

## BIOADSORPSI Hg(II) OLEH PATI SAGU TAUT SILANG FOSFAT

[Bioadsorption of Hg(II) by Crosslinked Sago Starch Phosphate]

Jorion Romengga<sup>1)\*</sup>, Tun Tedja Irawadi<sup>2)</sup> dan Sri Sugiarti<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Pontianak

<sup>2)</sup> Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor

Diterima 15 September 2011 / Disetujui 09 Juli 2012

### ABSTRACT

Crosslinked-sago-starch-phosphate (SgP) has been successfully synthesized from native sago starch (Sg) and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-NaH}_2\text{PO}_4$  in an acidic condition. The compound was designed as bioadsorbent for removing Hg(II) inside human digestion tract as shown by *in vitro* test. The bioadsorption followed pseudo-second order of reaction kinetic and Freundlich equation as chemisorption. As a result, 21% of Hg(II) was removed at pH of 6.80 and reached the isothermal equilibrium of the bioadsorption at pH of 5.80 and 8.60 for 29.95% and 31.39%, respectively. The result showed that SgP is more feasible than activated carbon to be used as bioadsorbent in removing Hg(II) in human digestion tract as proved by *in vitro* system.

**Keywords:** bioadsorption, phosphate crosslinked, Hg(II), phosphate, sago starch

### ABSTRAK

Pati sago taut silang fosfat (SgP) telah berhasil disintesis dari pati sago natif (Sg) dan  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-NaH}_2\text{PO}_4$  dalam suasana asam. SgP tersebut didesain sebagai bioadsorben untuk menyerap Hg(II) yang terdapat dalam saluran pencernaan manusia yang dilakukan secara *in vitro*. Proses bioadsorpsi tersebut memenuhi kinetika reaksi orde kedua semu dan persamaan Freundlich sebagai kemisorpsi. Adapun hasilnya menunjukkan bahwa 21% ion Hg(II) telah dijerap pada pH 6,80 dan mencapai kesetimbangan isothermal bioadsorpsi pada pH 5,80-8,60 sebesar 29,95% dan 31,39%, secara berturut-turut. Hal ini menunjukkan bahwa SgP lebih berguna daripada karbon aktif sebagai bioadsorben umum yang digunakan untuk menyerap Hg(II) pada saluran pencernaan manusia yang dibuktikan secara *in vitro*.

**Kata kunci:** bioadsorpsi, taut silang fosfat, Hg(II), fosfat, pati sago

### PENDAHULUAN

Pada saat ini, pencemaran logam berat menjadi salah satu topik utama pencemaran lingkungan air. Hal ini disebabkan logam berat dapat terikat dengan material organik yang terlarut di dalam air sehingga terjadi proses bioakumulasi, biotransformasi, dan biomagnifikasi dalam rantai makanan di alam (Gyliene dan Visniakova, 2008; Wan *et al.*, 2010). Salah satu jenis logam berat dengan toksisitas tinggi yang sering mencemari lingkungan air adalah merkuri. Merkuri di dalam air berada dalam bentuk Hg(II). *United State Environmental Protection Agency* menetapkan ambang batas Hg(II) dalam air adalah 0,300 ppb. Hg(II) dapat terdeposit dalam tubuh manusia terutama pada bagian otak, kulit, hati, pankreas, dan miokardium. Adapun gangguan yang ditimbulkan tersebut antara lain gangguan sistem saraf pusat, pernapasan, pencernaan, dan iritasi kulit (Farooq *et al.*, 2010).

Beberapa metode untuk menghilangkan kontaminasi logam berat di dalam air telah dilakukan. Metode tersebut di antaranya adalah koagulasi, flokulasi, evaporasi, presipitasi, elektrokoagulasi, pertukaran ion, pemisahan membran, dan bioadsorpsi (Aziz *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2011; Zakhama *et al.*,

2011). Bioadsorpsi merupakan suatu metode penghilangan kontaminasi logam berat yang paling efektif dan efisien. Hal ini disebabkan bioadsorpsi menggunakan bahan material yang murah, terbiodegradasi, dan dapat digunakan berulang kali. Sekarang ini, pati termodifikasi khususnya pati taut silang fosfat merupakan biomaterial adsorben yang ekonomis, efektif, dan mudah diaplikasikan (Xing *et al.*, 2006; Ding *et al.*, 2011).

Pati taut silang fosfat merupakan salah satu biomaterial yang dapat diaplikasikan sebagai bioadsorben. Modifikasi pati tersebut memiliki syarat khusus, yaitu bahan baku pati harus memiliki kadar amilosa  $\geq 25\%$  (Blennow *et al.*, 2002). Salah satu tipe pati yang prospektif tersebut dan tersedia di Indonesia adalah pati sago (Sg) (*Metroxylon sago*). Hal ini disebabkan pati sago memiliki kadar amilosa 24-31%. Selain itu, produksi pati sago di Indonesia sekitar 210 juta ton per tahun dan hanya 5 juta ton per tahun yang digunakan sebagai bahan pangan pokok (Ahmad *et al.*, 1999; BPBPI, 2007). Hal ini menunjukkan ketersediaan Sg untuk dapat dimodifikasi menjadi pati sago taut silang fosfat (SgP) sebagai bioadsorben.

Pati sago taut silang fosfat berpotensi sebagai bioadsorben Hg(II). Hal ini didasarkan adanya efek ligan, muatan parsial negatif, bilangan koordinasi, dan geometri gugus fosfat taut silang pada SgP (Chen *et al.*, 2011). Selain itu, resistansi SgP terhadap gangguan fisik, kimia, dan biologis menjadikan SgP

\*Korespondensi Penulis:  
E-mail: rion\_220687@yahoo.co.id; Hp: +6285252069729; +628989567876

dapat diaplikasikan sebagai bioadsorben Hg(II) dalam sistem pencernaan manusia. Hingga saat ini, belum ada kajian tentang aplikasi SgP sebagai bioadsorben Hg(II) yang terpapar dalam tubuh manusia. Hal ini disebabkan SgP baru marak disintesis dan diaplikasikan sebagai pati termodifikasi yang terbatas hanya sebagai agen pengental dan pelepasan obat (BeMiller dan Whistler, 2009; Li *et al.*, 2009; Manoi dan Rizvi, 2010).

Tujuan penelitian ini adalah menentukan kapasitas maksimum adsorpsi Hg(II) oleh SgP sebagai bioadsorben dalam sistem pencernaan manusia secara *in vitro*. Hipotesis yang mendasari penelitian ini, ialah (1) Sg memiliki gugus hidroksil bebas pada atom C<sub>3</sub> dan C<sub>6</sub> unit anhidroglukosa yang dapat dimodifikasi oleh gugus fosfat anorganik secara esterifikasi membentuk SgP; (2) SgP berpotensi sebagai bioadsorben Hg(II) karena adanya gugus taut silang fosfat yang stabil. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi ilmiah mengenai potensi SgP sebagai bioadsorben Hg(II) dalam sistem pencernaan manusia.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan

Sampel Sg (amilosa ~26%, kelengasan 10%, dan diameter molekul ~10 µm) dibeli dari pasar tradisional Laladon, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Reagen Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O p.a, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O p.a, dan Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O p.a, diperoleh dari Merck (Darmstadt, Jerman). Enzyplex (α-amilase) diproduksi oleh PT Medifarma Laboratories (Westmont Pharmaceuticals Ltd, USA).

### Sintesis SgP

Sintesis SgP pada penelitian ini mengacu pada metode yang dilakukan oleh Romengga *et al.* (2011). Pati sagu (Sg) disuspensikan menjadi 35% dalam larutan 0,1 M Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> dan larutan 0,1 M NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (3:2) (pH awal 6,89 diukur dengan pH-meter (TOA HM-20S), serta diatur pH-nya hingga 6,50 dengan penambahan beberapa tetes 0,01 M HCl dan 0,01 M NaOH. Suspensi tersebut dipanaskan pada suhu 40°C dan diaduk dengan kecepatan 300 rpm selama 20 menit. Selanjutnya, endapan yang terbentuk dipisahkan dari filtrat dengan disaring menggunakan kertas saring Whatmann 40. Endapan tersebut dikeringkan di dalam oven (80±5°C) selama 24 jam, dan diayak dengan ayakan 10 µm. Butiran SgP yang diperoleh selanjutnya disimpan dalam wadah kedap udara sebelum digunakan lebih lanjut selama penelitian berlangsung.

### Analisis spektrofotometri TFIM

Perbedaan gugus fungsi Sg dan SgP dianalisis secara spektrofotometri inframerah dengan spektrofotometer Transformasi Fourier Inframerah (TFIM) (Vector-33). Sebanyak 1% sampel dalam pelet KBr diuji dengan spektrofotometer TFIM pada panjang gelombang 4000-400 nm.

### Analisis viskosa

Pada penelitian ini, analisis viskosa Sg dan SgP berdasarkan pada metode Karim *et al.* (2008) menggunakan penganalisis viskosa cepat (Tecmaster, Australia).

### Penentuan nilai derajat substitusi fosfat (DSp) (Igura dan Okazaki, 2010)

Nilai DSp dihitung berdasarkan nisbah *Absorbans* relatif C-O-P yang didapat pada spektrum TFIM SgP berdasarkan persamaan 1.

$$DSp = A_{1200} \text{ cm}^{-1} / A_{990} \text{ cm}^{-1} \dots\dots\dots 1$$

### Penentuan adsorpsi Hg(II) oleh SgP

Sebanyak 0,100 g SgP ditambahkan ke dalam 50 mL larutan Hg(II) dengan konsentrasi awal 100 ppm. Adapun pH larutan awal dan akhir dijaga konstan pada pH ~3,00 dengan laju pengadukan 150 rpm pada suhu 30°C selama 1 jam. Selanjutnya, campuran tersebut disaring dan konsentrasi larutan Hg(II) akhir dihitung secara kolorimetrik dengan spektrofotometer UV/Vis pada λ<sub>maks</sub> = 575 nm dengan penambahan larutan I<sub>2</sub> 2% sebagai senyawa pengompleks (Amitava, 2010). Kapasitas adsorpsi Hg(II), yaitu (Q) (mg/g) dihitung berdasarkan persamaan 2.

$$Q = (C_i - C_f) \cdot V / W \dots\dots\dots 2$$

Dengan C<sub>i</sub> (mg/mL) dan C<sub>f</sub> (mg/mL) menyatakan konsentrasi awal dan akhir larutan Hg(II), secara berturut-turut; V menyatakan volume larutan (mL); dan W menyatakan massa SgP yang digunakan (g).

### Studi kinetika adsorpsi Hg(II) oleh SgP

Sebanyak 0,100 g SgP ditambahkan ke dalam 50 mL larutan Hg(II) 100 ppm. Parameter kinetika seperti pH awal diatur pada ~3,00 dan ragam waktu adsorpsi 0 sampai 60 menit. Pada akhir waktu tersebut, campuran disaring dan dipisahkan filtratnya. Kapasitas adsorpsi Hg(II) akhir dalam filtrat tersebut dihitung berdasarkan persamaan 2. Pada studi ini, persamaan kinetika adsorpsi orde pertama semu dan kedua semu digunakan. Penggunaan kedua persamaan tersebut dilakukan untuk mengetahui adanya interaksi antarmolekul (Ding *et al.*, 2011). Kedua persamaan tersebut dinyatakan pada persamaan 3 dan 4, secara berturut-turut.

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \dots\dots\dots 3$$

$$t/Q_t = 1/(k_2 Q_e^2) + t/Q_e \dots\dots\dots 4$$

Dengan, Q<sub>e</sub> dan Q<sub>t</sub> menyatakan kapasitas adsorpsi Hg(II) (mg/g) pada saat kesetimbangan dan pada waktu tertentu, secara berturut-turut; k<sub>1</sub> (min<sup>-1</sup>) dan k<sub>2</sub> (g/mg.min) menyatakan konstanta kinetika orde pertama semu dan orde kedua semu, secara berturut-turut.

### Studi kesetimbangan adsorpsi Hg(II) oleh SgP

Sebanyak 50 mL larutan Hg(II) dengan variasi konsentrasi awal (0-250 ppm) diatur pada pH awal ~3,00 dengan laju pengadukan 150 rpm pada suhu 30°C selama 1 jam. Pada akhir waktu tersebut, campuran tersebut disaring dan diambil filtratnya. Konsentrasi Hg(II) yang diadsorpsi oleh SgP pada variasi konsentrasi larutan Hg(II) tersebut ditentukan secara kolorimetrik pada λ<sub>maks</sub> = 575 nm (spektrofotometer UV/Vis

(Spectronic 20D+) menggunakan larutan I<sub>2</sub> 2%. Kapasitas adsorpsi Hg(II) yang diadsorpsi oleh SgP dengan variasi konsentrasi larutan Hg(II) dihitung berdasarkan persamaan 1. Adapun persamaan kesetimbangan adsorpsi Hg(II) oleh SgP yang digunakan pada penelitian ini ada 3, yaitu persamaan Langmuir, Freundlich, dan Dubinin-Radushkevich. Ketiga persamaan tersebut dinyatakan pada persamaan 5, 6, dan 7, secara berturut-turut.

$$\begin{aligned} C_e/Q_e &= C_e/Q_m + 1/(Q_m K_L) \dots\dots\dots 5 \\ \log Q_e &= (1/n) \log C_e + \log K_F \dots\dots\dots 6 \\ \ln Q_e &= K \varepsilon^2 + \ln Q_{DR} \dots\dots\dots 7 \end{aligned}$$

Dengan C<sub>e</sub> merupakan konsentrasi kesetimbangan Hg(II) (mg/L); Q<sub>e</sub> merupakan kapasitas adsorpsi Hg(II) pada saat kesetimbangan (mg/g); Q<sub>m</sub> (mg/g), K<sub>F</sub> (L/g), dan Q<sub>DR</sub> (mg/g) merupakan kapasitas adsorpsi Hg(II) maksimum pada persamaan Langmuir, Freundlich, dan Dubinin-Radushkevich, secara berturut-turut. Nilai K<sub>L</sub> (L/mg), ε (kJ/mol), dan K (mol<sup>2</sup>/kJ<sup>2</sup>) merupakan konstanta Langmuir, potensial Polanyi (jumlah energi ikatan adsorpsi), dan Dubinin-Radushkevich, secara berturut-turut. Nilai n (tanpa satuan) merupakan intensitas adsorpsi. Berdasarkan nilai K tersebut, maka nilai energi aktivasi biadsorpsi Hg(II) oleh SgP dapat dihitung berdasarkan persamaan 8 (Itodo dan Itodo, 2010; Chen et al., 2011).

$$E_a = 2 \sqrt{\frac{1}{2k}} \dots\dots\dots 8$$

**Uji resistansi**

Sebanyak 0,100-0,600 g Sg dan SgP diuji nilai resistansinya pada ragam pH 1,50; 6,80, 5,80; dan 8,60 selama 3 jam, 2 jam, 2 jam, dan 1 jam, pada suhu konstan 37°C secara berturut-turut. Massa resistansi SgP yang didapat selanjutnya diaplikasikan sebagai bioadsorben Hg(II) secara *in vitro* sistem pencernaan manusia.

**Bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP secara *in vitro* sistem pencernaan manusia**

Sejumlah SgP yang telah dihitung massa resistansinya disuspensikan ke dalam 50 mL larutan Hg(II) (100 ppm) yang dijaga konstan pada pH 1,50 selama 3 jam; 6,80 selama 2 jam (dengan penambahan 500 IU α-amilase); 5,80 selama 2 jam; dan 8,60 selama 1 jam, secara berturut-turut. Suspensi tersebut diaduk dengan laju 300 rpm pada suhu 38°C. Selanjutnya, suspensi tersebut disaring untuk memisahkan filtrat dan residunya. Residu yang didapat dikeringanginkan dan dilarutkan ke dalam larutan HNO<sub>3</sub> (0,1 M; 25 mL) pada suhu ruang selama 1 jam. Konsentrasi Hg(II) teradsorpsi dalam SgP tersebut setara dengan konsentrasi Hg(II) yang terdesorpsi ke dalam larutan 0,1 M HNO<sub>3</sub> dan dihitung secara kolorimetrik dengan spektrofotometer UV/Vis pada λ<sub>maks</sub> = 575 nm.

**Analisis data**

Semua data yang didapat dalam penelitian ini dilakukan pengulangan sebanyak enam kali dan dianalisis secara statistik menggunakan Microsoft Excel 2007.

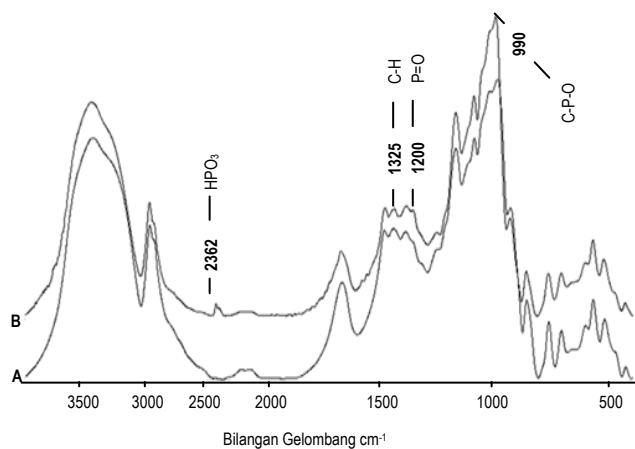
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Spektrum TFIM dari SgP**

Pada penelitian ini, spektrum TFIM dari Sg dan SgP menunjukkan pola serapan yang berbeda (Gambar 1). Pada Gambar 1B, terdapat 1 puncak serapan baru, yaitu 2362 cm<sup>-1</sup> (diester fosfat). Pada sisi lain, kedua spektrum TFIM 1200 cm<sup>-1</sup> (ayunan P=O), dan 990 cm<sup>-1</sup> (regangan C-O-P) (Silverstein et al., 2005; Wanrosli et al., 2011). Berdasarkan nisbah Absorbans relatif, nilai DSp SgP sebesar 0,355 (Tabel 1). Terjadinya substitusi dan pembentukan taut silang tersebut juga dapat dibuktikan dengan adanya perbedaan viskositas puncak antara Sg dan SgP (Gambar 2). Tingginya selisih antara viskositas puncak SgP dan Sg menunjukkan bahwa adanya substitusi gugus fosfat yang tinggi dan membentuk taut silang pada SgP sebagai suatu pati resistan (Karim et al., 2008; BeMiller dan Whistler, 2009). Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi substitusi dan pembentukan taut silang fosfat pada SgP, baik berdasarkan spektrum FTIR maupun analisis viskositas cepat.

Tabel 1. Absorbans relatif ikatan C-O-P pada SgP

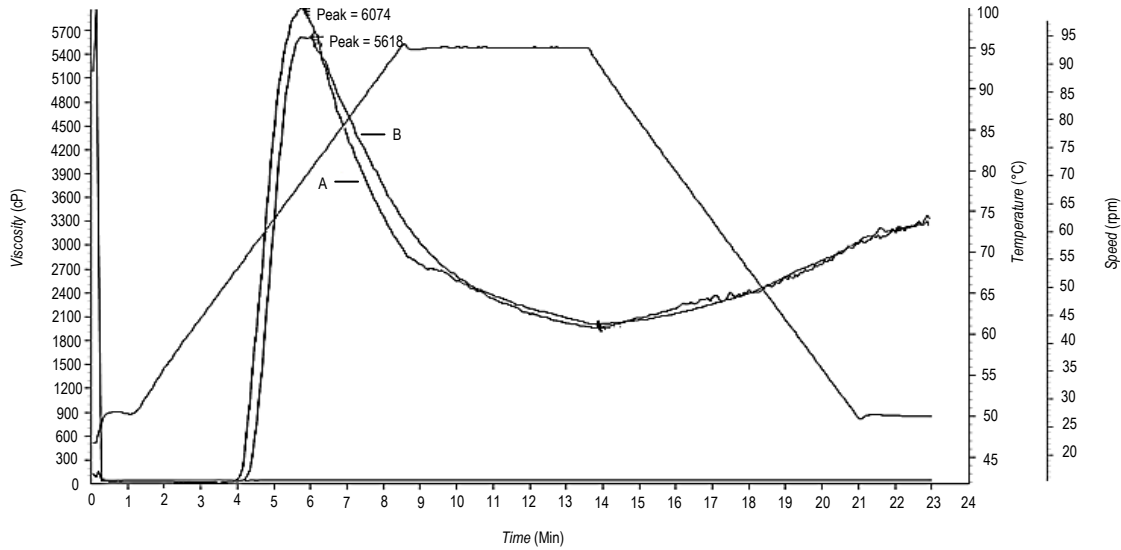
Sampel	Absorbans Relatif	
	1200 cm <sup>-1</sup> /1325 cm <sup>-1</sup>	990 cm <sup>-1</sup> /1325 cm <sup>-1</sup>
Sg	1,04	0,05
SgP	1,19	3,35



Gambar 1. Spektrum TFIM: A. Sg; B. SgP

**Kinetika adsorpsi Hg(II)**

Pada penelitian ini, kinetika adsorpsi Hg(II) mengikuti kinetika adsorpsi orde kedua semu (Tabel 2). Hal ini menunjukkan terjadinya kemisorpsi yang melibatkan daya tarik valensi atom logam dan gugus fungsi fosfat melalui pengelatan dan pengompleksan antara SgP dan Hg(II) (Gupta et al., 2010; Chen et al., 2011). Hal ini disebabkan adanya sisi koordinasi multidentat pada gugus fosfat (Wan Ngah et al., 2011). Ikatan P=O, P-O, dan OH diduga mengompleks dengan ion Hg(II). Ketiga gugus tersebut mampu berinteraksi dengan Hg(II) akibat adanya efek asam basa keras lunak (Gambar 3) (Lippard dan Berg, 1994).



Gambar 2. Spektrum Analisis Viskositas Cepat: A. Sg; B. SgP

Tabel 2. Parameter kinetika bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP

Tipe Kinetika Adsorpsi	Q <sub>e</sub>	k <sub>n</sub>	R <sup>2</sup>
Orde pertama semu	53,464	-0,056	0,934
Orde kedua semu	57,803	0,002	0,992

**Kesetimbangan adsorpsi Hg(II) oleh SgP**

Pada penelitian ini, ekuilibrium bioadsorpsi Hg(II) memenuhi persamaan Freundlich (Tabel 3). Pada penelitian ini, besarnya energi ikatan adsorpsi yang didapat dari nilai ε sebesar 21,765 kJ/mol. Adapun nilai E<sub>a</sub> Hg(II) oleh SgP yang diturunkan dari persamaan Dubinin-Radushkevich sebesar 8,452 kJ/mol (Persamaan 8). Hal ini menyatakan bahwa bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP merupakan kemisorpsi melalui reaksi tukar kation (Gambar 3) (Güney *et al.*, 2007; Gupta *et al.*, 2010).

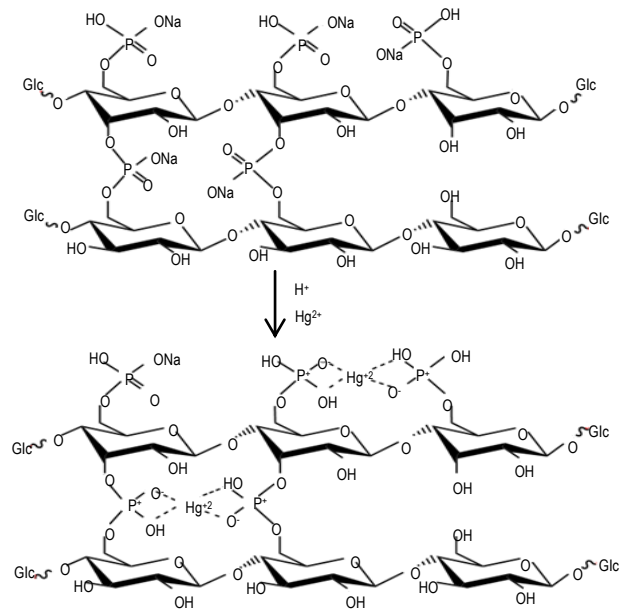
Tabel 3. Parameter isothermal Langmuir, Freundlich, dan Dubinin-Radushkevich

Tipe Adsorpsi	Parameter		
Langmuir	Q <sub>m</sub>	K <sub>L</sub>	R <sup>2</sup>
	8,333	0,12	0,833
Freundlich	K <sub>F</sub>	1/n	R <sup>2</sup>
	1,022	0,036	0,999
Dubinin-Radushkevich	ln Q <sub>DR</sub>	K	R <sup>2</sup>
	3,316	-0,007	0,985

**Uji *in vitro* bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP**

Sistem *in vitro* pencernaan manusia yang digunakan pada penelitian ini dilakukan dengan meragamkan nilai pH serupa dengan sistem pencernaan manusia (Gambar 4) (Murray *et al.*, 2003). Adapun resistansi SgP yang digunakan pada penelitian ini diuji secara *in vitro* (Tabel 4). Hal ini menunjukkan bahwa SgP memiliki resistansi tinggi terhadap perubahan ekstrem pH, suhu, pengadukan, dan aktivitas enzimatik (BeMiller dan Whistler, 2009; Haub *et al.*, 2010). Keadaan tersebut menjadikan SgP berpotensi sebagai suatu bioadsorben Hg(II). Bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP minimum pada pH 1,50 (asam lambung). Hal ini disebabkan pada pH asam terjadi kompetitif Tabel 4. Resistansi Sg dan SgP dalam sistem *in vitro* sistem pencernaan manusia (α-amilase ~500 IU ditambahkan pada saat pH ~6,80)

dengan ion H<sup>+</sup> (Igura dan Okazaki, 2010). Hal ini diduga ion H<sup>+</sup> tersebut merupakan asam keras yang lebih mudah berinteraksi dengan gugus fosfat pada SgP sebagai pasangan asam-basa keras (Lippard dan Berg, 1994).



Gambar 3. Mekanisme terusulukan terhadap bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP

Pada studi ini, kesetimbangan adsorpsi terjadi pada pH ~5,80-8,60. Hal ini diduga pada pH tersebut ion-ion Hg(II) telah jenuh terikat pada gugus HPO<sub>3</sub> pada SgP. Faktor lainnya yang dapat diduga adalah terjadinya hidrolisis sebagian rantai polimer SgP menjadi D-glukosa. Selain itu, tercapainya kondisi maksimum bioadsorpsi Hg(II) pada pH ~8,60 diduga akibat terjadinya hidrolisis ester fosfat yang umumnya terjadi pada pH ~8,60 dalam sistem pencernaan manusia yang biasanya dikatalisis oleh fosfatase (Murray *et al.*, 2003).

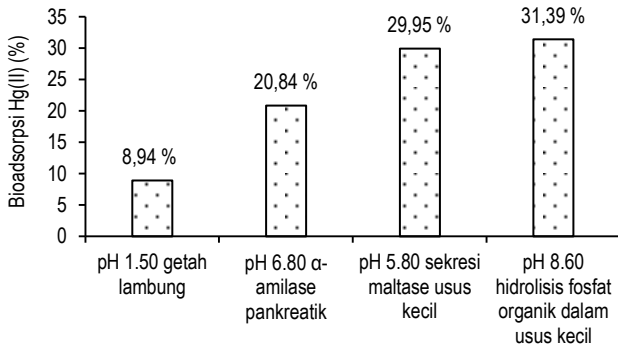
Perlakuan	pH = 1,50	pH = 6,80	pH = 5,80	pH = 8,60	Perlakuan	pH = 1,50	pH = 6,80	pH = 5,80	pH = 8,60
	D-glukosa	D-glukosa	D-glukosa	D-glukosa		D-glukosa	D-glukosa	D-glukosa	D-glukosa
Sampel					Sampel				
Sg1*	++	+	+++	+++	SgP1	+	+	++	-
Sg2	+	++	+++	+++	SgP2	+	+	-	-
Sg3	+	++	+++	+++	SgP3	-	-	-	-
Sg4	+	+++	++++	++++	SgP4	-	-	-	-
Sg5	+	++	++	+++	SgP5	-	-	-	-
Sg6	+	++	++	+++	SgP6	-	-	-	-
Sg	+	++	+++	+++	SgP	-	-	-	-

Keterangan:

\* angka 1-6 menyatakan kesetaraan nilai dengan 0, 100-0,600 gram Sg dan SgP yang digunakan

\*\* rasio banyaknya rasio endapan Cu<sub>2</sub>O yang terbentuk dengan uji Fehling hasil hidrolisis Sg dan SgP dalam sistem *in vitro*

Berdasarkan hal di atas, bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP dinyatakan memiliki kinerja efektif. Adapun persentase adsorpsi optimum dan maksimum tersebut sebesar 20,84% dan 31,39%, secara berturut-turut (Gambar 4). Hal ini disebabkan bahwa pH efektif mencapai adsorpsi optimum dan maksimum Hg(II) umumnya terjadi serentak pada pH ~5,00 dalam larutan berair (Farooq *et al.*, 2010).



Gambar 4. Persentase bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP secara *in vitro* sistem pencernaan manusia (massa SgP = ~0,300 g)

Pada penelitian ini, kapasitas bioadsorpsi Hg(II) oleh SgP secara *in vitro* memiliki kinerja yang baik dibandingkan beberapa tipe adsorben Hg(II) pada penelitian terdahulu (Tabel 5).

Tabel 5. Perbandingan nilai adsorpsi Hg(II) oleh beberapa adsorben termodifikasi

Bioadsorben	Q (mg/g)	Referensi
Serabut kelapa termodifikasi tiol	909,09	Igwe <i>et al.</i> , 2008
Asam poli-γ-glutamat	96,79	Inbaraj <i>et al.</i> , 2009
Karbon aktif	18,87	Amitava 2010
Karbon aktif termodifikasi sulfur	380,00	Silva <i>et al.</i> , 2010
SgP	104,63	Penelitian ini

Keunggulan SgP pada penelitian ini disebabkan tingginya resistansi SgP sebagai pati fosfat yang tidak tercerna dalam sistem pencernaan manusia (BeMiller dan Whistler, 2009). Selain itu, kapasitas adsorpsi Hg(II) oleh SgP lebih tinggi daripada karbon aktif yang selama ini digunakan sebagai adsorben pada pencernaan manusia secara umum. Tingginya kapasitas adsorpsi Hg(II) oleh SgP dibandingkan karbon aktif diduga akibat adanya interaksi ion Hg(II) dengan gugus fosfat dan hidroksil pada SgP melalui ikatan kovalen. Kondisi tersebut tidak ditemukan pada karbon aktif yang hanya mampu

menyerap ion-ion logam pada bagian pori (Amitava, 2010). Pada sisi lain, SgP memiliki nilai kapasitas adsorpsi Hg(II) yang lebih rendah daripada serabut kelapa termodifikasi tiol. Hal ini disebabkan gugus tiol merupakan spesi basa lunak yang tepat bagi ion Hg(II) yang merupakan suatu spesi asam lunak dibandingkan gugus fosfat yang terdapat pada SgP (Lippard dan Berg, 1994; Igwe *et al.*, 2008).

## KESIMPULAN

Kapasitas adsorpsi Hg(II) oleh SgP secara *in vitro* sistem pencernaan manusia mencapai 104,63 mg/g. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan karbon aktif yang selama ini digunakan sebagai adsorben secara umum pada tubuh manusia. Pada sisi lain, SgP memiliki nilai kapasitas adsorpsi Hg(II) yang lebih rendah dibandingkan adsorben lain yang termodifikasi turunan gugus tiol akibat adanya kesesuaian pasangan interaksi asam basa keras lunak.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Iman Sulaiman dari Fakultas Teknologi Pertanian Mayor Ilmu Pangan yang telah membantu dalam proses analisis viskosa cepat yang dilakukan pada penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad FB, Williams PA, Doublier JL, Durand S, Buleon A. 1999. Physico-chemical characterisation of sago starch. *Carbohydr Polym* 38: 361-370. DOI: [10.1016/S0144-8617\(98\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00123-4)
- Amitava S. 2010. Exploitation of Activated Carbon Materials for the Sorption of Mercury. [Dissertation]. Chennai. Department of Chemistry. Indian Institute of Technology Madras.
- Aziz HA, Adlan MN, Arifin KS. 2008. Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu and Cr(III)) removal from water in Malaysia: Post treatment by high quality limestone. *J Biotechnol* 99: 1578-1583. DOI: [10.1016/j.biortech.2007.04.007](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.007).

- BeMiller J, Whistler R. 2009. Starch: Chemistry and Technology. 3<sup>rd</sup> editions. Elsevier App. Sci. Publisher. New York. p. 646.
- Blennow A, Nielsen TH, Baunsgaard L, Mikkelsen R, Engelsen SB. 2002. Starch phosphorylation: a new front line in starch research. Trends in Plants Sci 7: 445-450. DOI: [10.1016/S1360-1385\(02\)02332-4](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02332-4)
- [BPBPI] Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia. 2007. Tanaman sago sebagai sumber energi alternatif. Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian 29: 3-4.
- Chen CY, Yang C-Y, Chen A-H. 2011. Biosorption of Cu(II), Zn(II), Ni(II) and Pb(II) ions by cross-linked metal-imprinted chitosans with epichlorohydrin. J Env Man 92: 796-802. DOI: [10.1016/j.jenvman.2010.10.029](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.029).
- Ding W, Zhao P, Li R. 2011. Removal of Zn(II) ions by dialdehyde-8-aminoquinoline starch from aqueous solution. Carbohydr Polym 83: 802-807. DOI: [10.1016/j.carbpol.2010.08.057](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.057).
- Farooq U, Kozinski JA, Khan MA, Athar M. 2010. Biosorption of heavy metal ions using wheat based bioadsorbents-A review of the recent literature. J Biotechnol 101: 5043-5053. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.02.030](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.030).
- Güney A, Arslankaya E, Tosun İ. 2007. Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics. J Haz Mat 146: 362-371. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2006.12.034](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.034).
- Gupta N, Amritphale SS, Chandra N. 2010. Removal of Zn(II) from aqueous solution by using hybrid precursor of silicon and carbon. J Bio Technol 101: 3355-3362. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.12.024](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.024).
- Gyliene O, Visniakova S. 2008. Heavy metal removal from solutions using natural and synthetic sorbents. Env Res Eng and Manag 43: 28-34.
- Igura M, Okazaki M. 2010. Cadmium sorption characteristics of phosphorylated sago starch-extraction residue. J Hazard Mater 178: 686-692. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2010.01.142](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.142).
- Igwe JC, Abia AA, Ibeh CA. 2008. Adsorption kinetic and intraparticulate diffusivities of Hg, As, and Pb ions on unmodified and thiolated coconut fiber. Int J Environ Sci Tech 5: 83-92.
- Inbaraj BS, Wang JS, Lu JF, Siao FY, Chen BH. 2009. Adsorption on toxic mercury(II) by an extracellular biopolymer poly( $\gamma$ -glutamic acid). J Bioresource Technol 100: 200-207. DOI: [10.1016/j.biortech.2008.05.014](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.014).
- Itodo AU, Itodo HU. 2010. Sorption energy estimation using Dubinin-Radushkevich and Temkin adsorption isotherms. Life Sci J 7: 31-39.
- Karim AA, Nadiha MZ, Chen FK, Phuah YP, Chui YM, Fazilah A. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (Metroxylon sago) starch. Food Hydrocoll 22: 1044-1053. DOI: [10.1016/j.foodhyd.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.05.011).
- Li B-Z, Wang L-J, Li D, Chiu YL, Zhang Z-J, Shi J, Chen XD, Mao Z-H. 2009. Physical properties and loading capacity of starch-based microparticles crosslinked with trisodium trimetaphosphate. J Food Eng 92: 255-260. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.008).
- Lippard SJ, Berg JM. 1994. Principles of Bioinorganic Chemistry. University Science Books. California. p. 22.
- Manoi K, Rizvi SSH. 2010. Physicochemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion. Carbohydr Polym 81: 687-694. DOI: [10.1016/j.carbpol.2010.03.042](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.042).
- Murray RK, Granner DK, Mayes PA, Rodwell VW. 2003. Biokimia Harper. Edisi ke-25. Hartono A (alih bahasa). EGC. Jakarta. p. 660.
- Romengga J, Irawadi TT, Djulaika R, Zakaria A, Muntamah, 2011. Sintesis pati taut silang fosfat berderajat substitusi tinggi dalam suasana asam. J Teknol dan Industri Pangan 18: 117-123.
- Silva HS, Ruiz SV, Granados DL, Santángelo JM. 2010. Adsorption of mercury(II) from liquid solutions using modified activated carbons. Mat Res 13: 129-134. DOI: [10.1590/S1516-14392010000200003](https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000200003).
- Silverstein RM, Webster FX, Kiemle DJ. 2005. Spectrometric Identification of Organic Compounds. 7<sup>th</sup> editions. John Wiley dan Sons. New Jersey. p. 124.
- Wan MW, Kan CC, Rogel BD, Dalida MLP. 2010. Adsorption of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solution on chitosan-coated sand. Carbohydr Polym 80: 891-899. DOI: [10.1016/j.carbpol.2009.12.048](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.048).
- Wan Ngah WS, Teong LC, Hanafiah MAKM. 2011. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. Carbohydr Polym 83: 1446-1456. DOI: [10.1016/j.carbpol.2010.11.004](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.004).
- Wanrosli WD, Rohaizu R, Ghazali A. 2011. Synthesis and characterization of cellulose phosphate from oil palm empty fruit bunches microcrystalline cellulose. Carbohydr Polym 84: 262-267. DOI: [10.1016/j.carbpol.2010.11.032](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.032).
- Xing G-x, Zhang S-f, Ju B-z, Yan J-z. 2006. Study on adsorption behavior of crosslinked cationic starch maleate for chromium(VI). Carbohydr Polym 66: 246-251. DOI: [10.1016/j.carbpol.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.03.005).
- Zakhama S, Dhaouadi H, M'Henni F. 2011. Nonlinear modelisation of heavy metal removal from aqueous solution using *Ulva lactuca* algae. J Bioresource Technol 102: 786-796. DOI: [10.1016/j.biortech.2010.08.107](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.107).