناتجة وتحسين خواص التخلص النهائي منها [1] [2]. وهي طريقة شائعة الاستخدام في الولايات المتحدة وأوروبا في معالجة مياه الفضلات عالية التركيز او الحمأة المتولدة من محطات معالجة مياه الفضلات البيولوجية [3] [4].

تعمل المفاعلات البيولوجية التي تستخدم الحمأة المنشطة المحببة للحرارة على مدى من درجات الحرارة يتراوح ما بين (٤٠ - ٦٠ م°) [5]. وبسبب كون أنعملية الأكسدة البيولوجية للمواد العضوية هي عملية باعثة للحرارة (Exothermal)، لذا من الممكن نظرياً تشغيل هذه الأنظمة بشكل ذاتي الحرارة (Auto-thermal) أي دون الحاجة إلى إضافة مصدر تدفئة خارجي إذا كانت درجة حرارة مياه الفضلات مرتفعة نسبياً، واتخذت التدابير اللازمة للاحتفاظ بالحرارة ضمن المفاعل، وكانت تراكيز المواد العضوية القابلة للهضم بيولوجياً كافية [6].

ان درجات الحرارة العالية (٤٠ - ٦٠ م°) المستخدمة في تشغيل المفاعلات البيولوجية تعمل في التسريع من عملية التحلل المائي للمواد العضوية وأكسنتها وتقليل زمن الحجز (المكوث) الهيدروليكي مقارنة مع الأنظمة التقليدية التي تعمل عند درجات الحرارة الاعتيادية (Mesophilic) وبالتالي فان معدل انتاج الحمأة سيكون اقل بكثير مقارنة بالأنظمة التقليدية وهذا يؤدي الى التقليل من كلفة تشييد محطات المعالجة فضلاً عن خفض كلفة عمليات معالجة الحمأة الناتجة عن استخدام هذه الأنظمة [6]. يهدف هذا البحث الى تحقيق الاهداف التالية:

١. المقارنة بين كفاءة عملية ازالة المواد العضوية وقابلية الترسيب لكل أنظمة معالجة الحمأة المنشطة باستخدام درجات الحرارة الاعتيادية (Mesophilic) والمرتفعة (Thermophilic).
٢. دراسة تأثير زمن الحجز (المكوث) الهيدروليكي في كفاءة عملية الازالة واستقراره النظام.

#### الدراسات السابقة

استخدم الباحث [7] مفاعلات بيولوجية تعمل بدرجة حرارة تساوي ( $50^{\circ}\text{C}$ ) والواقع ضمن مدى الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) في معالجة العصاره الناتجة عن مواقع الطمر الصحي وقد أثبتت النتائج قدرة النظام في تحقيق كفاءة ازالة مقبولة وأن معدل إنتاج الأحياء المجهرية ( $\gamma$ ) هو اقل عدة مرات من المعدل التقليدي في الأنظمة البيولوجية التي تعمل ضمن مدى حرارة الأنظمة الاعتيادية (Mesophilic). وقد قام الباحثان [8] باستخدام مفاعلات بيولوجية تعمل بدرجات حرارية تتراوح ما بين ( $45-80^{\circ}\text{C}$ ) لمعالجة مياه فضلات المسالخ، حيث اظهرت النتائج أن تشغيل المفاعلات عند هذه الدرجات المرتفعة يساهم في إنتاج كمية قليلة من الحمأة في حين كان معدل إزالة المواد العضوية أكثر بعشرة أضعاف مما عليه في الأنظمة التقليدية (Mesophilic). كما قام الباحثان [9] بمعالجة المياه الناتجة عن معامل إنتاج جيبس البطاطا باستخدام وحدة معالجة بيولوجية تعمل بدرجة حرارة ( $55^{\circ}\text{C}$ )، واثبتا انه يمكن تحقيق كفاءة إزالة للـ (BOD) تصل إلى 95% وإزالة مواد صلبة (TSS) تصل إلى حد 75%. كما قام الباحث [5] بمقارنة كمية الحمأة الناتجة عن مفاعلين بيولوجيين الاول يعمل ضمن مدى الاحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة وبدرجة حرارة ( $55^{\circ}\text{C}$ ) والثاني يعمل ضمن مدى الاحياء المجهرية المحببة للحرارة الاعتيادية. حيث لوحظ انخفاض إنتاجية الحمأة باستخدام المفاعل الاول مقارنة مع المفاعل الثاني.

وقد اجريت دراسة لمعالجة مياه الفضلات الناتجة عن المعامل الكيماوية وذلك باستخدام مفاعلات مخبرية مستمرة الجريان (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) تعمل ضمن درجات الحرارة المرتفعة، حيث اظهرت النتائج ان المفاعلات المخبرية استطاعت تحقيق ازالة المتطلب الكيماوي للأوكسجين (COD) بمقدار 85% عند أقصى حمل عضوي [10]، في حين أظهرت نتائج معالجة مياه الفضلات الناتجة عن معامل صناعة المستحضرات الصيدلانية باستخدام محطة تجريبية تعمل بنظام الحماية المنشطة عند درجة حرارة ( $45-60^{\circ}\text{C}$ ) ان كفاءة ازالة (COD) كانت بحدود 93% عند عدم طرح حمأة زائدة [11].

قام الباحث [12] بمعالجة مياه مطروحات معمل الورق باستخدام مفاعلين بيولوجيين احدهما يعمل بمدى الحرارة المرتفعة (Thermophilic) والثاني يعمل بمدى الحرارة المعتدلة (Mesophilic). استنتج الباحث أن معدل النمو البكتيري الأقصى ( $\mu_{\text{max}}$ ) ازداد بما يقرب من 50%، بينما معدل التحلل ( $k_d$ ) وصل إلى الضعف عند زيادة درجة الحرارة من ( $30-50^{\circ}\text{C}$ )، في حين كان معدل إنتاج الكتلة البيولوجية ( $y_{\text{obs}}$ ) اقل بشكل واضح عند درجة حرارة ( $55^{\circ}\text{C}$ ) مما هو عليه في الـ ( $30^{\circ}\text{C}$ ) وخصوصا عند زيادة فترة مكوث الحمأة (SRT). كذلك لاحظ الباحث ان الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة كانت ذات كفاءة أعلى مقارنة مع نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة بالنسبة لإزالة الـ COD. كما استنتج أن عكورة المياه الخارجة من نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) تعود إلى وجود المواد الغروية التي ساهمت في تقليل كفاءة عملية الترسيب مقارنة مع نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة (Mesophilic).

قام الباحث [2] بمقارنة أداء أنظمة الحمأة المنشطة العاملة ضمن مدى الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة (Mesophilic) وتلك العاملة ضمن مدى الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) في إزالة مستويات مختلفة من المتطلب الكيماوي للأوكسجين (COD). استنتج الباحث أن كلا النظامين أعطيا نسبة إزالة جيدة للـ  $\text{COD}_{\text{total}}$  والتي كانت بحدود (70-90%) عند وقت مكوث هيدروليكي (HRT) من (18) إلى (3) ساعات ومعدل حمل جملي (VLR) من (2) إلى (10) ( $\text{kg COD}_{\text{total}}/\text{m}^3.\text{d}$ ) على التوالي. كذلك استنتج الباحث أن نظام معالجة الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) يستطيع أن ينتج نفس الإزالة للـ  $\text{COD}_{\text{sol}}$  كما هي المتولدة في نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة (Mesophilic) بينما إزالة الـ  $\text{COD}_{\text{total}}$  ذات كفاءة اقل وذلك بسبب الخصائص الترسيبية الضعيفة للحمأة في أنظمة الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة والتي يمكن الاستدلال عليها من خلال ضعف اللباد والشكل غير المنتظم له وعكورة الخارج.

درس الباحثان [13] تأثير تغيير درجة الحرارة على أداء مفاعلين بيولوجيين من نوع (CSTR) الأول يعمل بنظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة (Mesophilic) وبدرجة حرارة أولية (37 °م)، والآخر بنظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic) وبدرجة حرارة أولية (55 °م) استخدماً لمعالجة مياه مطروحات معمل تصنيع زيت النخيل. تمت زيادة درجة حرارة المفاعل الأول بمعدل (3 °م) لكل مرحلة ليضمن درجات حرارية (37, 40, 43, 46, 49, 52 °م) على التوالي. استنتج الباحث أن تقليل درجة حرارة المفاعل الثاني وزيادة درجة حرارة المفاعل الأول إلى (40 °م) ثم (43 °م) لم يظهر أي اختلاف في الأداء على المفاعلين بالنسبة لكفاءة إزالة الـ COD حيث بقيت شبه ثابتة عند 68%. واستنتج أيضاً أن كلا المفاعلين يمكن تشغيلهما وبصورة ناجحة عند درجة حرارة (43 °م) والتي اعتبرها الباحث الدرجة المثلى للتحويل من نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة (Mesophilic) إلى الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة (Thermophilic).

#### المواد وطرق العمل

أجريت الدراسة عن طريق تصميم وتشغيل منظومتين اختباريتين لمعالجة الحمأة المنشطة الأولى تعمل عند درجة حرارة اعتيادية ثابتة (Mesophilic) والثانية تعمل عند درجات الحرارة المرتفعة (Thermophilic) وقد تم تغيير الأحمال الهيدروليكية والعضوية بهدف مقارنة خصائص عمل وكفاءة أداء كلا المنظومتين.

#### أقله الحمأة البيولوجية

تمت تنمية الحمأة في المختبر عن طريق جلب عينة من البذور من حوض التهوية التابع لمحطة المعالجة البيولوجية المقامة في مجمع مستشفيات مدينة الطيفي محافظة نينوي حيث تم وضعها في حوضين، يعمل الأول عند درجات الحرارة الاعتيادية الثابتة (25 °م)، والثاني للأقلمة على درجة الحرارة العالية (45 °م). اعتمد نظام الجرعة لغرض التغذية وبفترة 24 ساعة بين فترة تغذية وأخرى. تمت زيادة الأحمال العضوية تدريجياً على المنظومة وذلك بالاعتماد على زيادة الأحياء المجهرية في الحوضين وقابلية تأقلمها، حيث تم تشغيل الحوضين في الأيام الأولى على نسبة حمل عضوي (F/M) بحدود (0,2 غم BOD / غم. يوم)، وتمت زيادة هذه النسبة تدريجياً خلال (30) يوماً حيث وصل تركيز الأحياء المجهرية إلى (2000 ملغم/لتر). تم توزيع الأحياء المجهرية المتأقلمة حرارياً إلى ثلاثة أحواض سعة كل منها (7.5 لتر)، وأكملت بماء اعتيادي إلى حجم الحوض المذكور حيث تمت مواصلة أقلمتها على الدرجات الحرارية المراد اختبار المنظومة عليها وهي (40 °م، 50 °م، 60 °م) ولحين وصول الحمل العضوي (F/M) إلى (0,4 غم BOD / غم. يوم). استمرت هذه المرحلة بحدود (15) يوماً في المرحلة التالية تمت أقلمة الأحياء المجهرية على نوع الفضلات التي ستستخدم في البحث وبنظام التغذية المستمرة حيث تمت تغذية الأحياء المجهرية بخليط من الحليب ومياه الفضلات وينسب تمت زيادتها تدريجياً ابتداءً من (10%) مياه مطروحات معمل الألبان و (90%) حليب وحتى الوصول إلى التغذية بمياه مطروحات معمل الألبان فقط. استمرت هذه المرحلة بحدود (35) يوماً، حيث بلغ تركيز الأحياء المجهرية داخل الأحواض ما يقرب من (2800 ملغم/لتر).

#### إنشاء المنظومة المختبرية

تمفي هذا البحث تصنيعاً ربعة مفاعلات بيولوجية زجاجية متساوية الحجم والشكل وبسعة (7.5) لتر وحسب حجم النموذج المقترح من قبل الباحث [10] وبأبعاد 20 سم طول، 12 سم عرض، 31.25 سم

الارتفاع الفعال و40 سم الارتفاع الكلي. جُهزت المحطة بمنظومة تحكم وسيطرة كهربائية أوتوماتيكية متكاملة مجهزة بمصدر كهربائي يضمن استمرار عمل المنظومة دونما توقف. كما وُجّهت كل مفاعل بيولوجي بمسخن كهربائي قدرة (100) واط يحتوي على متحسس حراري رقمي (ذو حساسية  $\pm 1^\circ\text{C}$ ) لضبط درجة الحرارة التشغيلية المطلوبة.

ولغرض تقليل عملية التبادل الحراري مع المحيط (المختبر) فقد غُلّفت جميع المفاعلات بمادتين عازلتين هما الورق الحراري الشفاف ومادة الفلين ومن جميع الجوانب ماعدا واجهة الحوض (الحاوية على فتحة الخروج) وذلك للتمكن من مراقبة مزيج الحمأة والمياه داخل الحوض. كذلك جهزت المفاعلات البيولوجية بأحواض ترسيب ثانوية مكونة من حوض اسطواناني مجهز من اسفله بتركيب مخروطي لتسهيل تجميع الحمأة المترسبة، وقد تم تثبيت وقت الحجز الهيدروليكي لجميع الأحواض والمراحل التشغيلية ليكون مساويا لـ (4 ساعات)، في حين كانت قيمة معدل التحميل السطحي (SOR) للأحواض متساوية لجميع المراحل، والشكل رقم (1) يبين مخطط توضيحي لشكل وأبعاد المفاعل البيولوجي المستخدم في البحث مع ربط المنظومة المختبرية.

تم خلال البحث السيطرة على نسبة الحمأة الراجعة والتي مقدارها 100% من التصريف الداخلى لجميع الأحواض ولجميع المراحل التشغيلية [14] عن طريق منظومة ترجيع خاصة تكونت من مضخات صغيرة مثبتة في التركيب المخروطي في أسفل أحواض الترسيب ويتم التحكم بتشغيل هذه المضخات عن طريق منظومة سيطرة كهربائية تعمل بشكل آلي بواسطة مجموعة من المؤقتات المبرمجة التي تسيطر على فترات تشغيل وإطفاء المضخات التي يمكن من خلالها تحديد كمية ونسبة الحمأة الراجعة من حوض الترسيب إلى حوض التهوية.

استخدمت ضاغطة هواء كهربائية لتوفير الأوكسجين والمزج اللازم لعمل المفاعلات البيولوجية، حيث يتم إيصال الهواء المضغوط إلى المفاعلات بواسطة أنابيب بلاستيكية خاصة جُهزت بعدة صمامات لغرض السيطرة على كمية الهواء الداخلة إلى الحوض وبالتالي التحكم بمستوى الأوكسجين المذاب في المياه المعالجة. وقد جُهزت نهايات هذه الأنابيب بناشرات هواء حجرية (Stone Diffusers) ذات قطر 1 سم وبطول 12 سموضعت بواقع ناشرتي هواء لكل حوض وبشكل ملاصق لجانبي المفاعل، وهذا بدوره يؤدي الى تكوين حركة دورانية حلزونية ومزج لمكونات الحوض وتوزيع متساوٍ لتركيز الأوكسجين داخل حوض التهوية.

### المراحل والظروف التشغيلية

تم تشغيل المفاعلات البيولوجية الأربعة في آن واحد، حيث يعمل المفاعل الأول بنظام الحمأة المنشطة ذو درجات الحرارة الاعتيادية وبدرجة حرارة ثابتة مقدارها  $(\pm 1^\circ\text{C} 25^\circ\text{C})$ ، في تعامل المفاعلات الثلاثة الأخرى بنظام الحمأة المنشطة ذو درجات الحرارة المرتفعة وبدرجات حرارية  $(40^\circ\text{C})$  للمفاعل الأول و  $(50^\circ\text{C})$  للمفاعل الثاني و  $(60^\circ\text{C})$  للمفاعل الثالث وذلك لتغطية مدى درجات حرارة نظام الحرارة المرتفعة والذي حدده العديد من الباحثين، ومنهم [15][5].

فُسم العمل المختبري إلى أربع مراحل تشغيلية في كل منها تم زيادة التصريف المسلط على مفاعلات المنظومة، وابتداءً بتصريف مقداره 7.5 لتر/يوم وهو ما يعادل وقت مكوث هيدروليكي مقداره (24) ساعة. الجدول رقم (1) يبين التصاريح وأوقات المكوث وأحجام أحواض الترسيب لكل مرحلة تشغيلية من مراحل المنظومة المختبرية، حيث لم يتم الانتقال من مرحلة تشغيلية إلى أخرى إلا بعد استقرار المعالجة البيولوجية، وقد تم الاستدلال على حالة الاستقرار من خلال ثبوت كل من كفاءة المعالجة وتركيز الأحياء المجهرية فيها [16].

### النتائج والمناقشة

#### كفاءة المفاعلات البيولوجية في إزالة المواد العضوية

تم قياس تركيز المتطلب الكيماوي للأوكسجين الذائب ( $\text{COD}_{\text{sol}}$ ) الخارج من المنظومة المختبرية بشكل دوري بمعدل قراءة واحدة بصورة يومية ولكل من مفاعلات نظام درجات الحرارة

المرتفعة (Thermophilic reactors) ومفاعل نظام درجات الحرارة الاعتيادية (Mesophilic reactor). تمثل الأشكال رقم (٢، ٣، ٤، و ٥) التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد العضوية للخارج من أحواض المنظومة المختبرية ولكل مرحلة تشغيلية. حيث يلاحظ أن تركيز المواد العضوية الخارجة من مفاعل نظام الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة (Mesophilic) أقل من تلك الخارجة من مفاعلات نظام الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic)، وتتوافق هذه النتيجة مع ما عرضه كل من الباحثين [12][17][4][2]. حيث أعزى سبب ذلك إلى قلة تنوع الأحياء المجهرية التي تعمل في درجات الحرارة العالية وكذلك إلى عجز هذه الأحياء على إزالة نفس المدى من المركبات كما في نظيرتها التي تعمل بدرجات الحرارة الاعتيادية [4]. أما [12] فقد برر ذلك نتيجة لوجود المواد الغروية في مياه الفضلات الداخلة والتي تربك المعالجة عند الحرارة العالية فضلا عن تفتيت وانجراف اللباد (flocs) عند هذه الدرجات. وحسب الشكل (٢) فإن (100%) من تراكيز المياه الخارجة للمرحلة الأولى لمفاعل الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة وكذلك مفاعلي نظام الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic 40°C) و (Thermophilic 50°C) تقع ضمن محددات الطرح المحلية المعتمدة لصيانة الانهار والمياه العمومية من التلوث (COD ≤ 100mg/l) [18] أما مفاعل الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic 60°C) فكانت (84.5%) من القيم المسجلة تقع ضمن المحددات.

ومن ملاحظة الأشكال (٣)، (٤)، و (٥) فقد ازدادت تراكيز المواد العضوية الخارجة من أحواض المنظومة المختبرية مع انخفاض وقت المكوث، حيث كانت نسبة القيم التي تقع خارج محددات الطرح المحلية في مفاعل الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة ولكل من المراحل الثانية والثالثة والرابعة، هي 18%، 40%، و 64% على التوالي، في حين كانت (32%، 55% و 68%) من القيم المسجلة لمفاعل الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic 40°C) أكبر أو تساوي (100 ملغم/لتر) ولكل من المراحل الثانية والثالثة والرابعة على التوالي. أما بالنسبة لمفاعل الأحياء المجهرية الذي يعمل بالحرارة المرتفعة (Thermophilic 50°C) فإن (43%، 56% و 85%) من القيم المسجلة كانت ذات قيمة أكبر أو تساوي (100 ملغم/لتر)، في حين كانت (58%، 87% و 100%) من القيم المسجلة للماء الخارج من مفاعل الحرارة المرتفعة (Thermophilic 60°C) ذات قيمة (COD<sub>sol</sub>) أكبر أو تساوي (100 ملغم/لتر) والتي تعد خارج حدود مواصفات الطرح العراقية المعتمدة لصيانة الانهار والمياه العمومية من التلوث.

#### كفاءة المفاعلات البيولوجية في إزالة المواد الصلبة العالقة

يمثل الشكل رقم (٦) التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد الصلبة العالقة للخارج من أحواض الترسيب للمرحلة التشغيلية الأولى. وكما يلاحظ من الشكل فإن تراكيز المواد الصلبة العالقة الخارجة ولكل من مفاعل الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المعتدلة (Mesophilic 25°C) ومفاعل نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة (Thermophilic 40°C)، تقع ضمن محددات الطرح المحلية المعتمدة لصيانة الانهار والمياه العمومية من التلوث (suspended solids ≤ 60mg/l:التشريعات البيئية، ١٩٩٨). أما مفاعلا نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة (Thermophilic 50°C) و (Thermophilic 60°C) فقد كانت تراكيز الخارج لجميع المراحل هي خارج محددات الطرح ويعود السبب في ذلك إلى طبيعة الخصائص الترسيبية السيئة للحماة عند درجتي حرارة هاذين المفاعلين حيث تنخفض قابلية الحماة على التكتل مع زيادة درجة الحرارة، وتتوافق هذه النتيجة ما أورده كل من [12][2].

#### تأثير زمن المكوث الهيدروليكي (HRT) على تركيز الأحياء المجهرية (MLVSS)

تم حساب معدل تركيز الأحياء المجهرية (MLVSS) لكل مرحلة تشغيلية ولجميع المفاعلات البيولوجية للمحطة الاختبارية. يوضح الشكل رقم (٧) العلاقة بين معدل تركيز الأحياء المجهرية

(MLVSS) وزمن المكوث لجميع مراحل تشغيل المنظومة المختبرية. وكما يلاحظ أن هناك علاقة بين وقت المكوث الهيدروليكي وبين كمية الأحياء المجهرية المتبقية العالقة فيه، حيث يلاحظ انخفاض تركيز الأحياء المجهرية (MLVSS) مع انخفاض زمن المكوث الهيدروليكي وذلك بسبب زيادة معدل انجراف الأحياء المجهرية من حوض الترسيب وإلى خارج النظام [12][2].

كما يلاحظ أيضاً أن تركيز الأحياء المجهرية (MLVSS) لمفاعل الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة (Mesophilic) كان أكثر مما في مفاعلات الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة في أغلب المراحل التشغيلية ويعود السبب في ذلك إلى القابلية القليلة لإنتاج الحمأة عند ارتفاع درجة الحرارة كذلك وزيادة تحللها إلى جانب انجرافها إلى خارج النظام وبمعدلات أعلى من تلك الحاصلة في مفاعلات الأحياء المجهرية المعتدلة الحرارة وتتفق هذه النتيجة مع ما جاء به الباحثان [5][2]. أما لمفاعل الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic 40°C) فإنه امتلك تركيزاً مشابهاً نوعاً ما لتركيز مفاعل الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة ويعود السبب في ذلك إلى أن درجة الحرارة التي يعمل بها المفاعل (40°C) غالباً ما تعتبر بداية المدى الحراري لدرجات الحرارة المرتفعة أو إنها الحد الفاصل ما بين النظامين (Thermophilic & Mesophilic) [19].

ومن ملاحظة المنحني (٧) فإن مقدار حساسية الأحياء المجهرية لانخفاض وقت المكوث الهيدروليكي يكون متشابهاً نوعاً ما في مفاعلات الأحياء المجهرية التي تعمل بالحرارة المرتفعة (Thermophilic) وهذا ما يتبين من خلال ميل المنحني في حين تكون هذه الحساسية أقل في المفاعلات التي تعمل بالحرارة الاعتيادية (Mesophilic) حيث يلاحظ أن ميل المنحني أقل بشكل بسيط. ويعود السبب في ذلك إلى حالة تراجع قابلية الأحياء المجهرية على التكتل مع زيادة درجة الحرارة، مما يعني انجرافاً أعلى لتلك الأحياء مع انخفاض وقت المكوث الهيدروليكي (زيادة التصريف). وتتوافق هذه النتيجة مع ما أورده كل من [12][2].

**تأثير زمن المكوث الهيدروليكي على كفاءة إزالة المتطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)**

يمثل الشكل رقم (٨) العلاقة بين تغير كفاءة إزالة المواد العضوية معبراً عنها بدلالة (COD<sub>sol</sub>) وزمن المكوث الهيدروليكي ولجميع المفاعلات البيولوجية للمنظومة المختبرية. ومن ملاحظة الشكل يتبين أن كفاءة الإزالة تقل مع انخفاض زمن المكوث الهيدروليكي بثبوت درجة الحرارة، ويعود السبب في ذلك إلى عدم قدرة الأحياء المجهرية على أكسدة كل المواد العضوية الداخلة إلى المفاعلات عند انخفاض وقت المكوث الهيدروليكي (زيادة التصريف) وتتفق هذه النتيجة مع ما جاء به كل من [20][12][2].

**تأثير زمن المكوث الهيدروليكي على كفاءة أحواض الترسيب**

لغرض تقييم كفاءة أحواض الترسيب فقد تم حساب كفاءة الترسيب بصورة يومية طوال أيام التشغيل وذلك عن طريق حساب تركيز المواد الصلبة العالقة لكل من الداخل والخارج لهذه الأحواض. الجدول رقم (٢) يبين كفاءة الترسيب عند مراحل تشغيل المنظومة المختبرية المختلفة.

وكما يُلاحظ من الجدول فإن كفاءة الترسيب كانت متقاربة لكل من حوضي ترسيب الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة (Mesophilic) والأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة (Thermophilic 40°C)، أما كفاءة حوضي الترسيب في المفاعلات مرتفعة الحرارة (Thermophilic 50°C) و (Thermophilic 60°C) فقد كانت أقل مما يدل على انخفاض الكفاءة مع زيادة درجة الحرارة.

وتتوافق هذه النتيجة مع ما جاء به كل من [17][15] اللذان أعزيا سبب ذلك إلى تغير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للماء مع زيادة درجة الحرارة، كذلك فإن قابلية الأحياء المجهرية على التكتل تقل مع زيادة درجة الحرارة وهذا ما يؤدي إلى زيادة التشتت (Diffusivity)، فضلا عن أن ذوبان المواد الصلبة (solid-liquid solubility) يزداد عند زيادة درجة الحرارة وهذا ما يؤدي إلى تردي الخصائص الترسيبية مع زيادة درجة الحرارة، أما الباحث [2] فقد أشار إلى أن الخصائص الترسيبية الفقيرة للحمأة الخارجة من نظام الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة سببها هو شكل البناء الضعيف للباد (flocs).

### حساب ثابت معدل الإزالة (k) والمعاملات الخاصة بسرعة التفاعل (Ks, U<sub>max</sub>)

تم خلال البحث إيجاد قيم المعاملات الحركية التصميمية (kinetics) بالاعتماد على الطرق القياسية المعتمدة في كل من [20][16]. الجدول رقم (٣) يبين قيم المعاملات الحركية التصميمية للمفاعلات العاملة ضمن درجات الحرارة الاعتيادية والمفاعلات المحببة للحرارة المرتفعة. وكما يلاحظ ان قيمة ثابت معدل الإزالة النوعي (k) لمفاعل نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة كانت أعلى من قيم نظيراتها للمفاعلات التي تعمل بالحرارة المرتفعة حيث بلغت (0.017 day<sup>-1</sup>)، في حين انخفضت قيم ثابت الإزالة النوعي (k) مع ازدياد درجة الحرارة حيث بلغت (0.0130 day<sup>-1</sup>, 0.012, 0.008 day<sup>-1</sup>)، ولكل من الدرجات الحرارية (٦٠ م) و (٥٠ م) و (٤٠ م) على التوالي، وتتوافق هذه النتيجة مع ما أكده الباحث [1] حيث أشار إلى أن قيمة ثابت الإزالة النوعي (k) تنخفض عند ارتفاع درجة الحرارة إلى ما يزيد عن (35°C) وأعزى سبب ذلك إلى حدوث تناقص في أعداد الأحياء المجهرية من نوع (Mesophilic). كذلك يلاحظ من النتائج أن قيمتي تركيز المنتصف (Ks) ومعامل الإزالة القصوى (U<sub>max</sub>) لمفاعل الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة كانتا أقل من نظيراتها في مفاعلات الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة، كذلك يلاحظ أن هذه القيم تزداد مع زيادة درجة الحرارة في مفاعلات الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة. وتتوافق هذه النتائج مع تلك المستحصلة من قبل الباحثين [8][5].

إن قيمة تركيز المنتصف (Ks) مهم جدا ذلك انه يمثل تركيز المواد العضوية الذائبة التي تجعل معدل سرعة الانقسام أو التكاثر (معدل سرعة الإزالة) تساوي نصف السرعة القصوى، إن قيمة تركيز المنتصف (Ks) الكبيرة لنظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة تعطي إمكانية للعمل بتركيز للمواد العضوية الذائبة أقل من تركيز المنتصف (Ks) لها وبالتالي إنتاج كمية حمأة أقل بكثير مما في نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة مما يقلل من حجم وحدات معالجة الحمأة وأحيانا إلى الاستغناء عنها وهذا يعمل على تقليل كلف إنشاء محطات معالجة الحمأة.

كذلك يلاحظ من النتائج ان قيم معامل إنتاج الحمأة (Y) لمفاعلات نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة قد انخفضت عن مثيلاتها لنظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة ويتوافق هذا مع ما أورده العديد من الباحثين [12][5][2]، ويزداد هذا الانخفاض مع ارتفاع درجة الحرارة، ويتوافق هذا مع ما أورده [19][12][8][5]. حيث أشار [19] إلى أن سبب ذلك هو صعوبة توليد الحمأة عند ارتفاع درجات الحرارة. وبرر [12] سبب ذلك إلى ازدياد معدل التحلل (K<sub>d</sub>) للأحياء المجهرية عند ارتفاع درجة الحرارة، (لاحظ الجدول رقم ٤). ومما مبين في أعلاه يتضح أن نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المعتدلة يمتلك معامل لإنتاج الحمأة أكبر ومعامل انحلال أقل، أما نظام الأحياء المجهرية المحببة للحرارة المرتفعة فانه يمتلك معامل إنتاج حمأة أقل ومعامل انحلال أكبر بكثير مما يعني بالتالي على أن كمية الحمأة الناتجة في نظام الحرارة المرتفعة أقل بكثير مما في نظام الحرارة الاعتيادية وهذا ما يقلل من حجم وحدات معالجة الحمأة المطلوبة ويعمل على تقليل كلف إنشاء محطات معالجة الحمأة.

### الاستنتاجات

١. عند نفس الظروف التشغيلية فإن تركيز المواد العضوية الخارجة من مفاعل نظام الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة يكون أقل من تلك الخارجة من مفاعلات نظام الأحياء المجهرية مرتفعة الحرارة.
٢. يكون تركيز الأحياء المجهرية (MLVSS) في المفاعلات البيولوجية العاملة ضمن مدى الأحياء المجهرية معتدلة الحرارة أكثر مما في مفاعلات الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة، ويقل هذا التركيز مع زيادة درجة حرارة التشغيل.
٣. وجد أن تركيز الخارج للمواد الصلبة العالقة لكل من مفاعلي نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المعتدلة (Mesophilic) والمرتفعة (Thermophilic, 40°C) عند وقت تعويق هيدروليكي ثابت مقداره (4) ساعات لحوضي الترسيب ولجميع المراحل تقع ضمن محددات الطرح المحلية المعتمدة لصيانة الانهار والمياه العمومية من التلوث ( $Suspended Solids \leq 60mg/l$ ).
٤. يؤثر انخفاض وقت المكوث الهيدروليكي بشكل واضح على أداء محطات المعالجة التي تعمل بنظامي الحرارة الاعتيادية أو المرتفعة حيث أدى انخفاض وقت المكوث إلى انخفاض كل من كفاءة إزالة المواد العضوية، وكفاءة إزالة أحواض الترسيب كذلك وزيادة في معامل الدليل الحجمي للحمأة (SVI).
٥. كانت قيمة ثابت الإزالة النوعي (k) ومعامل إنتاج الحمأة (Y)، لمفاعل نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المعتدلة أكبر من مثيلاتها لمفاعلات نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة وتنخفض هذه القيمة مع ازدياد درجة الحرارة.
٦. تزداد قيم كل من تركيز المنتصف (Ks) معامل الإزالة القصوى ( $U_{max}$ )، ومعامل انحلال الحمأة ( $K_d$ ) مع زيادة درجة الحرارة لمفاعلات الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة وتكون أكثر من مثيلاتها لمفاعل الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المعتدلة.

### التوصيات

١. دراسة كفاءة إزالة كل من النيتروجين والفسفور باستخدام نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة.
٢. دراسة إمكانية استخدام بدائل أخرى لغرض ترسيب الحمأة المتولدة من نظام الأحياء المجهرية المحبة للحرارة المرتفعة.

### المصادر

- [1].Eckenfelder, Jr.W., , "Industrial water pollution control", 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw Hill International Edition, Singapore, (2000).
- [2].Suvilampi, Juhani, "Aerobic wastewater temperature under high and varying temperature", M.Sc. Thesis, Department of Biological and Environmental Science, University of Jyväskylä, (2003).
- [3].Stover, E.L. and Samuel G.J., "High rate thermophilic pretreatment of high strength industrial wastewaters". In *Proceedings of the 52<sup>th</sup> Industrial Waste Conference*, Purdue University, U.S.A., (1997).
- [4].Tripathi, C.S. & Allen D.G., "Comparing of mesophilic and thermophilic aerobic biological treatment in sequencing batch reactors treating bleach kraft pulp mill effluent", *Water Research Journal*, Vol. (33), No. (3), (1999).

- [5].Lapara, T.M., Konopka A., Nakatsu C.H. and Alleman E., "Thermophilic aerobic wastewater treatment in continuous flow bioreactor", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. (126), No. (8), (2000).
- [6].Stover, & Associates, Inc, "BETT Process & Pilot Plant", The Stover Group, USA, (2003).
- [7].Rozich, A.F., Clay S.G. and Colvin R.J., "Thermophilic aerobic treatment of high strength groundwater", *Proceedings of the 47<sup>th</sup> Industrial Waste Conference*, Purdue University, U.S.A, (1992).
- [8].Couillard, D. and Zhu S., "Thermophilic aerobic process for the treatment of slaughterhouse effluents with protein recovery". *Environ. Pollution*. Vol. (79), pp. 121-126, (1993) .
- [9].Malladi, B. and Ingham S. C., "Thermophilic aerobic treatment of potato-processing wastewater". *World J. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. (9), pp. 45-49, (1993).
- [10].Richard, J., Walter J., Christian D., Alan F., "Design and start-up of an advanced treatment system for high strength wastewater from a chemical plant", *PMC Technologies*, Pennsylvania, (2000).
- [11].Rozich, A.F., Colvin R.J. and Bordacs K., "Pilot trial of advance fluidized composting for high strength industrial waste treatment", Presented at the IWA World Water congress in Berlin, (2002).
- [12].Vogelaar, J.C.T., "Thermophilic aerobic post treatment of anaerobically pretreated paper process water", Ph. D. Thesis, University of Wageningen, (2002).
- [13].Choorit, W. and Wisarnwan P., "Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent", *Electrical journal of biotechnology*, Vol. (10), No. (3), (2007).
- [14].احمد، محمد سالم شهاب، "استخدام الأحواض المهوات ذات التهوية الناشرة في معالجة مياه مطروحات معمل ألبان نينوى"، رسالة ماجستير، كلية الهندسة/ جامعة الموصل، (٢٠٠٢).
- [15].Lapara, T.L. & Alleman J.E., "Thermophilic aerobic biological wastewater treatment", *Water Research Journal*, Vol. (33), No. (4), pp. 895-908, (1998).
- [16].Ramalho, R.S., "Introduction to wastewater treatment process", *Academic PressInc.*, Canada, (1977).
- [17].Suvilampi,J.E. and Rintala J.A., "Pilot-scale comparison of thermophilic suspended carrier biofilm process and activated sludge process in pulp and paper mill effluent treatment ", *Water Science and Technology*, Vol. 50 No 3 pp 95–102, (2004).
- [18].جمهورية العراق، وزارة الصحة، دائرة حماية وتحسين البيئة، "التشريعات البيئية"، قسم العلاقات والتوعية البيئية، كانون الاول، (١٩٩٨).
- [19].Kurian R. & Nakhla G., "Performance of Aerobic MBR Treating High Strength Oily Wastewater at Mesophilic –Thermophilic Transition Temperature", *Water Environment Foundation*, Canada, (2006).
- [20].Metcalf and Eddy, Inc., "Wastewater engineering treatment /disposal /reuse", 4<sup>th</sup>, *McGraw-Hill, Inc*, New York, (2003).



الشكل (١): مخطط يوضح المفاعل البيولوجي المستخدم في البحث مع طريقة ربط المنظومة المختبرية.

الجدول (١): المراحل التشغيلية للمفاعلات المختبرية وخصائص كل مرحلة

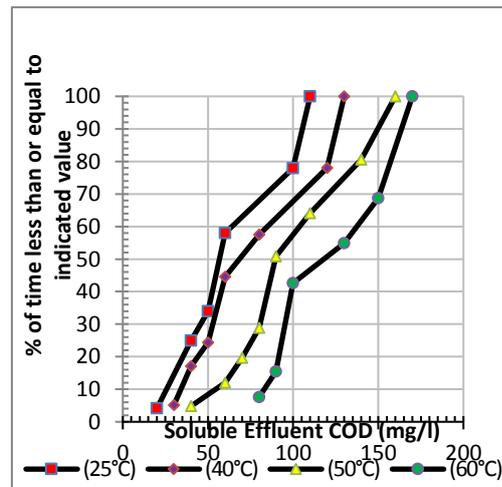
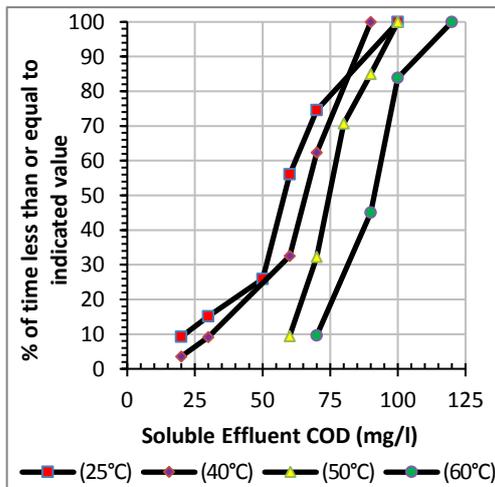
المرحلة	درجة حرارة تشغيل المفاعل الاول (°C)	درجة حرارة تشغيل المفاعل الثاني (°C)	درجة حرارة تشغيل المفاعل الثالث (°C)	درجة حرارة تشغيل المفاعل الرابع (°C)	التصريف الداخلي لحوض التهوية (لتر/يوم)	أحواض الترسيب		زمن المكوث للمفاعلات البيولوجي (ساعة)
						الحجم (لتر)	القطر (سم)	
١	٢٥	٤٠	٥٠	٦٠	٧,٥	١,٢٥	٧,٥	٢٤
٢	٢٥	٤٠	٥٠	٦٠	١٠	١,٦٦	٨,٦٦	١٨
٣	٢٥	٤٠	٥٠	٦٠	١٥	٢,٥	١٠,٦	١٢
٤	٢٥	٤٠	٥٠	٦٠	٣٠	٥	١٥	٦

الجدول (٢) كفاءة أحواض الترسيب لمختلف مراحل تشغيل المنظومة المختبرية

كفاءة الترسيب %				التصريف L/day) (	المرحلة
Mesophilic (25°C)	Thermophili (40°C)c	Thermophili (50°C)c	Thermophili (60°C)c		
98.6	98.8	84.2	80.8	7.5	الأولى
97.4	97.8	82.3	77.1	10	الثانية
96.8	96.7	79.4	75.3	15	الثالثة
95.9	95.8	78.8	73.6	30	الرابعة

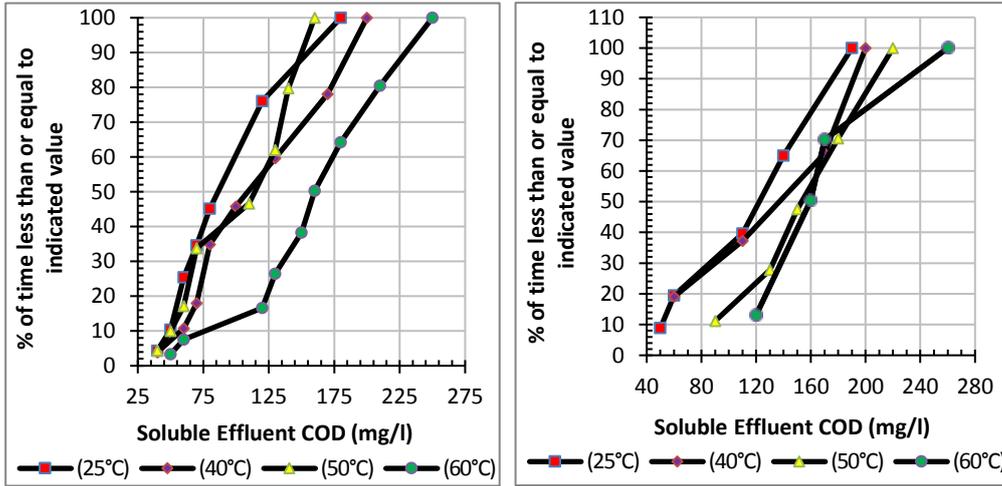
الجدول (٣) المعاملات البيولوجية التصميمية للمفاعلات المحبة للحرارة الاعتيادية والمرتفعة

المفاعل البيولوجي				الوحدة	المعامل
Mesophili (25°C)c	Thermophil (40°C)ic	Thermophili (50°C)c	Thermophil (60°C)ic		
٠,٠١٧	٠,٠١٣	٠,٠١٢	٠,٠٠٨	day <sup>-1</sup>	k
٢,١١	٢,٤٦	٣,١٧	٤,٨٥	day <sup>-1</sup>	U <sub>max</sub>
٦٤,٦	١٢٥,٩٧	١٨١	٤٠٢,١٣	mg/L	Ks
٠,٢٠	٠,١٠٢	٠,٠٩٤	٠,٠٨	mgVSS/mgCO D <sub>r</sub>	γ
٠,٠٢	٠,٠٢٧	٠,٠٣٢	٠,٠٤١	day <sup>-1</sup>	k <sub>d</sub>

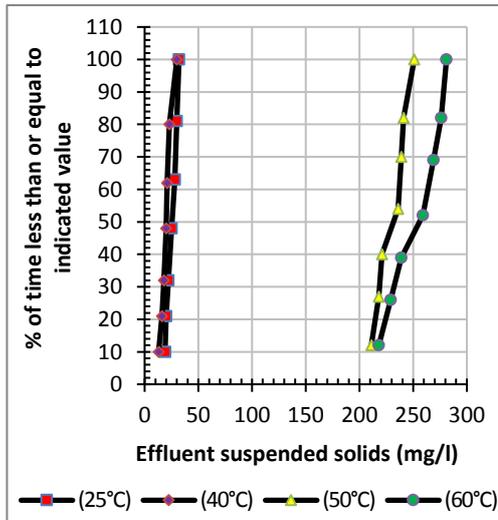


الشكل (٢): التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد العضوية الخارجة من مفاعلات المرحلة الاولى (وقت التعويق ٢٤ ساعة)

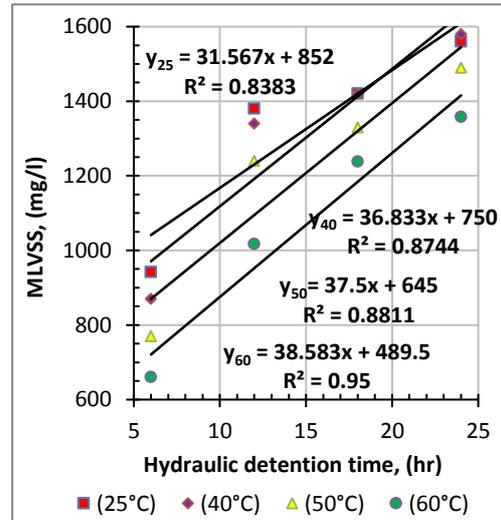
الشكل (٣): التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد العضوية الخارجة من مفاعلات المرحلة الثانية (وقت التعويق ١٨ ساعة)



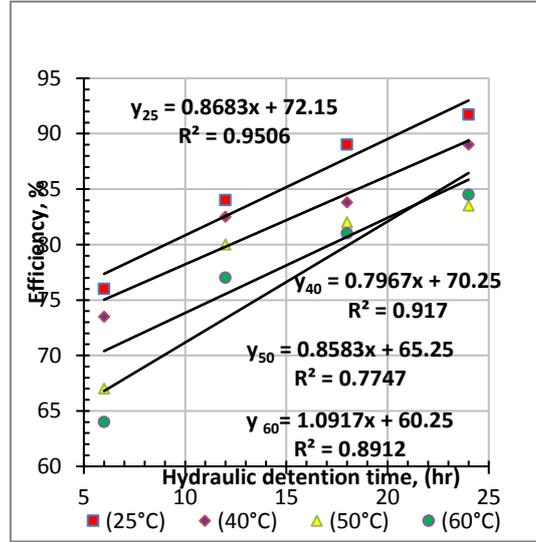
الشكل (4): التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد العضوية الخارجة من مفاعلات المرحلة الثالثة (وقت التعويق ١٢ ساعة).



الشكل (5): التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد العضوية الخارجة من مفاعلات المرحلة الرابعة (وقت التعويق ٦ ساعة).



الشكل (٧): علاقة زمن المكوث الهيدروليكي مع تركيز الأحياء المجهرية.  
الشكل (٦): التوزيع التكراري التراكمي لتراكيز المواد الصلبة العالقة الخارجة من مفاعلات المرحلة الأولى.



الشكل (٨): علاقة زمن المكوث الهيدروليكي مع كفاءة الإزالة.