

BAB I. FILTER AIR HUJAN DARI ADSORBEN ALAMI ENCENG GONDOK (*Eichhornia Crassipes*)

**Nur Qudus^{1*}, Bambang Sugiyarto¹, Harianingsih², Virgiawan
Adi Kristianto¹, Indra Sakti Pangestu², Savira Rinda Erliana²,
Isnina Noor Ubay², Asti Dwi Afidah³**

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Negeri Semarang

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Negeri Semarang

³Staff Administrasi dan Keuangan DSIH, Universitas Negeri

Semarang

nurqudus@mail.unnes.ac.id

ABSTRAK

Sistem pemanenan air hujan menjadi semakin penting dalam strategi pengelolaan air hujan yang berkelanjutan. Di negara-negara berkembang, masalah utama adalah pengolahan air yang tidak memadai dan kekurangan air. Terutama di kota-kota dan negara-negara berkembang, pemanenan air hujan dianggap sebagai sumber air alternatif yang sangat penting. Pemanenan air hujan telah disarankan sebagai teknologi bermanfaat di daerah di seluruh dunia yang mengalami musim kemarau. Jenis bahan atap dan kondisi lingkungan, seperti iklim setempat dan tingkat polusi atmosfer, memengaruhi kualitas air hujan yang dikumpulkan. Air hujan mengandung berbagai jenis bahan kimia, seperti ion bikarbonat, ion karbonat, amonia, natrium, kalium, kalsium, magnesium, hidrogen, sulfat, klorida, nitrat, dan magnesium sulfat. Konsentrasi ion hidrogen adalah faktor penting untuk mengukur tingkat keasaman hujan, atau hujan asam, Adsorpsi, pertukaran ion, pengendapan kimia, elektrolisis, elektrokoagulasi, kavitasi, elektrokoagulasi, dan ultrasonikasi adalah beberapa proses yang termasuk dalam kategori ini. Dalam produksi adsorben, asam klorida digunakan sebagai zat jenuh pada berbagai suhu aktivasi. Selain itu, adsorben digambarkan dengan Scanning Electron Microscope. Analisis suhu aktivasi digunakan untuk menentukan

seberapa efektif enceng gondok dalam adsorpsi dan mengoptimalkan parameter tersebut sehingga adsorpsi dapat membantu menghilangkan BOD, COD, TDS, klorida, dan nitrat dari air hujan. Salah satu metode yang dilakukan untuk pengolahan air hujan dengan adsorpsi menggunakan adsorben enceng gondok. Selain itu, untuk mendapatkan hasil terbaik dengan menganalisis model kinetik dan isotherm adsorpsi. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan adsorben enceng gondok menawarkan solusi pengolahan air hujan yang lebih hemat biaya dengan penggunaan listrik sebesar Rp. 1000,- setiap 15 menit proses adsorpsi sekali pdan ramah lingkungan.

Kata kunci: Adsorpsi, Air hujan, Enceng gondok, Filter

AIR HUJAN SEBAGAI SOLUSI AIR BERSIH

Masalah utama kekurangan pasokan air dan pengolahan air yang tidak memadai merupakan tantangan besar di negara-negara berkembang. Oleh karena itu, perlu dicari pendekatan alternatif yang mempertimbangkan keterbatasan finansial dan teknis yang dimiliki negara-negara miskin, terutama di daerah semi-perkotaan atau pedesaan. Sistem pemanenan air hujan semakin menjadi bagian penting dari upaya pengelolaan air hujan yang berkelanjutan. Pemanenan air hujan dianggap sebagai sumber air alternatif yang sangat relevan, terutama di perkotaan dan negara-negara berkembang. Pemanenan air hujan telah lama dianjurkan sebagai teknologi yang berguna di wilayah-wilayah di dunia yang mengalami musim kemarau. Kualitas air hujan yang dikumpulkan tergantung pada berbagai faktor, termasuk jenis bahan atap dan kondisi lingkungan seperti iklim setempat dan tingkat polusi udara.

Pencemaran yang berasal dari atap dapat diklasifikasikan menjadi sumber pencemaran eksternal dan internal. Sumber eksternal antara lain polutan udara dan zat organik yang berasal dari aktivitas manusia, dedaunan, dan kotoran burung. Bakteri patogen utama yang ditemukan di atap rumah berasal dari kotoran burung dan mamalia yang dapat hinggap di atap rumah. Sedangkan sumber pencemaran internal berasal dari material atap itu sendiri.

Curah hujan atau presipitasi merupakan proses utama di mana gas dan aerosol dari atmosfer bergabung dan jatuh ke permukaan bumi. Proses ini memainkan peran penting dalam penyerapan berbagai jenis gas dan senyawa kimia di udara. Akibatnya, air hujan mengandung berbagai jenis senyawa kimia seperti amonia, natrium, kalium, kalsium, magnesium, hidrogen, sulfat, klorida, nitrat, bikarbonat, dan ion karbonat. Konsentrasi ion hidrogen merupakan parameter yang sangat penting untuk menilai tingkat keasaman hujan, yang sering disebut dengan hujan asam.

Saat ini, terdapat berbagai metode konvensional yang digunakan untuk menghilangkan pewarna dan logam dari air. Beberapa proses tersebut antara lain adsorpsi, pertukaran ion, pengendapan kimia, elektrolisis, filtrasi membran, elektrokoagulasi, kavitasi, dan ultrasonikasi.

Metode adsorpsi cenderung lebih disukai dibandingkan metode lainnya karena mempunyai beberapa kelebihan. Pertama, cara ini mudah dioperasikan sehingga tidak memerlukan keahlian khusus untuk menggunakannya. Selain itu, proses adsorpsi mempunyai efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan zat warna dan logam dari air, bahkan pada konsentrasi yang rendah. Adsorpsi merupakan proses yang cocok untuk digunakan dalam pengolahan air dengan tingkat pencemaran yang bervariasi. Selain efisiensinya, metode adsorpsi juga dinilai lebih aman karena tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya bagi lingkungan atau kesehatan manusia.

Aspek ekonomi juga menjadi pertimbangan penting dalam memilih metode pengolahan air. Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi sebagai bahan adsorben. Pertama, material harus tersedia melimpah di alam, sehingga mudah diakses. Selain itu, bahan adsorben yang ideal adalah yang tidak mempunyai nilai ekonomis, sehingga biaya produksi dan penggunaan dapat ditekan. Selain itu, bahan adsorben harus mudah dibuat dari produk samping atau limbah industri atau pertanian, sehingga meminimalkan dampak lingkungan dan menjamin kelangsungan proses pengolahan air. Dengan mempertimbangkan semua faktor tersebut, metode adsorpsi menjadi pilihan yang tepat untuk

mengatasi masalah penghilangan pewarna dan logam dari air, terutama dalam konteks ketersediaan sumber daya alam dan aspek ekonomi.

Pengembangan adsorben yang ramah lingkungan dan hemat biaya untuk menghilangkan logam berat berbahaya dari air hujan. Metode tersebut melibatkan studi *batch* untuk mengukur kemampuan penyerapan adsorben yang terbuat dari bubuk enceng gondok. Proses pembuatan adsorben melibatkan penggunaan asam klorida sebagai zat impregnasi pada berbagai suhu aktivasi, dan karakterisasi adsorben dilakukan melalui *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pada penelitian ini telah dilakukan analisis suhu aktivasi untuk mengetahui efisiensi adsorpsi enceng gondok. Selanjutnya penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter-parameter tersebut sehingga adsorpsi untuk membantu penyisihan COD, BOD, TDS, Klorida, dan Nitrat dalam air hujan dapat mencapai hasil terbaik dan analisis isotherm adsorpsi dan model kinetik. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan alternatif pengolahan air hujan yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Upaya ini diharapkan dapat menjadi solusi efektif dalam mengatasi permasalahan pencemaran air hujan.

ENCENG GONDOK (*Eichhornia Crassipes*) SEBAGAI ADSORBEN

Tumbuhan terapung, eceng gondok terkadang berakar di dalam tanah. Eceng gondok tumbuh cepat. Mereka berbentuk lonjong, tidak bertangkai, dan tingginya sekitar 0,4–0,8 meter. Tanaman eceng gondok dianggap sebagai hama yang merusak ekosistem perairan karena airnya yang kaya akan unsur hara, terutama air yang mengandung nitrogen, fosfat, dan kalium. Hasil penelitian menurut menunjukkan bahwa kandungan zat kimia anorganik paling tinggi dalam eceng gondok segar, sedangkan kandungan kimia dalam eceng gondok kering terdiri dari silika 5,56%, selulosa 64,5%, lignin 7,69%, pentosan 15,61%, dan abu 12%. Dalam keadaan kering, kandungan kimia eceng gondok paling banyak adalah serat selulosa. Selain itu, pH juga mempengaruhi pertumbuhan eceng gondok dengan pH yang ideal adalah antara 7 dan 7,5. Beberapa faktor memengaruhi seberapa cepat eceng

gondok menyerap polutan ini termasuk jenis bahan pencemar yang ada di limbah, kerapatan tanaman, dan lamanya eceng gondok berada di air limbah. Tanaman eceng gondok juga memiliki kemampuan untuk menurunkan COD, BOD, TDS, klorida, dan nitrat pada air hujan.

Banyak adsorben biasanya ditemukan di bahan yang sangat berpori, yang memiliki pori yang sangat kecil dan memiliki permukaan bagian dalam yang lebih besar dari bagian luar. Banyak bukti mendukung gagasan bahwa eceng gondok mengandung gugus fungsional yang dapat bertindak sebagai lokasi aktif adsorpsi logam berat. Selain digunakan untuk menyerap logam berat eceng gondok juga dapat menyisihkan kontaminan seperti COD, BOD, TDS, klorida, dan nitrat. Pertumbuhan eceng gondok yang sangat cepat ini, perlu dilakukan pengendalian pertumbuhan populasi eceng gondok untuk menjaga keseimbangan ekosistem perairan. Salah satunya dengan memanfaatkan eceng gondok menjadi adsorben sebagai penyerap alami yang ramah lingkungan.

Karbon aktif bereaksi dengan bahan kimia sebelum atau sesudah karbonisasi. Bahan ini mengandung banyak karbon bebas dan pori-pori yang meningkatkan daya serapnya. Dalam kehidupan sehari-hari, karbon aktif memiliki banyak manfaat. Bahan tersebut digunakan sebagai katalis, penyerap, pemurnian gas, dan pewangi di berbagai industri, termasuk pengolahan air, obat-obatan, dan industri makanan. Selain itu, karbon aktif dapat digunakan sebagai pelarut yang dapat digunakan kembali dan disimpan. Kapasitas adsorpsi karbon aktif adalah karakteristik utamanya.

ADSORPSI

Adsorpsi adalah proses di mana suatu zat padat menyerap partikel dari zat cair hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan adsorbat. Sifat adsorpsi, tekanan, suhu, dan jenis adsorbat adalah beberapa faktor yang memengaruhi proses adsorpsi. Karbon aktif dengan struktur mikro dan mesopori yang besar dan luas permukaan yang besar memiliki daya serap yang tinggi pada larutan yodium. Untuk mendapatkan karbon aktif dengan daya serap yang tinggi, aktivator digunakan selama proses

produksi. Dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi adalah tiga fase produksi karbon aktif.

Pemanenan air hujan adalah metode ramah lingkungan yang melindungi air minum dan mengurangi kelangkaan air. Penyaringan air hujan yang dikumpulkan secara efektif adalah bagian penting dari pengumpulan air hujan untuk menjamin kualitas dan keamanannya. Pada dasarnya, air hujan dapat terkontaminasi dengan berbagai zat yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, filter air hujan merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa air yang dapat digunakan memiliki kualitas yang baik. Air hujan biasanya difilter dengan menggunakan bahan sintesis seperti karbon aktif, pasir, atau kerikil. Meskipun bahan-bahan ini digunakan dengan baik, namun berdampak buruk pada lingkungan dan ketersediaan bahan baku. Penggunaan adsorben alami semakin diminati sebagai alternatif yang berkelanjutan. Adsorben alami, yang berasal dari eceng gondok yang tersedia, dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi filter air hujan.

PEMBUANTAN ADSORBEN ENCENG GONDOK

Bahan yang digunakan untuk membuat adsorben dari enceng gondok dan melakukan analisis terkait efektifitasnya diantaranya adalah air hujan dengan pH 5, enceng gondok, natrium hidroksida Merck SAS 1310-73-2, asam klorida (Merck 1.00731.2500), dan akuades. Absorbansi larutan encer diukur menggunakan spektroskopi UV-Visible, khususnya dengan model UV-1800, yang diperoleh dari Shimadzu di Jepang.

Langkah penyiapan enceng gondok untuk digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan air. Pertama, enceng gondok dikumpulkan dan melalui beberapa tahapan pencucian dengan menggunakan akuades. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan kontaminan dan kotoran yang tidak diinginkan dari enceng gondok. Setelah proses pencucian, enceng gondok dikeringkan dalam oven udara panas selama 24 jam pada suhu 60°C. Tujuannya untuk mengurangi kadar air pada enceng gondok. Enceng gondok yang telah kering kemudian dihaluskan dan digiling hingga

menjadi bubuk halus sehingga mempunyai tekstur yang sesuai untuk proses adsorpsi. Bubuk enceng gondok kemudian disaring melalui saringan 40 mesh (450 μm) untuk memastikan ukuran partikel sesuai kebutuhan. Enceng gondok kemudian diresapi dengan asam klorida (HCl) dengan perbandingan enceng gondok/HCl = 1:1,5. Proses ini melibatkan penambahan asam klorida ke dalam air suling yang diaduk pada suhu 30°C. Enceng gondok kemudian ditambahkan ke dalam campuran dan diaduk selama 12 jam. Setelah proses impregnasi, campuran dipisahkan dengan cara penyaringan untuk memisahkan enceng gondok dari larutan asam klorida. Enceng gondok yang telah dipisahkan kemudian dikeringkan selama 4 jam pada suhu 60°C.

Selanjutnya sampel enceng gondok tersebut mengalami proses karbonisasi dengan cara pemanasan pada suhu yang berbeda yaitu 500, 600, dan 700°C. Proses ini dilakukan dengan laju kenaikan suhu 10°C per menit. Setelah proses karbonisasi selesai, sampel enceng gondok dicuci dengan akuades untuk menghilangkan sisa-sisa kimia yang mungkin masih ada dan dinetralkan hingga mencapai pH netral. Kemudian sampel dikeringkan kembali dalam oven selama 24 jam pada suhu 60°C. Sampel yang telah disiapkan dan diolah selanjutnya disimpan dalam wadah kaca kedap udara untuk digunakan pada pengolahan air selanjutnya.

ADSORBSI SECARA BATCH

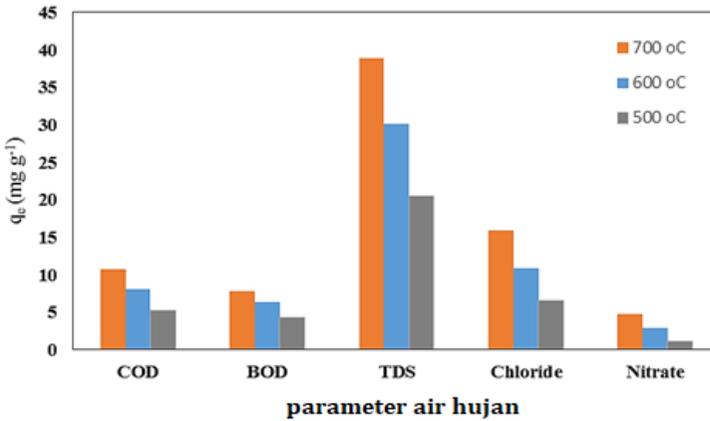
Eksperimen batch dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi adsorben enceng gondok dalam menghilangkan beberapa parameter kualitas air, antara lain *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Total Dissolved Solids* (TDS), kekeruhan, kekerasan total, *Electrical Conductivity* (EC), klorida, nitrat, dan warna. Reaktor *batch* berkapasitas 250 mL, dan digunakan adsorben sebanyak 500 mg dalam percobaannya. pH larutan pewarna diatur dengan menambahkan larutan HCl 0,1 N atau larutan NaOH 0,1 N sesuai kebutuhan. Adsorben enceng gondok yang telah diukur secara akurat kemudian ditambahkan ke dalam larutan pewarna. Setelah ditambahkan, adonan langsung

diaduk dalam jangka waktu tertentu. Sampel diambil dari reaktor *batch* dengan selang waktu yang telah ditentukan kemudian disentrifugasi selama 5 menit dengan kecepatan 4000 rpm untuk memisahkan seluruh partikel adsorben dari larutan. Konsentrasi pewarna yang tersisa dalam larutan diukur menggunakan spektroskopi UV-Vis pada panjang gelombang serapan maksimum (λ_{\max}) adalah 432 nm. Evaluasi kemampuan adsorben enceng gondok dalam menghilangkan berbagai parameter kualitas air.

ANALISIS KARAKTERISASI ADSORBEN ENCENG GONDOK

Ukuran partikel sampel adsorben enceng gondok yang dioptimalkan ditentukan menggunakan model penghitung Coulter LS230. Ukuran partikel adsorben enceng gondok kemudian dibandingkan dengan ukuran partikel adsorben yang tersedia secara komersial. Selain itu, morfologi permukaan sampel adsorben enceng gondok yang telah diimpregnasi pada suhu berbeda dianalisis menggunakan SEM. Permukaan adsorben enceng gondok juga dibandingkan dengan adsorben yang tersedia secara komersial. Setelah percobaan adsorpsi selesai, sampel bekas adsorben enceng gondok dikeringkan dalam oven pada suhu sekitar 60°C selama 1 jam untuk menghilangkan kadar airnya. Seluruh gambar SEM direkam dengan perbesaran 10.000x dan tegangan 20 kV. Pada gambar terdapat batang skala dengan panjang maksimum 20 μm dan sudut gambar sekitar 45° dari normal dalam kondisi vakum.

Melalui analisis tersebut, detail morfologi dan ukuran partikel adsorben enceng gondok yang telah dihasilkan pada berbagai suhu aktivasi dan membandingkannya dengan adsorben komersial. Pada Gambar 1. terlihat bahwa kapasitas adsorben enceng gondok terhadap COD, BOD, TDS, Klorida, dan Nitrat mengalami peningkatan pada suhu aktivasi 500 °C, 600 °C, dan 700 °C.

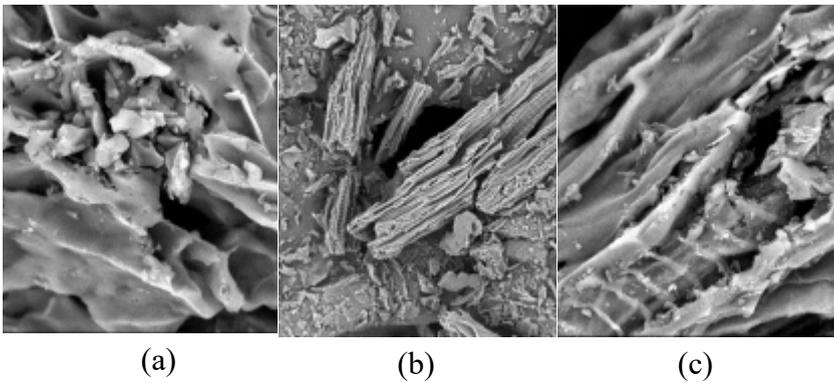


Gambar 1.1. Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Kapasitas Adsorpsi (Rasio impregnasi adsorben enceng gondok/HCl = 1:1,5)

Kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan karena adanya proses aktivasi enceng gondok, hal ini dapat dijelaskan oleh perubahan kimia dan fisika yang terjadi selama proses tersebut. Aktivasi ini melibatkan pemanasan enceng gondok pada suhu tinggi pada kondisi tertentu, dan dampak terhadap enceng gondok adalah sebagai berikut: Selama proses aktivasi, suhu tinggi menyebabkan dehidrasi, yaitu hilangnya air dari enceng gondok. Hal ini meningkatkan densitas dan luas permukaan adsorben, yang pada gilirannya meningkatkan kapasitas adsorpsi.

Selain itu, suhu tinggi memicu depolimerisasi molekul besar menjadi molekul yang lebih kecil. Hal ini mengakibatkan lebih banyak situs adsorpsi yang tersedia untuk berinteraksi dengan senyawa yang akan diadsorpsi. Proses aktivasi juga dapat mempengaruhi struktur biopolimer pada enceng gondok, sehingga terjadi redistribusi dan perubahan struktur yang dapat meningkatkan ketersediaan situs adsorpsi. Selama aktivasi, beberapa senyawa alifatik dapat diubah menjadi senyawa aromatik. Senyawa aromatik cenderung memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan senyawa alifatik. Ketika suhu aktivasi yang lebih tinggi digunakan, unsur-unsur non-karbon seperti nitrogen, oksigen, dan hidrogen dapat terurai menjadi gas dan cairan, meninggalkan kerangka karbon yang lebih padat dan

kaku. Hal ini juga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dengan meningkatkan luas permukaan tersedia adsorben. Namun perlu diperhatikan bahwa peningkatan suhu aktivasi dari 500 menjadi 700 °C hanya menghasilkan sedikit peningkatan kapasitas adsorpsi. Hal ini mungkin disebabkan oleh keterbatasan peningkatan kapasitas adsorpsi yang dapat dicapai dengan meningkatnya suhu. Pada titik tertentu, peningkatan suhu mungkin tidak lagi memberikan manfaat yang signifikan dalam peningkatan kapasitas adsorpsi.



Gambar 1.2. SEM Enceng gondok pada Suhu Aktivasi Berbeda (a) 500 °C (b) 600 °C (c) 700 °C

Gambar 1.2. menunjukkan deskripsi pemindaian SEM sampel adsorben enceng gondok yang memberikan gambaran penting mengenai perubahan struktural yang terjadi selama proses aktivasi. Proses ini melibatkan pemanasan sampel hingga suhu tinggi dalam kondisi tertentu, dan hasil pemindaian SEM mengungkapkan beberapa hal yang relevan: Pertama, perlu diperhatikan bahwa aktivasi adsorben enceng gondok telah mengakibatkan perubahan signifikan pada struktur pori di permukaan. dari sampel. Pori-pori ini muncul karena zat pengaktif yang menguap selama proses karbonisasi. Namun, perbedaan tampilan pori-pori dapat diamati pada sampel yang diaktifkan pada suhu berbeda. Ketika suhu aktivasi diatur pada 500 °C, tampaknya pori-pori belum berkembang sempurna atau terlihat. Hal ini

mungkin disebabkan karena proses aktivasi belum mencapai tingkat perkembangan pori yang maksimal pada suhu tersebut. Sedangkan pada sampel yang diaktivasi pada suhu 600 °C dan 700 °C, pori-pori terlihat jelas pada gambar SEM. Pori-pori ini memperlihatkan struktur seperti sarang lebah, menandakan perkembangan pori yang efektif pada permukaan adsorben yang merupakan hasil sintesis enceng gondok. Perubahan morfologi permukaan ini sangat relevan dalam konteks adsorpsi karena pori-pori yang terbentuk dapat berfungsi sebagai tempat adsorpsi yang efektif untuk menangkap dan mengikat molekul yang akan diadsorpsi.

Peningkatan perkembangan pori-pori pada suhu aktivasi yang lebih tinggi kemungkinan besar berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi yang diamati selama penelitian ini. Dengan demikian, pemindaian SEM memberikan pemahaman mendalam mengenai dampak aktivasi pada struktur pori sampel adsorben enceng gondok dan menggambarkan perubahan morfologi permukaan yang terjadi selama proses ini.

Hasil analisis ukuran partikel menunjukkan adanya perbedaan distribusi ukuran partikel antar adsorben enceng gondok yang diaktivasi pada berbagai temperatur. Sedangkan adsorben enceng gondok yang diaktivasi pada suhu 500 °C menunjukkan sedikit perbedaan distribusi ukuran partikel dibandingkan dengan adsorben pada suhu 600 °C dan 700 °C. Sekitar 50% partikel adsorben enceng gondok pada suhu 500 °C memiliki ukuran di bawah 60 µm, dan sekitar 92% berukuran di bawah 125 µm, dengan sekitar 90% partikel memiliki ukuran keseluruhan di bawah 100 µm. Namun, pada suhu aktivasi 600 °C dan 700 °C, adsorben enceng gondok memiliki sekitar 50% ukuran di bawah 46,04 µm (600 °C) dan 43,33 µm (700 °C), dengan sekitar 90% di bawah 97,87 µm (600 °C) dan 99,89 µm (700 °C). Secara keseluruhan, sekitar 90,04% (600 °C) dan 90,80% (700 °C) partikel adsorben enceng gondok memiliki ukuran di bawah 100 µm.

KAJIAN ISOTERMAL ADSORPSI

Isotermal adsorpsi merupakan alat matematika yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dan konsentrasi adsorbat pada suhu konstan. Interaksi antara adsorbat dan adsorben menggunakan beberapa model isotermal untuk menggambarkan proses adsorpsi pada enceng gondok seperti yang ditunjukkan pada pendekatan isotermal Langmuir persamaan (1).

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

Dimana, C_e adalah konsentrasi adsorbat (mg/L), q_e adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), K_L adalah konstanta kesetimbangan adsorpsi, dan q_m adalah kapasitas adsorpsi maksimum, dengan hasil ketetapan $K_L = 0.29$ L/mg dan $q_m = 79.36$ mg/g, sedangkan pada pendekatan isotermal Freundlich ditunjukkan pada Persamaan (2).

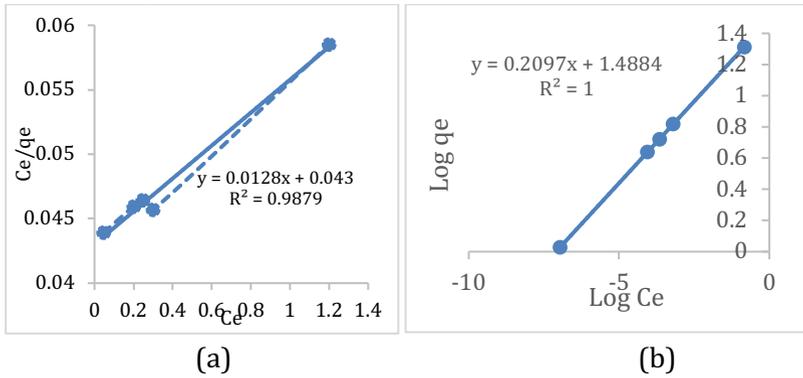
$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_F + \frac{1}{n} \text{Log } C_e \quad (2)$$

Nilai K_F dan n adalah konstanta isotherm Freundlich, sedangkan q_e merupakan kapasitas adsorpsi, serta C_e konsentrasi akhir adsorbat dengan $(L \cdot g^{-1})^n$, dengan hasil tetapan $K_F = 30.78$ mg/g, $n=4,77$

Dimana q_m adalah kapasitas adsorpsi monolayer maksimum (mg/g), K_L adalah konstanta isoterm Langmuir (L/mg), K_F adalah konstanta isoterm Freundlich (mg/g) $(L/g)^n$, n adalah intensitas adsorpsi. Dengan menggunakan model isoterm yang sesuai dan menggabungkan data eksperimen, sehingga hubungan antara konsentrasi adsorbat dan kapasitas adsorpsi pada enceng gondok dapat membantu dalam memahami karakteristik proses adsorpsi.

Nilai parameter yang dihasilkan dari model adsorpsi dua parameter ini telah dijelaskan pada Tabel 1.3., termasuk koefisien

korelasi (R^2) yang menggambarkan sejauh mana model tersebut sesuai dengan data eksperimen.



Gambar 1.3. Isotermal adsorpsi Langmuir (a) dan Freundlich (b)

Pada penelitian ini R^2 tertinggi sebesar 0,9879 diperoleh dari model isoterm Langmuir. Oleh karena itu, model Langmuir dianggap paling tepat untuk menjelaskan proses adsorpsi dalam penelitian ini. Model Langmuir menunjukkan energi adsorpsi tetap konstan pada masing-masing lokasi adsorpsi, dan setiap lokasi hanya dapat menampung satu molekul, tanpa interaksi antar molekul yang teradsorpsi. Hasil positif dalam penerapan model Langmuir menunjukkan bahwa sifat permukaan adsorben enceng gondok adalah seragam. Menurut model Langmuir, kapasitas adsorpsi maksimum teoritis ditentukan sebesar 80,34 mg/g. Selain itu nilai R_L (faktor separasi) juga dijelaskan dalam persamaan yang tidak tercantum di sini, yang digunakan untuk menentukan jenis adsorpsi yaitu tipe favorit, ireversibel, atau terbalik.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

Singkatnya, temuan ini menunjukkan bahwa model Langmuir paling tepat untuk menggambarkan adsorpsi pada adsorben enceng gondok yang diaktifkan pada 500 °C, dan model ini memberikan gambaran tentang sifat permukaan seragam dari adsorben. Dalam konteks faktor pemisahan R_L (Laju Pemisahan), nilai R_L yang dihitung untuk adsorben enceng gondok dalam

kisaran 0,054 hingga 0,009 menunjukkan sifat adsorpsi yang sangat baik. Artinya proses adsorpsi pada adsorben enceng gondok sangat menguntungkan dan efisien. Nilai R_L yang mendekati nol menunjukkan bahwa adsorpsi bersifat ireversibel, dan semakin mendekati nol maka proses adsorpsi semakin baik. Dengan demikian, berdasarkan nilai R_L yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa adsorben enceng gondok sangat efektif dalam proses adsorpsi air hujan dan proses ini mempunyai sifat adsorpsi yang sangat baik.

KAJIAN KINETIKA MODEL ADSORPSI

Penentuan kinetika adsorpsi mempunyai arti penting dalam pengembangan dan desain sistem adsorpsi. Hal ini karena kinetika adsorpsi memberikan pemahaman mendalam tentang berbagai aspek proses adsorpsi, seperti laju adsorpsi, mekanisme adsorpsi yang terlibat, dan langkah-langkah yang mengontrol laju reaksi. Pada Gajipara et al., (2023) melakukan eksperimen dengan model kinetika yang terbukti efektif dalam memodelkan proses adsorpsi. Masing-masing model kinetika yang digunakan pada model kinetika pseudo orde ke-1, orde ke-2, dan model kinetika Weber dan Morris yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.2. Dengan membandingkan data kinetika eksperimen dengan model. Model kinetika yang paling sesuai untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi yang terjadi pada enceng gondok. Hal ini mempunyai implikasi penting untuk memahami dan merancang sistem adsorpsi yang lebih efisien.

Model kinetika yang sering digunakan untuk memprediksi kinetika suatu adsorpsi adalah pseudo-1st-order pada persamaan (4), biasanya data q_e dan q_t sudah dipersiapkan dan akan mengalami perubahan terhadap waktu (t). Di sisi lain untuk pendekatan kinetika sesuai dengan pseudo-2nd-order ditunjukkan pada persamaan (5). Pendekatan model kinetika lainnya adalah Weber and Morris yang ditunjukkan persamaan (6).

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

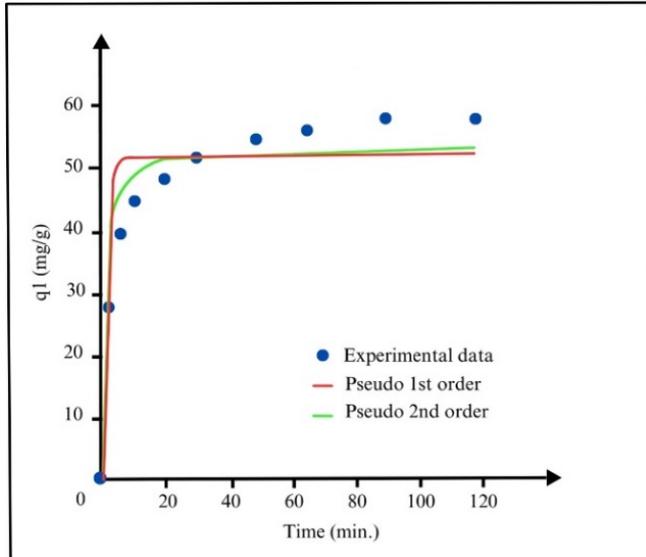
$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

Dimana, q_e dan q_t adalah jumlah adsorbat yang terserap pada kesetimbangan dan pada waktu (t) tertentu (mg/g), sedangkan k_1 adalah laju konstanta orde 1 (/min). sedangkan k_2 adalah laju konstanta orde 2 (/min).

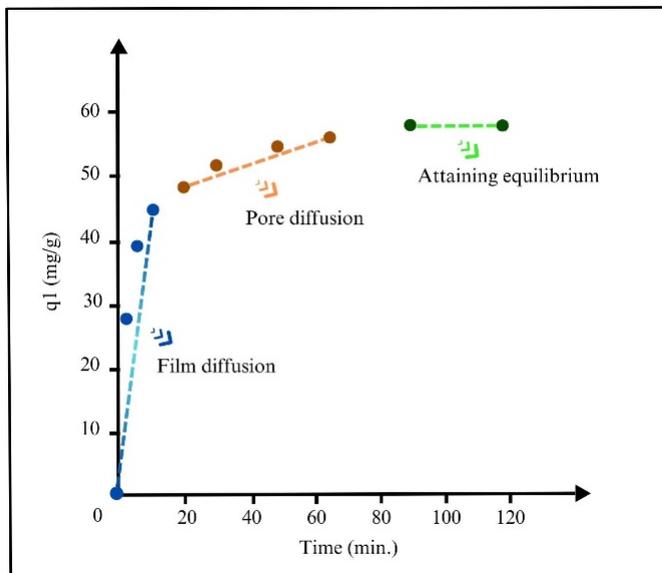
$$qt = k_d t^{1/2} \quad (6)$$

Dimana, q_t adalah jumlah adsorbat pada permukaan adsorben (mg/g), t adalah waktu tertentu (min), sedangkan k_d konstanta laju untuk model kinetika Weber dan Morris ($\text{mg} \cdot \text{min}^{0.5}/\text{g}$).

Gajipara et al., (2023) membandingkan data kinetika yang paling sesuai untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi yang terjadi pada eceng gondok. dengan I adalah ketebalan lapisan batas untuk model kinetik Weber dan Morris.



Gambar 1.4. Permodelan Kinetik dari Pseudo (Gajipara et al., 2023)



Gambar 1.5. Permodelan Kinetik dari Weber and Morries (Gajipara et al., 2023)

Tabel 1.1. Parameter Kinetik (Gajipara et al., 2023)

Model	Parameter	R ²
<i>pseudo-1st-order</i>	$q_e = 52.96 \text{ mg mg}^{-1}$ $k_t = 79.36 \text{ L min}^{-1}$	0.876
<i>pseudo-2nd-order</i>	$q_e = 54.05 \text{ mg g}^{-1}$ $k_2 = 0.02 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$ $k^*_2 = 1.08 \text{ min}^{0.5}$	0.914
<i>Weber and Morris</i>	$K_d = 2.82 \text{ mg g}^{-1} \text{ min}^{0.5}$ $I = 33.38 \text{ mg g}^{-1}$	0.835

Jika model kinetika pseudo orde kedua menunjukkan koefisien korelasi (R^2) tertinggi, yang berarti model tersebut lebih unggul dalam menjelaskan proses adsorpsi dibandingkan ke model pseudo orde pertama. Proses adsorpsi mempunyai banyak segi, meliputi difusi dan adsorpsi pada permukaan luar adsorben.

Proses ini dapat dibagi menjadi tiga langkah utama: difusi film, difusi pori, dan adsorpsi dan keseimbangan. Tahap pertama yaitu difusi film terjadi dengan cepat, sedangkan tahap kedua yaitu difusi pori berlangsung lebih lambat karena jumlah molekul pewarna dalam larutan berkurang dan jumlah situs aktif pada permukaan adsorben juga berkurang. Tahap ketiga yaitu adsorpsi dan mencapai kesetimbangan merupakan tahap yang paling lambat.

KAJIAN TERMODINAMIKA

Pengaruh suhu pada proses adsorpsi telah dianalisis oleh Gajipara et al, 2023 menggunakan Persamaan (1-3).

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_C \quad (1)$$

$$K_C = \frac{C_a}{C_e} \quad (2)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (3)$$

Dimana ΔG^0 adalah perubahan energi bebas Gibbs (kJ/mol), R adalah konstanta gas universal (8,314 J/mol K), T adalah suhu absolut (K), dan Kc adalah konstanta kesetimbangan termodinamika dengan C_s adalah jumlah zat warna yang teradsorpsi pada adsorben (mg/L), dan C_e adalah konsentrasi kesetimbangan suatu larutan (mg/L). Perubahan entalpi (ΔH^0) dan entropi (ΔS^0) dapat diperoleh dari plot van't Hoff. Dengan memplot grafik ΔG^0 versus T, ΔH^0 dan ΔS^0 dapat diperoleh berturut-turut sebagai kemiringan dan intersep.

Grafik ΔG^0 versus T yang diplot digunakan untuk menentukan parameter termodinamika seperti ΔH^0 (entalpi) dan ΔS^0 (entropi) pada proses adsorpsi. Parameter termodinamika yang dihitung tercantum pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2. Parameter Termodinamika (Gajipara et al, 2023)

ΔH^0	ΔS^0	R^2
(kJ mol ⁻¹)	(kJ mol ⁻¹ K)	
179,35	0,55	0,964

Nilai ΔG^0 yang negatif menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi secara spontan, hal ini sejalan dengan efektifnya penggunaan adsorben. Selain itu, kenaikan nilai ΔG^0 dengan

meningkatnya suhu menunjukkan bahwa proses adsorpsi menjadi lebih baik pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini dapat dijelaskan karena reaksi adsorpsi bersifat endotermik yang ditunjukkan dengan nilai ΔH° yang positif ($179,35 \text{ kJ mol}^{-1}$). Nilai ΔH° yang besar ini menunjukkan bahwa adsorpsi oleh adsorben merupakan reaksi yang membutuhkan energi, dan nilai ini berada dalam kisaran tipikal adsorpsi kimia. Selain itu, nilai positif ΔS° menandakan peningkatan derajat kebebasan pada situs aktif pada permukaan adsorben. Hal ini menunjukkan bahwa struktur permukaan adsorben mengalami perubahan selama proses adsorpsi, konsisten dengan efek aktivasi yang telah dibahas sebelumnya. Intinya, analisis termodinamika ini menawarkan pemahaman lebih lanjut tentang karakteristik adsorpsi ketika menggunakan adsorben enceng gondok, termasuk faktor-faktor seperti spontanitas, reaksi endotermik, dan perubahan struktural pada permukaan adsorben selama proses adsorpsi.

KESIMPULAN

Enceng gondok memiliki sifat adsorpsi yang sangat baik, dan filter yang dikembangkan terbukti efektif dalam menghilangkan berbagai kontaminan seperti COD, BOD, TDS, klorida, dan nitrat dari air hujan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa enceng gondok dapat digunakan sebagai proses pra-pengolahan air hujan yang efisien dan ramah lingkungan. Penerapan filter ini berpotensi meningkatkan kinerja sistem pengolahan air hujan secara keseluruhan. Temuan ini menunjukkan bahwa adsorben berbasis enceng gondok merupakan solusi yang menjanjikan dalam aplikasi pengolahan air, terutama di daerah yang memiliki akses terbatas terhadap metode pengolahan konvensional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kepada LPPM UNNES yang telah memberikan dana Penelitian Terapan Hilirisasi tahun 2023 dengan Nomor UN37/PPK.3.1/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Aigbe, U. O., Ukhurebor, K. E., Onyancha, R. B., Osibote, O. A., Darmokoesoemo, H., & Kusuma, H. S. (2021). Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, *14*, 2751-2774.
- Bachmann, S. A. L., Calvete, T., & Féris, L. A. (2021). Caffeine removal from aqueous media by adsorption: an overview of adsorbents evolution and the kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Science of the Total Environment*, *767*, 144229.
- Darpitamurti, G., Khotimah, N., & Putranta, H. (2022). Women rainwater harvesters in education on rainwater utilization. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA*, *72*(1), 15-31.
- Dehghani, M. H., Hassani, A. H., Karri, R. R., Younesi, B., Shayeghi, M., Salari, M., ... & Heidarinejad, Z. (2021). Process optimization and enhancement of pesticide adsorption by porous adsorbents by regression analysis and parametric modelling. *Scientific reports*, *11*(1), 11719.
- Emenike, E. C., Adeniyi, A. G., Omuku, P. E., Okwu, K. C., & Iwuozor, K. O. (2022). Recent advances in nano-adsorbents for the sequestration of copper from water. *Journal of Water Process Engineering*, *47*, 102715.
- Gajipara, Y. N., Balpande, D. N., Patil, P. S., Yadav, A. A., Yadav, M. D., & Patwardhan, A. V. (2023). Jackfruit Leaf-Based Natural Adsorbent for the Efficient Removal of Auramine O Dye. *Water Conservation Science and Engineering*, *8*(1), 33.
- Hasanpour, M., & Hatami, M. (2020). Application of three dimensional porous aerogels as adsorbent for removal of heavy metal ions from water/wastewater: A review study. *Advances in Colloid and Interface Science*, *284*, 102247.
- Ighalo, J. O., Ogunniyi, S., Adeniyi, A. G., Igwegbe, C. A., Sanusi, S. K., & Adeyanju, C. A. (2022). Competitive adsorption of heavy metals in a quaternary solution by sugarcane bagasse-

- LDPE hybrid biochar: equilibrium isotherm and kinetics modelling. *Chemical Product and Process Modeling*, 18(2), 231-246.
- Ighalo, J. O., Ogunniyi, S., Adeniyi, A. G., Igwegbe, C. A., Sanusi, S. K., & Adeyanju, C. A. (2022). Competitive adsorption of heavy metals in a quaternary solution by sugarcane bagasse-LDPE hybrid biochar: equilibrium isotherm and kinetics modelling. *Chemical Product and Process Modeling*, 18(2), 231-246.
- Majd, M. M., Kordzadeh-Kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., & Sillanpää, M. (2022). Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020). *Science of The Total Environment*, 812, 151334.
- Marszałek, A., Kamińska, G., & Salam, N. F. A. (2022). Simultaneous adsorption of organic and inorganic micropollutants from rainwater by bentonite and bentonite-carbon nanotubes composites. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102550.
- Marszałek, A. (2022). Encapsulation of halloysite with sodium alginate and application in the adsorption of copper from rainwater. *Archives of Environmental Protection*, 48(1).
- Morales-Figueroa, C., Castillo-Suárez, L. A., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., & Teutli-Sequeira, E. A. (2023). Treatment processes and analysis of rainwater quality for human use and consumption regulations, treatment systems and quality of rainwater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-24.
- Muktiningsih, S. D., & Putri, D. M. A. R. M. S. (2021, April). Study of the potential use of rainwater as clean water with simple media gravity filters: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 733, No. 1, p. 012147). IOP Publishing.
- Mussa, Z. H., Al-Ameer, L. R., Al-Qaim, F. F., Deyab, I. F., Kamyab, H., & Chelliapan, S. (2023). A comprehensive review on adsorption of methylene blue dye using leaf waste as a biosorbent: isotherm adsorption, kinetics, and

thermodynamics studies. *Environmental monitoring and assessment*, 195(8), 940.

- Nataadmadja, A. D., & Purnama, A. C. (2023, April). Improving rainwater quality by using porous asphalt with natural adsorbents. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2594, No. 1). AIP Publishing.
- Ponnuchamy, M., Kapoor, A., Senthil Kumar, P., Vo, D. V. N., Balakrishnan, A., Mariam Jacob, M., & Sivaraman, P. (2021). Sustainable adsorbents for the removal of pesticides from water: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2425-2463.
- Sahu, J. N., Kapelyushin, Y., Mishra, D. P., Ghosh, P., Sahoo, B. K., Trofimov, E., & Meikap, B. C. (2023). Utilization of ferrous slags as coagulants, filters, adsorbents, neutralizers/stabilizers, catalysts, additives, and bed materials for water and wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 138201.
- Solangi, N. H., Kumar, J., Mazari, S. A., Ahmed, S., Fatima, N., & Mubarak, N. M. (2021). Development of fruit waste derived bio-adsorbents for wastewater treatment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125848.
- Tran, D. T., Vu, D. T., & Le, M. C. (2023). Adsorptive removal of heavy metals from water using thermally treated laterite: an approach for production of drinking water from rain water. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1-13.