

PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH (FABA) SEBAGAI PENUDUNG MATERIAL POTENTIAL ACID FORMING (PAF) –HAL – HAL YANG MEMPENGARUHI PEMBACAAN KADAR OKSIGEN

¹⁾Rizky Muhib, ²⁾Nanang Supriyadi dan ³⁾Kris Pranoto

^{1,2,3}Departemen Lingkungan PT. Kaltim Prima Coal

Artikel masuk : 11-04-2022 , Artikel diterima : 29-08-2022

ABSTRAK

Kata Kunci: lapisan penudung, difusi oksigen, oksidasi, batuan berpotensi asam (Potential Acid Forming/PAF), air asam tambang

Keywords: dump cover, oxygen diffusion, oxidation, Potential Acid Forming (PAF) Rocks, acid mine drainage

Penetapan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai limbah Non B3 terdaftar pada PP 22/2021 tidak menghilangkan kewajiban untuk pengelolaan FABA secara bertanggung jawab. Setelah peraturan tersebut terbit, pemanfaatan FABA di KPC masih merujuk pada izin pemanfaatan FABA yang dimiliki, yaitu sebagai bahan baku lapisan penudung batuan yang berpotensi asam (Potential Acid Forming / PAF). Fungsi utama FABA sebagai lapisan penudung PAF adalah untuk menghalangi difusi oksigen ke dalam lapisan batuan asam sehingga tidak terjadi oksidasi yang dapat memicu terjadinya Air Asam Tambang. Pemanfaatan FABA dengan metode ini memerlukan pembuktian bahwa lapisan FABA tersebut mampu menahan difusi oksigen sehingga diperlukan pemantauan kadar oksigen dalam tiap lapisan penudung. Akurasi pembacaan kadar oksigen menjadi faktor yang sangat penting, sementara pembacaan sensor dapat menjadi tidak akurat karena dipengaruhi beberapa hal. Penelitian ini ditujukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pembacaan kadar oksigen pada lapisan NAF, FABA dan PAF. Fluktuasi kadar oksigen dalam lapisan penudung dipantau menggunakan sensor oksigen Apogee SO-210 yang dihubungkan ke data logger CR-1000X Campbell Scientific untuk perekaman data. Selain itu juga dilakukan perbandingan spesifikasi instrumen yang digunakan saat ini dengan penelitian sebelumnya. Dari hasil pengukuran dan pengamatan dapat disimpulkan bahwa sekurang-kurangnya ada 7 hal yang dapat mempengaruhi pembacaan kadar oksigen dalam lapisan penudung, yaitu: tipe alat ukur, survey topografi, pengeboran lubang monitoring, metode penutupan lubang bor, kompatibilitas data logger, kalibrasi sensor, dan konektivitas sensor.

Doi : <https://doi.org/10.36986/impj.v4i1.49>

ABSTRACT

The Determination of Fly Ash and Bottom Ash (FABA) as listed non-Hazardous waste in Government Decree No. 22/2021 did not omit the obligation to manage FABA properly. After the decree has been released, FABA exploitation in KPC still refers to the owned FABA exploitation permit, which is to utilize FABA as a dump cover material of Potential Acid Forming (PAF) rocks. The main function of FABA utilization as PAF covers is to barring oxygen diffusion from entering the PAF layer in order to prevent oxidation which can cause Acid Mine Drainage. These exploitation methods need some proof that FABA could barring the oxygen diffusion, therefore requires oxygen monitoring inside every cover layer. The reading accuracy of oxygen concentration is the important factor which determines the effectiveness of the dump covers, on the other side the sensor reading could be affected by sort things which lead to inaccuracy. This study is aimed to identify some factors which can affect the reading of oxygen concentration inside NAF, FABA and PAF layers. Fluctuation of oxygen concentration inside PAF covers were measured with SO-210 Apogee oxygen sensors which connected to CR-1000X Campbell Scientific datalogger to record the data. Besides that, comparison has also been made between existing and previous study instrument specifications. It can be concluded from the measurement and observation that there are at least 7 things which can affects the reading of oxygen concentration inside the dump cover system, which are: type of measuring device, topography survey, monitoring borehole drilling, borehole covering method, datalogger compatibility, sensor calibration and sensor connectivity.

PENDAHULUAN

Perubahan status Fly Ash dan Bottom Ash yang sebelumnya dikategorikan sebagai limbah B3 pada PP 101 / 2014 menjadi limbah non B3 terdaftar pada PP 22/2021, merupakan angin segar bagi perusahaan yang menghasilkan jenis limbah tersebut. Namun hal ini bukan berarti pengelolaan FABA tanpa tantangan. Di lampiran XV PP 22/2021

disebutkan bahwa limbah Non B3 yang dibuang ke TPA termasuk pelanggaran berat, hal ini dapat diartikan bahwa pengelolaan FABA masih belum bisa disejajarkan dengan limbah non B3 lain seperti sampah plastic, kayu dsb. Pengelolaan limbah FABA harus tetap dilakukan secara bertanggung jawab sesuai kaidah lingkungan serta dicantumkan dalam dokumen persetujuan lingkungan.

Salah satu jenis pemanfaatan FABA yang dapat menyerap FABA dalam jumlah besar dan kontinyu adalah pemanfaatan FABA sebagai penudung material berpotensi asam (Potential Acid Forming / PAF) di kegiatan reklamasi tambang. Jenis pemanfaatan ini - hingga saat ini - merupakan solusi pemanfaatan FABA dalam jumlah besar dan berkelanjutan untuk PLTU yang berada di mulut tambang. Hal ini disebabkan karena lahan reklamasi akan selalu ada sepanjang tambang tersebut masih beroperasi, sehingga area pun tersedia luas untuk pemanfaatan FABA dalam jumlah besar.

Dalam pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF, fungsi FABA adalah sebagai penghalang difusi oksigen sehingga mencegah oksidasi material pirit yang pada akhirnya mencegah pembentukan air asam tambang (AAT). Selain memiliki fungsi tersebut, FABA juga digunakan sebagai agen alkali yang dapat berfungsi sebagai penetral air pori.

Dikarenakan fungsi FABA sebagai penghalang difusi oksigen, maka kadar oksigen dalam timbunan dipantau secara otomatis menggunakan sensor oksigen yang ditanam dalam lapisan penudung. Sensor oksigen merupakan alat yang sangat sensitif dalam mengukur kadar oksigen dalam timbunan. Adanya kekurangcermatan dalam instalasi sensor oksigen dapat memicu kesalahan data dan yang lebih fatal adalah kerusakan alat / sensor. Dalam makalah ini akan dibahas mengenai hal-hal yang mempengaruhi pembacaan kadar oksigen sehingga dapat memicu terjadinya kesalahan data yang selanjutnya berpotensi mengindikasikan kegagalan fungsi lapisan penudung.

METODOLOGI PENELITIAN

Sesuai izin pemanfaatan FABA sebagai penudung material PAF yang dimiliki KPC, kadar oksigen maksimal yang dipersyaratkan dalam lapisan FABA adalah 1,5%.

Pemantauan kadar oksigen dilakukan dengan menggunakan sensor oksigen Apogee SO-210 yang dihubungkan dengan datalogger Campbell Scientific CR1000X. Sensor yang terhubung dengan data logger dipasang pada kedalaman spesifik sesuai data ketebalan tiap lapisan penudung untuk mengetahui konsentrasi oksigen pada masing-masing lapisan. Lubang bor kemudian ditutup kembali dengan tanah dan ditambahkan *sodium bentonite* untuk memastikan permukaan lubang bor kedap dan tidak terpengaruh udara dari luar timbunan. Pengeboran lubang pantau menggunakan alat drill Gemco type auger dengan jangkauan kedalaman maksimum 8 meter untuk mencapai kedalaman lapisan penudung hingga lapisan PAF.

Data konsentrasi oksigen yang dianalisa berasal dari rekaman data pada Uji Coba Pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF di lokasi J Void (mengacu pada persetujuan uji coba pemanfaatan FABA Nomor S.83/Menlhk/Setjen/PLB.3/2/2017) dan data utama dari rekaman data pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF di lokasi Galaxy Dump (mengacu pada izin pemanfaatan FABA sebagai Penudung PAF Nomor SK.660/Menlhk/Setjen/PLB.3/8/2019). Selain itu juga dilakukan perbandingan spesifikasi instrumen yang digunakan saat ini dengan penelitian sebelumnya maupun yang digunakan pada tahap Uji Coba di lokasi J

Void.

Analisa dari berbagai data yang didapatkan, baik pada saat uji coba maupun saat pemanfaatan FABA menghasilkan *best practice* yang dapat mencegah terjadinya ketidakakuratan pembacaan konsentrasi oksigen pada sensor, adanya data yang anomali dan lebih jauh adalah mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan pemantauan akibat instalasi yang kurang baik.



HASIL DAN PEMBAHASAN

Oksidasi mineral sulfida berkurang signifikan ketika konsentrasi oksigen pada pori batuan tambang kurang dari 1 atau 2 persen (USEPA., 1994) Berdasarkan kegiatan uji coba maupun implementasi pemanfaatan FABA sebagai penudung di KPC, maka beberapa hal di bawah ini perlu untuk diperhatikan dalam pemilihan maupun eksekusi di lapangan

Type alat pantau

KPC menggunakan alat pantau berupa sensor oksigen yang mampu untuk mendeteksi keberadaan oksigen hingga 0.001 %. Berbeda dengan penelitian sebelumnya dimana digunakan alat pengukur oksigen portable dengan cara menyedot udara dari dalam lubang bor untuk mengetahui konsentrasi oksigen di dalam timbunan. Perbandingan lebih lengkapnya terkait penggunaan alat ukur ini dijelaskan pada table di bawah ini:

Tabel 1. Perbandingan Alat Ukur Oksigen yang Digunakan di KPC

No.	Item		
1.	Brand, Type	Cosmos XP 3180, Oxygen Indicator	Apogee SO 210, Fast Response Thermistor Oxygen Sensor
2.	Metode deteksi oksigen	Penyedotan gas - Galvanic cell – reaksi kimia – arus listrik - display	Galvanic cell – reaksi kimia – arus listrik - datalogger
3.	Kelebihan	Ringan, portable, relative lebih murah	- Sensitif, Merekam data pada titik dimana sensor ditempatkan, - Frekuensi sampling dapat di set

			otomatis per satuan waktu - Memungkinkan untuk dilakukan analisa data pendukung yang lain pada satu waktu menggunakan datalogger yang sama (misal: kelembaban, saturasi dll)
4.	Kekurangan	- Udara yang disedot dan dideteksi berpotensi membawa udara dari area selain yang disasar, - Frekuensi sampling dilakukan manual	Relatif lebih mahal, pemasangan lebih rumit, perlu tambahan alat akuisisi data (datalogger)

Survey Topografi

Survey topografi merupakan tahapan yang cukup penting pada kegiatan pemanfaatan FABAs sebagai penudung PAF. Survey ini dilakukan untuk merekam topografi setiap lapisan penudung, sehingga saat pembuatan rencana pengeboran dapat direncanakan kedalaman pengeboran secara akurat. Pada implementasi pemanfaatan FABAs di KPC, survey dilakukan pada tahapan berikut ini:

- a. Setelah selesai penyiapan area PAF (area pemanfaatan), pada tahap ini survey topografi sangat dibutuhkan untuk memastikan area pemanfaatan telah diratakan dengan baik. Selain itu data topografi PAF diperlukan saat membuat rencana pengeboran
 - b. Setelah penudungan lapisan FABAs
 - c. Setelah penudungan lapisan NAF
 - d. Setelah penudungan lapisan tanah
- Keempat data topografi di atas kemudian akan digabungkan sehingga diperoleh profil ketebalan actual tiap lapisan penudung dan dapat direncanakan kedalaman pengeboran titik pantau oksigen

Teknik Pengeboran Titik Pantau

Teknik pengeboran yang tepat diperlukan untuk menjaga agar struktur dinding bor tetap terjaga. Pengeboran titik pantau di KPC menggunakan alat Gemco dengan type auger, tanpa menggunakan bantuan udara maupun air. Pengeboran dengan teknik *air blasting* sebaiknya dihindari, karena akan membuat rongga yang cukup besar pada lapisan FABAs. Selain itu pengeboran dengan bantuan air dapat mempengaruhi kelembaban dan saturasi dari lapisan penudung di sekitar lubang bor, sehingga sebaiknya juga dihindari

Teknik penutupan lubang bor

Penutupan lubang bor merupakan langkah yang krusial pada tahap persiapan pemantauan pada kegiatan pemanfaatan FABAs sebagai penudung PAF. Teknik penutupan lubang bor berhubungan dengan timing, material penutup, dan kedalaman penutupan lubang. Penutupan lubang bor yang kurang baik akan membuat permukaan lubang bor tidak kedap dan membuat pembacaan sensor tidak akurat.

Sensor oksigen diharapkan membaca konsentrasi oksigen relatif pada titik kedalaman yang diinginkan pada lapisan penudung. Pada udara bebas, konsentrasi oksigen relatif adalah sebesar 20.95%, artinya 20.95% dari keseluruhan molekul yang ada di udara bebas adalah molekul oksigen.

Berbeda dengan oksigen relatif, konsentrasi oksigen absolut adalah jumlah molekul oksigen per satuan volume udara. Pada hukum gas ideal, diketahui persamaan sebagai berikut:

$$PV = nRT \tag{1}$$

Keterangan :

P adalah tekanan

V adalah volume

n adalah jumlah mol

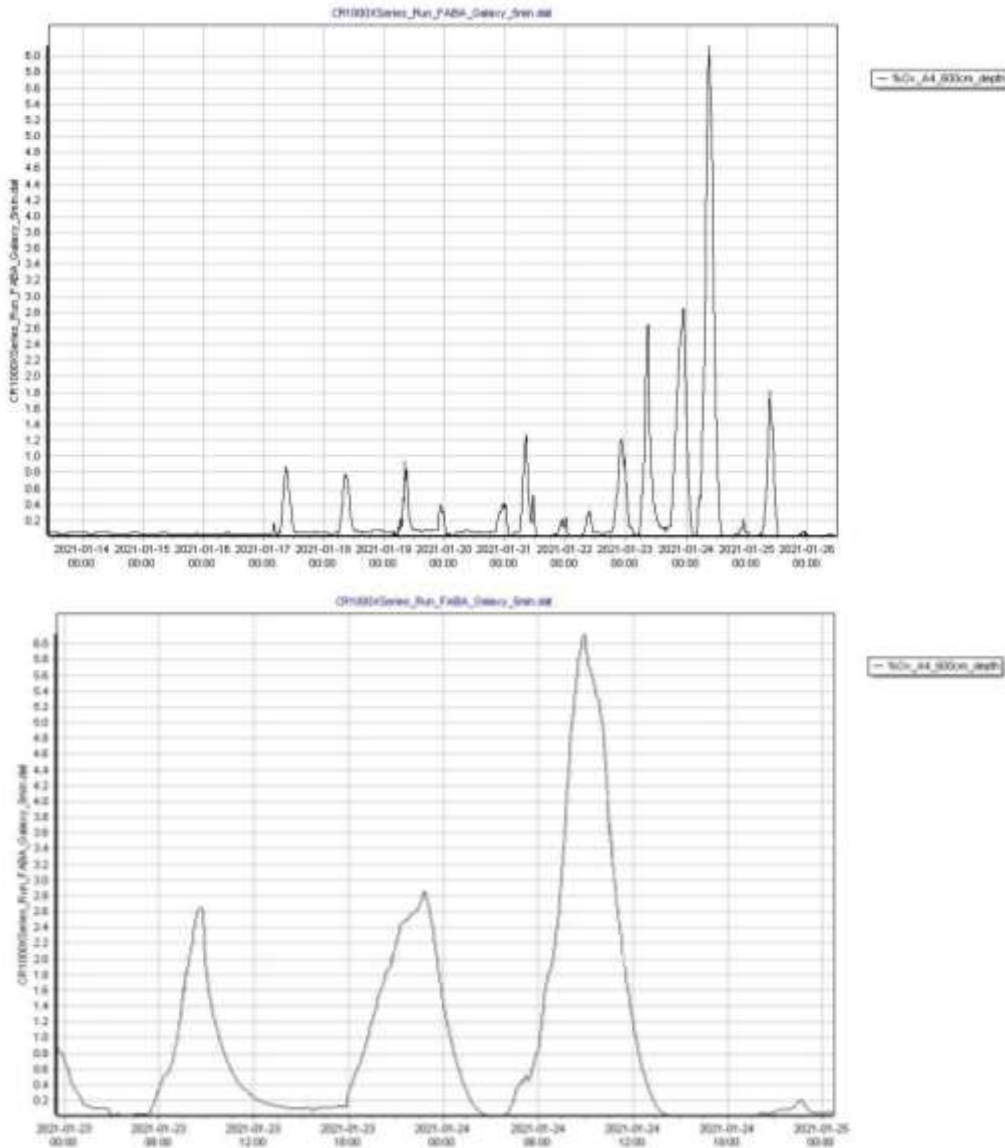
R adalah konstanta gas universal

T adalah suhu (K)

Volume udara akan mengembang jika tekanan udara turun atau suhu naik, dan ini mengakibatkan jumlah molekul oksigen per satuan volume akan mengalami penurunan. Sebaliknya, jika tekanan udara naik atau suhu udara turun, hal ini akan mengakibatkan volume udara menyusut dan jumlah molekul oksigen per satuan volume akan naik.

Ketidakakuratan pembacaan sensor pada penutupan lubang yang tidak kedap akan mengakibatkan sensor terpengaruh oleh perubahan tekanan udara maupun suhu udara ambien di luar lapisan penudung. Kasus ini terjadi pada awal instalasi sensor oksigen di area pemanfaatan FAB A – Galaxy Dump.

Grafik konsentrasi oksigen pada titik A4 pada tanggal 17 sampai 26 Januari 2021 menunjukkan adanya fluktuasi yang anomali. Konsentrasi oksigen naik dan turun hingga rentang konsentrasi oksigen 2-6% pada waktu tertentu.



Gambar 1. Grafik fluktuasi titik A4 sebelum perbaikan penutupan lubang pantau

Evaluasi pada hasil rekaman data logger ditemukan bahwa konsentrasi oksigen naik pada sekitar pukul 10.00 pagi dan 22.00 pada malam hari, dan konsentrasi oksigen turun ditunjukkan pada tabel berikut :

pada pukul 3.00 dini hari dan 15.00 sore hari. Pengukuran tekanan dan temperatur udara menggunakan barometer analog

Tabel 2. Hasil Pengukuran Suhu dan Tekanan Udara Ambien Pada Waktu Tertentu

Waktu	Tekanan Udara Ambien	Suhu Udara Ambien
10:20	99,8 kPa	27° C
15:30	99,5 kPa	35° C

Selain itu, pada pengecekan lapangan juga ditemukan adanya penurunan pada material penutup lubang (*collapse*) sekitar 1 cm yang

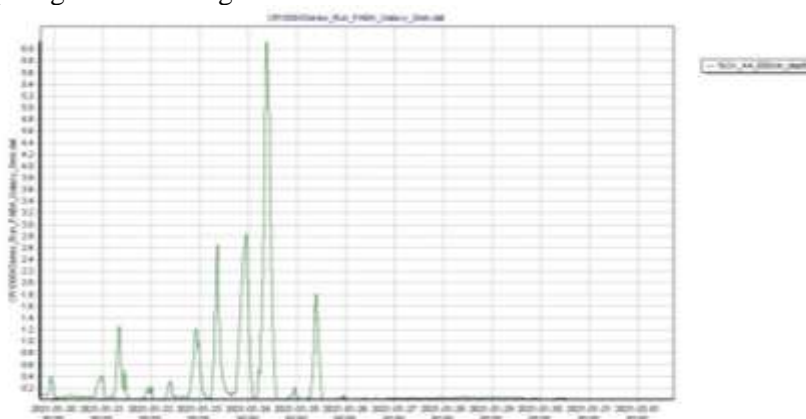
mengakibatkan timbulnya rongga dan tidak kedap.



Gambar 2. Penurunan (*collapse*) material penutup lubang titik A4

Meskipun telah ditutup dengan penutup pipa, penutupan lubang bor yang kurang sempurna seperti ini menimbulkan adanya rongga yang memungkinkan sensor terpengaruh oleh adanya tekanan dan suhu dari luar timbunan. Perbaikan dilakukan dengan penggantian material penutup bagian atas dengan *sodium*

bentonite yang dicampur dengan air untuk membuat tekstur seperti *clay*. Hasil pemantauan konsentrasi oksigen setelah dilakukan perbaikan penutup lubang dapat dilihat pada grafik di bawah ini (tanggal 27 Januari hingga akhir *axis*)



Gambar 3. Fluktuasi Kadar Oksigen yang Berhasil Dikoreksi Setelah Tanggal 26 Januari 2021

Selain itu, material penutup lubang juga harus dipastikan merupakan material yang kedap. Benda gas, termasuk oksigen, bergerak dalam tanah mengikuti hukum difusi. Parameter utama yang berkaitan dengan difusi gas di tanah adalah koefisien difusi tanah, yang merupakan sifat media dan gas yang dianalisa dan tergantung pada tekstur, struktur,

distribusi, ukuran dan konektivitas pori-pori serta celah berliku antar partikelnya (Neira et al., 2015).

Pada implementasi pemanfaatan FABA sebagai penutup PAF di area Galaxy Dump, KPC menggunakan material penutup berupa tanah di bagian 1 meter dasar lubang, dan kemudian ditutup dengan *sodium bentonite*

yang dicampur air terlebih dahulu untuk membuat tekstur dan fungsinya mirip *clay*. *Bentonite* dengan kandungan natrium sebagai kation utama yang dapat ditukar (dikenal dengan istilah *exchangeable cation*), mampu mengalami pengembangan volume hingga beberapa kali bila kontak dengan air (dikenal dengan istilah *swelling*), membentuk koloid, bernilai viskositas tinggi dan mampu mengikat air (Federation of Piling Specialists, 2006). Pemadatan dan saturasi air dalam tanah adalah penghambat utama dari perpindahan oksigen di dalam tanah, air menjadi penghambat yang lebih efektif (Papendick and Runkles, 1965; Moldrup et al., 2000a; Neale et al., 2000). Karena itu, sodium bentonite merupakan material yang baik untuk penutupan lubang monitoring pada pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF.

Instalasi sensor di dalam timbunan harus dilakukan segera setelah titik pantau dibor. Hal ini dilakukan untuk mencegah air hujan masuk ke dalam lubang dan menggerus bibir lubang sehingga lubang bor akan melebar dan terisi air. Sensor oksigen sebaiknya tidak dipasang pada lubang yang terisi air, karena sinyal keluaran sensor yang dialirkan ke data logger akan mengalami gangguan.

Kompatibilitas Data Logger

Datalogger merupakan alat akuisisi data yang dihubungkan ke sensor untuk mengirim perintah program dan juga merekam data pada tiap frekuensi waktu yang disetting. Datalogger yang kurang sesuai dengan sensor oksigen dapat mengakibatkan pembacaan yang kurang akurat. Pada Uji Coba Pemanfaatan FABA sebagai Penudung PAF di lokasi J Void, digunakan datalogger Intellilogger IL-80 dan sensor Apogee SO-210. Penggunaan IL-80 untuk durasi waktu yang lama dirasa kurang dapat diandalkan. Pembacaan data logger pada beberapa titik sensor oksigen menunjukkan hasil konsentrasi oksigen negatif pada beberapa bulan setelah penimbunan titik pantau.

Pada implementasi Pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF di area Galaxy Dump, digunakan datalogger Campbell Scientific CR1000X dan sensor Apogee SO-210. Hingga 8 bulan setelah sensor ditimbun, kualitas data yang didapatkan masih baik dan dapat diandalkan. Pembelian datalogger Campbell Scientific berdasarkan diskusi sebelumnya

dengan pabrikan Apogee. Untuk penggunaan sensor maupun datalogger lain, sebaiknya pengguna berdiskusi dulu dengan pabrikan untuk melihat kesesuaiannya.

Kalibrasi Sensor Oksigen

Umur pakai sensor oksigen seri SO-200 diperkirakan adalah 5 tahun dengan penggunaan terus menerus pada konsentrasi oksigen 20.95%. Umur pakai dapat lebih Panjang dengan menyimpan sensor pada suhu dingin (contohnya pada pendingin atau freezer) ketika tidak digunakan. Penurunan sinyal sensor pada penggunaan 1 tahun pada konsentrasi oksigen 20.95% ditunjukkan pada grafik di bawah. Sensor oksigen seri SO-200 akan mengalami penurunan arus listrik kira-kira sebesar 0.8 mV/tahun atau sebesar 6% dari sinyal keluaran pada saat kondisi baru (Apogee Oxygen Sensor Owner's Manual, 2016).

Kalibrasi ulang perlu dilakukan karena sinyal keluaran sensor oksigen akan mengalami penurunan dari waktu ke waktu. Pada pemantauan pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF, sensor oksigen telah ditimbun dalam tanah dan tidak dapat diambil kembali. Hal ini mengakibatkan tidak dapat dilakukan kalibrasi ulang pada kondisi ideal (konsentrasi oksigen ambien 20.95%). Sehingga penyesuaian perlu dilakukan pada faktor kalibrasi pada saat awal pemasangan sensor. Contohnya: jika pada awal pemasangan sinyal keluaran menunjukkan 13 mV yang kemudian dikonversi menjadi 20.95%, sehingga didapatkan factor kalibrasi sebagai berikut:

$$CF = \frac{20,95\%}{mV_c - mV_0} \quad (2)$$

Dimana :

CF = Faktor Kalibrasi

mV_c = sinyal keluaran saat kalibrasi (mV),

misal 12 mV saat sensor dalam kondisi baru

mV_0 = sinyal keluaran pada kondisi 0 oksigen, yaitu 0.3 mV

$$\hat{CF}_0 = \frac{20,95\%}{12 - 0,3}$$

(3)

Maka, faktor kalibrasi saat sensor masih baru

(CF_0) adalah = 1,7906

Pada sensor yang sama setelah penggunaan selama 1 tahun, diperkirakan sinyal keluaran

akan mengalami penurunan sebesar 6% atau sekitar 0.8 mV menjadi sekitar 11,2 mV pada kondisi 20,95% oksigen. Artinya perlu dilakukan penyesuaian faktor kalibrasi sebagai berikut:

$$CF_1 = \frac{20,95\%}{11,2 - 0,3}$$

(4)

Sehingga faktor kalibrasi setelah penggunaan 1 tahun (CF_1) akan mengalami penyesuaian menjadi 1,922

Masing-masing sensor oksigen yang digunakan akan ada perbedaan pada sinyal keluaran yang dihasilkan, oleh karena itu perlu dilakukan kalibrasi pada masing-masing sensor dan faktor kalibrasi pada masing-masing sensor akan berbeda juga.

Konektivitas Sensor

Sensor oksigen biasanya disupply dari pabrikan hanya dengan panjang kabel sekitar 5 meter. Untuk penggunaan pada kegiatan pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF, diperlukan panjang kabel sensor yang cukup dari dalam lubang bor hingga tersambung ke data logger pada permukaan tanah. Untuk pabrikan yang memiliki opsi untuk memesan sensor dengan panjang kabel tertentu, maka diperlukan perencanaan yang matang sebelum pemesanan sensor. Sehingga saat sensor yang dipesan tiba, panjang kabel sudah sesuai dan tidak perlu tambahan kabel atau penyambungan. Namun untuk sensor oksigen dengan standar kabel 5 meter, maka perlu dipesan juga kelengkapan kabel tambahan yang selanjutnya perlu dilakukan penyambungan kabel agar panjangnya sesuai dengan yang direncanakan.

Sambungan kabel sebaiknya dilakukan seminimal mungkin. Perencanaan kabel yang kurang baik akan mengakibatkan beberapa kali penyambungan. Penggunaan sensor di lapangan dalam waktu lama, mengakibatkan kabel akan terpapar panas dan hujan. Pada kabel dengan banyak sambungan akan meningkatkan resiko gangguan data pada sinyal keluaran karena masuknya air pada sambungan kabel.

KESIMPULAN

Pemantauan konsentrasi oksigen pada kegiatan pemanfaatan FABA sebagai penudung PAF

memiliki tantangan yang cukup banyak, dikarenakan penempatan alat pantau pada kondisi ekstrem di dalam lapisan penudung dengan jangka waktu yang lama. Sekurangnya ada 7 hal yang mempengaruhi akurasi pembacaan kadar oksigen dalam timbunan, yaitu:

1. Tipe alat pantau
2. Survey topografi
3. Teknik pengeboran titik pantau
4. Teknik penutupan lubang bor
5. Kompatibilitas data logger
6. Kalibrasi sensor oksigen
7. Konektivitas sensor

Perencanaan yang teliti terhadap 7 hal tersebut akan meningkatkan akurasi data oksigen yang direkam selama kegiatan pemantauan, sehingga dapat merepresentasikan performa lapisan penudung yang aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- Apogee Instruments, Inc. 2016. *Apogee Oxygen Sensor Owner's Manual, Models SO-110, SO-120, SO-210, and SO-220*.
- Bruce Bugbee, Mark Blonquist. *Absolute and Relative Gas Concentration: Understanding Oxygen in Air*. Apogee Instruments, Inc.
- Hillel, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, San Diego, California, USA.
- José Neira, Mauricio Ortiz, Luis Morales, and Edmundo Acevedo. 2015. *Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modelling*. Chilean Journal of Agricultural Research, 75, 35-44
- Moldrup, P., T. Olesen, J. Gamst, P. Schjønning, T. Yamaguchi, and D. Rolston. 2000a. *Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: water-induced linear reduction model*. Soil Science Society of America Journal 64:1588-1594.
- Neale, N., J. Hughes, and C. Ward. 2000. *Impacts of unsaturated zone properties on oxygen transport and aquifer reaeration*. Ground Water 38:784-794.
- Papendick, R.I., and J.R. Runkles. 1965. *Transient-state oxygen diffusion in soil: I. The case when rate of oxygen*

consumption is constant. Soil Science
100:251-261.

U.S.Environmental Protection Agency. 1994.
*Acid Mine Drainage
Prediction.* Technical Document 6-8

