PENYISIHAN HIDROGEN SULFIDA DARI GAS BIO DENGAN SABUT KELAPA TERIMPREGNASI BESI OKSIDA DI DALAM REAKTOR UNGGUN DIAM SKALA LABORATORIUM

REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS USING IRON OXIDE IMPREGNATED COCO COIR IN LABORATORY SCALE OF FIXED BED COLUMN REACTOR

^{*1}Muchlis dan ²Agus Jatnika Effendi

Program Pascasarjana Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10 Bandung 40132 e-mail : ¹much004@lipi.go.id dan ²agusje@ftsl.itb.ac.id

Abstrak: Upava konversi energi limbah berbasiskan gas bio seringkali memerlukan proses penvisihan gas hidrogen sulfida (H_2S) yang bersifat korosif, beracun dan berbau. Sebuah sorben reaktif berbasiskan besi oksida hidrat yang disebut iron oxide – impregnated coco coir (IOCC), telah dipreparasi untuk mendukung proses pembersihan gas bio terhadap pengotor H₂S. Untuk mendapatkan kondisi operasi optimum, serangkaian percobaan reaktor unggun diam skala laboratorium telah dilakukan dengan tinggi kolom 100 mm dan menggunakan biogas sintetis dengan konsentrasi H_2S umpan 1000 ppm di dalam kondisi aliran sumbat. Rancangan percobaan mengikuti jenis faktorial dua tingkat yang meliputi pH sorben 6,5 dan 9; kecepatan superfisial gas umpan, (v) 1,0 dan 2,5 m/detik serta dua tingkat perlakuan regenerasi. Indikator utama kinerja reaktor ditunjukkan oleh kapasitas penyisihan sulfur (SCb) yang dihitung dari hasil pengamatan kurva breakthrough hingga konsentrasi keluaran H₂S maksimum sebesar 100 ppm tercapai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja reaktor tidak dikendalikan oleh tahap perpindahan massa secara difusi eksternal, namun dikendalikan oleh tahap reaksi kimia. Peningkatan kapasitas sulfur secara signifikan dapat dicapai melalui peningkatan waktu tinggal dengan kecepatan superfisial rendah v=0,2 m/menit serta kondisi adsorben yang bersifat basa, pH=9 melalui penambahan Na₂CO₃. Disamping itu perlakuan regenerasi melalui reaksi oksidasi dengan bantuan aliran udara juga diketahui dapat memulihkan sebagian kapasitas sulfur adsorben bekas pakai. Data penelitian ini bermanfaat sebagai basis perancangan percobaan scale up dengan reaktor skala pilot.

Kata kunci: hidrogen sulfida, besi oksida, reaktor unggun diam, gas bio.

Abstract: Removal process for corrosive, noxious and offensive odorous hydrogen sulfide (H_2S) is often needed in waste to energy conversion system based on biogas. A hydrated iron oxide based reactive adsorbent that called iron oxide impregnated coco coir (IOCC) has been prepared for supporting H_2S removal from biogas. For establishing its optimized separation performance, a series of laboratory scale experiments have been carried out in 100 mm bed length of fixed bed reactors and using synthetic biogas with 1000 ppm H_2S concentration under plug flow condition. It was applied two level factorial design of experiment for parameters: pH 6.5 and 9; superficial gas velocity (v) 1.0 and 2.5m/min; and two level regeneration treatments. The main indicator of reactor performance was characterized with sulfur removal capacity (SC_b) that calculated from breakthrough curves with 100 ppm maximum outlet H_2S concentration. The results showed that, under the experimental conditions, the separation process was not controlled by the external diffusion mass transfer step, but controlled by the chemical reaction step. The reactor performance could be improved by increasing pH with Na_2CO_3 addition and increasing the contact time with decreasing superficial velocity. The optimum operating conditions are pH=9 and superficial velocity v=1.0 m/min. Besides that, the sulfur capacity of saturated adsorbent could be recovered partially by oxidation reaction with air. This study constitutes the basis data for the next step of scale-up experimentation at pilot scale fixed bed reactor.

Keywords: hydrogen sulfide, iron oxide, biogas, fixed bed column reactor

PENDAHULUAN

Gas bio merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dihasilkan dari berbagai jenis limbah organik melalui pengolahan biologi secara anaerob (Poh dan Chong, 2010; Rao dkk., 2010). Komponen utama gas bio terdiri atas gas metan (CH₄, 60-70%) dan karbon dioksida (CO₂, 30-40%). Disamping itu juga disertai uap air dalam kondisi jenuh (H₂O, 5-10%), hidrogen sulfida (H₂S, 10-10.000 ppmv) serta berbagai senyawa pengotor lainnya yang dapat menimbulkan masalah apabila tidak disingkirkan segera (Osorio dan Torres, 2009). Diantara senyawa pengotor tersebut, H₂S merupakan senyawa pencemar yang sangat berbahaya bagi manusia dan lingkungan karena sifatnya yang beracun, berbau dan korosif (Wellinger dan Lindberg, 2005). Disamping itu, dampak korosif yang ditimbulkan oleh konsentrasi H₂S yang terlalu tinggi ikut menghalangi pemanfaatan gas bio sebagai sumber energi terbarukan melalui teknologi pembangkit listrik yang lebih efisien, seperti teknologi *internal combustion engine, micro turbine* dan *fuel cell* (Capstone, 2006 di dalam Hur dkk., 2009; Krich, dkk.,2005; Wellinger dan Lindberg, 2005; XENERGY, 2002).

Terdapat berbagai pilihan teknologi untuk membersihkan gas bio dari pengotor H₂S seperti: proses absorpsi, adsorpsi (baik secara fisika maupun kimia), biofiltrasi, membran filtrasi, serta rekayasa langsung terhadap pengoperasian *digester anaerob* (Rickeybosch, 2011). Diantara pilihan tersebut, proses adsorpsi kimia dengan sorben reaktif besi oksida hidrat merupakan teknologi yang paling handal dan efisien untuk mendukung sistem konversi energi limbah (Ravishanker dan Hills, 1982). Proses ini dikenal dengan istilah *iron sponge* serta memiliki banyak keunggulan sebagai proses yang sederhana, mudah dikendalikan, memiliki selektifitas yang tinggi terhadap H₂S, berjalan optimal pada suhu relatif rendah (25 - 50 °C), biaya investasi relatif rendah serta efisien untuk kapasitas penyisihan sulfur < 200 kg sulfur/hari. Prinsip dasar teknologi pemisahan ini adalah proses adsorpsi kimia, yang melibatkan reaksi kimia antara H₂S dan Fe₂O₃. Sorben yang sudah jenuh dapat diregenerasi beberapa kali melalui reaksi oksidasi untuk memaksimalkan kapasitas adsorben. Reaksi kimia pada proses sorpsi serta regenerasinya ditunjukkan oleh persamaan 1 dan 2 berikut (Crynes, 1978 di dalam Ravishanker dan Hills, 1984):

Sorpsi	$Fe_2O_3.H_2O + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3.H_2O + 3H_2O$	Persamaan 1
Regenerasi	$Fe_2S_3.H_2O + 3/2 O_2 \rightarrow Fe_2O_3.H_2O + 3 S$	Persamaan 2

Umumnya, proses *iron sponge* dioperasikan secara kontinu di dalam reaktor unggun diam untuk alasan kemudahan teknis. Namun biaya operasi terkait penanganan dan konsumsi adsorben merupakan komponen dominan dalam biaya proses (Rickeybosch, 2011). Untuk menurunkan biaya operasi dibutukan adsorben dengan kapasitas sulfur yang tinggi serta reaktor unggun diam dengan waktu layan lebih lama.

Karakteristik adsorben serta aliran fluida yang melewatinya memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja reaktor unggun diam (Coker 2001). Menurut Geankoplis (2003), proses adsorpsi fisika maupun kimia di dalam reaktor unggun diam bersifat tidak tunak dan sangat dipengaruhi oleh dinamika sistem keseluruhan. Untuk memahami kinerja proses adsorpsi di dalam reaktor unggun diam, umumnya digunakan metoda analisis kurva *breakthrough* (Wang, 2011; Truong & Abatzoglou, 2005). Disamping itu, juga disarankan untuk melakukan percobaan kolom skala laboratorium, sebelum melaksanakan percobaan skala pilot atau skala komersial yang berbiaya tinggi dan memiliki tingkat kesulitan teknis lebih tinggi.

Penelitian ini terkait dengan upaya pengembangan suatu material baru dari sabut kelapa terimpregnasi besi oksida atau *iron oxide impregnated coco coir* (IOCC) untuk mendukung proses desulfurisasi gas bio di dalam sistem konversi energi limbah. Tujuan penelitian ini adalah untuk memahami pengaruh parameter proses kecepatan superfisial, pH dan perlakuan regenerasi terhadap kinerja reaktor unggun diam dengan adsorben IOCC. Sasaran dari percobaan yang dilakukan adalah mendapatkan perilaku kurva *breakthrough* serta menentukan tahap pengendali dalam mekanisme penyisihan secara keseluruhan (tahap difusi eksternal atau tahap reaksi kimia di permukaan adsorben).

METODOLOGI

Percobaan ini menggunakan adsorben berbasiskan besi oksida yang disebut *iron oxide impregnated coco coir* (IOCC). Sorben IOCC memiliki komposisi homogen yang terdiri atas *coco peat*, *coco fiber*, Fe₂O₃ dan air. *Coco peat* berukuran 14 – 30 mesh diimpregnasi di dalam *ultrasonic bath* (Branson 8210) selama satu jam dengan larutan Fe₂O₃ 1%-b dengan pelarut air. Kemudian disaring dan dikeringkan di dalam oven selama tiga jam pada suhu 60 °C. Setelah itu, dicampur dengan *coco fiber* rasio volume 1:1 serta serbuk Fe₂O₃ hingga mengandung 260 kg Fe₂O₃/m³ unggun. Tanpa penambahan Na₂CO₃, sorben IOCC memiliki pH 6.5. Sedangkan dengan penambahan 16 mg Na₂CO₃/ mL adsorbent diperoleh IOCC dengan pH 9. Adsorben IOCC memiliki kadar air 26% serta porositas unggun 46%.

Kinerja adsorben IOCC dievaluasi dengan gas bio buatan dengan komposisi menyerupai gas bio sesungguhnya dari unit pengolahan limbah cair secara anaerob. Komposisi gas bio buatan adalah 60% N₂ (sebagai pengganti CH₄), 40% CO₂ dan 1000 ppm H₂S. Gas bio buatan dipersiapkan di laboratorium melalui pengadukan kontinu di dalam kantong *polyethylene* berkapasitas 0,8 m³. Gas N₂ dan CO₂ diperoleh dari distributor gas industri di kota Bandung. Sedangkan gas H₂S disintesa di laboratorium melalui metoda Henwood (1925).

Percobaan dilakukan di dalam reaktor unggun diam skala laboratorium, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Reaktor terbuat dari tabung silinder Plexiglas dengan diameter dalam 16 mm dan dilengkapi penyangga mesh *stainless steel*. Reaktor diisi dengan 9,56 grams adsorben IOCC membentuk unggun ketinggian 100 mm. Gas umpan dialirkan secara kontinu dengan sistem upflow dengan pompa dan *flow meter* (Dwyer, RMA-1). Sebelum memasuki reaktor, gas umpan dilembabkan dengan air jenuh H₂S di dalam gelas impinger ukuran 30 mL pada suhu ruangan $(26\pm1 \text{ °C})$. Kondisi jenuh dikonfirmasi melalui pengukuran konsentrasi H₂S bagian *inlet* dan *outlet* dengan metoda *colorimetric* menggunakan *detector tube* (MSA-Auer).



Gambar 1. Skema Sistem Uji Reaktor Unggun Diam Skala Laboratorium.

Percobaan reaktor unggun diam dilakukan dengan kondisi tetap seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**, serta rancangan percobaan dua faktorial dengan variabel independen pH, kecepatan superfisial (v) dan perlakuan regenerasi, seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**. Regenerasi dilakukan dengan metoda Ravishanker dan Hills (1984) melalui pengalirkan udara dengan laju alir 500 mL/menit selama 20 menit. Nilai pH dipilih berdasarkan variasi kondisi netral dan basa yang mungkin mempengaruhi kinetika reaksi kimia. Nilai variasi kecepatan superfisial dipilih berdasarkan rentang optimum yang umum digunakan di dalam proses *iron sponge* (Anerousis dan Whitman, 1985 in Zicari, 2003), dan diperkirakan dapat mempengaruhi laju perpindahan massa secara difusi eksternal.

Constant Parameter	Value	Units
Bed diameter	16	mm
Bed height	100	mm
Bed porosity	0.46	-
IOCC weight	9.56	gram
Fe_2O_3 content	5.22	gram
Water content	26	%
H ₂ S inlet concentration	1000	ppm
CO ₂ concentration	~ 40	%
N ₂ concentration	~ 60	%
Temperature	25 - 27	°C

Tabel 1. Kondisi Parameter Operasi Konstan pada Percobaan Reaktor Unggun Diam

Kecepatan superfisial dikendalikan melalui variasi laju alir dengan flowmeter (Dwyer, RMA-1) dan dihitung berdasarkan *empty bed column* dan diameter reaktor konstan. Variasi pH dikendalikan melalui rekayasa penambahan Na₂CO₃. Konsentrasi H₂S umpan dimonitor dengan H₂S *detector tube* (MSA-Auer) dengan rentang konsentrasi pengukuran 100 – 4000 ppm H₂S. Konsentrasi H₂S keluaran reaktor diukur secara kontinu dengan *Toxiplus H₂S monitor* (Biosystems, Inc) dan kamera video untuk mendapatkan kurva *breakthrough*. Nilai konsentrasi maksimum *breakthrough* adalah 100 ppm H₂S yang dipilih berdasarkan kriteria biogas untuk *internal combustion engine* (Wellinger & Lindberg, 2005).

Kinerja reaktor ditunjukkan oleh kapasitas sulfur (SC_b) yang didefinisikan sebagai jumlah milligram massa sulfur terserap per satuan gram sorben IO-CC, hingga kondisi jenuh tercapai. Indikator tersebut dihitung dengan **Persamaan 3**, berdasarkan data kurva *breakthrough* yang menampilkan profil konsentrasi H₂S keluaran reaktor (C_{A,out}, ppm) terhadap waktu operasi (t, min) hingga waktu jenuh (t_b , min) tercapai. Disamping itu, juga digunakan nilai parameter lain berupa laju alir gas umpan (Q m³/min), konsentrasi H₂S umpan (C_{A,in}, ppm) serta berat adsorben (W_{fb},gram). Faktor 1.32 adalah faktor konversi ppm H₂S menjadi mg S/m³.

$$SC_b = \int_0^{t_b} \frac{1.32 \cdot Q \int_0^{t_b} (C_{A,in} - C_{A,out}) dt}{W_{fb}}$$
 Persamaan 3

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik aliran

49

Pada penelitian ini dilakukan percobaan reaktor unggun diam skala laboratorium dengan ukuran kolom relatif pendek, yaitu 100 mm. Hal ini memberikan keuntungan penghematan berbagai sumber daya laboratorium yang diperlukan untuk memperoleh data kurva *breakthrough*. Meski begitu, karakteristik aliran gas dalam reaktor masih cukup baik untuk mengikuti kriteria aliran sumbat yang umum ditemukan pada reaktor skala besar. Menurut Foggler (2006) dalam Wang dkk. (2011), aliran sumbat dapat diasumsikan ketika Bilangan Peclet (Pe) >1000. Bilangan Peclet menunjukkan rasio perpindahan secara konveksi terhadap dispersi. Bilangan Peclet minimal pada sistem reaktor unggun diam dihitung berdasarkan kecepatan superfisial terendah sebagai berikut:

$$Pe = \frac{v'L}{D_{H2S}} = \frac{(1,0 / 60)(0,1)}{2,17 \times 10^{-7}} = 3,51 \times 10^3$$
 Persamaan 4

Koefisien difusivitas H₂S, D_{H2S} dihitung dengan **Persamaan 5** berdasarkan metode Fuller (Poling, dkk, 2001 di dalam Wang dkk, 2011) untuk campuran biner H₂S – N₂ yang memberikan Bilangan Peclet lebih rendah dari sistem H₂S – N₂.

$$D_{H2S} = \frac{4,52 \times 10^{-4} T^{1.75}}{P \left[2 \left(M W_{N2}^{-1} + M W_{H2S}^{-1} \right)^{-1} \right]^{0.5} + \left[(\Sigma v)_{N2}^{-1} + (\Sigma v)_{H2S}^{-1} \right]^2}$$
Pers. 5

Dimana berat molekul MW_{H2S} = 34 kg/kmol; MW_{N2} = 28 kg/kmol; jumlah volume difusi $(\sum v)_{N2} = 18,5$; $(\sum v)_{H2S} = 27.52$ pada temperatur T = 299 K, dan tekanan P = 101 kPa. Kesamaan pola aliran tersebut merupakan salah satu kriteria penting yang agar reaktor skala laboratorium dapat memprediksi perilaku reaktor skala *pilot plant* (Coker, 2011).

Hasil pengamatan kurva *breakthrough* serta kinerja reaktor pada berbagai kondisi operasi ditunjukkan pada **Gambar 2** dan **Tabel 2**. Terlihat bahwa setiap percobaan memberikan kurva *breakthrough* yang unik dan dapat dibedakan satu sama lain berdasarkan parameter waktu *breakthrough* (tb) dan kapasitas sulfur (SCB). Secara umum, kinerja ideal reaktor ditandai dengan waktu *breakthrough* yang lama serta nilai kapasitas sulfur yang tinggi. Untuk beban permukaan yang sama (S_L), reaktor berkapasitas sulfur lebih tinggi ditandai dengan waktu *breakthrough* lebih lama.

Kurva Breakthrough



(b) adsorben IOCC hasil regenerasi Gambar 2. Perilaku kurva *breakthrough* pada berbagai pH dan kecepatan superfisial.

l abel 2.	Variasi Variabel Independen pada Rancangan Percobaan.			
Variabel	Range	dan levels		
bebas	Rendah	Tinggi		
pH adsorben IOCC	6,5	9		
	(tanpa penambahan Na ₂ CO ₃)	(dengan penambahan Na ₂ CO ₃)		
Kecepatan superfisial	1,0 m/min	2,5 m/min		
Perlakuan regenerasi	0	1		
	(fresh adsorbent)	(regenerated adsorbent)		

Data perilaku kurva *breakthrough* pada sistem adsorpsi kimia dengan adsorben IOCC menunjukkan perilaku yang berlawanan dengan teori adsorpsi umum, di mana reaktor dengan kapasitas sulfur tinggi selalu memiliki kurva *breakthrough* lebih miring dengan zona perpindahan massa yang lebih lebar (**Tabel 3** dan **Gambar 2**). Namun, hasil ini konsisten dengan percobaan sejenis yang dilakukan oleh Wang (2011) dengan adsorben komersil CG-04. Dengan demikian, teori reaktor heterogen gas-padat lebih cocok digunakan untuk menjelaskan perilaku sistem adsorpsi kimia ini. Berdasarkan model *shrinking core* pada teori reaktor heterogen gas-padat (Smith, 1970), ada tiga tahapan dari mekanisme penyisihan yang dapat mengendalikan laju penyisihan H₂S dalam reaktor unggun diam, yaitu difusi eksternal dengan perpindahan massa melalui lapisan tipis gas, *ash-layer diffusion*, dan reaksi permukaan. Tahap terlambat dari mekanisme tersebut merupakan tahap pengendali laju perpindahan massa keseluruhan.

Run	V (m/min)	рН	Reg	EBCT (sec)	S _L (gr S/m ² . sec)	t _b (min)	SCb (mg S/ gr adsorbent)	SCb total (mg S/ gr adsorbent)	
1	1,0	6,5	0	6	2.2	2,78	0,071	0,106	
2	1,0	6,5	1	0	0	2,2	1,38	0,035	
3	1,0	9	0	6	2.2	33,28	0,820	1,465	
4	1,0	9	1	0	0 2,2	2,2	26,03	0,645	
5	2,5	6,5	0	2.4	5 5	0,67	0,025	0,046	
6	2,5	6,5	1		5,5	0,62	0,022		
7	2,5	9	0	2.4	5 5	4.43	0,283	0,505	
8	2,5	9	1		5,5	3,47	0,222		

Tabel 3. Kinerja reaktor unggun diam pada berbagai kondisi operasi.

EBCT, waktu kontak; S_L beban pengolahan ; SC_b , kapasitas sulfur t_b , waktu *breakthrough*

Pengaruh kecepatan superfisial.

Seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** dan **Tabel 3**, reaktor dengan kecepatan superfisial lebih tinggi selalu memberikan waktu *breakthrough* lebih pendek dan kapasitas sulfur yang lebih rendah. Hasil yang sama juga ditemukan pada studi penyisihan H₂S dengan adsorben besi oksida komersil (Wang dkk, 2011; Truong dan Abatzoglou, 2005). Menurut Cussler (2007), peningkatan kecepatan superfisial akan meningkatkan koefisien perpindahan massa konvektif serta meningkatkan laju perpindahan massa secara difusi eksternal. Namun, hasil percobaan menunjukkan dampak penurunan kapasitas sulfur dengan peningkatan kecepatan superfisial. Fenomena negatif ini menunjukkan bahwa difusi eksternal bukanlah tahap pengendali laju perpindahan massa keseluruhan dalam sistem reaktor unggun tetap.

Seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**, reaktor dengan kecepatan superfisial lebih tinggi selalu memiliki waktu kontak EBCT (*empty bed contact time*) lebih rendah dan kapasitas sulfur lebih rendah. Nilai EBCT dihitung dengan **Persamaan 6** (Wang dkk, 2011).

$$EBCT (detik) = \frac{volume \, unggun \, (mL)}{laju \, alir \, (ml/min) \times 60}$$

$$= \frac{panjang \, unggun \, (cm)}{kecepatan \, superfisial \, (cm/min) \, \times 60}$$
Pers. 6

Pada kecepatan superfisial lebih tinggi, beban pengolahan reaktor meningkat dengan waktu kontak untuk menjalankan proses difusi dan reaksi kimia lebih singkat. Kondisi ini memudahkan molekul H₂S yang tidak sempat bereaksi untuk terbawa aliran keluar reaktor. Menurut Revel (2001) di dalam Zicari (2003), nilai waktu kontak EBCT minimum yang direkomendasikan untuk proses *iron sponge* adalah 60 detik. Sehingga, dengan waktu kontak yang sangat singkat, kinerja kapasitas sulfur sorben IOCC dilaporkan dalam penelitian skala laboratorium ini jauh lebih rendah dibandingkan laporan adsorben komersial (Wang dkk, 2011; Truong dan Abatzoglou, 2005).

Pengaruh pH.

Peningkatan pH adsorben IOCC melalui penambahan Na_2CO_3 memiliki dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja reaktor (**Gambar 2** dan **Tabel 3**). Namun, tanpa kehdiran Fe₂O₃, kinerja reaktor yang terdiri dari sabut kelapa dan Na_2CO_3 semata tidak memberikan waktu *breakthrough* dan kapasitas sulfur yang signifikan (**Gambar 3**). Hal ini menunjukkan bahwa Na_2CO_3 tidak berfungsi sebagai reaktan pengganti Fe₂O₃, tapi hanya bertindak sebagai katalis yang mempercepat laju reaksi kimia antara H₂S dan Fe₂O₃.



Gambar 3. Pengaruh penambahan Na₂CO₃ terhadap kurva *breakthrough* (v= 1.0 m/min; adsorben IOCC sebelum regenerasi)

Menurut Davydov dkk. (1998), laju reaksi H_2S dan Fe_2O_3 ditentukan oleh laju pembentukan komponen intermediate jenis anion HS^- . Sementara itu, pada kondisi basa nilai konstanta disosiasi H_2S untuk pembentukan anion HS^- lebih tinggi dibandingkan kondisi asam (Bandosz 2011). Dalam hal ini, upaya untuk meningkatkan pH melalui penambahan Na_2CO_3 yang terdiri dari kation Na+ dan anion $CO_3^{2^-}$ diperkirakan memainkan interaksi asam-basa Bronsted-Lowry yang mempercepat laju pembentukan anion HS^- . Dengan demikian, pada kondisi basa, terjadi peningkatan laju pembentukan anion HS^- serta laju perpindahan massa keseluruhan, dan kapasitas sulfur sorben IOCC. Pengaruh signifikan yang ditimbulkan oleh perlakuan pH

menunjukkan bahwa tahap reaksi kimia pada permukaan adsorben adalah penentu laju perpindahan massa keseluruhan.

Pengaruh perlakuan regenerasi.

Upaya regenerasi dengan metode oksidasi menggunakan udara telah memberikan hasil yang baik, seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**. Namun kinerja adsorben hasil regenerasi selalu memberikan waktu *breakthrough* lebih pendek dan kapasitas sulfur lebih rendah dari adsorben sebelum regenerasi (**Gambar 2** dan **Tabel 3**). Menurut Hayward (1964) dalam Smith (1970), molekul yang dapat bereaksi di dalam sistem adsorpsi kimia adalah yang memiliki konfigurasi sesuai dengan situs aktif permukaan serta memiliki energi aktivasi yang cukup. Selain itu, peluang suatu molekul menempati satu situs aktif akan sebanding dengan fraksi situs aktif permukaan yang kosong. Disamping itu, kekuatan interaksi antara situs terisi dan kosong dapat meningkatkan energi aktivasi dan menurunkan laju reaksi kimia. Oleh karena itu, kehadiran belerang hasil reaksi regenerasi (**Persamaan 2**) dapat menutupi sebagian situs aktif adsorben, menurunkan laju reaksi kimia pada permukaan adsorben, dan menurunkan kaspasitas sulfur pada adsorben IOCC hasil regenerasi.

KESIMPULAN

Pengaruh kecepatan superfisial, pH dan perlakuan regenerasi terhadap kinerja adsorben IOCC di dalam reaktor unggun diam skala laboratorium telah dipelajari dengan menggunakan biogas sintetik mengandung konsentrasi H_2S umpan 1000 ppm dengan kondisi aliran sumbat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa di bawah kondisi percobaan, laju perpindahan massa keseluruhan tidak dikendalikan oleh tahap difusi eksternal, namun dikendalikan oleh tahap reaksi kimia. Kinerja reaktor dapat ditingkatkan melalui peningkatan pH dengan penambahan Na₂CO₃ dan meningkatkan waktu kontak dengan menurunkan kecepatan superfisial. Kondisi operasi optimum adalah pH = 9 dan kecepatan superfisial v = 1,0 m / min. Selain itu, sebagian kapasitas sulfur adsorben bekas pakai dapat dipulihkan melalui reaksi oksidasi dengan udara.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Kimia LIPI serta Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui beasiswa RISTEK.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandosz, J. Teresa. 2011. "Towards understanding reactive adsorption of small molecule toxic gases on carbonaceous materials." *Catalysis Today*, no. 186. pp. 20–28.
- Coker, A. Kayode. 2001. *Modelling of chemical kinetics and reactor design*. Houston: Gulf publishing company.

Cussler, E. 2007 Diffusion - Mass Transfer in Fluid Systems 3rd ed. New York: Cambridge University,.

- Davydov, A., K. T. Chaung, and Sanger A.R. 1998. "Mechanism of H2S oxidation by ferric oxide and hydroxide surface." *Journal of Physical Chemistry*, no. 102. pp. 4745-4752.
- Geankoplis, C.J. 2003. Transport Processes and Sepration Process Principles. 4. New Jersey.
- Hur, K-b, S-k Rhim, and J-k Park. 2009. "Mechanical characteristics evaluation of biogas micro turbine power systems." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. pp. 1003-1009.
- Keller, J.,U., and R. Staudt. 2005. *Gas Adsorption Equilibria: Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*. Universität Siegen Germany: Springer Science.
- Missen, Ronald, W., Charles, A. Mims, and Bradley, A. Saville. 1999. Introduction to chemical engineering reactions and kinetics. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Osorio, F, and J.C. Torres. 2009. "Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production." *Renewable Energy*, no. 34. pp. 2164-2171.
- Poh, P.E., and M.F. Chong. 2010. "Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent (POME) with a thermophilic mixed culture cultivated using POME as a substrate." *Chemical Engineering Journal* 164. pp 146-154.

- Rao, P.V., S.S. Baral, R. Dey, and S. Mutnuri. 2010. "Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 pp. 2086–2094.
- Ravishanker, P, and Hills, D. 1984. "Hydrogen Sulfide Removal from Anaerobic Digester Gas." *Agricultural Wastes* 11. pp. 167-179.
- Rickeybosch, E., M. Drouillon, and A. Vervaeren. 2011. "Techniques for transformation of biogas to biomethane." *Biomass and Bionergy Journal 35* (Elsevier) 35 pp. 1633-1644.
- Seader, J.D, E.J. Henley, and D.K. Roper. 2011. Separation process principles: chemical and biochemical operations. 3rd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Smith, J. M. 1970. Chemical Engineering Kinetics. San Francisco: McGraw-Hill,.
- Truong, L.V.A., and N. Abatzoglou. 2005. "A H2S reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector." *Journal of Biomass and Bioenergy* 29. pp. 142–151.
- Wang, H., D.M. Wang, and K.T. Chuang. 2011. "A sulfur removal and disposal process through H2S adsorption and regeneration : *Breakthrough* behaviour investigation." *Process Safety and Environmental Protection*. pp. 53-60.
- Wellinger, A. and A. Lindberg, 2005. Biogas Upgrading and Utilisation. IEA Bioenergy Task 24: Energy From Biological Conversion of Organic Waste. Diakses Mei 2011. http://www.biogasmax.eu/media/biogas_upgrading_and_utilisation_018031200_1011_24042007. pdf..
- XENERGY, Inc. 2002. "Toward a Renewable Power Supply: The Use of Bio-based Fuels in Stationary Fuel Cells.". http://www.nrbp.org/pdfs/pub31.pdf (diakses 15 Januari 2012).
- Zicari, S.M. 2003 Thesis Report: Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas using Cow-Manure Compost. Cornell University.