

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penjelasan Umum

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memaksimalkan pemanfaatan limbah tulang sapi sebagai adsorben ion logam berat Cu (II). Pengujian kemampuan adsorpsi tulang sapi akan dilakukan dengan menggunakan larutan CuSO₄ sintetis. Digunakannya larutan sintetis ini dipilih karena jika digunakan limbah asli seperti yang berasal dari industri perak maka dikhawatirkan daya adsorpsi terhadap ion logam Cu (II) sebagai objek penelitian tidak akan maksimal karena pada limbah perak terdapat kandungan logam selain Cu (II).

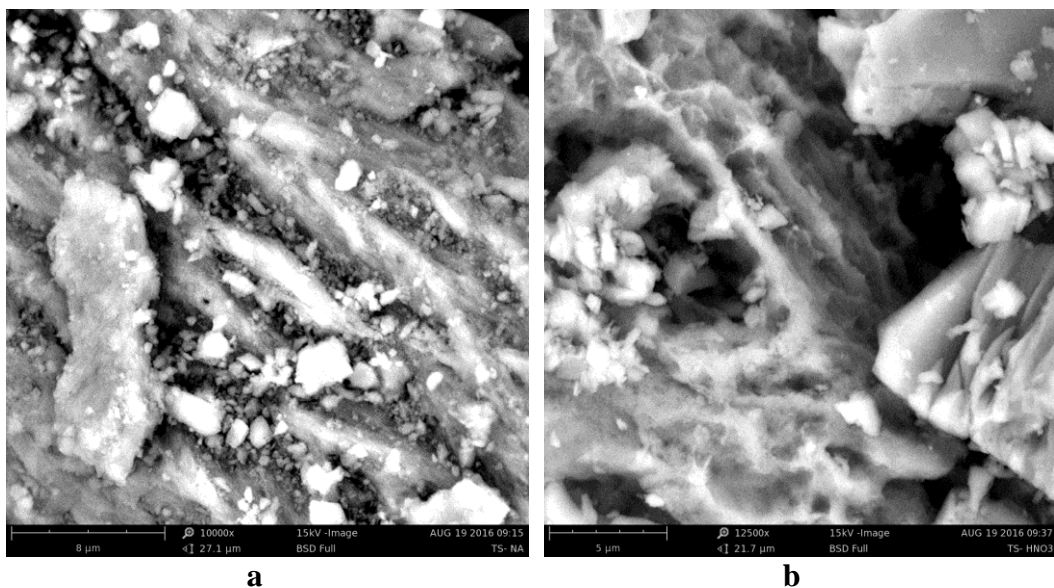
Langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini adalah persiapan tulang sapi dengan dilakukan pencucian tulang, lalu dilakukan perebusan untuk menghilangkan lemak dan setelah itu dilakukan pengeringan dengan oven untuk menghilangkan kadar air sehingga memudahkan pengerjaan pada tahap selanjutnya yaitu penghalusan tulang sapi hingga berukuran 100 mesh untuk mendapatkan luas permukaan adsorben yang lebih luas. Setelah semua proses tersebut, maka akan dilakukan dua perlakuan berbeda terhadap adsorben tersebut, yaitu sebagian akan diaktivasi secara kimia menggunakan HNO₃ 1M dengan tujuan untuk menghilangkan pengotor yang menutup pori-pori *adsorben* sehingga luas permukaan bertambah dan diharapkan dapat mengaktifkan dan meningkatkan gugus fungsi untuk membantu penyerapan ion logam Cu (II), dan sisanya dibiarkan sampai tahap penghalusan saja. Hal ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan efisiensi penyerapan terhadap ion Cu (II) oleh adsorben teraktivasi dan murni terhadap ion logam Cu (II).

Pengujian daya serap adsorben terhadap ion logam Cu (II) akan dilakukan dengan menggunakan alat berupa SSA berdasarkan SNI 06-6989.6-2004 dengan variasi uji meliputi variasi massa adsorben, pH, waktu kontak, dan konsentrasi larutan CuSO₄.

4.2 Karakterisasi Adsorben Tulang Sapi

4.2.1 Morfologi Permukaan Adsorben

Karakterisasi morfologi permukaan adsorben tulang sapi dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM)-EDS untuk mengetahui perbedaan stuktur adsorben tulang sapi murni dan teraktivasi HNO_3 . Pengujian ini dilakukan dengan perbesaran objek 10.000 kali yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini :



Gambar 4.1. Struktur morfologi permukaan (a) adsorben tulang sapi murni
(b) adsorben tulang sapi teraktivasi HNO_3 1 M

Dari gambar tersebut terlihat adanya perbedaan morfologi permukaan adsorben sebelum dan sesudah proses aktivasi. Pada adsorben tulang sapi teraktivasi HNO_3 1 M terlihat jumlah pori yang lebih banyak dengan struktur yang lebih besar dibandingkan dengan adsorben tulang sapi murni. Selain itu, terlihat bahwa semakin berkurangnya pengotor pada adsorben teraktivasi tersebut. Dalam pengujian menggunakan SEM-EDS juga diketahui kandungan kimia zat pendukung proses adsorpsi yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini :

Tabel 4.1. Hasil Uji SEM-EDS Terhadap Kandungan Unsur Pada Adsorben

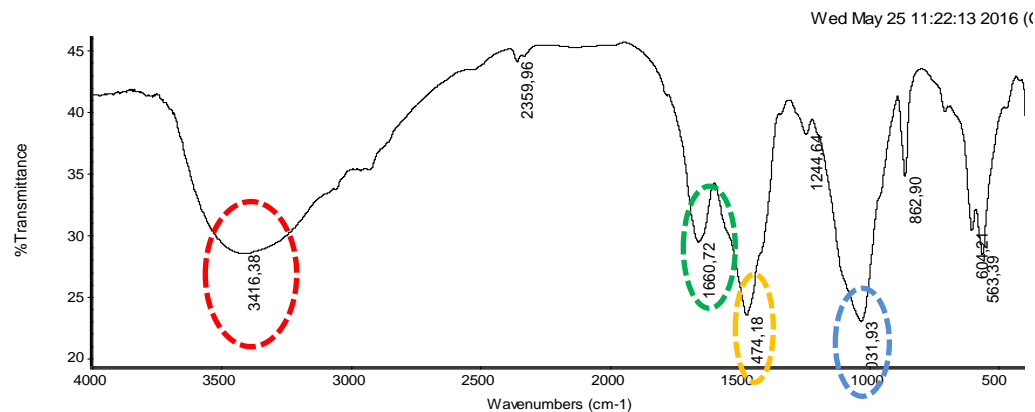
Adsorben	Nomor Atom	Simbol	Nama Unsur	Konsentrasi (%)
Tulang Sapi Murni	8	O	Oxygen	79
	20	Ca	Calcium	13.3
	15	P	Phosphorus	7.7
Tulang Sapi Teraktivasi HNO ₃ 1 M	8	O	Oxygen	75.1
	20	Ca	Calcium	10.1
	15	P	Phosphorus	8.1
	7	N	Nitrogen	6.7

Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa unsur-unsur yang terkandung dalam tulang sapi meliputi unsur oksigen, kalsium, dan fosfor yang sangat berperan dalam proses adsorpsi. Proses aktivasi menggunakan HNO₃ 1 M telah menurunkan kadar oksigen sebanyak 3,9% dan kalsium sebanyak 3,2% hal ini dapat berdampak pada efisiensi penyerapan terhadap logam yang akan diuji.

4.2.2 Identifikasi Gugus Fungsi

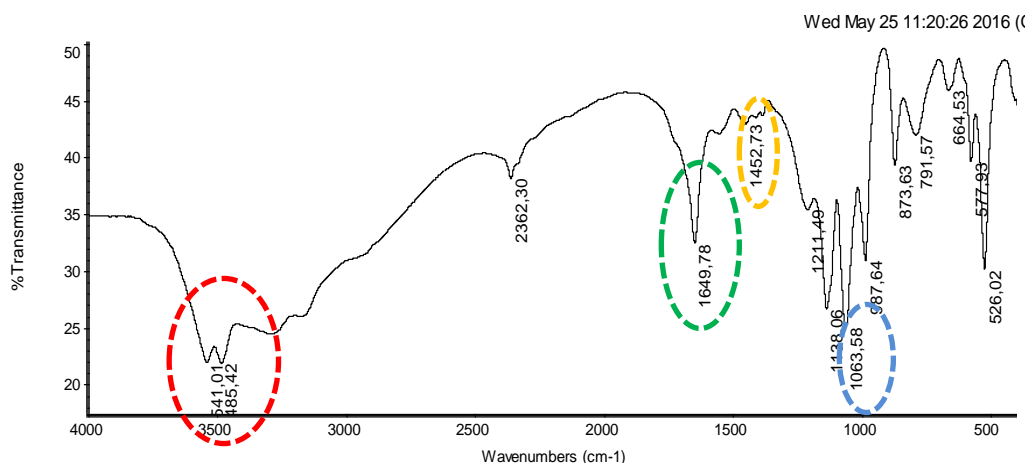
Pada penelitian ini, karakterisasi adsorben tulang sapi dilakukan dengan teknik spektroskopi infra merah atau biasa disebut *Fourier Transform Infrared* (FTIR) yang bertujuan untuk mengetahui gugus fungsional senyawa yang terkandung dalam adsorben tulang sapi, sehingga dapat diketahui perbedaan bentuk adsorben teraktivasi dan adsorben tanpa aktivasi.

Hasil pembacaan FTIR adsorben tulang sapi tanpa aktivasi dan adsorben tulang sapi teraktivasi HNO₃ 1 M dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 pada halaman selanjutnya.



Collection time: Wed May 25 08:58:48 2016 (GMT+07:00)
 Wed May 25 11:22:12 2016 (GMT+07:00)
 FIND PEAKS:
 Spectrum: *0276-3 Non Act
 Region: 4000,00 400,00

Gambar 4.2. Spektra IR Tulang Sapi Tanpa Aktivasi



Collection time: Wed May 25 08:48:27 2016 (GMT+07:00)
 Wed May 25 11:20:24 2016 (GMT+07:00)
 FIND PEAKS:
 Spectrum: *0276-1 Act-HNO3
 Region: 4000,00 400,00

Gambar 4.3. Spektra IR Tulang Sapi Teraktivasi HNO₃ 1 M

Berdasarkan data FTIR pada tulang sapi sebelum diaktivasi menunjukkan adanya pita serapan pada bilangan gelombang 3416,38 cm⁻¹ yang dikategorikan dalam gugus -OH yang kuat, dan gugus keton C=O dan amina (-NH₂) pada 1660,72 cm⁻¹, yang berfungsi sebagai pengikat logam, serta CH₂ alifatik dengan intensitas tajam pada 1474,18 cm⁻¹. Terlihat pula adanya gugus P-O-C yang pada bilangan gelombang 1031,93 cm⁻¹.

Dari hasil FTIR terlihat adanya perbedaan gugus fungsi antara adsorben sebelum aktivasi dan yang telah teraktivasi HNO₃, yaitu adanya pemecahan gugus

-OH. Selain itu, adanya perubahan dan adanya pengurangan gugus NH_2 setelah diaktivasi, serta peningkatan vibrasi P-O-C pada $1063,58 \text{ cm}^{-1}$. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa proses aktivasi menggunakan HNO_3 1 M tidak meningkatkan gugus-gugus fungsional yang ada pada tulang sapi yang sangat berperan dalam mengikat ion logam Cu (II).

4.3.2 Pengujian Daya Serap Adsorben

4.3.1 Pengaruh Variasi Massa Adsorben

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kadar ion logam Cu (II) yang mampu diserap adsorben tulang sapi. Pengujian ini dilakukan pada kondisi Equilibrium, yaitu kondisi optimum di mana logam dapat tereduksi dengan sangat optimum berdasarkan sifat dari logam tersebut. Masing-masing logam memiliki kondisi Equilibrium yang berbeda tergantung dari sifat logam itu sendiri, apakah logam tersebut bermuatan negatif atau positif. Pada penelitian ini dilakukan terhadap larutan CuSO_4 dengan pH 6.

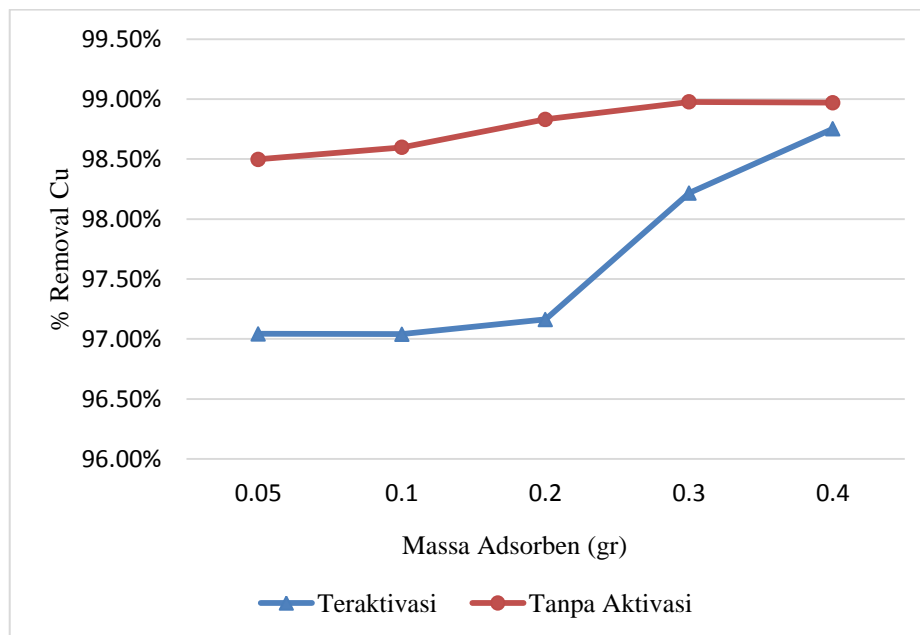
Berikut ini merupakan hasil uji daya serap adsorben tulang sapi terhadap ion logam Cu (II) dengan variasi massa adsorben yang disajikan pada Tabel 4.2 :

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Pengaruh Variasi Massa Adsorben Pada Adsorpsi Ion Logam Cu (II)

Tulang Sapi Teraktivasi HNO ₃				
No.	Massa (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	% Removal
1	0,05	48,25	1,43	97,04%
2	0,1	48,25	1,43	97,04%
3	0,2	48,25	1,37	97,16%
4	0,3	48,25	0,86	98,22%
5	0,4	48,25	0,60	98,75%
6	Kontrol	48,25	40,35	16,37%
7	Inlet	48,25	48,25	-
Tulang Sapi Tanpa Aktivasi HNO ₃				
No.	Massa (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	% Removal
1	0,05	48,25	0,73	98,50%
2	0,1	48,25	0,68	98,60%
3	0,2	48,25	0,56	98,83%
4	0,3	48,25	0,49	98,98%
5	0,4	48,25	0,49	98,97%
6	Inlet	48,25	48,25	-

Dari tabel data tersebut terlihat bahwa hasil kemampuan penyerapan adsorben terhadap ion logam Cu (II) semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah adsorben. Hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah adsorben maka ketersediaan pori semakin meningkat, hal ini memungkinkan terjadinya adsorpsi di banyak permukaan adsorben. Dari tabel tersebut juga diketahui bahwa nilai (%) *removal* adsorben tanpa aktivasi lebih besar dibandingkan dengan adsorben tulang sapi teraktivasi HNO₃ namun tidak terlalu jauh perbedaannya, yaitu masih dalam *range* yang sama yaitu diatas 90%. Hal ini didukung dengan adanya hasil SEM-EDS yang memperlihatkan hasil bahwa konsentrasi unsur Ca dan O setelah proses aktivasi mengalami penurunan, serta gugus fungsi -OH yang juga terpecah seperti yang tertera pada hasil pembacaan pada FTIR, unsur dan gugus tersebutlah yang berperan penting dalam proses penyerapan ion logam Cu (II). Dari data tersebut juga terlihat sampel sebagai kontrol memiliki ion logam Cu (II) yang tereduksi sebanyak 16,37% saja,

sehingga hal ini tidak terlalu berpengaruh terhadap penyerapan oleh adsorben, karena proses pengendapan yang terjadi secara kimiawi pada kondisi Equilibrium nilainya kecil. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada grafik berikut ini yang memperlihatkan perbedaan persentase penyerapan ion logam Cu (II) oleh adsorben tanpa aktivasi dibandingkan dengan adsorben teraktivasi HNO₃.



Gambar 4.4. Hubungan perbandingan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) terhadap pengaruh variasi massa adsorben

Dari keseluruhan data pada pengujian kemampuan adsorpsi terhadap ion logam Cu (II) dapat diambil kesimpulan bahwa kemampuan adsorpsi tulang sapi tanpa aktivasi sudah sangat baik, pada data juga terlihat bahwa dengan massa adsorben sebanyak 0.05 gram saja sudah dapat mereduksi ion logam Cu (II) sebesar 98,50%.

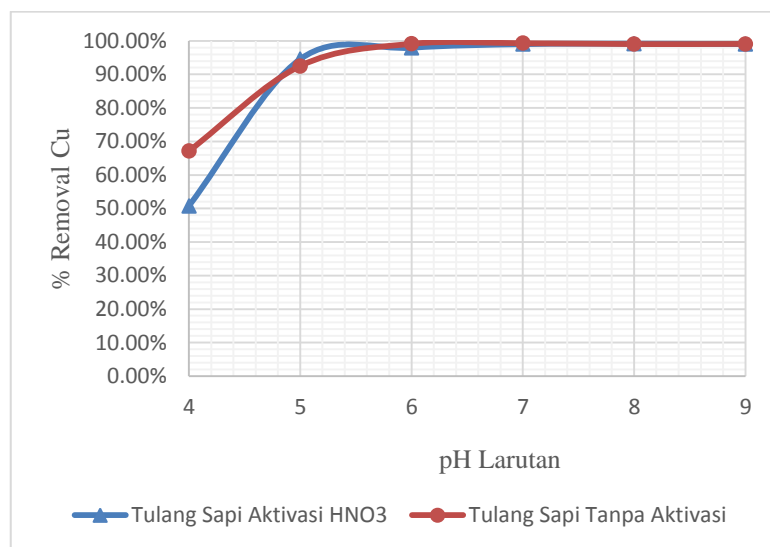
4.3.2 Pengaruh Variasi pH Larutan

Pengujian dilakukan dengan penambahan 0,05 gram adsorben sebagai massa optimum adsorben tulang sapi teraktivasi dan tanpa aktivasi. Berikut ini merupakan hasil pembacaan konsentrasi ion Cu (II) yang tersisa menggunakan AAS:

Tabel 4.3. Hasil Uji Pengaruh pH Larutan Pada Adsorpsi Ion Logam Cu (II)

Tulang Sapi Teraktivasi HNO₃										
No	Massa (gr)	pH Rencana	pH Awal	pH 30 menit	pH 60 menit	pH 90 menit	pH 120 menit	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	% Removal
1	0,05	4	4,08	4,09	4,02	4,00	4,80	40,475	19,925	50,77%
2	0,05	5	5,01	5,02	5,09	5,02	5,68	40,475	2,209	94,54%
3	0,05	6	6,00	6,03	6,01	6,06	6,25	40,475	0,830	97,95%
4	0,05	7	7,00	7,05	7,01	7,00	7,00	40,475	0,399	99,01%
5	0,05	8	8,07	8,01	8,00	8,02	7,82	40,475	0,337	99,17%
6	0,05	9	9,04	9,00	9,06	9,05	8,56	40,475	0,397	99,02%
Inlet								40,475	40,475	
Tulang Sapi Tanpa Aktivasi										
1	0,05	4	3,9	4,07	4,03	4,00	4,81	40,475	13,30	67,14%
2	0,05	5	5,05	5,03	5,01	5,05	5,36	40,475	3,031	92,51%
3	0,05	6	6,07	6,00	6,03	6,00	6,06	40,475	0,354	99,13%
4	0,05	7	7,00	7,00	7,10	7,06	7,15	40,475	0,282	99,30%
5	0,05	8	8,11	8,00	8,02	8,08	7,65	40,475	0,391	99,03%
6	0,05	9	8,97	9,10	9,06	9,06	8,45	40,475	0,366	99,10%

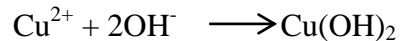
Hubungan perbandingan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) oleh adsorben tulang sapi yang dipengaruhi oleh variasi pH larutan juga ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Hubungan perbandingan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) terhadap pengaruh variasi pH larutan

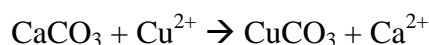
Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi pH larutan maka semakin besar nilai persen (%) *removal*nya terhadap ion logam Cu (II). Pada pH 4 nilai penyerapan ion logam Cu (II) rendah, hal ini dikarenakan pada pH rendah (asam) permukaan adsorben dikelilingi oleh ion H^+ karena adanya persaingan penyerapan muatan ion dengan Cu^{2+} untuk berikatan dengan gugus -OH. Dikarenakan muatan H^+ yang berlebih maka menggantikan Cu^{2+} untuk berikatan dengan gugus -OH, atau dapat dikatakan terjadinya tolak menolak muatan antara permukaan adsorben dan diketahui bahwa ion logam Cu (II) bermuatan positif sehingga kemampuan penyerapannya pun menjadi rendah. Pada pH larutan 6 dan 7 penyerapan ion logam Cu (II) semakin meningkat dan mencapai kondisi optimum pada pH 7 untuk adsorben tanpa aktivasi, hal ini berarti kondisi Equilibrium untuk tembaga terjadi pada pH 7. Selain itu, pada pH larutan 8 dan 9 terus terjadi peningkatan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) karena pada kondisi basa ion-ion logam membentuk endapan hidroksida sehingga

efisiensi penyerapannya sukar ditentukan. Pada kondisi ini reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Proses penendapan Cu^{2+} akibat penambahan NaOH sehingga mencapai kondisi basa ditandai dengan adanya endapan tembaga (II) hidroksida berwarna keruh cenderung biru jika konsentrasinya tinggi (Vogel, 1985). Semakin basa maka semakin pekat warna biru larutan yang ditimbulkan. Selain itu dari grafik terlihat nilai (%) *removal* ion logam Cu oleh adsorben tulang sapi tanpa aktivasi hampir sama dengan adsorben tulang sapi teraktivasi HNO_3 , hal ini membuktikan bahwa proses aktivasi tidak meningkatkan kemampuan penyerapan.

Jika dilihat dari hasil karakterisasi adsorben menggunakan FTIR dapat diketahui bahwa setelah proses aktivasi gugus fungsi yang berperan dalam proses adsorpsi ion logam Cu (II) mengalami pergeseran atau dapat dikatakan berkurang, sehingga mengakibatkan banyak pori yang terbuka namun berkurangnya senyawa pengikat logam. Selain itu diduga terjadi reaksi kimia karena adanya pertukaran dengan ion Ca^{2+} , karena jari-jari ion Cu^{2+} tidak berbeda jauh dengan jari-jari ion Ca^{2+} , maka Cu^{2+} dapat menggantikan ion Ca^{2+} yang ada di kisi kristal senyawa CaCO_3 yang terkandung pada serbuk tulang sapi murni tersebut, dengan reaksi sebagai berikut :



Hal ini sesuai dengan hasil dari SEM EDS yang menunjukkan hasil analisa bahwa kandungan kalsium pada adsorben tulang sapi murni lebih banyak dibandingkan dengan adsorben tulang sapi teraktivasi.

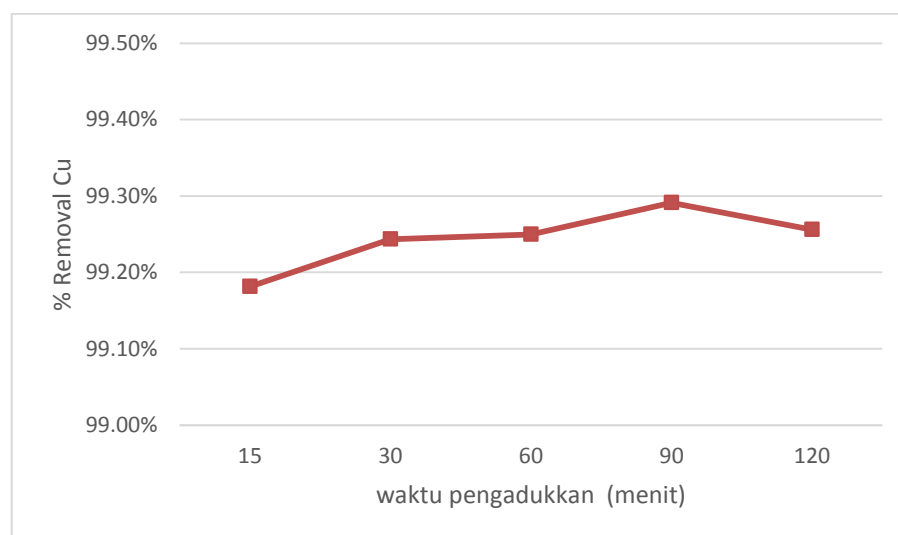
4.3.3 Pengaruh Variasi Waktu Pengadukkan

Setelah dilakukan pengujian terhadap pengaruh massa adsorben dan pH larutan, diketahui bahwa kemampuan penyerapan adsorben tulang sapi tanpa aktivasi hampir sama dengan adsorben teraktivasi HNO_3 , dan kondisi Equilibrium terjadi pada pH 7 dengan massa adsorben 50 mg. Sehingga untuk pengujian selanjutnya yaitu pengujian terhadap pengaruh variasi waktu pengadukkan digunakan adsorben tulang sapi tanpa aktivasi, dengan tujuan untuk mengetahui

waktu optimum reaksi adsorpsi ion logam Cu (II) terbanyak dengan variasi waktu pengadukkan 15, 30, 60, 90 dan 120 menit menggunakan *magnetic stirer* dengan kecepatan 150 rpm. Dari percobaan diperoleh hasil berupa data besarnya nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) yang dipengaruhi lamanya waktu pengadukkan yang tertera pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Pengaruh Variasi Waktu Pengadukkan Pada Adsorpsi Ion Logam Cu (II)

Tulang Sapi Tanpa Aktivasi HNO ₃							
No.	Massa (gr)	Waktu (menit)	pH Awal	pH Akhir	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Akhir (ppm)	% Removal
1	0.05	15	7.00	7.01	48.25	0.395	99.18%
2	0.05	30	7.00	7.10	48.25	0.365	99.24%
3	0.0501	60	7.00	7.00	48.25	0.362	99.25%
4	0.0502	90	7.01	7.06	48.25	0.342	99.29%
5	0.0509	120	7.00	7.03	48.25	0.359	99.26%
6	Kontrol	-	7.02	7.04	48.25	40.950	15.13%
7	Inlet	-	-	-	48.25	48.250	-



Gambar 4.6. Hubungan perbandingan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) terhadap pengaruh variasi waktu pengadukkan

Data tersebut menunjukkan semakin lama kontak antara adsorben dan ion logam yang akan diserapnya maka semakin besar pula nilai (%) *removal*nya dan akan turun kembali setelah terjadi kondisi maksimum penyerapannya. Pada waktu

pengadukkan 90 menit terjadi kondisi optimum dengan nilai (%) *removal* sebesar 99,26%. Dari grafik dapat diambil kesimpulan bahwa pada waktu pengadukkan 90 menit permukaan adsorben tulang sapi sudah dipenuhi permukaan adsorben telah terpenuhi oleh ion logam Cu (II) yang diserapnya, sehingga jika dilakukan pengadukkan lebih lama lagi kemampuan penyerapannya akan menurun.

4.3.4 Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan

Pada tahap ini dilakukan pengujian dengan variasi konsentrasi larutan CuSO₄ yang bertujuan untuk mengetahui efisiensi kemampuan penyerapan oleh adsorben tulang sapi tanpa aktivasi. Hal ini dilakukan dengan massa adsorben sebanyak 50 mg, pH larutan 7, waktu pengadukan 120 menit untuk mengkaji apakah kemampuan adsorpsinya masih meningkat yang ditandai dengan adanya nilai *Q_e* yaitu jumlah Cu (II) yang terserap per massa padatan pada kesetimbangan, dengan kecepatan putaran 150 rpm, serta variasi konsentrasi larutan 50, 75, 100, 150, 250, dan 300 ppm. Hasilnya dibandingkan dengan konsentrasi awal larutan sebelum dilakukan pengadukan dengan adsorben tulang sapi, sehingga diketahui sejauh mana kemampuan penyerapan terhadap ion logam Cu (II).

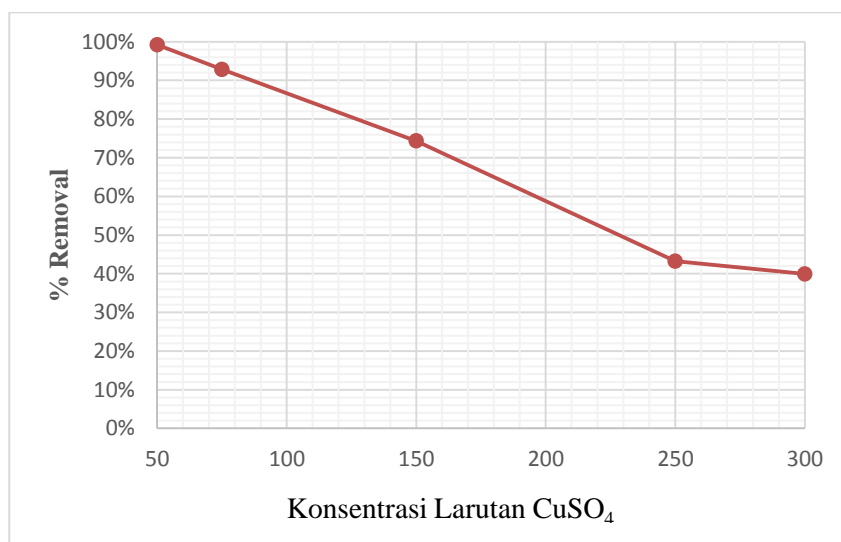
Berikut ini hasil yang diperoleh setelah dilakukan pembacaan konsentrasi akhir dengan AAS.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan Terhadap Adsorpsi Ion Logam Cu (II)

Konsentrasi Cu Rencana (ppm)	Inlet (ppm)	Massa Biosorban (gr)	pH Awal	pH Akhir	Konsentrasi Akhir (ppm)	% Removal
50	48.25	0.05	7.00	7.03	0.4	99%
75	76.90	0.05	7.05	7.08	5.5	93%
150	146.70	0.05	7.00	7.00	37.7	74%
250	263.50	0.05	7.00	7.01	149.6	43%
300	304.70	0.05	7.03	7.03	183.1	40%

Dari tabel terlihat adanya penurunan nilai (%) *removal* seiring dengan semakin meningkatnya konsentrasi larutan, pada larutan dengan konsentrasi 50 ppm terjadi

reduksi ion logam Cu (II) sebesar 99%, sedangkan pada larutan CuSO₄ dengan konsentrasi 300 ppm hanya dapat mereduksi ion logam Cu (II) sebesar 40% saja. Perbandingan nilai (%) removal ion logam Cu (II) oleh adsorben tulang sapi juga dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut :



Gambar 4.7. Hubungan perbandingan nilai (%) *removal* ion logam Cu (II) terhadap pengaruh variasi konsentrasi larutan

Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan CuSO₄ maka semakin kecil nilai (%) removalnya, itu artinya semakin kecil kemampuan penyerapan terhadap ion logam Cu (II). Penurunan efisiensi penyerapan disebabkan oleh konsentrasi yang lebih tinggi, jumlah ion logam dalam larutan tidak sebanding dengan jumlah partikel yang tersedia dalam adsorben, sehingga permukaan adsorben tulang sapi sudah mencapai titik jenuh yang mengakibatkan terjadinya penurunan efisiensi penyerapan terhadap ion logam Cu (II).

4.4 Mekanisme Isoterm Adsorpsi Adsorben Tulang Sapi Tanpa Aktivasi

Mekanisme adsorpsi ditentukan dengan mengevaluasi keseimbangan data adsorpsi yang diperoleh dari percobaan. Kesetimbangan jumlah logam yang diserap dapat ditunjukkan melalui isotherm adsorpsi. Karena adsorpsi ion atau molekul pada permukaan padatan umumnya terbatas pada lapisan satu molekul

(*monolayer*) maka adsorpsi tersebut mengikuti persamaan adsorpsi Freundlich dan atau Langmuir (Handayani, 2009).

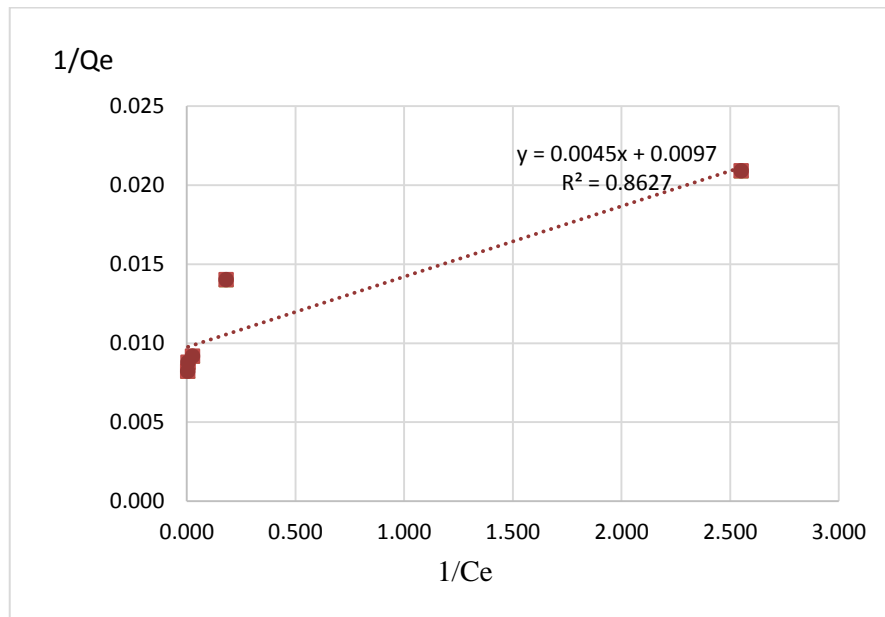
4.4.1 Isoterm Langmuir

Pada model isotherm Langmuir, kapasitas adsorpsi maksimum terjadi akibat adanya lapisan tunggal (*monolayer*) adsorbat di permukaan adsorben. Pada model isotherm ini dilakukan plot $1/C_e$ vs $1/Q_e$ pada grafik. C_e merupakan konsentrasi Equilibrium dan q_e merupakan nilai adsorpsi logam pada saat Equilibrium. Dari hasil pengujian pengaruh konsentrasi larutan dapat dihitung kemampuan penyerapan maksimum tulang sapi terhadap ion logam Cu (II) seperti yang ada pada tabel berikut ini :

Tabel 4.6. Perhitungan Nilai Adsorpsi Oleh Adsorben Tulang Sapi Murni dengan Model Langmuir

Konsentrasi Cu (ppm)	Massa Adsorben (gram)	Vol. Larutan (ml)	Konsentrasi		Cr (mg/L)	Removal (%)	Langmuir		
			Cin (mg/L)	Ce (mg/L)			Qe (mg/g)	1/Qe	1/Ce
50	0.05	50	48.25	0.392	47.86	99.19	47.858	0.021	2.551
75	0.05	50	76.9	5.525	71.38	92.82	71.375	0.014	0.181
150	0.05	50	146.7	37.65	109.05	74.34	109.050	0.009	0.027
250	0.05	50	263.5	149.6	113.90	43.23	113.900	0.009	0.007
300	0.05	50	304.7	183.1	121.60	39.91	121.600	0.008	0.005

Dari hasil perhitungan terhadap nilai Q_e dan C_e (Lampiran II, 9.1) selanjutnya dibuat plot $1/C_e$ vs $1/Q_e$ yang disajikan pada Gambar 4.8 berikut ini.



Gambar 4.8. Kurva Kalibrasi Isoterm Langmuir

Pada grafik tersebut diperoleh persamaan $y = 0,0045x + 0,0097$ dan nilai $R^2 = 0,8627$ yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung nilai Q_m , yaitu kapasitas adsorben dalam mengadsorpsi ion logam Cu (II). Nilai Q_m yang diperoleh dihitung dengan cara berikut ini :

$$\begin{aligned}
 Q_m &= 1/a \\
 &= 1/0,0097 \\
 &= 102,64 \text{ mg/g}
 \end{aligned}$$

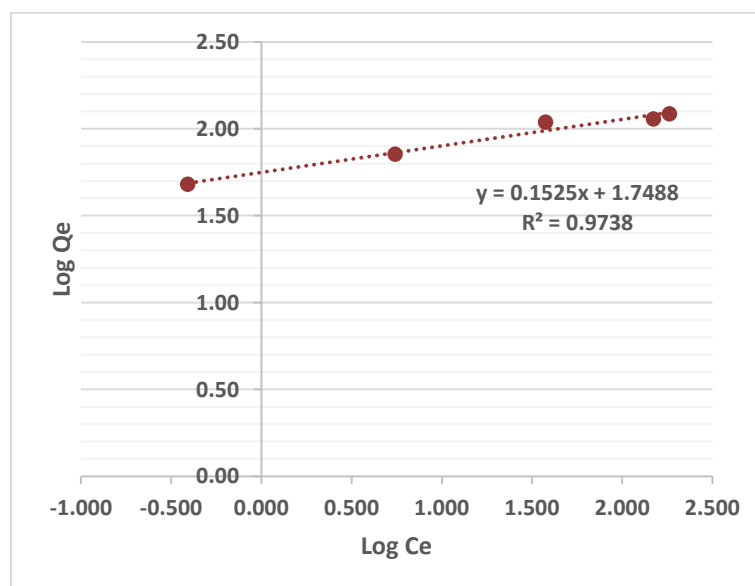
4.4.2 Isoterm Freundlich

Model isotherm ini mendefinisikan bahwa ada lebih dari satu lapisan (*multilayer*). Hasil perhitungan nilai adsorpsi oleh adsorben tulang sapi terdapat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Perhitungan Nilai Adsorpsi Oleh Adsorben Tulang Sapi Murni dengan Model Freundlich

Konsentrasi Cu (ppm)	Massa Adsorben (gram)	Vol. Larutan (ml)	Konsentrasi		Cr (mg/L)	Removal (%)	Freundlich		
			Cin (mg/L)	Ce (mg/L)			Qe	Log Qe	Log Ce
50	0.05	50	48.25	0.392	47.86	99.19	47.858	1.68	-0.407
75	0.05	50	76.9	5.525	71.38	92.82	71.375	1.85	0.742
150	0.05	50	146.7	37.65	109.05	74.34	109.05	2.04	1.576
250	0.05	50	263.5	149.6	113.90	43.23	113.9	2.06	2.175
300	0.05	50	304.7	183.1	121.60	39.91	121.6	2.08	2.263

Dari perhitungan tersebut diperoleh hasil plot pada grafik berikut ini :



Gambar 4.9. Kurva Kalibrasi Isoterm Freundlich

Kemampuan maksimum adsorpsi dari hasil penelitian adsorben *powder* tulang sapi murni dapat diketahui dari mekanisme pemodelan pada isoterm Langmuir dan Freundlich. Pada model kesetimbangan Langmuir diperoleh nilai $R^2 = 0,8627$ dan dari hasil perhitungan (Lampiran II, 9.1) diperoleh persamaan $y = 0,0045x + 0,0097$ seperti pada Gambar 4.8 dan diperoleh hasil kapasitas penyerapan maksimum (Q_m) adsorben tulang sapi terhadap logam Cu (II) yaitu sebesar 102,64 mg/g. Selain itu diperoleh nilai konstanta kesetimbangan sebesar 1,0041, nilai konstanta ini menunjukkan afinitas antara adsorben dengan logam yang akan diserapnya. Semakin besar nilai konstanta, maka semakin besar pula afinitas adsorben terhadap logam berat yang diserap. Sedangkan pada model

kesetimbangan Freundlich diperoleh nilai $R^2 = 0,9738$ dan dari hasil perhitungan (Lampiran II, 9.2) diperoleh persamaan $y = 0,1525x + 1,7488$ seperti pada Gambar 4.9. Ada pun nilai K_f dan n yang menunjukkan konstanta dengan nilai K_f sebesar 5,75 dan nilai n adalah 6,56. Penentuan model isotherm ditentukan dengan membandingkan besarnya nilai R^2 , semakin mendekati 1 maka menunjukkan data yang semakin valid, maka model kesetimbangan yang digunakan lebih cenderung cocok dengan model isotherm Freundlich. Hal ini berarti bahwa permukaan adsorben tidak homogen, yang memungkinkan terjadinya proses adsorpsi secara *multilayer* pada permukaan adsorben.