

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air limbah farmasi adalah limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas produksi, formulasi, pengujian, maupun penggunaan obat-obatan di industri farmasi, rumah sakit, laboratorium, atau fasilitas kesehatan lainnya. Dibandingkan dengan limbah domestik, kandungan polutan mikro dalam air limbah farmasi 5 hingga 15 kali lebih beracun (Verlicchi and Zambello, 2015). Air limbah farmasi biasanya mengandung polutan organik persisten dan senyawa bioaktif yang menimbulkan risiko lingkungan yang signifikan (Ates *et al.*, 2025). Di antara berbagai jenis cemaran, logam berat dan antibiotik menjadi perhatian utama karena sifatnya yang beracun meskipun hadir dalam konsentrasi sangat rendah (*trace-level contaminants*), biasanya dalam kisaran nanogram per liter (ng/L), dan tetap berpotensi memberikan dampak ekologis yang serius. Selain itu, kedua jenis polutan ini bersifat transparan secara visual, bahkan pada konsentrasi tinggi, sehingga menyulitkan proses pemantauan dan deteksi secara konvensional.

Kadar logam berat merupakan parameter penting untuk menentukan tingkat kualitas suatu limbah. Logam berat adalah berbagai jenis logam yang memiliki massa jenis lebih dari 5 g/cm³ (Briffa, Sinagra and Blundell, 2020). Kandungan logam berat yang melebihi batas ambang dalam air sering dikaitkan dengan adanya pencemaran karena keberadaannya yang membahayakan. Logam berat bersifat

racun yang dapat berdampak negatif bagi lingkungan hidup sehingga diperlukan perlindungan dan pengelolaan. Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum.

Selain berdampak terhadap lingkungan, logam berat juga dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan. Logam berat yang masuk ke dalam tubuh manusia dalam kadar tertentu dapat memicu munculnya berbagai gangguan kesehatan seperti gangguan ginjal akut, gangguan syaraf otak pada anak-anak, dan dapat menyebabkan kematian (Mitra *et al.*, 2022). Logam berat dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu logam berat esensial dan logam berat non-esensial. Logam berat esensial adalah logam berat yang keberadaannya diperlukan oleh sejumlah makhluk hidup tetapi akan menyebabkan efek toksik jika jumlahnya berlebihan, seperti logam besi (Fe), Seng (Zn), Tembaga (Cu), dan Kobalt (Co). Logam berat non-esensial adalah logam beracun jika dikonsumsi oleh makhluk hidup dan menimbulkan kerugian bagi kesehatan manusia seperti Timbal (Pb), Timah (Sn), Merkuri (Hg), dan Kadmium (Cd) (Badan POM RI, 2010).

Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan

penegakan hukum. Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup bertujuan menjamin keselamatan, kesehatan, dan kehidupan manusia. Salah satu upaya perlindungan dan pengelolaan tersebut yaitu dengan melakukan pencegahan kontaminasi kandungan logam berat yang melebihi batas ambang. Pada konteks air limbah farmasi, keberadaan logam berat diatur pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 yang secara eksplisit memberikan batasan baku mutu terutama air limbah farmasi dari fasilitas pelayanan kesehatan, dengan maksimum yang boleh ditenggang dalam air yaitu besi 5 mg/L, mangan 2 mg/L, barium 2 mg/L, tembaga 2 mg/L, seng 5 mg/L, krom 0,5 mg/L, kadmium 0,05 mg/L, merkuri 0,002 mg/L, timbal 0,1 mg/L, stanum 2 mg/L, arsen 0,1 mg/L, selenium 0,05 mg/L, nikel 0,2 mg/L, dan kobal 0,4 mg/L.

Parameter lain dalam air limbah farmasi yang mendapat perhatian adalah kandungan antibiotik. Penggunaan antibiotik berkontribusi penting dalam kehidupan manusia, terutama dalam pencegahan dan pengendalian penyakit yang bersumber dari mikroba (Shi *et al.*, 2022). Secara global, kebutuhan antibiotik diperkirakan sebesar 93.309 ton pada tahun 2017 dan akan mencapai 105.596 ton pada tahun 2030 (Yang *et al.*, 2022). Meskipun antibiotik diciptakan untuk mengatasi berbagai penyakit infeksi bakteri, terdapat situasi di mana antibiotik dapat menjadi ancaman serius bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Penggunaan yang berlebihan dan pembuangan antibiotik menyebabkan keberadaannya ditemukan di lingkungan. Berbagai penelitian telah melaporkan bahwa ditemukan sejumlah kandungan antibiotik yang bersumber dari saluran pembuangan, seperti aliran air limbah rumah sakit dan industri farmasi (Esrafil *et*

al., 2020; Pirsahab, Moradi and Hossini, 2023). Penelitian lain melaporkan bahwa beragam antibiotik telah tersebar secara masif hingga banyak ditemukan baik dalam konsentrasi tinggi maupun rendah di lingkungan darat, air tawar, dan air laut (Kraemer, Ramachandran and Perron, 2019). Sejumlah antibiotik juga telah banyak ditemukan di air tanah, air permukaan, lumpur, sedimen (Pirsahab, Moradi and Hossini, 2023), bahkan air minum (Gupta, Kumar Verma and Kumar, 2023).

Kandungan antibiotik pada air limbah dapat menimbulkan kerusakan lingkungan, seperti toksisitas dan rusaknya kehidupan mikroorganisme. Residu antibiotik akan berada di lingkungan untuk waktu yang lama karena sifat antibiotik yang tidak mudah mengalami biodegradasi (T. X. Wang *et al.*, 2020). Keberadaan antibiotik dalam air limbah akan menghambat dan membunuh organisme mikro yang membantu dalam proses pengolahan air limbah. Padahal organisme mikro memiliki peran vital dalam keseimbangan ekosistem. Lebih jauh, keberadaan antibiotik di lingkungan dapat menyebabkan berkembangnya *Antimicrobial Resistance Gen* (ARG) dan *Antibiotics Resistant Bacteria* (ARB) (Ali *et al.*, 2017). ARB dapat ditransmisikan dari lingkungan ke manusia melalui agen fisik, seperti air, tanah, angin, maupun agen biologis seperti hewan dan serangga. ARB memindahkan gen secara vertikal dan mewariskannya ke generasi berikutnya sehingga menjadi bagian permanen yang terjadi secara terus-menerus (Fu *et al.*, 2022). Apabila fenomena ini tidak dicegah dan dikelola secara efektif akan berdampak buruk terhadap keselamatan manusia dan kesehatan lingkungan secara menyeluruh.

Upaya pengelolaan logam berat dan antibiotik yang terkandung pada air limbah perlu dilakukan dengan serius karena memberikan dampak secara langsung terhadap keberlangsungan ekologi, kesehatan lingkungan, dan kehidupan manusia. Terdapat dua langkah penting dalam rangka mengelola polutan dalam air limbah, yaitu tahap deteksi dan tahap remediasi. Deteksi polutan merupakan tindakan penting dan mendesak yang harus dilakukan dalam rangka pencegahan serta mengidentifikasi jenis dan kadar suatu polutan dalam air limbah. Sedangkan remediasi merupakan tindakan pengolahan dalam rangka memperbaiki kondisi atau kualitas air limbah. Hasil deteksi menjadi informasi fundametal sebagai bentuk kendali kualitas air limbah dan remediasi digunakan untuk memastikan kondisi air limbah telah memenuhi standar untuk dilepaskan ke lingkungan.

Pada tahap deteksi, beberapa metode telah digunakan untuk mendeteksi kandungan polutan cair, seperti elektrokimia (Bansod *et al.*, 2017), spektroskopi serapan atom (Adu *et al.*, 2020), resonansi plasmon permukaan (N. Zhang *et al.*, 2019), kapiler elektroforesis (Song *et al.*, 2020), dan spektrometri massa plasma (Manousi *et al.*, 2020). Keunggulan analisis dengan teknik ini adalah memungkinkan untuk deteksi multielemen, namun beberapa teknik tersebut membutuhkan instrumen yang besar, preparasi rumit, membutuhkan waktu lama, dan biaya yang mahal (Kukkar *et al.*, 2018). Selain itu teknik tersebut memerlukan keterampilan khusus untuk dapat mengoperasikannya.

Perkembangan teknik pendeteksian polutan cair saat ini mengalami pergeseran paradigma dari sistem yang kompleks menuju sebuah sistem yang lebih sederhana. Teknik sederhana yang sedang dikembangkan oleh para peneliti saat ini

yaitu dengan memanfaatkan sifat optik material fluoresensi (Long *et al.*, 2021). Prinsip fluoresensi banyak diusulkan karena pengamatan dapat dilakukan dengan mata secara langsung, pembacaan cepat dan biaya rendah, sehingga deteksi optik berdasarkan sifat fluoresensi dapat mendorong analisis yang lebih cepat dan sederhana (Lewa *et al.*, 2019). Salah satu material fluoresensi ramah lingkungan yang dapat dikembangkan menjadi detektor yaitu karbon dots (Cdots).

Cdots merupakan material karbon yang memiliki ukuran partikel kurang dari 10 nm. Cdots memiliki sifat toksik yang rendah, biokompatibilitas tinggi, terlarut dalam air, stabilitas optik, dan luminesensi yang tinggi (Long *et al.*, 2021). Teknik pendeteksian yang dikembangkan oleh material Cdots dengan menerapkan prinsip *turn off detection*, dimana intensitas pendaran akan meredup (padam) seiring dengan peningkatan jumlah/kadar polutan (Ding *et al.*, 2022). Paydar *et al.*, (2022) melaporkan telah berhasil sintesis Cdots yang berpendar hijau dan dapat mendeteksi keberadaan logam berat Pb^{2+} pada batas 2,7 nM (Paydar *et al.*, 2022). Khan *et al.*, (2023) melaporkan telah mengaplikasikan Cdots berbahan *trysodium citrate* dengan pendaran warna biru yang dapat mendeteksi keberadaan ion Hg^{2+} pada kadar minimum 3,5 nM (Khan *et al.*, 2023). Beragam jenis logam berat lain juga telah dilaporkan dapat dideteksi oleh Cdots seperti Fe^{3+} (Zhou *et al.*, 2023), Ce^{4+} , Al^{3+} (Li *et al.*, 2022), Cu^{2+} dan Cr^{6+} (Mejía Ávila *et al.*, 2022). Di sisi lain, beberapa penelitian juga telah melaporkan potensi Cdots dalam mendeteksi antibiotik seperti Amoksisilin (AMX) (Zhang *et al.*, 2020), tetrasiklin (TC) (Cao *et al.*, 2022), dan ciprofloxacin (CIP) (Chaudhary *et al.*, 2023).

Namun demikian, sebagian besar Cdots yang digunakan hingga saat ini hanya menghasilkan emisi monowarna, umumnya dalam spektrum biru (~450–470 nm). Pola emisi tunggal ini menjadi keterbatasan fundamental yang secara signifikan membatasi sensitivitas, selektivitas, serta kemampuan multi-elemen dari sistem deteksi. Untuk mengatasi keterbatasan ini, diperlukan diversifikasi emisi fluoresensi menjadi sistem multiwarna, yang terdiri dari karbon dots dengan emisi dalam spektrum bervariasi. Sistem fluoresensi multiwarna memungkinkan pemetaan analit secara lebih presisi melalui diferensiasi respon berdasarkan panjang gelombang emisi, sehingga meningkatkan kapasitas selektif dan memperluas spektrum deteksi. Selain itu, konfigurasi multiwarna membuka peluang deteksi simultan terhadap lebih dari satu jenis polutan dalam satu material, serta memungkinkan integrasi dengan sistem sensor visual yang lebih aplikatif.

Selanjutnya, karakteristik fisik dan kimia dari Cdots yang tersedia saat ini masih memerlukan perbaikan signifikan agar dapat diimplementasikan secara optimal sebagai material detektor. Mayoritas Cdots dipreparasi dari serbuk yang didispersikan dalam larutan dan umumnya tidak memenuhi standar kelayakan sebagai material detektor polutan. Pertama, kemampuan deteksi Cdots (*limit of detection*) yang masih berada di atas batas ambang (baku mutu) dari kadar polutan target. Suatu material tidak dapat menjadi instrumen detektor jika tidak memiliki sensitivitas yang memadai terhadap kadar maksimal suatu polutan. Batas kemampuan mendeteksi konsentrasi serendah mungkin hingga melewati angka baku mutu merupakan syarat yang harus dipenuhi karena informasi detektor akan digunakan sebagai indikator kualitas air limbah. Kedua, mayoritas Cdots mudah

mengalami *photobleaching*, agregasi, dan menimbulkan ketidakstabilan intensitas luminesensi (Li *et al.*, 2016; Dua *et al.*, 2023). Padahal pada aplikasi sesungguhnya kestabilan karakteristik luminesensi Cdots merupakan syarat utama yang harus dipenuhi sebelum digunakan sebagai detektor. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan Cdots multiwarna dan film stabilitas fotofisik sebagai dasar dari detektor fluoresensi yang aplikatif dalam pemantauan polutan .

Pada sisi yang lain, serbuk Cdots juga sedang dikembangkan para peneliti sebagai material fotokatalis untuk meremediasi air limbah menggunakan aktivitas fotodegradasi. Metode fotodegradasi merupakan salah satu cara yang efektif dalam pengolahan limbah cair (Suahya *et al.*, 2016). Mekanisme proses fotokatalis terjadi saat foton dari sumber cahaya menumbuk material fotokatalis yang menyebabkan elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi membentuk pasangan muatan dan membangkitkan radikal untuk mendekomposisi polutan organik. Umumnya metode fotokatalis menggunakan material berbasis logam oksida atau semikonduktor, namun material-material tersebut umumnya bersifat toksik, menimbulkan residu baru, dan kurang terdispersi dalam air. Cdots sebagai material alternatif menawarkan pemanen cahaya murah dan efektif, dimana prosesnya akan menciptakan oksigen reaktif spesies (ROS) seperti radikal hidroksil (OH^*) dan radikal superoksida (O_2^{-*}). ROS bersifat reaktif dan bertanggung jawab atas penguraian berbagai bahan organik kompleks (Saini *et al.*, 2022).

Cdots telah diujicobakan sebagai katalis untuk menurunkan kadar berbagai polutan. Bella Natanael Jusuf *et al.*, (2018) telah meremediasi metilen biru menggunakan Cdots dari membran cangkang telur selama 10 jam dengan efisiensi

degradasi maksimal 43%, sedangkan Saravanan Gengan et al, (2022) melaporkan remediasi rhodamine-b selama 3 jam menggunakan Cdots menunjukkan efisiensi degradasi maksimal 55% (Nathanael and Soraya, 2018; Gengan, Murthy and Nhat, 2022). Beberapa antibiotik juga telah dicoba dalam fotodegradasi menggunakan Cdots, seperti tetrasiklin dan sulfadiazine (Yuan *et al.*, 2019; Louros *et al.*, 2021). Meskipun efisiensi degradasinya masih rendah namun Cdots memiliki potensi untuk diaplikasikan pada air limbah farmasi (Akbar, Moretti and Vomiero, 2021).

Sama seperti detektor, hampir semua Cdots dalam mendegradasi polutan masih dalam bentuk serbuk yang dilarutkan (*mobile photocatalyst*). Pada lingkungan yang sesungguhnya, Cdots dalam bentuk serbuk yang dilarutkan sulit untuk diaplikasikan. Hal ini dikarenakan air limbah akan menyisakan residu baru dan material Cdots hanya dapat digunakan satu kali. Material fotokatalis perlu diimobilisasi menjadi film untuk memenuhi kepentingan aplikasinya di lingkungan. Ada beberapa keuntungan fotokatalis film tipis dibandingkan fotokatalis serbuk seperti lebih hemat biaya karena pengurangan penggunaan material, menghindari proses daur ulang atau regenerasi yang mahal setelah degradasi, menghindari potensi gangguan fisik seperti agregasi, menawarkan kinerja jangka panjang yang relatif lebih baik, dan lebih mudah diaplikasikan dalam berbagai kondisi air limbah (Pedanekar, Shaikh and Rajpure, 2020).

Untuk mengatasi permasalahan ini, strategi imobilisasi Cdots ke dalam matriks polimer padat telah banyak digunakan guna meningkatkan stabilitas dan efisiensi fungsional material tersebut. Pengintegrasian Cdots ke dalam matriks padat menjadi langkah penting untuk mempertahankan kestabilan fotoluminesensi

serta memperpanjang umur aktif material (Cheng *et al.*, 2024). Pendekatan ini memberikan keuntungan signifikan dibandingkan metode konvensional karena menghasilkan distribusi partikel yang lebih homogen serta interaksi antarmolekul yang lebih stabil (Hu *et al.*, 2024).

Dalam penelitian ini, polivinil alkohol (PVA) dipilih sebagai matriks karena sifatnya yang transparan, fleksibel, serta kompatibel dengan sistem Cdots (Jannah *et al.*, 2021). Jika dibandingkan dengan matriks anorganik seperti kaca atau logam, matriks organik seperti PVA memiliki keunggulan dalam kemudahan pemrosesan, stabilitas kimia, dan fleksibilitas sintesis (Cardoso, Martins-Lopes and Gonçalves, 2025). Selain itu penggunaan PVA tidak hanya memfasilitasi dispersi partikel Cdots secara merata, tetapi juga mampu menjaga kestabilan struktural film dan mengurangi kemungkinan terjadinya agregasi. Hal ini turut berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi transfer muatan, baik dalam deteksi berbasis fluoresensi maupun dalam proses fotodegradasi polutan (Pandey and Raikwar, 2024).

Karbon dots akan dikembangkan dalam bentuk film fluoresen multiwarna yang disintesis dengan teknik solvotermal. Bahan baku yang digunakan sebagai sumber karbon adalah kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca*) yang diperoleh dari pelaku UMKM Keripik Pisang Dua Putri, Sitirejo, Tambakromo, Pati. Bahan baku tersebut dipilih karena ketersediaannya yang melimpah, keberlanjutan sumber daya, serta kemampuannya menghasilkan emisi fluoresensi dalam tiga spektrum warna utama: hijau, biru, dan merah. Eksplorasi limbah kulit pisang sebagai prekursor untuk produksi karbon dots menunjukkan prinsip keberlanjutan dan kimia hijau. Kulit pisang yang biasanya dibuang setelah dikonsumsi, pada

penelitian ini diubah menjadi bahan fungsional melalui pendekatan valorisasi. Hal ini sejalan dengan praktik produksi berkelanjutan dan mempromosikan model ekonomi sirkular, di mana sumber daya terus digunakan kembali, sehingga mengurangi timbulan limbah dan meminimalkan dampak lingkungan.

Cdots yang dihasilkan kemudian dimodifikasi menjadi film tipis dengan bantuan matriks PVA. Strategi ini diharapkan dapat meningkatkan *quantum yield* serta memperkuat stabilitas mekanik partikel Cdots yang terdispersi dalam jaringan polimer (Hu et al., 2022). Dalam aplikasi deteksi, keberadaan fluoresensi multiwarna diperkirakan mampu meningkatkan kapasitas deteksi terhadap berbagai jenis polutan, sementara format film Cdots memberikan keuntungan dalam menjaga fotostabilitas dan mempertahankan sifat optiknya dalam jangka waktu lebih lama. Transformasi Cdots menjadi sistem film multiwarna ini merupakan pendekatan rasional dalam merancang sensor optik yang ideal, yaitu yang mampu mengenali berbagai jenis polutan sekaligus menyimpan informasi deteksi secara stabil.

Pada tahap remediasi penelitian ini, karbon dots (Cdots) akan dikombinasikan dengan bismut oksida (Bi_2O_3) sebagai representasi logam oksida semikonduktor untuk membentuk sistem fotokatalitik yang efektif. Bi_2O_3 dipilih karena mudah dimodifikasi dan memiliki *bandgap* sempit yang mendukung fotodegradasi air limbah farmasi, sementara Cdots berperan sebagai fotosensitizer dan agen transfer elektron untuk memperluas absorpsi spektral dan menghambat rekombinasi pasangan elektron-hole. Kemudian, formulasi material $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Cdots}$ akan didekorasi dalam bentuk film terapung untuk meningkatkan kemudahan aplikasi pada permukaan air tercemar. Desain ini diharapkan dapat memfasilitasi pemanfaatan

energi cahaya secara lebih optimal karena eksposur langsung ke permukaan, mencegah kehilangan material selama proses fotodegradasi, serta mempermudah pemisahan dan daur ulang katalis. Implementasi dalam bentuk film padat juga diharapkan dapat memperpanjang masa pakai fotokatalis.

1.2 Rumusan Masalah

Logam berat dan antibiotik merupakan jenis cemaran yang tidak berwarna atau transparan meskipun dalam konsentrasi yang tinggi. Pada air limbah, kadar logam berat dan antibiotik perlu dikontrol dengan teknologi deteksi dan remediasi. Metode deteksi menggunakan Cdots mengalami banyak kendala terutama kendala kemampuan limit deteksi dan ketahanan karakteristik optik. Metode remediasi berbasis fotokatalitik menggunakan Cdots juga masih mengalami kendala, terutama kendala efisiensi degradasi dan siklus pemakaian. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perbedaan karakteristik karbon dots multiwarna hasil sintesis solvothermal dari kulit pisang kepok?
2. Bagaimana kemampuan karbon dots multiwarna dalam mendeteksi logam berat dan antibiotik pada air limbah farmasi berdasarkan selektivitas dan sensitivitas fluoresensinya?
3. Bagaimana formulasi optimal film padat berbasis karbon dots fluoresen multiwarna dapat mendukung deteksi polutan melalui karakteristik mekanik, optik, dan fotostabilitasnya?

4. Bagaimana parameter sintesis yang optimal memengaruhi karakteristik optik, kristalinitas, morfologi, topografi, dan kestabilan termal komposit bismut karbon dots sebagai fotokatalis?
5. Bagaimana aktivitas fotokatalitik komposit bismut karbon dots dalam mendegradasi antibiotik dan senyawa organik pada air limbah farmasi?
6. Bagaimana kinerja film terapung berbasis bismut karbon dots dalam remediasi air limbah farmasi ditinjau dari efisiensi degradasi, durabilitas, dan perubahan karakteristik limbah?
7. Bagaimana potensi aplikasi teknologi deteksi dan fotodegradasi berbasis material karbon dots dan dampak lingkungan yang ditimbulkan?

1.3 Orisinalitas

Beberapa penelitian deteksi polutan dengan fluoresensi Cdots tidak dapat diterapkan karena kemampuan deteksi melebihi baku mutu dan sifat larutannya yang mudah mengalami kerusakan. Cdots sebagai material fluoresensi perlu diimobilisasi pada substrat untuk mempertahankan karakteristik optiknya. Beberapa penelitian yang menggunakan Cdots untuk deteksi polutan antara lain (Hu *et al.*, 2022), (Tang *et al.*, 2022), dan (Yang Chen *et al.*, 2022). Penelitian terkait pengembangan Cdots multiwarna dari biomassa dalam bentuk film masih jarang ditemukan, khususnya penelitian yang mengkaji sensitivitas dan ketahanan karakteristiknya dalam mendeteksi logam berat dan antibiotik.

Beberapa penelitian fotokatalis Cdots menemui banyak kendala dalam aplikasi karena efisiensi degradasinya yang rendah dan bentuk serbuk hanya dapat digunakan satu kali. Cdots perlu dikombinasikan metal oksida yang diimobilisasi

pada substrat membentuk film tipis untuk meningkatkan persentase penyisihan sekaligus meningkatkan siklus pemakaian. Beberapa penelitian yang menggunakan Cdots/Bi₂O₃ untuk remediasi polutan antara lain (Que *et al.*, 2017), (Sharma *et al.*, 2019), dan (Xian *et al.*, 2019). Penelitian terkait pengembangan komposit Cdots/Bi₂O₃ yang diimobilisasikan pada substrat jarang penulis temukan, khususnya penelitian yang mengkaji kemampuan dan jumlah siklus degradasinya pada air limbah farmasi aktual.

Ringkasan hasil penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 1.1 Kontribusi kebaruan utama dari penelitian disertasi ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini mengembangkan suatu metode deteksi polutan yang memanfaatkan karbon dots dengan kontribusi kebaruan yang ingin dicapai:
(a) Peningkatan kemampuan selektivitas dan sensitivitas melalui diversifikasi karakteristik fluoresensi multiwarna karbon dots yang disintesis dari limbah kulit pisang kepok. (b) Peningkatan fotostabilitas, ketahanan material detektor, dan kemudahan dalam proses deteksi melalui imobilisasi partikel karbon dots pada matriks transparan dan fleksibel menjadi suatu film berfluoresensi yang praktis dalam mendeteksi logam berat dan antibiotik.
2. Penelitian ini mengembangkan suatu metode fotodegradasi polutan antibiotik pada air limbah farmasi dengan kontribusi kebaruan yang ingin dicapai: (a) Peningkatan karakteristik dan efek fotokatalitik dari logam oksida yang termodifikasi karbon dots sehingga meningkatkan efisiensi dan laju fotodegradasi terhadap berbagai antibiotik. (b) Peningkatan jumlah

siklus pemakaian dan ketahanan material dalam proses fotodegradasi melalui imobilisasi komposit Cdots/Bi₂O₃ pada substrat terapung lebih yang praktis digunakan.



SEKOLAH PASCASARJANA

Tabel 1. 1 Uraian Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Sumber dan Tahun	Judul	Ringkasan	Referensi
1	Laksmi Dewi Kasmiarno, Andini Fikarda, Reforny Krisianti Gunawan, Isnaeni, Supandi, Nonni Soraya Sambudi	Waste Tech. Vol. 9 (1): 1-10 Tahun: 2021	Carbon Quantum Dots (CQDs) from Rambutan and Pandan Leaves for Cu ²⁺ Detection	Cdots disintesis dari daun rambutan dan daun pandan dengan metode hidrotermal pada suhu 200°C selama 6 jam. Campuran disentrifugasi pada kecepatan 8.000 rpm selama 15 menit. Larutan Cdots menunjukkan pendaran berwarna biru yang menunjukkan LoD sebesar 123 uM dan 233 uM. Cdots pada penelitian ini masih dalam bentuk larutan dan LoD Cdots masih melebihi ambang batas kadar Cu dalam air kelas 2 peraturan nasional sehingga tidak bisa diaplikasikan.	(Dewi Kasmiarno <i>et al.</i> , 2021)
2	Zishan Sun, Yuping Zhou, Weiyang Zhou, Jiabao Luo, Ruiyuan Liu, Xinguo Zhang, Liya Zhouc and Qi Pang	Nanoscale 13: 2472–2480 Tahun: 2021	Pb(II) Detection And Versatile Bio- Imaging Of Green- Emitting Carbon Dots With Excellent Stability And Bright Fluorescence	Cdots disintesis dari bahan baku betaine hidroklorida, sulfadiazin, dan etilendiamin yang didispersikan dalam air deionisasi yang dipanaskan dengan metode hidrotermal bersuhu 180 °C selama 4 jam. Larutan difiltrasi menggunakan membran 0,22 µm untuk menghilangkan kotoran. Larutan Cdots menunjukkan pendaran fluoresensi berwarna hijau dan digunakan untuk mendeteksi logam berat. Hasilnya LOD untuk mendeteksi Pb sebesar 3,0174 uM, dimana nilai ini masih	(Sun <i>et al.</i> , 2021)

3	V.A Ansi, N.K Renuka	Sensors and Actuators B 264: 67–75 Tahun: 2018	Table Sugar Derived Carbon Dot – A Naked Eye Sensor For Toxic Pb ²⁺ Ions	melebihi batas ambang kadar Pb dalam air kelas 2 sesuai peraturan nasional. Cdots disintesis dari gula dan amonia encer yang diiradiasi gelombang mikro pada suhu 120° C. Larutan Cdots yang diperoleh menunjukkan pendaran berwarna biru dengan LoD deteksi ion Pb sebesar 14 ppb (67 uM).	(Ansi and Renuka, 2018)
4	Yang Chen , Huijing Cui , Mao Wang , Xudong Yang , Shujie Pang	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 638: 128164 Tahun: 2022	N And S Doped Carbon Dots As Novel Probes With Fluorescence Enhancement For Fast And Sensitive Detection Of Cr(VI)	Cdots disintesis dari bahan baku bahan dasar O-phenylenediamine (OPD) yang dilarutkan dalam air suling dengan pengadukan ultrasonik. Campuran dipanaskan dalam oven pada suhu 200°C selama 6 jam. Cdots diperoleh dengan sentrifugasi larutan pada 8000 rpm selama 15 menit dan filtrasi membran 0,22 µm disertai dengan dialisis selama 48 jam untuk menghilangkan pengotor. Larutan Cdots menunjukkan fluoresensi berwarna kuning dan dibuat menjadi komposit PVA-Cdots untuk mendeteksi logam berat. LOD untuk logam berat Cr(IV) adalah 0,64 µM. Pada penelitian ini tidak dianalisis lama ketahanan film Cdots dalam mendeteksi polutan.	(Yang Chen <i>et al.</i> , 2022)

5	Huang Tang, Yuran Tang, He Zhu, Man Xiao, Mingming Guo	Journal of Molecular Structure 1251: 132034 Tahun: 2022	Nitrogen-Doped Carbon Dots Based On Arginine And Maleic Acid For Fabrication Of PVA Composite Films And Iron Fluorescence Probes	Cdots disintesis dari berbahan L-Arginine (Arg) dan Asam Maleat (MA) yang dipanaskan dalam reaktor microwave pada suhu 220°C selama 2 jam. Larutan yang diperoleh diimobilisasikan pada PVA. Komposit Cdots menunjukkan fluoresensi berwarna biru dengan LoD untuk Fe^{3+} adalah 0,01 μM . Pada penelitian ini tidak dianalisis lama ketahanan material.	(Tang <i>et al.</i> , 2022)
6	Khee Chung Hui, Wei Lun Ang, Nonni Soraya Sambudi	Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry 418: 113411 Tahun: 2021	Nitrogen And Bismuth-Doped Rice Husk- Derived Carbon Quantum Dots For Dye Degradation And Heavy Metal Removal	Cdots disintesis dari bahan baku sekam padi yang dipanaskan dalam oven bersuhu 60°C. Cdots, ethylenediamine (EDA), dan bismut nitrat pentahidrat dikombinasikan dalam metode hidrotermal bersuhu 190°C selama 4 jam. Bi/Cdots digunakan untuk degradasi metilen blue dan Copper. Hasilnya komposit Cdots bisa mendegradasi Metilen blue sebesar 72.16% sedangkan Bi/Cdots bisa mendegradasi sebesar 68.91%. Hasil degradasi untuk copper dengan menggunakan Cdots sebesar 56.23% sedangkan dengan Bi- Cdots sebesar 33.13%. Produk yang dihasilkan pada penelitian ini adalah serbuk yang hanya dapat digunakan satu kali pemakaian.	(Chung Hui, Lun Ang and Soraya Sambudi, 2021)

7	Chaojie Qu, Duobao Zhang, Ran Yang, Jingyu Hu, Lingbo Qu	Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 206: 588–596 Tahun: 2019	Nitrogen and Sulfur Co-Doped Graphene Quantum Dots For The Highly Sensitive And Selective Detection Of Mercury Ion In Living Cells	Cdots disintesis dari bahan baku D- penisilamin dan asam sitrat yang dipanaskan pada suhu 160°C. Setelah didinginkan hingga suhu kamar, NaOH ditambahkan ke dalam larutan dan disentrifugasi pada 10.000 rpm selama 20 menit. Suspensi disaring melalui membran mikroporous 0,22 µm dan di <i>fry-</i> <i>drying</i> selama 48 jam. Padatan yang didapatkan kemudian dilarutkan untuk menjadi Cdots dengan pendaran berwarna biru. Hasil pendeteksian Hg diperoleh LoD sebesar 0,104 uM. Cdots belum dapat digunakan karena LoD masih diatas batas ambang nasional.	(Qu <i>et al.</i> , 2019)
8	Aaron Simpson, R.R. Pandey, Charles C. Chusuei, Kartik Ghosh, Rishi Patel, Adam K. Wanekaya	Carbon 127: 122- 130 Tahun: 2018	Fabrication, Characterization And Potential Applications Of Carbon Nanoparticles In The Detection Of Heavy Metal Ions In Aqueous Media	Cdots disintesis dari bahan gliserol dan asam fosfat yang dipanaskan pada suhu 250°C selama 4 jam. Larutan Cdots yang dihasilkan menunjukkan pendaran berwarna biru muda dengan nilai LoD untuk deteksi logam Pb dan Cu masing-masing 300 ppb dan 500 ppb.	(Simpson <i>et al.</i> , 2018)

9	J. Plácido, S. Bustamante López, K.E. Meissner, D.E. Kelly, S.L. Kelly	Science of the Total Environment 688: 751–761 Tahun: 2019	Multivariate Analysis Of Biochar-Derived Carbonaceous Nanomaterials For Detection Of Heavy Metal Ions In Aqueous Systems	Cdots yang diproduksi dari kotoran sapi perah, jerami padi dan biochar jerami sorgum untuk mendeteksi timbal (Pb^{2+}), nikel (Ni^{2+}), tembaga (Cu^{2+}) dan merkuri (Hg^{2+}). Polimerisasi bahan dilakukan pada suhu 120 °C selama 1 jam 15 psi dalam autoklaf dilanjutkan dengan isentrifugasi pada 5000 rpm selama 20 menit. LoD yang diperoleh untuk deteksi logam Cu adalah 0,55 uM, logam Pb adalah 50 uM, logam Ni adalah 2 uM dan Hg adalah 8,5 uM. LoD yang diperoleh tersebut masih melebihi batas ambang nasional.	(Plácido, Bustamante López, <i>et al.</i> , 2019)
10	Ismira Wahyu Lestari Lewa & Isnaeni Isnaeni	Journal of Nanoparticle Research, 22 (9) :252 Tahun: 2020	Enhancing Sensitivity Of Carbon Dots As Fe Ion Sensor Using Time-Resolved Photoluminescence Technique	Cdots disintesis dari bahan Asam sitrat dan urea yang dipanaskan dalam microwave 450 W selama 20 menit. Larutan Cdots menunjukkan pendaran berwarna hijau dan digunakan untuk mendeteksi Fe. Hasil LoD yang didapat yaitu 0,23 nM.	(Lewa and Isnaeni, 2020)
11	Amir Amiri, Farnoush Faridbod , Sheida Zoughi	Journal of Photochemistry & Photobiology A:	An Optical Nanosensor Fabricated By Carbon Dots	Cdots disintesis dari asam sitrat yang dipanaskan pada suhu 180 °C. Aminopropyltriethoxysilane ditambahkan ke Cdots sambil homogenisasi pada suhu 35 °C	(Amiri, Faridbod and Zoughi, 2021)

	Chemistry 408: 113111	Embedded In Silica Molecularly Imprinted Polymer For Sensitive Detection Of Ceftazidime Antibiotic	selama 30 menit. Ceftazidime dilarutkan dalam etanol anhidrat dan TEOS ditambahkan hingga terbentuk komposit. Larutan komposit menunjukkan pendaran warna biru dengan LoD untuk deteksi Ceftazidime sebesar 0,06 uM.	
	Tahun: 2021			
12	Yingying Hu, Rentian Guan, Shuai Zhang, Xiaoyu Fan, Wenjing Liu, Keying Zhang, Xiaodong Shao, Xia Li, Qiaoli Yue	Food Chemistry 372: 131287 Tahun: 2022	A Convenient Fluorescence Sensor Of Tetrasiklin Based On B, N Codoped Carbon Dots/Polymer Composite Film	Deteksi antibiotik Tetrasiklin berhasil dilakukan dengan film tipis yang terbuat dari asam sitrat, asam 3-aminofenilboronat dan polyvinyl alcohol (PVA). LoD untuk Tertrasiklin sekitar 0,17 µM. Film tipis Cdots menunjukkan pendaran berwarna biru terang, namun tidak dianalisis lama waktu film Cdots mempertahankan karakteristik optiknya setelah dilakukan aplikasi deteksi antibiotik. (Hu <i>et al.</i> , 2022)
13	Qinghe Que, Yonglei Xing, Zuoli He, Yawei Yang, Xingtian Yin, Wenxiu Que	Materials Letters 209: 220–223 Tahun: 2017	Bi ₂ O ₃ /Carbon Quantum Dots Heterostructured Photocatalysts With Enhanced Photocatalytic Activity	Remediasi Rodamin-B dengan menggunakan material Bi ₂ O ₃ /Cdots. Komposit disintesis dengan metode hidrotermal bersuhu 180 °C selama 24 jam. Efisiensi degradasi Rodamin B tertinggi sebesar 92.5% dalam waktu 60 menit. Belum diketahui dapat digunakan berapa kali atau analisis jumlah siklus degradasi. (Que <i>et al.</i> , 2017)

14	Shelja Sharma, S.K. Mehta, A.O. Ibhaddon, S.K. Kansal	Journal of Colloid and Interface Science 533: 227– 237 Tahun: 2019	Fabrication Of Novel Carbon Quantum Dots Modified Bismuth Oxide ($\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{C}$ - Dots): Material Properties And Catalytic Applications	Remediasi pewarna indigo carmine (IC) dengan menggunakan $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{C}$ -dots. Bahan baku untuk membuat Cdots adalah asam askorbat dan asam sitrat. Campuran reaksi diberi perlakuan ultrasonik selama satu jam. Larutan disaring dan dipanaskan dalam oven untuk menjadi serbuk kering. Hasil efisiensi untuk degradasi Indigo Carmine sebesar 86% pada cahaya tampak dalam waktu 120 menit. Material fotokatalis yang dihasilkan dalam bentuk serbuk yang hanya dapat digunakan satu kali.	(Sharma <i>et al.</i> , 2019)
15	Tao Xian, Xiaofeng Sun, Lijing Di, Yongjie Zhou, Jun Ma, Hongqin Li, Hua Yang	Catalysts 9: 1031 Tahun: 2019	Carbon Quantum Dots (Cqds) Decorated Bi_2O_3 - X Hybrid Photocatalysts With Promising NIR-Light-Driven Photodegradation Activity For AO7	Remediasi Oranye asam 7 dengan menggunakan komposit Cdots/ $\text{Bi}_2\text{O}_{3-x}$. Cdots telah berhasil didopingkan pada Bi_2O_3 melalui serangkaian metode hidrotermal. Bahan yang digunakan untuk membuat Cdots adalah Glukosa. Hasil efisiensi untuk degradasi AO7 mencapai 97% pada cahaya NIR dalam 60 menit.	(Xian <i>et al.</i> , 2019)
16	Chengli Tang, Limei Zhang	Chemical Physics Letters 739: 137025	GQD/ Bi_2O_3 Composite For	Komposit dibuat dengan menggunakan metode hidrotermal yang dipanaskan pada suhu 150 °C selama 4 jam dan dikeringkan	(Tang and Zhang, 2019)

		Tahun: 2020	High-Efficient Photocatalysts	dalam oven vakum pada suhu 80 °C untuk serbuk GQDs/Bi ₂ O ₃ . Bahan yang digunakan untuk membuat GQD adalah H ₂ SO ₄ and HNO ₃ . Hasil degradasi menunjukkan komposit GQD/Bi ₂ O ₃ bisa mendegradasi Rhb dengan efisiensi degradasi sebesar 91% dalam waktu 90 menit di bawah paparan cahaya tampak.	
17	Vasanthakumar V, Murad Alsawalha, Thamer Alomayri, Saud Allehyani, Yi-bo Hu, Ming-Lai Fu, Baoling Yuan	Chemosphere 306: 135505 Tahun: 2022	MWCNT Supported V ₂ O ₅ Quantum Dot Nanoparticles Decorated Bi ₂ O ₃ Nanosheets Hybrid System: Efficient Visible Light Driven Photocatalyst For Degradation Of Ciprofloxacin	Remediasi ciprofloxacin dengan menggunakan Bi ₂ O ₃ -V ₂ O ₅ -MWCNT yang disintesis dengan metode impregnasi basah sederhana. Bahan yang digunakan adalah H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , MWCNTs dan V ₂ O ₅ QDs. Komposit menunjukkan celah pita energi optimal sebesar 2,46 eV. Efisiensi fotokatalis ciprofloxacin sebesar 96% dalam waktu 120 menit. Uji fotokatalitik menunjukkan bahwa komposit hibrid menunjukkan peningkatan aktivitas fotokatalitik dalam degradasi CIP dibandingkan dengan fotokatalis murni. Efisiensi degradasi tidak menunjukkan penurunan secara signifikan setelah lima percobaan siklik.	(V <i>et al.</i> , 2022)

18	Chinnu R Thara, Binila K. Korah, Sneha Mathew, Bony K. John, Beena Mathew	Environmental Research 216: 114450 Tahun: 2023	Dual Mode Detection And Sunlight-Driven Photocatalytic Degradation Of Tetrasiklin With Tailor-Made N-Doped Carbon Dots	Cdots disintesis dengan metode pirolisis gelombang mikro dari bahan baku urea dan glukosa. Cdots menghasilkan fluorensensi berwarna biru dan efektif untuk sensor tetrasiklin. Cdots juga dapat mendegradasi tetrasiklin secara menyeluruh (>95%) dalam waktu 10 menit tanpa adanya bahan tambahan bahan lain.	(R Thara <i>et al.</i> , 2023)
19	Weilong Shi , Shuang Yang , Haoran Sun , Jingbo Wang, Xue Lin, Feng Guo, and Junyou Shi	Journal of Materials Science 56 (3): 2226-2240 Tahun: 2021	Carbon Dots Anchored High-Crystalline G-C ₃ N ₄ As A Metal-Free Composite Photocatalyst For Boosted Photocatalytic Degradation Of Tetrasiklin Under Visible Light	Komposit Cdots/g-C ₃ N ₄ berhasil dibuat melalui metode kalsinasi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa komposit dapat mendegradasi fotokatalitik TC hingga 86% dalam waktu 120 menit di bawah iradiasi cahaya tampak.. Komposit juga menunjukkan fotostabilitas yang sangat baik dan tidak ada penurunan efisiensi setelah 4 siklus reaksi dalam waktu 480 menit.	(Shi <i>et al.</i> , 2021)
20	Bing Xiao, Minghao Xu, Bin Lu, Yun	J. Phys. Chem. Solids. 163: 110583	In-Situ Preparation Of Cu-Biocl/Bi ₂ O ₃ -Cdots Composite And	C-dots dari asam sitrat dan etilendiamin disintesis dengan metode hidrotermal pada 150 °C selama 5 jam. Setelah didinginkan hingga suhu kamar, sampel disentrifugasi	(Xiao <i>et al.</i> , 2022)

Wang, Hui Liu, Rufen Chen College	Tahun: 2022	Excellent Performance For Photocatalytic Bisphenol A Degradation	pada kecepatan 4000 rpm selama 10 menit. Cdots ditambahkan pada BiOCl/Bi ₂ O ₃ untuk membentuk komposit heterojungsi. Komposit menunjukkan kinerja fotokatalitik yang sangat baik dengan efisiensi degradasi bisphenol-a (BPA) mencapai 91% dalam waktu 35 menit di bawah iradiasi lampu xenon.
---	-------------	--	--

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian disertasi ini adalah mengkaji pemanfaatan material fluoresensi Cdots multiwarna dari biomassa untuk pengelolaan polutan pada air limbah.

1. Mengkaji dan menentukan karakteristik karbon dots berfluoresensi multiwarna yang disintesis melalui solvotermal dari limbah biomassa kulit pisang kepok, meliputi: karakteristik fisik, distribusi ukuran partikel, kestabilan koloid, keadaan permukaan, dan karakteristik optik.
2. Mengkaji dan mengevaluasi kemampuan deteksi polutan transparan pada air limbah farmasi, seperti logam berat dan antibiotik, berdasarkan perubahan intensitas fluoresensi karbon dots multiwarna, dengan fokus pada aspek perbedaan selektivitas dan sensitivitas terhadap masing-masing jenis polutan.
3. Mendapatkan formulasi komposisi yang optimal dalam pengembangan film padat fluoresen berbasis karbon dots multiwarna melalui imobilisasi pada matriks, mengkaji karakteristik mekanik, karakteristik optik, dan ketahanan fotostabilitas, serta menganalisis performa film dalam mendeteksi polutan transparan pada air limbah farmasi (logam berat dan antibiotik) berdasarkan perbedaan selektivitas dan sensitivitas.
4. Mendapatkan formulasi sintesis yang optimal dan mengkaji karakteristik komposit bismut karbon dots ($\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Cdots}$) sebagai kandidat material

fotokatalis meliputi: karakteristik optik, kristalinitas, kestabilan termal, karakteristik morfologi, dan karakteristik topografi permukaan.

5. Mengkaji aktivitas fotokatalitik bismut karbon dots dalam proses remediasi polutan pada air limbah farmasi yang disintesis melalui metode presipitasi berbantuan gelombang mikro berdasarkan efisiensi dan laju fotodegradasi antibiotik, serta efisiensi dan laju fotodegradasi senyawa organik.
6. Menganalisis kinerja film fotokatalis terapan berbasis bismut karbon dots dalam remediasi polutan pada air limbah farmasi, meliputi efisiensi dan laju fotodegradasi antibiotik, durabilitas pemakaian ulang film fotokatalis, serta mengkaji perubahan karakteristik air limbah farmasi artifisial berdasarkan pengujian fisika, pengujian kimia, dan pengujian mikrobiologi sebelum dan sesudah proses fotodegradasi.
7. Menentukan potensi aplikasi teknologi deteksi yang memanfaatkan sifat fluoresensi dan aplikasi teknologi remediasi yang memanfaatkan aktivitas fotokatalitik serta dampak lingkungan yang dapat ditimbulkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat kepada berbagai pihak, yaitu :

1. Bagi Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini dapat memberikan suatu referensi ilmiah tentang teknologi deteksi multipolutan yang sederhana dan akurat. Penelitian ini dapat memberikan suatu referensi ilmiah mengenai teknologi remediasi berbasis

fotokatalis Cdots untuk pengolahan air limbah farmasi yang efektif, berkelanjutan, dan ekonomis. Penelitian ini dapat memberikan informasi tentang pemanfaatan limbah organik di pasaran untuk menjadi material fluoresensi yang dapat dimanfaatkan sebagai detektor dan remediator suatu polutan.

2. Bagi Industri dan Fasilitas Kesehatan

Teknologi deteksi pada penelitian ini dapat dijadikan sebagai alternatif untuk mengontrol kualitas air limbah khususnya untuk analisis kandungan logam berat dan antibiotik di outlet saluran IPAL pada industri farmasi dan berbagai fasilitas kesehatan. Teknologi remediasi pada penelitian ini dapat dijadikan sebagai alternatif untuk memperbaiki kualitas air limbah industri farmasi agar bersesuaian dengan baku mutu air limbah yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.

3. Bagi Pemerintah

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam perumusan kebijakan terhadap penanganan limbah farmasi khususnya jenis dan kadar antibiotik yang diizinkan. Penelitian ini dapat menjadi alternatif untuk diterapkan pada beberapa perairan yang terindikasi tercemar oleh logam berat dan antibiotik. Instansi pemerintah terkait pada penerapan tersebut diantaranya Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, serta Kementerian Perindustrian, Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan tingkat Kabupaten maupun Provinsi.

4. Bagi Masyarakat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai bahaya cemaran logam berat dan antibiotik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi dalam pengelolaan air limbah farmasi dengan teknologi yang mudah, efektif, dan ekonomis.



SEKOLAH PASCASARJANA