

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kementerian Kelautan dan Perikanan menargetkan produksi perikanan di tahun 2024 bisa mencapai 30,85 juta ton. Produksi udang tahunan dari hasil akuakultur diharapkan dapat berkontribusi dua juta metrik ton (MT) mulai tahun 2024 sehingga dapat mencapai target produksi (Mallikka, 2023). Target nasional ini menjadi tantangan besar, terutama bagi daerah-daerah yang memiliki kawasan mangrove yang luas dan berpotensi besar untuk mengembangkan tambak-tambak baru. Sayangnya tambak udang atau ikan yang dikonversi dari kawasan mangrove ini sangat umum dijumpai juga berasosiasi dengan tanah sulfat masam.

Tanah Sulfat Masam (TSM) mengacu pada sedimen pantai atau pesisir yang mengandung senyawa pirit atau besi sulfida (FeS_2) yang apabila teroksidasi dapat menyebabkan kemasaman tinggi disertai pelepasan logam toksik seperti aluminium, mangan, arsenik, nikel dan seng (Sukitprapanon et al., 2015; Karimian et al., 2018). Proses oksidasi pirit di tambak air payau dapat dijumpai pada pematang (gundukan tanah di tengah, di sekitar, atau dasar tambak saat persiapan lahan). Proses ini berdampak nyata pada tingkat produktivitas tambak air payau serta dapat mengakibatkan masalah lingkungan di perairan atau ekosistem sekitarnya. Terdapat sekitar 50 juta hektar TSM di seluruh dunia, termasuk di wilayah pedalaman dan pesisir di Asia, Australia, Skandinavia, dan Afrika Barat (Ljung et al., 2009; Karimian et al., 2018; Waddington et al., 2023), dan sekitar 1,5 juta ha di antaranya terdapat di Indonesia (Masulili, 2015). Jika mempertimbangkan keseluruhan asosiasi TSM dengan tanah gambut dan tanah salin, maka total area TSM di Indonesia mencapai 6,7 juta hektar (Mustafa, 2007; Halimatussakdiah et al., 2013).

Oksidasi pirit pada TSM dapat memainkan peran utama dalam mengubah kondisi kimia tambak air payau, melebihi kapasitas penyangga sistem karbonat yang terlarut secara alami dan meningkatkan keasaman secara drastis, memobilisasi besi dan aluminium sebagai spesies terlarut yang beracun, mengikat fosfor, dan menghasilkan endapan besi hidroksida yang menghambat pertumbuhan alga dasar. Proses oksidasi pirit pada TSM di pantai dapat terjadi karena penebangan hutan mangrove, pengangkatan tanah saat konstruksi tambak (pematang, saluran dan dasar tambak) dan pada saat perawatan saluran dan pematang selama kegiatan budidaya udang/ikan; yang mengekspos lapisan pirit ke udara. Reaksi kimia dalam oksidasi pirit sebagian besar dimediasi oleh komunitas mikroba yang membutuhkan konsentrasi oksigen terlarut yang tinggi (Stumm and Morgan, 1981). Pada kondisi masam ini, asam sulfat dari hasil oksidasi dan hidrolisis pirit tersebut menghancurkan mineral liat atau lempung selanjutnya melepaskan Fe, Al dan logam lain ke dalam tanah kemudian dimobilisasi ke air tambak (Shamshuddin et al., 2004). Menurut Dent (1986), pada kondisi asam konsentrasi aluminium tinggi sehingga menghambat pertumbuhan alga atau

fitoplankton akibat defisiensi nutrisi, terutama fosfor. Dalam kondisi seperti ini, pemberian pupuk fosfor tidak akan memberikan hasil yang positif dan kebutuhan kapur untuk menetralkan keasaman tanah sangat tinggi sehingga tidak ekonomis.

Tahapan remediasi disarankan oleh Mustafa dan Sammut (2007) untuk mengantisipasi tingkat keasaman yang tinggi. Tahapan remediasi ini termasuk pengeringan untuk mengurangi pirit yang dapat teroksidasi (potensi keasaman), penggenangan untuk melarutkan asam dan logam beracun, dan pembilasan untuk menghilangkan senyawa beracun dari matriks tanah yang bersifat asam. Pengapuran adalah langkah selanjutnya untuk menetralkan sisa keasaman, sehingga aplikasi ini lebih hemat biaya. Namun, meskipun teknik remediasi tersebut dapat mengurangi keasaman tanah dan konsentrasi logam toksik, tetapi potensi keasaman yang tersisa masih tinggi. Asam dan logam toksik kemudian akan larut ke dalam air tambak. Tekstur dasar tanah liat juga berpotensi melepaskan keasaman dan hasil oksidasi logam secara kontinyu ke dalam air. Konsentrasi aluminium dalam TSM meningkat pada tingkat pH yang lebih rendah (pH 4,0-4,5) (Harrison et al., 2017). Oleh karena itu selain mengurangi potensi keasaman di tanah, diperlukan penanganan lebih lanjut untuk mengurangi konsentrasi logam (terutama Al dan Fe) untuk mencapai standar yang aman untuk kehidupan organisme akuatik di tambak.

Meningkatkan efektivitas pemupukan selama periode budidaya pada tambak TSM, Brinkman (1982) dan Paul dan Alam (2011) merekomendasikan pemanfaatan abu sekam padi kaya kandungan silika untuk meminimalisir fiksasi fosfat. Sekam padi merupakan material yang murah dan mudah didapat karena sawah penghasil padi merupakan penggunaan lahan yang sering berdampingan dengan kawasan tambak air payau. Sekam padi juga masih sering dianggap sebagai limbah pertanian dan penanganan yang tidak tepat dapat menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) (metana dan CO₂) dan polutan lain yang mencemari lingkungan (Baiyeri et al., 2019). Abu sekam padi dapat dengan mudah disebarkan di dasar tambak yang terkena dampak TSM untuk membantu mengikat Al dan Fe secara efektif dalam tanah dan air tambak. Ketika disebarkan ke dasar tambak, silika dalam abu sekam bereaksi dengan ion Al dan Fe aktif, membentuk kompleks yang tidak larut. Oleh karena itu, bahan silika dalam abu sekam berpotensi membatasi keberadaan Fe dan Al aktif dalam tambak TSM, sehingga meningkatkan ketersediaan P dan efektivitas pemupukan. Konsentrasi silikon yang tinggi juga banyak dijumpai pada pupuk organik tertentu yang dapat digunakan untuk menangani masalah TSM (Wang et al., 2018). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Qian et al. (2016), ditemukan bahwa silika yang dilepaskan dari biochar berbahan dasar jerami padi dapat berinteraksi dengan aluminium (Al) aktif di tanah, membentuk senyawa kompleks Al-Si yang stabil. Selanjutnya, silika terbukti juga dapat memobilisasi fasa Fe(III)-P dari permukaan mineral tanah. Hal tersebut dapat terjadi karena silika bersaing dalam proses penyerapan pada permukaan mineral besi (Fe), sehingga menyebabkan destabilisasi senyawa kompleks Fe(III)-P. Interaksi ini memungkinkan pelepasan fosfor (P) yang sebelumnya terikat kuat dengan mineral Fe, sehingga meningkatkan ketersediaannya di dalam tanah dan

membuktikan aplikasi bahan pupuk yang kaya silika sangat potensial untuk mengurangi kandungan Al dan Fe dalam TSM dan yang terlepas ke air (Schaller et al., 2019). Camilleri et al. (2003) juga menyatakan bahwa asam organik dan silika dalam air akan mengurangi toksisitas aluminium dalam kondisi asam lemah. Asam organik bekerja dengan cara membentuk kompleks dengan ion aluminium (Al^{3+}), sehingga mengurangi ketersediaannya dalam bentuk bebas yang bersifat toksik bagi organisme. Sementara itu, silika berperan dengan membentuk senyawa kompleks stabil seperti Al-Si, yang juga menurunkan konsentrasi aluminium aktif dalam air. Mekanisme ini membantu menetralkan dampak negatif aluminium terhadap lingkungan perairan dan tanah masam. Pada kegiatan budidaya ikan/udang di tambak, silika juga dibutuhkan sebagai unsur untuk mendukung pertumbuhan fitoplankton jenis diatom (dinding sel hampir 100% terbuat dari silika) yang merupakan pakan alami yang kaya nutrisi dan tidak menyebabkan penurunan kualitas air (Boyd, 2014). Berdasarkan beberapa hasil penelitian tersebut, aplikasi bahan silika menunjukkan potensi memiliki manfaat ganda dibanding jenis adsorban lainnya.

Dalam beberapa studi telah diperlihatkan potensi aplikasi silika untuk menurunkan konsentrasi ion aluminium dalam air melalui interaksi Al-Si (Exley et al., 1993; Duan dan Gregory, 1996; Elisa et al., 2016; Tarunamulia et al., 2024). Namun informasi terkait proses atau mekanisme kimia-fisika dan kapasitas adsorpsi belum sepenuhnya dikaji. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat efektivitas dan efisiensi nano-biosilika dari sekam padi untuk menurunkan kelarutan aluminium dalam air. Karakterisasi melalui *Fourier Transform Infrared Spectra* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-ray* (EDX), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Surface Area Analyzer* (SSA) akan meningkatkan pemahaman yang mendalam terkait struktur adsorben, morfologi, dan sifat fungsional, serta ukuran pori yang dapat menjadi acuan dalam mengevaluasi dan kemungkinan mengoptimalkan fungsi dari nano-biosilika tersebut. Penelitian ini menggunakan beberapa metode antara lain isoterm kinetik untuk menafsirkan perilaku sistem di bawah berbagai kondisi untuk menguatkan analisis.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. bagaimana hasil sintesis dan karakterisasi nano-biosilika dari abu sekam padi?
2. bagaimana kondisi optimum bagi nano-biosilika berdasarkan pH, waktu kontak, dan konsentrasi aluminium terlarut?
3. bagaimana model isoterm dan kinetika adsorpsi aluminium terlarut oleh nano-biosilika?
4. bagaimana potensi penggunaan nano-biosilika untuk mengurangi aluminium terlarut pada tambak TSM?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. melakukan sintesis dan karakterisasi nano-biosilika dari hasil ekstraksi abu sekam padi
2. menganalisis kondisi optimum nano-biosilika berdasarkan pH, waktu, dan konsentrasi aluminium terlarut
3. menentukan model isoterm dan kinetika adsorpsi aluminium oleh nano-biosilika
4. menganalisis potensi nano-biosilika dalam mengurangi aluminium terlarut pada tambak TSM

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi terkait cara mensintesis nano-biosilika dari hasil ekstrak abu sekam padi yang nantinya dapat dimanfaatkan sebagai agen penurun/pengikat aluminium terlarut pada air tambak tanah sulfat masam (TSM) dan dapat menjadi alternatif solusi efektif yang murah untuk membantu perbaikan kualitas lingkungan tambak TSM yang aman untuk organisme akuatik.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Sekam padi (*Oryza sativa*), natrium hidroksida (NaOH), *aluminium foil*, asam klorida (HCl), amonium asetat ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$), aluminon ($\text{C}_{22}\text{H}_{23}\text{N}_3\text{O}_9$), kalium aluminium sulfat ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), kalium hidroksida (KOH), asam asetat glasial (CH_3COOH), amonia (NH_3), akuades, dan kertas saring *Whattmann* No 42.

2.2 Alat Penelitian

Tanur, tungku pembakaran, oven, cawan porselin, *hot plate*, saringan, corong buchner, *magnetic stirrer*, shaker, botol ekstrak, mortar dan pestle, pH meter, *bulb*, batang pengaduk, spatula, pipet ukur, pipet volume, labu semprot, *centrifuge*, spektrofotometer *Ultra Violet Visible* (UV-Vis) (DS5 UV-Vis), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (Shimadzu, IR Prestige 21), *X-ray diffractometer* (XRD), *Surface Area Analyzer* (SAA) (Altamira, Miceo200), *Scanning Electron Microscope* dan *Energy Dispersive Spectorscopy* (SEM-EDS) (JOEL, JSM-6510 LA), dan serangkaian alat gelas kaca.

2.3 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September–Oktober 2024 di Laboratorium Tanah dan Air Balai Riset Perikanan Budidaya Air Payau dan Penyuluhan Perikanan (BRPBAPPP), Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) yang berlokasi di Kabupateten Maros, Sulawesi Selatan. Pengambilan sampel sekam padi di Desa Mattoangin, Kecamatan Bantimurung, Kabupaten Maros (Peta Lokasi Terlampir), Provinsi Sulawesi Selatan. Peta pengambilan sampel dapat dilihat pada Lampiran 1.

2.4 Prosedur Penelitian

2.4.1 Preparasi Biosilika (Priombodo, 2008)

Sekam padi yang diperoleh dari penggilingan padi dibersihkan dari tanah atau sampah dan bahan anorganik lainnya. Kemudian, sekam padi dicuci dan dikeringkan di bawah sinar matahari selama 6 jam (tergantung cuaca), jika belum maksimal dapat dilanjutkan dengan pengeringan selama 1 jam dalam oven pada suhu 100°C . Sekam padi lalu ditimbang sebanyak 1 kg dan dibakar menggunakan tungku pembakaran (proses pengarangan juga dapat dilakukan dalam tanur pada suhu 400°C selama 30 menit). Setelah dilakukan pembakaran, timbang kembali arang yang didapatkan. Arang yang diperoleh kemudian di masukkan ke dalam tungku pembakaran (atau tanur) selama 1 jam dengan suhu 600°C kemudian didinginkan dan dihaluskan.

2.4.2 Sintesis nano-biosilika (Handayani et al., 2014)

Abu sekam ditimbang 250 g dan ditambahkan larutan 1,5 L NaOH 1 N pada suhu 90-100°C selama 45 menit di atas *hot plate*. Larutan tersebut diaduk agar panas merata dan busa tidak meluap. Kemudian, larutan disaring dan residu dicuci dengan air panas. Setelah uap panas hilang, ditutup dengan *aluminium foil* dan didiamkan selama kurang lebih 24 jam (proses pematangan). Setelah didiamkan, ampas sekam dipisahkan dari ekstraknya menggunakan corong buchner untuk memperoleh filtrat (silika terlarut). Filtrat tersebut kemudian disaring kembali menggunakan kertas saring *Whatman* nomor 42. Setelah itu diteteskan larutan HCl 10-36% untuk memperoleh endapan gel silika dengan pH 7 sambil dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer*. Endapan gel yang didapatkan kemudian disaring dan dicuci dengan air hangat. Setelah itu, hasil saringan gel silika dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100°C selama 8 jam hingga silika memadat. Padatan silika yang diperoleh kemudian digerus menggunakan *mortar* dan *pestle* hingga serbuk halus dan berwarna putih. Rendamen yang diperoleh dari hasil sintesis nano-biosilika dapat ditentukan melalui rumus pada persamaan (1).

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

A = Massa nano-biosilika yang dihasilkan (g)

B = Massa abu sekam padi (g)

2.4.3 Karakterisasi Nano-biosilika

2.4.3.1 Karakterisasi Nano-biosilika menggunakan *Scanning Electron Microscope -Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)*

Material nano-biosilika yang dihasilkan dianalisis morfologi permukaannya dengan pembesaran 10.000 dan 5.000 kali menggunakan instrumen SEM-EDS.

2.4.3.2 Karakterisasi Nano-biosilika menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)*

Material nano-biosilika yang dihasilkan, dianalisis dengan radiasi sinar-X monokromatik dengan panjang gelombang 1,542 Å pada rentang 10–60° (2θ) diukur pada suhu kamar dengan instrument Bruker AXS yang dilengkapi dengan radiasi Cu Kα (λ=1.54 Å) yang beroperasi pada 30 kV dan 15 mA pada 2θ. Ukuran partikel nano-biosilika dapat diperoleh melalui persamaan (2).

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Keterangan:

D = Ukuran partikel (nm)

K = Faktor bentuk dari kristal (0,9)

λ = Panjang gelombang dari sinar-X (1,54178 Å)

β = Nilai FWHM (rad)

θ = Sudut Bragg atau sudut difraksi (setengah dari nilai 2θ)

2.4.3.3 Karakterisasi Nano-biosilika menggunakan *Surface Area Analyzer* (SAA)

Material Nano-biosilika dipreparasi dengan menghilangkan gas-gas yang terperangkap pada permukaannya (*degassing*). Selanjutnya, sampel tersebut dianalisis menggunakan instrumen SAA.

2.4.3.4 Karakterisasi Nano-biosilika menggunakan *Fourier-transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR)

Material nano-biosilika dipreparasi dengan mencampur KBr dengan perbandingan 1:10 hingga merata. Kemudian, campuran tersebut ditempatkan dalam cetakan pelet dan ditekan dengan alat mekanik selama beberapa menit. Pelet kemudian dimasukkan ke dalam plat KBr dan dianalisis menggunakan instrumen FT-IR.

2.4.4 Pembuatan Amonium Asetat ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1 N; pH 4,2

Asam asetat glasial dipipet 60 mL ke dalam gelas kimia dan ditambahkan 250 mL akuades. Setelah itu, ditambahkan 18,75 mL larutan ammonia dan didinginkan. Kemudian, larutan tersebut dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL lalu dihipitkan hingga tanda batas dengan akuades dan dihomogenkan.

2.4.5 Pembuatan Aluminon ($\text{C}_{22}\text{H}_{23}\text{N}_3\text{O}_9$) 0,2%

Aluminon ditimbang sebanyak 0,2 g dan dimasukkan ke dalam gelas kimia. Setelah itu, ditambahkan 100 mL akuades dan dihomogenkan.

2.4.6 Pembuatan Larutan Induk Al^{3+} 100 mg/L

Serbuk $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ditimbang sebanyak 4,3888 g dan dilarutkan dengan akuades dalam gelas kimia. Kemudian, larutan tersebut dimasukkan ke dalam labu ukur 250 mL dan dihipitkan hingga tanda batas dengan akuades.

2.4.7 Pembuatan Larutan Kerja Al^{3+} 10 mg/L

Larutan induk Al^{3+} 100 mg/L dipipet sebanyak 50 mL ke dalam labu ukur 500 mL, kemudian dihipitkan hingga tanda batas menggunakan akuades dan dihomogenkan.

2.4.8 Pembuatan Blanko (Menon, 1973)

Amonium asetat dipipet sebanyak 1 mL ke dalam labu ukur 25 mL kemudian ditambahkan 1 mL aluminon. Setelah itu, dihipitkan dengan akuades hingga tanda batas.

2.4.9 Pembuatan Deret Larutan standar 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 dan 1,2 mg/L (Menon, 1973)

Larutan Al^{3+} 10 mg/L dipipet sebanyak 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 dan 3 mL ke dalam beberapa labu ukur 25 mL, kemudian masing-masing ditambahkan 1 mL amonium

asetat dan 1 mL aluminon. Setelah itu ditambahkan akuades hingga tanda batas dan dihomogenkan. Absorbansi dari deret larutan standar tersebut diukur menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis pada panjang gelombang 520 nm.

2.5 Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi Aluminium oleh nano-biosilika (Kukwa et al., 2020)

Efektivitas adsorpsi ditentukan melalui optimasi yang didasarkan pada beberapa parameter yaitu variasi pH, waktu kontak, dan konsentrasi oleh adsorben nano-biosilika yang telah disintesis dan karakterisasi sebelumnya. Persentase penyisihan Al^{3+} dengan adsorpsi menggunakan nano-biosilika secara numerik dicari dengan menggunakan rumus penyisihan (%E) pada persamaan (3).

$$\%E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \cdot 100 \quad (3)$$

Keterangan:

- E = Efektivitas eliminasi aluminium terlarut oleh Nano-biosilika (%)
- C_o = Konsentrasi awal larutan (mg/L)
- C_f = Konsentrasi akhir larutan (mg/L)

Selain itu, kapasitas adsorpsi nano-biosilika pada kesetimbangan dapat ditentukan melalui persamaan (4).

$$q_e = (C_o - C_e) \times \frac{V}{M} \quad (4)$$

Keterangan:

- q_e = Jumlah aluminium terlarut yang teradsorpsi pada kesetimbangan (mg/g)
- C_o = Konsentrasi awal larutan (mg/L)
- C_e = Konsentrasi pada kesetimbangan larutan (mg/L)
- V = Volume larutan (L)
- m = Massa adsorben (g)

2.5.1 Optimasi Adsorpsi nano-biosilika berdasarkan Variasi pH (Kandasamy et al., 2022; Khan et al., 2012; Lora et al., 2022)

Larutan Al^{3+} 10 mg/L yang telah disiapkan dipipet sebanyak 25 mL ke dalam beberapa botol ekstrak yang berbeda. Setelah itu, masing-masing ditambahkan amonium asetat sebanyak 1 mL dan dilakukan pengaturan pH 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 melalui penambahan KOH 1 M. Kemudian ditambahkan 1 g nano-biosilika ke masing-masing botol ekstrak lalu disimpan dalam alat shaker selama 150 menit. Masing-masing sampel selanjutnya disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit. Supernatan yang diperoleh dipipet 1 mL dalam labu ukur 25 mL dan ditambahkan 1 mL aluminon, lalu dihipitkan hingga tanda batas dengan akuades dan dihomogenkan. Nilai absorbansinya diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis untuk menentukan sisa konsentrasi aluminium dalam larutan.

2.5.2 Optimasi Waktu Kontak Adsorpsi nano-biosilika (Kandasamy et al., 2022; Khan et al., 2012; Lora et al., 2022)

Larutan Al^{3+} 10 mg/L yang telah disiapkan dipipet sebanyak 25 mL ke dalam beberapa botol ekstrak yang berbeda. Setelah itu, masing-masing ditambahkan amonium asetat sebanyak 1 mL. Kemudian, dalam kondisi pH optimum, ditambahkan 1 g nano-biosilika ke masing-masing botol ekstrak lalu disimpan dalam alat shaker selama 30, 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Masing-masing sampel selanjutnya disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit. Supernatan yang diperoleh dipipet 1 mL dalam labu ukur 25 mL dan ditambahkan 1 mL aluminon, lalu dihipitkan hingga tanda batas dengan akuades dan dihomogenkan. Nilai absorbansinya diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis untuk menentukan sisa konsentrasi aluminium dalam larutan.

2.5.3 Optimasi Adsorpsi nano-biosilika berdasarkan Variasi Konsentrasi (Kandasamy et al., 2022; Khan et al., 2012; Lora et al., 2022)

Larutan Al^{3+} dengan konsentrasi 10; 15; 20; 25; 30; 35 dan 40 mg/L yang telah disiapkan dipipet sebanyak 25 mL ke dalam beberapa botol ekstrak yang berbeda. Setelah itu, masing-masing ditambahkan amonium asetat sebanyak 1 mL. Kemudian dalam kondisi pH optimum, ditambahkan 1 g nano-biosilika ke masing-masing botol ekstrak lalu disimpan dalam alat shaker dengan waktu optimum (150 menit). Masing-masing sampel selanjutnya disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit. Supernatan yang diperoleh dipipet 1 mL dalam labu ukur 25 mL dan ditambahkan 1 mL aluminon, lalu dihipitkan hingga tanda batas dengan akuades dan dihomogenkan. Nilai absorbansinya diukur menggunakan spektrofotometer Uv-Vis untuk menentukan sisa konsentrasi aluminium dalam larutan.

2.6 Penentuan Kinetika Adsorpsi nano-biosilika

Kinetika adsorpsi nano-biosilika dapat dihitung dari analisis pengaruh waktu menggunakan persamaan *pseudo-orde* satu dan persamaan *pseudo-orde* dua. Persamaan orde satu semu dapat dilihat pada persamaan (5) dan persamaan orde dua semu dapat dilihat pada persamaan (6).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 \cdot t \quad (5)$$

$$1/q_t = 1/K_2 \cdot q_e^2 + (1/q_e)t \quad (6)$$

Keterangan:

- q_t = Jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada waktu t (mg/g)
- q_e = Kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan (mg/g)
- k_1 = Konstanta orde satu semu (menit^{-1})
- k_2 = Konstanta orde dua semu ($\text{g/mg} \cdot \text{menit}$)
- t = Waktu kontak (menit)

2.7 Penentuan Kapasitas Adsorpsi nano-biosilika

Kapasitas adsorpsi nano-biosilika dapat dianalisis dari data pengaruh konsentrasi menggunakan persamaan linear dan non-linier (dengan bantuan aplikasi MATLAB) isothermal adsorpsi Langmuir, Freundlich, dan SIPS. Persamaan Langmuir, Freundlich, dan SIPS berturut-turut dapat dilihat pada persamaan (7), (8) dan (9).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (7)$$

$$\text{Log } q_e = \text{log } K_F + \frac{1}{n} \text{log } C_e \quad (8)$$

$$\ln \frac{q_e}{q_m - q_e} = \ln K_S + \frac{1}{n} \cdot C_e \quad (9)$$

Keterangan:

C_e = Konsentrasi saat setimbang dalam larutan (mg/L)

q_m = Kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

q_e = Jumlah zat teradsorpsi saat kesetimbangan (mg/g)

K_L = Konstanta afinitas (L/mg)

$K_F / K_L / K_S$ = Konstanta/kapasitas adsorpsi (mg/g)

n = Intensitas adsorpsi