

4 و 7 و 10. وكانت جميع التجارب أجريت في ضغط مدخل ثابت 4 bar [9].

1.3 نمذجة التفاعلات الكيميائية في انهيار الفقاعة

استخدم التجويف الهيدروديناميكي لزيادة حدة العمليات الكيميائية. يعزى هذا التأثير إلى إنتاج أنواع من الجذور الحرة الشديدة التفاعل نتيجة حركة الفقاعة مدفوعة بتغير الضغط بكميات كبيرة في الوسط السائل. فقاعات الغاز في الوسط تخضع لاعلى انطلاق نحو الذروة نتيجة تأثير تغير الضغط بكميات كبيرة [8].

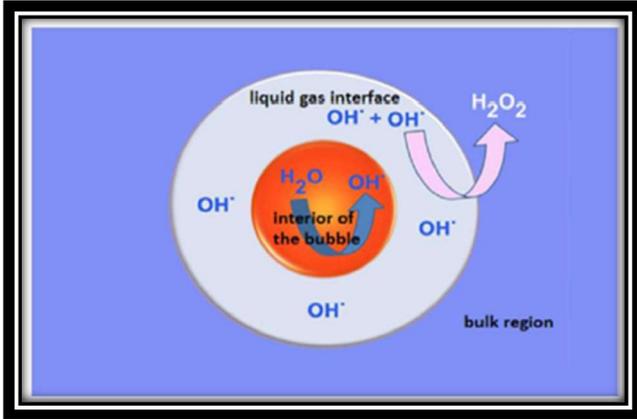
في طور التوسع، ينتشر بخار السائل في الفقاعة بسبب التبخر في واجهة الغاز - السائل، عندما ينخفض الضغط في الفقاعة إلى ما دون ضغط بخار السائل عند درجة حرارة التشغيل. أثناء مرحلة الضغط اللاحقة، الضغط داخل الفقاعة يزداد ويبدأ البخار في التكاثف. ومع ذلك، اعتماداً على طبيعة تغير الضغط، يمكن أن يكون الانهيار سريعاً جداً لدرجة أن سرعة انهيار جدار الفقاعة تصل أو تتجاوز سرعة الصوت في الوسط. في هذا الوقت، البخار الموجود في مركز نواة الفقاعة ليس لديه الوقت الكافي للهروب. ثم يتعرض هذا البخار المحاصر إلى درجات حرارة وضغط شديدة يتم الوصول إليها أثناء انهيار الفقاعة. ظروف درجة الحرارة والضغط هذه كافية للتسبب في انشقاق جزيئات البخار لحدوث الجذور الحرة كما موضح في الشكل (1). في معظم التطبيقات، يتم استخدام الماء كوسط سائل بسبب انخفاض لزوجته وضغط البخار المنخفض، مما يساعد على حدوث التجويف [11].

تحدث التفاعلات الكيميائية بكميات كبيرة عندما تختلط محتويات الفقاعة مع السائل المحيط. يمكن أن تحدث عملية الخلط بطريقتين:

عند نهم الفقاعة عند نقطة الضغط الأقصى (أو الحد الأدنى لنصف القطر)

عن طريق انتشار أنواع كيميائية مختلفة عبر جدار الفقاعة أثناء نبضات الفقاعة

ومع ذلك، فإن المساهمة في عملية الخلط الإجمالية عن طريق التجزئة هي أعلى بكثير، لأن عملية الانتشار بطيئة [7].



شكل 1: تشكيل الجذور الحرة OH في الفقاعة لحظة الانهيار [16].

1.4 تأثير الخواص الفيزيائية - الكيميائية

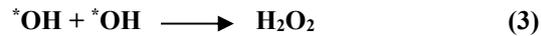
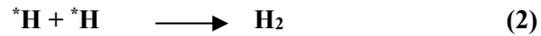
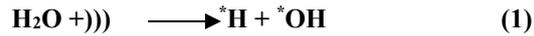
تشمل الخواص الفيزيائية والكيميائية هذه التأثيرات [11]

1.4.1 تأثير ضغط البخار السائل

زيادة تقلب السائل، يمكن أن يتحول السائل بسهولة إلى طور البخار. لذا هو أقل استحساناً في المضخات والمعدات.

على الرغم من النتائج المؤثرة التي تم الحصول عليها في مجال مفاعلات Sonochemical وتطبيقاتها في تطهير ومعالجة المياه إلا أنها تعتبر مكلفة من الناحية الاقتصادية بسبب ارتفاع كلفة المعالجة واستهلاك الطاقة والصعوبات المتعلقة بزيادة الحجم. أجهزة التجويف Orifice أو Venture يمكن أن تكون عبارة عن تدفق خطي بسيط أو تعتمد على دوامات التدفق الدوراني [14] [12].

التجويف الهيدروديناميكي قادر على توليد نقاط ساخنة، وبالتالي فإن الجزيئات التي تكون ضمت التجويف أو بالقرب منه تنقسم حرارياً إلى جزيئات اصغر وجذور حرة شديدة التفاعل، في حالة تعرض المياه العادمة إلى HC سيتم فصل جزيئات الماء إلى جذور الهيدروكسيل (OH) تحت ظروف ضغط ودرجة حرارة قصوى، وبالتالي من الممكن لجذور الهيدروكسيل التي لها إمكانية أكسدة قوية أن تؤكسد أي جزيئات عضوية موجودة في المياه العادمة، هنالك اليان رئيسان تشترك في تحطيم الملوثات العضوية عن طريق HC، الأولى التحلل الحراري لجزيء الملوثات المتطايرة المنحصرة داخل التجويف المنهار، والثانية تفاعل جذور الهيدروكسيل مع الملوثات. من الممكن أن تحدث كلتا الآليتين في قلب التجويف، واجهة التجويف وفي وسط السائل. في بعض الأحيان تكون التأثيرات الميكانيكية مهمة أيضاً في تحطيم الملوثات، في بعض الحالات يمكن أن تؤدي الكثافة العالية لموجات الصدمة (الناجمة عن انهيار التجويف) إلى كسر الروابط الجزيئية خاصة المركبات المعقدة ذات الوزن الجزيئي الكبير، وبالتالي تكون المركبات المفككة أكثر عرضة لهجوم OH، وبالتالي من الممكن زيادة معدل أكسدة المركبات باستخدام HC كطريقة معالجة مسبقة. التفاعلات التالية من الممكن أن تحدث أثناء أكسدة الجزيئات العضوية باستخدام HC [5] [3]:



Molecules

intermediates

يهدف البحث إلى استخدام وتطبيق تقنيات حديثة في معالجة المياه المصرفة من محطات توليد الطاقة الكهربية بكلفة منخفضة، ويعتبر التجويف الهيدروديناميكي أحد تلك التقنيات لذا سوف يتم تقييم عمل المنظومة المصنعة مختبرياً وبيان كفاءة المعالجة من خلال إجراء فحوصات COD و TOC التي تعتبر من أهم المؤشرات على التلوث الكيميائي في المياه.

1.1 تأثير انخفاض الضغط

انخفاض الضغط المفاجئ (ΔP) أحد أكثر العوامل أهمية في مفاعلات التجويف حيث أنه يملئ الكثافة العديدة ونوعية التجاويف بناء على نوع جهاز التجويف، بعيداً عن كمية ونوعية التجاويف، انفجار التجاويف هو الأكثر أهمية في آلية الأكسدة الحقيقية. علاوة على ذلك، القص العالي المتولد أثناء انهيار التجويف أيضاً قد ينكسر فيزيائياً فيفتح الأغلفة الخارجية للقطرات المائية والأحياء المجهرية ويساعد على تداخل الضغط وبالتالي يسبب المعالجة والتعقيم. يكون الضغط الأمثل عادة بين الضغط التشغيلي الأدنى والأعلى، المقابلة لكثافة وبقعة تجويف منخفضة على التوالي [10]. يمكن أن تؤدي الضغوط العالية أيضاً إلى هروب التجاويف من الماء دون انهيار، مما يقلل من إنتاج جذور الهيدروكسيل وبالتالي خفض كفاءة المعالجة، كما لوحظ زيادة الضغط الداخلي (Orifice, Venturi) تؤدي إلى زيادة المعالجة حتى ضغط معين وبعدها تبدأ بالانخفاض [9].

1.2 تأثير الدالة الحامضية على المعالجة

تأثير درجة الدالة الحامضية باستخدام التجويف تعتبر ذات أهمية كبيرة من وجهة نظر معالجة مياه الصرف وإعادة التدوير والاستخدام. تمت دراسة تأثير الرقم الهيدروجيني في ثلاثة مستويات مختلفة من الرقم الهيدروجيني:

يربط جهاز التجويف بسهولة عن طريق وصلات الربط. مواصفات جهاز Venture هو تركيب اتبوبي الشكل يتدفق السائل عبر طول انبوب بقطر مقفاوت لتجنب السحب الديناميكي (الحركي) الهوائي. يحتوي انبوب Venture عادة على مخروط دخول بمقدار 30 درجة ومخروط خروج بمقدار 5 درجات. تم التحكم في درجات الحرارة خلال التجربة باستخدام مبادل حراري يتكون من انابيب نحاسية ومضخة لاعادة تدوير الماء البارد. كان متوسط درجة الحرارة بحدود 35 درجة مئوية. التحكم بمعدل الجريان للحصول على تغير بالضغط المدخل يتم عن طريق الصمامات (2 و 3). تم تحليل اداء ازالة COD لجهاز التجويف عند مدخل اربعة ضغوط مختلفة (1-4 bar). تعد P1 واحدة من اهم المعلمات المعتمدة لتقييم كفاءة جهاز التجويف الهيدروديناميكي، نظرا لانه كلما زاد الضغط يدخل السائل في الانقباض، وبالتالي تزداد عدد التجاويف المتولد.

يتم تعديل الاس الهيدروجيني للنموذج باستخدام حامض الكبريتيك و هيدروكسيد الصوديوم قبل المعالجة في جهاز التجويف، تم اعتماد هذا الاجراء بناء على [13] و [12].

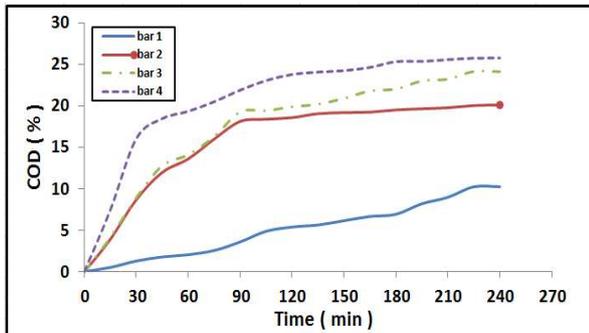
الذين اظهروا ان تحلل المركبات العضوية كان اكثر كفاءة في ظل الظروف الحامضية.

3. النتائج والمناقشة

التجربة الحالية تضمنت ثبوت درجة حرارة السائل (2 ± 30) عن طريق مبادل حراري، تتضمن النتائج والمناقشة مايلي:

3.1 تأثير الضغط المدخل على ازالة المتطلب الاوكسجين الكيميائي

استخدم نموذج من المياه الذي جلب من محطة جنوب بغداد لتوليد الطاقة الكهربائية كان تركيز COD (392 mg/l)، $\text{pH}=7.37$ ودرجة الحرارة للنموذج (18°C)، تم تحديد تأثير الضغط المدخل على اداء ازالة المركبات العضوية من المياه المصرفة للمحطة بواسطة منظومة التجويف الهيدروديناميكي HC. النتائج الموضحة في الشكل (2)، في المرحلة الاولية من التجويف الهيدروديناميكي (HC) تقل نسبة الازالة من COD عند مدخل ضغوط مختلفة مع زيادة وقت التجويف. عند وقت تشغيل المنظومة خلال 15min الاولى وبمدخلات ضغط مختلف (1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar) نلاحظ انه عند ضغط 1 bar كانت نسبة ازالة COD 0.51% وتبدأ نسبة الازالة بالازدياد تدريجيا مع زيادة وقت التشغيل حتى تصل 10.2% خلال 240 min ، اما عند مدخل ضغط 2 bar كانت نسبة ازالة COD 3.98% وتبدأ الزيادة في ازالة COD الى ان تصل 20.18% خلال 240 min، اما عند مدخل ضغط 3 bar نلاحظ نسبة ازالة COD 4.12% عند 15 min وتبدأ الزيادة في ازالة COD حتى تصل 24.11% خلال 240 min ، اما عند مدخل ضغط 4 bar اصبح نسبة ازالة COD 7.44% عند 15 min وتزداد نسبة الازالة لتصبح 25.78% . نلاحظ من خلال النتائج اعلاه ان نسبة ازالة COD من المياه المصرفة الملوثة بالمركبات العضوية تكون افضل في حالة الضغوط العالية ولفترة زمنية 4 hour .



الشكل 2: تأثير مدخلات الضغوط على نسبة ازالة COD بمرور الزمن.

كلما زاد تطاير السائل، زاد محتوى البخار داخل الفقاعة. شدة الانهيار تتخفض. لذا فان ذروة درجة الحرارة والضغط ستكون اقل.

تحتاج اللزوجة العالية إلى مدخلات طاقة أعلى، وإذا حدث التجويف، فإن التغيرات في اثار الضغط الناتجة عن الانهيار ليست كبيرة، ولكن عدد التجويف تقلل الأحداث.

1.4.2 تأثير درجة حرارة السائل

- زيادة درجة حرارة السائل السائب يزيد من تقلب السائل، يمكن أن يتحول السائل بسهولة إلى مرحلة بخار. لذلك هو أقل رغبة في المضخات و معدات أخرى.
- ارتفاع درجة الحرارة يقلل من قابلية الغاز على الذوبان وهو المصدر الرئيسي لتنبوية التجويف ويقلل من معدل حدوث التجويف.

2. المواد وطرائق العمل

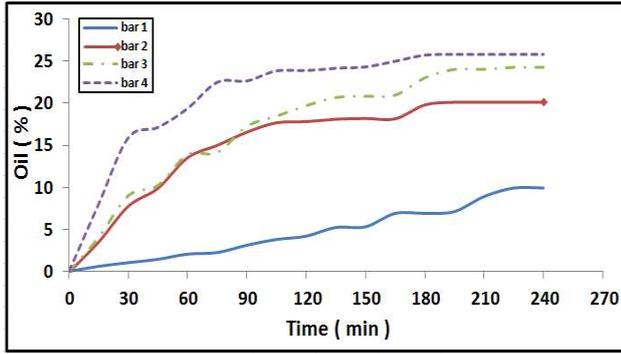
صورة (1) توضح تصنيع الجهاز التجريبي المستخدم في الدراسة الحالية، تم بناء النظام في دائرة مغلقة تتألف من:

- خزان تغذية حجم (20 l)
- مضخة ماء (1500 W, 220 V, 50 Hz, 2850 rpm, 10 bar, 6 l/min)
- صمامات تحكم
- مقياس ضغط عدد 2
- جهاز تجويف Venture
- انابيب و وصلات ربط
- مقياس درجة الحرارة
- حامض الكبريتيك H_2SO_4
- هيدروكسيد الصوديوم NaOH

استخدمت الطريقة اللونية في جهاز قياس الطيف اللوني DR5000 لقياس تراكيز COD و TOC اما قياس الزيوت قيست بواسطة HORIBA OCMA - 350.



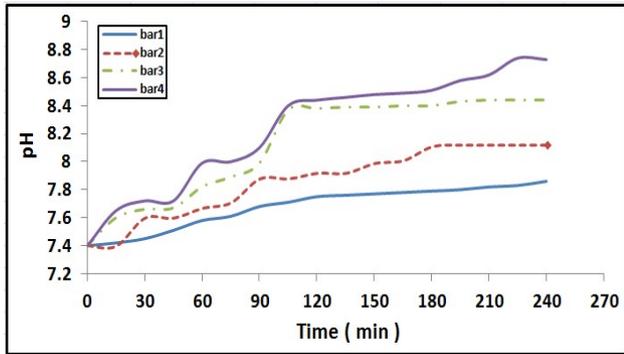
صورة 1: منظومة معالجة التجويف الهيدروديناميكي.



الشكل 4: تأثير مدخلات الضغوط على نسبة ازالة الزيوت بمرور الزمن.

4.3 تأثير الضغوط المدخل على الدالة الحامضية

نلاحظ من الشكل 5, هنالك زيادة في مقدار الدالة الحامضية بالاتجاه القاعدي لكل مدخلات الضغوط (1bar, 2bar, 3bar, 4bar), لكن يبقى اعلى مدخل ضغط 4bar يسجل قيمة عالية في قراءة الدالة الحامضية (pH=8.73) خلال 240 min من زمن المعالجة. ويرجع السبب في ذلك الى زيادة الجذور الحرة من OH عند زيادة الضغط المدخل وزمن المعالجة.



الشكل 5: علاقة الدالة الحامضية (pH) مع التجويف الهيدروديناميكي (HC) في اوقات زمنية مختلفة ومدخلات ضغوط مختلفة.

4. الاستنتاجات

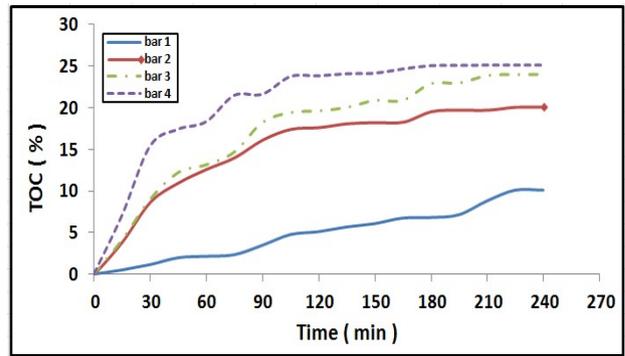
اظهر البحث انه يمكن تنفيذ التجويف الهيدروديناميكي في خطوات معالجة المياه والتي يكون الاستفادة منها بشكل مناسب من خلال تأثير الانفجارات الداخلية للفقاعات. الاختيار المناسب لاعداد مفاعل التجويف الهيدروديناميكي يلعب دورا اساسيا في الية المعالجة. علاوة على ذلك الظروف المثلى مثل ظواهر التجويف في توليد الجذور التفاعلية, تخلخل الضغط التي تساعد في تحلل الملوثات العضوية. تعتبر تقنية التجويف الهيدروديناميكي طريقة مناسبة بسبب امكانية المعالجة على نطاق واسع. من النتائج المستحصلة, بشكل عام تقنية التجويف الهيدروديناميكي المتعددة الاستخدامات تعتبر من المعالجات الصديقة للبيئة. اظهرت التجارب ان افضل زمن معالجة 240 min ومدخل ضغط 4 bar حيث بلغت نسبة انخفاض قيم COD و TOC و Oil الحامضية (pH) حيث بلغت (8.73).

المصادر

- [1] J. Lalwani, A. Gupta and S. Thatikonda, "Oxidative treatment of crude pharmaceutical industry effluent by hydrodynamic cavitation," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, pp. 10-4281, 2020.

3.2 تأثير الضغوط المدخل على ازالة TOC

النتائج الموضحة في الشكل (3), في المرحلة الاولى من التجويف الهيدروديناميكي (HC) تقل نسبة الازالة من TOC عند مدخل ضغوط مختلفة مع زيادة وقت التجويف, عند وقت تشغيل المنظومة خلال 15min الاولى وبمدخلات ضغط مختلفة (1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar), نلاحظ انه عند ضغط 1 bar كانت نسبة ازالة TOC 0.5% وتبدأ نسبة الازالة تزداد تدريجيا مع زيادة وقت التشغيل حتى تصل 10.12% خلال 240 min, اما عند مدخل ضغط 2 bar كانت نسبة ازالة TOC 3.99% وتبدأ الزيادة في ازالة TOC الى ان تصل 20.1% خلال 240 min, اما عند مدخل ضغط 3 bar نلاحظ نسبة ازالة TOC 4.1% عند 15 min وتبدأ الزيادة في ازالة TOC حتى تصل 24.02% خلال 240 min, اما عند مدخل ضغط 4 bar اصبح نسبة ازالة TOC 7.05% عند 15 min وتزداد نسبة الازالة لتصبح 25.16%. كذلك نلاحظ من خلال النتائج المتحده اعلاه ان نسبة ازالة TOC من المياه المصرفة الملوثة بالمركبات العضوية تكون افضل في حالة الضغوط العالية ولفترة زمنية 4 hour.



الشكل 3: تأثير مدخلات الضغوط على نسبة ازالة TOC بمرور الزمن

3.3 تأثير الضغوط المدخل على ازالة الزيوت

يبين الشكل 4 نسب ازالة الزيت في الماء الى الحد الاقصى تحت مدخل ضغط (1bar, 2bar, 3bar, 4bar), كانت تركيز الزيت (67 mg/l) بعد (4 hour), يتناقص تركيز الزيت تدريجيا في الماء مع زيادة وقت التجويف. عندما كان زمن التجويف (15 min), كان نسبة ازالة الزيت عند مدخل ضغط (1bar) 0.16% وبعد مرور 240 min اصبح نسبة الازالة 9.9%, اما عند مدخل ضغط 2bar كانت نسبة ازالة Oil 3.6% وبعد مرور 240 اصبح نسبة الازالة 20.2%. اما عند الضغط المدخل 3bar كانت نسبة ازالة Oil هي (4.04%, 24.24%) على التوالي. اما عند مدخل ضغط 4bar في الزمن (15, 240 min) كانت نسبة ازالة Oil (8.01%, 25.81%) على التوالي. تشير هذه النتائج الى انه في ظل نفس الظروف التشغيلية, تزداد نسبة ازالة الزيت من الماء مع زيادة الضغط المدخل في المرحلة الاولى, عندما يصل تركيز الزيت الى اقصى قيمة فانه لا ينخفض بسرعة كبيرة عند ارتفاع الضغط المدخل. عندما يكون الضغط (4bar) يكون انخفاض الزيت اكثر وضوحا, مما يشير الى ان معدل ازالة ملوثات الزيت يكون اكبر. ويرجع السبب في ذلك لاحتواء الزيت الموجود في الماء بشكل اساسي على زيت عالق وزيت مذاب, في المرحلة الاولى يكون التأثير الميكانيكي للتجويف اكبر من تأثير تحلل التجويف. مع زيادة الضغط يكون هنالك تأثير ميكانيكي اقوى, وبالتالي تزداد قابلية ذوبان الزيت العالق. عندما يزداد الضغط المدخل الاولى يكون تركيز الزيت في الماء اعلى, بينما في المرحلة الثانية عندما يل تركيز الزيت اقصى قيمة, يسود تأثير تحلل الجذور الحرة OH على التأثير الميكانيكي ل HC وبذلك ينخفض تركيز الزيت.

- cavitation–Applications in food processing," *Food Reviews International*, vol. 36, pp. 668-691, 2020.
- [11] V.O.Abramov, A.V.Abramova, G.Cravotto, R.V. Nikonov, I.S.Fedulov and V.K.Ivanov, "Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 70, p. 105323, 2021.
- [12] V. P. Sarvothaman, *et al.*, "Modelling of vortex based hydrodynamic cavitation reactors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 377, p. 119639, 2019.
- [13] V. K. Saharan, *et al.*, *Advanced oxidation technologies for wastewater treatment: an overview*: Elsevier, Butterworth, Heinemann, UK, 2014.
- [14] X. Long, *et al.*, "Experimental investigation of the global cavitation dynamic behavior in a venturi tube with special emphasis on the cavity length variation," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 89, pp. 290-298, 2017.
- [15] Y. Elshorbany, "Investigation of the Tropospheric Oxidation Capacity and Ozone Photochemical Formation in the City of Santiago de Chile-Field Measurements and Modelling Study," Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, 2018.
- [16] Y.-F. Ye, Y.Zhu, N.L.XinWang and Z.Su, "Treatment of rhodamine B with cavitation technology: comparison of hydrodynamic cavitation with ultrasonic cavitation," *RSC Advances*, vol. 11, pp. 5096-5106, 2021.
- [2] K. S. Ojha, "Application of ultrasound technology for functional meat products," University College Cork, 2017.
- [3] K.Yasui, "Numerical simulations for sonochemistry," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 78, p. 105728, 2021.
- [4] M. B. Mane, *et al.*, "A novel hybrid cavitation process for enhancing and altering rate of disinfection by use of natural oils derived from plants," *Ultrasonics sonochemistry*, vol. 61, p. 104820, 2020.
- [5] M. Capocelli, *et al.*, "A Transport-Phenomena Approach to Model Hydrodynamic Cavitation of Organic Pollutants," *Water*, vol. 12, p. 1564, 2020.
- [6] M. Gaḡol, *et al.*, "Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation—a review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 338, pp. 599-627, 2018.
- [7] M. T. Gevari, *et al.*, "Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, p. 115065, 2020.
- [8] P. R. Gogate and A. M. Kabadi, "A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 44, pp. 60-72, 2009.
- [9] P. R. Gogate and G. S. Bhosale, "Comparison of effectiveness of acoustic and hydrodynamic cavitation in combined treatment schemes for degradation of dye wastewaters," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 71, pp. 59-69, 2013.
- [10] S. Arya, *et al.*, "Novel, nonthermal, energy efficient, industrially scalable hydrodynamic

Reducing Oil and Organic pollutant concentrations from wastewater power plants using hydrodynamic cavitation technology

Ali Ch. Khraibet^{1*}, Liqaa Hussein Abdul-Raheem², Natheer J. Imran³, Aqeel K. Alwan⁴, Ali S. Abdul-Sadah⁵ and Jaafar S. Murtadah⁶

¹ Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, ali_most74@yahoo.com

² Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, aljoboryliqaa@gmail.com

³ Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, natheer_as@yahoo.com

⁴ Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, akeel_alamiry@yahoo.com

⁵ Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, alisaleem722@yahoo.com

⁶ Directorate of Environment and Water, Ministry of Science and Technology, jafarsadig42@yahoo.com

*Corresponding author and email: Ali Ch. Khraibet, ali_most74@yahoo.com

Published online: 31 December 2022

Abstract— Hydrodynamic cavitation technique was used recently as a treatment method for water contaminated with organic compounds, The conventional technologies for wastewater treatment have drawbacks in terms of limited application and efficiency. Use of hydrodynamic cavitations reactors for large scale pollutant degradation has shown great promising over past few years, due to high energy efficiency and low cost, treatment process relies on less chemical consumption to decompose various pollutants such as organic compounds and oil discharged with water used in washing and cooling equipment of electric power plants, aim of research was to investigate effect of hydrodynamic cavity duration on reducing concentrations of values chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), oil and evaluate efficiency of operation hydrodynamic cavity system, by conducting COD and TOC test, which are one of most important indicators of chemical pollution for water. The experiments showed a weak decrease in concentrations of COD, TOC and Oil after hydrodynamic cavitation, values of COD, TOC and Oil were reduced (25.78%, 25.16%, 25.81%) respectively during 240 min operating time and 4bar pressure. Also, an increase in (pH) was observed, reaching (8.73) during an operating time of 240 min and pressure 4bar. Experiments proved, hydrodynamic cavitation of applied for time period 24 min and input pressure 4bar was acceptable for operating conditions during laboratory experiments.

Keywords— hydrodynamic cavitation, bubble dynamics, free radicals, and chemical oxygen demand.