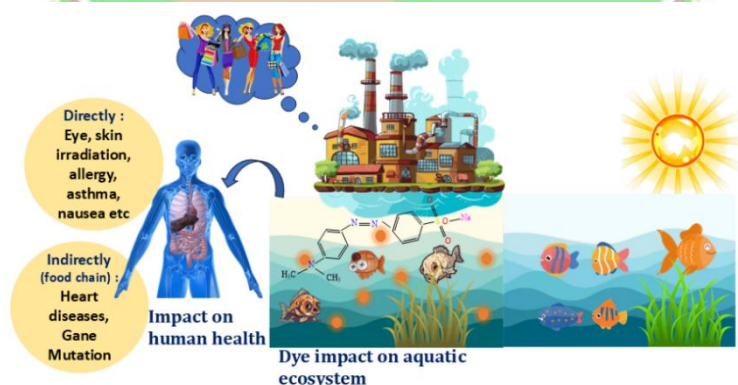


## BAB I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pencemaran air akibat limbah zat warna sintetis telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan secara global. Lebih dari 10.000 jenis zat warna dengan total produksi sekitar 700.000 ton per tahun digunakan secara luas, terutama di industri tekstil yang berkontribusi sekitar 20 % terhadap total pencemaran air (Dutta et al., 2024; Tkaczyk et al., 2020). Dari jumlah tersebut, hanya 85–90 % zat warna yang terserap pada serat tekstil, sedangkan 10–15 % sisanya (sekitar  $\pm 280.000$  ton per tahun) terbuang ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan yang memadai (Kant, 2012). Akumulasi zat warna dengan konsentrasi tinggi dapat menurunkan kualitas air, menghambat penetrasi cahaya, mengurangi aktivitas fotosintesis fitoplankton, serta menurunkan kadar oksigen terlarut yang pada akhirnya mengancam kehidupan akuatik, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1 (Eddy et al., 2024). Sebagian besar zat warna bersifat toksik, persisten, dan sulit terdegradasi secara alami. Zat warna azo seperti MO dan AY25, diketahui memiliki stabilitas tinggi serta berpotensi tereduksi menjadi senyawa aromatik yang bersifat karsinogenik dan mutagenik (Verma et al., 2022).



Gambar 1. Dampak pencemaran zat warna terhadap manusia dan ekosistem

Berbagai metode konvensional, seperti koagulasi, adsorpsi, dan fotodegradasi biologis, telah diterapkan untuk mengatasi limbah zat warna. Akan tetapi efektivitas dari metode tersebut umumnya relatif rendah, terutama pada konsentrasi zat warna yang kecil maupun pada senyawa dengan struktur kimia yang resisten terhadap

proses fotodegradasi. Sebagai alternatif, fotolisis dan fotokatalisis titanium oksida ( $\text{TiO}_2$ ) yang merupakan bagian dari teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), telah menunjukkan potensi yang signifikan karena mampu mendegradasi senyawa organik kompleks menjadi produk akhir yang lebih sederhana dan tidak berbahaya, seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  (Madima et al., 2022).

$\text{TiO}_2$  NPs fase anatase dikenal memiliki stabilitas tinggi dan efisiensi unggul dalam menghasilkan radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) serta anion superoksida ( $\text{O}_2^-$ ) di bawah iradiasi UV. Spesi reaktif ini bertindak sebagai oksidator kuat yang menguraikan senyawa organik kompleks menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  melalui reaksi redoks pada permukaan katalis. Metode sol-gel dipilih untuk sintesis  $\text{TiO}_2$  Nps karena efisien, ekonomis, dan mampu menghasilkan partikel seragam dengan kemurnian tinggi. Pendekatan tersebut juga telah terbukti efektif pada fotodegradasi berbagai zat warna, seperti *direct red-23*, *naphtol blue black*, *violet-3B*, dan *acid red-185*, *Rhodamine B*, *Yellow-GCN*, *Direct Red-81*, *Direct Yellow-27*, *Violet-3B*, dan *Orange F3R* (Aswini et al., 2021; Safni et al., 2019; Deliza et al., 2025; Putri et al., 2020; Safni et al., 2017; Safni et al., 2016). Namun, sintesis  $\text{TiO}_2$  secara konvensional memiliki beberapa keterbatasan, antara lain penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar, biaya produksi yang tinggi, luas area penyerapan cahaya yang terbatas, serta laju rekombinasi elektron-hole yang tinggi (Rahmawati et al., 2024).

Oleh karena itu, pengembangan  $\text{TiO}_2$  Nps berukuran kecil menjadi solusi yang lebih unggul karena memiliki luas permukaan aktif yang lebih besar serta kemampuan pemisahan muatan yang lebih efisien. Tren penelitian terkini juga mengarah pada *green synthesis*, yang memanfaatkan senyawa fitokimia dari tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil yang ramah lingkungan.

Pemanfaatan senyawa fitokimia dari berbagai bagian dan jenis tanaman (biomaterial) berperan ganda sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam *green synthesis*  $\text{TiO}_2$  telah dilaporkan mampu meningkatkan aktivitas fotokatalitik secara signifikan (Ahmad et al., 2024; Eddy et al., 2024). Kandungan metabolit sekunder, seperti flavonoid, tanin, saponin, dan polifenol, berperan penting dalam proses pembentukan serta stabilisasi nanopartikel melalui keberadaan gugus fungsional

yang dapat berinteraksi dengan ion logam selama proses reduksi (Shukla et al., 2018; ur Rehman et al., 2022a; Zare et al., 2019). Berbagai biomaterial telah berhasil dimanfaatkan dalam sintesis  $\text{TiO}_2$  NPs untuk aplikasi fotokatalisis. Beberapa di antaranya meliputi ekstrak tanaman *Azadirachta indica* (Sankar, 2015), *Moringa oleifera* (Patidar & Jain, 2017), *Carica papaya* (Kaur et al., 2019), daun *Morus alba* (Shimi, Wabaidur, et al., 2022), *Coronopus didymus* (ur Rehman et al., 2022a), *Pulicaria undulata* (Khaleel et al., 2022), *Averrhoa carambola* (Rajaram et al., 2023; Rathi & Rejo, 2023; Rathi & Jeice, 2024), *Aloe vera* (Dülger et al., 2024; Jiang et al., 2025; K. Ganapathi Rao, CH. Ashok, K. Venkateswara Rao, CH. Shilpa Chakra, 2016), *Curcuma longa*, dan *Hibiscus rosa-sinensis* (Jalilian et al., 2020). Hingga saat ini, belum terdapat laporan ilmiah yang memanfaatkan limbah kulit duku (*Lansium domesticum* Correa) sebagai *capping agent* dalam *green synthesis*  $\text{TiO}_2$  Nps maupun aplikasinya sebagai fotokatalis untuk mendegradasi zat warna MO dan AY25 maupun zat warna lain. Kondisi ini membuka peluang baru dalam pengembangan material fotokatalis berbasis biomaterial, tetapi juga berpotensi memberikan nilai tambah pada limbah biomassa yang selama ini belum dimanfaatkan.

Oleh karena itu, penelitian disertasi ini difokuskan pada sintesis  $\text{TiO}_2$  NPs berbasis ekstrak kulit *LdC* menggunakan metode *sol-gel*, dilanjutkan dengan karakterisasi, serta evaluasi aktivitas fotokatalitiknya terhadap fotodegradasi MO dan AY25 dalam larutan berair melalui kombinasi metode fotolisis dan fotokatalisis dengan variasi sumber cahaya yaitu UV-A, UV-C, cahaya tampak, dan sinar matahari.

Sejalan dengan itu, Penelitian ini juga mengkaji aspek kinetika fotodegradasi, pengaruh kondisi pH awal, analisis kondisi pH dengan aktivitas fotokatalitik, efek keberadaan *scavenger* terhadap mekanisme fotodegradasi, serta kemampuan reusabilitas katalis  $\text{TiO}_2$  dalam siklus berulang, sehingga diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai efektivitas dan stabilitas sistem fotokatalitik yang dikembangkan. Pendekatan ini diharapkan tidak hanya menawarkan strategi baru dalam pengolahan limbah zat warna yang berkelanjutan, tetapi juga berkontribusi secara signifikan terhadap pencapaian tujuan *Sustainable Development Goals*

(SDGs), Dengan mengintegrasikan nanoteknologi hijau, pemanfaatan biomassa lokal, dan analisis kimia mutakhir, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam remediasi pencemaran air berbasis teknologi berkelanjutan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dijawab melalui penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik fisikokimia dari  $\text{TiO}_2$  Nps hasil *green synthesis* berbasis *Lansium domesticum Correa* ?
2. Bagaimana efektivitas  $\text{TiO}_2$  Nps tersebut dalam mendegradasi zat warna MO dan AY25 melalui metode fotolisis dan fotokatalisis dengan variasi dosis katalis, kondisi pH, serta perbedaan jenis sumber sinar (UV-A, UV-C, cahaya tampak, dan sinar matahari)?
3. Bagaimana perbedaan kinerja fotolisis dan fotokatalisis dalam menurunkan konsentrasi MO dan AY25 serta pengaruh faktor pendukung seperti pH awal, efek *scavenger*, dan kondisi reaksi lainnya?
4. Bagaimana mekanisme reaksi fotodegradasi hingga mineralisasi dari MO dan AY25 dengan katalis  $\text{TiO}_2$  Nps?
5. Bagaimana stabilitas dan reusabilitas katalis  $\text{TiO}_2$  Nps dalam siklus penggunaan berulang ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai melalui penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengkarakterisasi sifat fisikokimia  $\text{TiO}_2$  Nps yang disintesis secara *green synthesis* menggunakan ekstrak kulit duku (*Lansium domesticum Correa*)
2. Mengevaluasi efektivitas  $\text{TiO}_2$  Nps dalam mendegradasi zat warna MO dan AY25 melalui metode fotolisis dan fotokatalisis dengan mempertimbangkan variasi dosis katalis, kondisi pH, serta perbedaan jenis sumber sinar (UV-A, UV-C, cahaya tampak, dan sinar matahari).
3. Membandingkan kinerja metode fotolisis dan fotokatalisis dalam menurunkan konsentrasi MO dan AY25, termasuk analisis pengaruh pH awal, efek *scavenger*, dan kondisi reaksi lain yang relevan.



4. Menjelaskan mekanisme reaksi fotodegradasi hingga tahap mineralisasi dari MO dan AY25 menggunakan katalis  $\text{TiO}_2$  Nps.
5. Menilai stabilitas dan reusabilitas  $\text{TiO}_2$  Nps hasil *green synthesis* dalam siklus penggunaan berulang

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan ruang ilmu pengembangan pengetahuan untuk mengatasi permasalahan lingkungan dari limbah zat warna yang bermanfaat bagi industri tekstil, batik dan tenun, kemudian menjadi referensi pengembangan ilmu sintesis  $\text{TiO}_2$  NPs biomaterial sebagai *capping agent*.

#### 1.5 Kebaruan Penelitian

Penelitian ini menawarkan kebaruan dalam bidang fotokatalisis, yakni melalui pemanfaatan limbah kulit duku/ LdC sebagai *capping agent* pada sintesis  $\text{TiO}_2$  NPs yang digunakan untuk mendegradasi zat warna MO dan AY25 dengan metode fotolisis dan fotokatalisis. Berdasarkan kajian literatur yang komprehensif dan informasi yang telah dibaca oleh peneliti, pendekatan ini belum pernah dilakukan maupun dilaporkan oleh peneliti lain.

