

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gambaran Lokasi Penelitian**

Kota Pekalongan yang lebih dikenal sebagai Kota Batik memiliki ciri khas seni tradisional membatik kain dengan motif unik dan warna –warni (*Baihaqi et al.*, 2024). Berdasarkan data DLH Kota Pekalongan sebagaimana lampiran I, sebaran industri kecil menengah batik tahun 2023 di Kota Pekalongan sebanyak 2.177 unit. Kecamatan Pekalongan Selatan memiliki sebaran pengrajin terbanyak dibandingkan kecamatan yang lain yaitu sebanyak 792 unit dengan total debit air limbah yang dihasilkan diperkirakan mencapai 1000 m<sup>3</sup>/hari. Sayangnya debit air limbah yang dihasilkan tersebut tidak diimbangi dengan pengolahan air limbah yang baik, sehingga menimbulkan masalah pencemaran badan air permukaan.

Pemerintah Kota Pekalongan, telah berupaya untuk melakukan pengendalian pencemaran yang bersumber dari buangan air limbah batik melalui fasilitasi IPAL Komunal Jenggot Kecamatan Pekalongan Selatan Kota Pekalongan pada tahun 2004. IPAL tersebut dibangun dengan kapasitas desain 400 m<sup>3</sup>/hari dengan unit proses meliputi equalisasi–anaerob–wetland–outlet–outfall (Sungai Setu). Seiring berjalannya waktu, IPAL komunal Jenggot mengalami penurunan kapasitas pengolahan menjadi 150 m<sup>3</sup>/hari akibat sedimentasi dan *clogging*. Memperhatikan bahwa kapasitas IPAL sudah tidak mampu lagi mengolah seluruh debit air limbah yang dihasilkan, maka diperlukan strategi baru dalam penanganan buangan air limbah batik industri kecil menengah (Fajar dkk., 2019).

#### **2.2 Dampak Buangan Air Limbah terhadap Ekosistem Akuatik**

Ekosistem akuatik merupakan indikator pencemaran air, yang diakibatkan oleh berbagai aktivitas antropogenik seperti industrialisasi, aktivitas pertanian dan urbanisasi. Penggunaan berbagai bahan kimia dalam proses produksi batik yang ada dalam air limbah yang tidak terkelola yang mengalir menuju badan air akan

mengancam ekosistem perairan dan selanjutnya mengakibatkan degradasi kualitas sedimen akuatik. Efek pencemaran pada sedimen dapat dievaluasi dengan “tingkat pencemaran”. Sedimen akuatik adalah sumber utama nutrisi penting bagi ekosistem.

Kondisi lingkungan biologi secara alami adalah hasil dari pengaruh berbagai parameter lingkungan terhadap kelangsungan hidup organisme di dalamnya. Perubahan dalam ekosistem atau keanekaragaman plankton dan bentos bisa dijadikan indikator untuk menilai kondisi lingkungan perairan. Komunitas plankton mencerminkan kondisi di dalam badan air, sementara komunitas bentos menggambarkan keadaan dasar perairan. Secara umum, keanekaragaman hayati yang tinggi biasanya ditemukan di lingkungan dengan kondisi fisik dan kimia yang optimal, di mana perubahan yang terjadi akibat faktor lingkungan masih berada dalam batas toleransi makhluk hidup dalam ekosistem tersebut. Masuknya zat pencemar sepanjang aliran sungai berpotensi menyebabkan kematian atau kepunahan beberapa jenis fitoplankton dan zooplankton (Suriadarma, 2010). Dampak buangan air limbah batik terhadap zooplankton kecil akan menyebabkan malformasi telur, pengurangan kopulasi (proses perkawinan), pelepasan hemolimfa (cairan tubuh), serta menyebabkan pembesaran insang utama, kekurangan ion, dan degenerasi hati (Dutta *et al.*, 2024). Sifat bentos yang sesil, atau dengan mobilitas yang rendah maka kesamaan jenis antar komunitas (stasiun) hanya dapat terjadi bilamana kondisi lingkungan sesuai atau paling tidak berada pada batas toleransi perubahan lingkungan (Suriadarma, 2010).

### **2.3 Teknologi *Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs)***

Selama lebih dari tiga dekade terakhir, para peneliti telah banyak mengembangkan teknologi yang lebih efektif untuk menghilangkan polutan organik persisten dalam air limbah (Jiang *et al.*, 2023). Teknologi *Advanced Oxidation Processes (AOPs)* merupakan salah satu alternatif teknologi yang menjanjikan untuk mendegradasi polutan dalam air limbah (Deng *et al.*, 2020). *AOPs* memberikan beberapa kelebihan antara lain efisiensi degradasi yang tinggi, kecepatan oksidasi yang cepat, dan tidak menimbulkan produk samping (Nordin *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021). *AOPs* dapat mereduksi senyawa toksik, dan dapat

mereduksi bau dan warna (Ribeiro & Nunes, 2021). Salah satu teknologi *AOPs* adalah *Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs)* yang menggunakan metode berbasis elektrokimia dengan membentuk oksidator kuat (radikal OH) sehingga mampu memecah polutan organik yang ada dalam air limbah.

Pemecahan polutan dengan teknologi *EAOPs* terjadi melalui oksidasi secara langsung dan tidak langsung. Pada oksidasi tidak langsung, peran elektrolit sangat dominan. Garam NaCl banyak digunakan sebagai spesies elektrolit dimana konsentrasi ion *chlorida* (Cl<sup>-</sup>) akan dioksidasi menjadi klorin aktif melalui mekanisme reaksi sebagai berikut :



### 2.3.1. Metode *EAOPs* dengan *Anodic Oxidation*

*Anoxic Oxidation (AO)* merupakan teknologi yang sering digunakan yang efisien digunakan untuk degradasi polutan organik melalui metode elektrokimia. Mekanismenya meliputi oksidasi langsung dan tidak langsung. Oksidasi langsung mengacu pada oksidasi bahan organik pada permukaan anoda melalui perpindahan elektron secara langsung, sedangkan oksidasi tidak langsung biasanya melibatkan remediasi polutan oleh radikal OH yang dihasilkan oleh adsorpsi fisik anoda atau pembangkitan elektrokimia (Hu et al., 2021). Penelitian terbaru menunjukkan adanya klorin aktif, radikal klorin, persulfat dan sulfat radikal secara signifikan meningkatkan efisiensi proses *Anodic Oxidation* dalam mendegradasi polutan organik (Karim et al., 2021; Zhang et al., 2021). Pemilihan bahan anoda juga mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi degradasi dan kinerja *Anodic Oxidation*. PbO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> dan oksida berbasis titanium dianggap sebagai bahan elektroda yang menjanjikan (Hu et al., 2021).

### 2.3.2. Metode *EAOPs* dengan Elektro Fenton

Dalam metode *EAOPs* dengan elektro fenton, Fe<sup>2+</sup> digunakan sebagai katalis dioksidasi menjadi Fe<sup>3+</sup> melalui reaksi dengan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> yang dihasilkan secara

elektrogenerasi. Reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dalam kondisi asam mempercepat reaksi keseluruhan (Nidheesh *et al.*, 2023).



Berbagai bahan berbasis karbon (seperti gas elektroda difusi, grafit, kain kempa karbon, tabung nano karbon, karbon / *polytetrafluoroethylene* dan material dop) sebagai katoda atau katalis juga dapat secara efektif mendorong pembentukan  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Qu & Liang, 2022). Katoda dengan bahan grafit yang dimodifikasi karbon hitam akan meningkatkan laju degradasi 2,4-D sebanyak 8 kali lipat dan memperoleh efisiensi arus yang tinggi (53%) dan konsumsi energi yang rendah (71,8 kWh kg<sup>-1</sup> TOC) (Cai *et al.*, 2020).

### 2.3.3. Metode *EAOPs* dengan *Peroxi-coagulation*, *Electro-peroxone*, *Photo-electro catalyst* dan *Electro-membrane*

Teknologi *EAOPs* yang berkembang pesat selama beberapa tahun terakhir antara lain *peroxi-coagulation*, *electro-peroxone*, *photoelectrocatalyst* dan *electro membrane* (Jiang *et al.*, 2023). Metode *peroxi-coagulation* menggunakan besi sebagai anoda *sacrificial* dalam proses *electro fenton* dan mengakibatkan koagulasi (Nordin *et al.*, 2020). *Electro-peroxone* merupakan proses elektrokimia menggunakan  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  sistem (Brillas & Garcia-Segura, 2020).  $\text{H}_2\text{O}_2$  terbentuk pada katoda dan bereaksi dengan  $\text{O}_3$  membentuk radikal OH (Asgari *et al.*, 2021). Ozon juga dapat menghasilkan radikal OH melalui reduksi elektron (Ghanbari *et al.*, 2020). Teknologi *EAOPs-membrane* menggunakan proses dua tahap maupun satu tahap yang mana *EAOPs* dan separasi membran dirancang dalam dua unit terpisah atau digabung dalam satu unit (Wang *et al.*, 2021). Proses ini akan menggabungkan degradasi senyawa organik dan fungsi antifouling pada proses *EAOPs* dengan filtrasi membran (Wei *et al.*, 2020). Metode *EAOPs photoelectrocatalyst* menggunakan cahaya untuk mengaktifkan katalis seperti semi konduktor ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnO}$  dsb), semikonduktor sulfida ( $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MoS}_2$  dsb) dan organik polimer ( $\text{C}_3\text{N}_4$ , polianilin, polipirol dsb) untuk membangkitkan

*Reactive Oxygen Species* (ROS) dalam degradasi senyawa organik (Lozano *et al.*, 2022).

Dalam *review*nya Jiang *et al.* (Jiang *et al.*, 2023), menyimpulkan bahwa pengembangan teknologi *EAOPs* selanjutnya agar lebih difokuskan pada hal-hal sebagai berikut:

1. Mengkombinasikan *EAOPs* dengan teknologi pengolahan air limbah yang lain,
2. Mensintesis katalis dengan aktivitas katalitik tinggi dan ramah lingkungan (seperti katalis berbahan dasar karbon) untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja pengolahan air limbah,
3. Mencari bahan elektroda *EAOPs* dari segi efektivitas, stabilitas dan kelayakan ekonomi.
4. Mengurangi konsumsi energi dan biaya pengolahan limbah melalui eksplorasi dan perbaikan jenis *EAOPs*, jenis polutan, desain reaktor dan parameter ekonomi,
5. Mengevaluasi dan meminimalkan toksisitas produk sampingan reaksi, mengeksplorasi sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan sebagai sumber daya pada teknologi *EAOPs*, dan meningkatkan keberlanjutan teknologi *EAOPs* untuk penerapan pengolahan air limbah skala besar.

#### **2.4 Elektroda Oksida Logam**

Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) merupakan semikonduktor oksida yang banyak digunakan sebagai fotokatalis. Titanium dioksida terdapat ada dalam 3 bentuk kristal polimorfik yaitu fase dengan luas permukaan tinggi (brookite), fase tetragonal yang lebih stabil secara termodinamika (rutile), dan fase tetragonal yang stabil (anatase) (Ramaripa *et al.*, 2024).  $\text{TiO}_2$  sebagai semikonduktor, banyak diaplikasikan karena mempunyai kelebihan yaitu memiliki kestabilan termal dan kimia yang tinggi, mampu menyerap cahaya, bersifat inert secara biologis dan kimia, tidak beracun, stabil terhadap korosi oleh bahan kimia, dan relatif murah (Utami *et al.*, 2023). Fotokatalis  $\text{TiO}_2$  mempunyai nilai band gap yang tinggi (3,2 eV untuk fase anatase dan 3,0 eV untuk fase rutile), sehingga tidak cocok untuk digunakan di bawah sinar matahari. Selain itu,  $\text{TiO}_2$  memiliki efisiensi

fotokatalitik yang rendah karena pasangan lubang elektron yang difotogenerasi akan bergabung kembali dengan mudah sebelum berpindah ke permukaan fotokatalis (Ida *et al.*, 2022). Kelemahan ini dapat diatasi melalui modifikasi menggunakan pelapis logam atau nonlogam. Namun, pelapis logam sering kali menghasilkan efisiensi yang kurang baik karena rekombinasi yang dihasilkan adalah di bawah pita konduksi minimum. Sedangkan pelapis nonlogam telah menunjukkan aktivitas fotokatalis yang diinginkan (Natarajan *et al.*, 2021). Penelitian yang dilakukan oleh Mukimin *et al.* (2022), telah menginvestigasi reduksi parameter amonia yang signifikan pada air limbah tekstil dengan teknologi *EAOPs* menggunakan anoda Ti/RuO<sub>2</sub> dan katoda tembaga. Amonia sebagai salah satu parameter karakteristik air limbah tekstil dapat dihilangkan secara efektif menggunakan metode elektrokimia. Garam klorida teroksidasi dengan mudah oleh elektroda Ti/RuO<sub>2</sub>, membentuk asam hipoklorit yang kemudian bereaksi dengan amonia untuk menghasilkan gas nitrogen. Laju pengurangan amonia dipengaruhi oleh kandungan garam, durasi pemrosesan, dan tegangan listrik. Pengurangan konsentrasi NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dan NO<sub>2</sub><sup>-</sup> mencapai tingkat sempurna (100%) pada kondisi operasi dengan konsentrasi garam 2000 mg/L, tegangan 7 V, dan waktu pemrosesan 30 menit. Laju penghilangan amonia mengikuti reaksi orde 1 dengan k sebesar 0,1679 dan R<sup>2</sup> sebesar 0,9369. Jalur transformasi nitrogen ini berbeda dari proses biologis yang biasanya melibatkan mikroorganisme.

## 2.5 Elektroda Karbon.

Elektroda berbasis karbon memiliki konduktivitas yang baik, luas permukaan spesifik yang tinggi, kemampuan adsorpsi yang sangat baik, serta sifat katalitik dan listrik yang unggul (Jiang *et al.*, 2021). Elektroda karbon merupakan struktur berlapis-lapis yang terdiri dari lapisan katalitik, lapisan pengumpul arus dan lapisan difusi gas, yang dibentuk melalui metode pengepresan gulungan atau metode pengecatan (Cai *et al.*, 2023).

Bahan lapisan katalitik dapat diklasifikasikan menjadi karbon tunggal dan bahan karbon termodifikasi (Zhang *et al.*, 2023). Bahan karbon dapat diklasifikasikan menjadi non-logam dan katalis logam sesuai dengan sifat zat

dopan pada saat modifikasi. Sebaliknya, logam katalis dapat diklasifikasikan menjadi logam mulia dan non mulia katalis. Bahan karbon monolitik sering digunakan dalam lapisan katalitik antara lain karbon hitam, grapheme, tabung nano karbon, dll (Shi *et al.*, 2024). Material-material tersebut mempunyai potensi relatif stabil dan memiliki konduktivitas elektron yang baik, kaya akan pori dengan ukuran berbeda dan memiliki luas permukaan spesifik yang besar, sehingga dapat meningkatkan laju transfer elektron secara efektif dan meningkatkan efek katalitik dalam sintesis hidrogen peroksida (Arici *et al.*, 2019). Semakin tinggi derajat grafitisasi karbon, akan semakin baik konduktivitas listriknya dan semakin baik pula aktivitas katalitiknya dalam mereduksi oksigen (Ren *et al.*, 2024).

## 2.6 Elektroda Tempurung Kelapa.

Elektroda tempurung kelapa yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Mukimin, *et al.* (2019) dan Yanti, *et al.* (2024). Penelitian tersebut telah berhasil mensintesis grafit nanosheet berpori dari tempurug kelapa melalui dua tahapan yaitu:

- 1) Pembuatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa (*Coconut Shell Activated Carbon /CSAC*).

Langkah pertama, 100 gram arang tempurung kelapa (CSC) dihancurkan menggunakan blender, kemudian digiling dengan ball mill, dan disaring menggunakan ayakan 100 mesh untuk memperoleh bubuk tempurung kelapa halus. Setelah itu, 50 gram bubuk halus tersebut dicampur dengan 250 mL larutan NaOH 0,5 M, diaduk menggunakan pengaduk magnetik pada pelat panas dengan suhu 80°C selama 2 jam, lalu dibiarkan pada suhu kamar selama 24 jam. Campuran ini dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 12 jam. Proses selanjutnya adalah aktivasi termal karbon dalam tungku tabung pada suhu 900°C di bawah atmosfer nitrogen selama 1 jam. Setelah aktivasi selesai, karbon didinginkan dalam tungku semalaman dengan aliran gas nitrogen yang terus menerus. Pada hari berikutnya, karbon dicuci menggunakan air suling hingga mencapai pH netral dan dikeringkan kembali

dalam oven listrik pada suhu 110°C selama 12 jam, menghasilkan produk akhir berupa CSAC.

- 2) Pembuatan karbon aktif mirip grafit dari tempurung kelapa (*Coconut Shell Graphitic-Like Activated Carbon / CSGAC*).

Sebanyak 8 gram bubuk halus CSAC dimasukkan ke dalam 50 mL larutan  $\text{FeCl}_3$  3 M dan diaduk perlahan menggunakan pengaduk magnetik pada pelat panas bersuhu 80°C selama 2 jam. Setelah itu, campuran karbon dan  $\text{FeCl}_3$  dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam. Proses berikutnya adalah grafitisasi, di mana campuran karbon ditempatkan dalam tungku tabung pada suhu 900°C di bawah atmosfer nitrogen dengan tekanan 45  $\text{kgf/cm}^2$  selama 1 jam. Setelah proses ini selesai, karbon dibiarkan mendingin semalaman dalam tungku sambil tetap dialiri gas nitrogen. Pada hari berikutnya, karbon yang telah melalui grafitisasi dicuci menggunakan larutan HCl 2 M, lalu dibilas dengan air suling hingga pH mencapai netral (pH 7). Akhirnya, produk dikeringkan dalam oven listrik pada suhu 80°C selama 12 jam, menghasilkan CSGAC sebagai produk akhir.

## 2.7 Komparasi Tekno Ekonomi

Merujuk penelitian sebelumnya bahwa beberapa jenis elektroda telah digunakan untuk pengolahan air limbah batik sebagaimana tabel berikut:

**Tabel 2. Komparasi Tekno Ekonomi**

No.	Pasangan Elektroda	Kondisi Operasi Variabel Optimum	Tekno Ekonomi
1	Anoda = Ti/RuIrO <sub>2</sub> Katoda = stainless steel	Penyisihan COD = 60,8% pada V = 5 V, 120 menit, konsentrasi garam = 4.000 mg/L pH = 5	Kebutuhan listrik = 0,0278 kWh/g
2	Anoda = Ti/RuO <sub>2</sub> Katoda = pipa tembaga	Penyisihan ammonia mencapai 100% pada konsentrasi NaCl = 2000	---

		mg/L, 7 Volt, 30 menit	
3	Anoda = Karbon tempurung kelapa Katoda = Ti	Penyisihan COD = 49% dan 75% pada UV dan tampak	---
4	Anoda = Ti/RuIrO <sub>2</sub> Katoda = Fe	Penyisihan Nitrit mencapai 75% (setelah 60 menit) dan 99,7% (setelah 120 menit) Penyisihan Sulfida mencapai 97 % (setelah 60 menit) dan 99,9% (setelah 90 menit) pada voltase 5 V dan konsentrasi NaCl=500 mg/L	0,452 kWh per 1 gram nitrit yang disisihkan

## 2.8 Riset mapping

Berdasarkan hasil *review* yang telah dilakukan terhadap penelitian menggunakan teknologi *EAOPs* sebelumnya, dapat dilakukan analisis dengan aplikasi *VOS Viewer* sebagai berikut:

Sekolah Pascasarjana

