

PENGARUH PROSES AKTIVASI TERHADAP KINERJA ADSORBEN ORGANIK DARI KULIT BUAH MELON DALAM MENYERAP ION LOGAM Cr(III) DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI

Sri Martini* dan Erna Yuliwati

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik,

Universitas Muhammadiyah Palembang

Program Studi Teknik Kimia Program Magister, Program Pasca Sarjana

Universitas Muhammadiyah Palembang

Jalan Ahmad Yani 13 Ulu Seberang Ulu II Palembang

Telp/Fax: (0711) 513022/ (0711) 513078

*Corresponding author: sri_martini79@yahoo.co.id

Abstrak

Logam berat Cr(III) termasuk polutan yang membahayakan kesehatan manusia dan makhluk biotik lainnya sehingga limbah industri yang mengandung logam tersebut harus melalui proses pengolahan intensif sebelum dialirkan ke pembuangan akhir, salah satunya melalui proses adsorpsi. Dalam penelitian ini dilakukan adsorpsi ion Cr(III) menggunakan adsorbent yang terbuat dari kulit buah melon sehingga bernilai ekonomis tinggi. Perbandingan perlakuan aktivasi yang terdiri dari aktivasi secara kimia menggunakan KOH, H₃PO₄, NaOH, dan ZnCl₂, aktivasi secara fisika melalui karbonisasi pada temperatur yang bervariasi (200, 300, dan 400 °C) dan aktivasi hybrid dianalisa dan dideskripsikan dengan jelas. Selanjutnya, didapatkan beberapa poin utama yaitu adsorbent yang mendapat perlakuan aktivasi ganda menghasilkan nilai efisiensi penurunan konsentrasi polutan yang lebih tinggi dibanding aktivasi tunggal, aktivasi kimia dengan KOH dan H₃PO₄ bersifat lebih reaktif di banding menggunakan NaOH dan ZnCl₂, sedangkan peningkatan temperatur karbonisasi berbanding lurus dengan laju peningkatan nilai efisiensi penyerapan Cr(III).

Kata Kunci : adsorpsi, Cr(III), kulit buah melon, aktivasi kimia, karbonisasi.

Abstract

Heavy metals including Cr(III) are hazardous materials threatening human health and other biotic creatures, so industrial wastewater containing that metal needs to be intensively treated before final discharging to open environment. This research investigated Cr(III) ions adsorption using low cost melon peel derived adsorbent. The comparison among chemical activation treatment using KOH, H₃PO₄, NaOH, dan ZnCl₂, physical activation under different temperatures (200, 300, dan 400 °C), and hybrid activation treatments were analysed and described well. Furthermore, it was found that hybrid treatment resulted in the highest removal efficiency compared to sole treatment, and chemical activation using KOH dan H₃PO₄ was more reactive than NaOH, dan ZnCl₂. Other than that, increasing carbonization temperature will increase the removal efficiency of Cr(III) to some extent.

Keywords: adsorption, Cr(III), melon peels, chemical activation, carbonization.

PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan sektor industri secara tidak langsung telah memberikan dampak negatif terhadap kualitas lingkungan hidup akibat limbah yang dihasilkan dari aktifitas industri tersebut. Limbah yang tidak diolah dengan baik masih mengandung berbagai polutan yang dapat merusak ekosistem sehingga merugikan kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya termasuk merusak kelestarian lingkungan. Beberapa jenis industri yang umumnya menghasilkan limbah dalam jumlah dan tingkat kontaminasi yang cukup tinggi adalah industri pengolahan minyak bumi, minyak makan, farmasi, kertas, cat, pestisida, herbisida dan tekstil. Limbah sebagai hasil akhir sampingan dalam proses pengolahan industri manufaktur dapat berwujud limbah cair, padat maupun gas. Limbah cair merupakan air bekas pakai dari berbagai proses penggunaan yang telah mengandung bahan pencemar atau polutan berupa senyawa organik dan anorganik, dan umumnya memiliki kuantitas yang lebih besar dibanding limbah padat maupun gas serta memiliki tipikal

kandungan yang beragam, antara lain; minyak, alkohol dan logam berat yang bersifat karsinogenik (Gogate and Pandit, 2004; Abedi dkk., 2016).

Salah satu metode yang digunakan untuk mengolah air dan limbah cair yang terkontaminasi berbagai polutan tersebut adalah metode adsorpsi. Dalam proses adsorpsi, digunakan adsorben yang berfungsi untuk menyerap polutan. Adsorbent dapat terbuat dari mineral non organik, bahan organik sintetik atau bahan organik alami. Adsorben yang berasal dari material non organik memiliki tingkat daya apung dan daya serap terhadap minyak dan logam yang relatif rendah, sedangkan penggunaan adsorbent dari bahan sintesis cenderung mencemari lingkungan setelah habis masa pakainya (Chai dkk., 2015; Nejadshafiee and Islami, 2019). Keadaan tersebut mendorong banyak pihak untuk mencari alternatif bahan dasar adsorbent yang bersifat ramah terhadap lingkungan dengan tingkat ketersediaan yang stabil, ekonomis serta memiliki efisiensi yang tinggi, dan hal tersebut merupakan karakteristik adsorbent yang terbuat dari bahan organik termasuk sisa hasil pertanian dan produk turunannya (Ibrahim dkk., 2009; Ahmad dkk., 2005; Doshi dkk., 2018; Peng dkk., 2013).

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai hasil penelitian terhadap pemanfaatan sisa limbah produk pertanian sebagai bahan dasar pembuatan adsorbent alami telah dilakukan, termasuk pendayagunaan bagian tanaman dan buah yang tidak dapat dikonsumsi seperti kulit, cangkang, dan biji tanaman untuk mengurangi konsentrasi beberapa kontaminan yang umum terdapat dalam limbah cair yaitu logam berat, minyak, phenol dan lain-lain (El-Naas dkk., 2010; Nejadshafiee and Islami, 2019; Coelho dkk., 2014; Sadeek dkk., 2015; Basu dkk., 2019; Bhatnagar dkk., 2015).

Meskipun demikian, pemanfaatan bahan organik mentah sebagai adsorbent secara langsung atau tanpa melalui proses aktivasi umumnya menghasilkan tingkat penyerapan yang terbatas, terutama untuk limbah industri yang mengandung tingkat polutan yang tinggi. Sehingga diperlukan berbagai metode modifikasi untuk meningkatkan kinerja adsorbent tersebut yang bertujuan untuk menghasilkan persentase penurunan konsentrasi polutan dan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi (Bhatnagar dkk., 2015; Bhatnagar and Sillanpää, 2010).

Dalam penelitian ini, penulis melakukan pengujian tingkat penyerapan logam Cr(III) sebagai representasi dari logam berat yang umumnya terkandung dalam berbagai limbah cair industri, dalam kaitannya dengan pengaruh teknik modifikasi selama proses preparasi adsorbent yang terbuat dari bahan organik berupa kulit buah melon. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tingkat perbandingan efisiensi berbagai proses modifikasi yang dilakukan secara terpisah, yaitu meliputi teknik perendaman menggunakan larutan kimia (chemical impregnation) menggunakan larutan kimia yang berbeda yaitu H_3PO_4 , NaOH, dan HCl, dan teknik karbonisasi dengan variasi suhu dengan kisaran 200, 300 dan 400 °C. Pada tahap akhir, dilakukan pengujian dengan membandingkan proses aktivasi tunggal dan terintegrasi (hybrid methods). Dengan demikian akan diperoleh hasil yang mendeskripsikan perbedaan kinerja adsorbent yang berhubungan dengan proses aktivasi awal.

METODE PENELITIAN

Limbah cair

Dalam penelitian ini, limbah cair yang digunakan adalah limbah cair minyak bumi yang memiliki karakteristik seperti yang tertera pada table 1. Pada tahap awal, dilakukan proses penyaringan terhadap sampel limbah cair tersebut. Hal ini dilakukan untuk menyaring partikel padatan yang berukuran relatif besar yang dapat menghambat proses pemurnian limbah lebih lanjut. Penelitian ini menggunakan reagent analitis yang terstandar. Perubahan pH larutan dilakukan dengan menggunakan larutan HCl atau NaOH.

Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Minyak Bumi yang digunakan dalam Penelitian

Parameter	Nilai Konsentrasi
COD	850
Oil	290
pH	9
Cr(III)	6.115
TDS	1500

*Konsentrasi dalam mg/L, kecuali pH

Pembuatan Adsorben Awal

Bahan organik yang digunakan untuk proses pembuatan adsorbent adalah sisa konsumsi buah melon yang umumnya dibuang yaitu kulit buah melon. Limbah melon ini diperoleh dari sisa konsumsi rumah tangga. Setelah dikumpulkan, kulit buah melon tersebut dibersihkan dari sisa daging buah yang masih menempel, lalu dicuci berulang kali sehingga didapatkan material kulit buah melon yang bersih dari berbagai partikel pengotor. Selanjutnya bahan organik yang sudah dicuci tersebut dikeringkan pada suhu 105 °C selama 48 jam dengan menggunakan oven laboratorium. Kulit melon yang telah kering lalu dipotong dadu untuk selanjutnya diproses menggunakan mesin penggiling mekanik (mechanical grinder) hingga membentuk butiran (powder). Kemudian bahan organik yang telah melalui proses tersebut diayak untuk menyeragamkan ukuran butiran adsorbent menggunakan alat pengayak terstandar (British standard sieves of 106 µm).

Proses Aktivasi

Untuk proses aktivasi secara kimia dilakukan dengan metode perendaman material kulit melon yang telah diproses pada tahap sebelumnya ke dalam 0,1 M larutan yang ditentukan (KOH, H₃PO₄, NaOH, dan ZnCl₂) selama 24 jam pada suhu ruangan dengan ratio 1:1 w/w. Setelah proses aktivasi, bahan adsorbent dipisahkan melalui proses penyaringan. Pencucian menggunakan air deionisasi, dan pengeringan dalam oven selama 48 jam.

Proses aktivasi karbonisasi dilakukan untuk memperoleh karbon aktif. Proses ini dilakukan dengan cara meletakkan material adsorbent yang telah melalui proses preparasi awal ke dalam tungku pembakar laboratorium (muffle furnace) pada suhu yang ditentukan (200, 300, dan 400 °C) selama 60 menit. Selanjutnya adsorbent didinginkan pada suhu ruang.

Proses hybrid dilakukan dengan melakukan proses aktivasi kimia terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan proses karbonisasi sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya.

Adsorbent kulit melon mentah (raw) dan yang telah diaktivasi (activated sorbent) disimpan dalam wadah plastik yang telah disterilisasi dan bersifat kedap udara untuk digunakan pada tahap eksperimen adsorpsi.

Proses Adsorpsi Dan Analisa

Limbah cair minyak bumi yang telah disaring dan diukur dengan volume tertentu menggunakan gelas ukur dituangkan ke dalam botol gelas. Selanjutnya adsorbent yang telah diketahui jumlahnya ditambahkan ke dalam botol gelas yang berisi limbah lalu botol ditutup rapat menggunakan penutup yang sesuai. Kemudian botol tersebut, termasuk botol larutan indikator, diletakkan ke dalam inkubator digital (*Thermo Line Scientific Orbital Incubator shaker*) dengan lama waktu 30 menit, temperatur ruang dan kecepatan putar yang ditentukan secara seragam. Kemudian dilakukan pengukuran reduksi polutan dengan mempertimbangan pengaruh waktu kontak, temperatur, pH larutan dan dosis adsorbent.

Konsentrasi logam diukur menggunakan alat analisa khusus kandungan logam (*atomic absorption spectroscopy, Perkin Elmer*). Nilai efisiensi penurunan kandungan logam dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

Efisiensi penurunan polutan (%);

$$(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \% \quad (1)$$

Kapasitas adsorpsi (mg/g);

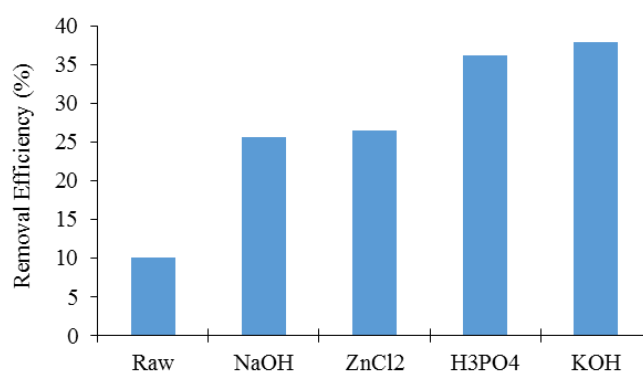
$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

Di mana C_0 dan C_e adalah konsentrasi awal dan konsentrasi akhir ion logam Cr(III) dalam sample limbah (mg/L), V dan m adalah volume sampel limbah (L) dan massa adsorbent (g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh proses aktivasi secara kimia

Proses aktivasi material adsorbent melibatkan tahap pengontakan material tersebut dengan larutan kimia yang berfungsi untuk mengaktifkan pori dan sisi permukaan adsorbent. Proses ini dapat dilakukan sebagai proses pengaktifan tunggal, atau terintegrasi dengan proses karbonisasi yang bisa diaplikasikan sebelum atau sesudah karbonisasi dilakukan. Dalam penelitian ini, beberapa larutan kimia yaitu NaOH, ZnCl₂, H₃PO₄, dan KOH dimanfaatkan sebagai media pengaktif di mana material adsorbent yang telah melewati proses preparasi awal dikontakan selama masing – masing 30 menit sebelum adsorbent tersebut dikeringkan dan digunakan untuk mengadsorpsi kandungan logam Cr(III) pada limbah cair minyak bumi. Berdasarkan hasil eksperimen, didapatkan profil nilai efisiensi penurunan konsentrasi (removal efficiency) polutan Cr(III) yang menunjukkan pengaruh masing – masing agen pengaktif terhadap peningkatan kinerja adsorbent sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengaruh proses aktivasi secara kimia terhadap peningkatan kinerja adsorbent menggunakan larutan yang berbeda.

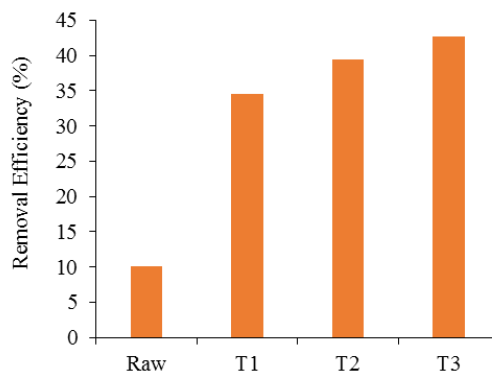
Berdasarkan Gambar 1, diketahui bahwa proses aktivasi secara kimia terbukti dapat meningkatkan kinerja adsorbent. Pada adsorbent mentah (raw) yang tidak mendapat perlakuan baik secara fisika atau kimia, efisiensi penurunan konsentrasi logam Cr(III) yang didapatkan hanya sebesar 10,05%. Nilai tersebut tergolong rendah sehingga adsorpsi menjadi kurang efektif apabila diterapkan dalam skala industri menggunakan limbah industri dengan tingkat konsentrasi polutan yang tinggi. Lalu setelah dilakukan proses aktivasi kimia, terlihat peningkatan kemampuan adsorbent dalam menyerap polutan logam Cr(III), dimana peningkatan kinerja adsorbent tertinggi terjadi pada biomassa yang mendapat perlakuan aktivasi kimia menggunakan larutan KOH, yang menunjukkan efisiensi penurunan konsentrasi logam sebesar 37,8 %, dan diikuti oleh H₃PO₄ dengan nilai efisiensi penurunan 3,22 %.

Peningkatan yang cukup signifikan tersebut dipengaruhi oleh peningkatan nilai dehidrasi dan dekomposisi pirolitik dalam materi adsorbent (Feng dkk., 2011). Adanya perbedaan nilai efisiensi antara satu media aktivasi kimia dengan yang lainnya dapat didasarkan pada asumsi bahwa terjadi perbedaan kemampuan larutan tersebut dalam memfasilitasi proses dekomposisi pirolitik dan pembentukan struktur terkait pada sisi pori dan permukaan adsorbent aktif (cross-link structure) (Yorgun and Yildiz, 2015). Hal tersebut juga berhubungan dengan perbedaan kemampuan masing – masing larutan kimia dalam meningkatkan karakteristik porositas adsorbent dan area permukaan aktifnya. Selain itu, sifat porositas yang diinisiasi oleh media larutan kimia tersebut akan tetap berlangsung dalam struktur internal material yang mengandung lignocellulosic, yang merupakan salah satu unsur yang terdapat pada material organik yang berperan dalam proses adsorpsi (Danish and Ahmad, 2018). Dengan demikian, perbedaan profil efisiensi dapat terjadi pada biomassa yang mendapat perlakuan aktivasi kimia meskipun menggunakan larutan yang tergolong asam atau basa yang sama kuat. Hal tersebut juga menjadi alasan terhadap pembahasan untuk perbedaan nilai

efisiensi penurunan Cr(III) dari biomassa yang diaktivasi dengan larutan NaOH dan ZnCl₂ yang masing – masing memperoleh nilai efisiensi sebesar 25,6 dan 26,4 %.

Pengaruh proses aktivasi secara fisika

Selain secara kimia, proses aktivasi secara fisika juga dapat menjadi pilihan untuk meningkatkan nilai efisiensi penurunan konsentrasi polutan. Sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 2, terjadi peningkatan kemampuan adsorbent dalam memurnikan limbah cair yang mengandung ion logam Cr(III).



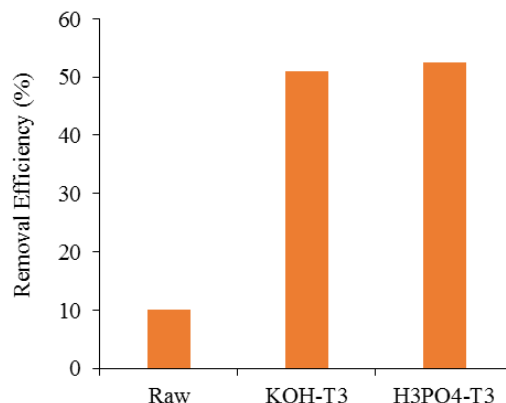
Gambar 2. Pengaruh aktivasi karbonisasi adsorbent terhadap efisiensi penurunan ion logam Cr(III) (T1= 200 °C, T2= 300 °C, T3= 400 °C)

Berdasarkan hasil eksperimen yang tertera pada gambar 2, terlepas dari nilai temperatur yang digunakan, didapatkan kesimpulan bahwa karbonisasi merupakan tahapan yang efektif meningkatkan daya serap biomassa karena terjadi peningkatan efisiensi penurunan konsentrasi ion Cr(III) yang signifikan, dimana adsorbent mentah (raw) hanya memiliki nilai efisiensi penurunan polutan sebesar 10,05 %, sedangkan adsorbent dari kulit buah melon yang telah dikarbonisasi pada temperatur 200, 300 dan 400 °C masing – masing memiliki nilai efisiensi sebesar 34,58; 39,49; dan 42,76 %. Peningkatan ini terjadi karena proses karbonisasi secara aktif dapat mempengaruhi tingkat distribusi ukuran pori, volume pori, dan area permukaan biomassa yang kontak dengan sampel limbah. Distribusi pori pada karbon aktif merupakan hal esensial yang dapat digunakan untuk menunjukkan nilai heterogenitas struktur karbon dan struktur internal karbon yang solid sehingga dapat mengikat polutan lebih banyak dan dengan ikatan yang lebih kuat (Ismadji and Bhatia, 2001). Selain itu, meskipun tidak signifikan, perbedaan level temperatur pembakaran menghasilkan perbedaan profil nilai efisiensi penurunan ion Cr(III) dimana peningkatan temperatur karbonisasi berbanding lurus dengan peningkatan nilai efisiensi pengurangan polutan yang menjadi target. Secara teoritis, hal tersebut dapat didasarkan pada asumsi bahwa temperatur karbonisasi memiliki pengaruh yang penting terhadap morfologi and luas permukaan adsorbent serta ukuran pori (Tseng dkk., 2003). Selain itu laju peningkatan nilai temperatur pada tingkatan tertentu dapat meningkatkan area muka adsorbent yang teraktivasi sekaligus mempengaruhi material yang bersifat volatile dalam adsorbent yang berkaitan dengan kemampuan adsorbent menyerap dan mengakumulasi polutan (Malarvizhi and Ho, 2010). Meskipun demikian, tidak dapat dipungkiri bahwa peningkatan nilai temperatur tersebut akan berpengaruh pada tingkat energi yang dikonsumsi alat pembakar sehingga apabila profil perbedaan nilai efisiensi tidak terpaut jauh, maka dapat disimpulkan bahwa ketiga level temperatur karbonisasi tersebut memiliki nilai efisiensi dan efektifitas yang relatif sama.

Pengaruh proses aktivasi terintegrasi (hybrid)

Berdasarkan studi literatur, diketahui bahwa proses modifikasi tunggal memiliki kemampuan yang lebih terbatas dalam hal efisiensi dan efektifitas adsorbent dalam mengolah berbagai polutan dalam limbah cair, termasuk limbah yang mengandung polutan organik dan non organik seperti minyak, phenol, dan logam yang bersifat karsinogenik sehingga proses aktivasi yang terintegrasi atau yang bersifat hybrid dapat menjadi salah satu solusi dalam meningkatkan daya adsorpsi pada

massa adsorbent (Martini dkk., 2020; Wahi dkk., 2013). Berdasarkan hasil penelitian di laboratorium, didapatkan profil peningkatan kinerja adsorbent sebagaimana yang tertera pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh proses aktivasi adsorbent secara hybrid terhadap efisiensi penurunan ion logam Cr(III)

Pada Gambar 3, diketahui bahwa terjadi lonjakan nilai efisiensi penurunan konsentrasi ion logam Cr(III) dari 10.05% pada adsorbent mentah tanpa perlakuan aktivasi menjadi lebih dari 51% untuk adsorbent yang mendapatkan perlakuan aktivasi hybrid. Dibandingkan dengan peningkatan kinerja adsorbent yang hanya mendapat perlakuan aktivasi tunggal (Gambar 1 dan 2), terjadi peningkatan yang cukup signifikan pada adsorbent dengan aktivasi hybrid. Peningkatan laju efisiensi ini dilandasi oleh peningkatan luas area permukaan aktif adsorbent dan volume pori internal (mesoporous volume) adsorbent tersebut sebagai akibat positif dari aktivasi ganda secara kimia dan fisika. Dimana proses perendaman kimia memainkan peranan lebih penting dalam hal pembentukan pori, volume pori dan permukaan aktif sehingga adsorbent menjadi unggul sebagai precursor proses separasi polutan dari larutan air dan limbah cair, sedangkan proses karbonisasi menunjang peningkatan jumlah kandungan karbon dalam materi adsorbent yang berkorelasi positif dengan peningkatan nilai efisiensi (Danish and Ahmad, 2018; Bansal and Goyal, 2005; Daza dkk., 1986).

SIMPULAN

Artikel ini melaporkan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu terhadap proses adsorpsi polutan ion logam Cr(III) dalam limbah cair minyak bumi dengan menggunakan adsorbent yang terbuat dari kulit buah melon. Adsorbent tersebut mendapat perlakuan tertentu yang berbeda yaitu berupa perlakuan dasar yang terkategori adsorbent mentah (raw), adsorbent yang diaktivasi secara kimia (chemically activated adsorbent) menggunakan larutan kimia NaOH, ZnCl₂, H₃PO₄, dan KOH secara terpisah, adsorbent yang mendapat perlakuan secara fisika dengan proses karbonisasi (carbonized activated carbon) pada temperatur 200, 300 dan 400 °C serta adsorbent yang mendapat perlakuan aktivasi ganda (hybrid). Secara keseluruhan proses adsorpsi dilakukan pada temperatur, lama waktu kontak dan pH larutan yang sama. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa proses aktivasi ganda memperoleh nilai efisiensi penurunan konsentrasi ion logam yang paling tinggi dengan persentase lebih dari 51%, sedangkan adsorbent yang mendapat perlakuan secara kimia dan karbonisasi secara tunggal menunjukkan efisiensi yang relatif kompetitif. Selain itu didapatkan hubungan yang berbanding lurus antara kenaikan temperatur karbonisasi dengan kenaikan kinerja adsorbent dalam menyerap polutan Cr(III). Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa perlakuan baik secara kimia atau fisika dapat meningkatkan kinerja adsorbent samapi pada tingkatan tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedi, S., Zavvar Mousavi, H., & Asghari, A. (2016). Investigation of heavy metal ions adsorption by magnetically modified aloe vera leaves ash based on equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(29), 13747-13759.
- Ahmad, A. L., Sumathi, S., & Hameed, B. H. (2005). Adsorption of residue oil from palm oil mill

- effluent using powder and flake chitosan: Equilibrium and kinetic studies. *Water Research*, 39(12), 2483-2494, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.035>.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). Activated carbon adsorption: CRC press.
- Basu, M., Guha, A. K., & Ray, L. (2019). Adsorption of Lead on Lentil Husk in Fixed Bed Column Bioreactor. *Bioresource Technology*, 283, 86-95.
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2010). Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment—a review. *Chemical Engineering Journal*, 157(2), 277-296.
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., & Witek-Krowiak, A. (2015). Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification – A review. *Chemical Engineering Journal*, 270, 244-271, doi:[10.1016/j.cej.2015.01.135](https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135).
- Chai, W., Liu, X., Zou, J., Zhang, X., Li, B., & Yin, T. (2015). Pomelo peel modified with acetic anhydride and styrene as new sorbents for removal of oil pollution. *Carbohydrate Polymers*, 132, 245-251, doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.060>.
- Coelho, G. F., Gonçalves Jr, A. C., Tarley, C. R. T., Casarin, J., Nacke, H., & Francziskowski, M. A. (2014). Removal of metal ions Cd (II), Pb (II), and Cr (III) from water by the cashew nut shell *Anacardium occidentale* L. *Ecological Engineering*, 73, 514-525.
- Danish, M., & Ahmad, T. (2018). A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 1-21.
- Daza, L., Mendioroz, S., & Pajares, J. (1986). Preparation of Rh/active carbon catalysts by adsorption in organic media. *Carbon*, 24(1), 33-41.
- Doshi, B., Sillanpää, M., & Kalliola, S. (2018). A review of bio-based materials for oil spill treatment. *Water Research*, 135, 262-277, doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.034>.
- El-Naas, M. H., Al-Zuhair, S., & Alhaija, M. A. (2010). Reduction of COD in refinery wastewater through adsorption on date-pit activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 750-757, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.002>.
- Feng, N., Guo, X., Liang, S., Zhu, Y., & Liu, J. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 49-54.
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3-4), 501-551, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7).
- Ibrahim, S., Ang, H.-M., & Wang, S. (2009). Removal of emulsified food and mineral oils from wastewater using surfactant modified barley straw. *Bioresource Technology*, 100(23), 5744-5749, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.070>.
- Ismadji, S., & Bhatia, S. (2001). A modified pore-filling isotherm for liquid-phase adsorption in activated carbon. *Langmuir*, 17(5), 1488-1498.
- Malarvizhi, R., & Ho, Y.-S. (2010). The influence of pH and the structure of the dye molecules on adsorption isotherm modeling using activated carbon. *Desalination*, 264(1-2), 97-101.
- Martini, S., Afroze, S., & Roni, K. A. (2020). Modified eucalyptus bark as a sorbent for simultaneous removal of COD, oil, and Cr (III) from industrial wastewater. *Alexandria Engineering Journal*.
- Nejadshafiee, V., & Islami, M. R. (2019). Adsorption capacity of heavy metal ions using sultone-modified magnetic activated carbon as a bio-adsorbent. *Materials Science and Engineering: C*, 101, 42-52.
- Peng, D., Lan, Z., Guo, C., Yang, C., & Dang, Z. (2013). Application of cellulase for the modification of corn stalk: Leading to oil sorption. *Bioresource Technology*, 137, 414-418, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.178>.
- Sadeek, S. A., Negm, N. A., Hefni, H. H., & Wahab, M. M. A. (2015). Metal adsorption by agricultural biosorbents: Adsorption isotherm, kinetic and biosorbents chemical structures. *International Journal of Biological Macromolecules*, 81, 400-409.
- Tseng, R.-L., Wu, F.-C., & Juang, R.-S. (2003). Liquid-phase adsorption of dyes and phenols using pinewood-based activated carbons. *Carbon*, 41(3), 487-495.
- Wahi, R., Chuah, L. A., Choong, T. S. Y., Ngaini, Z., & Nourouzi, M. M. (2013). Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: an overview. *Separation and Purification Technology*, 113, 51-63.

Yorgun, S., & Yıldız, D. (2015). Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with H₃PO₄. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 53, 122-131, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.032>.