

Dekolorisasi *Malachite Green* oleh Reagen Fenton: Optimalisasi Parameter dan Studi Kinetika

Said Ali Akbar*

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

*Corresponding author: said.aliakbar@serambimekkah.ac.id

Received: July ,17,2020 /Accepted: December,27,2020

Doi: 10.24252/al-kimiav8i2.13261

Abstract: *The study of the decolorization of Malachite Green in solution using the Fenton reagent has been investigated. The effects of different reaction parameters such as hydrogen peroxide concentration, iron ion concentration, pH of the solution, and initial dye concentration have been carried out. In this study the experimental range for H₂O₂ concentrations varied from 0.2 mM to 4 mM and Fe²⁺ ions were 0.01-0.1 mM. All experiments were carried out at room temperature of 27 oC. Furthermore, the optimal oxidation condition with the concentration of MG dyes of 20 mg/L was with H₂O₂ 0.5 mM, Fe²⁺ 0.05 mM, and pH at 3. The dye decolorization process of MG was also observed kinetically, it was found that the degradation process took place with first-order reaction rate. Under optimal conditions, the dye solution with a concentration of 20 mg/L completely decolorized within 60 minutes at 27°C, and 76% of the Chemical Oxygen Demand (COD) was removed. This proves that MG was not only decolorized but also mineralized.*

Keywords: *Chemical Oxygen Demand, dye decolorization, fenton's reagent, malachite green*

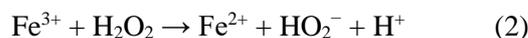
PENDAHULUAN

Pewarna sintetis banyak digunakan di banyak industri seperti tekstil, kulit, produksi kertas, teknologi makanan, dan lain-lain. *Malachite Green* (MG) paling umum digunakan untuk pewarnaan kapas, sutra, kertas, kulit dan juga dalam pembuatan cat atau tinta cetak (Choudhary dkk, 2020; Gavrilenko dkk, 2019). MG memiliki sifat-sifat yang membuatnya sulit untuk dihilangkan dari larutan. MG juga digunakan secara luas di tempat penyulingan untuk tujuan pewarnaan. Malachite green ketika dibuang ke aliran air seperti sungai akan mempengaruhi kehidupan akuatik dan menyebabkan efek merugikan pada hati, insang, ginjal, usus, dan sel gonadotropik hipofisis pada kehidupan makhluk hidup disana (Salamat dkk, 2019). Oleh karena itu, penghilangan zat warna organik sintetis dari limbah cair menjadi penting bagi lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, proses oksidasi lanjutan menggunakan ozon, titanium dioksida (TiO₂), ultra violet (UV), dan pereaksi Fenton (H₂O₂ dan ion besi) telah menerima perhatian yang cukup besar sebagai proses *pretreatment* efektif dari air limbah yang kurang dapat terbiodegradasi (Boonrattanakij dkk, 2018; Faye, 2019). Di antara semua itu, reagen Fenton telah banyak digunakan karena hemat biaya, mudah digunakan, bereaksi baik dengan senyawa organik dan tidak menghasilkan senyawa beracun selama oksidasi (Guo dkk, 2010). Reagen Fenton adalah salah satu metode paling efektif dari oksidasi polutan organik, yang secara oksidatif terdegradasi oleh radikal hidroksil yang dihasilkan dari H₂O₂ dengan adanya Fe²⁺ sebagai katalis:



Ketika garam besi (II) digunakan, radikal hidroksil diproduksi segera oleh reaksi cepat antara ion besi (II) dan hidrogen peroksida (Persamaan (1)) (Iskander dkk, 2019). Dengan garam besi (III), radikal hidroksil diproduksi dalam proses dua tahap dengan reaksi lambat antara ion besi dan hidrogen peroksida (Persamaan (2)) diikuti oleh reaksi cepat antara ion besi (II) yang dihasilkan dan hidrogen peroksida tambahan:



Efisiensi proses Fenton tergantung pada konsentrasi H_2O_2 dan Fe^{2+} dan pH reaksi. Menurut laporan peneliti sebelumnya, nilai pH harus dalam kisaran 3-5 (Shanmugam dkk, 2019; Wang dkk, 2019). Pereaksi Fenton ternyata sangat efektif dalam mengolah berbagai komponen air limbah industri, termasuk menghilangkan COD dan warna dari air limbah ternak, pengolahan limbah tekstil dengan beban organik tinggi, pengolahan limbah cair kosmetik, pengolahan limbah resin, oksidasi zat warna reaktif *Black B*, dekolourisasi pewarna azo Orange G dalam larutan, dekolourisasi *Acid Yellow 23* (Yamaguchi dkk, 2018). Oleh karena itu, reagen Fenton telah diterapkan untuk mengolah berbagai limbah seperti yang terkait dengan industri tekstil dan kimia.

Oleh karena itu, artikel ini membahas tentang penentuan efisiensi reaksi Fenton dalam proses dekolourisasi MG dari larutan. Selain itu, juga dilakukan optimalisasi Parameter serta studi kinetika dalam kondisi operasional optimal seperti pH, besi, dan konsentrasi hidrogen peroksida konsentrasi itu penting.

METODE PENELITIAN

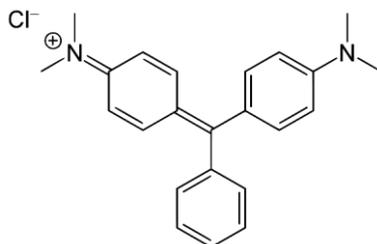
Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah garam klorida *Malachite Green* ($\text{C}_{23}\text{H}_{25}\text{ClN}_2$, Sigma-Aldrich), Besi (II) sulfat Heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), air deionisasi, dan hidrogen peroksida (H_2O_2) 30% (b/b).

Procedures

Persiapan Larutan *Malachite Green*

Larutan MG dibuat dengan melarutkan MG dalam air deionisasi untuk menghasilkan larutan stok dengan konsentrasi 500 mg/L. Larutan stok ini dibuat dalam proporsi yang akurat untuk menghasilkan larutan dengan konsentrasi awal lain yang berbeda.



Gambar 1. Struktur kimia dari *Malachite Green* (MG) dalam bentuk garam klorida

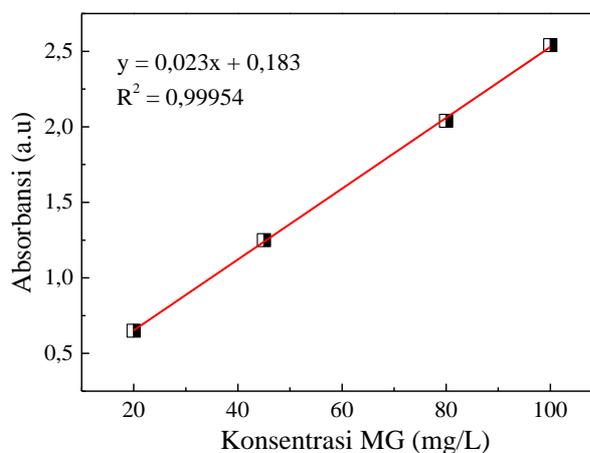
Variabel pengukuran dari penelitian ini yaitu:

- 1) Efek konsentrasi awal H_2O_2 dalam mengoksidasi MG 20 mg/L dipelajari dengan memvariasikan jumlah H_2O_2 yang digunakan pada percobaan yaitu 0,20, 0,50, 2,00, dan 4,00 mM, dengan konsentrasi Fe^{2+} untuk setiap wadah sebesar 0,050 mM. Larutan diaduk dalam pengocok penangas air termostatik untuk jangka waktu 60 menit pada 27 °C.

- 2) Efek dari konsentrasi awal Fe^{2+} dengan variasikan konsentrasi yang digunakan pada percobaan yaitu 0,010, 0,025, 0,050 dan 0,100 mM. Semua variasi konsentrasi ion Fe^{2+} ditambahkan bersama dengan H_2O_2 0,50 mM, MG 20 mg/L, dan pH larutan adalah 3. Semua larutan diaduk dalam pengocok penangas air termostatik untuk jangka waktu 60 menit pada 27 °C.
- 3) Efek konsentrasi MG awal dengan variasikan konsentrasi yang digunakan pada percobaan yaitu 20, 45, 80 dan 100 mg/L. Keasaman larutan dipertahankan pada pH 3, konsentrasi awal Fe^{2+} adalah 0,05 mM, serta konsentrasi awal H_2O_2 0,50 mM. Suhu konstan pada 27 °C. Larutan diaduk dalam pengocok termostatik untuk periode 60 menit.
- 4) Pengaruh pH pada degradasi MG dipelajari menggunakan 200 mL larutan MG 20 mg/L yang mengandung Fe^{2+} 0,05 mM dan H_2O_2 2,00 mM. pH larutan bervariasi yaitu 2, 3, 4, 5, 6, 7 yang dibuat dari H_2SO_4 0,1 N dan NaOH 0,1 N. Larutan pada pH masing-masing diaduk dalam pengocok penangas air termostatik (150 rpm) untuk periode 60 menit pada 27 °C.

Metode Analisis

Efisiensi dari penelitian ini dievaluasi dengan memantau degradasi MG melalui pengukuran absorbansi pada 618 nm menggunakan spektrofotometer UV/VIS berkas ganda (Shimadzu, Model UV 1601, Jepang). Oleh karena itu, konsentrasi MG dalam campuran reaksi pada waktu reaksi yang berbeda ditentukan dengan mengukur intensitas penyerapan pada maks 618 nm dan dari kurva kalibrasi.



Gambar 2. Kurva kalibrasi dari larutan *Malachite Green*

Sebelum pengukuran, kurva kalibrasi diperoleh dengan menggunakan larutan MG standar dengan konsentrasi yang diketahui. Karena reaksi berlanjut setelah pengambilan sampel, pengukuran absorbansi larutan reaksi dilakukan dalam 1 menit.

Efisiensi dekolorisasi MG didefinisikan sebagai berikut:

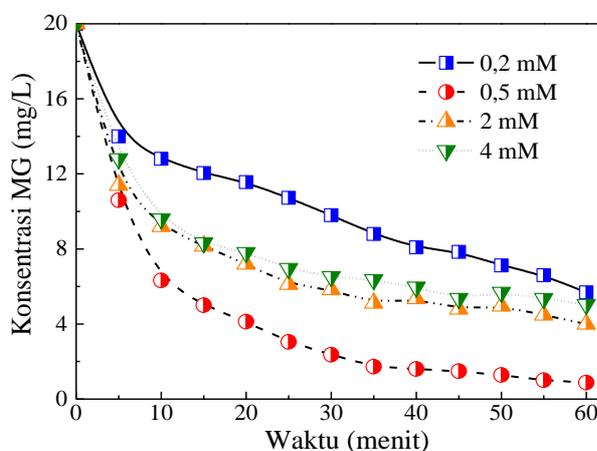
$$\text{Efisiensi dekolorisasi} = \left(1 - \left(\frac{C_t}{C_0} \right) \right) \times 100\% \quad (3)$$

C_0 (mg/L) adalah konsentrasi awal MG, dan C_t (mg/L) adalah konsentrasi MG pada waktu reaksi t (menit).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Konsentrasi H₂O₂ Terhadap Dekolorisasi Malachite Green

Komponen bahan kimia utama dari reagen Fenton adalah hidrogen peroksida. Untuk membuat proses Fenton lebih efektif dibandingkan dengan proses lainnya, perlu untuk mengoptimalkan konsentrasi hidrogen peroksida. Efek konsentrasi H₂O₂ pada reagen Fenton diselidiki dalam kisaran konsentrasi H₂O₂ antara 0,2 hingga 4 mM, pada konsentrasi ion besi (II) sebesar 0,05 mM, pH larutan 3, serta suhu konstan 30 °C. Hasil yang diperoleh diekstrapolasi pada Gambar 3. Pada temuan tersebut menunjukkan bahwa dekolourisasi MG secara signifikan dipengaruhi oleh dosis larutan H₂O₂, dan efisiensi dekolourisasi terbaik diperoleh pada konsentrasi H₂O₂ sebesar 0,5 mM.



Gambar 3. Efek konsentrasi H₂O₂ terhadap dekolourisasi Malachite Green ([MG]₀ = 20 mg/L, [Fe²⁺]₀ = 0,05 nM, pH = 3, dan suhu 27 °C)

Terlihat bahwa dengan meningkatnya konsentrasi hidrogen peroksida, laju dekolourisasi MG menurun. Mekanisme reaksi dasar dari proses Fenton adalah pembentukan radikal hidroksil (persamaan 1), radikal ini bertanggung jawab untuk oksidasi lebih lanjut dari molekul organik. Jadi awalnya dengan meningkatnya konsentrasi hidrogen peroksida, lebih banyak radikal hidroksi yang dihasilkan oleh reaksi (1) dan efisiensi proses dekolourisasi meningkat (konsentrasi 0,2 mM dan 0,5 mM). Tetapi setelah mencapai nilai konsentrasi H₂O₂ lebih besar dari 0,5 mM, efisiensi dekolourisasi MG berkurang. Hal ini disebabkan oleh H₂O₂ secara berlebihan bertindak sebagai efek reaksi dari radikal hidroksil (Lamb dkk, 2019; Qin dkk, 2017). Radikal hidroksil dapat dikonsumsi oleh H₂O₂ dan menghasilkan generasi radikal HO₂• yang kurang reaktif yang lagi-lagi dapat bereaksi dengan radikal hidroksil dan membentuk air dan oksigen, sesuai persamaan (4) dan (5).



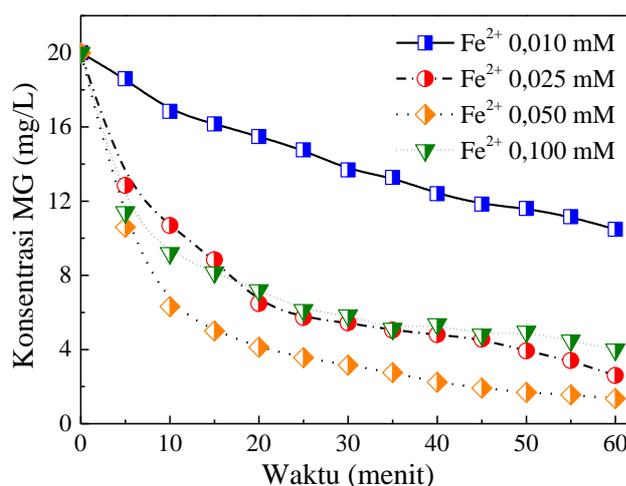
Selain itu beberapa reaksi kompetitif dapat terjadi di mana dua radikal hidroksil dapat bergabung kembali seperti yang diberikan dalam persamaan (6) dan (7).



Konsentrasi optimal hidrogen peroksida harus ditentukan secara eksperimental untuk setiap air limbah sebelum merancang aplikasi skala besar.

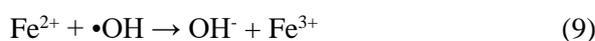
Pengaruh Konsentrasi Fe^{2+} Terhadap Dekolorisasi *Malachite Green*

Jumlah ion besi juga merupakan parameter yang sangat penting dalam proses oksidasi Fenton karena ion besi bertanggung jawab untuk menghasilkan radikal hidroksil dengan reaksi H_2O_2 . Pengaruh konsentrasi ion Fe^{2+} pada dekolourisasi MG telah dipelajari dalam kisaran konsentrasi Fe^{2+} 0,01 – 0,1 mM sambil menjaga parameter lain secara konstan (konsentrasi $\text{H}_2\text{O}_2 = 0,2$ mM, pH = 3, dan suhu 27 °C). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4. Efisiensi dekolourisasi meningkat dengan peningkatan konsentrasi Fe^{2+} awal dari 0,01-0,05 mM. Namun, konsentrasi lebih tinggi dari 0,05 mM mengakibatkan penurunan efisiensi dekolourisasi MG.

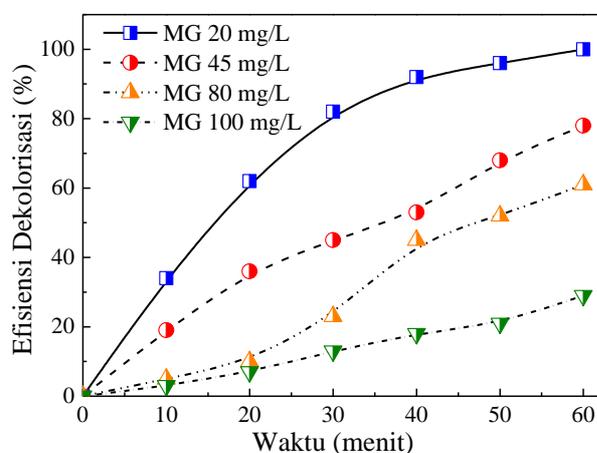


Gambar 4. Efek konsentrasi Fe^{2+} terhadap dekolourisasi *Malachite Green* ($[\text{MG}]_0 = 20$ mg/L, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5$ mM, pH = 3, dan suhu 27 °C)

Peningkatan konsentrasi ion besi membuat efisiensi dekolourisasi meningkat disebabkan oleh lebih banyak radikal hidroksil yang dihasilkan oleh reaksi ion besi dengan hidrogen peroksida (Kubo dkk, 2018; Jurczyk dkk, 2017). Tetapi setelah konsentrasi dari ion besi terlalu besar, efisiensi menjadi menurun karena radikal hidroksil dapat bereaksi dengan reaksi dengan hidrogen peroksida atau dengan molekul Fe^{2+} lain seperti yang diberikan oleh persamaan (8) dan (9).



Pengaruh Konsentrasi Fe^{2+} Terhadap Dekolorisasi Malachite Green

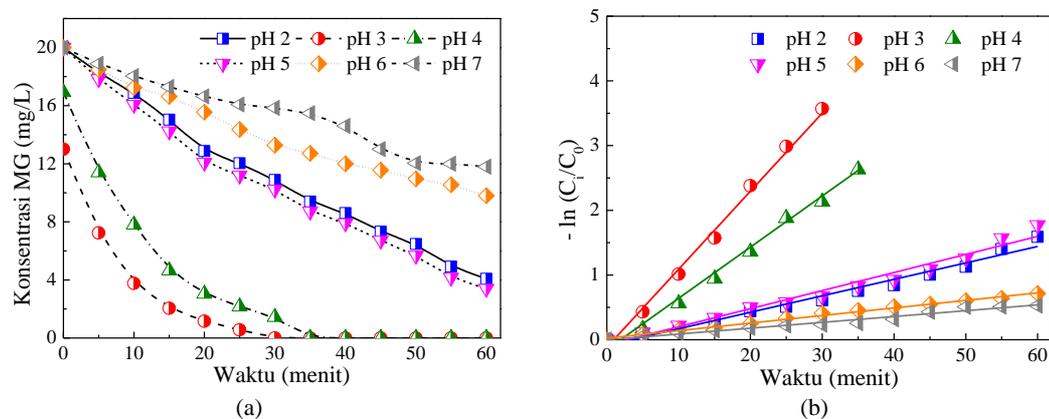


Gambar 5. Efek konsentrasi awal Malachite Green terhadap dekolourisasi MG ($[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5 \text{ mM}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,05 \text{ mM}$, $\text{pH} = 3$, dan suhu $27 \text{ }^\circ\text{C}$)

Pengaruh konsentrasi MG awal pada proses dekolourisasi dimonitor pada $\text{pH} 3$ dengan konsentrasi H_2O_2 awal $0,50 \text{ mM}$ dan Fe^{2+} $0,05 \text{ mM}$. Hasil yang diperoleh disajikan pada Gambar 5. Meningkatnya konsentrasi MG dari 20 hingga 100 mg/L , maka waktu untuk dekolourisasi warna meningkat. Hal ini disebabkan oleh ketika jumlah molekul MG meningkat, maka lebih banyak radikal hidroksil diperlukan untuk melakukan proses dekolourisasi. Namun, konsentrasi radikal hidroksil tetap sama untuk setiap konsentrasi MG, dengan demikian waktu dekolourisasi meningkat (Wang dkk, 2019).

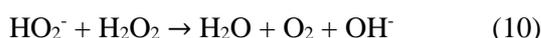
Pengaruh pH serta studi kinetika Dekolorisasi Malachite Green

Pengaruh pH larutan pada dekolourisasi MG oleh proses oksidasi Fenton dipelajari dalam kisaran $\text{pH} 2-7$. Konsentrasi MG adalah 20 mg/L , H_2O_2 2 mM , dan Fe^{2+} $0,05 \text{ mM}$. Hasil menunjukkan bahwa pH memiliki peran yang sangat penting pada dekolourisasi MG. Laju dekolourisasi MG lebih baik di media asam daripada media basa dan efisiensi dekolourisasi terbaik diamati pada $\text{pH} 3$. Jika pH dinaikkan melebihi 3 atau lebih rendah dari itu, efisiensi dekolourisasi berkurang (Gambar 6.a).



Gambar 6. (a) Efek pH dan (b) studi kinetika order 1 terhadap dekolourisasi Malachite Green ($[\text{MG}]_0 = 20 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 2 \text{ mM}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,05 \text{ mM}$, dan suhu $27 \text{ }^\circ\text{C}$)

Efisiensi yang lebih rendah pada nilai pH tinggi mungkin disebabkan oleh pengendapan Fe (OH)₃. Pada pH tinggi, ion besi tidak stabil dan akan dengan mudah membentuk ion besi yang memiliki kecenderungan untuk menghasilkan kompleks hidroksida besi koloidal. Bentuk HO• menjadi lebih lambat karena pembentukan spesies ini. Dalam bentuk yang terakhir, besi secara katalitik menguraikan H₂O₂ menjadi oksigen dan air, tanpa membentuk radikal hidroksil (Lien dkk, 2019). Alasan lain untuk efisiensi yang lebih rendah pada pH yang lebih tinggi adalah karena dekomposisi H₂O₂ sendiri (Wang dkk, 2018). Dekomposisi yang dikatalisis basa melibatkan anion HO₂⁻, basa terkonjugasi dari H₂O₂ bereaksi dengan molekul H₂O₂ yang tidak terdisosiasi menurut persamaan (10).



Di sisi lain ketika kondisi pH di bawah 3, •OH dapat dikonsumsi melalui reaksi radikal hidroksil dengan ion H⁺ seperti yang dapat dilihat pada persamaan (11).



Menurut persamaan (12), hidrogen peroksida dapat menangkap proton untuk membentuk ion oksonium (H₃O₂⁺) dan H₃O₂⁺ dapat membuat hidrogen peroksida menjadi elektrofilik, sehingga dengan demikian mengurangi reaktivitas reaksi antara hidrogen peroksida dan ion besi (Wu dkk, 2019).

Degradasi zat warna dapat dinyatakan dengan persamaan (13). Di mana k adalah konstanta laju, [•OH] adalah konsentrasi radikal hidroksil dan [MG] menjadi konsentrasi *Malachite Green*. Dengan mengasumsikan bahwa konsentrasi radikal hidroksil adalah konstan, kinetika degradasi *Malachite Green* akan mengikuti mekanisme reaksi orde satu dan persamaan di atas dapat ditulis seperti yang diberikan dalam persamaan (14).

$$r_{\text{MG}} = k [\bullet\text{OH}] [\text{MG}] \quad (13)$$

$$r_{\text{MG}} = k [\text{MG}] \quad (14)$$

$$\ln ([\text{MG}]_t/[\text{MG}]_0) = -k t \quad (15)$$

k 'adalah konstanta laju keseluruhan. Mengintegrasikan dan mengatur ulang persamaan (14), menghasilkan persamaan orde satu seperti yang diberikan dalam persamaan (15).

Tabel 1. Nilai konstanta laju order satu dekolourisasi *Malachite Green* pada variasi pH

pH	k (menit ⁻¹)	R ²
2	0,0254	0,9893
3	0,1205	0,9986
4	0,0790	0,9964
5	0,0279	0,9873
6	0,0116	0,9967
7	0,0090	0,9845

Hasil plot kurva ln ([MG]_t/[MG]₀) terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 6.b menunjukkan hubungan linier. Koefisien korelasi yang baik (R² = 0,99) diperoleh

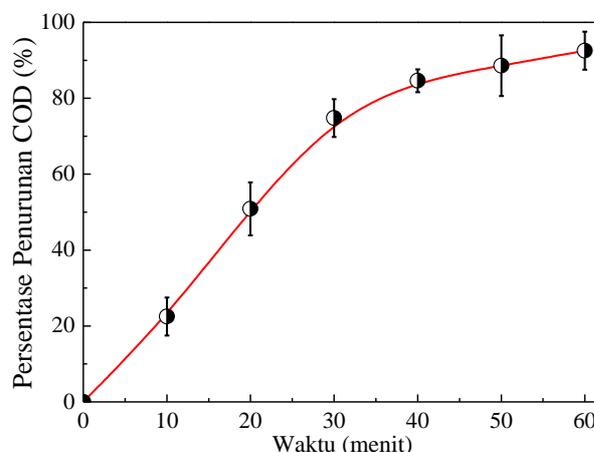
dalam sistem ini. Nilai konstanta laju k (min^{-1}) diperoleh dari kemiringan persamaan dan disajikan pada Tabel 1. Dari Tabel 1 terlihat bahwa nilai konstanta laju tertinggi ($0,1205 \text{ menit}^{-1}$) diperoleh pada pH sebesar 3 (Yamaguchi dkk, 2018).

Mineralisasi Malachite Green

Chemical Oxygen Demand (COD) memberikan ukuran rata-rata keadaan oksidasi produk sampingan organik yang dihasilkan selama degradasi MG. Tingkat mineralisasi MG dengan proses Fenton dievaluasi dengan mengukur COD pada interval waktu yang berbeda dengan konsentrasi MG 20 mg/L menggunakan kondisi yang dioptimalkan dengan H_2O_2 0,5 mM, Fe^{2+} 0,05 mM, pH 3, dan suhu dijaga pada 27 °C. Efisiensi penghilangan COD ditentukan oleh persamaan (16).

$$\text{Efisiensi penghilangan COD} = (\text{COD}_0 - \text{COD}_t)/(\text{COD}_0) \quad (16)$$

COD_0 adalah mula-mula dan COD_t adalah saat waktu t . Dari hasil yang disajikan pada Gambar 7, dapat dilihat bahwa pada awalnya tingkat penghilangan COD rendah. Karena pada awalnya ketika larutan diwarnai, molekul zat warna pertama kali didekomposisi menjadi senyawa dengan berat molekul rendah oleh radikal hidroksil dan zat antara yang dihasilkan masih berkontribusi pada larutan COD. Dengan bertambahnya waktu, COD menurun tajam dan setelah 30 menit sekitar 76% COD dihilangkan. Jadi terlihat bahwa setelah dekolourisasi diperlukan lebih banyak waktu retensi untuk mineralisasi lengkap dari larutan (Shanmugam dkk, 2019; Boonrattanakij dkk, 2018; Faye, 2019).



Gambar 7. Persentase penurunan COD pada dekolourisasi *Malachite Green* menggunakan reagen Fenton dengan dosis ($[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 0,5 \text{ mM}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0,05 \text{ mM}$, pH = 2, dan suhu 27 °C

SIMPULAN

Degradasi MG dilakukan menggunakan reagen Fenton. Efek dari berbagai parameter seperti konsentrasi hidrogen peroksida, konsentrasi ion besi, pH larutan dan konsentrasi MG awal diselidiki. Semua percobaan dilakukan pada suhu kamar sekitar 27 °C dengan konsentrasi MG awal 20 mg/L. Kondisi operasi yang dioptimalkan untuk dekolourisasi MG meliputi H_2O_2 0,5 mM, ion besi 0,05 mM, dan pH larutan 3 untuk konsentrasi MG 20 mg/L. Pada kondisi ini, konstanta laju degradasi orde satu diperoleh dari data percobaan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses Fenton mendekolorisasi sempurna MG dengan konsentrasi 20 mg/L selama 60 menit. Juga hasil

menunjukkan bahwa proses Fenton tidak hanya menghilangkan warna larutan pewarna tetapi juga dapat mengoksidasi produk samping yang mengarah ke mineralisasi dan pengurangan COD 76% dicapai dalam 30 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Choudhary, M., Kumar, R., Neogi, S. 2020. Activated biochar derived from *Opuntia ficus-indica* for the efficient adsorption of malachite green dye, Cu^{2+} and Ni^{2+} from water, *Journal of Hazardous Materials*, 39215, 122441.
- 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.
- Gavrilenko, N.A., Volgina, T.N., Pugachev, E.V., Mikhail A. Gavrilenko, M.A. 2019. Visual determination of malachite green in sea fish samples, *Food Chemistry*, 27415, 242-245.
- Guo, Q., Li, G., Liu, D., Wei, Y. 2010. Synthesis of zeolite Y promoted by Fenton's reagent and its application in photo-Fenton-like oxidation of phenol, *Solid State Sciences*, 91, 89-95.
- 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.
- 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.
- Kubo, D., Kawase, Y. 2018. Hydroxyl radical generation in electro-Fenton process with in situ electro-chemical production of Fenton reagents by gas-diffusion-electrode cathode and sacrificial iron anode, *Journal of Cleaner Production*, 2031, 685-695.
- 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.
- 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.
- 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.
- Salamat, S., Hadavifar, M., Rezaei, H. 2019. Preparation of nanochitosan-STP from shrimp shell and its application in removing of malachite green from aqueous solutions, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103328.

- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.