

V. PEMBAHASAN

V.1. Sintesis dan Modifikasi Adsorben

V.1.1. Proses pembuatan, sintesis dan modifikasi adsorben

Pencucian dalam pembuatan adsorben menjadi tahapan awal, yang bertujuan menghilangkan materi pengotor hingga dekolorisasi komponen pewarna alami pada kulit buah. Dalam Tabel 4., secara umum air yang digunakan untuk pencucian menggunakan air biasa, air distilasi, air deionisasi hingga air ultramurni. Air distilasi merupakan tingkatan kemurnian air yang paling sering digunakan. Beberapa penelitian menggunakan air deionisasi hingga air ultramurni. Air tersebut memiliki perbedaan pada tahapan dan kadar kemurnian airnya. Air distilasi diproduksi dengan menggunakan *softened-water* atau air yang telah dihilangkan kandungan kalsium dan magnesiumnya didalam logam yang dipanaskan dengan uap (Nielsen, 2017). Sedangkan air ultramurni menurut (Freshney, 2016), diproduksi melalui beberapa tahap seperti *reverse osmosis* atau distilasi, filtrasi karbon (menghilangkan koloid organik dan inorganik), deionisasi (menghilangkan material inorganic terionisasi), dan filtrasi mikropori (menghilangkan mikroba dan resin yang tertinggal). Air distilasi, deionisasi ataupun ultramurni memiliki tujuan yang sama agar tidak mengganggu proses penelitian modifikasi adsorben.

Pengeringan umumnya dilakukan pada rentang suhu 40-120°C. Suhu yang paling banyak digunakan adalah 105°C. Menurut O'Kelly (2014), suhu 105°C merupakan standard dari ASTM (*American Standard Testing and Material*). O'Kelly (2014) juga menyatakan bahwa pada suhu pengeringan 105-110°C dipastikan terjadi proses penguapan secara penuh dan lebih efisien daripada suhu yang lebih rendah, yakni 35-90°C. Penggunaan suhu yang berlebih dapat merusak dinding partikel adsorben, namun jika menggunakan suhu yang lebih rendah mengakibatkan waktu proses pembuatan adsorben menjadi lebih lama.

Senyawa kimia yang digunakan pada Tabel 4., dapat berperan sebagai agen modifikasi ataupun sebagai pelarut senyawa organik. Proses tersebut dapat menggunakan senyawa bersifat basa dan asam, senyawa alkohol sebagai pelarut

pada proses ekstraksi, serta senyawa magnetik. Senyawa kimia yang paling sering digunakan adalah senyawa basa dan asam. Senyawa basa NaOH banyak digunakan dalam proses modifikasi Tabel 4., baik sebagai pelarut senyawa organik, penetral pH atau sebagai larutan aktivasi karbon. Terdapat senyawa basa lain seperti KOH dan $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$. Modifikasi menggunakan alkali hidroksida seperti NaOH dan KOH bertujuan membesarkan pori. Perbesaran pori pada adsorben berhubungan dengan modifikasi reduksi dan oksidatif yang bertanggung jawab terbentuknya porositas makro dan mikro pada sebuah adsorben (Foo dan Hameed, 2012). Selain itu, penggunaan senyawa hidroksida seperti NaOH dapat meningkatkan jumlah muatan negatif pada permukaan adsorben (Du *et al.*, 2021). Senyawa asam yang digunakan dalam modifikasi, diantaranya asam sitrat dan asam fosfat. Asam sitrat meningkatkan intensitas puncak hidroksil, karboksil dan karbonil sehingga permukaan situs aktif nya meningkat (Arslanoglu *et al.*, 2008; Gerola *et al.*, 2013). Senyawa basa dan asam dapat memberikan situs penyerapan baru yang berfungsi sebagai pengikat ion polutan yang bersifat kation ataupun anion.

Gugus fungsional dalam proses modifikasi adsorben dapat dipengaruhi oleh senyawa yang digunakan. Salah satunya penambahan atau impregnasi FeCl_3 ke dalam adsorben. Gugus fungsi Fe-O terdeteksi oleh FT-IR (Bellahsen *et al.*, 2021). Selain itu, pada Tabel 4 ditemukan bahwa beberapa gugus fungsional COO^- ditemukan pada adsorben yang dimodifikasi menggunakan senyawa basa NaOH. Hal ini diperjelas dengan pernyataan Feng *et al.*, (2009), bahwa sodium hidroksida (NaOH) dapat mengkonversi metil ester yang terdapat pada selulosa, pektin, hemiselulosa, dan lignin menjadi karboksilat (COO^-), karena metil ester tersebut kurang secara signifikan mengikat ion logam. Selain itu, menurut Castro *et al.*, (2021) dan Gerola *et al.*, (2013) aplikasi NaOH dapat mendegradasi komponen organik (selulosa, hemiselulosa, lignin, pektin) dan dapat meningkatkan intensitas puncak $\text{C}=\text{O}$ yang bertanggung jawab sebagai interaksi dengan logam. Dalam hasil Wang *et al.*, (2021), NaOH yang digunakan sebagai senyawa maserasi dan dipadukan dengan DTPA meningkatkan gugus $-\text{COO}^-$, situs aktif dan kandungan Na. Elemen Na diduga sebagai salah satu elemen yang berperan pada proses

pertukaran ion (*ion exchange*) dengan kadmium dan nikel dengan ion bebas.

Dalam proses pirolisis terbentuk karbon aktif, dimana pada proses tersebut terjadi proses penghilangan komponen volatil (co: C-O-C dan Alkohol-OH) karena adanya dehidroksilasi, dehidrogenasi, dan aromatisasi. Selain itu, pirolisis sedikit meningkatkan jumlah kation (Lim *et al*, 2013, Ates dan Oymak, *et al*, 2019). Proses pembentukan karbon aktif pada umumnya menggunakan beberapa senyawa seperti KOH, NaOH, asam fosfat untuk aktivasi. Senyawa aktivasi yang digunakan akan menentukan pembentukan mesopori atau minopori (Linares-Solano *et al.*, 2012). Ukuran pori yang terbentuk ini memengaruhi dalam proses adsorpsi secara fisik.

V.1.2. Karakteristik Adsorben

Proses pertumbuhan dari biji menjadi buah, membuat kulit buah terletak pada bagian exocarp atau bagian yang paling luar dari biji. Limbah kulit buah mengandung polisakarida dan lignin. Kulit buah dapat dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya bagian primer, sekunder dan tersier. Pada bagian primer atau bagian terluar memiliki kandungan polisakarida (selulosa, hemiselulosa, pektin) dan protein. Sedangkan pada bagian sekunder terdapat lignin karena struktur sel yang lebih keras dan tebal serta komposisi yang hampir sama seperti bagian primer. Komponen seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin memberikan indikasi munculnya gugus fungsi hidroksil, karboksil dan gugus fungsi lainnya yang dapat berinteraksi dengan polutan (Almeida-Naranjo *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2020). Hal ini mendukung sering ditemukannya gugus hidroksil dan karbonil, karboksil dalam berbagai adsorben pada Tabel 4.

Luas permukaan dengan nilai dua terbesar adalah limbah kulit buah yang mendapatkan beberapa perlakuan modifikasi (Tabel 4.). Adsorben tersebut yaitu adsorben yang berasal dari salak dengan modifikasi karbonisasi, kimia KOH, dan pirolisis (1939 m²/g), diikuti dengan adsorben delima dengan modifikasi pirolisis dan kimia KOH (845,96 m²/g). Hal ini memberikan bukti bahwa proses modifikasi dapat meningkatkan luas permukaan adsorben, dengan tetap memperhatikan

beberapa penggunaan suhu atau konsentrasi senyawa yang dapat merusak permukaan adsorben. Limbah jeruk jika dibandingkan dengan limbah kulit buah lainnya yang diberi perlakuan yang sama lebih unggul (Tabel 4.). Hal ini sesuai dengan Dey *et al.* (2021), yang menyatakan bahwa kulit jeruk banyak digunakan sebagai adsorben yang mengolah limbah pembuangan air karena memiliki luas permukaan yang tinggi jika dibandingkan buah lainnya. Selain itu, ada kemungkinan adanya komposisi lignin, selulosa yang lebih unggul pada jeruk.

V.2. Kondisi Aplikasi Proses Adsorpsi

V.2.1. Efisiensi, q_{max} dan model adsorpsi

Efisiensi minimal yang diperoleh ditemukan pada adsorben yang belum diberi modifikasi atau menggunakan modifikasi terbaru seperti EDTA perlu pengembangan lebih lanjut. Efisiensi yang rendah ini sesuai dengan pernyataan dan teori pada subbab sebelumnya bahwa modifikasi dapat meningkatkan kemampuan adsorben dalam menyerap polutan tertentu. Dalam data yang diperoleh dalam kajian ini, polutan Nikel (Ni^{2+}) memiliki efisiensi adsorben yang paling rendah.

Model Adsorpsi yang digunakan untuk menentukan nilai q_{max} pada umumnya Langmuir. Namun, penggunaan model lain seperti Freundlich dan Dubinin dapat digunakan. Pada Tabel 7., nilai Q_{max} pada model yang menggunakan Langmuir jika dibandingkan dengan adsorben yang menggunakan model D-R isotherm (Dubinin-Radushkevich) terjadi perbedaan yang cukup signifikan. Ada kemungkinan hal ini disebabkan perbedaan asumsi penentuan interaksi keduanya. Menurut Nizam *et al.* (2021), Langmuir diasumsikan proses adsorpsi secara homogen terdistribusi diseluruh permukaan dan mendeskripsikan titik equilibrium antara adsorbat dan adsorben dalam satu lapis. Sedangkan model D-R isotherm mendeskripsikan proses adsorpsi secara detail dan kompleks baik secara fisik ataupun kimia, dan juga memiliki preasumsi adsorben memiliki karakter *multilayer* (Ayawei *et al.*, 2017; Nizam *et al.*, 2021). D-R isotherm dapat diasumsikan memberikan nilai q_{max} baik adsorben tersebut secara nyata atau tidak nyata dapat terjadi proses adsorpsi berulang (*multilayer*) secara fisik dan kimia. Berdasarkan perbedaan asumsi pada setiap model, nilai q_{max} D-R isotherm dapat diperoleh

lebih besar dari model Langmuir, karena asumsi proses adsorpsi yang terjadi membentuk satu lapisan.

Rentang persentase efisiensi proses adsorpsi polutan nikel yang besar, menunjukkan bahwa efisiensi masih beragam (Gambar 3.). Sehingga masih terdapat peluang dalam mengembangkan adsorben untuk penyerapan polutan nikel. Rentang persentase efisiensi proses adsorpsi *methylene blue* dan timbal yang cukup kecil, memberikan informasi bahwa adsorben yang digunakan dalam kajian pustaka ini sudah cukup tinggi dan pengaruh penggunaan buah atau adsorpsi tertentu menghasilkan efisiensi yang tidak terlalu timpang.

Adsorben naga putih serbuk, adsorben markisa serbuk murni dan nanas serbuk murni merupakan adsorben dengan nilai persentase efisiensi terendah. Nilai efisiensi tertinggi ditemukan pada adsorben delima bola liofilisasi, markisa NaOH, dan lemon serbuk modifikasi NaOH (Gambar 4., 5., dan 6.). Perbedaan nilai efisiensi dengan perlakuan yang diberikan pada adsorben, diketahui proses modifikasi adsorben secara langsung dapat memengaruhi efisiensi adsorben dalam menyerap polutan. Efisiensi adsorben diduga memiliki hubungan dengan luas permukaan adsorben. Luas permukaan pada adsorben tanpa modifikasi akan memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan luas permukaan adsorben dengan modifikasi. Hal tersebut sesuai dengan Abegunde *et al.*, (2020), bahwa proses modifikasi terutama secara kimiawi dapat secara langsung memengaruhi permukaan adsorben dan ikatan kimia pada permukaannya sehingga mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi suatu adsorben.

V.2.2. Perbandingan pH

Proses adsorpsi, khelasi, presipitasi, kelarutan sangat dipengaruhi oleh perubahan pH yang digunakan (Latif *et al.*, 2019). Tabel 5., 6., dan 7., menunjukkan bahwa rata-rata pH yang ditemukan berada pada rentang pH 5-7 untuk adsorpsi *methylene blue*, timbal dan nikel. Namun, polutan lain seperti tembaga (Cu^{2+}) menggunakan pH 5 dan 8. Polutan kadmium (Cd^{2+}) berada di pH 5,5. Namun, terdapat

penggunaan pH 2 oleh polutan eosin dan *fluorescein*. Selain itu, ditemukan pH 9 penggunaannya pada polutan pewarna disperse blue dan malachite green. Perbedaan pH aplikasi yang cukup jauh ini berhubungan dengan kondisi muatan pada permukaan adsorben yang dibutuhkan untuk mengikat polutan dengan muatan ion negatif ataupun muatan positif. Menurut Latif *et al.* (2019), pH 2 yang digunakan oleh eosin dan *fluorescein* didukung karena pewarna tersebut termasuk ke dalam pewarna asam dan akan lebih banyak terionisasi dan lebih mudah larut ke dalam suasana asam. pH rendah atau kondisi asam akan membuat kondisi ikatan hidrogen menjadi bermuatan positif (H^+). Permukaan adsorben akan bermuatan positif jika pH yang digunakan selama proses adsorpsi lebih rendah dibandingkan dengan nilai pH_{pzc} atau point zero of charge. Sebaliknya, permukaan adsorben akan memiliki muatan negatif jika pH yang digunakan lebih tinggi dibandingkan pH_{pzc} (Oladoye *et al.*, 2022). Adsorben yang memiliki muatan negatif akan lebih mudah mengikat senyawa yang memiliki ion positif seperti logam dengan muatan positif (timbal Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , dan lain-lain) dan pewarna kationik.

Hasil data pada Tabel 5., 6., dan 7., menunjukkan bahwa rata-rata pH yang ditemukan pada polutan *methylene blue*, nikel, dan timbal memiliki rentang 5-7. *Methylene blue* merupakan zat pewarna yang bersifat kationik. Berdasarkan Gambar 7., diperoleh rentang pH 5-7 dimana kondisi pH yang berbeda dalam proses adsorpsi, dapat menentukan bentuk ion setiap senyawa polutan yang disebut dengan spesiasi ion. pH yang digunakan dalam proses adsorpsi akan mendukung bentuk ion polutan yang ditargetkan, yaitu bentuk kation (*methylene blue*, timbal, dan nikel). Hal ini didukung dengan penelitian Salazar-rabago *et al.*, (2017), bahwa spesiasi ion *methylene blue* akan tampak sebagai MB^0 (*undissociated molecules*) dalam pH 3 dan tampak sebagai campuran MB^0 dengan MB^+ jika dalam rentang $pH - pK_a$ (Konstanta disosiasi asam)-3,8. Spesiasi ion MB^+ akan menjadi satu satunya ion jika berada dalam pH lebih dari 6. Pernyataan tersebut dengan dengan nilai minimal dan maksimal pH *methylene blue* yaitu 5 dan 7. pH 5 dan 7 tersebut masih masuk ke dalam spesiasi ion MB^+ . Nilai maksimal dan minimal yang sama diperoleh oleh timbal dan nikel. Spesiasi ion Timbal (Pb^{2+}) menurut Abed &

Belattar (2022), akan muncul dalam rentang 2-6, sedangkan pada pH lebih dari pH 6, Pb^{2+} akan berkurang jauh dan terbentuk $Pb_3(OH)_4^{2-}$, $Pb(OH)^+$, dan $Pb(OH)^2$. Dalam rentang 5-7 pH optimal polutan timbal (Pb^{2+}), ada kemungkinan terikat juga $Pb(OH)^+$. Dalam hasil pengamatan dalam Tabel 5., tidak ditemukan pH lebih dari 7 karena timbal hidroksida ($Pb(OH)_2$) yang tidak larut akan mulai mengendap sehingga proses tentang studi adsorpsi timbal tidak dapat dilakukan kembali (Boujelben *et al.*, 2009).

Nilai pH maksimal dan minimal adsorpsi nikel yaitu 5 dan 7. Rentang pH ini sesuai dengan penelitian tentang spesies ion nikel oleh Ciesielczyk *et al.* (2013). Ion Ni^{2+} dapat berbentuk Ni^{2+} pada pH kurang dari 8. Pada pH lebih dari 8, Ni^{2+} berubah menjadi $Ni(OH)_2$, $Ni(OH)^{3-}$, dan $Ni(OH)_4^{2-}$. Pembentukan ion lain jika pH melebihi 10. pH nikel yang ditemukan tidak melebihi pH 7 (Tabel 5.), sehingga ion yang diserap dalam bentuk ion Ni^{2+} (kation). Sifat adsorben sebelumnya telah dibahas, bahwa dapat dilakukan protonasi (pada pH asam) dan deprotonasi (pada pH basa). Dalam menyerap Ni^{2+} diperlukan adsorben yang bermuatan negatif (deprotonasi). Dalam pH 5-7, adsorben dapat bersifat negatif. Proses adsorpsi dilakukan pada pH basa lebih dari 8, tidak akan terjadi proses adsorpsi Ni^{2+} yang baik, karena muatan ion nikel dan muatan adsorben sama-sama negatif (anion). Selain itu, terjadi pembentukan endapan $Ni(OH)_2$ pada pH 7.5 yang dapat menghambat proses adsorpsi (Ciesielczyk *et al.*, 2013).

Nilai median yang diperoleh memiliki hasil yang hampir mendekati. Untuk pH *methylene blue* 6,95 dan untuk pH timbal dan nikel sebesar 6. Menurut Raju *et al.* (2012), adsorpsi timbal dengan menggunakan pH rendah akan membuat ion Pb terutama Pb^{2+} bersaing dengan ion H^+ untuk menempati permukaan adsorben. Sedangkan jika pH yang digunakan meningkat menuju pH netral atau lebih, ion H^+ yang telah terikat pada permukaan adsorben dapat digantikan oleh ion Pb (II). Baik *methylene blue*, nikel dan timbal sama sama bermuatan ion positif sehingga memerlukan permukaan adsorben yang bermuatan negatif, untuk berikatan. Pengaruh penggunaan pH dalam proses adsorpsi, menurut Salazar-rabago *et al.*

(2017), merupakan mekanisme adsorpsi yang disebut *electrostatic attraction* atau daya tarik-menarik elektrostatik.

V.2.3. Perbandingan waktu kontak

Secara umum, waktu kontak proses adsorpsi yang dilaporkan (Tabel 5., 6., dan 7.) memiliki rentang 5 -1440 menit (1 hari). Adsorben memiliki titik puncak dalam waktu kontak dan setelah itu mencapai titik equilibrium. Perbedaan waktu 5 menit dengan 1440 menit sangat jauh. Menurut Zhang *et al.* (2013), kecepatan waktu dalam adsorpsi memberikan tanda terjadinya interaksi elektrostatik yang kuat antara permukaan adsorben dan polutan yang diserapnya. Namun, jika lama waktu yang digunakan mencapai 1440 menit atau setara dengan satu hari, maka besar kemungkinan hal tersebut dilakukan untuk melihat titik equilibrium tanpa melewatkan titik aplikasi yang terjadi.

Dampak waktu kontak yang terlalu lama sebesar 1440 menit terhadap nilai efisiensi proses adsorpsi *methylene blue* dan nikel (Ni^{2+}), diperoleh persentase efisiensi yang lebih rendah jika dibandingkan adsorben lain dengan waktu kontak yang lebih cepat. Faktor perbedaan adsorben juga dapat memengaruhi waktu optimal yang diperoleh. Jika dalam waktu yang optimal, efisiensi yang diperoleh baik dalam menyerap polutan *methylene blue*, nikel ataupun timbal dapat mencapai lebih dari 90%. Sehingga, waktu aplikasi yang optimal diperlukan karena menurut Kurniawati *et al.* (2021), proses yang lebih lama dapat membuat terlepasnya ikatan antara adsorben dan adsorbat yang sebelumnya telah terbentuk.

V.2.4. Suhu

Suhu yang digunakan dalam proses adsorpsi polutan nikel dan *methylene blue* berada dalam rentang 25- 29°C yang tergolong sebagai suhu ruang. Pada Tabel 5., polutan timbal yang diserap dengan menggunakan sawo manila menggunakan suhu 60°C sebagai kondisi aplikasi yang optimal. Hal ini memungkinkan adanya proses kinetika yang berbeda. Menurut Salazar-rabago *et al.* (2017), jika kesetimbangan adsorpsi dapat dicapai dengan menaikkan suhu atau adsorpsi meningkat seiring dengan peningkatan suhu yang digunakan, maka proses yang berlangsung proses

reaksi endoterm, dan sebaliknya. Reaksi endotermik dan eksotermik dideskripsikan sebagai salah satu mengetahui proses adsorpsi yang terjadi. Adsorpsi secara fisik biasanya memiliki reaksi eksotermik, dan adsorpsi secara *chemisorption* (kemisorpsi) memiliki reaksi endotermik (Tran et al., 2016). Secara umum, reaksi endotermik mengandalkan luas permukaan dan membentuk reaksi kimia pada permukaannya dan bersifat tidak reversibel (*irreversible*) (Botahala, 2019). Reaksi eksotermik atau reaksi fisik seperti daya tarik elektrostatis dan pertukaran ion (Fu et al., 2021). Hal ini sesuai dengan pembahasan dan dari hasil pengamatan sebelumnya, bahwa mekanisme yang terjadi adalah daya tarik elektrostatis yang dipengaruhi oleh pH.

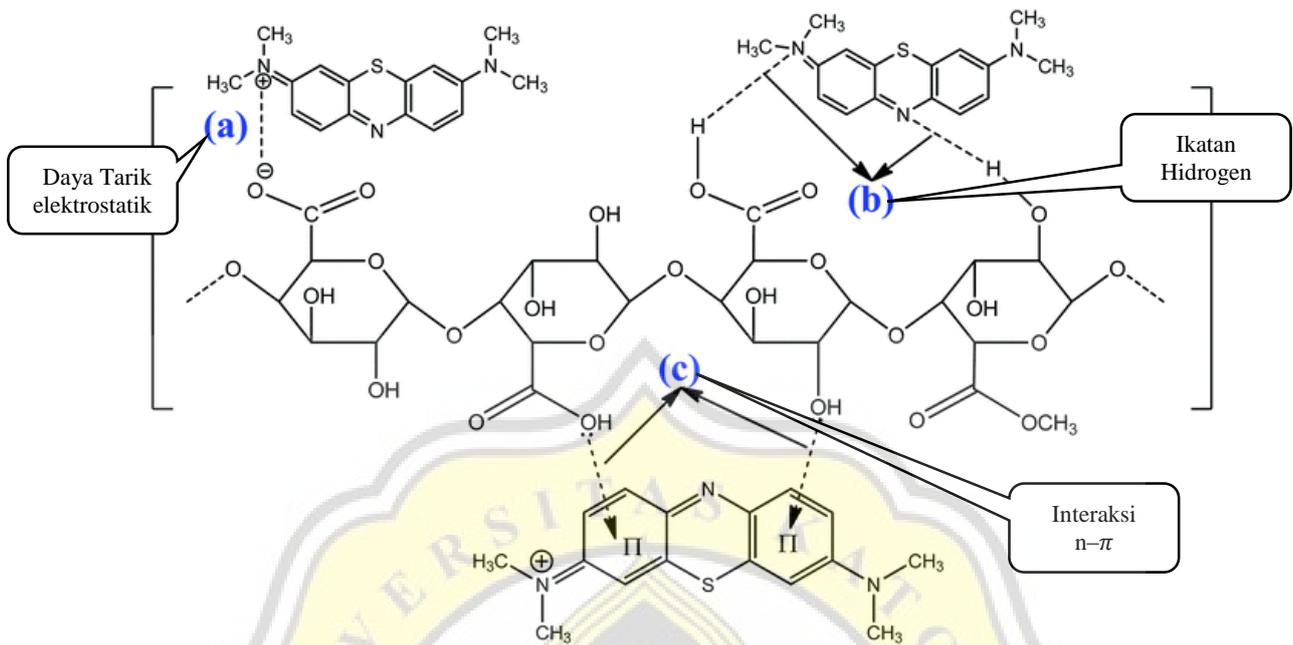
V.3. Efektivitas Adsorben berdasarkan Radar Diagram

Data yang digunakan untuk menentukan efektivitas adsorben dalam mengadsorpsi polutan *methylene blue*, nikel, dan timbal dapat dilihat pada Tabel 5. dan 6. Penilaian efektivitas berdasarkan pH, waktu, konsentrasi adsorben dan suhu yang digunakan melihat pada efisiensi adsorben yang berada di atas nilai median dari setiap polutan yang dapat dilihat pada Tabel 4-6. Nilai median digunakan dalam standar penggunaan data dikarenakan menurut Keele (2010), nilai median akan lebih akurat digunakan sebagai pemusatan nilai pada data yang cenderung timpang atau memiliki kecenderungan pada nilai tertentu. Berdasarkan hasil penilaian efektivitas menggunakan diagram radar, diketahui bahwa adsorben jeruk mandarin dengan modifikasi H_2SO_4 memiliki poin atau luas radar tertinggi untuk menyerap polutan *methylene blue* (Gambar 14.). Adsorben alpukat dengan modifikasi NaOH, Kiwi Biochar yang diaktivasi dengan asam Fosfat dan Hamimelon modifikasi dengan NaOH memiliki poin yang sama tinggi untuk adsorpsi polutan timbal (Gambar 15.). Untuk adsorpsi polutan nikel, pada gambar 16 adsorben angka NaOH (18) dan angka EDTA. Seluruh adsorben tersebut menggunakan modifikasi kimia dengan menggunakan asam atau basa. Pada adsorben kiwi, selain menggunakan asam, dilakukan karbonisasi dengan suhu $700\text{ }^\circ\text{C}$.

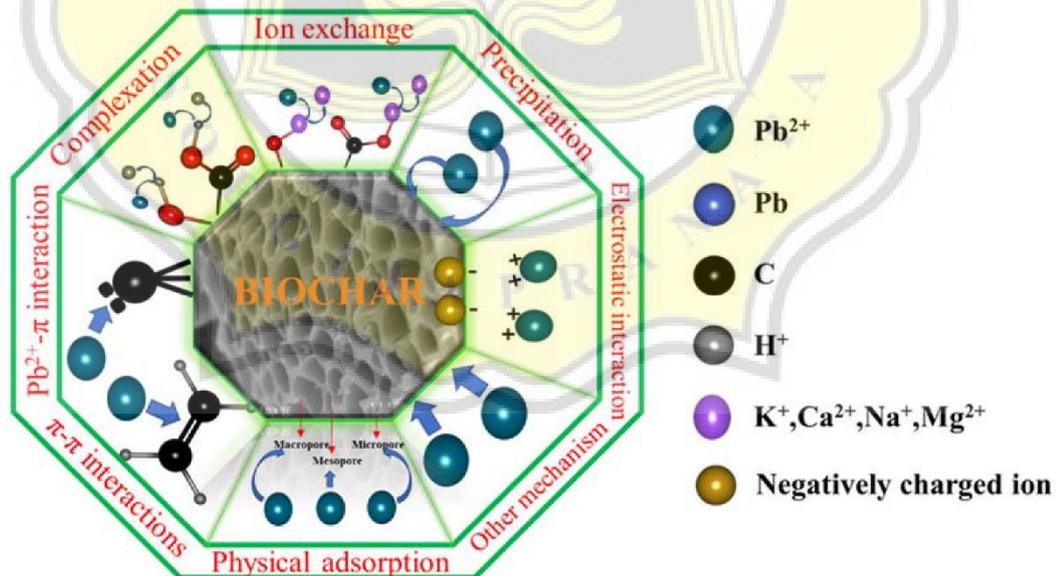
V.3.1. Gugus fungsi dan mekanisme adsorpsi

Polutan *methylene blue*, nikel dan timbal masing-masing memiliki gugus fungsi

yang berperan sebagai pengikat polutan tersebut. Dalam hasil yang diperoleh, gugus yang paling sering ditemukan adalah gugus C=O, O-H, C-H, C=C, COO, C-O (Ates & Oymak, 2020; Jawad *et al.*, 2018; Mallampati *et al.*, 2015; Msaadi *et al.*, 2022; Rahimnejad *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2017). Menurut Septevani *et al.* (2018), adanya deteksi puncak O-H, dan C-O memberikan tanda bahwa terjadi proses penyerapan oleh gugus fungsional selulosa. Dalam proses adsorpsi timbal, menurut Zhou *et al.* (2017), gugus fungsional yang mengandung oksigen seperti hidroksil dan karboksilat berpartisipasi dalam proses adsorpsi Pb^{2+} . Kemudian, gugus C=O/O-C=O dan -COOH yang mengalami penurunan peak, diduga juga berperan terhadap proses adsorpsi Pb^{2+} . Proses adsorpsi yang telah dilakukan akan menghasilkan gugus Pb-O-C dan Pb-O. Ditemukan gugus fungsi tersebut memberi tanda terjadi pertukaran ion dan mekanisme adsorpsi kompleksasi permukaan. Hal ini didukung oleh Xia *et al.* (2022), bahwa proses adsorpsi Pb^{2+} berdasarkan reaksi kimia dibandingkan dengan proses adsorpsi fisik. Sehingga proses mekanisme adsorpsi dapat dilihat pada gambar 17 dan 18. Dimana keduanya sama-sama terjadi mekanisme daya tarik elektrostatik dan ikatan $n-\pi$. Adapun telah dibahas pada poin pH sebelumnya, daya tarik-menarik elektrostatik ini timbul karena penggunaan pH yang memengaruhi muatan ion pada adsorben sehingga dapat secara efektif mengikat polutan dengan muatan ion tertentu. Mekanisme lain yang dapat terjadi diantaranya ada ikatan hidrogen, kompleksasi, pertukaran ion, adsorpsi fisik berdasarkan jenis pori, dan mekanisme lainnya. Kompleksasi menurut Fu *et al.* (2021) dapat terjadi jika konsentrasi polutan terlalu tinggi.



Gambar 18. Contoh interaksi mekanisme yang terjadi antara *methylene blue* dan jeruk bali (Sumber: Dinh *et al.*, 2019)



Gambar 19. Contoh mekanisme interaksi yang terjadi antara Pb^{2+} dengan *biochar* (Sumber: C. Wang *et al.*, 2022)