

DEGRADASI CARMOISINE OLEH REAGEN FENTON: OPTIMALISASI PARAMETER DEGRADASI

Degradation of Carmoisine by Fenton Reagent: Optimization of Degradation Parameters

Said Ali Akbar

Departemen Pendidikan Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Aceh, 23245, Indonesia

Email : said.aliakbar@serambimekkah.ac.id

Abstrak

Carmoisine adalah zat warna azo sintesis yang menghasilkan warna merah untuk makanan. Kehadiran gugus sulfonat dalam *Carmoisine* membuatnya polar dan larut dalam air. Zat warna ini dapat menyebabkan asma dan alergi pada banyak orang. Oleh karena itu, perlu adanya metoda yang tepat untuk menghilangkan *Carmoisine* dari limbah yang mudah dioperasikan dan berbiaya rendah. Penelitian ini dirancang untuk menyelidiki degradasi *Carmoisine* dari larutan dengan proses oksidasi menggunakan reagen Fenton. Proses degradasi zat warna dipantau menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Efek dari parameter operasi yang mempengaruhi efisiensi degradasi seperti H_2O_2 , Fe^{2+} , konsentrasi zat warna, serta pH dipelajari dan dioptimalkan. Kondisi optimal dicapai pada saat Fe^{2+} 0,1 mM, H_2O_2 0,5 mM, konsentrasi zat warna awal adalah 10 mg/L, serta pH = 3,5. Semua percobaan ini dilakukan pada suhu ruangan yaitu 27 °C. Dalam kondisi optimal, efisiensi degradasi zat warna mencapai 93,25% dalam larutan yang dicapai setelah 60 menit reaksi. Oleh sebab itu, reagen Fenton adalah metode yang baik untuk menghilangkan zat warna *Carmoisine* dari larutan.

Kata kunci: *carmoisine*, degradasi, fenton, radikal

Abstract

Carmoisine is a synthetic azo dyes that give food a red color. The presence of a sulfonic group in Carmoisine makes it polar and water soluble. This dye can cause asthma and allergies in many people. Therefore, it is necessary to have an appropriate method to remove Carmoisine from waste that is easy to operate and low-cost. This study was designed to investigate Carmoisine degradation from solutions by oxidation processes using the Fenton reagent. The dye degradation process was monitored using a UV-Vis spectrophotometer. The effects of operating parameters that affect the efficiency of decolorization such as H_2O_2 , Fe^{2+} , dye concentration, and pH are studied and optimized. The optimal conditions were achieved when Fe^{2+} 0.05 mM, H_2O_2 0.5 mM, initial dye concentration was 10 mg/L, and pH = 3.5. All these experiments were carried out at room temperature of 27 °C. Under optimal conditions, the dye degradation efficiency reaches 93.25% in the solution achieved after 60 minutes of reaction.

Keywords: *carmoisine*, degradation, fenton, radical

PENDAHULUAN

Zat warna adalah kelas polutan penting yang terdiri dari dua komponen utama: kromofor dan auksokrom [1]. Kromofor bertanggung jawab untuk menghasilkan warna, dan auksokrom melengkapi kromofor serta membuat molekul larut dalam air. Zat warna menunjukkan variasi struktur kimia yang penting dan diklasifikasikan dalam beberapa

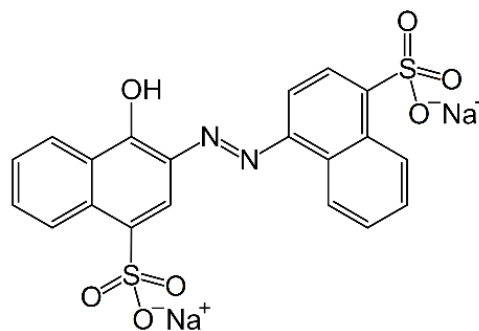
cara. Salah satunya adalah zat warna azo, yang dikategorikan sebagai zat warna sintesis terbanyak yang digunakan saat ini. Zat warna azo dicirikan oleh adanya ikatan azo (-N=N-) dengan satu atau lebih sistem aromatik, yang mungkin juga memiliki gugus asam sulfonik [2].

Zat warna ini banyak digunakan dalam berbagai industri seperti industri tekstil, karet, plastik, kulit, kosmetik, dan makanan.

Dalam beberapa tahun terakhir penggunaan pewarna yang dapat dimakan dalam industri makanan telah meningkat secara signifikan karena salah satu kualitas makanan yang paling penting adalah warna [3]. Pewarna makanan sintetis sering ditambahkan ke dalam bahan makanan dan minuman ringan untuk menjaga warna alaminya selama proses atau penyimpanan, serta untuk menciptakan tampilan warna yang diinginkan, juga untuk memulihkan kehilangan warna karena paparan cahaya, udara, suhu yang ekstrem, dan kelembaban. Saat ini banyak negara maju yang hanya mengizinkan sekitar 10 jenis zat warna untuk digunakan sebagai zat warna yang dapat dimakan, dan banyak lainnya telah dilarang dalam dua dekade terakhir karena toksisitas dan karsinogenisitasnya [4].

Carmoisine adalah zat warna azo sintetis yang menghasilkan warna merah untuk makanan. Kehadiran gugus sulfonat dalam *Carmoisine* membuatnya polar dan larut dalam air [5,6]. Pewarna ini digunakan dalam makanan seperti jeli, selai, permen, dan pengawet. Penggunaan *Carmoisine* dilarang banyak negara maju karena kehadiran *2-naphthylamine* yang bersifat karsinogen [7]. Zat warna ini dapat menyebabkan asma dan alergi pada banyak orang. Selain itu zat ini meningkatkan komplikasi perilaku seperti hiperaktif, dan sulit tidur pada anak-anak, serta dengan zat dosis tinggi juga mengakibatkan koma dan bahkan kematian [6]. Oleh karena itu, perlu adanya metode yang tepat untuk menghilangkan *Carmoisine* dari limbah yang mudah dioperasikan dan berbiaya rendah [8].

Berbagai metode seperti proses fisiko-kimia dan biologis telah digunakan untuk menghilangkan zat warna dari air limbah. Beberapa proses fisika-kimia yaitu koagulasi, pengendapan, adsorpsi, pertukaran ion, filtrasi dan lain-lain, tidak mengarah pada degradasi organik tetapi lebih pada transfernya dari satu fase ke fase lain yang harus diregenerasi (dilakukan berulang kali) dan diolah dengan biaya operasional yang mahal [2,3,9].



Gambar 1. Zat warna *Carmoisine*

Proses biologis berlangsung dengan kecepatan rendah dan sering dihambat oleh beberapa zat, terutama yang beracun bagi mikroorganisme. Untuk alasan ini, upaya penelitian telah difokuskan dalam mengembangkan proses oksidasi alternatif yang lebih baik dan hemat biaya. Hal ini memungkinkan digunakan sebagai tahap pra perlakuan yaitu untuk meningkatkan biodegradabilitas sehingga dapat dilanjutkan ke tahap proses biologi atau sebagai *treatment* akhir, ketika proses biologis tetap tidak dapat berlangsung setelah tahap awal, maka proses oksidasi dilanjutkan sampai tahap akhir [7].

Kemajuan terbaru dalam bidang penelitian ini telah mengarah pada pengembangan *Advanced Oxidation Processes* (AOP). AOP didasarkan pada teknologi oksidasi kimia yang menggunakan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang berasal dari H_2O_2 [10]. Radikal hidroksil ini adalah salah satu oksidan terkuat yang dikenal setelah fluor dengan potensi oksidasi 2,06 (dengan referensi $\text{Cl}_2 = 1,0$) [7]. Radikal ini mengoksidasi kontaminan organik dan /atau anorganik untuk menghasilkan fragmen yang ramah lingkungan dan akhirnya menjadi CO_2 dan H_2O . Ada berbagai cara untuk menghasilkan radikal hidroksil seperti UV/ H_2O_2 , UV/ HOCl , *ozone based* AOP, fotokatalisis TiO_2 , dan reagen Fenton. Reagen Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) merupakan salah satu proses paling baik untuk menghasilkan radikal hidroksil [1,11,12]. Selain itu, reagen Fenton telah terbukti menjadi metode yang efektif untuk degradasi zat warna serta untuk menghilangkan sejumlah besar polutan organik berbahaya. Selain itu proses ini

hemat biaya dan sederhana, serta berlangsung pada suhu dan tekanan ruangan normal [13].

Literatur menunjukkan bahwa reagen Fenton telah digunakan untuk pengolahan berbagai jenis air limbah seperti aromatik amina, minyak bumi, fenol, limbah obat-obatan, p-nitroanilin, pestisida, serta berbagai jenis air limbah zat warna. Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan degradasi *Carmoisine* menggunakan reagen Fenton serta studi optimasi degradasi yang meliputi parameter pH, konsentrasi Fe^{2+} , konsentrasi H_2O_2 , dan konsentrasi *Carmoisine*.

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Bahan

Zat warna *Carmoisine*, Hidrogen peroksida, H_2O_2 (30% b/b), Besi(II) Sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) sebagai sumber untuk ion Fe^{2+} , NaOH, dan H_2SO_4 .

2.2 Instrumentasi

Spektra UV-Vis direkam menggunakan *Thermo Scientific Evolution 200 Series UV-Visible Spectrophotometer*, dengan rentang panjang gelombang 300-1100 nm. pH larutan diukur menggunakan Bante 901 digital pH meter.

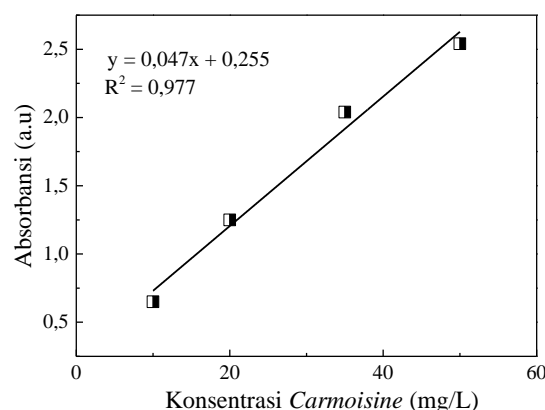
2.3 Teknik Pengumpulan Data

Degradasi *Carmoisine* dilakukan dalam metode *batch* dengan menambahkan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ sebagai sumber Fe^{2+} dan H_2O_2 sebagai oksidator pada larutan zat warna. Secara singkat, pH sampel zat warna 50 mL disesuaikan dengan nilai yang diinginkan dan setelah itu reagen Fenton (H_2O_2 dan Fe^{2+}) ditambahkan ke dalam larutan zat warna dan diaduk. Selanjutnya, absorbansi sampel diukur dengan spektrofotometer UV-Vis.

2.4 Analisis Data

Kurva kalibrasi dicapai dengan menggunakan solusi standar *Carmoisine* dengan konsentrasi yang berbeda dalam kisaran 10 - 50 mg/L (Gambar 2). Efisiensi proses yang diusulkan dievaluasi dengan

memantau degradasi *Carmoisine* setelah mengukur absorbansi pada $\lambda_{\text{max}} = 515$ nm.



Gambar 2. Kurva kalibrasi dari larutan *Carmoisine*

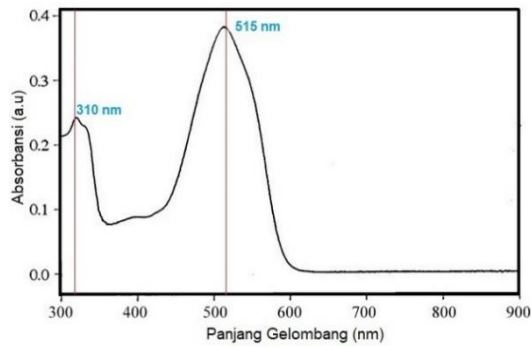
Setelah pengambilan sampel, reaksi dilanjutkan. Untuk alasan ini mengukur absorbansi larutan dilakukan dalam 5 menit. Efisiensi dekolorisasi zat warna dari *Carmoisine* dihitung sebagai berikut [8]:

$$\text{Efisiensi dekolorisasi} = \left(1 - \left(\frac{C_t}{C_0}\right)\right) \times 100\% \quad (1)$$

di mana C_0 (mg/L) adalah konsentrasi awal *Carmoisine*, dan C_t (mg/L) adalah konsentrasi *Carmoisine* pada waktu reaksi t (menit).

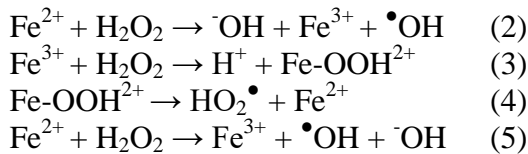
HASIL DAN PEMBAHASAN

Spektrum hasil UV-Vis *Carmoisine* dipantau pada panjang gelombang 300-800 nm (Gambar 3). Pengukuran ini menunjukkan puncak penyerapan pada 515 nm, sekitar 310 nm, dan 220 nm. Puncak pada 515 nm dikaitkan dengan transisi $n \rightarrow \pi^*$ dari kromofor $\text{N}=\text{N}$, $\text{C}=\text{N}$ dan $\text{C}=\text{O}$ [5,7]. Puncak absorbansi pada 310 dan 200 nm dikaitkan dengan transisi $p \rightarrow \pi^*$ dalam cincin aromatik dan menunjukkan karakter aromatik dari zat warna [7].



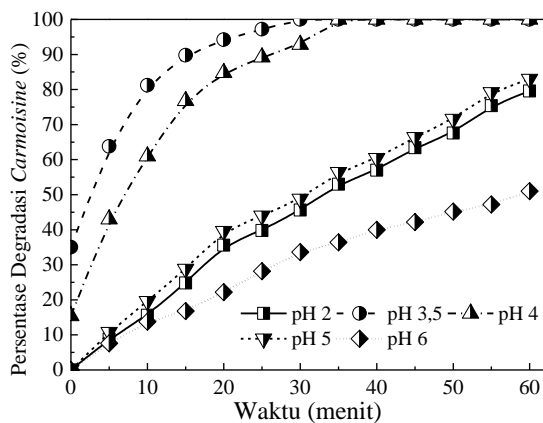
Gambar 3. Spektrum UV-Vis dari *Carmoisine*

Mekanisme reaksi Fenton cukup kompleks, Fe(II) teroksidasi menjadi Fe(III) dalam beberapa menit atau detik dengan adanya hidrogen peroksida [14]. Hidrogen peroksida terurai oleh Fe(III) menghasilkan radikal hidroksil.



3.1 Pengaruh pH larutan

Menurut Gambar 4, pH terbaik untuk proses degradasi berada pada pH 3,5. Ada beberapa referensi dalam literatur yang mengonfirmasi pH optimal pada proses degradasi menggunakan pereaksi Fenton yaitu mendekati 3 [14,15,16]. Ketika pH menurun dari 3,5 menjadi 2, maka persentase degradasi menurun secara signifikan. Hal ini dapat dijelaskan dengan pembentukan ion oksonium (H_3O_2^+). Ion ini meningkatkan stabilitas H_2O_2 dan membatasi pembentukan $\bullet\text{OH}$ secara ekstrem oleh H^+ [8].

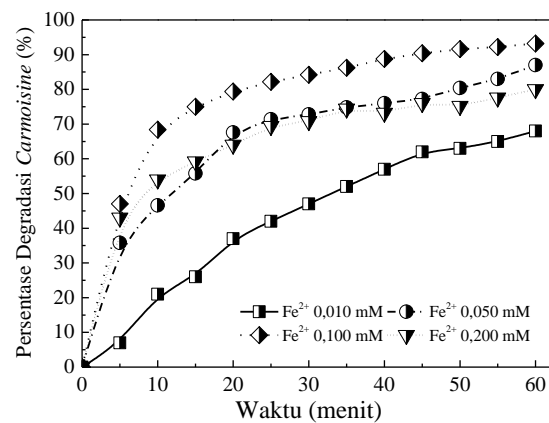


Gambar 4. Efek pH terhadap degradasi *Carmoisine* ($[\text{Carmoisine}]_0 = 10 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5 \text{ mM}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,1 \text{ mM}$, dan suhu 27°C)

Pada nilai pH lebih tinggi dari 3,5, persentase degradasi juga menurun. Penurunan persentase pada nilai pH yang lebih tinggi dapat disebabkan oleh pengendapan ion besi sebagai hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) [1]. Dalam hal ini, besi menguraikan H_2O_2 menjadi air dan oksigen, dan laju oksidasi menurun karena lebih sedikit radikal hidroksil yang tersedia.

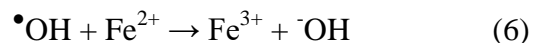
3.2 Pengaruh konsentrasi Fe^{2+} awal

Pada langkah selanjutnya dari reaksi Fenton, radikal hidroksil dapat bereaksi dengan Fe^{2+} dan mengoksidasinya menjadi ion Fe^{3+} . Fe^{2+} adalah parameter utama yang lain dalam proses Fenton.



Gambar 5. Efek konsentrasi Fe^{2+} terhadap degradasi *Carmoisine* ($[\text{Carmoisine}]_0 = 10 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5 \text{ mM}$, $\text{pH} = 3,5$, dan suhu 27°C)

Hasil yang dicapai untuk peran Fe^{2+} dalam proses Fenton disajikan pada Gambar 5. Persentase degradasi zat warna meningkat sebagai konsekuensi dari peningkatan dosis Fe^{2+} dari 0,01 mM menjadi 0,1 mM, tetapi pada saat konsentrasi Fe^{2+} lebih besar dari 0,1 mM, terjadi penurunan persentase degradasi *Carmoisine*.

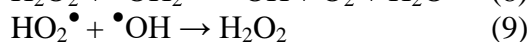
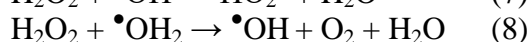
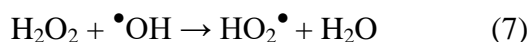


Banyak peneliti telah melaporkan

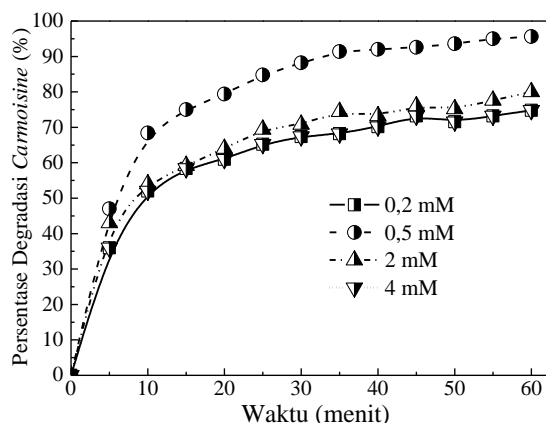
bahwa penggunaan konsentrasi Fe^{2+} yang lebih tinggi dapat menyebabkan reaksi dengan radikal $\bullet\text{OH}$ dengan mengubahnya menjadi ion hidroksil (Persamaan 6) [3,16].

3.3 Pengaruh konsentrasi H_2O_2 awal

Pada tahapan ini, radikal hidroksil juga dapat bereaksi dengan hidrogen peroksida untuk menghasilkan radikal hidroperoksil ($\text{HO}_2\bullet$), dan juga dapat bereaksi dengan radikal hidroksil lain untuk menghasilkan hidrogen peroksida, atau bereaksi dengan radikal hidroperoksil untuk menghasilkan radikal hidroksil yang ditunjukkan pada persamaan reaksi 7-9.



Menurut Gambar 6, efek H_2O_2 pada efisiensi degradasi *Carmoisine* dipelajari pada kisaran 0,2-4,0 mM dalam Fenton. Peningkatan konsentrasi H_2O_2 dari 0,2-0,5 mM menyebabkan terjadinya peningkatan efisiensi degradasi melalui efek radikal $\bullet\text{OH}$ yang dihasilkan.



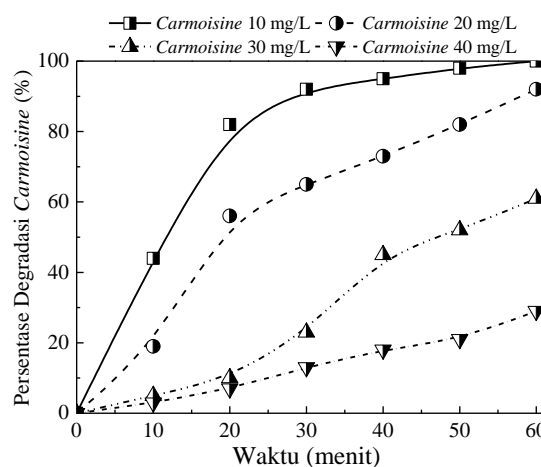
Gambar 6. Efek konsentrasi H_2O_2 terhadap degradasi *Carmoisine* ($[\text{Carmoisine}]_0 = 10 \text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,1 \text{ mM}$, $\text{pH} = 3,5$, dan suhu 27°C)

Namun pada konsentrasi H_2O_2 yang lebih besar dari 0,5 mM, menyebabkan H_2O_2 menyerang $\bullet\text{OH}$ yang kuat. Dengan demikian, penambahan konsentrasi H_2O_2 yang lebih tinggi menyebabkan adanya radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) tambahan yang

dapat menghasilkan radikal hidroperoksil ($\text{HO}_2\bullet$) yang jauh kurang reaktif dibandingkan $\bullet\text{OH}$ sehingga tidak berkontribusi terhadap degradasi oksidatif senyawa organik [18].

3.4 Pengaruh konsentrasi *Carmoisine* awal

Konsentrasi polutan adalah salah satu faktor terpenting dalam pemanfaatan reagen Fenton. Gambar 7 cukup jelas menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi zat warna akan menurunkan efisiensi degradasi sampai jumlah tertentu.



Gambar 7. Efek konsentrasi *Carmoisine* terhadap degradasi *Carmoisine* ($[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,1 \text{ mM}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5 \text{ mM}$, $\text{pH} = 3,5$, dan suhu 27°C)

Ketika konsentrasi zat warna meningkat, radikal $\bullet\text{OH}$ yang tersedia tidak cukup digunakan untuk bereaksi. Oleh sebab itu, untuk proses oksidasi terbaik pada saat konsentrasi *Carmoisine* di atas 10 mg/L adalah dengan menyesuaikan komposisi reagensinya [17].

KESIMPULAN

Telah dilakukan penerapan reagen Fenton pada proses degradasi *Carmoisine*. Aktivitas reagen Fenton dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu, pH, konsentrasi Fe^{2+} , dan H_2O_2 . pH terbaik yaitu pada 3,5. Penggunaan Fe^{2+} atau H_2O_2 yang berlebihan, dapat menyebabkan terbentuknya radikal $\text{HO}_2\bullet$ yang tidak dapat bereaksi dengan *Carmoisine*. Reagen Fenton bersifat ramah lingkungan sehingga tidak melibatkan

penggunaan reagen kimia yang merugikan. Oleh sebab itu, reagen Fenton merupakan metode yang baik untuk menghilangkan zat warna *Carmoisine* dari larutan. Untuk penelitian selanjutnya, reagen Fenton dapat diaplikasikan pada zat warna lain seperti *malachite green*, brotimol biru, dan sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boonrattanakij, N., Sakul, W., Segura, S.G., Lu, M.C. (2018). Implementation of fluidized-bed Fenton as pre-treatment to reduce chemical oxygen demand of wastewater from screw manufacture: Influence of reagents feeding mode, *Separation and Purification Technology*, 20231, 275-280. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.075>
- [2] Lien, H., Yu, C., Kamali, S., & Sahu, R.S. (2019). Bimetallic Fe/Al system: An all-in-one solid-phase Fenton reagent for generation of hydroxyl radicals under oxic conditions, *Science of The Total Environment*, 67310, 480-488. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.116>
- [3] Qin, J., Li, Y, Feng, M., Li, H., & Lin, C. (2017). Fenton reagent reduces the level of arsenic in paddy rice grain, *Geoderma*, 3071, 73-80. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.039>
- [4] Shanmugam, B.K., Easwaran, S.N., Mohanakrishnan, A.S., Kalyanaraman, C., & Mahadevan, S. (2019). Biodegradation of tannery dye effluent using Fenton's reagent and bacterial consortium: A biocalorimetric investigation, *Journal of Environmental Management*, 24215, 106-113. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.075>
- [5] Chakma, S., & Moholkar, V.S. (2016). Mechanistic analysis of sono-photolysis degradation of *Carmoisine*, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 3325, 276-287. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.10.015>
- [6] Rubio, L., Sanlloriente, S., Sarabia, L.A., & Ortiz, M.C. (2019). Fluorescence determination of cochineal in strawberry jam in the presence of *Carmoisine* as a quencher by means of four-way PARAFAC decomposition, *Food Chemistry*, 29030, 178-186. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.113>
- [7] Thiam, A., Sirés, I., Garrido, J.A., Rodríguez, R.M., & Brillas, E. (2015). Effect of anions on electrochemical degradation of azo dye *Carmoisine* (Acid Red 14) using a BDD anode and air-diffusion cathode, *Separation and Purification Technology*, 14022, 43-52. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.012>
- [8] Kiayi, Z., Lotfabad, T.B., Heidarinasab, A., & Shahcheraghi, F. (2019). Microbial degradation of azo dye *Carmoisine* in aqueous medium using *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 9763, *Journal of Hazardous Materials*, 3735, 608-619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.111>
- [9] Jurczyk, Ł., & Jurczyk, J.K. (2017). Quantitative dynamics of ammonia-oxidizers during biological stabilization of municipal landfill leachate pretreated by Fenton's reagent at neutral pH, *Waste Management*, 63, 310-326. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.028>
- [10] Kubo, D., & Kawase, Y. (2018). Hydroxyl radical generation in electro-Fenton process with in situ electrochemical production of Fenton reagents by gas-diffusion-electrode cathode and sacrificial iron anode, *Journal of Cleaner Production*, 203, 685-695. DOI :

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.231>
- [11] Faye, M.C.A.S., Zhang, K.K., Peng, S., & Zhang, Y. (2019). Sludge dewaterability by dual conditioning using Fenton's reagent with *Moringa oleifera*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102838. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102838>
- [12] Iskander, S.M., Novak, J.T., & He, Z. (2019). Reduction of reagent requirements and sludge generation in Fenton's oxidation of landfill leachate by synergistically incorporating forward osmosis and humic acid recovery, *Water Research*, 15115, 310-317. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.089>
- [13] Lamb, J.J., Islam, M.H., Hjelme, D.R., Pollet, B.G., & Lien, K.M. (2019). Effect of power ultrasound and Fenton reagents on the biomethane potential from steam-exploded birchwood, *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104675. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104675>
- [14] Wang, Y., Wang, Z., Pan, J., & Liu, Y. (2019). Removal of gaseous hydrogen sulfide using Fenton reagent in a spraying reactor, *Fuel*, 2391, 70-75. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.143>
- [15] Wu, H., Chen, H., Wang, Q., & Yang, H. (2019). Characteristics and inhibition of mercury re-emission from desulfurization slurry by Fenton reagent, *Fuel Processing Technology*, 1881, 89-97. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.02.006>
- [16] Yamaguchi, R., Kurosu, S., Suzuki, M., & Kawase, Y. (2018). Hydroxyl radical generation by zero-valent iron/Cu (ZVI/Cu) bimetallic catalyst in wastewater treatment: Heterogeneous Fenton/Fenton-like reactions by Fenton reagents formed in-situ under oxic conditions, *Chemical Engineering Journal*, 33415, 1537-1549. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.154>
- [17] Wang, Y., Hung, I., & Wu, C. (2018). The characteristics and electrochemical performance of graphite felts with thermal and fenton's reagent treatment for vanadium redox flow battery, *Ceramics International*, 44, s30-s33. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.277>
- [18] Cai, Q. Q., Jothinathan, L., Deng, S. H., Ong, S. L., Ng, H. Y., Hu, J. Y. (2021). 11 - Fenton- and ozone-based AOP processes for industrial effluent treatment, *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*, 199-254, ISBN 978-0-12-821011-6. DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821011-6.00011-6>