

BENTONIT TERMODIFIKASI MAGNETIT DAN APLIKASINYA SEBAGAI ADSORBEN Hg(II)

Modification of Bentonite with Magnetite and Application as Adsorbent Hg(II)

Retno Agnestisia^{1*}, Suyanta², Narsito²

¹Mahasiswa Program Magister Ilmu Kimia, FMIPA, UGM Yogyakarta

²Jurusan Kimia FMIPA Universitas Gadjah Mada

*e-mail : r_agnestisia@yahoo.co.id

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, bentonit alam diaktivasi dengan larutan asam, selanjutnya dimodifikasi dengan magnetit menggunakan metode kopresipitasi pada berbagai konsentrasi molar $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ (0,05:0,1; 0,025:0,05; 0,0125:0,025). Dilakukan pula variasi temperatur sintesis (25°C; 50°C; 85°C) pada rasio konsentrasi molar $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ optimal. Adsorpsi dilakukan menggunakan sistem *batch* dengan kajian adsorpsi yang dipelajari meliputi pH optimum, kinetika adsorpsi dan kesetimbangan adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivasi asam mampu mengurangi jumlah mineral pengotor dan meningkatkan luas permukaan bentonit dari 11,986 m²/g menjadi 116,475 m²/g. Modifikasi bentonit dengan magnetit optimum tercapai pada rasio konsentrasi molar $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ sebesar 0,025:0,05 pada temperatur sintesis 85°C. Bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit mampu mengadsorpsi Hg(II) dari dalam larutan dengan adsorpsi maksimal terjadi pada pH 5. Adsorpsi Hg(II) oleh kedua jenis adsorben mengikuti persamaan kinetika orde dua semu dengan konstanta laju adsorpsi k_2 untuk bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit masing-masing sebesar $1,316 \times 10^{-3}$ dan $2,125 \times 10^{-3}$ g/mg.menit dengan pola adsorpsi isoterm Langmuir. Modifikasi bentonit mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi sampai dengan 2 kali lipatnya dan mempercepat proses pemisahan partikel adsorben dari dalam larutan menggunakan medan magnet eksternal.

Kata Kunci: bentonit, modifikasi, magnetit dan adsorpsi.

ABSTRACT

In this research natural bentonite was activated with acid solution, modified with magnetite was done by coprecipitation method of various concentration molar $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ (0.05:0.1; 0.025:0.05; 0.125:0.025). In addition, temperature synthesis was varied (25°C; 50°C; 85°C) at the optimal concentration of $Fe^{2+} : Fe^{3+}$. In the adsorption of Hg(II), the optimum pH, kinetic and equilibrium aspects of adsorption were studied. The result showed that acid activation process can reduce the impurities minerals and increased surface area from 11.986 m²/g to 116.475 m²/g. Modification of bentonite with magnetite optimum at ratio concentration molar $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ of 0.025:0.05 and temperature 85°C. The activated and modified of bentonite can adsorbed Hg(II) from aqueous phase, with the maximum adsorption at pH 5. Adsorption of on those of adsorbent followed the kinetic equation of pseudo order 2 with reaction rate constant for activated and modified of bentonite was 1.316×10^{-3} dan 2.125×10^{-3} g/mg.menit, where as the isotherm adsorption according to Langmuir isotherm. Modification of bentonite increased the adsorption capacity until about two time and accelerated the adsorption of adsorbent from aqueous phase using external magnet field.

Key Words: bentonite, modification, magnetite and adsorption

PENDAHULUAN

Merkuri merupakan salah satu logam berat yang keberadaannya di dalam air kebanyakan berbentuk ion Hg(II). Penggunaan merkuri banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti industri produksi gas klor, soda api, lampu, baterai, termometer, desinfektan, biosida, dan kosmetik (Hutagalung, 1985). Selain digunakan dalam bidang industri, merkuri juga banyak digunakan pada kegiatan penambangan emas yang biasa disebut sebagai "air kuik".

Jika pemanfaatan merkuri tidak diimbangi dengan penanggulangan limbah yang dihasilkan, maka kegiatan-kegiatan ini sangat berdampak pada munculnya berbagai permasalahan lingkungan dan kesehatan, seperti pencemaran tanah, air, dan udara akibat pelepasan merkuri dari aktivitas industri, pertanian, dan pertambangan. Dalam kadar tertentu, logam ini umumnya sangat beracun bagi tumbuhan, hewan, dan manusia karena dapat terakumulasi di dalam tubuh mengikuti pola rantai makanan, terutama dalam bentuk metilmerkuri yang dapat menghambat kerja enzim dan sistem metabolisme tubuh (Hutagalung, 1985).

Keberadaan kandungan logam berat ini di lingkungan khususnya perairan, tentu membutuhkan penanganan serius mengingat tingginya faktor resiko yang ditimbulkan. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menurunkan konsentrasi logam merkuri sampai pada batas tertentu. Salah satu metode yang dapat digunakan ialah adsorpsi

dengan menggunakan sistem *batch*. Metode ini dipilih, karena proses dinilai sederhana, efektif, efisien, dan murah (Volesky *et al.*, 2005).

Penerapan metode adsorpsi dalam prakteknya membutuhkan bahan pengikat atau penyerap kontaminan yang biasa disebut sebagai adsorben. Bahan penyerap yang dapat digunakan salah satunya adalah bentonit. Saat ini bentonit merupakan material yang keberadaannya cukup melimpah dan memiliki harga yang relatif murah. Cadangan bentonit di Indonesia cukup besar, yaitu sekitar 380 juta ton, yang merupakan aset potensial yang harus dimanfaatkan sebaik-baiknya (Ardianto, 2013).

Penyusun utama bentonit adalah mineral monmorilonit. Monmorilonit memiliki struktur 3 lapis dengan konfigurasi 2 : 1 yang terdiri dari 2 lapis silika tetrahedral dan 1 lapis oktahedral sebagai sentral. Adanya substitusi isomorfik pada struktur dasar menyebabkan terbentuknya muatan negatif pada permukaan lapisan monmorilonit penyusun bentonit. Bagian inilah yang disebut sebagai situs aktif (*active site*) yang dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengikat kation dari senyawa-senyawa organik maupun metalik melalui ikatan elektrostatik (Bhattacharyya & Gupta, 2008)

Namun, aplikasi bentonit sebagai adsorben menggunakan sistem *batch* memiliki kesulitan dalam proses pemisahan fase padat adsorben dari dalam larutan. Pemisahan hanya didasarkan pada proses

pengendapan secara alami oleh gaya gravitasi bumi yang tentunya membutuhkan waktu lama untuk proses pemisahan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi kelemahan tersebut ialah dengan melakukan modifikasi bentonit menggunakan oksida besi fasa magnetit, sehingga diperoleh bentonit magnetik yang memiliki sifat kemagnetan. Dengan pemberian sifat kemagnetan ini, diharapkan pemisahan partikel-partikel bentonit setelah proses adsorpsi dapat dilakukan dengan mudah dan cepat menggunakan medan magnet eksternal (Oliveira *et al.*, 2003). Berdasarkan pada pemikiran tersebut, maka dalam penelitian ini akan dikaji mengenai bentonit termodifikasi magnetit dan aplikasinya sebagai adsorben Hg(II).

METODE PENELITIAN

Persiapan Sampel

Bentonit dibersihkan dari pengotor kasar, kemudian dipanaskan dalam oven pada temperatur 70°C selama 3 jam. Selanjutnya dilakukan penggerusan dan diayak dengan menggunakan ayakan lolos 100 mesh. Hasil ayakan dikarakterisasi dengan FTIR, XRD dan BET.

Aktivasi Bentonit dengan HCl 5 M

Sebanyak 50 gram bentonit yang telah diayak, direfluks dengan 250 mL HCl 5 M selama 3 jam pada temperatur 105°C. Kemudian disaring dan dicuci dengan akuades hingga lolos uji klor menggunakan

AgNO₃ 0,1 M. Padatan dikeringkan dengan oven pada temperatur 60°C selama 48 jam. Bentonit yang telah diaktivasi selanjutnya diayak sampai lolos 200 mesh. Hasil ayakan dikarakterisasi dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared*), XRD (*X-ray diffraction*) dan fisisorpsi isothermal gas N₂ menggunakan persamaan BET.

Modifikasi Bentonit

Variasi konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺

Dibuat larutan FeSO₄.7H₂O dan FeCl₃.6H₂O dengan konsentrasi masing-masing sebesar 0,0125:0,025; 0,025:0,05 dan 0,05:0,1 M. Kedua larutan tersebut dimasukkan ke dalam gelas beker 1000 mL yang di dalamnya terdapat bentonit yang telah diaktivasi. Campuran diaduk pada temperatur 50°C, kemudian ditambahkan larutan NH₄OH tetes demi tetes hingga pH 10. Campuran didiamkan selama 2 jam kemudian disaring, dicuci, dan dioven pada temperatur 110°C selama 2 jam. Bentonit termodifikasi magnetit yang telah diperoleh selanjutnya digerus perlahan-lahan sampai diperoleh bubuk halus. Padatan yang diperoleh dikarakterisasi dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared*) dan XRD (*X-ray diffraction*).

Variasi temperatur

Dibuat larutan FeSO₄.7H₂O dan FeCl₃.6H₂O pada konsentrasi optimum dari hasil kajian sebelumnya. Kedua larutan tersebut dimasukkan ke dalam gelas beker 1000 mL yang di dalamnya terdapat bentonit yang telah diaktivasi. Campuran diaduk pada

beberapa variasi temperatur, yaitu 25°C, 50°C, dan 85°C kemudian ditambahkan larutan NH₄OH tetes demi tetes hingga pH 10. Campuran didiamkan selama 2 jam kemudian disaring, dicuci, dan dioven pada temperatur 110°C selama 2 jam. Bentonit termodifikasi magnetit yang telah diperoleh selanjutnya digerus perlahan-lahan sampai diperoleh bubuk halus. Padatan yang diperoleh dikarakterisasi dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared*) dan XRD (*X-ray diffraction*).

Uji adsorpsi

a. Penentuan pH optimum

Sebanyak 0,05 gram sampel bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit digunakan untuk mengadsorpsi 50 mL larutan Hg(II) 50 ppm dengan pH awal 1, 2, 3, 4, 5 dan 6. Proses dilakukan menggunakan *shaker* selama 3 jam pada temperatur kamar. Konsentrasi Hg(II) yang tidak teradsorpsi diukur dengan menggunakan *mercury analyzer*.

b. Kinetika adsorpsi

Sebanyak 0,05 gram sampel bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit digunakan untuk mengadsorpsi 50 mL larutan Hg(II) 50 ppm pada pH optimum dengan variasi waktu 5, 10, 20, 40, 60, 90, 180, 300 dan 420 menit pada temperatur kamar. Konsentrasi Hg(II) yang tidak teradsorpsi diukur dengan menggunakan *mercury analyzer*.

c. Kesetimbangan Adsorpsi

Sebanyak 0,05 gram sampel bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit digunakan untuk mengadsorpsi 50 mL larutan merkuri pada pH dan waktu optimum dengan variasi konsentrasi 10, 20, 30, 40 dan 50 ppm pada temperatur kamar. Konsentrasi Hg(II) yang tidak teradsorpsi diukur dengan menggunakan *mercury analyzer*.

Uji pemisahan adsorben dalam larutan Hg(II)

Larutan Hg(II) dimasukkan pada 2 buah botol sampel. Botol sampel pertama ditambahkan dengan adsorben bentonit teraktivasi dan botol sampel kedua ditambahkan adsorben bentonit termodifikasi magnetit. Masing-masing campuran diaduk kemudian didiamkan beberapa saat. Pada botol sampel kedua diberi medan magnet eksternal. Kemudian diamati apa yang terjadi pada masing-masing campuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

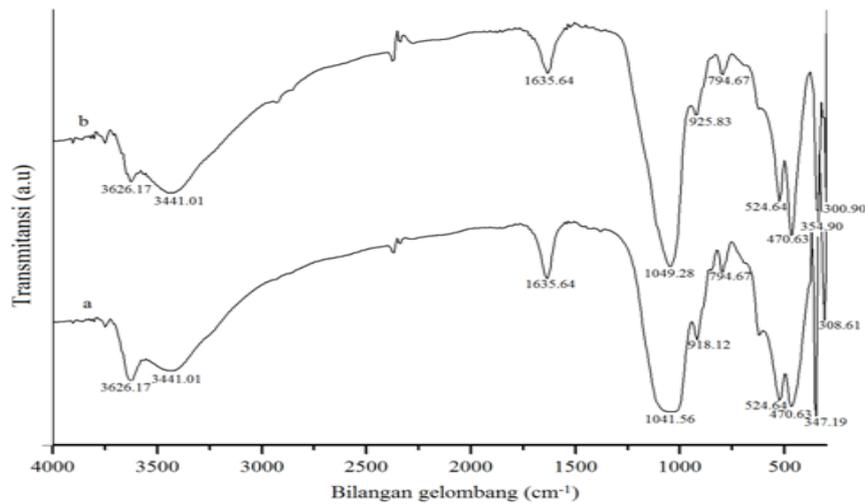
Bentonit Teraktivasi Asam

Sampel bentonit diaktivasi menggunakan larutan asam. Penggunaan larutan asam bertujuan untuk menukarkan kation penyeimbang pada ruang antar lapis bentonit dengan ion H⁺ dan melarutkan pengotor lainnya dari kisi struktur, sehingga secara fisik rangkaian struktur (*framework*) bentonit memiliki area yang lebih luas.

Analisis data FTIR, XRD, dan luas permukaan spesifik berdasarkan persamaan

BET digunakan untuk memverifikasi karakteristik bentonit hasil aktivasi. Gambar 1 menyajikan data spektra hasil analisis

menggunakan spektroskopi FTIR untuk bentonit dan bentonit teraktivasi asam.



Gambar 1. Spektrum FTIR : (a) bentonit dan (b) bentonit teraktivasi

Gambar 1(a) merupakan spektrum inframerah bentonit. Puncak daerah bilangan gelombang $3441,01 \text{ cm}^{-1}$ dan $1635,64 \text{ cm}^{-1}$ merupakan puncak serapan dari dari molekul air yang terperangkap dalam kisi kristal atau di ruang antar lapis (Wang *et al.*, 2011). Sedangkan pada daerah bilangan gelombang $3626,17 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur -OH yang terikat pada atom Al oktahedral. Pita serapan tersebut berkorelasi dengan adanya bilangan gelombang $918,12 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi ulur Al-Al-OH (Eren *et al.*, 2009).

Puncak serapan yang tajam pada daerah sekitar $1041,56 \text{ cm}^{-1}$ merupakan serapan karakteristik dari vibrasi ulur Si-O yang berkorelasi dengan bilangan gelombang $524,64 \text{ cm}^{-1}$ dan $470,63 \text{ cm}^{-1}$ yang masing-masing menunjukkan adanya vibrasi dari Al-O-Si dan Si-O-Si (Eren *et al.*, 2009). Pita serapan pada daerah bilangan gelombang

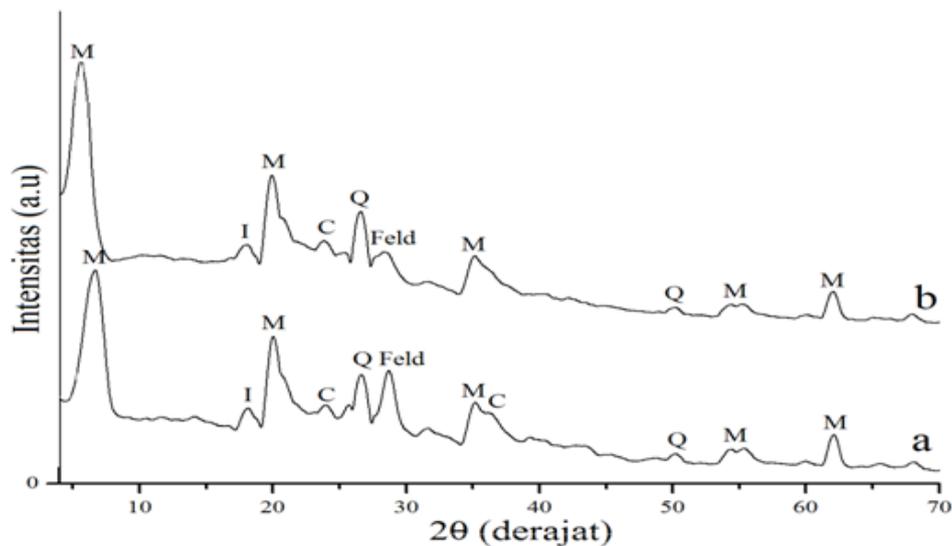
$794,67 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur dari O-Si-O yang karakteristik terhadap mikrokristalin SiO_2 atau lebih dikenal dengan mineral kuarsa (Holtzer *et al.*, 2011). Dengan demikian, berdasarkan seluruh data puncak-puncak serapan tersebut diperoleh informasi bahwa sampel yang dianalisis merupakan keluarga dari mineral silika alumina.

Pola spektra FTIR sampel bentonit dan bentonit teraktivasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 secara keseluruhan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan perlakuan asam, struktur bentonit berdasarkan eksistensi gugus fungsi tidak mengalami kerusakan. Sedikit pergeseran spektrum terjadi pada daerah bilangan gelombang $1041,56 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi ulur dari Si-O mengalami pergeseran ke arah bilangan gelombang $1049,28 \text{ cm}^{-1}$. Pergeseran ke arah bilangan gelombang

yang lebih besar mengindikasikan bahwa terjadi dealuminasi pada struktur dasar bentonit. Bilangan gelombang $918,12 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi tekuk Al-OH juga mengalami pergeseran ke arah bilangan gelombang lebih besar yang mengindikasikan bahwa semakin homogenya lingkungan dari struktur Al-OH akibat adanya disolusi atom-atom logam di luar kerangka dasar penyusun bentonit (non-oktahedral) (Saikia *et al.*, 2003).

Untuk memperkuat hasil identifikasi, diperlukan data pendukung berupa data XRD. Difraktogram sinar-x untuk kedua sampel bentonit sebelum dan sesudah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh *Joint Comitte on Powder Diffraction* (JCPDS) dapat dinyatakan bahwa sampel bentonit yang digunakan pada penelitian ini mengandung mineral monmorilonit, illit, cristobalit, kuarsa, dan *feldspar*.



Gambar 2. Difraktogram (a) bentonit dan (b) bentonit teraktivasi (M = Monmorilonit, I = Illit, C = Cristobalit, Feld= *Feldspar*, Q = Kuarsa).

Dari data XRD di atas terlihat bahwa difraktogram sampel bentonit teraktivasi secara umum tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan difraktogram bentonit tanpa aktivasi, terutama pada puncak-puncak yang khas untuk mineral monmorilonit. Perubahan yang cukup jelas hanya terjadi pada puncak *feldspar* di 2θ sebesar $28,68^\circ$ dan cristobalit di 2θ sebesar $36,08^\circ$ yang mengalami penurunan intensitas. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadi kerusakan

pada struktur mineral *feldspar* dan cristobalit akibat adanya perlakuan asam.

Data kualitatif yang diperoleh dari data XRD di atas juga didukung dengan data semikuantitatif yang disajikan pada Tabel 1. Terlihat bahwa perlakuan asam mampu meningkatkan komposisi relatif dari mineral monmorilonit, illit, dan kuarsa, serta menurunkan kelimpahan relatif dari mineral *feldspar* dan cristobalit yang merupakan mineral pengotor sampel bentonit.

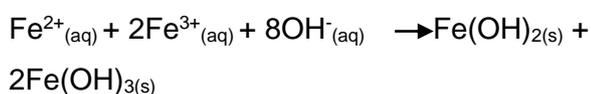
Tabel 1. Analisis semikuantitatif sampel bentonit dihitung berdasarkan data XRD

Sampel	Komposisi relatif mineral (%)				
	Monmorilonit	Illit	Kuarsa	Cristobalit	Feldspar
Bentonit	61,88	3,49	12,38	10,40	11,85
Bentonit Teraktivasi	66,94	3,97	13,22	5,98	5,29

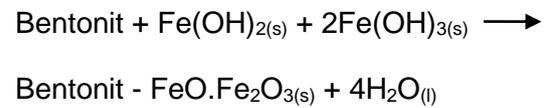
Analisis luas permukaan spesifik berdasarkan persamaan BET juga menunjukkan bahwa dengan perlakuan asam, bentonit teraktivasi memiliki karakteristik yang lebih baik dengan bertambahnya luas permukaan spesifik dari 11,986 m²/g menjadi 116,475 m²/g.

Bentonit Termodifikasi Magnetit

Modifikasi bentonit dengan magnetit dilakukan dengan mereaksikan secara serempak bentonit dengan larutan yang mengandung Fe²⁺ dan Fe³⁺ pada rasio mol 1 : 2. Rasio mol 1 : 2 merupakan stoikiometri yang dibutuhkan dalam pembentukan FeO.Fe₂O₃ pada ruang antar lapis bentonit. Ion-ion ini akan mengalami proses kopresipitasi dengan penambahan basa NH₄OH yang berfungsi untuk pembentukan Fe(OH)₂ dan Fe(OH)₃.



Selanjutnya dilakukan penyaringan endapan dan pencucian menggunakan akuades untuk menghilangkan ion-ion sisa berupa kation dan anion terlarut. Tahap berikutnya adalah pemanasan yang diperlukan dalam proses dehidrasi sehingga terbentuk FeO.Fe₂O₃ atau yang lebih sering disebut dengan Fe₃O₄ sebagai partikel magnetit (Waynert, 2003).



Pada tahap modifikasi bentonit dengan magnetit akan dikaji pengaruh konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺ dan pengaruh temperatur sintesis terhadap ketahanan struktur dasar bentonit dan jenis oksida besi yang terbentuk.

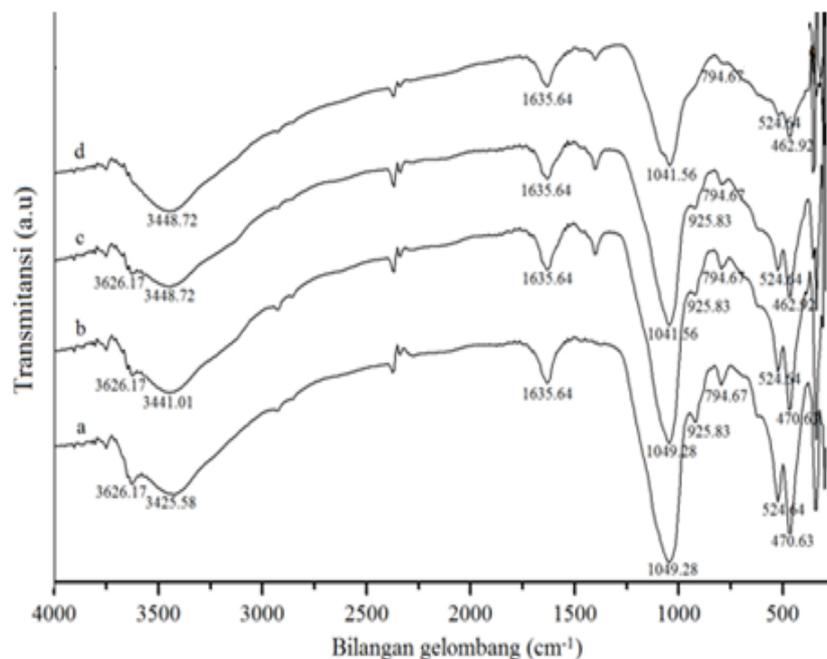
Pengaruh Konsentrasi Molar Fe²⁺ : Fe³⁺

Pada kajian variasi konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺ dilakukan 3 variasi konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺, yaitu masing-masing sebesar 0,0125:0,025; 0,025:0,05 dan 0,05:0,1. Hasil sintesis dari beberapa variasi konsentrasi tersebut kemudian akan diverifikasi karakteristiknya menggunakan spektroskopi FTIR dan XRD.

Spektra FTIR dari bentonit termodifikasi magnetit dengan beberapa variasi konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺ disajikan pada Gambar 4. Pola spektra FTIR sampel bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit yang ditunjukkan pada Gambar 4(a) dan (b) tidak menunjukkan perbedaan dilihat dari bilangan gelombang dan intensitasnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi molar Fe²⁺ : Fe³⁺ sebesar 0,0125:0,025 tidak terjadi pembentukan magnetit di ruang antar lapis bentonit. Namun, hal yang berbeda ditunjukkan oleh spektra data FTIR Gambar

4(c) dan (d), terlihat adanya perubahan pada beberapa bilangan gelombang, seperti pada pita serapan $470,63 \text{ cm}^{-1}$ mengalami pergeseran ke arah bilangan gelombang yang lebih kecil, yaitu sebesar $462,92 \text{ cm}^{-1}$ yang menandakan bahwa terjadi perubahan ikatan pada vibrasi Si-O-Si. Hal ini juga berkorelasi dengan bilangan gelombang $1049,28 \text{ cm}^{-1}$ yang mengalami pergeseran ke arah bilangan gelombang yang lebih kecil yaitu sebesar $1041,56 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan bahwa vibrasi Si-O dalam keadaan kurang bebas. Data ini juga didukung dengan bentuk spektrum pada

bilangan gelombang $400\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$ yang lebih landai bila dibandingkan dengan data spektrum bentonit teraktivasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa ikatan antara Si-O masih terdapat di dalam bentonit termodifikasi namun kekuatan ikatan tekuk Si-O berkurang karena terdapatnya ikatan-ikatan antara oksigen dengan Fe yang merupakan prekursor pembentuk magnetit yang memberikan kompetisi kekuatan ikatan tarik menarik antara Si-O-Fe di ruang antar lapis bentonit. Hasil spektra yang diperoleh ini hampir sama dengan spektrum yang diperoleh oleh Ardianto (2013).



Gambar 4. Spektra FTIR : bentonit teraktivasi (a) dan bentonit termodifikasi pada $T = 50^\circ\text{C}$ dengan konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar $0,0125:0,0125$ (b); $0,025:0,05$ (c); $0,05:0,01$ (d)

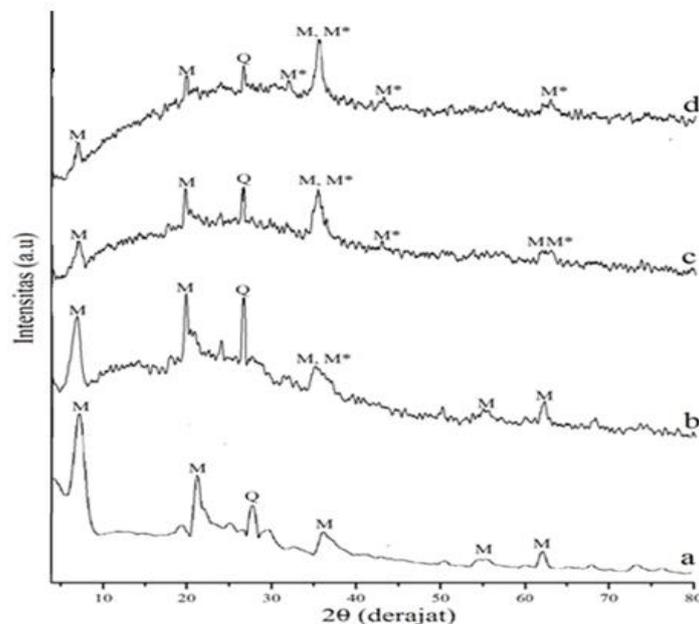
Dengan demikian, berdasarkan seluruh data puncak-puncak serapan tersebut diperoleh informasi bahwa dengan konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar $0,025:0,05$ dan $0,05:0,1$ yang ditampilkan pada spektra FTIR di atas, menunjukkan adanya ikatan Si-O-Fe yang terdapat pada

ruang antar lapis bentonit. Pada spektrum Gambar 4(d) terjadi perubahan yang cukup signifikan, yaitu pada bilangan gelombang $1041,56 \text{ cm}^{-1}$ mengalami penurunan intensitas dan hilangnya serapan pada bilangan gelombang $3626,17 \text{ cm}^{-1}$ dan $925,83 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan bahwa vibrasi ulur –

OH dan vibrasi tekuk Al-OH dari struktur oktahedral bentonit mengalami kerusakan. Hal ini terjadi karena rusaknya kerangka oktahedral bentonit akibat serangan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} pada konsentrasi yang terlalu besar. Berdasarkan data FTIR dapat dinyatakan bahwa konsentrasi molar optimal $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025:0,05.

Spektra FTIR yang ditunjukkan pada gambar diatas tidak dapat menegaskan keberadaan partikel magnetit (Fe_3O_4). Namun keberadaan partikel magnetit didalam jaringan struktur bentonit dapat diperlihatkan oleh data difraktogram sinar-x. Difraktogram sinar-x bentonit termodifikasi magnetit dengan variasi konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ disajikan pada Gambar 5. Difraktogram

Gambar 5 memperlihatkan perubahan pola difraksi pada bentonit termodifikasi dengan munculnya puncak-puncak baru yang karakteristik untuk oksida besi berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh *Joint Committee on Powder Diffraction* (JCPDS) yaitu pada 2θ sebesar $35,49^\circ$; $43,14^\circ$; dan $62,82^\circ$ yang masing-masing berkesesuaian dengan $d = 2,53\text{\AA}$; $2,10\text{\AA}$; dan $1,48\text{\AA}$ yang tumpang tindih dengan puncak dari mineral monmorilonit penyusun bentonit. Puncak - puncak difraktogram tersebut karakteristik terhadap oksida besi fasa magnetit (Fe_3O_4). Hal ini mengindikasikan bahwa oksida besi fasa magnetit terdapat pada jaringan antar lapis struktur bentonit.

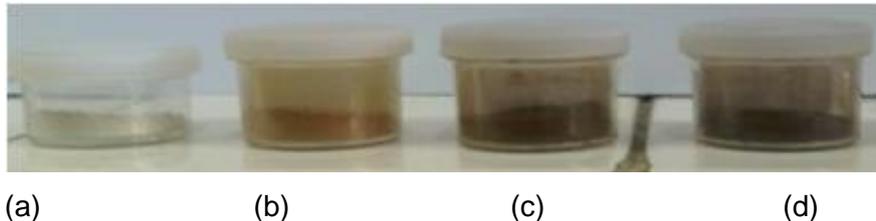


Gambar 5. Difraktogram bentonit teraktivasi (a), bentonit termodifikasi pada $T = 50^\circ\text{C}$ dengan konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,0125:0,025 (b); 0,025:0,05 (c); 0,05:0,1 (c) (M = Monmorilonit, Q = Kuarsa, M* = Magnetit).

Semakin besar konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ yang digunakan untuk pembentukan magnetit maka akan semakin tinggi pula puncak-puncak dari fasa magnetit yang

terbentuk. Semakin besar konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$, pembentukan fasa magnetit pada ruang antar lapis menjadi semakin sempurna dan semakin banyak partikel

magnetit yang terbentuk pada ruang antar lapis. Namun sebaliknya, peningkatan konsentrasi ini justru akan menurunkan intensitas puncak - puncak yang karakteristik untuk mineral monmorilonit penyusun bentonit. Penurunan intensitas tersebut terjadi karena menurunnya kristalinitas bentonit. Kerusakan bentonit dapat disebabkan oleh banyaknya magnetit yang terbentuk pada ruang antar lapis bentonit. Dengan mempertimbangkan tingginya intensitas puncak difraktogram magnetit yang dihasilkan serta intensitas difraktogram monmorilonit penyusun bentonit maka konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ yang dianggap optimal terbentuk pada konsentrasi sebesar 0,025:0,05.



Gambar 6. Serbuk bentonit teraktivasi (a), bentonit termodifikasi magnetit dengan konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ masing-masing sebesar 0,0125 : 0,025 (b), 0,025 : 0,05 (c), 0,05 : 0,1 (d)

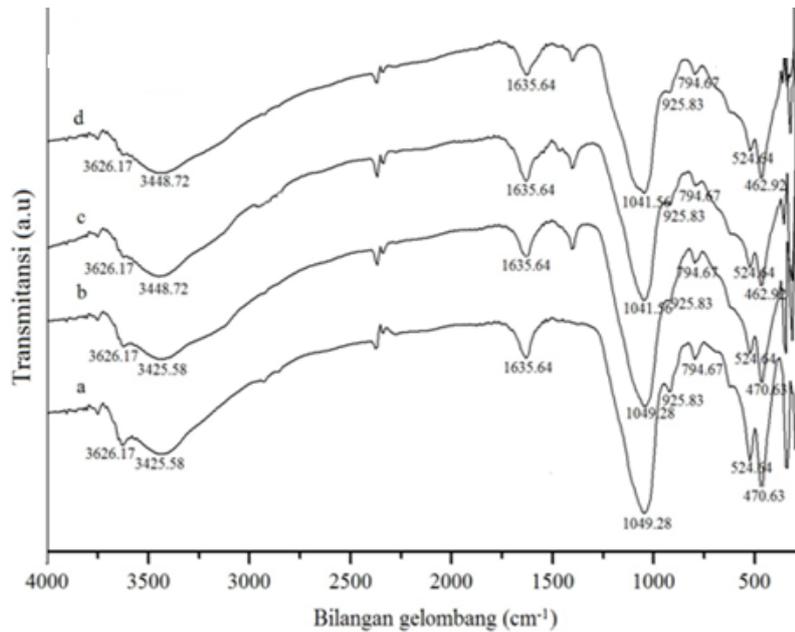
Pengaruh Temperatur

Kajian variasi temperatur sintesis digunakan untuk menentukan kondisi terbaik Sintesis magnetit yang terbentuk pada ruang antar lapis bentonit. Dilakukan 3 variasi

Pengamatan visual warna padatan bentonit termodifikasi magnetit pada variasi konsentrasi molar prekursor $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ yang dihasilkan pada penelitian ini juga dapat menunjukkan jenis oksida besi yang terbentuk. Perbedaan warna padatan yang dihasilkan disajikan pada Gambar 6. Pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,0125:0,025 padatan yang dihasilkan berwarna coklat, sedangkan pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025:0,05 dan 0,05:0,1 padatan yang dihasilkan berwarna hitam. Hal ini disebabkan karena di dalam sampel terdapat magnetit, dimana oksida besi yang berwarna hitam merupakan oksida besi fasa magnetit (Fe_3O_4).

temperatur sintesis, yaitu pada 25°C, 50°C dan 85°C.

Analisis data FTIR dan XRD digunakan untuk memverifikasi karakteristik bentonit hasil sintesis. Data FTIR dari bentonit hasil sintesis, ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Spektra FTIR : bentonit teraktivasi (a) dan bentonit termodifikasi magnetit pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025 : 0,05 pada $T = 25^\circ\text{C}$ (b), $T = 50^\circ\text{C}$ (c), $T = 85^\circ\text{C}$ (d)

Pola spektra FTIR sampel bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 secara keseluruhan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Sedikit pergeseran spektra terjadi pada daerah bilangan gelombang $1049,28 \text{ cm}^{-1}$ Gambar 7(c) dan (d) yang menunjukkan adanya vibrasi ulur dari Si-O mengalami pergeseran ke arah bilangan gelombang $1041,56 \text{ cm}^{-1}$. Pergeseran ke arah bilangan gelombang yang lebih kecil mengindikasikan bahwa ikatan Si-O dalam keadaan kurang bebas karena adanya kompetisi tarik menarik antara Si-O dengan Fe dari partikel magnetit di dalam ruang antar lapis bentonit. Data ini juga didukung dengan pergeseran pita serapan pada bilangan gelombang $470,63 \text{ cm}^{-1}$ ke arah bilangan gelombang yang lebih kecil, yaitu sebesar $462,92 \text{ cm}^{-1}$ yang

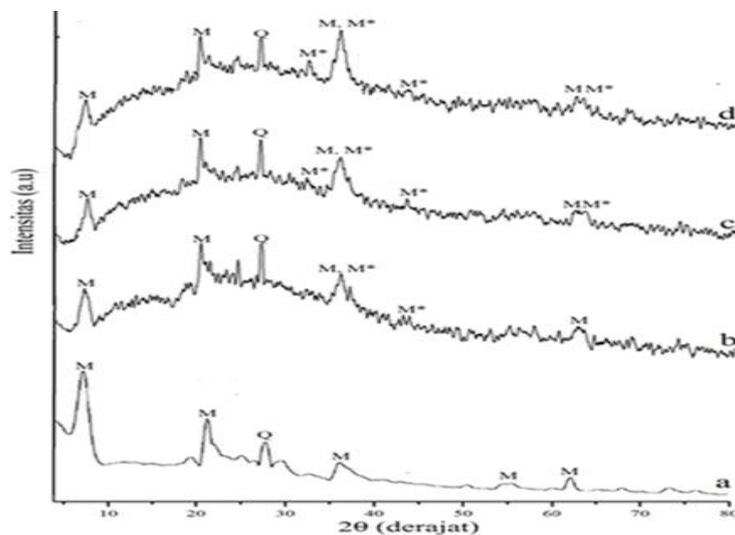
menandakan bahwa terjadi perubahan ikatan pada vibrasi Si-O-Si (Ardianto, 2013).

Keberadaan partikel magnetit di dalam jaringan struktur bentonit dapat diperlihatkan oleh data difraktogram sinar-x. Difraktogram sinar-x pada Gambar 8 menunjukkan bahwa pada temperatur kamar, puncak difraksi untuk fasa magnetit memiliki kesesuaian yang masih sangat lemah dan akan semakin tajam seiring dengan peningkatan temperatur sampai dengan 85°C yang menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan pembentukan fasa magnetit (Fe_3O_4) di ruang antar lapis bentonit seiring dengan kenaikan temperatur. Kondisi ini berhubungan dengan peran energi termal dalam proses pembentukan magnetit dalam ruang antar lapis bentonit. Proses pembentukan ini akan melibatkan tahapan penyisipan ion-ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ dalam ruang antar lapisan, proses

pertukaran kation pada permukaan lapisan bentonit dan akhirnya proses kopresipitasi pembentukan magnetit.

Peningkatan temperatur akan memberikan suplai energi termal untuk menjalankan berbagai tahapan-tahapan tersebut. Ion-ion Fe, yang mempunyai energi kinetik yang meningkat akan lebih mudah berdifusi di ruang antara lapis bentonit yang telah mengalami *swelling* akibat proses pelarutan dalam air. Demikian pula proses pertukaran kation pada permukaan bentonit akan semakin meningkat sehingga akan semakin banyak jumlah ion-ion Fe yang terikat di permukaan bentonit. Ion-ion ini

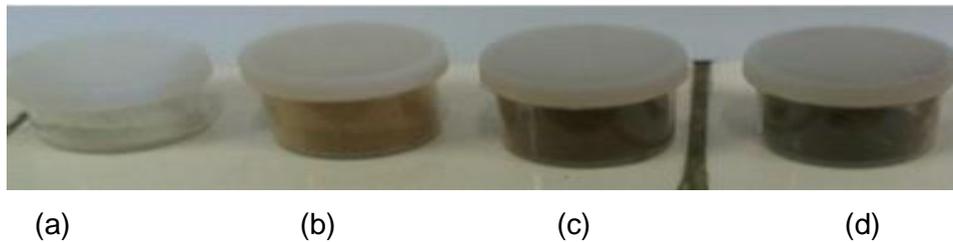
selanjutnya akan mengalami proses kopresipitasi dengan penambahan basa NH_4OH dimana pembentukan partikel magnetit cenderung lebih cepat terjadi pada temperatur yang lebih tinggi (Fisli *et al*, 2008). Selain itu, sifat ketebalan lapisan baur atau jarak antar lapis bentonit juga bergantung pada temperatur larutan. Dengan semakin meningkatnya temperatur larutan maka akan semakin tebal lapisan baur bentonit (Notodarmojo, 2005). Ketika lapisan baur membesar, ion Fe^{2+} dan ion Fe^{3+} akan lebih mudah masuk ke dalam ruang antar lapis sehingga pembentukan magnetit akan semakin sempurna.



Gambar 8. Difraktogram bentonit teraktivasi (a), bentonit termodifikasi pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025 : 0,05 pada $T = 25^\circ\text{C}$ (b), $T = 50^\circ\text{C}$ (c), $T = 85^\circ\text{C}$ (d) (M = Monmorilonit, Q = Kuarsa, M^* = Magnetit)

Dari data FTIR dan XRD dapat diperoleh bahwa karakteristik bentonit termodifikasi magnetit optimal terjadi pada temperatur sintesis 85°C . Pada pengamatan visual bentonit termodifikasi juga

memperlihatkan bahwa pada temperatur sintesis 85°C dihasilkan padatan berwarna hitam yang mendekati warna hitam dari besi oksida fasa magnetit (Fe_3O_4).



Gambar 9. Serbuk bentonit teraktivasi (a), bentonit termodifikasi magnetit dengan dengan konsentrasi $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025 M : 0,05 M pada $T = 25^\circ\text{C}$ (b), $T = 50^\circ\text{C}$ (c), $T = 85^\circ\text{C}$ (d)

Dua kajian diatas menunjuk an bahwa karakteristik bentonit termodifikasi magnetit terbaik diperoleh pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025:0,05 dengan temperatur sintesis sebesar 85°C . Hasil modifikasi yang paling optimal ini kemudian dikarakterisasi dengan fisisorpsi isothermal gas N_2 menggunakan *gas sorption analyzer* berdasarkan persamaan BET untuk penentuan luas permukaan spesifik sampel.

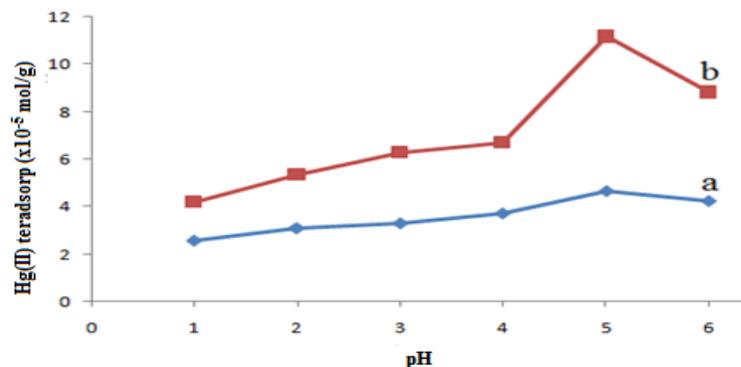
Berdasarkan data analisis diperoleh bahwa sampel bentonit termodifikasi magnetit memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar jika dibandingkan dengan bentonit teraktivasi, yaitu masing-masing sebesar $125,743 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $116,475 \text{ m}^2/\text{g}$. Hal ini menunjukkan bahwa partikel magnetit telah terbentuk di ruang antar lapis bentonit. Pembentukan magnetit di ruang antar lapis

bentonit menyebabkan bertambahnya kehadiran partikel dan kation-kation yang menempati ruang antar lapis (Fisli *et al.*, 2008). Hal inilah yang menyebabkan luas permukaan bentonit termodifikasi magnetit lebih besar daripada bentonit teraktivasi. Hasil modifikasi yang paling optimal ini juga akan digunakan pada kajian sifat adsorpsi terhadap $\text{Hg}(\text{II})$.

Uji Adsorpsi terhadap $\text{Hg}(\text{II})$

Penentuan pH Optimum

Penentuan pH optimum merupakan salah satu parameter penting dalam mengontrol proses adsorpsi. Harga pH larutan dapat mempengaruhi muatan permukaan adsorben dan spesiesi adsorbat. Adapun hasil kajian pengaruh pH terhadap adsorpsi $\text{Hg}(\text{II})$ pada kedua jenis adsorben dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Adsorpsi $\text{Hg}(\text{II})$ oleh (a) bentonit teraktivasi dan (b) bentonit termodifikasi sebagai fungsi pH

Berdasarkan Gambar 10 dapat diamati bahwa kemampuan adsorpsi dari kedua jenis adsorben menunjukkan kemiripan. Terlihat bahwa adsorpsi baik oleh bentonit teraktivasi maupun bentonit termodifikasi magnetit mulai terjadi secara signifikan pada pH 1-5 namun pada pH 6 justru mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena pada pH rendah (kondisi asam), keberadaan proton dari ion H^+ akan semakin dominan yang mengakibatkan situs aktif adsorben akan terprotonasi. Hal ini menyebabkan semakin kecilnya peluang spesies $Hg(II)$ berinteraksi dan mengalami ikatan elektrostatis dengan situs aktif dari permukaan bentonit.

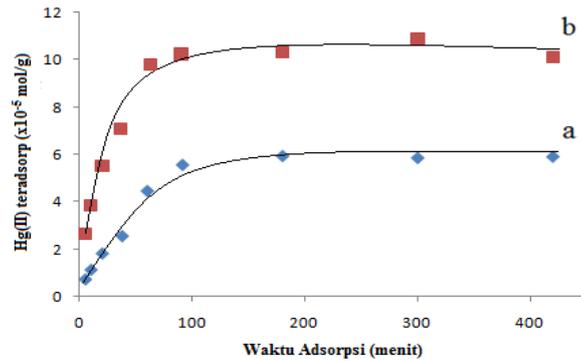
pH larutan dalam proses adsorpsi juga mempengaruhi keberadaan spesies $Hg(II)$ dalam larutan. Pada pH rendah, spesies $Hg(II)$ ada dalam bentuk Hg^{2+} , $HgOH^+$, dan $Hg(OH)_2$ namun seiring dengan kenaikan pH, tepatnya pada $pH > 5$ spesies $Hg(II)$ didominasi oleh $Hg(OH)_2$ (Sujoy *et al.*, 2007; Eloussaief, 2013). Adanya ligan OH^- dimana atom oksigennya kaya akan pasangan elektron bebas dan memiliki sifat elektronegatifitas yang besar mengakibatkan ligan bermuatan parsial negatif sehingga akan menurunkan interaksi $Hg(II)$ dengan situs aktif permukaan bentonit yang bermuatan negatif. Hal inilah yang menyebabkan interaksi bentonit terhadap $Hg(II)$ pada pH 6 mengalami penurunan.

Fenomena yang sama juga ditunjukkan oleh bentonit termodifikasi magnetit terhadap

adsorpsi $Hg(II)$. Pada pH rendah bentonit termodifikasi magnetit memiliki kemampuan adsorpsi lebih kecil karena adanya kompetisi antara proton dari ion H^+ dengan kation $Hg(II)$ yang akan menurunkan interaksi antara situs aktif bentonit dengan logam kationik $Hg(II)$. Pada pH 5, seperti yang terlihat pada gambar juga menunjukkan adanya peningkatan kemampuan adsorpsi yang cukup signifikan untuk bentonit termodifikasi magnetit. Peningkatan ini terjadi karena magnetit yang berada pada ruang antar lapis bentonit juga memiliki peran dalam mengadsorpsi $Hg(II)$. Magnetit merupakan suatu jenis oksida besi yang memiliki titik isoelektrik pada pH 4,4. Jika $pH < 4,4$ magnetit cenderung bermuatan positif sedangkan pada $pH > 4,4$ magnetit cenderung bermuatan negatif. Sehingga pada kondisi pH larutan $> 4,4$ situs aktif dari magnetit yang bermuatan negatif dapat berinteraksi dengan $Hg(II)$. Maka dari penjelasan di atas, dapat disimpulkan bahwa kemampuan adsorpsi untuk kedua jenis adsorben mencapai optimum pada pH 5.

Kajian Kinetika Adsorpsi

Hasil adsorpsi terhadap pengaruh waktu kontak dapat dilihat pada Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11 dapat diamati pola adsorpsi $Hg(II)$ pada bentonit teraktivasi dan bentonit termagnetisasi dengan beberapa variasi waktu adsorpsi memperlihatkan adanya kemiripan. Terlihat bahwa adsorpsi $Hg(II)$ dalam jumlah yang relatif banyak terjadi pada menit-menit awal.



Gambar 11. Grafik hubungan antara waktu adsorpsi dengan jumlah Hg(II) teradsorpsi/gram (a) bentonit teraktivasi dan (b) bentonit termodifikasi.

Hasil penelitian selanjutnya diuji dengan menggunakan model kinetika adsorpsi yang didasarkan pada rumusan kinetika adsorpsi orde satu (Santoso),

kinetika adsorpsi orde satu semu (Lagergren), dan kinetika adsorpsi orde dua (Ho and McKey).

Tabel 2. Parameter kinetika adsorpsi

Material	Menurut Santosa dkk.			Menurut Lagergren		Menurut Ho and McKey	
	Q (mol/L) ⁻¹	k ₁ (menit ⁻¹)	R ²	B (menit ⁻¹)	R ²	k ₂ (g/mg.menit)	R ²
Benonit Teraktivasi	1,948	0,001	0,598	0,020	0,897	1,316x10 ⁻³	0,985
Bentonit Termodifikasi	10,809	0,003	0,615	0,057	0,964	2,125x10 ⁻³	0,994

Dari harga koefisien korelasi pada Tabel 2 terlihat bahwa grafik adsorpsi orde dua semu untuk kedua jenis adsorben lebih linier jika dibandingkan dengan grafik orde satu dan orde satu semu. Dari harga koefisien korelasi tersebut dapat disimpulkan bahwa adsorpsi Hg(II) oleh bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit merupakan model kinetika adsorpsi orde dua semu dengan harga konstanta laju k₂ untuk bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit masing-masing sebesar 1,316 x 10⁻³ g/mg.menit dan 2,125 x 10⁻³ g/mg.menit. Model kinetika reaksi ini menunjukkan bahwa laju adsorpsi setara dengan kuadrat konsentrasi ion logam divalen yang diekspresikan dengan (q_e-q_t)².

Kesetimbangan adsorpsi

Hasil penelitian yang diperoleh kemudian diuji dengan menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich dapat dilihat pada Tabel 3. Bila ditinjau dari nilai R² maka adsorpsi pada bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit cenderung mengikuti pola isoterm Langmuir, sehingga dapat diasumsikan bahwa situs aktif pada permukaan adsorben bersifat homogen yang berarti bahwa satu ion Hg(II) menempati satu situs aktif dan tidak ada adsorpsi lebih lanjut yang dapat dilakukan pada situs tersebut. Semakin tinggi koefisien korelasi untuk model Langmuir memprediksi bahwa cakupan ion Hg(II) mungkin *monolayer*. Apabila ditinjau dari nilai R_L-nya pada bentonit teraktivasi dan

bentonit termodifikasi magnetit yang ditunjukkan pada Tabel 3 berturut-turut adalah sebesar 0,806 dan 0,838 memiliki nilai lebih dari 0 dan kurang dari 1 maka mempertegas dugaan bahwa proses adsorpsi cenderung mengikuti pola isoterm Langmuir.

Berdasarkan pola isoterm Langmuir juga dapat ditentukan pula secara langsung nilai

kapasitas adsorpsi (b) dari adsorben yang ditunjukkan pada Tabel 5. Pada tabel tersebut terlihat bahwa bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit memiliki kapasitas adsorpsi (b) terhadap Hg(II) secara berturut-turut sebesar $1,80 \times 10^{-4}$ mol/g dan $4,42 \times 10^{-4}$ mol/g.

Tabel 5. Konstanta isoterm adsorpsi bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi terhadap Hg(II).

Material	Parameter Adsorpsi Langmuir				Parameter Adsorpsi Feundlich		
	B (mol/g)	K (L/mol)	E (kJ/mol)	R ²	B	n	R ²
Bentonit teraktivasi	$1,80 \times 10^{-4}$	2.942,56	19,788	0,996	0,071	1,217	0,992
Bentonit termodifikasi	$4,42 \times 10^{-4}$	5.118,65	21,160	0,458	1,155	0,990	0,458

Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa modifikasi mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi bentonit teraktivasi terhadap Hg(II) sampai dengan dua kali lipat. Hal ini terjadi karena bentonit termodifikasi magnetit memiliki karakteristik luas permukaan yang lebih besar. Selain itu, peningkatan kapasitas adsorpsi juga dimungkinkan terjadi karena adanya peranan dari situs aktif magnetit yang terdapat pada ruang antar lapis bentonit termodifikasi.

Penerapan persamaan isoterm Langmuir dapat dikembangkan untuk menentukan energi adsorpsi. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa energi yang diperlukan untuk adsorpsi Hg(II) pada bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi secara berturut-turut sebesar 19,788 kJ/mol dan 21,160 kJ/mol. Energi yang diperoleh menunjukkan bahwa ikatan yang terjadi antara situs-situs aktif bentonit teraktivasi

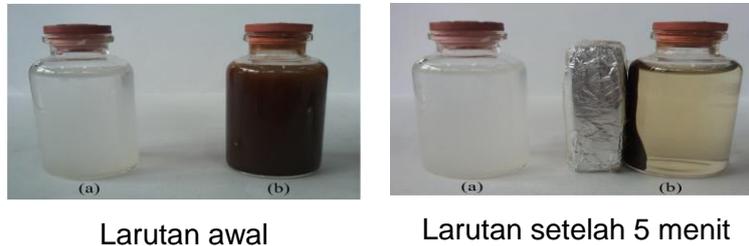
terhadap Hg(II) merupakan ikatan yang cukup lemah jika dibandingkan dengan ikatan yang terjadi antara situs-situs aktif bentonit termodifikasi magnetit terhadap Hg(II). Interaksi antara bentonit teraktivasi dengan Hg(II) didominasi oleh interaksi elektrostatis. Sedangkan interaksi yang terjadi antara bentonit termodifikasi magnetit dengan Hg(II) didominasi oleh interaksi elektrostatis, ikatan kovalen koordinasi dan ionik.

Uji Pemisahan Adsorben dalam Larutan Hg(II)

Uji pemisahan dilakukan pada kedua jenis adsorben, yaitu bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit. Setelah digunakan dalam proses adsorpsi Hg(II), adsorben bentonit teraktivasi dibiarkan mengendap secara alami oleh gaya gravitasi bumi. Perlakuan yang sama juga dilakukan pada adsorben bentonit termodifikasi magnetit. Hanya saja, proses pemisahan

adsorben ini dibantu dengan medan magnet eksternal. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa setelah proses pemisahan berlangsung selama 2 menit, bentonit termodifikasi magnetit telah terpisah dari

dalam larutan Hg(II). Hal yang berbeda justru ditunjukkan oleh bentonit teraktivasi yang masih terdispersi didalam larutan dan baru terpisah setelah waktu 65 menit.



Gambar 12. Uji pemisahan adsorben dari larutan Hg(II) (a) bentonit teraktivasi (b) bentonit termodifikasi magnetit.

Hal tersebut menunjukkan bahwa bentonit termodifikasi magnetit menerima respon terhadap medan magnet eksternal sehingga dapat terpisah dengan mudah dan cepat dari larutan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa jika bentonit termodifikasi magnetit memiliki sifat kemagnetan, maka fase padat adsorben tersebut akan lebih cepat terpisah jika dibandingkan dengan bentonit teraktivasi yang proses pemisahannya hanya bergantung pada gaya gravitasi.

KESIMPULAN

Aktivasi bentonit dengan larutan HCl 5 M mampu mendisolusi kation logam dan mineral pengotor serta mampu meningkatkan kristalinitas dan luas permukaan bentonit. Bentonit termodifikasi magnetit optimum dibuat pada konsentrasi molar $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ sebesar 0,025 : 0,05 dengan temperatur sintesis 85°C.

Uji adsorpsi bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi terhadap Hg(II) mencapai optimum pada pH 5. Kajian kinetika dan kesetimbangan adsorpsi menunjukkan bahwa adsorpsi Hg(II) oleh bentonit teraktivasi dan bentonit termodifikasi magnetit mengikuti kinetika orde dua semu dengan pola isotherm Langmuir.

Modifikasi bentonit dengan partikel magnet mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi Hg(II) sampai dengan 2 kali lipatnya dan dapat mempercepat proses pemisahan partikel adsorben dari dalam larutan menggunakan medan magnet eksternal.

DAFTAR PUSTAKA

Ardianto, D., 2013, *Sintesis bentonit magnetik dengan metode presipitasi sebagai adsorben ion logam berat Cd^{2+} dan Co^{2+}* , Skripsi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia : Depok.

- Bhattacharyya, K. G and Gupta, S. S., 2008, Adsorption of a Few Heavy Metal on Natural and Modified Kaolinite and Montmorillonite : A review, *J. Adv. Coll. In. Sci*, 140, 114–13.
- Eloussaief, M., Sdiri, A and M. Benzina, 2013, Modelling the adsorption of mercury onto natural and aluminium pillared clays, *Environ Sci Pollut Res*, 20, 469-479.
- Eren, E., Afsin, B and Onal, Y, 2009, Removal of lead ions by acid activated and manganese oxide-coated bentonite, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 677–685.
- Fisli, A., Hamsah, D., Wardiyati, S and Ridwan., 2008, Pengaruh Suhu Pembuatan Nano Komposit Oksida Besi Bentonit, *J. Mater. Sci.*, ISSN : 1411-1098, Vol. 9, No. 2, 145 – 149.
- Holtzer, M., Bobrowski, A and Kumon, S., 2011, Temperature influence on structural changes of foundry bentonites, *Journal of Molecular Structure*, 1004, 102–108.
- Hutagalung, H.P., 1985, Raksa (Hg), *Oseana*, Vol. X, 3, 93-105.
- Notodarmojo, S., 2005, *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*, Bandung : ITB press.
- Oliveira, L.C.A., Rios, R.V.R.A., Fabris, J.D., Sapag, K., Garg, V.K. and Lago, R.M., 2003, Clay – iron oxide magnetic composites for the adsorption of contaminants in water, *Appl. Clay Sci*, 22, 169-177.
- Saikia, N, J., Bharali, D, J., Sengupta, P and Bornhakun, 2003, Characterication, beneficiation and utilization of a clay from Assam, India, *App.Clay Sci.*, 24, 93-103.
- Sujoy, K., Akhil, R and Arun, R., 2007, A Study on the Adsorption Mechanism of Mercury on *Aspergillus versicolor* Biomass, *Environ. Sci. Technol*, 41, 8281–8287.
- Wang, Q., Chang, X., Li, D., Hu, Z., Li, R and He, Q, 2011, Adsorption of chromium(III), mercury(II) and lead(II) ions onto 4-aminoantipyrine immobilized bentonite, *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1076–1081.
- Zambrano., J. B. Laborie., S. Viers., Rakib, M and G. Durand., 2004, Mercury removal and recovery from aqueous solutions by coupled complexation–ultrafiltration and electrolysis, *Journal of Membrane Science*, 229, 179–186.

