

Karakteristik Magnetic Biochar Sebagai Adsorben Untuk Pemanfaatan Kembali Buangan Akhir POME Untuk Air Baku Industri

Kesni Savitri^a, David Andrio^b, Zuchra Helwani^c

^aTeknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

^bTeknik Lingkungan, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

^cTeknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

INFO ARTIKEL

keywords:

Adsorption, characterization, magnetic biochar, palm frond, POME

*corresponding author:

Email: keznisavitri88@gmail.com

ABSTRACT

The current problem in the Palm oil industry is POME's final discharge failed to comply with discharge standards. This study aims to treat POME final discharge using magnetic biochars (MBC) and treated water can be reused as raw water for the palm oil industry. MBC were successfully produced from palm fronds through the pyrolysis process together with FeCl₃.6H₂O modification. MBC were characterized by acquiring elemental, functional groups, morphological and magnetic properties of adsorbent. The characterization showed embedded iron oxide crystals within the biochar structure with a magnetic strength of 12,14 emu/g which can assist the separation process of the powdered adsorbent from the treated water. The highest removal of COD, TSS, and color was 72.72%, 77.95%, and 84.30%, respectively with an 8.55 g/l magnetic biochar dosage and 150 minutes contact time. However, the results of the final POME effluent treatment have not all of the parameters reached the industrial water quality standard class 3.

1. PENDAHULUAN

Proses ekstraksi minyak sawit membutuhkan 5 – 7,5 ton air untuk memproduksi 1 ton minyak sawit, dimana lebih dari 50% akan menjadi limbah cair atau palm oil mill effluent (POME) (Loh dkk., 2013 dan Munandar dkk., 2016). Kandungan dari POME adalah air (95-96%), minyak (0,6-0,7%), total padatan sebesar 4-5% dan memiliki kandungan organik yang tinggi yaitu COD sebanyak 57.000-60.400 mg/L dan TSS sebanyak 23.000-54.400 mg/L, serta komponen organik yang sulit diuraikan seperti asam lemak rantai panjang, lignin, dan tannin (Shintawati dkk., 2019).

Besarnya volume POME yang dihasilkan berpotensi untuk dimanfaatkan kembali menjadi sumber air baku industri. Untuk pemanfaatan potensi ini, buangan akhir pengolahan POME harus diolah kembali untuk menurunkan COD dan TSS dari 350 dan 250 mg/l (Permen LH No.5, 2014) menjadi air kelas 3 untuk peruntukan industri dengan konsentrasi COD dan TSS berurutan sebesar 40 dan 100 mg/L serta warna sebesar 100 PtCo. Oleh karena itu untuk dapat memanfaatkan kembali buangan akhir pengolahan POME sebagai air baku industri minyak sawit memerlukan pengolahan lanjutan untuk mengurangi kandungan COD, TSS dan warna.

Proses biologi umumnya tidak feasible untuk konsentrasi COD rendah (< 350 mg/L) sehingga untuk mengolah buangan akhir pengolahan POME diperlukan proses kimia-fisika, salah satunya adsorpsi menggunakan biochar untuk menyisihkan COD, TSS dan warna air limbah. Biochar merupakan salah satu adsorben dalam proses adsorpsi yang menarik peneliti karena memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi untuk mengadsorpsi berbagai macam polutan pada air (Deng dkk., 2017). Pemanfaatan biochar dalam bentuk powder memiliki efisiensi penghilangan kontaminan yang tinggi namun sulit untuk dipisahkan dari air yang diolah. Dibutuhkan rekayasa untuk mempermudah pemisahan tersebut dan mencegah kontaminasi lanjutan.

Teknologi magnet dapat diterapkan dalam aplikasi lingkungan untuk membantu proses pemisahan. Penerapannya adalah dengan memodifikasi biochar dengan material magnet menghasilkan bahan komposit baru yang memiliki dua sifat yaitu sifat adsorpsi dan magnet (Fisli dkk., 2018). Penggunaan material magnet dalam membantu proses pemisahan adsorben dalam air yaitu γ -Fe₂O₃/biochar berbahan baku kayu kapas (Zhang dkk, 2013), magnetic biochar berbahan baku tandan kosong sawit (Mubarak dkk., 2014), kulit manggis (Ruthiraan dkk, 2016), kulit kacang (han dkk, 2016), tongkol jagung (Xin dkk, 2017) dan jerami (Yin dkk, 2018).

Penelitian sebelumnya telah mampu menyisihkan arsenik dari badan air (Zhang dkk, 2013), pewarna organik methylene blue dan Orange G (Mubarak dkk, 2015) dan menunjukkan kemampuan yang baik dalam penyisihan kontaminan senyawa organik. Material yang mengandung lignoselulosa tinggi berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pembuatan biochar (Liu dkk, 2018). Selain itu ketersediaan dan keterlimpahan biomassa sebagai bahan baku biochar menjadi salah satu dasar pemilihan bahan baku. Pelepah sawit merupakan limbah yang melimpah yang dihasilkan dari perkebunan sawit belum dimanfaatkan secara optimal (Kementrian Perindustrian, 2011). Komponen pelepah sawit terdiri dari 44,15% selulosa, 29,07% hemiselulosa dan 21,16% lignin (Zainol dkk, 2017). Kandungan lignoselulosa yang tinggi pada pelepah sawit menunjukkan bahwa pelepah sawit berpotensi sebagai bahan baku pembuatan biochar.

Mubarak dkk., (2015) berhasil menyisihkan methylene blue pada kondisi optimum dosis 5 g/l dan waktu kontak 120 menit. Lawal dkk., (2020b) membuat biochar berbahan baku pelepah sawit telah berhasil menyisihkan 63,3% dan 81,4% COD buangan akhir POME pada dosis 10 g/l dan 30 g/l dengan waktu kontak 24 jam. Adapun dari hasil penelitian adsorpsi menggunakan biochar (Lawal dkk, 2020) menunjukkan bahwa dosis adsorben dan waktu kontak berpengaruh terhadap penyisihan polutan dalam air.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi dosis dan waktu kontak adsorben dalam penyisihan COD, TSS dan warna buangan akhir POME dengan memanfaatkan pelepah sawit sebagai bahan baku magnetic biochar yang diimpregnasi dengan FeCl₃ dan karakteristik magnetic biochar akan dibandingkan dengan biochar.

2. METODOLOGI

2.1 Bahan dan Alat

Alat yang digunakan adalah Reaktor fixed bed horizontal, homogenizer, oven dan timbangan analitik. Pelepah sawit yang digunakan berasal dari perkebunan sawit di Universitas Riau, FeCl₃.6H₂O pro analitik (Merck), Aquades, magnet batang dan limbah buangan akhir POME dari PT. XYZ. Karakteristik awal buangan akhir pengolahan POME dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1 : Karakteristik Buangan Akhir Pengolahan POME

Parameter	Penelitian ini	Baku mutu limbah	Baku mutu air nasional Kelas 3	Satuan
pH	7,8	6-9	6-9	
COD	348	350	40	mg/l
TSS	220	250	100	mg/l
Warna	558	-	100	PtCo

Alat yang digunakan adalah reaktor horizontal fixed bed, homogenizer, saringan 100 mesh, shaker, FTIR, SEM-EDX dan VSM.

2.2 Prosedur Penelitian

1. Pembuatan magnetic biochar

Pelepah sawit dipres menggunakan mesin pres, dibersihkan dan dicuci menggunakan aquadest, kemudian dijemur dan dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 105°C guna menghilangkan kadar air sampai diperoleh berat konstan. Selanjutnya ukuran pelepah sawit dilakukan pengecilan hingga ukuran 100 mesh. Sebanyak 150 gram pelepah sawit diimpregnasi menggunakan logam $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan rasio impregnasi yakni 0,5 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: biomassa) dalam 1000 ml gelas kimia. Kondisi operasi yakni pengadukan 150 rpm selama 3 jam pada temperatur 30°C. Temperatur pirolisis 550°C, waktu pirolisis 20 menit (Mubarak dkk, 2016; Yap dkk, 2016; Tomin dkk, 2022).

Produk magnetic biochar (MBC) yang diperoleh didinginkan secara natural dan dibilas menggunakan aquadest hingga pH netral. Kemudian dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 105°C selama 3 jam. Sedangkan produk biochar (BC) diproduksi dari pirolisis pelepah sawit.

2. Pengujian karakteristik *magnetic biochar*

Gugus fungsi MBC dan BC diidentifikasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Analysis* (FTIR). Morfologi dan komposisi pada permukaan diamati menggunakan *Scanning Electron Microscopy- Energy Dispersive Xray* (SEM-EDX) dan sifat kemagnetan dapat diketahui menggunakan *Vibration Sampel Magnetization* (VSM).

3. Pengujian MBC untuk reduksi COD, TSS dan warna

Reaktor penelitian menggunakan beaker glass 250 mL dengan volume kerja 200 mL dan laju pengadukan 150 rpm (Yap dkk, 2016) dan pH proses adsorpsi 7,8. Untuk mengetahui kemampuan MBC untuk menyisihkan COD, TSS dan warna, dilakukan variasi dosis sebesar 1,25; 3,15; 5; 6,8; 8,55 g/l dan waktu kontak 30; 60; 90; 120; 150 menit. Pemisahan antara MBC dengan air limbah dilakukan menggunakan magnet dan selanjutnya dianalisis supernatan menggunakan SM 5220 C, SNI SM 2540 C dan SM 2120 B untuk parameter COD, TSS dan warna.

4. Analisis dan pengolahan data

Efisiensi penyisihan kontaminan dan kapasitas adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan 2.

$$\text{Efisiensi adsorpsi (\%)} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

$$Q = \frac{(C_o - C_t)}{w} \times V \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

C_o = konsentrasi awal larutan uji (mg/l)

C_t = konsentrasi akhir larutan uji (mg/l)

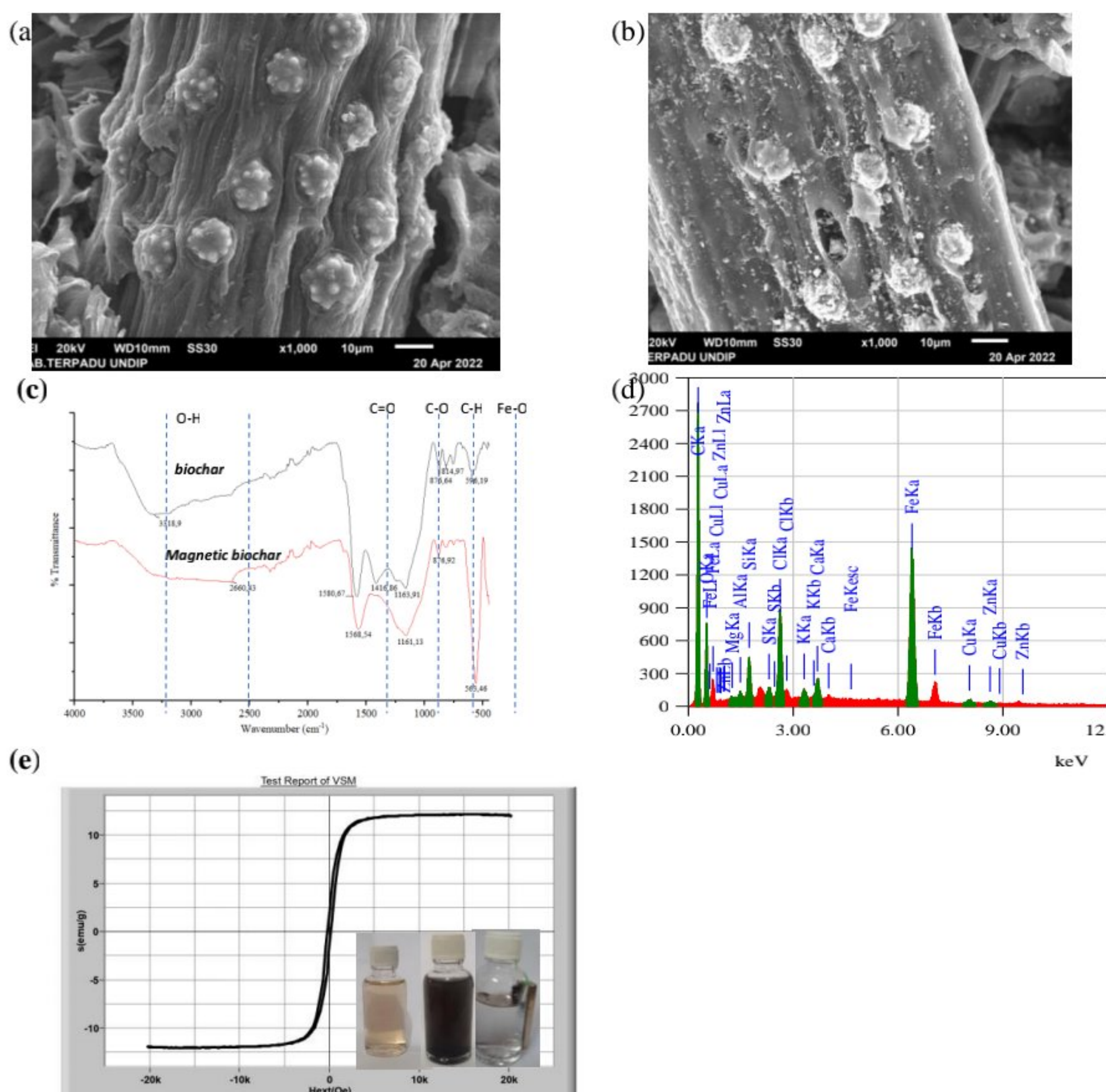
Q = kapasitas adsorbent l (mg/g)

w = massa adsorbent (g)

V = volume larutan (ml)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik MBC berbahan baku pelepah sawit



Gambar 1. Morfologi SEM (a) BC (b) MBC; (c) Spektrum Gugus Fungsi BC dan MBC, (d) EDX MBC; (e) Kurva histeris dan gambar kinerja MBC dipisahkan dengan magnet

Hasil uji SEM dengan pembesaran 1000 kali diketahui bentuk permukaan MBC dikelilingi dan ditutupi oleh partikel-partikel oksida besi (Gambar 1b) hal serupa juga terjadi pada penelitian Saleh dkk (2016) dan Wang dkk (2020) dimana partikel-partikel oksida besi tersebar di permukaan MBC. MBC memiliki permukaan yang tampak lebih padat dibandingkan permukaan BC. Partikel-partikel oksida besi juga memiliki pori-pori sehingga luas permukaan biochar meningkat dengan keberadaan Fe dan dapat meningkatkan luas permukaan biochar 12 kali (Wang dkk, 2020) hingga 254 kali (Shaleh dkk, 2016). Pada penelitian ini keberadaan partikel Fe yang terlihat pada gambar 1d menunjukkan keberhasilan penyisipan γ -Fe₂O₃ pada permukaan biochar dan berdasarkan morfologi dapat diketahui secara kualitatif menunjukkan bahwa luas permukaan MBC juga lebih luas dibandingkan dengan biochar.

Tabel 2. Hasil analisa EDX BC dan MBC

Adsorben	C(%)	O(%)	Fe(%)	Cl(%)
BC	78,48	17,07	0,17	0,67
MBC	60,03	17,27	16,77	2,39

Modifikasi biochar mengakibatkan penurunan unsur C, meningkatkan unsur oksigen dan Fe dan secara signifikan menurunkan pH (Tabel 2). Hal ini mengindikasikan bahwa pembuatan MBC telah berhasil dilakukan dan dibuktikan dengan keberadaan unsur Fe pada MBC.

Gambar 1c menampilkan spektrum FTIR yang mirip antara B dan MBC. Gugus OH muncul pada B dan MBC dengan masing-masing muncul pada bilangan gelombang 3318 cm⁻¹ dan 3026,46 cm⁻¹ dengan intensitas yang lebih lemah pada MBC. Hal ini berarti pada proses modifikasi *biochar*, kemungkinan besar keberadaan Fe pada MBC tidak berbentuk hidroksida (Reddy dkk, 2014; Wang dkk, 2020).

Serapan pada ikatan C=O aromatik (1580,67 cm⁻¹), regangan ikatan C-O dari ester, eter atau fenol (1163 cm⁻¹), dan C-H (876 cm⁻¹) menunjukkan serapan lemah dan tidak ada perubahan yang signifikan. Bilangan gelombang 2660,43 cm⁻¹ pada MBC menandakan adanya serapan O-H (gugus karboksil). Pada bilangan gelombang 563,48 cm⁻¹ menandakan adanya gugus fungsi Fe-O, dan serapan pada MBC intensitasnya lebih tinggi dari pada B. Keberadaan gugus fungsi Fe-O menunjukkan *magnetic biochar* kaya akan γ -Fe₂O₃ pada permukaan *biochar* berbahan baku pelepah sawit.

Kurva histeris magnetisasi pada Gambar 1e menunjukkan *magnetic biochar* termasuk kemagnetan dengan tipe *ferrimagnetic*. Saturasi magnetik yang diperoleh adalah 12,14 emu/g yang hampir sama dengan yang diperoleh Xin dkk, (2017) pada pembuatan *magnetic biochar* berbahan baku kulit kacang dengan suhu pirolisis yang sama yaitu 550°C dan 4x lebih besar dari hasil penelitian Yin dkk, (2018). Nilai saturasi magnetik ini masih jauh dibawah nilai pure γ -Fe₂O₃ (Ms= 76 emu/g), walaupun saturasinya kecil pada sudut kanan bawah Gambar 1e menunjukkan kemampuan yang baik pada pemisahan *magnetic biochar* menggunakan magnet batang. Perbandingan saturasi magnetik dari *magnetic biochar* berbahan baku biomassa lainnya dapat dilihat pada Tabel 3.

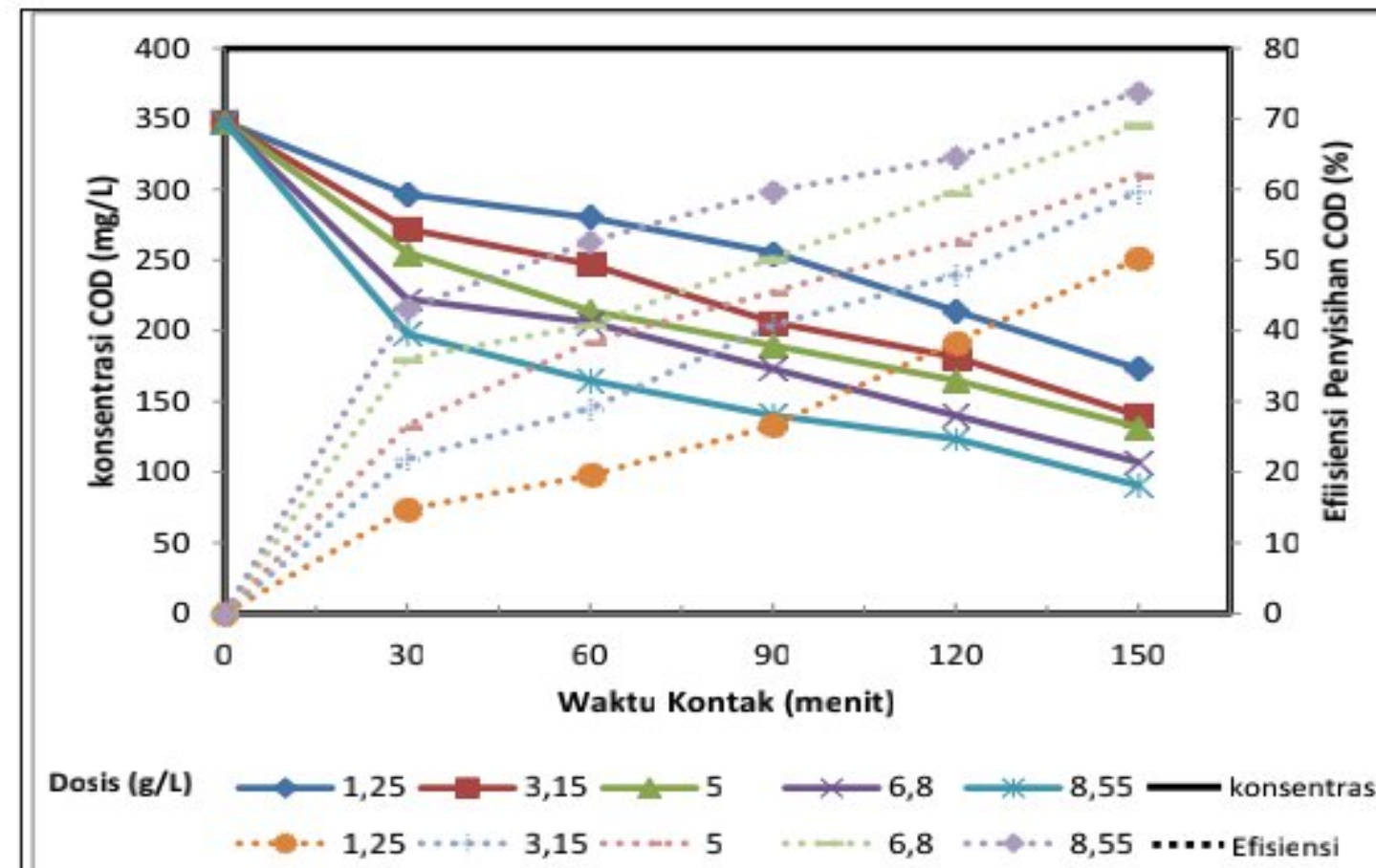
Tabel 3. Perbandingan saturasi magnetik dari *magnetic biochar* berbahan baku berbagai biomassa

Adsorben	Kontaminan	Suhu pirolisis (°C)	Ms	Referensi
γ -Fe ₂ O ₃ / batang kayu	Arsenic	600	69,2	Zhang dkk, 2013
<i>Magnetic biochar</i> / kulit kacang	Cr (VI)	450	4,28	Han dkk, 2016
<i>Magnetic biochar</i> / tandan kosong sawit	Methylene blue	550	8,16	Mubarak dkk, 2016
<i>Magnetic biochar</i> / tongkol jagung	Cr (VI)	450	11,27	Xin dkk, 2017
<i>Magnetic biochar</i> / pelepah sawit	POME	550	14,26	Penelitian ini
			12,06	

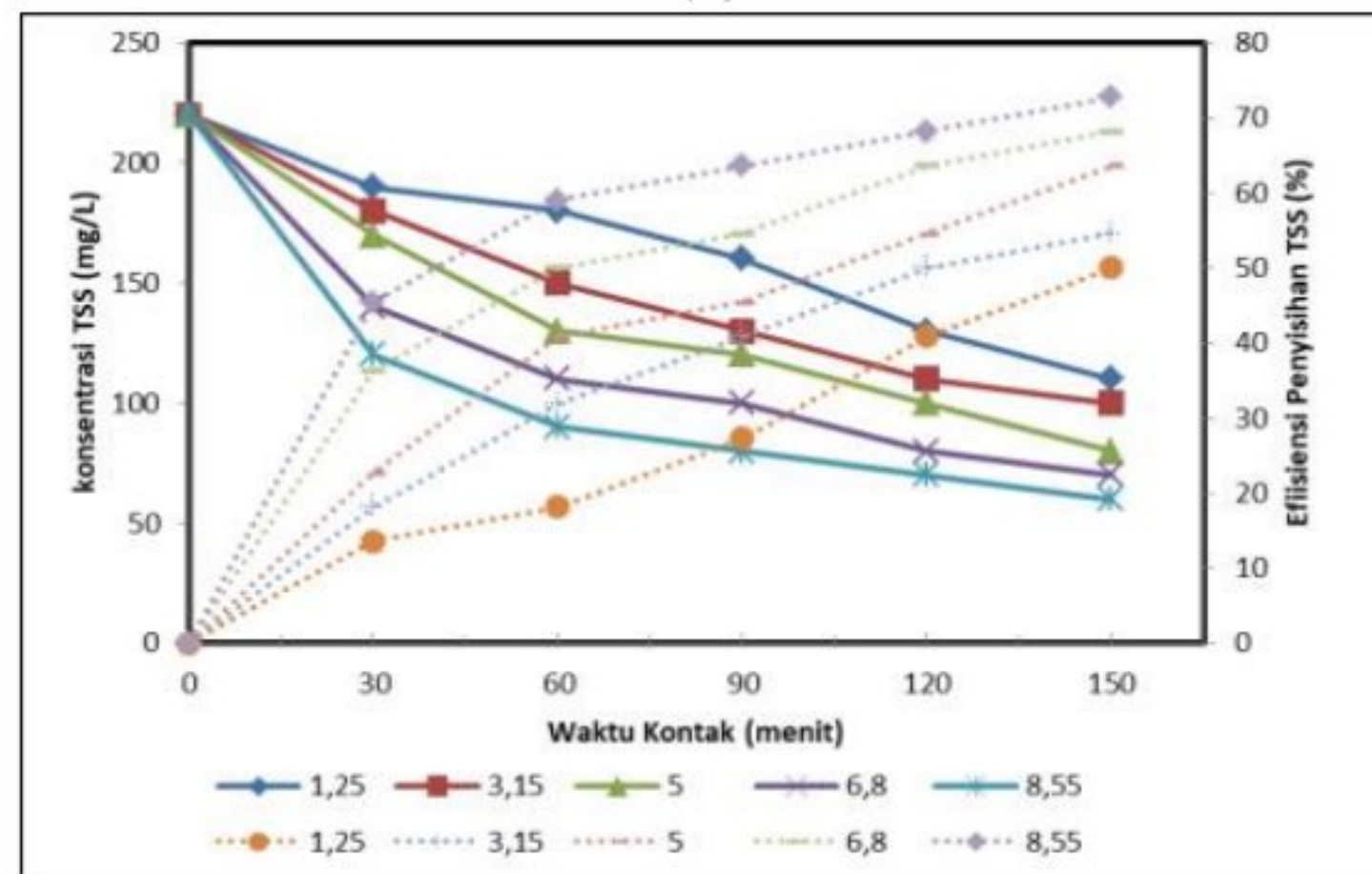
3.2 Pengaruh Dosis dan waktu kontak *magnetic biochar*

Berdasarkan Gambar 2 penyisihan COD, TSS dan warna pada buangan akhir pengolahan POME meningkat dengan bertambahnya dosis *magnetic biochar* dan waktu kontak yang digunakan. Hal ini terjadi karena bertambahnya waktu kontak antara adsorbat

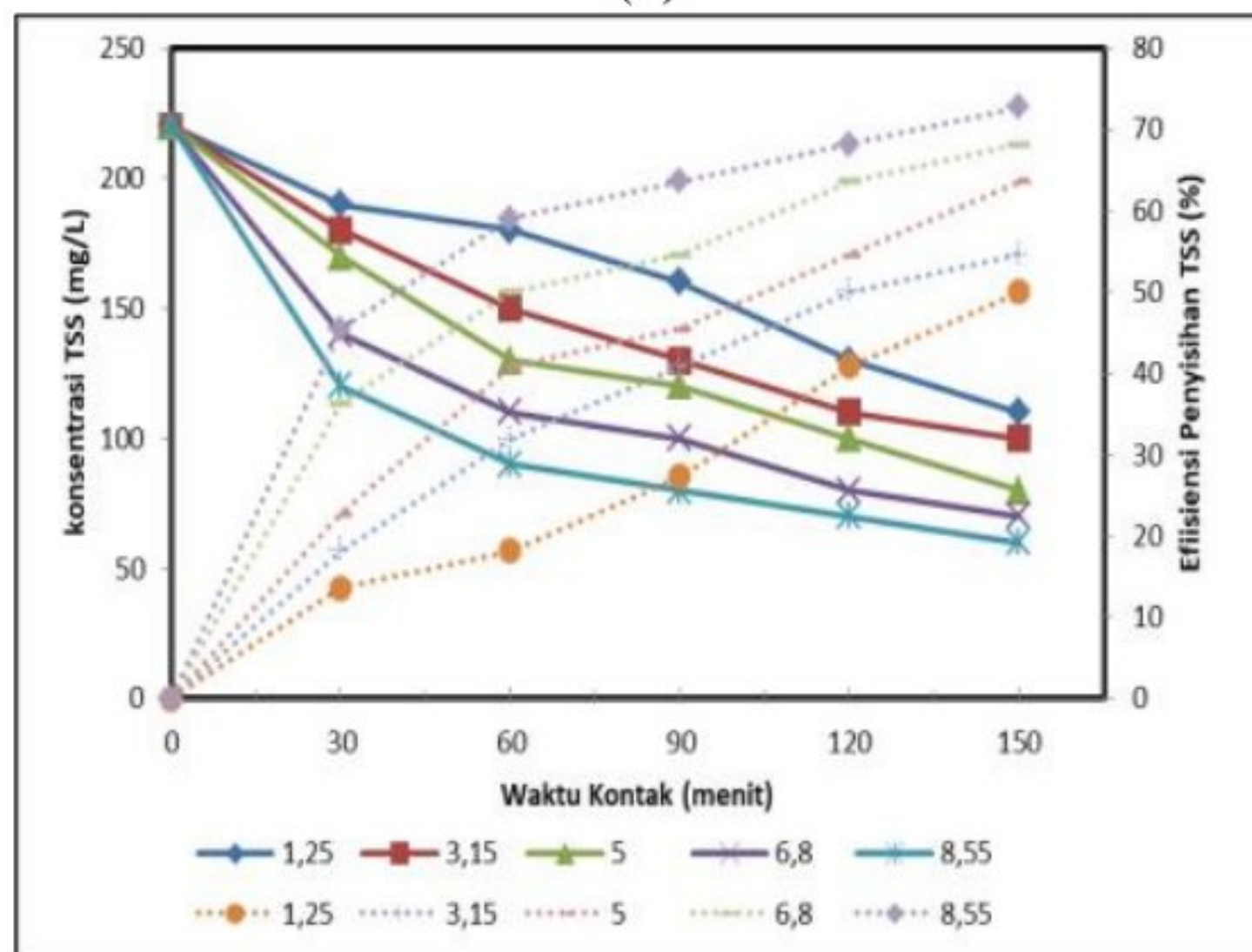
dan adsorben menyebabkan waktu interaksi semakin lama. Sehingga banyaknya situs aktif permukaan yang tersedia dan tidak terisi pada awal proses penyisihan dapat diakses oleh adsorbat. Serta bertambahnya dosis adsorben dapat memperluas area permukaan, yang membuat area kontak lebih besar dan meningkatkan jumlah molekul organik yang diadsorpsi (Said dkk, 2015; Munandar dkk, 2016; Mubarak dkk, 2016).



(a)



(b)



(c)

Gambar 2 Pengaruh Dosis *Magnetic Biochar* dan Waktu Kontak Terhadap Penyisihan (a) COD, (b) TSS dan (c) warna

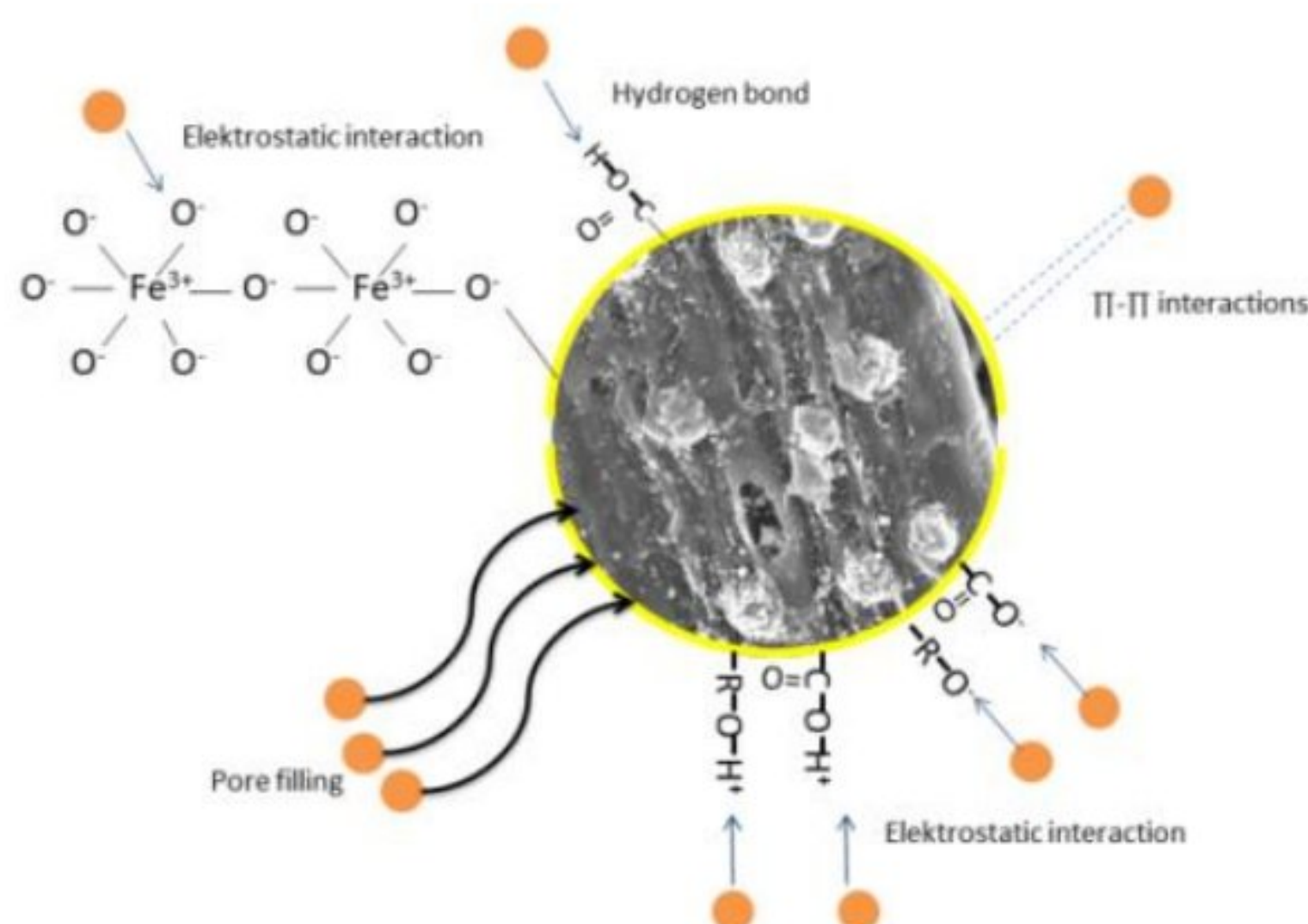
Tabel 4. Perbandingan adsorben dari biomassa yang berbeda untuk adsorpsi COD

Adsorben	Dosis (g/l)	% Penyi- sihan	Kemampuan Adsorpsi (mg/g)	Peneliti
Nano karbon aktif berbahan baku cangkang sawit	20	87,7	-	Munandar dkk, 2016
karbon aktif berbahan baku cangkang sawit	40	68	10,3	Zainal dkk, 2017
<i>biochar</i> berbahan baku kulit jeruk	-	52	-	Lam dkk, 2018
<i>biochar</i> berbahan baku pelepah sawit	10	63,6	14,4	Lawal dkk, 2020
<i>Magnetic biochar</i> berbahan baku pelepah sawit	8,55	73,9	30,1	Penelitian ini

Tabel 4 menunjukkan hasil penelitian mengenai adsorpsi COD buangan akhir POME menggunakan adsorben berbahan baku biomassa yang berbeda. Jika dibandingkan dari dosis *biochar* yang digunakan pada penelitian ini dengan beberapa literatur, *biochar* berbahan baku pelepah sawit yang dimodifikasi menjadi *magnetic biochar* memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi.

3.3 Mekanisme Adsorpsi

Pengaruh penyisipan γ - Fe_2O_3 pada *biochar* terhadap adsorpsi buangan akhir POME dapat dilihat pada Gambar 3. Keberadaan γ - Fe_2O_3 di dalam *biochar* akan meningkatkan interaksi π - π dan interaksi elektrostatis pada *magnetic biochar* dan buangan akhir POME. Oksida besi γ - Fe_2O_3 memiliki banyak situs O^{2-} yang tersedia diantara atom Fe^{3+} yang berintegrasi dengan sisi positif buangan akhir POME. Oksida besi pada *magnetic biochar* mengakibatkan adsorben semakin bermuatan negatif dalam penyerapan buangan akhir POME dan meningkatkan interaksi antara adsorben dengan permukaan adsorbat sehingga terjadi peningkatan presentase dan kapasitas adsorpsi dalam penghilangan senyawa organik seperti buangan akhir POME.



Gambar 3 Mekanisme adsorpsi buangan akhir POME menggunakan MBC (Joshi dkk, 2019; Ambaye dkk, 2021)

Selain itu berdasarkan hasil FTIR gugus fungsi yang juga terdapat pada *magnetic biochar* adalah COOH, C=C, C-O dan C-H dan gugus fungsi bisa berperan sebagai donor ikatan π - π elektorn dan akan meningkatkan kapasitas adsorpsi (Wang dkk, 2020). Sesuai dengan hasil pada penelitian ini, penyisihan COD, TSS dan warna buangan akhir POME pada *biochar* tanpa perlakuan, efisiensi penghilangan COD, TSS dan warna berturut-turut 31,77%, 27,27% dan 64,03%. Sedangkan *magnetic biochar*, efisiensi penghilangan COD, TSS dan warna berturut-turut 72,72%, 77,95% dan 84,30%.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian karakteristik magnetic biochar sebagai adsorben pengolahan buangan akhir POME dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil karakterisasi magnetic biochar menggunakan instrumen SEM-EDX, FTIR dan VSM terbukti bahwa logam oksida maghemit (γ -Fe₂O₃) telah berhasil terdistribusi dipermukaan biochar sehingga dapat ditarik dengan batangan magnet serta meningkatkan daya adsorpsi terhadap limbah POME
2. Penggunaan MB telah berhasil menyisihkan COD, TSS dan warna dengan kondisi operasi yang paling optimal diperoleh ialah penggunaan dosis adsorben sebanyak 8,55 g/l dan waktu kontak 150 menit.
3. penyisihan COD, TSS dan warna buangan akhir POME pada biochar tanpa perlakuan, efisiensi penghilangan COD, TSS dan warna berturut-turut 31,77%, 27,27% dan 64,03%. Sedangkan magnetic biochar, efisiensi penghilangan COD, TSS dan warna berturut-turut 72,72%, 77,95% dan 84,30%.
4. Namun dalam penyisihan COD belum mencapai air baku industri kelas 3 sesuai Peraturan pemerintah No. 22 tahun 2021. Sehingga masih diperlukan pengembangan modifikasi biochar selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambaye, T.G., Vaccari, M., Hullebucsh, E.D.V., Amrane, A., dan Rtimi, S. 2021. "Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater," *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol.18, pp. 3273–3294, 2021
- Deng, Y., Zhang, T., dan Wang, Q. 2017. "Biochar Adsorption Treatment for Typical Pollutants Removal in Livestock Wastewater: A Review," *Intech*. pp. 72-82.2017
- Fisli, A., Rahma D. S., Nurhasni dan Deswita. 2018. "Analisis Struktur dan Porositas Komposit Fe₃O₄-Karbon Aktif dari Limbah Kertas Sebagai Adsorben Magnetik," *J. sains materi indonesia*, Vol. 19, pp.179-187, Juli 2018.
- Han, Z., Sani, B., Mrozi, W., Obst, M., Beckingham, B., Karapanagioti, H.K dan Werner, D.2016. "Magnetite impregnation effects on the sorbent properties of activated carbons and biochars", *Water Research*, Vol.70, pp. 394-403
- Joshi, S., Garg, V. K., Kataria, N., and Kadirvelu. 2019. "Applications of Fe₃O₄@AC Nanoparticles for Dye Removal from Simulated Wastewater," *Chemosphere* 236, No.124280,pp 1-11. 2019
- Khadaroo, S. N. B. A, Grassia, P., Gouwanda, D., Poh, P.E. 2019. "Is the dewatering of Palm Oil Mill Effluent (POME) feasible? Effect of temperature on POME's rheological properties and compressive behavior," *Chemical Eng. Science*, vol. 202, pp. 519-528, Maret 2019

- Kementrian Perindustrian, (2011). Potensi limbah padat perkebunan sawit. Jakarta.
- Lam, S.S., Liew, R.K., Cheng, C.K., Rasit, N., Ooi, C.K., Ma, N.L., Ng, J.-H., Lam, W.H., Chong, C.T., Chase, H.A., 2018b. "Pyrolysis production of fruit peel biochar for potential use treatment of palm oil mill effluent," J. Environ. Manag. Vol.213, 400e408. doi:10.1016/j.jenvman.2018.02.092
- Lawal, A.A., Hassan, M.A., Farid, M.A.A., Yasim-Anuar, T.A.T., Yusoff, M.Z.M., Zakaria, M.R., Roslan, A.M., Mokhtar, M.N., Shirai, Y., 2020b. "Production of biochar from oil palm frond by steam pyrolysis for removal of residual contaminants in palm oil mill effluent final discharge," J. Clean. Prod., Vol. 265, No. 121643, April 2020
- Liu, L., Fan, S., and Li, Y. 2018. "Removal Behavior of Methylene Blue from Aqueous Solution by Tea Waste: Kinetics, Isotherm and Mechanism," International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol.15, No. 1321, pp 1-16. 2018
- Mohammad, S.; Baidurah, S.; Kobayashi, T.; Ismail, N.; Leh, C.P. Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. Processes 2021, 9, 739. <https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Mubarak, N.M., Sahu, J.N, Abdullah, N.S dan Jayakumar, N.S. 2016. "Plam oil empty fruit bunch based magnetic biochar composite comparison for synthesis by microwave-assisted and conventional heating," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, doi: 10.1016/j.jaap.2016.06.02
- Mubarak, N.M., Sahu, J.N, Abdullah, N.S dan Jayakumar, N.S. 2016. "Plam oil empty fruit bunch based magnetic biochar composite comparison for synthesis by microwave-assisted and conventional heating," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, doi: 10.1016/j.jaap.2016.06.02
- Munandar, A., Muhammad, S. dan Mulyati, S. 2016. "Penyisihan COD dari Limbah Cair Kelapa Sawit menggunakan Nano Karbon Akti," Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan, Vol. 11, No.1, pp. 24 - 31, Juni 2016, Doi: 10.23955/rkl.v11i1.4231
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Reddy, D.H.K, and S.M. Lee. 2014. "Magnetic biochar composite: Facile synthesis, characterization and application for heavy metal removal," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.03, No.105, pp 1-29, Maret 2014, doi:10.1016/j.colsurfa.2014.03.105
- Ruthiraan, M., Abdullah, E.C., Mubarak, N.M., dan Norainia, M.N. 2017. "A Promising Route of Magnetic Based Materials for Removal of Cadmium And Methylene Blue from Waste Water," J. of Environmental Chemical Eng. Vol. 5, pp.1447–1455, 2017
- Said, M., Hassimi A.H., Mohd, T.M.N., dan Abdul, W.M. 2015. "Removal of COD, TSS and Colour from Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Montmorillonite," Desalination and Water Treatment, Vol. 57, No. 23, pp. 10490-10497. 2015
- Saleh, S., Khairul B.K., Wan, A.W.A.K.G., dan Loh, S.K. 2016. "Removal of Organic Contaminant from Aqueous Solution Using Magnetic Biochar," International Conference on Process Engineering and Advanced Materials. Vol. 148, pp. 228-235. 2016
- Shintawati, Hasanudin, U., dan Haryanto, Agus, 2017. "Karakteristik Pengolahan Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit dalam Bioreaktor Cigar Semi Kontinu," Jurnal Teknik Pertanian Lampung, Vol.6, No. 2, pp. 81-88
- Tomin, O. dan M. R. Yazdani, "Production and characterization of porous magnetic biochar: before and after phosphate adsorption insights," Journal of Porous Matarials, vol. 29, pp. 849-859, Maret. 2022, doi: 10.1007/s10934.022.01217.1

- Wang, J., Zhang, M., Zhou, R., Li, J., Zhao, W., dan Zhou, J., 2020. "Adsorption mechanism of norfloxacin in water by γ -Fe₂O₃@BC," IWA Publishing 2020 Water Science & Technology, Vol. 82, No.2, pp. 242-253
- Xin, O., Yitong, H., Xi, C., & Jiawei, C. 2016, "Magnetic biochar combining adsorption and separation recycle for removal of chromium in aqueous solution," Water Science and Technology, vol.75, No.5, pp 1177–1184, 2016
- Yap, M.W., Mubarak, N.M., Sahu, J.N., dan Abdullah, E.C. 2016. "Microwave Induced Synthesis of Magnetic Biochar from Agricultural Biomass for Removal Of Lead And Cadmium from Wastewater," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, pp. 1-27, september 2016
- Yin, Z., Liu, Y., Liu, S., Jiang, L., Tan, X., Zeng, G., Li, M., Liu, S., Tan, S., dan Fang, Y. 2018, "Activated magnetic biochar by one-step synthesis: Enhanced adsorption and coadsorption for 17 β -estradiol and copper," Sci. of the total environment, Vol.639, pp. 1530-1542. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv
- Zainal, N.H., Jalani, N.F., Mamat, R., Astimar, A.A., 2018b. A review on the development of palm oil mill effluent (POME) final discharge polishing treatments. J. Oil Palm Res. 29, 528e540. <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.00012>
- Zainol, M., M, N. A. S. Amin., Asmadi M. 2017. "Preparation and Characterization of Impregnated Magnetic Particles on Oil Palm Frond Activated Carbon for Metal Ions Removal," Sains Malaysiana, Vol. 46, No.5, pp.773–782. 2017, doi: 10.17576/jsm.2017.4605.12
- Zhang, Ming., Bin, G., Sima, V., Arthur, H., Ying, Y., dan Mandu, I. 2013a, "Preparation and Characterization of A Novel Magnetic Biochar for Arsenic Removal," Bioresource Technology, Vol. 130, pp. 457-462, November 2012