

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran lingkungan adalah masalah global yang terus berkembang, dengan lebih dari 80% air limbah dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan yang tepat (Rahman et al., 2025a). Karena industrialisasi dan urbanisasi yang cepat, seluruh dunia kini menghadapi berbagai masalah ekologi yang sebagian besar disebabkan oleh pelepasan limbah dari pewarna (Tsaviv et al., 2024). Salah satu masalah polusi air yang saat ini terjadi berasal dari limbah industri tekstil dan percetakan, yaitu Metilen Biru (MB) (Subramanian et al., 2024). Hal ini tentu berbahaya karena limbah MB sendiri merupakan limbah yang bersifat karsinogenik dan beracun (Tsaviv et al., 2024).

Degradasi fotokatalitik adalah pendekatan yang sangat efektif untuk menghilangkan polutan organik dari air dengan menggunakan proses kimia. Beberapa jalur yang disarankan untuk pembersihan total polutan berfokus pada penguraian pewarna secara fotokatalitik (Doğan Tunç et al., 2025; Milojević-Rakić et al., 2024). Fotokatalisis menghasilkan elektron dan *hole* melalui *photoexcitation*, memungkinkan reaksi redoks untuk mendegradasi polutan organik secara efisien. Fotokatalisis berbasis semikonduktor telah menarik perhatian yang signifikan karena manfaatnya bagi lingkungan, efektivitas biaya, dan efisiensinya yang tinggi. Oleh karena itu, mengembangkan fotokatalis yang digerakkan oleh cahaya tampak merupakan arah yang sangat penting dan menjanjikan untuk memanfaatkan energi matahari secara lebih efektif (Shi, Li, et al., 2020; Zhang et al., 2024).

Grafrit karbon nitrida ($g-C_3N_4$) adalah polimer fotokatalis organik yang dipelajari secara luas yang terdiri dari atom karbon (C) dan nitrogen (N). $g-C_3N_4$, fotokatalis terkonjugasi non-logam, telah menjadi material yang sangat diperlukan di bidang fotokatalisis karena kapasitas pemanenan cahaya yang unggul, ramah lingkungan, dan memiliki stabilitas fisikokimia. (Elemike et al., 2024; H. Guo et al., 2025). $g-C_3N_4$ adalah semikonduktor tipe-n dengan struktur berlapis yang mirip dengan grafit dan graphene, dan telah diakui secara luas oleh para peneliti sebagai bahan semikonduktor berkualitas tinggi oleh sebagian besar peneliti (Schimon et al., 2024). $g-C_3N_4$ sangat menjanjikan untuk pengolahan air limbah, dengan peningkatan adsorpsi ion logam dan senyawa organik yang dicapai melalui fungsionalisasi permukaan dengan gugus fungsi tunggal, zat pengkelat, atau zat pengoksidasi seperti asam nitrat dan hidrogen peroksida (Basumatary et al., 2024).



Berdasarkan hasil pengamatan, produk dari limbah berbahaya yang dikenal sebagai Red Mud (RM), yang dihasilkan selama proses produksi aluminium oksida, mengandung mineral yang juga ada di Tanah Merah/Red Soil (RS) - konsentrasi yang sedikit berbeda untuk RM dan RS adalah 1: 0,7 untuk SiO_2 , 1: 0,02 untuk CaO , 5: 1 untuk TiO_2 , 1: 1,6 untuk Fe_2O_3 , 1: 1 untuk MgO (Shi, Ren, et al., 2020; Subagyo et al., 2022; X. M adalah produk sampingan yang bersifat basa yang dihasilkan

selama proses pemurnian bauksit untuk mendapatkan alumina (Moreira et al., 2020). Telah banyak penelitian yang sebelumnya telah menggunakan RM sebagai bahan untuk aktivasi fotokatalis sebelumnya (M. Guo et al., 2024; Shi, Ren, et al., 2020; Thi Mai et al., 2025; Y. Wang et al., 2024). Karena komposisi kimiawi RS tidak jauh berbeda dengan RM (Meng et al., 2022; X. Yuan et al., 2021), dan hal ini secara tidak langsung menjelaskan bahwa aktivitas fotokatalitik yang dilakukan oleh RM juga dapat dilakukan oleh RS secara teoritis. RS adalah jenis tanah yang termasuk dalam tanah laterit, biasanya ditemukan di daerah tropis dan subtropis, dan merupakan residu dari proses alami yang disebut laterisasi (Cyriaque Kaze et al., 2022). Meskipun begitu, konten dalam RS tidak jauh berbeda dengan RM (Meng et al., 2022; X. Yuan et al., 2021). RS sendiri relatif mudah ditemukan karena ditemukan di banyak tempat di seluruh dunia, seperti yang dapat dilihat **Gambar 1**. penyebarannya dianggap sangat luas di dunia (Cyriaque Kaze et al., 2022; Santha Kumar et al., 2022).

Oleh karena itu, dengan menggabungkan RS dan Melamine Powder pada proses kalsinasi, maka produk tersebut akan membantu Carbon Nitride (CN) memperoleh permukaan yang lebih baik dalam menangkap polutan yang nantinya akan diproses pada proses fotokatalis. Pada beberapa penelitian serupa sebelumnya lebih memilih menggunakan RM daripada menggunakan RS karena kandungan kimia yang dimiliki RM lebih banyak dan karena RM juga merupakan limbah, seperti pada komposit Red Mud Carbon Nitride (RMCN) yang diteliti oleh Shi. W, et. al pada tahun 2020 dengan tingkat penyisihan MB hingga 96,6%. dan juga komposit Z-scheme-heterojunction g-C₃N₄/RM yang diteliti oleh Wang. Y, et. al pada tahun 2024 untuk penyisihan Rhodamine B, yang keduanya menghasilkan hasil yang memuaskan karena kemampuan RM dalam kadar yang tepat untuk meningkatkan proses fotokatalis CN ketika komposit (Shi, Ren, et al., 2020; Y. Wang et al., 2024).



Gambar 1. Penyebaran tanah laterit (RS) di dunia

elitian ini dilakukan, belum ditemukan penelitian yang dan Melamine secara langsung dengan menggunakan metode membentuk komposit dari tanah merah dan carbon nitrid. Oleh ian ini memperkenalkan suatu terobosan baru, yaitu



mengembangkan komposit RS dan CN menggunakan metode kalsinasi sederhana sebagai adsorben dan fotokatalis untuk degradasi MB. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk menilai dan mengevaluasi fotokatalis, dalam hal degradasi tanpa memerlukan pengaduk magnetik. Bertujuan untuk mengembangkan bahan fotokatalitik yang terukur, murah, dan ramah lingkungan. Komposit yang disintesis dikarakterisasi secara rinci dengan XRD, FTIR, SEM, dan UV-Vis untuk menyelidiki struktur kristal, gugus fungsi, morfologi permukaan, dan sifat optik. Selain itu, penelitian ini menggunakan pemantauan waktu nyata berbasis Internet of Things (IoT) yang meningkatkan ketepatan data dan menjelaskan bagaimana reaksi berkembang, yang dapat membantu dalam pemahaman yang lebih dalam tentang mekanisme fotokatalitik. Selain itu, perbedaan energi $\Delta(\text{LO-TO})$ dianalisis untuk mengevaluasi sifat optik material dan hubungannya dengan efisiensi fotokatalitik. Memanfaatkan atribut sinergis dari RS dan CN, penelitian ini berusaha untuk memperkenalkan pendekatan inovatif dan ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah, menghadirkan solusi yang layak untuk mencegah degradasi lingkungan.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis potensi material komposit berbasis tanah merah dan karbon nitrid sebagai alternatif bahan fotokatalis yang murah dan ramah lingkungan.
2. Mengidentifikasi karakteristik fisika dan kimia dari komposit Karbon Nitrid/Tanah Merah.
3. Membandingkan pengaruh variasi Karbon Nitrid/Tanah Merah dalam beberapa konsentrasi yang berbeda dalam aplikasinya sebagai material fotokatalis terhadap polutan MB.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan terkait mekanisme pembuatan material fotokatalis berbasis tanah merah dan karbon nitrid yang relatif murah dan mudah ditemukan. Analisis kinerja fotokatalis dalam mendegradasi polutan memberikan wawasan baru mengenai efektivitas kombinasi komposit karbon nitrid dalam pengolahan limbah metilen biru. Hasil karakterisasi dan evaluasi kinerja fotokatalis dapat menjadi referensi untuk penelitian lanjutan dalam bidang teknologi material, khususnya dalam aplikasi pengolahan limbah.

2. Manfaat Praktis

Fotokatalis berbasis tanah merah dan karbon nitrid yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diterapkan secara langsung untuk menghilangkan polutan air industri. Dengan efektivitasnya dalam proses fotodegradasi, ini menawarkan solusi yang lebih sederhana dan efisien dalam pengelolaan limbah yang digunakan oleh berbagai sektor industri yang menghasilkan limbah tekstil dan kertas. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi keberlanjutan dan lingkungan.



Penggunaan tanah merah sebagai bahan dasar fotokatalis menawarkan solusi yang murah dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair industri. Material ini tersedia secara melimpah dengan biaya rendah, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis yang lebih mahal. Selain itu, teknologi ini membantu mengurangi pencemaran air dengan cara yang berkelanjutan, meningkatkan kualitas lingkungan, dan mendukung industri kecil dalam mengelola limbah secara lebih ekonomis.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober hingga Desember 2024, di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.2 Bahan dan Alat

2.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Tanah merah (*Red Soil/RS*)
2. Melamin bubuk
3. Metilen Biru (2mg/L)
4. *Aquadest*

2.2.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. *Furnace*
2. Oven
3. *Blender*
4. Cawan petri
5. Lumpang porselen
6. Ayakan 200 *mesh*
7. Gelas kimia
8. *Ball rage*
9. Gelas ukur
10. Corong
11. Cawan kursibel
12. Arduino Uno R3
13. NodeMCU ESP8266
14. Sensor kekeruhan
15. Sensor PH-4502C
16. Sensor DS18B20
17. FTIR (*Fourier Transform Infrared*)
18. XRD (*Scanning Electron Microscope*)
19. *Spectrometer Uv-Vis*
20. SEM (*Scanning Electron Microscope*)



tian

Composit CN/RS

Composit VN/RS dengan konsentrasi yang berbeda

	Red Soil (g)	Melamine (g)
ode		

CN/RS1	0.8	10
CN/RS2	1	10
CN/RS3	1.2	10

Pembuatan Karbon Nitrida/Tanah Merah (CN/RS) dibuat dengan metode kalsinasi sederhana, diawali dengan mengeringkan tanah pada suhu 110°C selama 6 jam, diikuti dengan penggilingan dan pengayakan dengan saringan 200 mesh. Untuk proses kalsinasi, 10 g melamin dicampur dengan tanah merah dalam jumlah yang bervariasi (0,8 g, 1 g, dan 1,2 g), dan campuran tersebut digiling selama 30 menit. Campuran ini kemudian ditempatkan di dalam tungku, di mana ia dipanaskan hingga 550°C dan ditahan pada suhu tersebut selama 3 jam sebelum dibiarkan dingin. Terakhir, produk yang telah dikalsinasi digiling untuk menghasilkan komposit CN/RS dengan kandungan tanah merah yang berbeda (**Tabel 1**).



Gambar 2. Rute skematik untuk sintesis komposit CN/RS sebagai Fotokatalis.

2.4 Pengamatan dan Pengukuran

2.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi komposit CN/RS melibatkan beberapa teknik analitik untuk menilai sifat-sifatnya secara komprehensif. Analisis difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengevaluasi fase struktural dan kristal yang ada dalam sampel, memberikan wawasan terperinci tentang kristalinitas material. Pola XRD diperoleh melalui difraktometer Shimadzu 7000 dengan Cu K α ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) pada rentang 2θ : 10°-70° kemudian ukuran kristalit dapat diukur dengan menggunakan persamaan Debye



$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

ukuran kristalit, λ adalah panjang gelombang sinar-X, θ adalah sudut difraksi, β adalah lebar penuh pada setengah maksimum/ *full width at half maximum* (FWHM), dan k adalah konstanta Scherrer dengan nilai 0,98 (Bahadori et al., 2017).

et al., 2021). Regangan mikro, ε yang disebabkan oleh distorsi, cacat kristal, dan ketidaksesuaian kisi diperkirakan dengan menggunakan (Lim & Yam, 2025):

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (2)$$

2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier transform infrared (FT-IR) Spektroskopi digunakan dengan menggunakan IR Prestige-21 Shimadzu untuk mengidentifikasi gugus fungsi tertentu, sehingga mengungkapkan karakteristik ikatan kimia dalam sampel. Selanjutnya, dengan menggunakan data dari FTIR, sifat optik dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Heryanto & Tahir, 2021):

$$A(\omega) = 2 - \log[T(\omega)\%] \quad (3)$$

$$R(\omega) = 100 - [T(\omega) + A(\omega)] \quad (4)$$

Dengan menggunakan nilai reflektansi $R(\omega)$, indeks bias $n(\omega)$ dan koefisien $k(\omega)$ dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (Heryanto, 2025):

$$n(\omega) = \frac{1 - R(\omega)}{1 + R(\omega) - 2\sqrt{R(\omega) \cos \varphi(\omega)}} \quad (5)$$

$$k(\omega) = \frac{2\sqrt{R(\omega) \cos \varphi(\omega)}}{1 + R(\omega) - 2\sqrt{R(\omega) \cos \varphi(\omega)}} \quad (6)$$

Dari persamaan ini, nilai perubahan fase ($\varphi(\omega)$) dapat dihitung dan kemudian disederhanakan menggunakan persamaan Kramers-Kronig menjadi:

$$\varphi(\omega) = -\frac{4\omega_j}{\pi} x \Delta\omega x \sum_i \frac{\ln(\sqrt{R(\omega)})}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (7)$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln R(\omega') - \ln R(\omega)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (8)$$

Dari persamaan tersebut, j adalah kalimat bilangan gelombang di mana jika j adalah ganjil, maka i sama dengan $2, 4, 6, 8, \dots, j-1$, dan $j+1$, dan jika j adalah bilangan genap, maka i sama dengan $3, 5, 7, \dots, j+1, \dots$. $\Delta\omega = \omega_{i+1} - \omega_i$. ϵ_1 (real) and ϵ_2 (imaginer) bagian dari persamaan dielektrik dapat dihitung dengan menggunakan



$$\varepsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) \quad (9)$$

$$\epsilon_1(\omega) = n^2(\omega) - k^2(\omega) \quad (10)$$

$$\epsilon_2(\omega) = 2n(\omega)k(\omega) \quad (11)$$

Dari persamaan tersebut, *energy loss function* (ELF) dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(\omega)} \right) = \frac{\epsilon_1(\omega)}{\epsilon_1^2(\omega) + \epsilon_2^2(\omega)} \quad (12)$$

2.4.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

HITACHI TM4000Plus II scanning electron microscope (SEM digunakan untuk mengamati morfologi dan distribusi partikel, yang memberikan gambaran yang lebih dekat pada struktur permukaan dan fitur mikrostruktural

2.4.5 Pengujian Aktivitas Fotokatalis

Menggunakan sinar matahari untuk menyinari sampel dan untuk memperoleh celah pita sampel menggunakan Shimadzu UV-1800 UV-vis. *Internet of Things* (IoT) untuk membantu untuk memantau sampel secara berkala.

Aktivitas fotokatalitik sampel dievaluasi di bawah sinar matahari alami, dengan memanfaatkan panjang gelombang cahaya tampak yang tersedia dalam spektrum matahari. Sinar matahari mencakup rentang panjang gelombang yang luas, biasanya membentang dari sekitar 200 nm hingga 800 nm dalam spektrum yang terlihat, dengan panjang gelombang ultraviolet di bawah 200 nm dan panjang gelombang inframerah di atas 800 nm. Untuk percobaan ini, bagian cahaya tampak dari sinar matahari (terutama antara 200-800 nm) digunakan sebagai sumber aktivasi utama untuk fotokatalisis. Analisis celah energi (E_g) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Tauc:

$$\alpha h\nu = A[h\nu - E_g]^{\frac{n}{2}} \quad (13)$$

dimana α adalah koefisien absorpsi, h adalah konstanta planck, ν adalah frekuensi cahaya, A adalah konstanta and E_g dalah energi gap (Tsaviv et al., 2024)

Selama pengujian, suspensi sampel terpapar sinar matahari, dan secara berkala dipantau degradasi polutannya. Pada setiap interval waktu, 7 mL air DI yang mengandung MB yang telah diberi 0,1 g fotokatalis diperiksa, dan kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-vis dan IoT. Teknologi IoT memfasilitasi pemantauan dan akuisisi data secara *real-time* selama proses eksperimental, meningkatkan ketepatan data dan memungkinkan pelacakan kondisi lingkungan dan prosedural secara terus menerus, yang sangat penting untuk menjaga konsistensi dan reproduktifitas hasil penelitian. Alat UV-vis ini digunakan untuk mengukur absorbansi pada panjang gelombang tertentu, yang memberikan

terhadap konsentrasi polutan dari waktu ke waktu. Efisiensi kapasitas adsorpsi dihitung dengan menggunakan efisiensi dengan menggunakan rumus:

$$\text{Degradation (\%)} = \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) \times 100\% \quad (14)$$



$$Q_c = \frac{(C_0 - C) \times V}{m} \quad (15)$$

Dimana C adalah konsentrasi polutan pada waktu yang akhir dan C_0 adalah konsentrasi awal setelah mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi dan V adalah volume larutan (L) setelah mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi (Akmal et al., 2024; Rahman et al., 2025b).

2.5 Pelaksanaan Penelitian

