

KAPASITAS ADSORPSI SERBUK KAYU JATI TERAKTIVASI H_2SO_4 SEBAGAI ADSORBEN ION LOGAM Pb(II)

Irdhawati*, Dhimas Agung Kurniawan, I Gusti Ayu Kunti Sri Panca Dewi, dan Elma Tiana Siallagan

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali, 80361, Indonesia

*irdhawati@unud.ac.id

ABSTRAK: Serbuk gergaji kayu jati merupakan salah satu produk sampingan dari industri mebel. Serbuk gergaji kayu jati mengandung selulosa yang memiliki gugus hidroksil sehingga dapat digunakan sebagai adsorben. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi serbuk gergaji kayu jati sebagai adsorben ion Pb(II). Parameter yang dioptimasi meliputi konsentrasi aktivator H_2SO_4 , waktu kontak optimum adsorben teraktivasi dengan Pb(II), dan kapasitas adsorpsi. dan tipe isoterm adsorpsi. Proses adsorpsi ditentukan dengan sistem batch. Hasil yang diperoleh adalah konsentrasi optimum H_2SO_4 yang digunakan sebagai aktivator sebesar 3,0 M. Waktu kontak optimum untuk Pb(II) diperoleh pada waktu 40 menit. Kapasitas adsorpsi yang dihasilkan untuk ion logam Pb(II) yang diamati adalah sebesar 4,565 mg/g. Tipe isoterm adsorpsi serbuk gergaji kayu jati terhadap ion logam Pb(II) cenderung mengikuti tipe isoterm Freundlich.

Kata kunci: Serbuk kayu jati; Adsorben; Ion logam Pb(II); Isoterm Adsorpsi Freundlich.

ABSTRACT: Teak sawdust is one of the by-products of the furniture industry. The teak sawdust contains cellulose which has hydroxyl groups so it can be used as an adsorbent. This study aims to determine the potential of teak sawdust as an adsorbent for Pb (II) ion. Parameters optimized include H_2SO_4 activator with a variety of concentrations, optimum contact time of activated adsorbent and Pb (II), and adsorption capacity, and the type of adsorption isotherm. The adsorption process was determined by a batch system. The results obtained were the optimum concentration of H_2SO_4 used as an activator of 3.0 M. Meanwhile, the optimum contact time for Pb (II) was 40 minutes. The resulting adsorption capacity for Pb (II) metal ion is 4.565 mg/g. The adsorption isotherm type of teak sawdust towards metal ions Pb (II) tends to follow the Freundlich isotherm type.

Keywords: Adsorbent; Freundlich isotherm adsorption; Lead (Pb) ion; Teak Sawdust

1. PENDAHULUAN

Adsorpsi merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk menyerap ion logam. Metode adsorpsi banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan beberapa metode lainnya diantaranya biaya yang dibutuhkan tidak terlalu tinggi, efisien dan efektif. Dalam proses adsorpsi terjadi akumulasi partikel pada permukaan atau antarmuka. Partikel yang terakumulasi atau terperap disebut adsorbat sedangkan partikel

yang disebut adsorben [1]. Bahan yang dapat digunakan sebagai adsorben harus memiliki pori, rongga dan situs aktif [2].

Dalam perkembangannya adsorben dapat dibuat dari material organik (biosorben). Berbagai bahan dapat digunakan sebagai adsorben logam berat antara lain cangkang kelapa sawit dengan kapasitas adsorpsi logam Pb sebesar 84,61% menggunakan 0,5 g karbon aktif dari cangkang kelapa pada 100 mL larutan $PbSO_4$ 10 ppm [3], kulit salak dengan

kapasitas adsorpsi terhadap logam Pb sebesar 83,33% [4], dan sabut siwalan [5].

Kapasitas adsorpsi adsorben dapat ditingkatkan melalui proses aktivasi, dengan tujuan untuk memperbesar pori sehingga proses adsorpsi menjadi lebih baik. Proses aktivasi dapat dilakukan secara fisika maupun secara kimia. Aktivasi secara fisika memerlukan gas pengoksidasi seperti uap air, oksigen, CO₂ atau aliran gas dengan temperatur yang tinggi berkisar antara 800-1000°C [6]. Aktivasi secara kimia yaitu proses aktivasi dengan mereaksikan serbuk adsorben dengan bahan kimia (agen aktivator) yang selanjutnya dipanaskan hingga kering [7]. Aktivasi secara kimia memiliki beberapa kelebihan diantaranya membutuhkan suhu pirolisis yang lebih rendah dan mampu meningkatkan ukuran pori adsorben sehingga menghasilkan luas permukaan yang tinggi (3600 m²/g) [8]. Peningkatan konsentrasi aktivator akan mengakibatkan luas permukaan pada adsorben juga semakin besar, hal tersebut mengakibatkan kapasitas adsorpsi juga semakin meningkat.

Ampas tebu juga telah dimanfaatkan untuk adsorben dengan melakukan aktivasi secara kimia menggunakan HCl 0,1 N. Hasil yang diperoleh adalah terjadi penurunan kadar Mn sebesar 60% menggunakan 3 g dalam 100 mL larutan dengan konsentrasi 10,3 ppm dengan waktu kontak selama 60 menit [9]. Limbah serbuk kayu jati dengan aktivasi secara kimia dengan aktivator NaOH diperoleh hasil kapasitas adsorpsi sebesar 1,745 mg/g sedangkan hasil yang diperoleh jika tanpa adanya perlakuan aktivasi kapasitas adsorpsi yang diperoleh sebesar 0,597 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi sebesar 74% [10].

Serbuk kayu jati yang dihasilkan dari industri meubel diperkirakan mencapai sebesar 0,78 juta m³/tahun. Serbuk gergaji kayu terdiri dari tiga senyawa yaitu selulosa sekitar 40%, lignin 30% dan hemiselulosa 10% [11]. Serbuk gergaji kayu tersebut yang mengandung selulosa, hemiselulosa,

dan lignin yang tinggi dapat digunakan sebagai adsorben limbah berbahaya, misalnya logam berat Pb [12]. Serbuk kayu jati dengan aktivasi secara kimia menggunakan EDTA memperoleh hasil waktu optimum pada adsorpsi logam Cu(II) dan Cr(III) menggunakan adsorben sebanyak 1 gram dalam 50 mL larutan dengan konsentrasi 60 ppm dengan waktu kontak selama 105 menit dengan pola isoterm adsorpsi Freundlich [13]. Hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa logam-logam berat seperti Pb dapat terjerap ke dalam adsorben serbuk kayu jati melalui pori yang tersedia.

Timbal (Pb) termasuk ke dalam jenis logam berat yang memiliki tingkat toksisitas yang tinggi. Jika Pb masuk ke dalam tubuh dan diserap secara berlebihan dapat menyebabkan gangguan kesehatan diantaranya kecerdasan anak menurun, pertumbuhan terhambat, bahkan dapat menimbulkan kelumpuhan. Gejala keracunan logam Pb ditandai dengan rasa mual, sakit perut dan anemia [14].

Berdasarkan latar belakang diatas, maka perlu dilakukan penelitian tentang pembuatan adsorben dengan memanfaatkan serbuk kayu jati yang teraktivasi menggunakan H₂SO₄ untuk mengetahui kondisi optimum dalam menurunkan kadar ion logam Pb (II). Pengukuran konsentrasi logam Pb menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA).

2. PERCOBAAN

2.1 Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan yaitu Pb(NO₃)₂, NaOH, HNO₃ (*Merck*). H₂SO₄ (*Malinckrodt*), dan aquadest. Semua bahan yang digunakan dalam penelitian memiliki grade pro analisis (p.a). Sampel serbuk kayu jati yang diambil dari Toko Meubel Mentawai 2, Denpasar.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah neraca analitik Ohaus PX523 Pioneer, pH meter Mediatech, oven B-One, magnetic stirrer, kertas saring 20 µm, ayakan dengan ukuran 150 µm,

seperangkat alat gelas laboratorium. Spektrofotometer serapan atom (SSA) (Simadzu tipe AA7000) digunakan untuk analisis logam Pb.

2.2 Metode Percobaan

2.2.1 Penyiapan Serbuk Kayu Jati dan Optimasi Konsentrasi H₂SO₄

Serbuk kayu jati dicuci dengan aquades, ditiriskan dan dikeringkan di dalam oven dengan suhu 65°C selama 12 jam hingga massa konstan. Selanjutnya serbuk kayu jati dihaluskan menggunakan blender dan diayak dengan ayakan ukuran lubang 150 µm. Gelas Beaker sebanyak 6 buah masing-masing diisi dengan serbuk kayu jati yang telah kering dan halus sebanyak 10 g. Masing-masing adsorben ditambahkan larutan H₂SO₄ 200 mL dengan konsentrasi yang bervariasi yaitu 0,0 ; 1,5 M; 2,0 M; 2,5 M; 3,0 M dan 3,5 M. Campuran tersebut selanjutnya diaduk dengan pengaduk magnetik selama 3 jam, kemudian disaring. Endapan dibilas dengan NaOH 0,01 M hingga pH filtrat netral. Endapan selanjutnya dikeringkan di dalam oven selama 18 jam hingga massa konstan.

Serbuk kayu jati teraktivasi H₂SO₄ ditimbang sebanyak 1 g untuk tiap jenis konsentrasi, dan masing-masing ditambahkan larutan Pb dengan konsentrasi 100 mg/L. Campuran tersebut diaduk menggunakan pengaduk magnet selama 60 menit. Setelah itu, campuran disaring dan filtrat diukur absorbansinya menggunakan SSA untuk menghitung kapasitas adsorpsi. Masing-masing percobaan dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali. Kapasitas adsorpsi dihitung dengan rumus:

$$q_e = \frac{(C_{awal} - C_{akhir})}{m} \times V \quad (2.1)$$

Keterangan :

q_e = kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

C_{awal} = konsentrasi mula-mula (mg/L)

C_{akhir} = konsentrasi akhir (mg/L)

m = massa adsorben (g)

V = volume sampel (L)

Konsentrasi H₂SO₄ yang menghasilkan kapasitas adsorpsi paling besar digunakan untuk percobaan selanjutnya.

2.2.2 Penentuan Waktu Kontak Optimum Adsorpsi Terhadap Logam Pb

Serbuk kayu jati teraktivasi dengan konsentrasi aktivator H₂SO₄ optimum ditimbang sebanyak 1,0 g dalam gelas Beaker. Adsorben ditambahkan larutan logam Pb dengan konsentrasi 100 mg/L sebanyak 100 mL dan diaduk dengan pengaduk magnet dengan variasi waktu kontak selama 20, 30, 40, 50, 60, 80, dan 100 menit. Setelah itu, larutan disaring dengan kertas saring kemudian konsentrasi Pb dalam filtrat diukur dengan SSA. Masing-masing percobaan dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali. Waktu kontak optimum adalah waktu kontak yang dapat menyerap adsorbat paling banyak (kapasitas adsorpsi paling besar).

2.2.3 Penentuan Jenis Isoterm Adsorpsi Adsorben Serbuk Kayu Jati Teraktivasi H₂SO₄

Sebanyak 1,0 g serbuk kayu jati teraktivasi dengan konsentrasi H₂SO₄ optimum dimasukkan ke dalam gelas Beaker, kemudian ditambahkan 100 mL larutan logam Pb dengan konsentrasi yang bervariasi yaitu 60, 80, 100, 120, dan 140 mg/L. Campuran diaduk selama waktu kontak optimum kemudian disaring. Konsentrasi logam Pb dalam filtrat diukur dengan SSA.

Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan jenis isoterm adsorpsi yang terjadi, yaitu jenis isoterm Langmuir atau Freundlich. Langmuir berasumsi bahwa permukaan adsorben dengan situs aktif memiliki luas permukaan yang proporsional. Pada masing-masing situs aktif hanya dapat mengadsorpsi satu molekul, sehingga adsorpsi hanya terbatas pada pembentukan lapis tunggal (mono layer) [15]. Persamaan yang digunakan dalam isoterm Langmuir ini sebagai berikut:

$$q = \frac{qm \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2.2)$$

Dari persamaan 2.2 dapat diubah ke dalam bentuk persamaan linier menjadi

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{b \cdot qm} + \frac{C_e}{qm} \quad (2.3)$$

Data yang diperoleh kemudian dibuatkan plot antara C_e/q sebagai sumbu y dan C_e sebagai sumbu x [16]. Grafik yang diperoleh adalah garis linier dengan intercept = $\frac{1}{b \cdot qm}$ dan slope = $\frac{1}{qm}$.

Keterangan :

- q = Besarnya adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben (mg/g)
- q_m = Kapasitas adsorpsi (mg/g)
- b = Konstanta (L/mg)
- C_e = Konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan (mg/L)

Selanjutnya dibuat kurva hubungan antara C_e dan $\frac{C_e}{x}$ sehingga akan didapatkan persamaan garis linier $y = a + bx$. Hal ini adalah persamaan isoterm Langmuir $\frac{C_e}{x} = \frac{1}{bK} + \frac{C_e}{b}$. Sebagai pembanding untuk mendapatkan nilai koefisien regresi dibuat kurva hubungan antara $\log C_e$ dan $\log \frac{x}{m}$ sehingga akan didapatkan persamaan garis linier $y = a + bx$.

Isoterm adsorpsi Freundlich didasarkan pada pembentukan lapisan multilayer dari molekul-molekul adsorbat pada permukaan adsorben, dengan situs aktif yang bersifat heterogen karena panas adsorpsi yang tidak seragam sepanjang permukaan adsorben [16]. Isoterm adsorpsi Freundlich memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\frac{x}{m} = K \cdot C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

$$\log \frac{x}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

Keterangan :

$\frac{x}{m}$ = Jumlah adsorbat yang teradsorpsi (mg/g adsorben)

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

K = Konstanta kesetimbangan

n = Konstanta empiris tergantung pada sifat zat

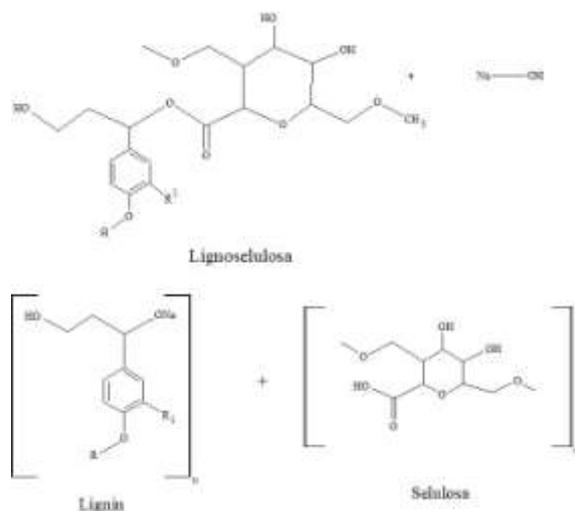
Persamaan Freundlich menunjukkan bahwa jumlah zat yang teradsorpsi akan meningkat bila konsentrasi atau tekanan meningkat. Persamaan untuk isoterm Freundlich yaitu $\log \frac{x}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$. Jenis isoterm dapat ditentukan dari nilai koefisien regresi yang mendekati satu [17].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

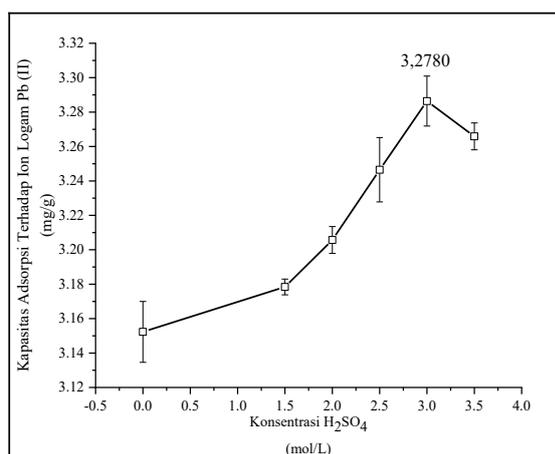
3.1 Penentuan Konsentrasi H_2SO_4 Optimum Sebagai Aktivator

Aktivasi adsorben serbuk kayu jati dilakukan secara kimia yaitu dengan menggunakan aktivator H_2SO_4 . Konsentrasi H_2SO_4 dengan kapasitas adsorpsi paling tinggi terhadap ion logam Pb (II) diperoleh pada konsentrasi 3,0 M dengan kapasitas adsorpsi sebesar 3,28 mg/g. Aktivasi secara kimia menggunakan asam bertujuan untuk melarutkan garam-garam mineral yang terdapat pada adsorben sehingga akan lebih banyak ion logam Pb (II) yang diadsorpsi oleh adsorben. NaOH yang digunakan untuk menetralkan juga berfungsi untuk menghilangkan lignin pada serbuk kayu jati [18]. Reaksi pemutusan lignin dalam serbuk kayu jati dapat dilihat pada Gambar 1.

Larutan NaOH dapat menyerang dan merusak struktur lignin pada bagian kristalin dan amorf serta memisahkan sebagian hemiselulosa. Ion OH^- dari NaOH akan memutuskan ikatan-ikatan dari struktur dasar lignin dan Na^+ akan berikatan dengan lignin membentuk natrium fenolat yang bersifat mudah larut. Lignin yang terlarut ditandai dengan lindi hitam. Plot antara kapasitas adsorpsi dengan variasi konsentrasi H_2SO_4 disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1 Mekanisme pemutusan ikatan antara lignin dengan selulosa menggunakan NaOH



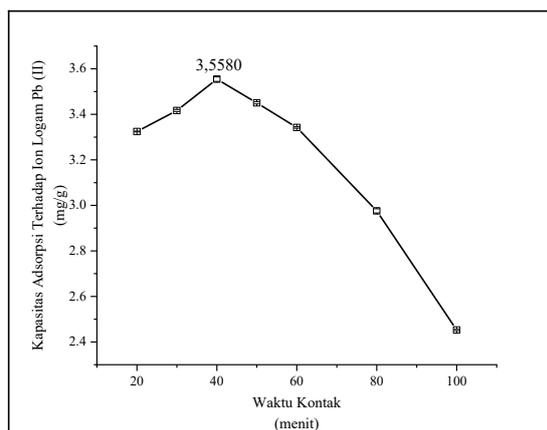
Gambar 2 Hubungan antara kapasitas adsorpsi terhadap ion logam Pb (II) dengan variasi konsentrasi H₂SO₄

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi H₂SO₄ yang digunakan sebagai aktivator maka kapasitas adsorpsi serbuk kayu jati untuk menjerap ion logam Pb (II) akan meningkat sampai konsentrasi 3 mol/L. Adsorben tanpa aktivasi menghasilkan kapasitas adsorpsi terhadap ion logam Pb (II) sebesar 3,15 mg/g, sedangkan pada konsentrasi 3,0 mol/L kapasitas adsorpsi yang dihasilkan terhadap ion logam Pb (II) sebesar 3,28 mg/g. Kapasitas adsorpsi terhadap ion logam Pb (II) pada konsentrasi H₂SO₄ optimum mengalami peningkatan sebesar

4,13%, dibandingkan dengan adsorben tanpa aktivasi. Peningkatan kapasitas adsorpsi disebabkan semakin tinggi konsentrasi H₂SO₄ yang digunakan maka semakin banyak ion H⁺ yang melarutkan logam-logam pengotor dengan menukar ion logam yang terikat pada adsorben. Proses ini mengakibatkan jumlah sisi aktif adsorben menjadi lebih banyak ion H⁺ yang selanjutnya akan berikatan dengan gugus hidroksil dalam selulosa membentuk OH₂⁺ yang bersifat menolak ion logam [19]. Pori-pori dari serbuk kayu jati juga membesar sehingga akan meningkatkan luas permukaan yang menyebabkan daya jerap yang dihasilkan juga semakin besar. Pengaruh aktivasi menggunakan asam sulfat akan menambah daerah permukaan asam pada adsorben, dan terjadi pembentukan gugus karboksil (-COOH) dan hidroksil (-OH), yang akan meningkatkan daya jerap kation [20]. Pada konsentrasi H₂SO₄ sebesar 3,5 mol/L terjadi penurunan daya jerap pada ion logam Pb (II). Hal tersebut terjadi disebabkan konsentrasi H₂SO₄ yang tinggi menyebabkan rusaknya dinding struktur pada adsorben, karena H₂SO₄ yang bersifat destrukatif [21].

3.2 Penentuan Waktu Kontak Optimum

Penentuan waktu kontak optimum dilakukan menggunakan adsorben yang telah teraktivasi H₂SO₄ optimum (3 M). Penentuan waktu kontak ini bertujuan untuk mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan oleh serbuk kayu jati teraktivasi H₂SO₄ optimum sebagai adsorben untuk menjerap ion logam Pb (II) sebagai adsorbat. Grafik penentuan waktu kontak optimum terdapat pada Gambar 3 yang menunjukkan semakin lama waktu kontak maka adsorpsi terhadap ion logam juga semakin meningkat. Hal ini terjadi disebabkan semakin lama adsorben dan adsorbat berinteraksi maka memungkinkan semakin banyak tumbukan yang terjadi, sehingga akan membuat semakin banyak adsorbat yang terjerap.



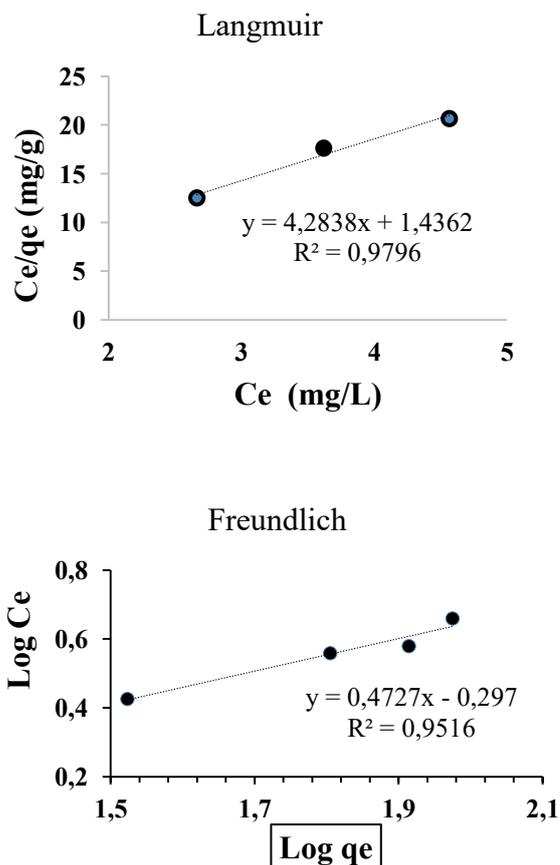
Gambar 3. Hubungan antara kapasitas adsorpsi serbuk kayu jati teraktivasi H_2SO_4 terhadap ion logam Pb (II) dengan variasi waktu kontak

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada waktu kontak 20 menit, permukaan adsorben belum menyerap ion logam Pb (II) secara optimum. Pada awal proses adsorpsi jumlah situs aktif yang menyerap ion logam masih banyak tersedia dan pada tahap selanjutnya jumlah situs aktif yang tersedia menjadi berkurang sehingga terjadi penurunan daya jerap [22]. Pada waktu kontak selama 40 menit adsorben telah berada di titik optimum untuk menyerap ion logam Pb (II) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 3,56 mg/g. Setelah melewati waktu kontak optimum, adsorpsi terhadap adsorbat mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan sisi aktif dari permukaan adsorben telah jenuh. Selain itu penurunan kapasitas adsorpsi setelah waktu kontak optimum juga dapat disebabkan oleh proses desorpsi atau pelepasan kembali ion yang berikatan dengan adsorben karena telah mengalami kejenuhan.

3.3 Penentuan Jenis Isoterm Adsorpsi

Penentuan jenis isoterm adsorpsi menggunakan adsorben serbuk kayu jati teraktivasi H_2SO_4 terhadap ion logam Pb(II) menggunakan Persamaan 2.3 untuk model isoterm Langmuir dan model isoterm Freundlich pada Persamaan 2.5.

Dalam model isoterm Langmuir, dibuat kurva linier hubungan antara konsentrasi sisa (ion logam yang tidak terjerap oleh adsorben) yaitu C_e (mg/L) dengan perbandingan konsentrasi sisa dan kapasitas adsorpsi $C_e/(x/m)$. Penentuan model isoterm adsorpsi terhadap ion logam Pb (II) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva linearitas jenis isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich terhadap ion logam Pb(II)

Model isoterm adsorpsi dapat diketahui dari nilai koefisien regresi linier (R^2). Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa pada adsorpsi ion logam Pb (II) nilai koefisien regresi linier model isoterm Langmuir sebesar 0,9796 lebih besar dibandingkan dengan model isoterm Freundlich sebesar 0,9516. Oleh karena itu maka dapat disimpulkan bahwa pola isoterm adsorpsi terhadap ion logam Pb (II) lebih sesuai dengan isoterm Langmuir. Isoterm adsorpsi Freundlich diasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan

adsorben yang heterogen dengan energi adsorpsi yang bervariasi [23]. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa proses yang terjadi pada proses adsorpsi terdapat hanya satu lapisan permukaan (single layer).

4. KESIMPULAN

Kapasitas adsorpsi adsorben kayu jati meningkat setelah aktivasi dengan H₂SO₄ konsentrasi 3,0 mol/L. Waktu kontak optimum terhadap ion logam Pb (II) adalah 40 menit. Jenis isoterm adsorpsi yang dihasilkan adsorben serbuk kayu jati teraktivasi H₂SO₄ terhadap ion logam Pb (II) mengikuti model isoterm Langmuir dengan nilai koefisien regresi linier (R²) sebesar 0,9796.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pemilik Toko Meubel Mentawai 2 Denpasar sebagai tempat sampling serbuk kayu jati yang digunakan sebagai adsorben.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Atkins, P.W. 1999. *Kimia Fisika Jilid II*. Erlangga. Jakarta
- [2] Astuti, W. 2018. *Adsorpsi Menggunakan Material Berbasis Lignosulosa*. Unnes Press. Semarang
- [3] Gultom, E.M., dan Lubis, M.T. 2014. Aplikasi Karbon Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit dengan Aktivator H₃PO₄ Untuk Penyerap Logam Berat Cd dan Pb. *Jurnal Teknik Kimia*. 3(1):5-10
- [4] Zein, R., Wardana, N., Refilda, Aziz, H. 2018. Kulit Salak Sebagai Biosorben Untuk Pengolahan Timbal (II) dan Cadmium (II) Dalam Larutan. *Journal Chemica et Natura Acta*. 6(2) : 56-64
- [5] Nafi'ah, R. 2016. Kinetika Adsorpsi Pb (II) Dengan Adsorben Arang Aktif Dari Sabut Siwalan. *Jurnal Farmasi Sains dan Praktis*. 1(2):28-37
- [6] Marsh, H., dan Reinoso, F.R. 2006. *Activated Carbon*. Elsevier Science & Technology Books. London
- [7] Kienle, H.V. 1986. *Ulman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 5th Completely Revised Edition. Wiley-VCH. Weinheim
- [8] Paul, T., Wei, L.C., Johan, B., dan Rafie, M.. 2019. Recent Developments in Biomass-Derived Carbon as a Potential Sustainable Material for Super-Capacitor-Based Energy Storage and Environmental Applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 140:54–85
- [9] Imani, A., Sukwika, T., dan Febriana, L. 2020. Karbon Aktif Ampas Tebu Sebagai Adsorben Penurunan Kadar Besi dan Mangan Limbah Air Asam Tambang. *Jurnal Teknologi*. 13(1):33 – 42
- [10] Firmanto, R.P., Setyowati, R.D.N., dan Suprayogi, D. 2021. Kemampuan Adsorben Limbah Serbuk Gergaji Kayu Jati terhadap Penurunan Kandungan Timbal (Pb) pada Limbah Cair dengan Menggunakan Sistem Batch. *Journal of Research Technology*. 7 (2) : 197-206
- [11] Muley, P.D., Henkel, C., Abdollahi, K.K., Marculescu, C., dan Boldor, D. 2016. A Critical Comparison of Pyrolysis of Cellulose, Lignin, and Pine Sawdust Using an Induction Heating Reactor. *Jurnal Energy Conversion and Management*. 117:273–280
- [12] Mohadi, R., Saputra, A., Hidayati, R., dan Lesbani, A. 2014. Studi Interaksi Ion Logam Mn²⁺ Dengan Selulosa Dari Serbuk Kayu. *Jurnal Kimia*. 8(1):1-8
- [13] Irdhawati, Sinthadevi, N.N.T., dan Sahara, E. 2020. Serbuk Gergaji Kayu Jati Teraktivasi EDTA Sebagai Penjerap Ion Tembaga (II) Dan Krom (III). *Indonesia Journal of Chemical Reseach*. 7(2):114-1196
- [14] Manahan, S. E. 1990. *Environment Chemistry*. Edisi keempat. Jewis Publisher. Michigan
- [15] Do, D. D. 1998. *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. Imperial College Press. London.

- [16] Sawyer, Clair, N., McCarty, Perry, L., Parkin, dan Gene, F. 1994. *Chemistry for Environmental Engineering*. 4th edition. McGraw-Hill. New York
- [17] Soemirat, J. 2015. *Toksikologi Lingkungan*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta
- [18] Harni, M. R., Iryani, A., Affandi, H. 2015. *Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu Jati (Tectona Grandis L.f.) Sebagai Adsorben Logam Timbal (Pb)*. FMIPA Universitas Pakuan. Jawa Barat.
- [19] Sudiarta, I.W., Diantariani, N.P., dan Yulihastuti, D.A. 2012. Biosorpsi Cr (III) Pada Biosorbent Serat Sabut Kelapa Hijau Teraktivasi Asam Nitrat. *Chemistry Progres*. 5(1) : 25-30
- [20] Benis, K.Z., Damuchali, A.M., McPhedran, K.N., dan Soltan, J. 2020. Treatment of aqueous arsenic – a review of biosorbent preparation methods. *Journal of Environmental Management*. 273 : 1-14
- [21] Arung, S., Yudi, M., dan Chadijah, St. 2014. Pengaruh Konsentrasi Aktivator Asam Klorida (HCl) Terhadap Kapasitas Adsorpsi Arang Aktif Kulit Buah Kakao (Theobroma cacao. L) Pada Zat Warna Methanil Yellow. *Al Kimia*. 52-63
- [22] Dey, S., Uppala, P., Sambangi, A., Haripavan, N., dan Veerendra, G.T.N. 2022. Recycling of Solid Waste Biosorbents for Removal of Nitrates from Contaminated Water. *Cleaner and Circular Bioeconomy*. 2 : 1-17
- [23] Ali, Z., Sajid, M., Raza, N., Sohail, Y., Hayat, M., Manzoor, S., Shakeel, N., Gill, K.A., Ifseisi, A.A., dan Ansari, M.Z. 2023. Study of Modified Biomass of *Gossypium hirsutum* as Heavy Metal Biosorbent. *Arabian Journal of Chemistry*. 16 : 1 - 12