

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran logam berat di lingkungan perairan menjadi salah satu permasalahan yang menjadi perhatian global karena berdampak langsung terhadap keberlanjutan ekosistem dan kesehatan manusia. Berbeda dengan polutan organik yang umumnya dapat terdegradasi secara alami, logam berat bersifat persisten sehingga mampu bertahan di lingkungan dalam jangka waktu yang lama dan berpotensi mencemari ekosistem perairan secara berkelanjutan [1]. Beberapa logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan nikel (Ni) diketahui memiliki tingkat toksisitas yang tinggi meskipun berada dalam konsentrasi yang rendah. Selain itu, logam berat dapat mengalami bioakumulasi di dalam jaringan organisme serta biomagnifikasi sepanjang rantai makanan, sehingga konsentrasinya dapat meningkat pada tingkat trofik yang lebih tinggi dan akhirnya membahayakan kesehatan manusia melalui konsumsi biota perairan [2]. Paparan jangka panjang logam berat dapat mengganggu berbagai sistem organ pada manusia, termasuk sistem saraf, ginjal, reproduksi, dan kardiovaskular [3]. Oleh karena itu, pencemaran logam berat tidak hanya menjadi isu lingkungan, tetapi juga merupakan tantangan penting dalam bidang kesehatan masyarakat yang memerlukan upaya pengendalian dan teknologi remediasi yang efektif [4].

Di Indonesia, kasus pencemaran logam berat pada lingkungan perairan telah banyak dilaporkan, termasuk di wilayah Bandung. Penelitian pada Sungai Cikapundung menunjukkan adanya kandungan logam berat arsen (As), timbal (Pb), dan kadmium (Cd) pada beberapa lokasi pengambilan sampel [5]. Selain itu, penelitian pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum Hulu juga melaporkan keberadaan Pb dan Cd pada kolom air dan sedimen, dengan konsentrasi Pb berkisar antara 0,01–0,08 mg/L dan Cd sebesar 0,003–0,01 mg/L [9].

Kondisi tersebut menegaskan perlunya upaya remediasi efektif dan berkelanjutan untuk menurunkan kadar logam berat di perairan. Berbagai metode telah dikembangkan, seperti presipitasi kimia, filtrasi membran, elektrodosis, pertukaran ion, dan adsorpsi [6]. Metode presipitasi kimia relatif sederhana, tetapi menghasilkan limbah sekunder berupa lumpur logam yang memerlukan

pengolahan lebih lanjut. Filtrasi membran memiliki efisiensi pemisahan yang tinggi, namun umumnya membutuhkan biaya operasional dan perawatan membran yang cukup besar. Sementara itu, elektrodposisi memerlukan konsumsi energi tinggi dan lebih sesuai diterapkan pada larutan dengan konsentrasi logam tertentu, sedangkan metode pertukaran ion memiliki keterbatasan pada biaya material penukar ion dan proses regenerasi. Di antara berbagai alternatif tersebut, metode adsorpsi dinilai lebih efisien dan ekonomis karena dapat menggunakan material ramah lingkungan, prosesnya sederhana, mudah diaplikasikan, serta memungkinkan regenerasi adsorben [7]. Efektivitas metode adsorpsi sangat bergantung pada jenis material adsorben yang digunakan, sehingga pengembangan bahan baru dengan kapasitas adsorpsi tinggi menjadi hal yang menjadi fokus penting dalam penelitian saat ini.

Salah satu material yang banyak dikembangkan untuk aplikasi adsorpsi adalah hidroksiapatit (HAp), senyawa kalsium fosfat ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) yang memiliki kemampuan pertukaran ion tinggi, biokompatibilitas baik, serta stabilitas kimia yang kuat, dan dapat disintesis dari sumber biogenik seperti tulang ikan, tulang sapi, cangkang telur, atau limbah kerang [8]. Penggunaan sumber biomassa, khususnya tulang sapi, menjadi alternatif yang menarik karena ketersediaannya yang melimpah, biaya bahan baku yang relatif rendah, serta berpotensi mengurangi limbah biomassa melalui penerapan konsep ekonomi sirkular. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa HAp yang disintesis dari limbah cangkang telur mampu mengadsorpsi Pb^{2+} dengan efisiensi mencapai 99,78% pada kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 500 mg/g [9]. Namun, sifat HAp yang rapuh dan kurang stabil secara mekanik membatasi penggunaannya sebagai adsorben tunggal.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, HAp dapat dikombinasikan dengan polivinil alkohol (PVA) yang merupakan polimer sintesis yang bersifat larut dalam air, bersifat biokompatibel, dan memiliki banyak gugus hidroksil ($-\text{OH}$) yang dapat berinteraksi dengan ion logam [10]. PVA dipilih sebagai matriks pendukung karena memiliki kemampuan membentuk film (*film-forming ability*) yang baik, sehingga mampu menghasilkan material komposit dengan struktur yang lebih fleksibel, mudah dibentuk, serta meningkatkan kestabilan fisik HAp yang bersifat rapuh. Kombinasi ini meningkatkan fleksibilitas dan kestabilan struktur komposit. Namun,

sifat hidrofilik PVA yang tinggi menyebabkan material mudah larut dalam air. Oleh karena itu, modifikasi melalui proses fungsionalisasi atau penambahan komponen lain diperlukan untuk memperkuat kestabilan mekaniknya [11].

Salah satu pendekatan yang menguntungkan adalah menambahkan partikel Fe_3O_4 (*magnetit*) ke dalam sistem komposit. Komponen ini berfungsi meningkatkan performa adsorben melalui pemberian sifat magnetik yang memudahkan pemisahan material dari larutan menggunakan medan magnet eksternal [12]. Kemampuan pemisahan secara magnetik tersebut menjadi keunggulan dalam aplikasi praktis karena dapat mengurangi tahapan proses filtrasi atau sentrifugasi setelah proses adsorpsi, serta berpotensi mendukung proses regenerasi dan penggunaan kembali adsorben. Selain itu, Fe_3O_4 juga memperluas luas permukaan aktif dan memperkuat interaksi antara permukaan adsorben dengan ion logam berat [13]. Dengan demikian, penggabungan ketiga material ini diharapkan memiliki kestabilan mekanik tinggi, kapasitas adsorpsi unggul, serta kemudahan pemisahan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa komposit berbasis PVA, hidroksiapatit (HAp), dan Fe_3O_4 memiliki potensi yang baik sebagai adsorben untuk logam berat Pb(II) dan Cd(II). Wang (2022) melaporkan bahwa komposit berbasis PVA yang mengandung nanopartikel magnetik Fe_3O_4 efektif dalam mengadsorpsi ion logam berat dari larutan sekaligus memberikan sifat magnetik untuk mempermudah pemisahan adsorben [6]. Sementara itu, Le (2019) menunjukkan bahwa penambahan PVA ke HAp dapat meningkatkan porositas dan luas permukaan material, sehingga meningkatkan proses adsorpsi [12]. Sebuah studi oleh Iswara (2025) juga melaporkan bahwa komposit HAp- Fe_3O_4 menunjukkan kemampuan yang sangat baik untuk menghilangkan ion Pb(II) [14]. Lebih lanjut, Xu (2023) menunjukkan bahwa modifikasi struktur HAp dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi untuk Pb(II) dan Cd(II) [14]. Namun, sebagian besar penelitian masih menggunakan adsorben dalam bentuk serbuk yang memiliki keterbatasan dalam proses pemisahan setelah adsorpsi. Oleh karena itu, pengembangan komposit berbentuk film PVA-HAp- Fe_3O_4 menjadi alternatif untuk memperoleh adsorben dengan kemampuan adsorpsi baik, stabilitas mekanik lebih tinggi, dan kemudahan pemisahan melalui sifat magnetik.

Suhu kalsinasi merupakan salah satu parameter yang berperan dalam

menentukan derajat kristalinitas, ukuran partikel, dan struktur morfologi HAp. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat memicu proses sintering yang menyebabkan aglomerasi dan peningkatan ukuran partikel, sehingga menurunkan luas permukaan spesifik material. Perubahan kristalinitas, ukuran kristalit, dan luas permukaan tersebut akan memengaruhi ketersediaan situs aktif pada permukaan HAp serta kemampuan pertukaran ion dengan logam berat. Oleh karena itu, suhu kalsinasi menjadi faktor penting yang dapat menentukan efektivitas interaksi antara adsorben dan ion logam, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi material.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada variasi komposisi atau metode sintesis, sedangkan kajian mengenai pengaruh suhu kalsinasi HAp terhadap karakteristik film komposit PVA-HAp-Fe₃O₄ serta kemampuan adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) masih sangat terbatas. Hingga saat ini, belum banyak penelitian yang secara simultan mengkaji hubungan antara variasi suhu kalsinasi HAp, perubahan karakteristik struktur dan morfologi film komposit PVA-HAp-Fe₃O₄, serta pengaruhnya terhadap kinerja adsorpsi ion Pb(II) dan Cd(II).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada sintesis dan karakterisasi film komposit PVA-HAp-Fe₃O₄ dengan variasi suhu kalsinasi hidroksiapatit, yaitu 700°C, 800°C, 900°C, dan 1000°C untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap karakteristik material dan kemampuan adsorpsi ion Pb(II) dan Cd(II), serta menentukan suhu kalsinasi optimum yang menghasilkan kinerja adsorpsi terbaik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi hidroksiapatit terhadap karakteristik struktur, morfologi, dan sifat permukaan film komposit PVA-HAp-Fe₃O₄ yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi HAp terhadap kemampuan adsorpsi ion logam berat Pb(II) dan Cd(II)?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Bahan yang digunakan dalam sintesis film komposit adalah polivinil alkohol (PVA), hidroksiapatit (HAp) dari tulang sapi, dan Fe_3O_4 (*magnetit*) dengan rasio komposisi tetap berdasarkan literatur acuan.
2. Metode sintesis yang digunakan yaitu metode pencampuran (*blending*) dan pencetakan film (*casting*).
3. Variasi penelitian dibatasi pada suhu kalsinasi HAp sebesar 700°C , 800°C , 900°C , dan 1000°C .
4. Uji karakterisasi yang dilakukan meliputi FTIR (untuk identifikasi gugus fungsi), XRD (untuk analisis struktur kristal), SEM (untuk morfologi permukaan) dan AAS (untuk menentukan konsentrasi unsur logam) serta pengujian sudut kontak.
5. Pengujian kapasitas adsorpsi dilakukan terhadap ion Pb(II) dan Cd(II) dalam larutan sintetis pada kondisi pH, suhu, waktu kontak, dan konsentrasi awal sesuai literatur acuan yang memberikan hasil optimal.
6. Penelitian ini tidak membahas kinetika dan isoterm adsorpsi secara mendalam, melainkan dibatasi pada satu kondisi operasi tetap ($C_0 = 50$ ppm, pH 6, waktu kontak 120 menit). Kajian lebih lanjut mengenai mekanisme adsorpsi, model kinetika, dan karakteristik isoterm adsorpsi dapat menjadi peluang penelitian lanjutan untuk memahami proses adsorpsi secara lebih komprehensif.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang diajukan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi suhu kalsinasi hidroksiapatit terhadap karakteristik struktur, morfologi, dan sifat permukaan film komposit PVA–HAp– Fe_3O_4 yang dihasilkan.
2. Menganalisis pengaruh variasi suhu kalsinasi HAp terhadap kemampuan adsorpsi ion logam berat Pb(II) dan Cd(II) .

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat secara teoritis melalui

penyediaan informasi ilmiah mengenai pengaruh suhu kalsinasi HAp terhadap karakteristik dan kemampuan adsorpsi film komposit PVA–HAp–Fe₃O₄. Secara praktis, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan adsorben berbasis biomaterial untuk pengolahan limbah logam berat. Selain itu, secara teknologi, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan material komposit fungsional yang efektif, stabil, dan berkelanjutan untuk aplikasi lingkungan.

