

Sintesis *Metal-Doped Carbon Nitride Nanosheets* sebagai Pengurai Limbah Pewarna secara Fotokatalisis

Tsabitul Faiz¹, Tara Nabila¹, Anatta Wahyu Budiman^{1*}¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia 57126*Corresponding author: budiman@staff.uns.ac.idDOI: <https://dx.doi.org/10.20961/equilibrium.v6i1.62258>

Article History

Received: 19-06-2022, Accepted: 14-08-2022, Published: 15-08-2022

Kata kunci:Co-doped g-C₃N₄ nanosheets, fotokatalis, fotoremediasi, Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets

ABSTRAK. Pada perairan Sungai Bengawan Solo, limbah pewarna batik hasil produksi industri sekitar mencemari sungai dalam kadar rhodamine-B yang tinggi. Salah satu upaya yang efektif untuk mengatasi pencemaran di lingkungan perairan adalah melalui proses degradasi menggunakan fotokatalis dengan bantuan sinar-UV. Pada riset ini, digunakan fotokatalis *carbon nitride nanosheets* dengan doping zirkonium dan kobalt. Penambahan doping pada g-C₃N₄ *nanosheets* mampu meningkatkan kinerja fotokatalitik. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh berbagai jenis doping terhadap kinerja fotoremediasi katalis *carbon nitride nanosheets* sehingga dapat menentukan jenis doping yang paling efektif dalam meningkatkan kinerja carbon nitride *nanosheets* untuk meremediasi limbah cair batik. Metode yang digunakan untuk mensintesis Co-doped g-C₃N₄ *nanosheets* dan Zr-doped g-C₃N₄ *nanosheets* dilakukan dengan sintesa g-C₃N₄ *nanosheets* murni menggunakan melamin dan amonium sulfat yang dikalsinasi pada suhu 600°C. Selanjutnya dilakukan impregnasi doping Zr dan Co pada g-C₃N₄ *nanosheets* menggunakan *vacuum evaporator*. Pengujian efektifitas katalis dalam mendegradasi rhodamine-B dianalisa menggunakan uji *X-Ray Diffraction* (XRD) dan Spektrofotometer UV-Visible. Hasil penelitian menunjukkan g-C₃N₄ *nanosheets* yang terdoping Kobalt dan Zirkonium dapat meningkatkan kemampuan mendegradasi rhodamine B. Berdasarkan data absorbansi dari fotokatalis yang diuji, fotokatalis Zr-doped g-C₃N₄ *nanosheets* menunjukkan hasil yang paling optimal dalam mendegradasi rhodamine-B dengan penurunan konsentrasi rhodamine-B hampir mendekati 0.

Keywords:Co-doped g-C₃N₄ nanosheets, photocatalyst, photoremediation, Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets

ABSTRACT. Batik dye waste pollutes the Bengawan Solo River in high levels. One of the effective efforts to overcome pollution in the aquatic environment is through a degradation process using photocatalysts with UV-rays. In this research, carbon nitride nanosheets as photocatalyst with zirconium and cobalt doping was used. The addition of doping on g-C₃N₄ nanosheets was able to improve the photocatalytic performance. The purpose of this study was to determine the effect of various types of doping on the photoremediation performance of carbon nitride nanosheets. Synthesize Co-doped g-C₃N₄ nanosheets and Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets was carried out by synthesizing pure g-C₃N₄ nanosheets using melamine and ammonium sulfate that calcined at 600°C. Afterwards, the mixture was impregnated by Zr and Co-doped using a vacuum evaporator. The effectiveness of the photocatalyst to degrading rhodamine-B was analyzed using X-Ray Diffraction (XRD) and UV-Visible Spectrophotometer. The result shows that photodegradation performance of Co and Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets has increased. Based on the absorbance data of photocatalysts, the Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets photocatalyst give the most optimal results in degrading rhodamine-B with the final rhodamine-B concentration close to zero.

1. PENDAHULUAN

Produksi batik di Indonesia sudah banyak tersebar di beberapa kota, salah satunya Kota Surakarta. Banyaknya produksi batik di Surakarta tidak sebanding dengan pengelolaan limbahnya. Sebagai contoh, air limbah yang tidak tertampung langsung dibuang ke Sungai Jenes yang merupakan penyumbang tercemarnya DAS (Daerah Aliran Sungai) Bengawan Solo [1].

Berdasarkan riset tentang kualitas air di DAS Bengawan Solo didapatkan hasil kadar BOD (*Biological Oxygen Demand*) di kisaran (3,8–49,2)mg/L, COD (*Chemical Oxygen Demand*) (9,3–123,2)mg/L [2]. Nilai tersebut lebih tinggi dibanding dengan baku mutu limbah. Riset lain menunjukkan kandungan O₂ rendah (beberapa lokasi kurang dari 2 mg/L), CO₂ tinggi (8,8–34,32 mg/L), NH₃-N bebas (beberapa lokasi lebih dari 0,2 mg/L), fenol (0,087–1,431 mg/L), dan minyak lemak (2,6–54,6 mg/L) [3]. Dari data tersebut, dapat disimpulkan Sungai Bengawan Solo memiliki kualitas air yang tidak sesuai dengan baku mutu air limbah.

Oleh karena itu, perlu adanya teknologi untuk meremediasi zat warna dalam limbah tersebut agar dapat mengurangi tingkat toksisitas limbah cair batik Sungai Bengawan Solo. Salah satu solusinya adalah dengan bantuan cahaya (fotoremediasi). Umumnya proses fotoremediasi ini menggunakan bantuan katalis TiO_2 . Namun senyawa ini memiliki beberapa kelemahan berupa celah pita lebar (3,2 eV) dan efisiensi rekombinasi TiO_2 yang sangat rendah sehingga aplikasi praktis dari TiO_2 menjadi tidak mudah [4].

Carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) *nanosheets* menjadi salah satu material yang potensial untuk digunakan dalam fotoremediasi. Namun, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* murni memiliki kecepatan pemisahan pembawa muatan yang buruk dan batas penyerapan cahaya tampak yang rendah. Hal tersebut yang menyebabkan *carbon nitride* murni kurang optimal untuk proses fotokatalitik [5] sehingga perlu adanya inovasi dengan melakukan penambahan doping pada $\text{g-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets*.

Metode doping merupakan salah satu cara efektif dalam meningkatkan kerja fotokatalitik. Sistem doping memodifikasi respon cahaya tampak dan menghasilkan lebih banyak permukaan aktif sehingga meningkatkan kinerja degradasi polutan [5]. Jenis doping yang digunakan dalam riset ini adalah *metal-doped*. Dalam hal ini, akan dibandingkan logam yang paling baik dan efektif untuk digunakan sebagai doping. Dari beberapa jenis logam, terpilih logam yang akan ditinjau lebih lanjut yaitu Zr dan Co dengan perlakuan metode dan waktu pengambilan sampel yang berbeda untuk masing – masing logam.

Kelebihan penggunaan *metal-doped* kobalt secara efektif mampu memodifikasi morfologi, menggeser tepi penyerapan, dan meningkatkan kemampuan penyerapan [6]. Sedangkan doping dengan Zr meningkatkan konduktivitas elektronik yang menekan rekombinasi pasangan elektron yang difotogenerasi sehingga menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi [7]. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kontribusi terhadap ilmu pengetahuan dalam peningkatan kinerja katalis agar proses remediasi limbah batik lebih optimal.

2. BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah melamin sebagai bahan utama yang didapatkan dari Sigma Aldrich; zirkonium (IV) oksida klorida oktahidrat ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) dan kobalt (II) nitrat heksahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebagai metal carrier yang akan diimpregnasikan yang didapatkan dari Ensure; serta amonium klorida (NH_4Cl) sebagai prekursor yang didapatkan dari Sigma Aldrich. Larutan standar untuk limbah batik buatan dipersiapkan dengan membuat larutan rhodamine-B dari penyedia pewarna batik lokal dengan *aquadest* sebagai pelarutnya.

Metal-doped g-C₃N₄ nanosheets disintesa dengan alat-alat seperti *crucible* alumina, alu mortar, *muffle furnace*, *vacuum evaporator*, dan reaktor fotokatalis. Reaktor ini dilapisi aluminum foil dan *yellowboard* serta dilengkapi lampu UV BLB 20 W. *Metal-doped g-C₃N₄ nanosheets* diuji struktur kristalnya menggunakan alat *X-Ray Diffractofotometer* (XRD). Sedangkan untuk menguji konsentrasi rhodamine-B dari hasil fotoremediasi digunakan alat *UV-Vis Spectrophotometer*.

2.1 Tahapan Penelitian

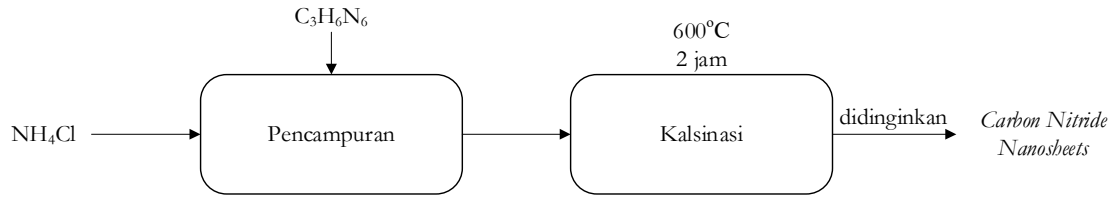
Tahapan utama penelitian yaitu sintesa $\text{g-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets*, impregnasi $\text{g-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* dengan *Co-doped* dan *Zr-doped*, preparasi limbah batik, dan fotoremediasi limbah batik. Pada penelitian terdapat dua variasi doping logam yaitu zirkonium dan kobalt. Waktu dalam pengambilan hasil fotoremediasi berselang 20 menit hingga 120 menit.

2.2 Langkah Penelitian

Empat tahapan penelitian dilakukan dengan langkah-langkah penelitian sebagai berikut:

2.2.1 Tahap Sintesa Carbon Nitride Nanosheets

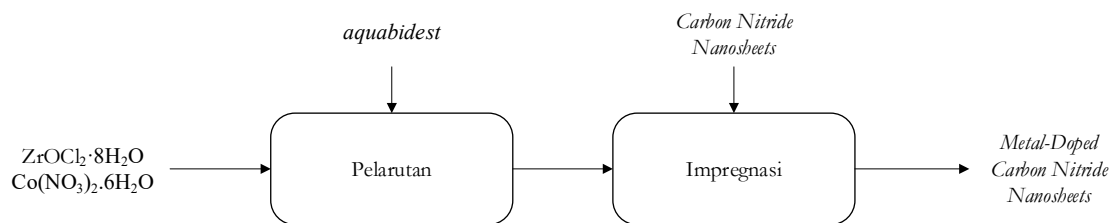
10 gram melamin dicampurkan dengan 10 gram amonium klorida dengan alu mortar hingga homogen. Campuran bubuk tersebut dikalsinasi pada suhu 600°C selama 2 jam di dalam alat *muffle furnace* dengan kenaikan suhu $2^\circ\text{C}/\text{menit}$. Kemudian campuran didinginkan hingga suhu ruangan [8]. Skema terkait tahap sintesa $\text{g-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Blok Sintesa *Carbon Nitride Nanosheets*

2.2.2 Tahap Impregnasi *Carbon Nitride Nanosheets*

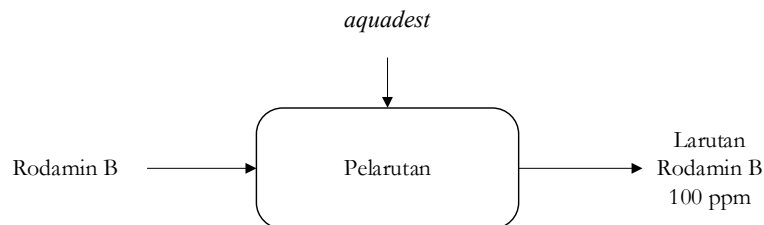
Membuat larutan metal carrier [$ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ dan $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$] dengan melarutkan masing-masing 0,8 dan 1 gram ke dalam 20 mL *aquabidest*. Kemudian, 2 gram $g-C_3N_4$ *nanosheets* diimpregnasi dengan larutan logam tersebut menggunakan alat *vacuum evaporator* pada suhu $90^\circ C$ dengan kecepatan putaran 180 rpm hingga terbentuk kristal. Skema terkait tahap impregnasi $g-C_3N_4$ *nanosheets* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Blok Impregnasi *Carbon Nitride Nanosheets*

2.2.3 Tahap Preparasi Limbah Batik

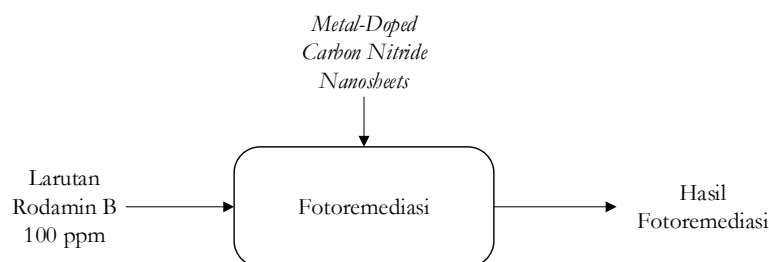
Limbah batik diwakilkan dengan larutan rhodamine-B 100 ppm. Larutan ini dibuat dengan melarutkan 100 mg rhodamine-B ke dalam 1000 mL *aquadest* [8]. Skema terkait tahap preparasi limbah batik ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Blok Preparasi Limbah Batik

2.2.4 Tahap Fotoremediasi Limbah Batik

Sebanyak 50 mg *metal-doped carbon nitride nanosheets* dicampur dengan 50 mL larutan rhodamin-B 100 ppm. Setelah itu lampu UV dihidupkan dan pengambilan sampel dilakukan pada menit ke-0, 10, 20, 30, 40, 60, 90, dan 120 menit. Skema terkait tahap fotoremediasi limbah batik ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Blok Fotoremediasi Limbah Batik

2.2.5 Uji XRD

Uji menggunakan XRD dilakukan untuk mengidentifikasi metal-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets yang terbentuk. Hasil uji XRD dalam bentuk pola difraksi (difraktogram) digunakan untuk menentukan fase kristalin, jumlah fase kristalin, dan material amorf yang terdapat dalam senyawa *metal-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets.

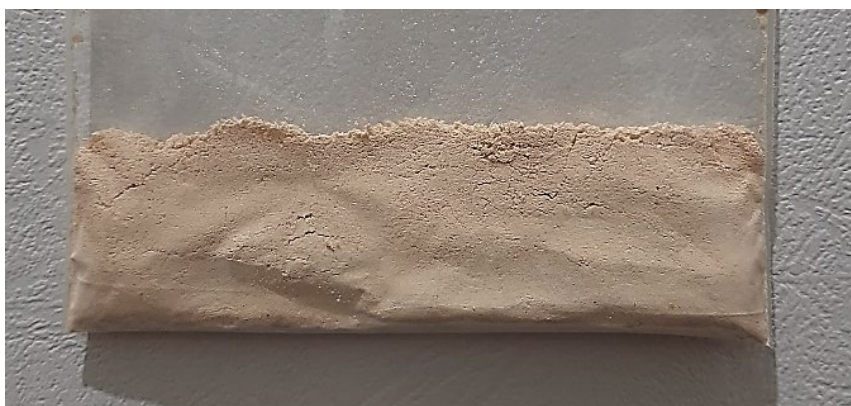
2.2.6 Uji UV-Vis Spectrophotometer

Pengujian ini digunakan untuk mengukur kadar rhodamin-B dalam hasil fotoremediasi larutan rhodamine-B menggunakan *metal-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets. Hasil UV-Vis Spectrophotometer dalam bentuk absorbansi dari setiap sampel digunakan untuk menghitung kadar rhodamine-B yang tersisa di dalam aquadest.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Sintesis Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets

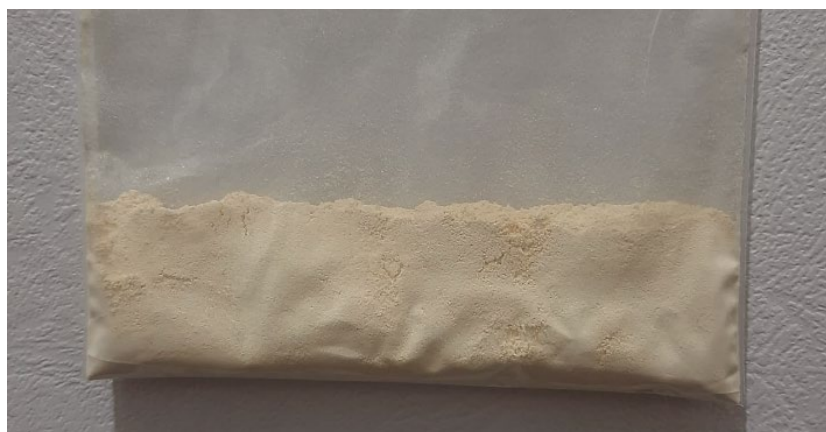
Sintesis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets menggunakan proses kalsinasi dimana campuran melamin dan ammonium sulfat didipanasakan didalam *furnace* pada suhu 600°C . Kemudian diimpregnasi dengan logam Co dari senyawa $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ di dalam alat *vacuum evaporator*. Didapatkan katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets berwarna cokelat muda seperti Gambar 5.



Gambar 5. Katalis *Co-Doped Carbon Nitride Nanosheets*

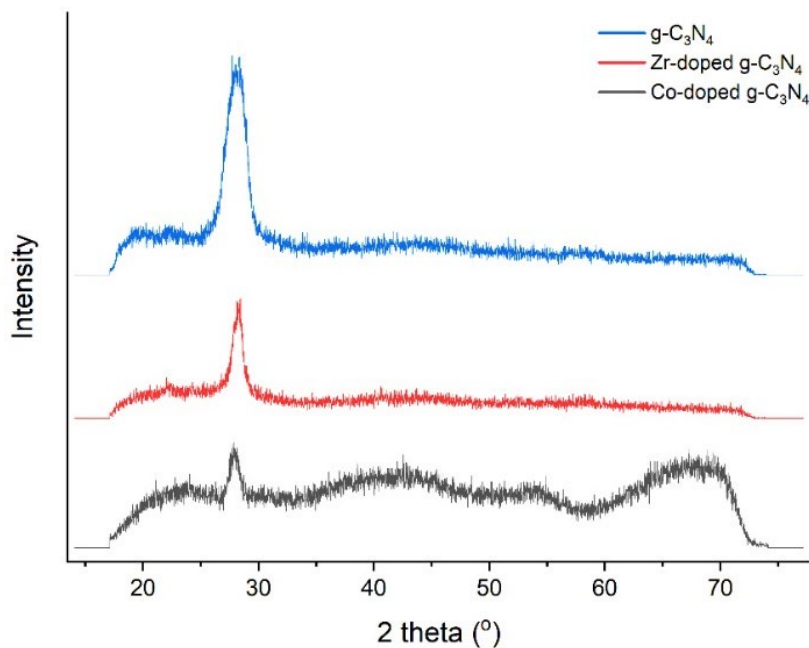
3.2 Hasil Sintesis Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets

Sintesis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets menggunakan proses kalsinasi dimana campuran melamin dan ammonium sulfat didipanasakan didalam *furnace* pada suhu 600°C . Kemudian diimpregnasi dengan logam Zr dari senyawa $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ di dalam alat *vacuum evaporator*. Didapatkan katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets berwarna kuning muda seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Katalis *Zr-Doped Carbon Nitride Nanosheets*

3.3 Hasil Uji XRD $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets, Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets, dan Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets



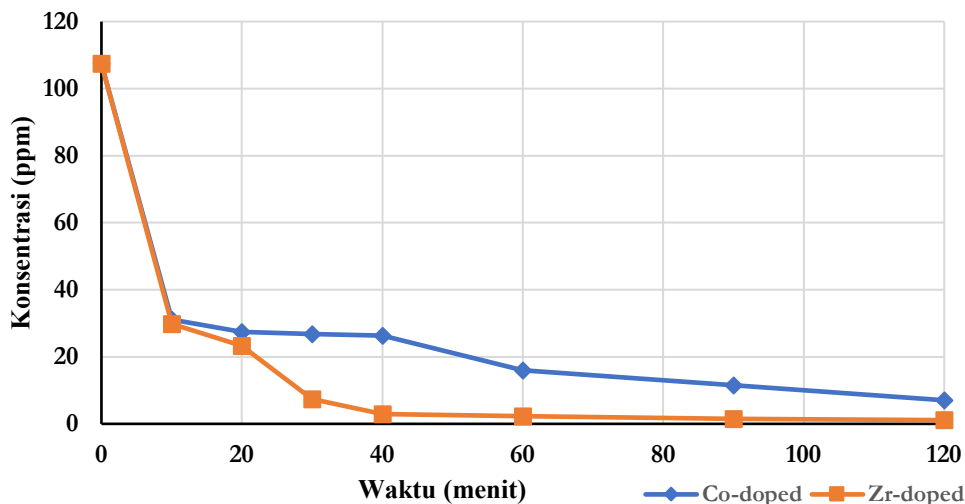
Gambar 7. Hasil Uji XRD terhadap Katalis

Struktur kristal dari $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets dan *metal-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets dianalisis dengan uji XRD. Hasil uji XRD yang dilakukan kepada $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets murni menghasilkan puncak pada $28,26^\circ$, ini merupakan ciri khas puncak dari $g\text{-C}_3\text{N}_4$ karena adanya pola antar lapisan [9]. Setelah didoping dengan logam Zr dan Co, puncak tersebut tidak banyak berubah. Puncak tersebut hanya berpindah ke derajat menjadi masing-masing Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets dan Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets $28,34^\circ$ dan $27,87^\circ$. Hanya saja terdapat *noise* pada hasil uji Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets.

Perhitungan diameter kristal menggunakan persamaan Debye Scherrer menunjukkan diameter $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets sebesar 402,09 nm; diameter Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets sebesar 1.313,81 nm; dan diameter Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets sebesar 3.056,52 nm. Perbedaan diameter kristal ini disebabkan adanya penambahan doping logam yang dapat meningkatkan luas permukaan. Bertambahnya luas permukaan dapat meningkatkan kemampuan penyerapan katalis dalam mendegradasi limbah rhodamine-B. Berdasarkan hasil perhitungan ukuran kristal katalis diketahui bahwa kristal Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets memiliki ukuran paling besar seiring dengan kemampuan degradasi yang paling optimal.

3.3 Analisa Perbandingan Hasil Fotodegradasi Limbah Rhodamin B Menggunakan Katalis Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets dan Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets

Hasil dari fotodegradasi rhodamine B dengan katalis Co-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ dan Zr-doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$ diuji dengan UV-Vis Spectrophotometer. Keluaran dari pengujian berupa absorbansi yang kemudian diolah datanya menjadi konsentrasi pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan Hasil Fotodegradasi

Berdasarkan data yang didapat, diketahui bahwa katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ memiliki kemampuan mendegradasi limbah rhodamine-B lebih tinggi dibandingkan katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Kemampuan tersebut dapat diamati pada data fotoremediasi mulai menit ke-20, sampel limbah rhodamin-B yang diremediasi katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ memiliki konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Pada menit ke-40, katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ mampu mendegradasi limbah rhodamin-B hingga mencapai konsentrasi 2,96 ppm. Jika dibandingkan pada hasil fotodegradasi *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ pada menit ke-40 dengan konsentrasi rhodamine-B sebesar 26,30 ppm, dapat diketahui bahwa katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ memiliki kemampuan 9 kali lebih cepat dalam mendegradasi rhodamine-B.

Penggunaan katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ dan *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ terbukti berhasil dapat mendegradasi limbah pewarna batik. Menurut PP Nomor 22 tahun 2021, batas baku mutu air sungai adalah 1000 ppm. Pada riset ini, katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ dan *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ mampu menurunkan konsentrasi limbah pewarna batik hingga 98,97% (konsentrasi 1,11 ppm) dengan wujud cairan sampel menjadi tidak berwarna (bening).

Analisa terkait data variasi performa fotokatalis diperlukan untuk mengetahui kemampuan *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ dan *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ dalam mendegradasi zat rhodamine-B. Berdasarkan data pada Tabel 1, diketahui bahwa katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* memiliki performa yang sudah optimal jika dibandingkan fotokatalis lainnya. Seperti pada menit ke-120, katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* memiliki performa yang lebih tinggi dibandingkan katalis $g\text{-C}_3\text{N}_4/(\text{BiO})_2\text{CO}_3$.

Tabel 1. Kumpulan Performa Variasi Fotokatalis pada Degradasi Rhodamine-B

Fotokatalis	Zat Polutan	Metode Preparasi	Hasil Degradasi (%)	Referensi
$g\text{-C}_3\text{N}_4/(\text{BiO})_2\text{CO}_3$	RhB	Hidrotermal	70%/120 min	[10]
$\text{C}_3\text{N}_4\text{-Au}/10\text{Pt}$	RhB	Kalsinasi	86,3%/30 min	[11]
$\text{CuI}/\text{C}_3\text{N}_4$	RhB	Hidrotermal	98%/60 min	[12]
<i>Phosphorus doped</i> $g\text{-C}_3\text{N}_4$	RhB	Kalsinasi	95%/30 min	[13]
<i>Co-doped</i> $g\text{-C}_3\text{N}_4$ <i>nanosheets</i>	RhB	Kalsinasi dan Impregnasi	93,45%/120 min	Riset ini
<i>Zr-doped</i> $g\text{-C}_3\text{N}_4$ <i>nanosheets</i>	RhB	Kalsinasi dan Impregnasi	98,97%/120 min	Riset ini

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil riset yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* dengan bahan melamin dan campuran ammonium sulfat serta doping $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ dan katalis *Co-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets* dengan bahan melamin dan campuran ammonium sulfat serta doping $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berhasil disintesis. Indikator keberhasilan tersebut dapat diketahui dari kemampuan katalis *Zr-doped* $g\text{-C}_3\text{N}_4$ *nanosheets*

dan katalis Co-doped g-C₃N₄ nanosheets dalam mendegradasi sampel limbah batik Sungai Bengawan Solo. Hasil uji fotoremediasi menunjukkan katalis Zr-doped g-C₃N₄ nanosheets dapat mendegradasi limbah batik paling baik apabila dibandingkan dengan katalis Co-doped g-C₃N₄ nanosheets.

PUSTAKA

- [1] E.U. Lolo, Y.S. Pambudi, “Penurunan Parameter Pencemar Limbah Cair Industri Tekstil Secara Koagulasi Flokulasi (Studi Kasus: IPAL Kampung Batik Laweyan, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia),” *J. Serambi Eng.* 5 1090–1098 (2020). <https://doi.org/10.32672/jse.v5i3.2072>.
- [2] R. Ratnawati, “Studi Potensi Beban Pencemaran Kualitas Air Di Das Bengawan Solo,” *WAKTU J. Tek. UNIPA.* 10 54–63 (2012). <https://doi.org/10.36456/waktu.v10i2.873>.
- [3] A.D. Utomo, M.R. Ridho, E. Saleh, D.D.A. Putranto, “Pencemaran di Sungai Bengawan Solo antara Solo dan Sragen, Jawa Tengah,” *BAWAL.* 3 25–32 (2010).
- [4] M. Tahir, N. Mahmood, J. Zhu, A. Mahmood, F.K. Butt, S. Rizwan, I. Aslam, M. Tanveer, F. Idrees, I. Shakir, C. Cao, Y. Hou, “One Dimensional Graphitic Carbon Nitrides as Effective Metal-Free Oxygen Reduction Catalysts,” *Sci. Rep.* 5 1–10 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep12389>.
- [5] R. Zhang, S. Niu, X. Zhang, Z. Jiang, J. Zheng, C. Guo, “Combination of experimental and theoretical investigation on Ti-doped g-C₃N₄ with improved photo-catalytic activity,” *Appl. Surf. Sci.* 489 427–434 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.362>.
- [6] B. Babu, J. Shim, K. Yoo, “Efficient solar-light-driven photoelectrochemical water oxidation of one-step in-situ synthesized Co-doped g-C₃N₄ nanolayers,” *Ceram. Int.* 46 16422–16430 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.203>.
- [7] Y. Wang, Y. Wang, Y. Li, H. Shi, Y. Xu, H. Qin, X. Li, Y. Zuo, S. Kang, L. Cui, “Simple synthesis of Zr-doped graphitic carbon nitride towards enhanced photocatalytic performance under simulated solar light irradiation,” *Catal. Commun.* 72 24–28 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2015.08.022>.
- [8] W. Iqbal, B. Qiu, J. Lei, L. Wang, J. Zhang, M. Anpo, “One-step large-scale highly active g-C₃N₄ nanosheets for efficient sunlight-driven photocatalytic hydrogen production,” *Dalt. Trans.* 46 10678–10684 (2017). <https://doi.org/10.1039/c7dt00849j>.
- [9] S. Babar, N. Gavade, H. Shinde, A. Gore, P. Mahajan, K.H. Lee, V. Bhuse, K. Garadkar, “An innovative transformation of waste toner powder into magnetic g-C₃N₄-Fe₂O₃ photocatalyst: Sustainable e-waste management,” *J. Environ. Chem. Eng.* 7 103041 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103041>.
- [10] J. Huang, H. Liu, J. Chen, J. Zhong, J. Li, R. Duan, “In-situ loading of (BiO)₂CO₃ on g-C₃N₄ with promoted solar-driven photocatalytic performance originated from a direct Z-scheme mechanism,” *Mater. Sci. Semicond. Process.* 82 97–103 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.036>.
- [11] H. Zhang, B. Zhang, F. Liang, Y. Fang, H. Wang, A. Chen, “Precise regulation of Ultra-thin platinum decorated Gold/Graphite carbon nitride photocatalysts by atomic layer deposition for efficient degradation of Rhodamine B under simulated sunlight,” *Arab. J. Chem.* 15 103951 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103951>.
- [12] M. Ghanbari, M. Salavati-Niasari, “Copper iodide decorated graphitic carbon nitride sheets with enhanced visible-light response for photocatalytic organic pollutant removal and antibacterial activities,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 208 111712 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111712>.
- [13] B. Chai, J. Yan, C. Wang, Z. Ren, Y. Zhu, “Enhanced visible light photocatalytic degradation of Rhodamine B over phosphorus doped graphitic carbon nitride,” *Appl. Surf. Sci.* 391 376–383 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.180>.