

# Bab 2

## Penyerap (Adsorben)

---

Adsorben yang biasanya merupakan padatan berpori, memegang peranan yang sangat penting dalam proses adsorpsi. Adsorben harus mampu memberikan kinerja yang baik pada saat berdifusi dalam pori maupun pada saat kesetimbangan adsorpsi. Suatu adsorben yang mempunyai kemampuan penyerapan yang sangat bagus tetapi memerlukan waktu yang lama pada saat berdifusi, bukan pilihan yang tepat untuk penerapan pada skala industri karena akan membutuhkan waktu tinggal yang lama di dalam kolom penyerap. Semakin besar waktu tinggal, semakin banyak jumlah adsorben yang dibutuhkan. Adsorben yang baik adalah adsorben yang mempunyai kapasitas dan kinetika adsorpsi yang tinggi (Do, 1998). Suatu adsorben yang cocok untuk penerapan dalam skala industri harus memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Adsorben harus mempunyai luas permukaan aktif dan volume mikropori yang tinggi. Suatu adsorben harus mempunyai porositas yang besar dan ukuran pori yang kecil. Kombinasi yang tepat antara mikropori dan mesopori merupakan syarat sebagai adsorben yang baik.
- Adsorben harus mempunyai jaringan pori yang cukup besar sehingga memudahkan perpindahan atau difusi adsorbat ke dalam struktur dalam dari adsorben.
- Murah dan dapat diregenerasi dengan mudah.

Berdasarkan definisi *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) ukuran pori adsorben dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Do, 1998):

- Mikropori :  $d < 20$  angstrom
- Mesopori :  $20 < d < 500$  angstrom
- Makropori :  $d > 500$  angstrom

Beberapa adsorben yang tersedia secara komersial adalah: alumina, silika gel, karbon aktif dan zeolite. Pada Bab 2 ini dibahas beberapa aspek penting adsorben komersial, beberapa adsorben non-konvensional, dan adsorben berbahan material maju yang baru dikembangkan pada tahap penelitian.

### 2.1. Karbon aktif

Karbon aktif adalah bahan yang memiliki struktur pori yang kompleks dan sangat heterogen. Struktur yang heterogen dari karbon aktif disebabkan

adanya berbagai macam pori baik mikro, meso, maupun makro dengan berbagai macam ukuran. Karbon aktif diproduksi secara komersial dari berbagai macam bahan baku, di mana sifat permukaan yang dihasilkan (komposisi kimia, luas permukaan dan ukuran pori) bergantung pada bahan mentah yang dipilih sebagai bahan baku, serta prosedur pembuatan (metode aktivasi, suhu, dll.) (Lopes dkk., 2021). Kemampuan adsorpsi mereka yang tinggi karena luas permukaannya yang tinggi, mempunyai struktur mikropori, dan reaktivitas permukaan yang sangat tinggi. Oleh karena itu, bahan ini secara luas digunakan untuk pemurnian berbagai macam produk kimia, menghilangkan warna, menghilangkan bau, menghilangkan klorin, pemisahan senyawa-senyawa berbahaya dari gas dan larutan, dan lain-lain.

Permukaan karbon aktif memiliki karakter yang unik. Ia memiliki struktur berpori yang menentukan kapasitas adsorpsi, memiliki struktur kimia yang mempengaruhi interaksi dengan adsorbat polar atau nonpolar, memiliki sisi aktif yang menentukan reaksi kimia dengan atom lain. Dengan demikian, perilaku adsorpsi pada karbon aktif tidak dapat diinterpretasikan berdasarkan luas permukaan dan distribusi ukuran pori saja. Permukaan karbon aktif memiliki muatan positif di bawah  $pH_{pzc}$  (muatan titik nol) dan muatan negatif di atas  $pH_{pzc}$  hingga kisaran nilai pH tertentu. Muatan positif pada permukaan karbon aktif dikaitkan dengan adanya gugus permukaan basa, protonasi permukaan yang berlebihan pada pH rendah dan lapisan *graphene* yang bertindak sebagai basa Lewis yang menghasilkan pembentukan kompleks akseptor-donor yang sangat penting pada adsorpsi senyawa-senyawa organik dari larutan (Bansal dan Goyal, 2005). Pada nilai pH yang lebih tinggi, permukaan karbon memiliki muatan negatif, akibat ionisasi gugus permukaan karbon-oksigen yang bersifat asam.

Sifat kimiawi permukaan karbon aktif lebih kompleks dari pada jaringan pori. Sifat ini bergantung pada banyak faktor, misalnya sumber karbon serta cara karbon diaktifkan. Karbon aktif dibuat dari bahan baku yang biasanya kaya akan oksigen sehingga banyak gugus fungsi pada karbon aktif yang memiliki atom oksigen. Selain itu, oksigen juga dimasukkan selama proses aktivasi (terutama aktivasi fisika) yaitu dengan penambahan udara atau uap air. Kelompok fungsional pembawa oksigen dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama: kelompok asam dan kelompok basa. Gugus fungsi karbon aktif dapat ditingkatkan dengan menambahkan oksidator atau diturunkan dengan memaparkannya ke lingkungan vakum pada suhu yang sangat tinggi (Do, 1998).

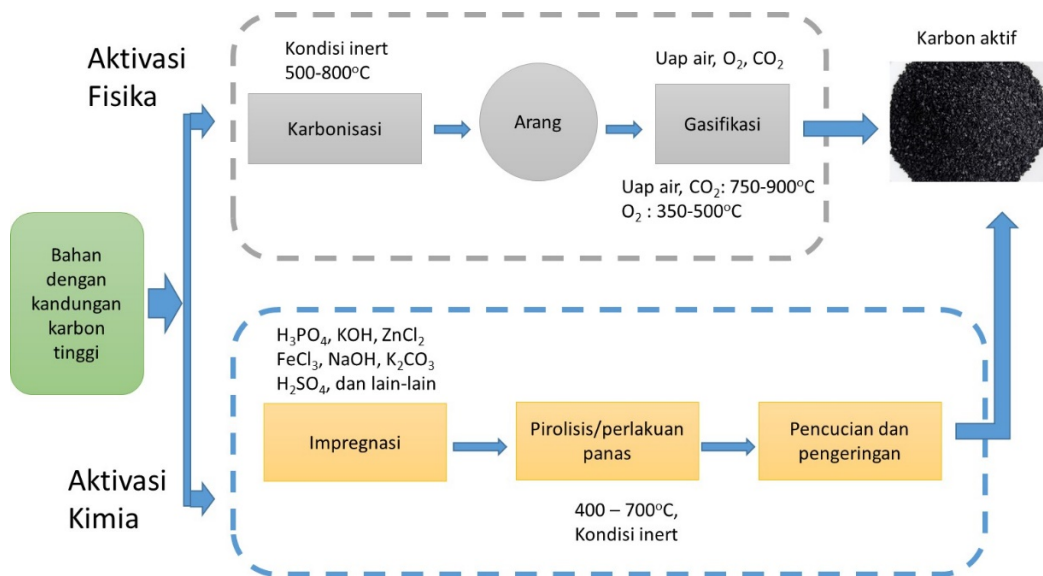
### 2.1.1. Bahan baku dan proses pembuatan

Karbon aktif dibuat dengan proses pirolisis bahan baku berkarbon pada suhu lebih rendah dari 1000°C. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi termal pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen dalam sistem. Pada proses pirolisis ini dihasilkan tiga macam produk, yaitu gas yang tidak dapat dikondensasi, uap yang dapat dikondensasi menjadi suatu cairan (*tar*) dan padatan arang karbon (*char*). Padatan arang karbon hasil proses pirolisis biasanya mempunyai porositas dan jumlah pori yang rendah. Arang karbon (*char*) harus diproses lebih lanjut untuk memperbesar porositas dan menciptakan pori-pori baru. Proses pembentukan pori dan porositas padatan karbon disebut dengan proses aktivasi, dan produk hasil aktivasi dinamakan dengan karbon aktif.

Karakteristik pori dari karbon aktif yang diperoleh sangat tergantung dari bahan baku awal dan proses aktivasi yang digunakan. Karakteristik karbon aktif pada umumnya adalah sebagai berikut:

- Luas permukaan spesifik (BET) : 400 – 1600 m<sup>2</sup>/g
- Total porositas : 0,3 – 0,75
- Volume mikropori : 0,2 – 0,5 cm<sup>3</sup>/g
- Volume mesopori : 0,2 – 0,4 cm<sup>3</sup>/g
- Ukuran mikropori : 4 – 20 angstrom
- Ukuran mesopori : 20 – 500 angstrom
- Densitas partikel : 0,6 – 0,8 g/cm<sup>3</sup>

Terdapat dua macam proses pembuatan dan aktivasi karbon aktif yaitu proses aktivasi kimia dan aktivasi fisika (Gambar 2.1). Proses aktivasi kimia dikenal sebagai proses satu langkah, karena karbonisasi dan aktivasi berjalan secara bersamaan. Proses pembuatan karbon aktif melalui aktivasi kimia dilakukan pada kisaran suhu 400 – 700°C. Pada tahap ini, reaksi de-polymerisasi, dehidrasi, dan kondensasi berlangsung, menghasilkan hasil karbon yang lebih tinggi daripada aktivasi fisika karena pembatasan dalam pembentukan tas dan senyawa-senyawa volatil. Senyawa kimia yang umum digunakan sebagai pengaktif adalah ZnCl<sub>2</sub>, KOH, dan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Bahan kimia lain yang kadang-kadang digunakan sebagai senyawa pengaktif adalah H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan NaOH.



**Gambar 2.1.** Diagram pembuatan karbon aktif (dimodifikasi dari Bedia dkk., 2020)

Sedangkan aktivasi fisika merupakan proses dua tahap, karbonisasi dan aktivasi dilakukan dalam tahapan proses yang berbeda. Karbonisasi bahan baku dilakukan pada suhu 500 – 800°C dan dilanjutkan dengan proses aktivasi (gasifikasi) pada suhu 750 – 900°C. Aktivator yang digunakan pada proses aktivasi fisika adalah uap air, oksigen dan gas CO<sub>2</sub>. Beberapa contoh pembuatan karbon aktif berbahan baku biomassa dengan proses aktivasi kimia dan fisika dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Karbon aktif dari limbah biomassa dan proses aktivasinya

Bahan baku	Metode aktivasi	Kondisi operasi	Luas BET, m <sup>2</sup> /g	Referensi
Ampas biji jarak	Fisika (aktivasi uap), kimia (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	900°C, 30 menit (Fisika), 200°C, 1 jam (Kimia)	603	Silva dkk., 2021
Ampas kopi	Kimia (KOH)	650°C	1372	Asimakopoulos dkk., 2020

Ampas malt	Fisika (aktivasi uap)	841°C, 82 menit	917	Lopes dkk., 2021
Batang kelapa sawit	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	450°C	1657	Lim dkk., 2020
Biji <i>Peganum harmala</i>	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	500°C	442	Nasseh dkk., 2021
Biji buah <i>Phyllanthus emblica</i>	Fisika (hidrotermal)	400°C, 90 menit	569	Suhas dkk., 2021
Biji oak	Kimia (KOH)	650°C	2896	Borghei dkk., 2021
Daun mangga	Kimia (KOH)	800°C, 2 jam	677	Negi dkk., 2021
Kayu pinus	Kimia (KOH)	750°C	944	Sher dkk., 2020
Kraft lignin	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	700°C	1150	Brazil dkk., 2020
Kulit kacang	Kimia (KOH)	600°C	1240	Orduz dkk., 2021
Kulit kacang	Kimia (KOH)	750°C	900	Sher dkk., 2020
Kulit kayu akasia	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	500°C	391	Zhang dkk., 2021(a)
Kulit manggis	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	550°C	1832	Zhang dkk., 2021(b)
Kulit manggis	Kimia (ZnCl <sub>2</sub> )	600°C, 2 jam	424	Kongsune dkk., 2021
Kulit walnut	Kimia (KOH)	750°C	603	Sher dkk., 2020
Pakis air	Kimia (KOH)	700°C	2848	Mueanpun dkk., 2021
Polong buah apel ackee	Kimia (ZnCl <sub>2</sub> )	500°C	812	Bello dkk., 2021
Polong buah kakao	Kimia (KOH)	600°C, 3 jam	-	Tiegam dkk., 2021
Polong <i>Sibipiruna</i>	Kimia (KOH, K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	500°C, 2 jam	1984	Spessato dkk., 2021
<i>Sargassum (sp)</i>	Kimia (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	700°C, 90 menit	754	Francoeur dkk., 2021
Sekam padi	Kimia (KOH)	800°C, 2 jam	2610	Dias dkk., 2021

Suhu merupakan salah satu parameter proses yang sangat penting dalam pembuatan karbon aktif. Dalam aktivasi atau karbonisasi bahan lignoselulosa pada suhu tinggi, struktur polimer alam pada bahan (hemiselulosa, lignin, selulosa) terurai dan membebaskan sebagian besar elemen non-karbon, terutama hidrogen, oksigen dan nitrogen dalam bentuk cairan (disebut sebagai *tar*) dan gas, meninggalkan kerangka karbon yang kaku. Secara umum, proses kehilangan massa suatu bahan lignoselulosa karena pemanasan pada suhu tinggi melalui tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Suhu 50 – 200°C: terjadi penguapan air bebas dan air terikat dari struktur bahan lignoselulosa.
- Suhu 200 – 300°C: terjadi dekomposisi termal hemiselulosa menjadi senyawa-senyawa dengan berat molekul lebih rendah.
- Suhu 300 – 360°C: terjadi dekomposisi termal selulosa menjadi senyawa-senyawa dengan berat molekul lebih rendah.
- Suhu 360 – 500°C: dekomposisi termal lignin menjadi senyawa-senyawa dengan berat molekul lebih rendah.

Semakin tinggi suhu yang digunakan, hasil padatan karbon yang diperoleh juga semakin berkurang karena proses dekomposisi termal yang terjadi menyebabkan lebih banyak struktur polimer yang terurai. Untuk memperoleh suatu karbon aktif dengan struktur mikroporositas yang tinggi dan homogen, pemilihan bahan baku harus dilakukan secara ketat dan aktivasi dilakukan secara fisika, bahan baku berupa polimer buatan seperti poliamida, polivinil klorida, resin dan lain-lain akan memberikan hasil pori yang lebih homogen dibandingkan menggunakan bahan lignoselulosa.

Proses pembuatan karbon dengan aktivasi kimia melibatkan berbagai macam reaksi kimia yang kompleks. Sebagai contoh adalah pembuatan karbon aktif dari limbah kapas dengan zat aktivator FeCl<sub>3</sub> (Xu dkk., 2019; Bedia dkk., 2020). Pada proses aktivasi dengan FeCl<sub>3</sub>, adanya FeCl<sub>3</sub> mengurangi suhu hidrolisis selulosa dan menyebabkan reaksi depolimerisasi yang intens dengan pelepasan sejumlah besar hidrokarbon dengan berat molekul rendah. Pada suhu pirolisis antara 200 dan 300°C, FeCl<sub>3</sub> memutus ikatan glikosida selulosa, dan molekul H<sub>2</sub>O dilepaskan secara bersamaan dari garam terhidrasi, menghasilkan pembentukan glukosa monosakarida (Bedia dkk., 2020). Dalam kisaran suhu ini, garam besi klorida terhidrasi terurai menjadi FeOOH amorf melalui reaksi berikut:





Tahap kedua terjadi pada suhu pirolisis antara 330 dan 700°C. Ketika suhu aktivasi meningkat, molekul glukosa mengalami pembukaan cincin berturut-turut, dehidrasi, dan siklisasi menjadi 5-hidroksimetilfurfural, yang setelah dekarbonilasi diubah menjadi furfural. Dengan kenaikan suhu tersebut, FeOOH terlebih dahulu diurai menjadi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, yang selanjutnya direduksi oleh permukaan karbon menjadi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sesuai dengan reaksi kimia berikut (Bedia dkk., 2020):



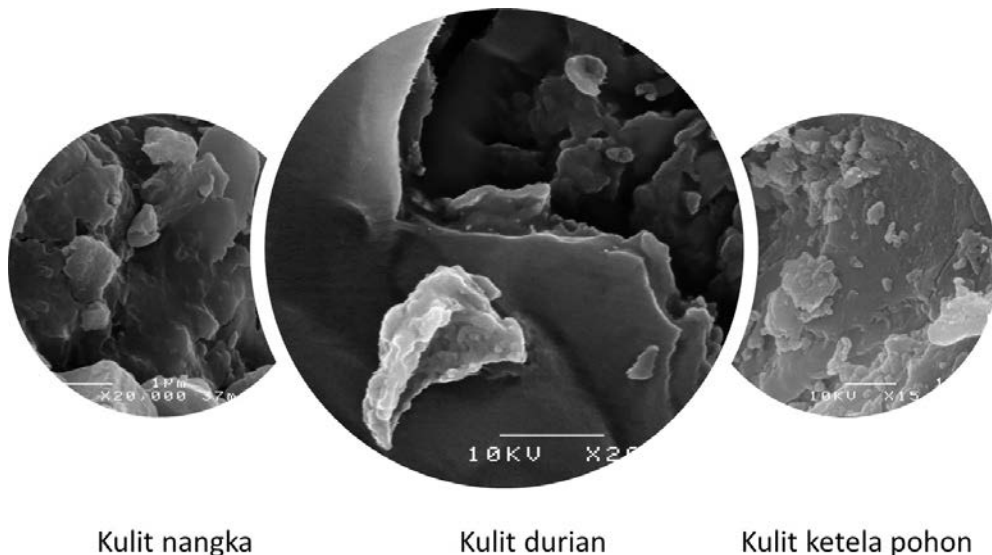
Oksida besi ini mengkatalis pembentukan mikroporositas pada matriks karbon. Selain itu, berbagai hidrokarbon yang dihasilkan selama pirolisis diendapkan pada permukaan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan membentuk mesopori setelah penghilangan spesies besi pada tahap pencucian asam. Peningkatan lebih lanjut dari suhu aktivasi (> 700°C) mengakibatkan peningkatan proporsi padatan karbon tetap dengan diiringi pelepasan zat volatil, uap air, dan karbon dioksida, sebagai konsekuensi dari polimerisasi dan polikondensasi yang terjadi antara furfural dan 5-hidroksimetilfurfural (Bedia dkk., 2020). Pada suhu tinggi ini, spesies besi direduksi menjadi besi valensi nol oleh permukaan karbon:



Akhirnya, adanya ikatan silang dan reorganisasi struktur dengan transformasi spesies besi menghasilkan pembentukan karbon aktif yang sangat berpori dengan Fe yang sangat stabil tertambat di permukaannya.

### 2.1.2. Karakteristik dan struktur pori

Ciri utama karbon aktif adalah struktur pori mereka yang berkembang dengan baik. Untuk mengetahui struktur dan karakteristik pori serta sifat topografi permukaan suatu karbon aktif perlu dilakukan karakterisasi dengan menggunakan beberapa metode yaitu: analisa SEM (*Scanning Electron Microscopy*), difraksi sinar X (XRD), adsorpsi dan desorpsi gas nitrogen, dan lain-lain. Analisa SEM memberikan gambaran topografi permukaan suatu adsorben, Analisa ini hanya mampu memberikan informasi mengenai struktur makropori suatu adsorben dan tidak dapat memberikan informasi mengenai struktur mikropori dan mesopori. Beberapa contoh gambar SEM untuk bahan baku lignoselulosa (kulit durian, kulit Nangka, dan kulit ketela pohon) serta karbon aktif yang dihasilkan dari bahan baku tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan 2.3.



**Gambar 2.2.** Beberapa gambar SEM dari limbah lignoselulosa

Dari Gambar 2.2 dan 2.3 dapat dilihat bahwa proses karbonisasi dan aktivasi pada suhu tinggi akan merubah topografi permukaan dari bahan lignoselulosa. Pada Gambar 2.3 juga dapat dilihat dengan jelas bahwa analisa dengan menggunakan SEM tidak dapat digunakan untuk melihat struktur dalam dari karbon aktif.

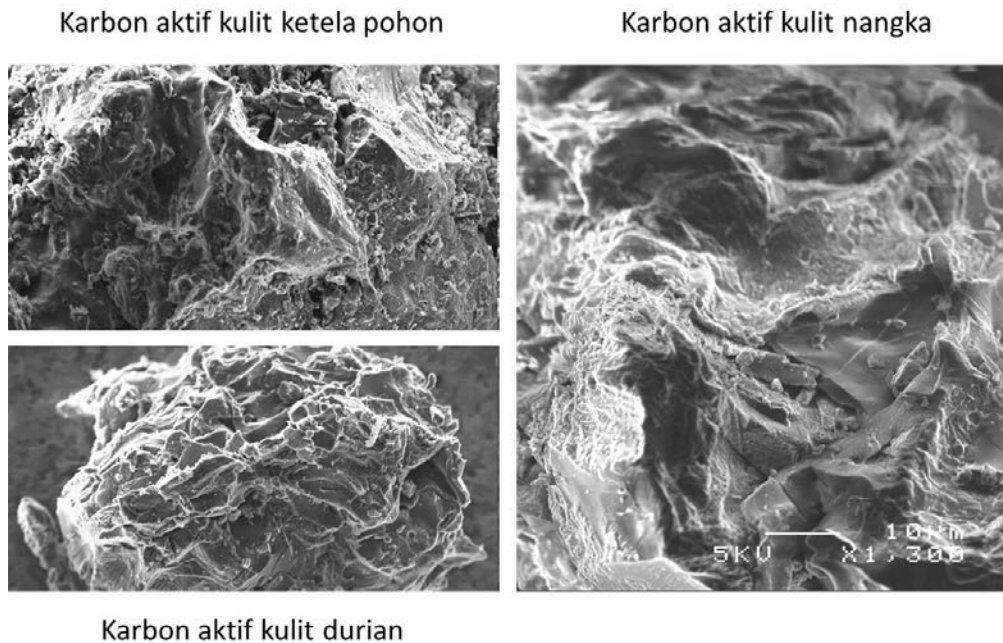
Analisa XRD digunakan untuk menentukan kristalinitas suatu bahan. Karbon aktif memiliki struktur mikrokristalin yang mulai terbentuk pada saat



proses karbonisasi. Struktur mikrokristalin ini dinyatakan dengan jarak antar lapisan  $d_{002}$  yang dapat dihitung berdasarkan persamaan Bragg:

$$d = \frac{\gamma}{2 \sin \theta} \quad (2-8)$$

Dimana  $\gamma$  adalah panjang gelombang sinar X dan  $\theta$  adalah sudut difraksi. Harga  $d_{002}$  untuk karbon aktif bervariasi antara 0,34 – 0,36 nm. Semakin tinggi suhu karbonisasi atau suhu aktivasi harga  $d_{002}$  akan mendekati harga grafit ( $d_{002} = 0,335$  nm) (Prahas dkk., 2008). Orientasi lapisan mikrokristalin pada karbon aktif berbeda dengan grafit, orientasi lapisan mikrokristalin pada karbon aktif kurang teratur dibandingkan grafit. Ketidakteraturan orientasi lapisan mikrokristalin pada karbon aktif disebabkan adanya atom-atom lain seperti oksigen dan hidrogen pada struktur karbon. Disamping itu adanya cacat pada situs kosong karbon aktif juga akan menyebabkan orientasi mikrokristalin menjadi tidak teratur (Bansal dan Goyal, 2005).



**Gambar 2.3.** Karbon aktif dari bahan lignoselulosa

Selain mempunyai struktur kristal dan berpori, permukaan karbon aktif juga memiliki struktur kimiawi. Struktur kimia karbon aktif hampir selalu dikaitkan dengan keberadaan unsur oksigen dan hidrogen dalam jumlah yang cukup besar. Selain unsur oksigen dan hidrogen, unsur-unsur lain seperti belerang, nitrogen, dan halogen juga terdapat dalam struktur kimia karbon

aktif tetapi dalam jumlah yang lebih terbatas. Heteroatom ini berasal dari bahan baku yang digunakan dan menjadi bagian dari struktur kimia karbon aktif sebagai akibat dari karbonisasi yang tidak sempurna, atau mereka menjadi terikat secara kimiawi pada permukaan selama aktivasi. Heteroatom ini terikat pada tepi dan sudut lembaran aromatik atau pada atom karbon pada posisi cacat dan menimbulkan ikatan karbon-oksigen, karbon-hidrogen, karbon-nitrogen, karbon-sulfur, dan senyawa permukaan karbon-halogen, juga dikenal sebagai gugus fungsi permukaan. Heteroatom ini juga dapat bergabung dalam lapisan karbon membentuk sistem cincin heterosiklik. Karena tepi ini merupakan permukaan penyerap utama, keberadaan senyawa permukaan atau spesies molekul ini dapat mengubah karakteristik permukaan dan sifat permukaan karbon aktif (Bansal dan Goyal, 2005).

Gugus fungsi permukaan karbon-oksigen sejauh ini merupakan gugus fungsi permukaan terpenting yang mempengaruhi karakteristik permukaan seperti keterbasahan, polaritas, keasaman, dan sifat fisika-kimia seperti reaktivitas katalitik, listrik, dan kimia dari bahan-bahan ini. Sifat dan jumlah gugus oksigen permukaan yang terbentuk karena oksidasi sangat berbeda antara karbon aktif yang satu dengan yang lain dan sangat tergantung pada sifat permukaan karbon, cara pembuatan, aktivasi, luas permukaan, perlakuan oksidasi, dan suhu. Karbon aktif memiliki sifat asam-basa sebagai akibat dari oksidasi permukaan, proses pembuatan, dan suhu oksidasi. Saat ini gugus fungsi permukaan karbon – oksigen dari karbon aktif dibedakan menjadi 3 jenis yaitu asam, basa, dan netral. Gugus fungsi yang bersifat asam biasanya terbentuk jika karbon aktif direaksikan dengan oksigen pada suhu hingga 400°C atau direaksikan dengan larutan oksidator pada suhu kamar. Gugus fungsi yang bersifat asam ini tidak terlalu stabil pada suhu tinggi dan akan terurai jika karbon aktif dipanaskan di atas suhu 350°C membentuk gas CO<sub>2</sub>. Suatu karbon aktif yang memiliki gugus fungsional asam akan cenderung bersifat hidrofilik dan polar. Gugus fungsional permukaan yang bersifat asam ini adalah golongan karbosilat, fenolik, dan lakton (Bansal dan Goyal, 2005).

Gugus fungsi permukaan yang bersifat basa terbentuk jika karbon dipanaskan pada kondisi vakum pada suhu sekitar 1000°C, setelah pendinginan hingga mencapai suhu kamar, karbon dikontakkan dengan gas oksigen. Gugus fungsi permukaan dengan struktur tipe piron dikategorikan dalam gugus permukaan yang bersifat basa. Struktur ini memiliki cincin yang mengandung oksigen heterosiklik dengan sisi aktif =CH<sub>2</sub> atau =CHR (dengan R adalah gugus alkil). Struktur seperti piron terletak di dua cincin berbeda dari lapisan grafitik. Gugus permukaan yang bersifat basa ini akan terdekomposisi membentuk CO<sub>2</sub> dan CO pada suhu 900 – 1200°C. Gugus oksigen permukaan

yang bersifat netral terbentuk karena oleh kimisorpsi oksigen yang tidak dapat diubah di situs tak jenuh jenis etilen yang ada di permukaan karbon. Pada suhu tinggi, gugus permukaan yang bersifat netral ini akan terdekomposisi menjadi  $\text{CO}_2$ . Jika dibandingkan dengan gugus fungsional permukaan yang bersifat asam, gugus permukaan yang bersifat basa ini lebih stabil dan terdekomposisi pada rentang suhu 500 – 600°C (Bansal dan Goyal, 2005).

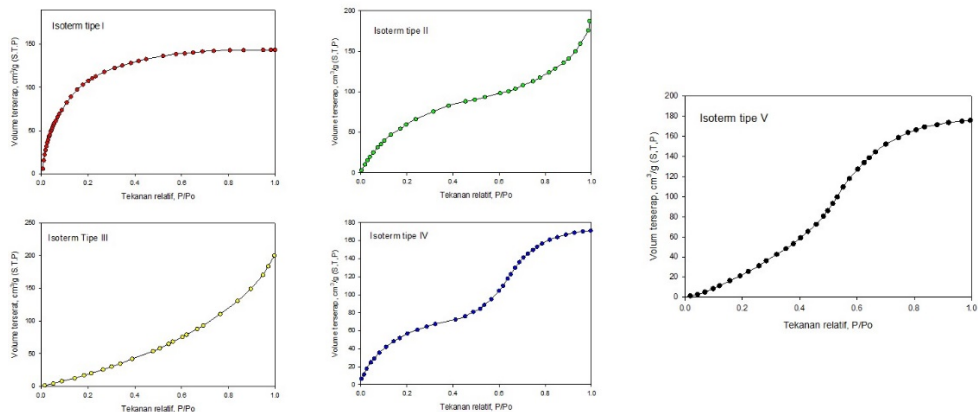
Sifat yang penting dari karbon aktif adalah gugus fungsi permukaannya dapat dimodifikasi secara tepat untuk mengubah karakteristik adsorpsinya dan untuk menyesuaikan dengan aplikasi karbon aktif untuk proses tertentu. Modifikasi permukaan karbon aktif dapat dilakukan dengan pembentukan berbagai jenis gugus fungsional permukaan yang berbeda. Gugus fungsional permukaan tersebut adalah sebagai berikut (Bansal dan Goyal, 2005):

- Gugus permukaan karbon-oksigen yang dibentuk oleh oksidasi permukaan karbon dengan gas atau larutan pengoksidasi.
- Gugus permukaan karbon-hidrogen dengan perlakuan menggunakan gas hidrogen pada suhu tinggi.
- Gugus permukaan karbon-nitrogen dapat diperoleh dengan modifikasi permukaan karbon dengan gas ammonia.
- Gugus permukaan karbon-belerang dapat diperoleh dengan modifikasi karbon aktif menggunakan belerang, karbon disulfida,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  baik dalam fase gas maupun cair.

Struktur pori suatu karbon aktif dapat diketahui dari interpretasi isoterm adsorpsi/desorpsi nitrogen yang diperoleh pada suhu -196°C (titik didih gas nitrogen). Secara umum terdapat 5 tipe isoterm adsorpsi yaitu: isoterm tipe I, II, III, IV, dan V. Bentuk isoterm I, II, III, IV, dan V dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Isoterm adsorpsi tipe I biasanya terjadi untuk adsorpsi pada adsorben yang mempunyai struktur mikropori yang kecil. Pada jenis mikropori seperti ini gaya potensial dari dinding pori yang berhadapan akan saling tumpang tindih yang akan menyebabkan kenaikan energi interaksi antara permukaan adsorben dan molekul-molekul gas nitrogen. Fenomena ini akan menyebabkan meningkatnya molekul gas nitrogen yang terserap oleh padatan, terutama pada tekanan relatif yang rendah. Pada kondisi ini energi interaksi cukup besar untuk mengisi mikropori yang kecil dengan nitrogen secara sempurna pada tekanan relatif yang rendah. Isoterm ini dicirikan oleh kurva yang hampir horizontal dan sejajar dengan sumbu tekanan relatif (sumbu x).

Adsorpsi pada tekanan relatif yang tinggi menjadi kecil dan cenderung mendatar. Isoterm tipe I umum terjadi pada proses adsorpsi kimia, meskipun beberapa adsorpsi fisika juga terjadi seperti pada karbon aktif yang mempunyai struktur pori sangat kecil dan dalam *carbon molecular sieve* juga sesuai dengan tipe ini.



**Gambar 2.4.** Tipe-tipe kurva isoterm adsorpsi

Isoterm tipe II tidak menunjukkan batas saturasi seperti halnya pada tipe I. Isoterm tipe ini menunjukkan formasi multi-lapisan yang tidak terbatas setelah selesainya lapisan tunggal dan banyak dijumpai dalam adsorben dengan distribusi ukuran pori yang luas. Isoterm tipe II banyak dijumpai untuk adsorpsi pada serbuk tidak berpori atau pada serbuk yang mempunyai ukuran pori lebih besar dari mikropori. Selesainya adsorpsi pada lapisan pertama ditandai dengan adanya titik belok pada isoterm.

Isoterm tipe III umumnya diperoleh dalam kasus adsorben yang tidak berpori atau sangat mikroporous. Isoterm tipe III ini dicirikan oleh panas adsorpsi yang lebih kecil daripada panas pencairan adsorbat, sehingga interaksi antara adsorbat dengan permukaan adsorben lebih kecil bila dibandingkan dengan interaksi antara adsorbat dan lapisan teradsorpsi.

Isoterm tipe IV diperoleh untuk padatan yang mengandung pori-pori dalam kisaran mesopori. Bentuk isoterm Tipe IV mengikuti jalur yang sama dengan tipe II pada tekanan relatif rendah, kemiringan kurva akan menurun pada tekanan yang lebih tinggi. Adanya kondensasi kapiler merupakan ciri khas dari isoterm tipe IV.

Isoterm sigmoidal, atau tipe V menurut sistem klasifikasi IUPAC, tersebar luas dalam sistem adsorpsi yang melibatkan molekul polar, seperti air

pada karbon aktif. Perilaku ini biasanya dikaitkan dengan pengelompokan molekul dari adsorbat, karena interaksi adsorbat-adsorben yang lemah dibandingkan dengan interaksi antar molekul yang lebih kuat. Hal ini menyebabkan isoterm yang awalnya cembung berubah menjadi cekung dan menunjukkan saturasi pada tekanan tinggi. Jenis isoterm ini sebagian besar dijumpai pada proses adsorpsi dengan menggunakan mesopori adsorben.

Salah satu karakteristik penting dari karbon aktif yang dapat diperoleh dari isoterm adsorpsi gas nitrogen adalah luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori adsorben. Luas permukaan spesifik dari adsorben biasanya dinyatakan dengan luas permukaan Brunauer-Emmet-Teller (BET). Persamaan BET yang digunakan untuk menentukan luas permukaan suatu adsorben dapat dituliskan dalam bentuk linear sebagai berikut:

$$\frac{p}{V(p_o-p)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \frac{p}{p_o} \quad (2-9)$$

Plot antara  $p/V(p_o-p)$  dan  $p/p_o$  memberikan suatu garis lurus dengan *slope*  $C-1/(V_m C)$  dan intersep  $1/(V_m C)$ . Parameter  $V_m$  adalah volume gas yang dibutuhkan untuk membentuk lapisan *monolayer* pada permukaan adsorben. Isoterm adsorpsi BET pada umumnya linier dalam kisaran tekanan relatif 0,05 hingga 0,35. Pada tekanan relatif yang lebih rendah, persamaan tersebut biasanya tidak valid karena pengaruh heterogenitas permukaan menjadi signifikan. Pada tekanan relatif yang lebih tinggi, persamaan kehilangan validitasnya karena adsorpsi oleh kondensasi kapiler dan adsorpsi fisika juga terjadi.

Luas permukaan spesifik adsorben dapat dihitung dari parameter  $V_m$  ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) dengan menggunakan persamaan berikut ini:

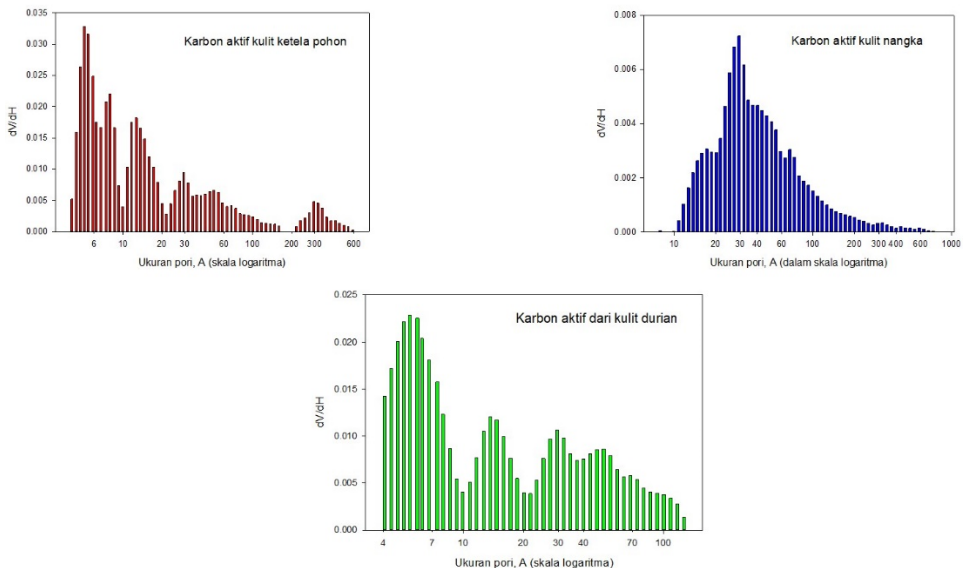
$$S_{BET} = a_m \cdot N \cdot V_m \quad (2-10)$$

$N$  adalah bilangan Avogadro,  $a_m$  adalah luas permukaan molekul adsorbat ( $0.162 \text{ nm}^2$  untuk gas nitrogen). Jika  $S_{BET}$  dinyatakan dalam  $\text{m}^2/\text{g}$ , persamaan (2-10) dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$S_{BET} = (V_m/22,400) \cdot N \cdot a_m \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{g} \quad (2-11)$$

Struktur bagian dalam suatu karbon aktif dapat dinyatakan dalam distribusi ukuran pori. Frekuensi ukuran pori yang dinyatakan sebagai diameter pori ekuivalen saat membentuk fungsi kontinu dianggap sebagai

distribusi ukuran pori. Distribusi ukuran pori adalah fungsi dari bentuk pori yang digunakan dalam analisis, dan sering kali digunakan beberapa bentuk fungsi distribusi seperti distribusi gamma atau distribusi Gaussian. Pada sebagian besar media berpori, ukuran pori tersebar pada spektrum nilai yang luas, dari mikropori sampai makropori. Beberapa metode dapat digunakan untuk mengukur distribusi ukuran pori suatu karbon aktif seperti *mercury porosimetry*, adsorpsi fase gas, *micro tomography* dan lain-lain. Contoh distribusi ukuran pori beberapa karbon aktif yang diperoleh dari penerapan persamaan *density functional theory* (DFT) pada kurva adsorpsi gas nitrogen dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** Distribusi ukuran pori beberapa karbon aktif

Dari Gambar 2.5 dapat dilihat bahwa distribusi ukuran pori karbon aktif sangat beragam, dari ukuran mikropori hingga makropori. Untuk karbon aktif dari kulit ketela pohon yang dibuat pada suhu karbonisasi dan aktivasi 500°C dengan zat aktivator  $ZnCl_2$ , ukuran pori sangat heterogen mulai dari mikropori yang kecil (4 Å) hingga makropori (600 Å). Untuk karbon aktif dari kulit nangka (karbonisasi pada suhu 450°C dilanjutkan aktivasi dengan uap  $CO_2$  pada suhu 900°C) distribusi ukuran pori sebagian besar berada pada daerah mesopori dan terdapat makropori dalam fraksi yang sangat kecil. Sedangkan karbon aktif dari kulit durian (aktivasi pada suhu 700°C dengan menggunakan uap air) karbon yang dihasilkan adalah kombinasi mikro dan mesopori. Metoda aktivasi

dan bahan baku sangat mempengaruhi struktur dan distribusi ukuran pori suatu karbon aktif. Sifat dan karakteristik pori dapat diatur dengan memilih metode aktivasi dan bahan baku yang akan digunakan.

## 2.2. Tanah liat

Mineral tanah liat adalah salah satu bahan yang paling melimpah di bumi. Mineral tersebut berperan penting dalam perkembangan peradaban manusia. Untuk melindungi lingkungan, mineral tanah liat telah digunakan dalam pembuangan dan penyimpanan bahan kimia berbahaya. Mineral tanah liat memiliki kemampuan katalitik untuk menetralkan bahan kimia organik berbahaya tertentu. Sebagai lapisan penyimpanan bahan kimia berbahaya, salah satu karakteristik terpenting dari mineral tanah liat adalah kemampuan adsorpsi. Sebagai lapisan dasar, mineral tanah liat harus mampu mencegah kebocoran bahan berbahaya ke lapisan tanah atau lingkungan. Kemampuan mineral tanah liat untuk menahan zat berbahaya bergantung pada kapasitas tukar kation (KTK) karena proses penahanan bahan beracun terutama terjadi melalui adsorpsi atau pertukaran ion (Ismadji dkk., 2015).

Karena nilai KTKnya yang tinggi, mineral tanah liat sangat efektif untuk adsorpsi kation dari larutan, oleh karena itu bahan ini banyak digunakan untuk menghilangkan logam berat dari larutan. Penyerapan logam berat oleh mineral tanah liat melibatkan serangkaian mekanisme adsorpsi yang kompleks, seperti ikatan langsung antara kation logam dengan permukaan mineral tanah liat, kompleksasi permukaan, pertukaran ion, dll. Meskipun sebagian besar tanah liat bermuatan negatif, karena luas permukaan dan volume pori yang tinggi, bahan ini dapat menyerap zat organik dan non-ionik dalam jumlah banyak. Dalam keadaan alami, mineral tanah liat bersifat hidrofilik dan dalam larutan air biasanya memiliki kapasitas adsorpsi yang rendah terhadap senyawa organik non ionik kecil. Kapasitas adsorpsi mineral tanah liat dapat ditingkatkan dengan modifikasi menggunakan berbagai macam asam, basa, garam, surfaktan dan bahan kimia organik atau anorganik lainnya. Melalui modifikasi ini mineral tanah liat menjadi hidrofobik dan organofilik, dan akan meningkatkan serapan senyawa organik non-ionik kecil (Ismadji dkk., 2015).

Mineral tanah liat termasuk dalam famili mineral filosilikat, yang tersusun dari lembaran polimer  $\text{SiO}_4$  tetrahedra yang dihubungkan menjadi lembaran  $(\text{Al,Mg,Fe})(\text{O,OH})_6$  oktahedra. Mineral tanah liat adalah aluminosilikat yang terbentuk sebagai produk pelapukan kimiawi dari mineral silikat lainnya di permukaan bumi (Sposito et al., 1999). Mineral ini memiliki

morfologi pelat datar karena susunan tertentu dari atom penyusun yang berada dalam struktur tertentu. Mineral tanah liat adalah mineral industri yang sangat penting; mereka telah digunakan sebagai bahan mentah untuk ratusan aplikasi industri karena ketersediaannya yang melimpah dan murah. Tanah liat telah digunakan dalam aplikasi pertanian, teknik dan konstruksi, perbaikan lingkungan, geologi, farmasi, pengolahan makanan, dan banyak aplikasi industri lainnya (Murray, 2007).

### 2.2.1. *Jenis dan tipe mineral tanah liat*

Mineral tanah liat pada dasarnya terdiri dari silika, alumina atau magnesia atau keduanya, dan air, tetapi substitusi besi untuk aluminium dan magnesium dalam derajat yang bervariasi juga sering dijumpai. Mineral tanah liat juga mengandung unsur-unsur kalium, natrium, dan kalsium dalam jumlah yang cukup banyak. Partikel mineral tanah liat secara individu terlihat seperti pelat kecil yang terdiri dari banyak lembaran kristal yang memiliki struktur atom berulang. Struktur atom terdiri dari lembaran oktahedral atau alumina dan lembaran tetrahedral atau silika. Lembaran oktahedral pada dasarnya adalah kombinasi dari enam hidroksil atau oksigen yang membungkus atom logam (aluminium, magnesium, besi atau atom lainnya).

Rasio  $\text{SiO}_2$  dalam rumus molekul mineral tanah liat merupakan faktor kunci yang menentukan jenis mineral tanah liat. Beberapa mineral tanah liat yang penting dalam industri dan sering digunakan dalam proses adsorpsi adalah sebagai berikut:

1. Mineral kaolin
2. Mineral smectite
3. Illite (mika)
4. Klorit
5. Palygorskite

#### 2.2.1.1. Mineral kaolin

Mineral kaolin mempunyai rumus struktur  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ , dan secara teoritis kaolin mempunyai komposisi kimia  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (39,50%),  $\text{SiO}_2$  (46,54%), dan air (13,96%). Mineral-mineral yang termasuk dalam kelompok kaolin adalah kaolinite, dickite, nacrite, dan halloysite. Struktur dasar mineral kaolin tersusun dari sebuah lembaran tetrahedral dan sebuah lembaran oktahedral. Dua pertiga dari posisi oktahedral diisi oleh atom-atom aluminium. Atom-atom aluminium ini dikelilingi oleh 4 atom oksigen dan 8 molekul hidroksil.

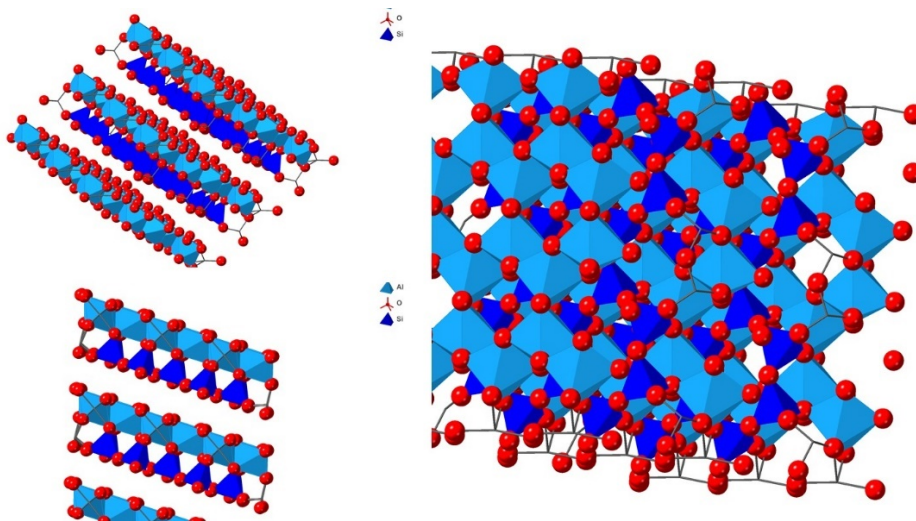


Distribusi muatan di lapisan kaolinite dapat dilihat pada Tabel 2.2. Distribusi muatan pada struktur kaolinite adalah berimbang (Murray, 2007).

**Tabel 2.2.** Distribusi muatan pada lapisan kaolinite (Murray, 2007)

Ion	Muatan
6 O <sup>2-</sup>	-12
4 Si <sup>4+</sup>	+16
4 O <sup>2-</sup> + 2(OH) <sup>-</sup>	-8
4 Al <sup>3+</sup>	+12
6(OH) <sup>-</sup>	-6

Kelompok mineral kaolin adalah lapisan 1:1 yang tersusun dari lembaran oktahedral dan tetrahedral (Gambar 2.6).

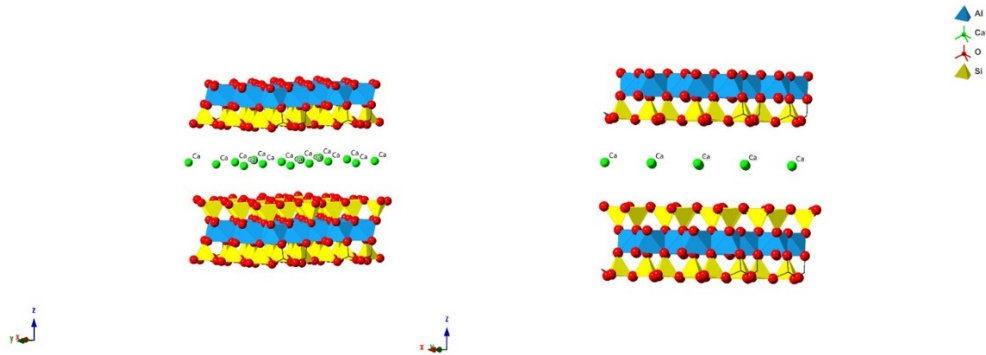


**Gambar 2.6.** Struktur kaolinite

### 2.2.1.2. Mineral smectite

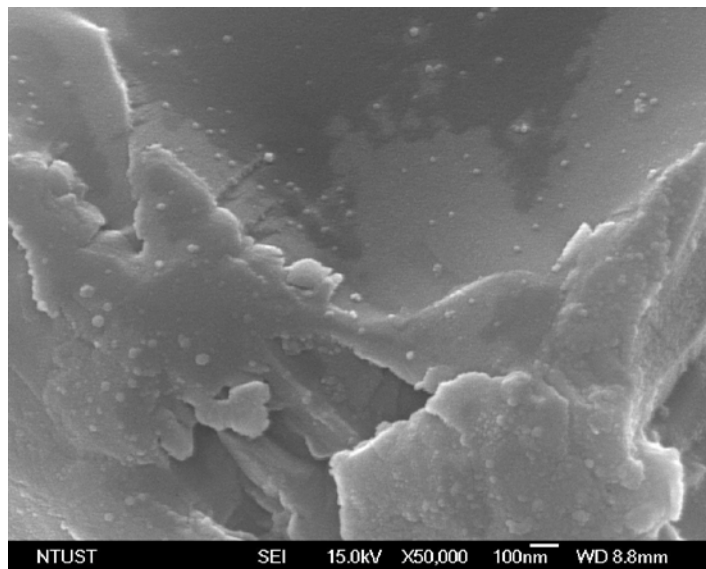
Mineral terpenting dari kelompok smectite adalah Na-montmorillonite, Ca-montmorillonite, Mg-montmorillonite (saponite), Fe-montmorillonite (nontronite), Li-montmorillonite (hectorite), dan Al-montmorillonite (beidellite). Mineral smectite tersusun dari dua lapisan silika tetrahedral dengan sebuah lapisan oktahedral sebagai pusat. Mineral smectite juga dikenal dengan lapisan 2:1. Di antar lapisan mineral smectite ini terdapat molekul-molekul air

dan molekul kation lainnya. Secara teoritis rumus molekul mineral smectite adalah  $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$  dan komposisi teoritis tanpa memperhitungkan molekul di ruang antar lapisan adalah:  $Al_2O_3$  28,3%,  $SiO_2$  66,7%, dan  $H_2O$  5% (Murray, 2007). Contoh salah satu struktur dari mineral smectite (Ca-montmorillonite) dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7.** Struktur Ca-montmorillonite

Tipe yang paling umum dari mineral smectite yang paling banyak digunakan untuk proses adsorpsi atau purifikasi adalah Ca-montmorillonite atau tanah liat nya disebut bentonite. Gambar SEM untuk Ca-montmorillonite dapat dilihat pada Gambar 2.8.

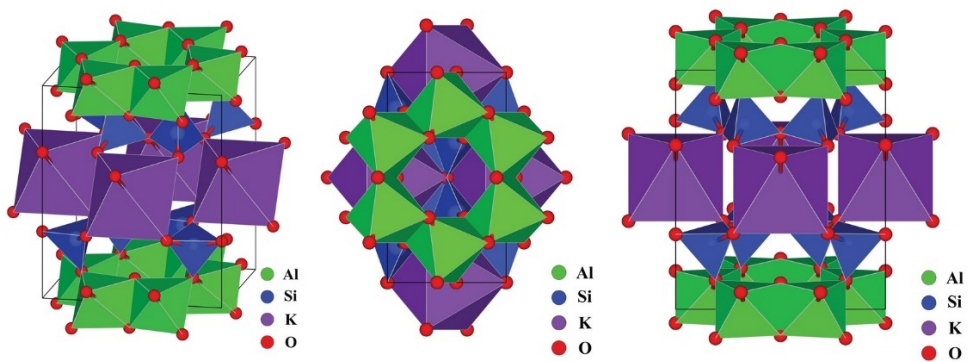


**Gambar 2.8.** Analisa SEM Ca-montmorillonite

Dalam proses adsorpsi pada fase cair menggunakan Ca-montmorillonite, ruang antar lapisan tetrahedral dan oktahedral memegang peranan yang sangat penting, karena pada ruangan itulah adsorpsi berlangsung.

#### 2.2.1.3. Illite

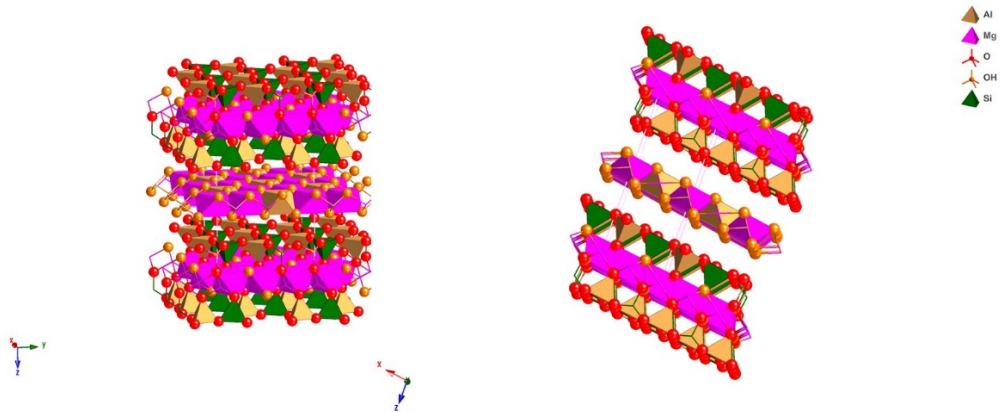
Illite merupakan mineral tanah liat mika, dan mempunyai lapisan struktur 2:1 dengan kalium sebagai kation pada antar lapisan. Ukuran, muatan, dan bilangan koordinasi kalium sedemikian rupa sehingga cocok dengan cincin heksagonal oksigen dari lembaran tetrahedral silika yang berdekatan. Hal ini memberikan struktur ikatan ionik yang saling terkait yang kuat yang menyatukan setiap lapisan dan mencegah molekul air menempati posisi antar lapisan (Murray, 2007). Struktur illite dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Struktur illite

#### 2.2.1.4. Klorit

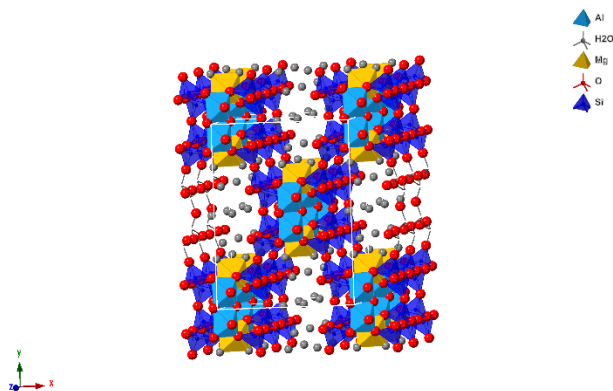
Klorit biasanya berbentuk serpihan dan juga dapat ditemukan di lapisan bawah dari lapisan batubara. Mineral klorit tanah liat berbeda dari klorit yang terkristalisasi dengan baik karena lapisan-lapisannya bertumpuk secara acak dan juga adanya beberapa hidrasi. Klorit adalah mineral lapis 2:1 dengan lapisan brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) sebagai *interlayer* (Gambar 2.10). Ada cukup banyak substitusi kation dalam klorit, paling sering adalah  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$ . Rumus molekul untuk klorit adalah  $(\text{OH})_4(\text{SiAl})_8(\text{Mg-Fe})_6\text{O}_{20}$ . Lembaran seperti brucite pada posisi *interlayer* memiliki komposisi umum  $(\text{MgAl})_6(\text{OH})_{12}$ . Jarak basal  $d_{001}$  klorit adalah sekitar  $14 \text{ \AA}$  (Murray, 2007).



**Gambar 2.10.** Struktur klorit

#### 2.2.1.5. Polygorskite: sepiolite

Palygorskite dan sepiolite adalah silikat lapis 2:1. Lembaran tetrahedral dihubungkan secara tak terhingga dalam dua dimensi. Namun, mereka secara struktural berbeda dari mineral lempung lainnya di mana lembaran oktahedral kontinu hanya dalam satu dimensi dan lembaran tetrahedral dibagi menjadi pita oleh inversi berkala baris tetrahedron. Struktur polygorskite dapat dilihat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11.** Struktur polygorskite

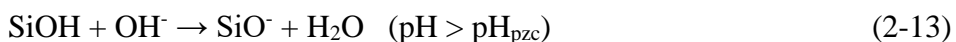
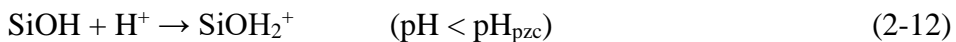
Mineral lempung ini mengandung dua jenis air, satu berkoordinasi dengan kation oktahedral dan yang lainnya terikat secara bebas di saluran, yang

disebut air zeolitik. Saluran ini mungkin juga berisi kation yang dapat ditukar (Murray, 2007).

### 2.2.2. Sifat-sifat mineral tanah liat

Adanya muatan dalam mineral tanah liat merupakan dasar terjadinya pertukaran kation dan sifat pembengkakan mineral tersebut. Lembaran mineral tanah liat tetrahedral dan oktahedral biasanya memiliki muatan. Muatan dalam mineral tanah liat ada dalam dua bentuk: muatan struktural dan permukaan. Muatan struktural bersifat permanen dan ada karena substitusi ion sedangkan muatan permukaan, biasanya bergantung pada nilai pH. Muatan struktural berasal dari bagian dalam lapisan. Pada mineral tanah liat dengan lapisan 2:1, muatan permukaan berasal dari permukaan basal lembaran tetrahedral, sedangkan untuk tanah liat dengan tipe lapisan 1:1 muatan permukaannya berasal dari lembaran tetrahedral dan oktahedral. Tepi lembaran tanah liat 1:1 dan 2: 1 juga berkontribusi pada muatan permukaan (Eslinger dan Pevear, 1988; Ismadji dkk., 2015).

Hidrolisis ikatan Si-OH atau Al-OH di sepanjang kisi tanah liat menghasilkan muatan permukaan. Bergantung pada struktur silika dan pH larutan, muatan permukaan bersih dapat positif atau negatif. Pada pH kurang dari  $pH_{pzc}$ , tanah liat akan memiliki kapasitas tukar anion, sedangkan pada pH lebih tinggi dari  $pH_{pzc}$ , tanah liat akan memiliki kapasitas tukar kation.



Untuk mineral tanah liat jenis lapisan 2:1, kontribusi muatan permukaan terhadap muatan total hanya kurang dari 1%, tetapi untuk mineral tanah liat jenis lapis 1:1, muatan permukaan memberikan kontribusi yang besar terhadap muatan total (Eslinger dan Pevear, 1988; Ismadji dkk., 2015). Seperti disebutkan sebelumnya,  $pH_{pzc}$  mineral tanah liat menentukan kemampuan pertukaran anion atau kation.  $pH_{pzc}$  adalah pH di mana muatan bersih total adalah nol. Pada  $pH_{pzc}$ , permukaan dapat tidak bermuatan atau bermuatan muatan positif dan negatif dengan kepadatan yang sama.

Kapasitas tukar kation (KTK) merupakan salah satu sifat penting dalam mineral tanah liat. KTK adalah ukuran kapasitas mineral tanah liat untuk menukar kation dari larutan. KTK juga merupakan ukuran konsentrasi kation tidak tetap pada lapisan *interlayer* dan permukaan, yang bergantung

pada besarnya muatan lapisan total. Karena muatan lapisan permukaan merupakan fungsi dari pH, maka KTK juga bervariasi dengan pH dan biasanya KTK diukur pada pH 7. Nilai KTK dari beberapa mineral tanah liat diberikan pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3.** Nilai KTK beberapa mineral tanah liat

<b>Mineral tanah liat</b>	<b>KTK, meq/100 g</b>
Allophane	70
Kaolinite	3-15
Halloysite (2H <sub>2</sub> O)	5-10
Natrium montmorillonite	80-130
Kalsium montmorillonite	40-70
Hectorite	80-130
Palygorskite	30-40
Sepiolite	30-40
Illite	10-40
Vermiculite	100-150

Kation logam yang umum ditemukan pada posisi pertukaran mineral lempung adalah Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, dan K<sup>+</sup>.

### 2.2.3. Modifikasi tanah liat untuk penyerap

Sifat kimiawi dan struktur pori bahan tanah liat umumnya mempengaruhi kemampuan adsorpsinya. Namun karena hidrofilitas sebagian besar mineral tanah liat, mineral tanah liat alami biasanya tidak efektif untuk adsorpsi kontaminan organik seperti zat warna, antibiotik, pestisida, dan senyawa biosidal (Koswojo et al., 2010; Kurniawan et al., 2011). Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya, modifikasi struktur pori bahan lempung telah dilakukan secara kimiawi maupun fisik. Modifikasi material tanah liat menggunakan bahan kimia modifikasi biasanya dilakukan dengan metode impregnasi sederhana sebagai berikut:

1. Pencucian dengan asam

2. Pilarisasi
3. Modifikasi dengan surfaktan
4. Komposit

#### 2.2.3.1. Pencucian dengan asam

Pencucian asam pada tanah liat dan mineral tanah liat menyebabkan pemisahan partikel tanah liat, menghilangkan pengotor, dan pelarutan lapisan luar. Modifikasi tanah liat dengan asam anorganik bertujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi mineral tanah liat melalui penambahan luas permukaan, volume pori, dan jumlah sisi asam. Penggunaan asam untuk menambah luas permukaan spesifik dan volume pori bentonit telah dilakukan dalam skala industri. Produk bentonit pencucian asam juga dikenal sebagai tanah pemucat telah digunakan untuk penghilangan warna minyak nabati. Asam yang paling banyak digunakan untuk tujuan ini adalah asam sulfat ( $H_2SO_4$ ). Modifikasi bentonit menggunakan asam dapat mengubah struktur kristal mineral tanah liat (Temuujin dkk., 2006).

Pada modifikasi mineral montmorillonite dengan asam, konsentrasi asam dan lamanya modifikasi asam sangat mempengaruhi struktur pori dan keasaman mineral montmorillonit. Keasaman montmorillonite timbul dari ion  $H^+$  di situs pertukaran permukaan (situs asam Brønsted). Situs-situs asam ini dihasilkan oleh pertukaran kation *interlamelar* ( $Mg^{2+}$  dan  $Al^{3+}$ ) dari lembaran oktahedral montmorillonite dengan proton ( $H^+$ ) dari asam sulfat. Dengan meningkatnya konsentrasi asam dan waktu impregnasi, sejumlah besar ion  $Al^{3+}$  dan  $Mg^{2+}$  dari lapisan oktahedral telah dihilangkan, sehingga menyebabkan penurunan keasaman Lewis. Beberapa penelitian yang menggunakan modifikasi asam untuk meningkatkan kemampuan penyerapan mineral tanah liat dapat dilihat pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4.** Modifikasi mineral tanah liat dengan asam

<b>Tanah liat/Mineral tanah liat</b>	<b>Asam</b>	<b>Kondisi operasi</b>	<b>Referensi</b>
Bentonite	$HNO_3$	Konsentrasi asam 8 M, suhu 75°C, kecepatan pengadukan 100 rpm	Shattar dkk., 2020

Biotite	HCl	Konsentrasi asam 0,3 M, suhu 30°C, waktu perendaman 30 menit	Kwon dkk., 2021
Illite	HCl	Konsentrasi asam 0,3 M, suhu 30°C, waktu perendaman 30 menit	Kwon dkk., 2021
Kaolinite	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Konsentrasi asam 2 M, perendaman: 24-72 jam	Zhou dkk., 2021
Palygorskite	HNO <sub>3</sub>	Konsentrasi asam 0,2 M, pemanasan menggunakan gelombang mikro	Pardo-Canales dkk., 2020
Vermiculite	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Konsentrasi asam 2,75 M, suhu 20°C, waktu perendaman 3,5 jam	Wang dkk., 2021a

#### 2.2.3.2. Pilarisasi

Pilarisasi adalah proses di mana senyawa anorganik berlapis diubah menjadi bahan mikro dan/atau mesopori yang stabil secara termal dengan tetap mempertahankan struktur lapisan. Pilarisasi pada mineral tanah liat sering dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan, porositas, menyeragamkan ukuran pori dan lain-lain. Tanah liat berpilar adalah jenis khusus dari tanah liat yang dimodifikasi untuk meningkatkan porositas secara signifikan dan permanen, yang dihasilkan dengan menyematkan kolom atau pilar di antara lapisan tanah liat (Najafi dkk., 2021). Porositas permanen senyawa ini adalah salah satu sifat utama tanah liat terpilar yang menjadikannya sebagai adsorben yang baik.

Tanah liat berpilar memiliki struktur berpori seperti zeolit dua dimensi, dimana strukturnya sangat tergantung pada jenis, kepadatan, dan distribusi pilar di antar-lapisan tanah liat. Bahan ikatan silang yang kuat diperoleh dari ikatan antara oksida logam dan lapisan alumino-silikat dari tanah liat menggunakan jembatan oksigen yang berada di ruang antar lapisan. Sifat fisika-kimia yang berbeda, yaitu kristalinitas, luas permukaan, ukuran pori, volume pori, jarak basal, dan keasaman dapat dicapai oleh agen pilar (*pillaring agent*) yang berbeda. Sifat fisik dan struktur dari beberapa jenis tanah liat berpilar adalah sebagai berikut (Najafi dkk., 2021):

- Tanah liat berpilar aluminium: luas permukaan spesifik: 100–300 m<sup>2</sup>/g dan jarak basal, d<sub>001</sub>: 1,7–2 nm.
- Tanah liat berpilar zirkonium: luas permukaan spesifik: 200–300 m<sup>2</sup>/g dan jarak basal, d<sub>001</sub>: 1,4–2 nm.



- Tanah liat berpilar besi: luas permukaan spesifik: 100–200 m<sup>2</sup>/g dan jarak basal, d<sub>001</sub>: 1,4–1,8 nm.
- Tanah liat berpilar titanium: luas permukaan spesifik: 100–350 m<sup>2</sup>/g dan jarak basal, d<sub>001</sub>: 1,2–1,8 nm.
- Tanah liat berpilar silika: luas permukaan spesifik: 500–1000 m<sup>2</sup>/g dan jarak basal, d<sub>001</sub>: 3–4 nm.

Selain oksida logam yang terdapat pada struktur tanah liat terpillar dan berasal dari agen penyusun (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, dll.), tanah liat terpillar memiliki struktur dan senyawa kimia yang hampir mirip dengan tanah liat induk. Tanah liat terpillar terutama terdiri dari SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> selain Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan sejumlah kecil oksida logam alkali dan alkali tanah seperti Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, dan MgO.

Berbagai macam studi tentang pilarisasi tanah liat untuk tujuan sebagai adsorben dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5.** Pilarisasi tanah liat untuk adsorben

Tanah liat	Agen pilar	Kondisi operasi	adsorbat	Referensi
Bentonit	Al <sub>13</sub> dan Al <sub>30</sub> (Keggin kation)	Impregnasi pada suhu kamar, 8 jam	pestisida	Basiony dkk., 2020
Kaolinite	ZrOCl <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	Impregnasi 10 jam, rasio tanah liat dengan Zr 2,5:1 sampai 10:1	fosfat	Huo dkk., 2021a
Montmorillonite	AlCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> , TiCl <sub>4</sub>	Konsentrasi Al <sup>3+</sup> dan Fe <sup>3+</sup> 0,2 M, untuk Ti <sup>4+</sup> 0,82 M. Pemanasan 60°C, 24 jam. Kalsinasi 400°C	deoxynivalenol	Zhang dkk., 2021c

Montmorillonite	ZrOCl <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	Impregnasi 10 jam, rasio tanah liat dengan Zr 2,5:1 sampai 10:1	fosfat	Huo dkk., 2021a
Vermiculite	ZrOCl <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	Impregnasi 10 jam, rasio tanah liat dengan Zr 2,5:1 sampai 10:1	fosfat	Huo dkk., 2021a

### 2.2.3.3. Modifikasi dengan surfaktan

Surfaktan merupakan senyawa organik yang memiliki sifat polar dan non polar. Surfaktan adalah kelompok besar senyawa aktif permukaan dengan banyak aplikasi. Klasifikasi surfaktan didasarkan pada disosiasi mereka dalam air: surfaktan kationik, surfaktan anionik, dan surfaktan non-ionik. Surfaktan kationik sebagian besar adalah alkil amina linier dan zat alkil amonium (garam amina berlemak dan amonium kuaterner). Surfaktan anionik termasuk alkilbenzena sulfonat, sabun, di-alkil sulfosuksinat, lauril sulfat, lignosulfonat, dll. Surfaktan non-ionik tidak terdisosiasi dalam air dan surfaktan ini termasuk alkohol linier teretoksilasi, alkil fenol teretoksilasi, ester asam lemak, turunan amina dan amida, dll. Saat ini berbagai surfaktan telah digunakan untuk modifikasi bahan tanah liat untuk meningkatkan kinerja adsorpsi. Tujuan utama interkalasi ion surfaktan ke struktur mineral tanah liat adalah untuk mengubah partikel mineral tanah liat yang awalnya hidrofilik menjadi organo tanah liat hidrofobik.

Di dalam air, surfaktan kationik akan terdisosiasi menjadi kation amfifilik dan anion. Meskipun surfaktan kationik menimbulkan banyak buih saat penggunaannya, zat ini masih banyak digunakan sebagai zat pengubah untuk modifikasi tanah liat karena muatan positifnya. Surfaktan kationik yang paling umum digunakan untuk modifikasi tanah liat, adalah garam amonium kuaterner, seperti:

- Cetyltrimethylammonium bromide (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>15</sub>N(Br)(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) → CTAB (Ashna dan Heydari, 2020; Burgos Castellanos dkk., 2019; Haounati dkk., 2021; Yuliana dkk., 2020; Yu dkk., 2020; Wu dkk., 2020).

- Trimethyloctadecylammonium bromide ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{N}(\text{Br})(\text{CH}_3)_3$ ) → ODTMA (Flores dkk., 2017; Sukenik dkk., 2017).
- Myristyltrimethylammonium bromide ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{N}(\text{Br})(\text{CH}_3)_3$ ) → TMAB (Bu dkk., 2019).
- Dodecyltrimethylammonium bromide ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$ ) → DTAB (Bantaleb dkk., 2017; Park dkk., 2017; Shayesteh dkk., 2021).
- Hexadecyl trimethylammonium chloride ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{Cl})(\text{CH}_3)_3$ ) → HDTMA (Issaoui dkk., 2020; Słomkiewicz dkk., 2020).

Mineral tanah liat yang dimodifikasi dengan surfaktan amonium kuaterner memiliki afinitas tinggi terhadap sebagian besar senyawa organik hidrofobik. Modifikasi tanah liat dengan surfaktan amonium kuaterner dengan gugus pengganti benzil menghasilkan permukaan yang tidak dapat dibasahi air dan superhidrofobik, sedangkan tanah liat yang dimodifikasi dengan surfaktan amonium kuaterner tanpa gugus pengganti benzil menjadi lebih basah dan hidrofilik dibandingkan dengan tanah liat mula-mula.

Surfaktan anionik adalah surfaktan yang paling umum digunakan untuk berbagai macam aplikasi. Alkylbenzene sulfonates (deterjen), sabun, lauryl sulfate, di-alkyl sulfosuccinate, dan lignosulfonate adalah surfaktan penting untuk aplikasi rumah tangga dan industri. Meskipun surfaktan anionik lebih murah daripada surfaktan jenis lain, surfaktan anionik jarang digunakan untuk modifikasi lempung daripada surfaktan kationik dan non-ionik. Beberapa penelitian yang menggunakan anionik surfaktan untuk memodifikasi beberapa mineral tanah liat.

- Ni dkk., (2021) memodifikasi kaolin dengan natrium dodesil benzene sulfonat (SDBS) untuk mengetahui pengaruh surfaktan terhadap daya serap kaolin termodifikasi.
- Allen dkk., (2021) menggunakan SDS (natrium dodecyl sulfat) untuk menghilangkan lapisan kation pada mineral mika untuk memfasilitasi penyerapan penta etilen glikol mono dodesil eter.
- Haounati dkk., (2021) melakukan penggabungan antara SDS dan CTAB untuk memodifikasi montmorillonite, SDS/CTAB@montmorillonite kemudian digunakan untuk menyerap malachite green dari larutan.

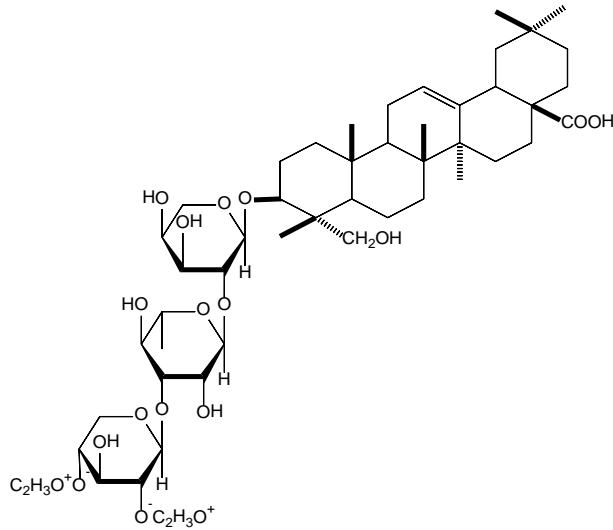
Karena sifat hidrofilik pada permukaannya, material tanah liat alami bukan merupakan adsorben yang efektif untuk senyawa organik nonpolar nonionik. Beberapa surfaktan nonionik yang telah digunakan untuk memodifikasi tanah liat antara lain polyoxyethylene (20)oleyl-ether (Brij-O20) (De Oliveira dkk., 2020), alkyl dimethylamine oxide (Lazorenko dkk., 2020), octylphenol polyoxyethylene ether (10) (OP-10) (Sun dkk., 2020a), t-

octylphenoxyethoxyethanol (Triton X-100)(Andrunik dan Badja, 2019). Organobentonit yang berasal dari surfaktan nonionik menunjukkan jarak antar lapisan yang lebih besar dan kandungan karbon organik yang lebih tinggi daripada organobentonit dari surfaktan kationik. Selanjutnya, organobentonit surfaktan nonionik lebih stabil secara kimiawi daripada organobentonit surfaktan kationik. Beberapa keuntungan penggunaan surfaktan nonionik untuk modifikasi tanah liat antara lain:

- Biodegradable dan tidak beracun.
- Mempunyai stabilitas termal dan kimia yang baik.
- Kation anorganik yang dapat ditukar tidak hilang setelah proses adsorpsi ke mineral tanah liat.
- Kemungkinan pertukaran kation organomineral nonionik dengan kation organik dan anorganik.

Penggunaan surfaktan sintetik untuk memodifikasi kapasitas adsorpsi bahan tanah liat terkadang menimbulkan masalah lingkungan yang cukup serius karena kelebihan surfaktan yang tidak terpakai. Surfaktan dapat memiliki efek racun pada kehidupan akuatik, terutama jika senyawa kimia ini ada dalam jumlah yang cukup. Surfaktan memiliki kemampuan untuk merusak lapisan lendir ikan dan menyebabkan kerusakan parah pada insang. Lapisan lendir ini merupakan pelindung aktif ikan terhadap parasit dan bakteri. Kemampuan untuk menurunkan tegangan permukaan air adalah masalah besar lainnya dari keberadaan surfaktan di lingkungan air. Dengan tegangan permukaan yang lebih rendah, senyawa organik mudah larut dalam air dan diserap oleh ikan atau makhluk air lainnya. Toksisitas suatu surfaktan berkaitan dengan struktur kimianya, semakin panjang rantai lemaknya, semakin beracun surfaktan tersebut bagi organisme akuatik. Oleh karena itu, kajian tentang pemanfaatan dan modifikasi material tanah liat untuk tujuan remediasi lingkungan dan pengolahan air limbah harus diarahkan pada penerapan bahan kimia yang ramah lingkungan atau alami sebagai agen pengubah (Kurniawan dkk., 2011).

Ekstrak rarasaponin dari sabun berry (*Sapindus rarak DC*) digunakan sebagai agen pengubah untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi beberapa bahan lempung oleh kelompok penelitian kami (Kurniawan dkk., 2011; Suwandi dkk., 2012; Kurniawan dkk., 2012; Chandra dkk., 2013; Laysandra dkk., 2019; Angkawijaya dkk., 2020; Santoso dkk., 2020). Struktur molekul rarasaponin dapat dilihat pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12.** Struktur rarasaponin (Kurniawan dkk., 2011)

Rarasaponin termasuk dalam kelompok alkaloid yang memiliki satu atau lebih oligosakarida. Beberapa gugus fungsi terdapat pada struktur rarasaponin seperti hidroksil, ester karbonil, cincin aromatik, dan juga gugus alkana baik dalam struktur alifatik maupun alisiklik (Kurniawan dkk., 2011).

Pembentukan rarasaponin-bentonit hasil interkalasi surfaktan rarasaponin dengan bentonit dijelaskan dengan mekanisme reaksi berikut (Kurniawan dkk., 2011): mekanisme pertama adalah reaksi deasilasi struktur rarasaponin, rarasaponin mengandung dua gugus asil ( $C_2H_3O^+$ ) yang menempel. Dalam struktur karbonil, gugus asil yang melekat pada struktur karbonil ini akan mengalami deasilasi jika dilarutkan dalam pelarut polar seperti air. Fenomena ini menyebabkan atom oksigen dalam gugus karbonil menjadi bermuatan negatif. Langkah kedua adalah protonasi permukaan gugus silanol (Si-OH) karena kelebihan  $H^+$  dalam larutan. Mekanisme terakhir adalah penempelan gugus silanol terprotonasi menjadi atom oksigen bermuatan negatif dalam gugus karbonil.

#### 2.2.3.4. Komposit

Komposit tanah liat telah mendapat perhatian khusus karena sifat dan kinerja strukturalnya lebih unggul daripada komponen individualnya. Pembuatan komposit tersebut melibatkan kombinasi dari dua atau lebih fase yang berbeda secara kimiawi dan tidak saling larut satu dengan yang lainnya. Secara garis besar komposit tanah liat dengan bahan lainnya dapat dikelompokkan menjadi:

- Tanah liat – karbon
- Tanah liat – polimer (alami dan buatan)
- Tanah liat – bahan magnet
- Tanah liat – bahan silika
- Tanah liat – kombinasi karbon, polimer, magnetic, dan silika

Tujuan dari modifikasi tanah liat menjadi komposit pada dasarnya adalah meningkatkan kemampuan adsorpsi tanah liat dan meningkatkan porositas bahan. Beberapa penelitian pembuatan komposit dari tanah liat dengan bahan-bahan dalam kelompok diatas dan penggunaannya dapat dilihat pada Tabel 2.6.

**Tabel 2.6.** Komposit tanah liat dan aplikasinya

<b>Tanah liat</b>	<b>Bahan karbon</b>	<b>Aplikasi</b>	<b>Referensi</b>
Bentonite	Natrium alginat dan lignin	Adsorpsi Hg(II)	Gong dkk., 2021
Bentonite	poly(N-acryloylglycineamide)	Adsorpsi Hg(II) dan As(V)	Yilmaz dkk., 2021
Bentonite	Alginat	Adsorpsi Pb(II) dan Cu(II)	Pawar dkk., 2020
Bentonite	Selulosa nano fiber	Penyerapan Cd(II), safranin dan fosfat	Abukhadra dkk., 2020
Bentonite	TEOS	Adsorpsi herbisida paraquat	Rasaie dkk., 2021
Bentonit	Natrium alginat dan poly(N-vinyl formamide-co-acrylic acid)	Penyerapan metil hijau	Subhan dkk., 2021
Bentonit	Natrium alginat dan polivinil alkohol	Pernyerapan As(V)	Baigoria dkk., 2020
Halloysite	Polivinil alkohol dan karbosil metil selulosa	Adsorpsi metil biru	Radoor dkk., 2020
Illite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Adsorpsi dan degradasi bisfenol	Bao dkk., 2021
Kaolinite	Biochar	Penyerapan ivermectin	Olu-Owolabi dkk., 2021

Kaolin	Kitosan - tripolifosfat	Penyerapan Remazol brilliant blue R	Jawad dan Abdulhameed, 2020
Montmorillonite	Biochar dari sampah	Adsorpsi tetrasiklin	Borthakur dkk., 2021
Montmorillonite	Kitosan	Acid Orange 7 (AO7), Basic Red 46 (BR4), Basic Yellow 2 (BY2) dan Basic Yellow 28 (BY28)	Karaca dkk., 2021
Montmorillonite	Kitosan	Adsorpsi Metil biru	El-Kousy dkk., 2020
Montmorillonite	Poliakrilamida	Adsorpsi metil biru	Qiu dkk., 2020
Montmorillonite	Kitosan dan poli-anilin	Penyerapan metil biru	Minisy dkk., 2021
Montmorillonite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> dan biochar	Adsorpsi norfloxacin, thiabendazole, thiophanate-methyl, oxytetracycline, P4R dan Cr(VI)	Soulé dkk., 2021

### 2.3. Zeolit

Kelas penting lain dari adsorben yang banyak digunakan dalam industri adalah zeolit. Zeolit merupakan mikroporous kristal aluminosilikat terhidrasi yang strukturnya adalah saluran-saluran atau rongga-rongga tertutup dengan ukuran molekuler (diameter 0,3-1,5 nm). Kerangka zeolit tersusun dari tetrahedra alumina (AlO<sub>4</sub>) dan silika (SiO<sub>4</sub>) yang saling terkait. Struktur kristal tiga dimensi zeolit dibangun dari unsur aluminium, oksigen, dan silikon, dengan logam alkali atau alkali-tanah (seperti natrium, kalium, dan magnesium) ditambah molekul air yang terperangkap di celah di antara mereka. Zeolit terbentuk dengan banyak struktur kristal berbeda, yang memiliki pori-pori besar (terkadang disebut sebagai rongga) dalam susunan yang sangat

teratur dan kira-kira berukuran sama dengan molekul kecil. Perbandingan atom oksigen dengan gabungan atom aluminium dan silikon selalu sama dengan 2, dan oleh karena itu setiap atom aluminium memberi kontribusi muatan negatif sebesar -1 pada kerangka zeolit yang diseimbangkan dengan muatan positif kation yang dapat ditukar. Rumus satuan sel kerangka zeolit secara stokiometri adalah sebagai berikut:



dengan M adalah kation dengan valensi m, z adalah jumlah molekul air di setiap sel satuan, dan x dan y adalah bilangan bulat sehingga y/x lebih besar dari atau sama dengan 1.

Dalam bentuk kristal, zeolit berbeda dari adsorben lain, karena untuk setiap jenis zeolit tidak mempunyai distribusi ukuran pori, zeolit mempunyai ukuran pori (kisi) yang seragam. Untuk alasan ini, zeolit mampu memisahkan molekul adsorbat secara efektif berdasarkan ukuran dan mereka sering dikenal sebagai saringan molekuler. Rasio Si/Al pada zeolit dapat diatur, sehingga zeolit dengan sifat adsorptif yang sangat berbeda dapat diperoleh dengan mengatur struktur kerangka, bentuk kationik, dan rasio Si/Al yang tepat untuk mendapatkan selektivitas yang diperlukan untuk aplikasi proses pemisahan tertentu.

Untuk mengaktifkan zeolit, molekul air dihilangkan dengan cara memanaskan pada suhu tinggi atau memanaskan pada tekanan hampa. Proses tersebut akan menghasilkan kerangka dengan atom yang masih utuh dan menghasilkan rongga yang dihubungkan oleh suatu saluran (pori-pori). Ukuran saluran ditentukan oleh jumlah atom yang membentuk lubang (atau jendela) yang menuju ke rongga. Mengubah posisi dan jenis kation akan mengubah ukuran saluran dan sifat zeolit, termasuk selektivitasnya dalam suatu reaksi kimia tertentu.

Zeolit memiliki struktur kristal 3 dimensi yang kokoh (mirip dengan sarang lebah) yang terdiri dari jaringan saluran dan rongga-rongga yang saling berhubungan. Air bergerak bebas keluar masuk pori-pori ini tanpa mempengaruhi struktur zeolit. Zeolit dapat ditemukan secara alami (kira-kira ada sekitar 59 jenis) atau dibuat secara sintesis (lebih dari 200 jenis). Penerapan zeolit alam tidak seluas zeolit sintetik karena zeolit sintetik lebih spesifik dan sifat-sifat fisiknya dapat diatur. Jenis zeolit sintetik ini banyak macamnya, seperti tipe A, X, Y, mordenit, ZSM, dll.



### 2.3.1. Zeolit alam

Zeolit alam bersifat hidrotermal dan sebagian besar berasal dari vulkanik. Mereka terdapat bentuk kristal yang ditemukan di batuan dan metamorf, serta dalam butiran dengan diameter lebih kecil yang terakumulasi dalam batuan sedimen (Krol, 2020). Tabel 2.7 menampilkan jenis dan tipe zeolit alam yang ada (Coombs dkk., 1997)

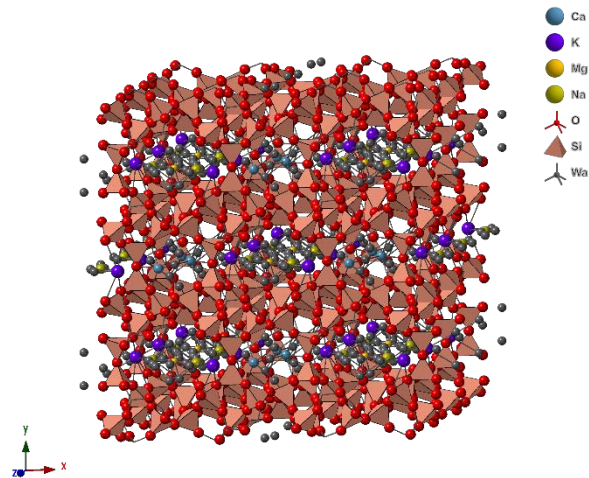
**Tabel 2.7.** Tipe dan jenis zeolit alam (Coombs dkk., 1997)

<b>Nama</b>	<b>Bentuk kristal</b>	<b>Rumus molekul</b>	<b>Z</b>
Amicite	Monoklinik	$K_4Na_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_8].10H_2O$	1
Ammonioleucite	Tetragonal	$NH_4[(AlO_2)(SiO_2)_2]$	16
Analcime	Kubus, tetragonal, ortorombik, monoklinik	$Na[(AlO_2)(SiO_2)_2].H_2O$	16
Barrerite	ortorombik	$Na_2[(AlO_2)_2(SiO_2)_7].6H_2O$	8
Bellbergite	Heksagonal	$(K,Ba,Sr)_2Sr_2Ca_2(Ca,Na)_4[(AlO_2)_{18}(SiO_2)_{18}].30H_2O$	1
Bikitaite	Monoklinik, triklinik	$Li[(AlO_2)(SiO_2)_2].H_2O$	2
Boggsite	Ortorombik	$Ca_8Na_3[(AlO_2)_{19}(SiO_2)_{77}].70H_2O$	1
Brewsterite (seri)	Monoklinik	$(Sr,Ba)_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_{12}].10H_2O$	1
Chabazite (seri)	Trigonal	$(Ca_{0.5},Na,K)_4[(AlO_2)_4(SiO_2)_8].12H_2O$	1
Chiavennite	Ortorombik	$CaMn[Be_2Si_5O_{13}(OH)_2].2H_2O$	4
Clinoptilolite	Monoklinik	$(Na,K,Ca_{0.5},Sr_{0.5},Ba_{0.5},Mg_{0.5})_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{30}].20H_2O$	1
Cowlesite	Ortorombik	$Ca[(AlO_2)_2(SiO_2)_3].5,3H_2O$	52
Dachiardite (seri)	Monoklinik	$(Ca_{0.5},Na,K)_{4-5}[(AlO_2)_5(SiO_2)_{19}].13H_2O$	1
Edingtonite	Ortorombik, tetragonal, triklinik	$Ba[(AlO_2)_2(SiO_2)_3].4H_2O$	2
Epistilbite	Monoklinik, triklinik	$(Ca,Na_2)[(AlO_2)_2(SiO_2)_4].4H_2O$	4
Erionite (seri)	Hexagonal	$K_2(Na,Ca_{0.5})_8[(AlO_2)_{10}(SiO_2)_{26}].30H_2O$	1
Faujasite (seri)	Kubus	$(Na,Ca_{0.5},Mg_{0.5},K)_x[(AlO_2)(SiO_2)_{12}].4H_2O$	16
Ferrierite	Ortorombik	$(K,Na,Mg_{0.5},Ca_{0.5})_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{30}].8H_2O$	1
Garronite	Tetragonal	$NaCa_{2.5}[(AlO_2)_6(SiO_2)_{10}].14H_2O$	1
Gaultite	Ortorombik	$Na_4[(ZnO_2)_2(SiO_2)_7].5H_2O$	8

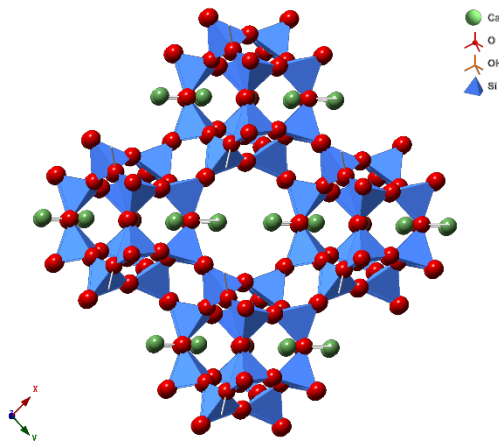
Gismondine	Monoklinik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2] \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$	4
Gmelinite (seri)	Heksagonal	$(\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{K}_2)_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{16}] \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	1
Gobbinsite	Tetragonal	$\text{Na}_5[(\text{AlO}_2)_5(\text{SiO}_2)_{11}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1
Gonnardite	Tetragonal	$(\text{Na}, \text{Ca})_{6-8}[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{10}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1
Goosecreekite	Monoklinik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2
Gottardiite	Ortorombik	$\text{Na}_3\text{Mg}_3\text{Ca}_5[(\text{AlO}_2)_{19}(\text{SiO}_2)_{117}] \cdot 93\text{H}_2\text{O}$	1
Harmotome	Monoklinik	$(\text{Ba}_{0.5}, \text{Ca}_{0.5}, \text{K}, \text{Na})_5[(\text{AlO}_2)_5(\text{SiO}_2)_{11}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1
Heulandite (seri)	Monoklinik	$(\text{Ca}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5}, \text{Mg}_{0.5}, \text{Na}, \text{K}, )_9[(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{27}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	1
Hsianghualite	Kubus	$\text{Li}_2\text{Ca}_3[(\text{BeO}_2)_3(\text{SiO}_2)_3] \cdot \text{F}_2$	8
Kalborsite	Tetragonal	$\text{K}_6[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_6] \text{B}(\text{OH})_4\text{Cl}$	2
Laumontite	Monoklinik	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{16}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	1
Leucite	Kubus, tetragonal	$\text{K}[(\text{AlO}_2)(\text{SiO}_2)_2]$	16
Levyne (seri)	Trigonal	$(\text{Ca}_{0.5}, \text{Na}, \text{K})_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	3
Lovdarite	Ortorombik	$\text{K}_4\text{Na}_{12}[(\text{BeO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{28}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	1
Maricopaite	Ortorombik	$(\text{Pb}_7\text{Ca}_2)[\text{Al}_{12}\text{Si}_{36}(\text{O}, \text{OH})_{100}] \cdot n(\text{H}_2\text{O}, \text{OH}),$ $n \approx 32$	1
Mazzite	Heksagonal	$(\text{Mg}_{2.5}\text{K}_2\text{Ca}_{1.5}) [(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{26}] \cdot 30\text{H}_2\text{O}$	1
Merlinoite	Ortorombik	$\text{K}_5\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{23}] \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	1
Mesolite	Ortorombik	$\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}[(\text{AlO}_2)_{48}(\text{SiO}_2)_{72}] \cdot 64\text{H}_2\text{O}$	1
Montesommaite	Ortorombik	$\text{K}_9[(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{23}] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1
Mordenite	Ortorombik	$(\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{K}_2)_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}] \cdot 28\text{H}_2\text{O}$	1
Mutinaite	Ortorombik	$\text{Na}_3\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_{11}(\text{SiO}_2)_{85}] \cdot 60\text{H}_2\text{O}$	1
Natrolite	Ortorombik	$\text{Na}_2[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_3] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	8
Offretite	Heksagonal	$\text{CaKMg}[(\text{AlO}_2)_5(\text{SiO}_2)_{13}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	1
Parthéite	Monoklinik	$\text{Ca}_2[\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{15}(\text{OH})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4
Paulingite (seri)	Kubus	$(\text{K}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Na}, \text{Ba}_{0.5})_{10}[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 27-44\text{H}_2\text{O}$	16
Perlialite	Heksagonal	$\text{K}_9\text{Na}(\text{Ca}, \text{Sr}) [(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{24}] \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	1
Phillipsite (seri)	Monoklinik	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5})_x[\text{Al}_x\text{Si}_{16-x}\text{O}_{32}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1
Pollucite	Kubus	$(\text{Cs}, \text{Na}) [(\text{AlO}_2)(\text{SiO}_2)_2] \cdot n\text{H}_2\text{O}$	16
Roggianite	Tetragonal	$\text{Ca}_2[\text{Be}(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{13}] \cdot <2.5\text{H}_2\text{O}$	8
Scolecite	Monoklinik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4
Stellerite	Ortorombik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_7] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	8
Stilbite (seri)	Monoklinik	$(\text{Ca}_{0.5}, \text{Na}, \text{K})_9[(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{27}] \cdot 28\text{H}_2\text{O}$	1
Terranovaite	Ortorombik	$\text{NaCa}[(\text{AlO}_2)_3(\text{SiO}_2)_{17}] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4
Thomsonite	Tetragonal	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_6] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	8
Tschörtnerite	Kubus	$\text{Ca}_4(\text{K}_2, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba})_3\text{Cu}_3(\text{OH})_8[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot n\text{H}_2\text{O}, n \geq 20$	16
Wairakite	Monoklinik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	8

Weinebeneite	Monoklinik	$\text{Ca}[\text{Be}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4
Willhendersonite	Triklinik	$\text{K}_x\text{Ca}_{(1.5-0.5x)} [(\text{AlO}_2)_3(\text{SiO}_2)_3] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , $0 < x < 1$	2
Yugawaralite	Monoklinik	$\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2

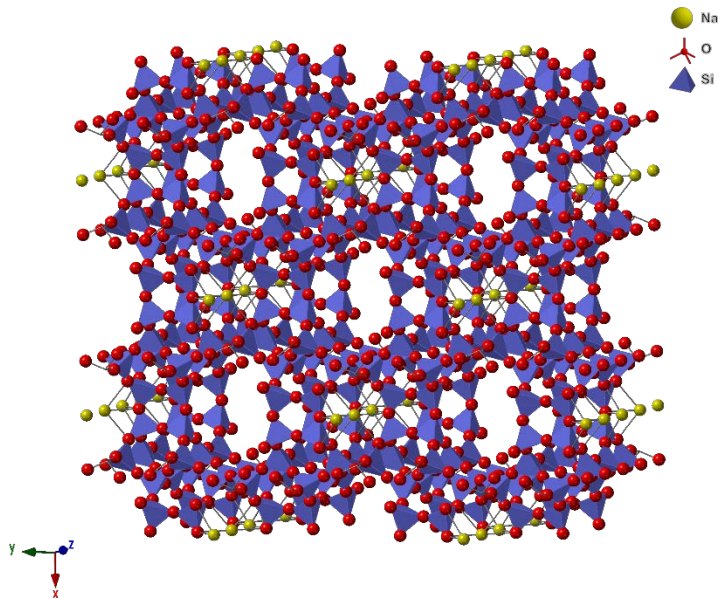
Dari 59 jenis zeolite alam, hanya beberapa yang penting bagi industri (sebagai adsorben) yaitu clinoptilolite, chabazite, dan modernite. Struktur molekul dari clinoptilolite, chabazite, dan modernite dapat dilihat pada Gambar 2.13 – 2.15.



**Gambar 2.13.** Struktur clinoptilolite



**Gambar 2.14.** Struktur chabazite



**Gambar 2.15.** Struktur modernite

### 2.3.2. Zeolit sintetis

Saat ini lebih dari seratus jenis struktur zeolit yang berbeda dapat diperoleh secara sintetis. zeolit sintetis memiliki struktur dan sifat yang beragam yang sangat tergantung dari metode sintesis dan komposisi bahan baku yang digunakan. Waktu reaksi, suhu, tekanan, dan komposisi kimia dari campuran reaksi sangat berpengaruh pada struktur zeolit yang diperoleh. Pada umumnya zeolit sintetis dibuat dengan metode berikut ini (Krol, 2020):

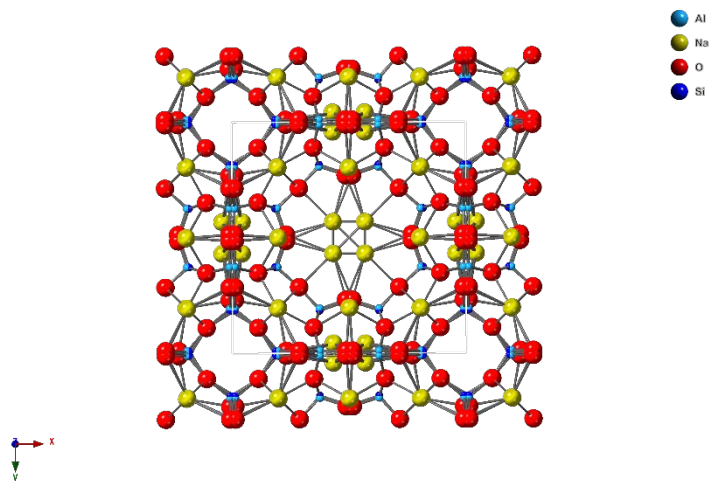
- Hidrotermal sintetis (tekanan atmosfer atau lebih tinggi)
- Metode lelehan garam
- Metode fusi
- Aktivasi basa
- Sintesis dengan bantuan gelombang mikro
- Sintesis dengan metode dialisis
- dan lain-lain.

Karakteristik dan klasifikasi aluminium silikat kompleks, seperti zeolit, cukup sulit karena tidak adanya sistem tata nama kimia yang pasti. Jika penamaan zeolit didasarkan pada IUPAC, penamaan harus didasarkan pada jumlah unsur penyusun. Nomenklatur semacam ini rumit dan membutuhkan pengetahuan tentang komposisi unsur penyusun, yang kadang-kadang sangat

sulit untuk mengetahui komposisi unsur penyusunnya. Oleh karena itu, saat ini, metode penggolongan zeolit sintetis digunakan metode berikut ini:

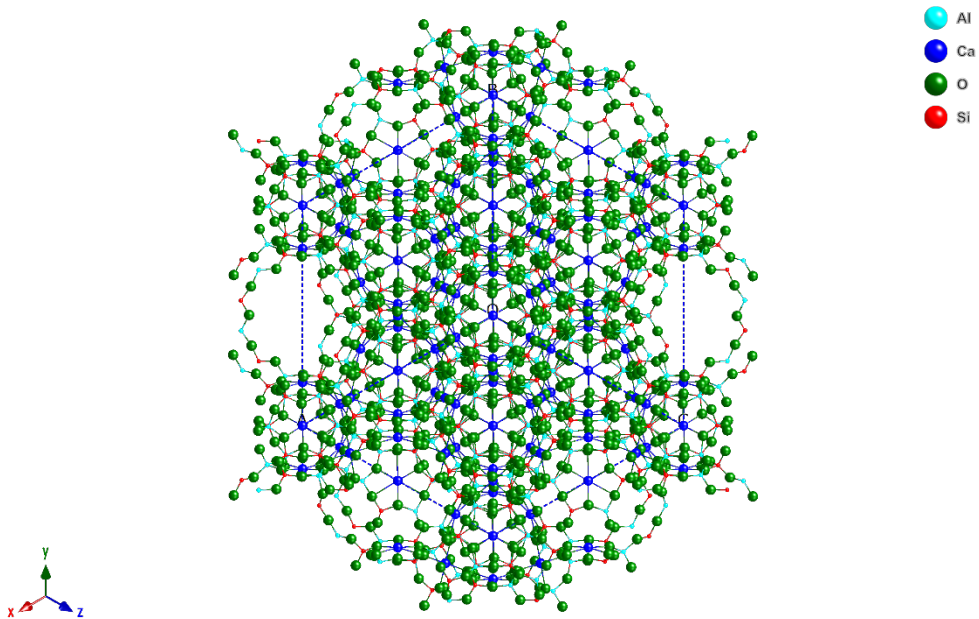
1. Penamaan zeolit sintetis didasarkan oleh huruf-huruf yang dikenalkan oleh peneliti pertama (berdasarkan hak prioritas), misalnya: zeolit A, zeolit K-G, zeolit ZK-5, dll.
2. Simbol-simbol ini digunakan untuk menunjukkan modifikasi zeolit sintesis. Huruf A, misalnya, berarti zeolit sintetis  $\text{Na}_{16}(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$  (molekul *sieve* tipe 4A), yang diperoleh dari sistem  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Rumusnya menunjukkan komposisi zeolit yang khas. Sebutan lainnya termasuk "zeolit tipe A", "zeolit tipe X", dll.
3. Kadang-kadang, zeolit sintetis dinamai dengan nama bahan alami yang sesuai, mis. "Zeolit jenis analitik" atau "zeolit jenis mordenit".
4. Berbagai bentuk kationik, yang diperoleh dari pertukaran ion, mungkin juga memiliki sebutan khusus. Misalnya, bentuk kalsium untuk zeolit A ditetapkan sebagai CaA (atau molekul *sieve* jenis 5A). Namun demikian, tanda hubung antara Ca dan A, yaitu Ca-A, berarti zeolit yang sama sekali berbeda.

Sebagai contoh zeolit sintetis adalah zeolit A dan zeolit X. Zeolit A memiliki dua jenis rongga: kecil (terletak di rongga alfa dan hanya dapat diakses oleh molekul air kecil) dan besar (terletak di rongga beta dan dapat diakses oleh molekul gas seperti argon, oksigen, dan nitrogen). Volume bebas per sel dasar zeolit adalah  $926 \text{ \AA}^3$ . Struktur zeolit A dapat dilihat pada Gambar 2.16



**Gambar 2.16.** Struktur zeolit A

Untuk zeolit X, olume pori zeolit per sel dasar adalah  $7908 \text{ \AA}^3$  (didasarkan pada molekul air). Sebagian besar zat yang teradsorpsi, selain air, mengisi rongga besar zeolit (saringan molekuler). Struktur kristal zeolit X dapat dilihat pada Gambar 2.17.



**Gambar 2.17.** Zeolit tipe X

Beberapa rumus molekul zeolit sintetis dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut ini.

**Tabel 2.8.** Rumus molekul beberapa zeolit sintetis

Zeolit	Rumus molekul
Zeolit A	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit H	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Zeolit L	$(\text{K}_2\text{Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit N - A	$(\text{Na}, (\text{CH}_3)_4\text{N}^+)_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Zeolit O	$(\text{Na}_2, \text{K}_2, ((\text{CH}_3)_4\text{N}^+)_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit P	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2-5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit ZK-4	$0,85\text{Na}_2\text{O} \cdot 0,15 ((\text{CH}_3)_4\text{N}^+)_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3,3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

## 2.4. Metal-organic framework (MOF)

Kerangka logam-organik (MOF) adalah bahan kristal hibrida organik-anorganik berpori yang terdiri dari susunan reguler ion logam bermuatan positif yang dikelilingi oleh molekul 'penghubung' organik. Ion logam membentuk simpul yang mengikat kedua lengan penghubung untuk membentuk struktur seperti sangkar yang berulang. Karena struktur berlubang ini, MOF memiliki luas permukaan internal yang besar.

MOF menawarkan keragaman struktural yang unik, berbeda dengan bahan berpori lainnya, seperti struktur pori seragam; keseragaman struktural pada tingkat atom; porositas yang dapat diatur; varietas yang luas; dan fleksibilitas dalam topologi jaringan, geometri, dimensi, dan fungsi kimiawi. Hal ini memungkinkan para peneliti berhasil mengontrol topologi kerangka, porositas, dan fungsionalitas dari MOF.

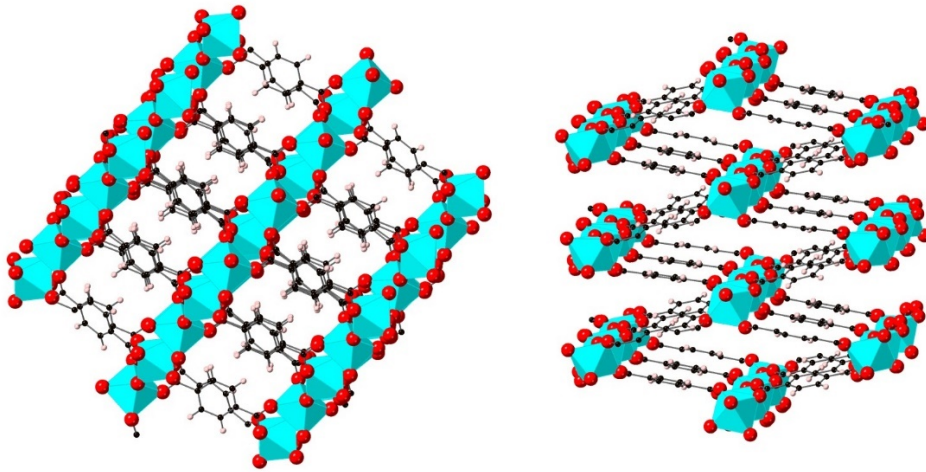
Secara umum, sifat MOF bergantung pada struktur dan komposisi MOF tersebut. Sehingga kemampuan untuk mengontrol struktur dari MOF sangat penting pada saat proses sintesa, karena unjuk kerja MOF sangat ditentukan oleh struktur dan komposisi MOF. Ada empat strategi utama dalam mengatur parameter struktural MOF dan material fungsional turunannya (Liu dkk., 2021):

1. Menyesuaikan pusat logam dan ligan di MOF.
2. Mengendalikan morfologi MOF.
3. Menciptakan hibrida berbasis MOF.
4. Membuat bahan turunan MOF.

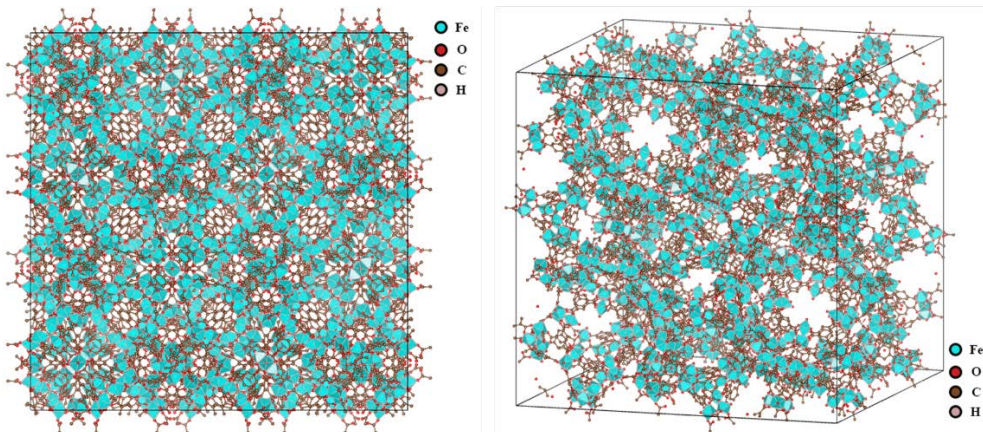
Saat ini lebih dari 90 ribu MOF dan turunannya telah berhasil disintesa dan yang paling sering digunakan untuk adsorpsi fase cair adalah sebagai berikut:

- *Calcium Fumarate MOF* (Singh dkk., 2021)
- Cu-BTC (Abbasi dkk., 2017)
- Fe-BDC (Arora dkk., 2019)
- HKUST-1 (MOF-199) (Ediati dkk., 2021; Mohammadnejad dan Fakhrefatemi, 2021)
- NiCu-BTC (Abd El Salam dan Zaki, 2018)
- Sn (II)-BDC (Ghosh dan Das, 2020)
- *Zeolitic imidazolate frameworks* (ZIF-8) (Ahmad dkk., 2021; Cao dkk., 2021; Dou dkk., 2021; Huo dkk., 2021)
- *Zr-benzene dicarboxylate* (UiO-66) (Embaby dkk., 2018)
- dan lain-lain.

Struktur tiga dimensi (3D) dari beberapa MOF seperti MIL-53(Fe), MIL-100(Fe), IR-MOF-1, dan UiO-66 dapat dilihat pada Gambar 2.18 sampai 2.21 berikut ini.

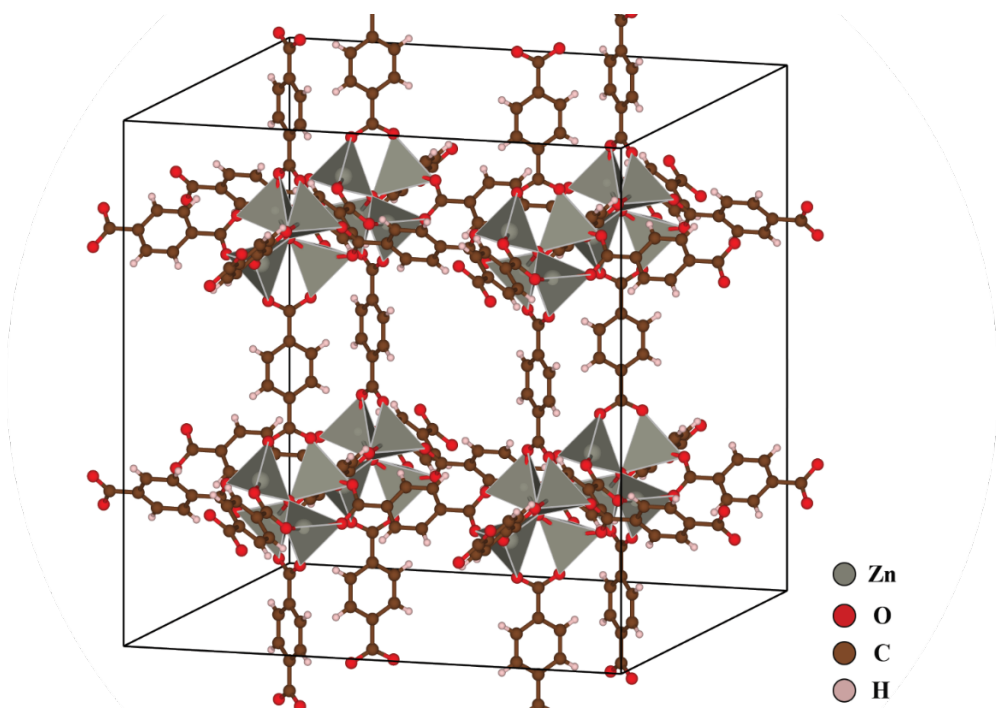


**Gambar 2.18.** Struktur 3D MIL-53(Fe)

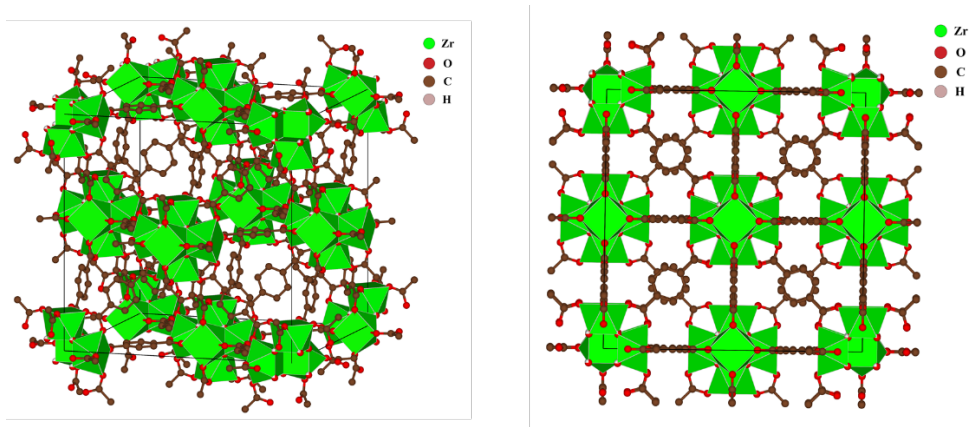


**Gambar 2.19.** Struktur 3D MIL-100(Fe)





**Gambar 2.20.** Struktur 3D IRMOF-1



**Gambar 2.21.** Struktur 3D UiO-66

Kombinasi MOF dengan senyawa lain untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap berbagai macam senyawa beracun dan berbahaya juga sangat sering dilakukan seperti: grafen oksida/ZIF-8 (Arabkhani dkk., 2021), MIL-53(Fe)/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Bagherzadeh dkk., 2020),

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MIL-101(Cr) (Jarrah dan Farhadi, 2018), Karbon aktif/ HKUST-1 (Azad dkk., 2016), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MIL-101 (Jiang dan Li, 2016). Beberapa singkatan yang digunakan untuk penamaan MOF adalah sebagai berikut:

- HKUST: Hong Kong University of Science and Technology
- MIL: Matériaux de l'Institut Lavoisier
- UiO: University of Oslo

## 2.5. Karbon tiga dimensi

Bahan berbasis grafin 3D adalah adsorben yang menjanjikan untuk aplikasi lingkungan. Saat ini penelitian intensif sedang dilakukan untuk memanfaatkan grafin sebagai adsorben untuk penyerapan berbagai macam senyawa pencemar. Grafin murni adalah kristal karbon 2D dengan struktur kisi seperti sarang lebah dengan elektron  $\pi$ - $\pi$  bebas, yang memberikan kontribusi pada pemisahan polutan melalui interaksi  $\pi$ - $\pi$  dan efek hidrofobik. Tetapi, sifat hidrofobik dari struktur terkonjugasi-  $\pi$  menghambat penyerapan suatu polutan dari suatu larutan. Penerapan grafin 2D dalam perbaikan lingkungan juga dibatasi oleh sulitnya proses regenerasi grafin setelah digunakan karena terjadi proses aglomerasi lembaran graphene yang bersifat permanen. Oleh karena itu, sintesis material grafin 3D merupakan jalan keluar untuk mengatasi masalah tersebut (Lin dkk., 2021).

Konstruksi struktur 3D grafin, seperti dalam bentuk spons, aerogel, dan busa, tidak hanya mempertahankan sifat intrinsik grafin tetapi juga memberi jaminan grafin yang telah digunakan dapat dimanfaatkan kembali untuk proses yang sama secara realistis (Sun dkk., 2020b). Luas permukaan spesifik merupakan faktor penting untuk menentukan kapasitas adsorpsi suatu adsorben. Namun, area spesifik dari adsorben 3D grafin biasanya di bawah 1000 m<sup>2</sup>/g. Karena luas permukaan yang tidak terlalu besar, aktivasi dengan KOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dan uap air sering dilakukan untuk mengembangkan struktur mikro dan mesopori dari karbon.

Dalam banyak kasus, aktivasi dengan KOH untuk grafin sangat direkomendasikan karena kemampuan pembentukan mikropori yang luar biasa (hingga 3000 m<sup>2</sup>/g), diikuti oleh aktivasi ZnCl<sub>2</sub> dan aktivasi H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Aktivasi CO<sub>2</sub> dan uap juga menjanjikan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik karena proses operasinya yang ramah lingkungan dan sederhana. Untuk lebih meningkatkan selektivitas dan kemampuan adsorpsi, fungsionalisasi permukaan grafin tetap harus dilakukan. Fungsionalisasi permukaan grafin yang telah diaktifkan dilakukan melalui (Lin dkk., 2021):

- Fungsionalisasi kovalen
- Fungsionalisasi non-kovalen
- Fungsionalisasi permukaan dengan polimer
- Fungsionalisasi permukaan dengan logam
- Fungsionalisasi permukaan dengan oksida logam

Disamping melalui fungsionalisasi permukaan, untuk meningkatkan effektivitas penyerapan 3D grafin juga dilakukan melalui pengabungan dengan material lain menjadi suatu komposit (Fan dkk., 2015; Huang dkk., 2020; Jiao dkk., 2016; Kabiri dkk., 2015; Lai dkk., 2020; Liu, dkk., 2016; Liu dan Qiu, 2020; Tan dkk., 2018; Zhang dkk., 2018).

## 2.6. Penyerap non konvensional

Proses adsorpsi merupakan langkah mendasar dan penting dalam pengolahan air dan air limbah. Proses adsorpsi sangat mudah dan relatif murah, tetapi dapat memenuhi persyaratan standar yang tinggi untuk limbah cair. Proses ini telah terbukti efektif untuk menghilangkan berbagai macam polutan berbahaya, bahkan dalam konsentrasi yang sangat kecil sekalipun. Keberhasilan proses adsorpsi sangat tergantung pada jenis adsorben yang digunakan. Saat ini, adsorben industri utama untuk pemurnian air dan pengolahan air limbah adalah karbon aktif. Karbon aktif telah terbukti sebagai adsorben yang sangat efektif, secara konsisten menghasilkan efisiensi pemisahan yang tinggi dan memiliki stabilitas yang tinggi dalam proses regenerasi. Namun, masalah utama yang terkait dengan karbon aktif sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah adalah harga. Karbon aktif komersial mahal harganya. Oleh karena itu, penggunaan adsorben ini untuk tujuan pengolahan air limbah dianggap sebagai proses yang tidak ekonomis. Oleh karena itu, perlu dicari material berbiaya rendah sebagai adsorben alternatif untuk proses pengolahan air limbah.

Berbagai macam bahan penyerap non-konvensional telah dipelajari sebagai adsorben alternatif untuk menghilangkan berbagai zat berbahaya dari larutan. Adsorben non-konvensional ini termasuk limbah pertanian dengan berbagai bentuk modifikasinya, ganggang, mikro alga, dan lain-lain. Beberapa dari adsorben non-konvensional tersebut telah terbukti sebagai adsorben potensial dalam aplikasi skala laboratorium. Namun, cukup banyak kekurangan yang dijumpai jika diterapkan pada skala industri, terutama untuk adsorben dari limbah pertanian. Hingga saat ini, pemanfaatan adsorben non konvensional untuk pengolahan air limbah industri masih jauh dari kenyataan.

Beberapa persyaratan utama yang harus dipenuhi oleh adsorben non konvensional untuk dapat digunakan pada skala komersial:

- Mempunyai kapasitas penyerapan yang sebanding atau lebih tinggi dari penyerap konvensional.
- Tersedia dalam jumlah besar dan kapasitas penyerapannya harus stabil.
- Tidak mempunyai nilai ekonomi.
- Dapat dengan mudah diregenerasi tanpa mengalami penurunan kemampuan adsorpsi secara signifikan.
- Ramah lingkungan.

Beberapa penelitian terbaru yang menggunakan penyerap non konvensional dapat dilihat pada Tabel 2.9.

<b>Nama</b>	<b>Jenis</b>	<b>polutan</b>	<b>referensi</b>
<i>Aspergillus niger</i>	Jamur	Cr (VI)	Ren dkk., 2021
<i>Bacillus cereus</i>	Bakteri	Pb (II)	Sharma dan Shukla, 2021
Biji alpukat	Limbah biomassa	Trypan blue	El-Idreesy dkk., 2021
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mikro alga	Cd (II)	Soto-Ramírez dkk., 2021
<i>Dunaliella sp.</i>	Mikro alga	Zn (II)	Elleuch dkk., 2021
<i>Fucus vesiculosus</i>	Ganggang coklat	Metil biru dan eriochrome black T	Lebron dkk., 2021
<i>Geliedella acerosa</i>	Rumput laut merah	Pb (II), Ni (II), Zn (II)	Vijayaraghavan dkk., 2021
Kulit jeruk	Limbah lignoselulosa	Reactive Red	Alwared dkk., 2021
Kulit lemon	Limbah lignoselulosa	Ni (II) dan Cd (II)	Villen-Guzman dkk., 2021
<i>Mucor plumbeus</i>	Jamur	Metil violet	Akar dkk., 2021
<i>Pseudomonas alcaliphila</i>	Bakteri	Cr (VI)	Saber dkk., 2021
<i>Rhodopseudomonas sp. strain 51ATA</i>	Bakteri	Astrazon red	Abdullah dkk., 2021
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Jamur	Hg (II)	Massoud dkk., 2021

---

Serbuk gergaji	Limbah	Kristal	Grassi dkk., 2021
<i>Cordia trichotoma</i>	lignoselulosa	violet	
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Bakteri	Cr (VI)	An dkk., 2021
<i>Weissella viridescens</i> ZY-6	Bakteri	Cd (II)	Li dkk., 2021

---