

Pengujian Sulfur Oksida (SO_x) dari Emisi Sumber Tidak Bergerak Menggunakan Metode Ion Kromatografi

Sulfur Oxides (SO_x) Gas Testing from Stationary Emission Using Ion Chromatography Method

Retno Puji Lestari, Ricky Nelson, Resi Gifrianto, dan Bambang Hindratmo

Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan BLI-KLHK Kawasan Puspipstek Gedung 210,
Tangerang Selatan, 15314, e-mail: emc_acdep@yahoo.com

Diterima 13 Agustus 2020, direvisi 14 September 2020, disetujui 19 Oktober 2020

ABSTRAK

Pengujian Sulfur Oksida (SO_x) dari Emisi Sumber Tidak Bergerak Menggunakan Metode Ion Kromatografi. Emisi gas buang oksida-oksida sulfur yang terdiri dari SO₂ dan SO₃ merupakan salah satu polutan yang menyebabkan terjadinya pencemaran udara. Sumber SO_x umumnya berasal dari kegiatan emisi sumber tidak bergerak seperti pembangkit listrik, cerobong industri, pembakaran sumber domestik, maupun insinerator. Pengujian konsentrasi gas oksida-oksida sulfur (SO_x) dari emisi sumber tidak bergerak dilakukan sebagai salah satu kegiatan pengkajian metode di Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan (P3KLL) yang berlangsung pada September – Oktober 2018. Laboratorium P3KLL melakukan verifikasi dengan menentukan limit deteksi terhadap metode uji yang diadopsi dari JIS K 0103:2011 *Methods for determination of sulfur oxides in flue gas - Annex JC (normative)*. Instrumen kromatografi ion (IC) DIONEX ICS5000 tersebut dilengkapi dengan detektor konduktivitas, memiliki ukuran *loop* sampel 50µL, kolom separator IonPac AS18, kolom penjaga IonPac AG18 dan suppressor ASRS-II yang dioperasikan pada suhu 35°C. Larutan yang digunakan sebagai eluen adalah campuran 2,7 mM Na₂CO₃ dan 0,3 mM NaHCO₃ pada laju alir 1 L/menit. Tahapan kegiatan terdiri dari pengambilan contoh uji dari fasilitas cerobong genset dan proses verifikasi metode melalui analisis menggunakan IC. Hasil verifikasi metode pengujian SO_x dalam emisi gas buang sumber tidak bergerak fasilitas genset menggunakan kromatografi ion menunjukkan bahwa limit deteksi, LoD_(G) dan limit kuantifikasi, LoQ_(G) yang diperoleh masing-masing sebesar 4 mg/Nm³ dan 13 mg/Nm³, sedangkan limit linearitas, LoL sebesar 834 mg/Nm³. Metode ini telah terverifikasi sesuai persyaratan teknis, dan laboratorium mampu menerapkan metode pengujian tersebut.

Kata kunci: SO_x, oksida-oksida sulfur, emisi, sumber tidak bergerak, genset.

ABSTRACT

Sulfur Oxides (SO_x) Gas Testing from Stationary Emission Using Ion Chromatography Method. The sources of SO_x are generally derived from stationary emission sources such as power plants, industrial chimneys, domestic combustion, and incinerators. Determination of sulfur oxides (SO_x) gasses from stationary emission was conducted as a part of method study activities at the Center for Quality Research and Environmental Laboratories (P3KLL) which took place in September to October 2018. Laboratory of P3KLL managed to do verification method with determining the detection limit to the testing method which was adopted from JIS K 0103:2011 *Methods for determination of sulfur oxides in flue gas - Annex JC (normative)*. The ion chromatography (IC) instrument DIONEX ICS5000 was equipped with conductivity detector, 50µL size of sample loop, separator column IonPac AS18, guard column IonPac AG18 and suppressor ASRS-II which was operated at 35°C. The eluent was the mixture of 2,7 mM Na₂CO₃ and 0,3 mM NaHCO₃ at flow rate of 1 L/minute. The step of activities consisted of collecting sample from stack's genset facility and verifying method through analysis using IC. The verification result of Sox's testing method from stationary emission genset facility using ion chromatography showed that limit of detection, LoD_(G) and limit of quantification, LoQ_(G) were 4 mg/Nm³ and 13 mg/Nm³, respectively,

while the limit of linearity, LoL was 834 mg/Nm³. This method was verified based on technical condition and laboratory was able to apply this testing method.

Keywords: Persistent organic pollutant, organochlorines, konvensi Stockholm, national implementation plan, GCMS.

1. Pendahuluan

Oksida-oksida sulfur (SO_x) yang terdiri dari sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃), merupakan polutan yang dihasilkan dari kegiatan emisi sumber tidak bergerak seperti pembangkit listrik, cerobong industri, pembakaran sumber domestik, maupun insinerator, merupakan sumber terjadinya pencemaran udara (APIS, 2016; Jafarinejad, 2016; Lippmann, 2020). Oksidasi SO₂ dalam fase gas di awan dan kabut akan membentuk ion sulfat yang memberikan kontribusi terhadap partikulat (Azimi, Feng, & Yang, 2018; Dovrou *et al.*, 2019). Emisi SO₂, bersama-sama dengan NO_x berpotensi menyebabkan asidifikasi yang berpengaruh pada kualitas lingkungan dan juga berdampak buruk terhadap makhluk hidup (Azimi *et al.*, 2018). Sumber gas SO₂ di industri berasal dari boiler berbahan bakar batubara (Fu *et al.*, 2017).

Metode titrimetri, spektrofotometri, dan elektroda ion selektif umumnya digunakan untuk menentukan komponen polutan dari emisi sumber tidak bergerak (JIS, 2011; Nonomura & Kurita, 2011). Metode pengujian yang diterbitkan oleh International Standard Organization (ISO) yang berpusat di Geneva adalah ISO 7934:1989 Stationary source emission – Determination of the mass concentration of sulfur dioxide – Hydrogen peroxide/barium perchlorate/Thorin method (ISO, 1989) dan ISO 11632 : 1998 Stationary source emission – Determination of the mass concentration of sulfur dioxide – ion chromatography method (ISO, 1998). Sebelum tahun 2011, panduan

Japan Industrial Standard (JIS) belum mengadopsi metode IC untuk pengujian kecuali untuk parameter HCl and Cl₂ dalam emisi sumber tidak bergerak (Nonomura & Kurita, 2011). Dalam JIS tahun 2011, pada bagian JIS K 0103:2011 dilampirkan *Annex JC (normative): simultaneous analysis method of sulfur hydroxides and hydrogen chloride by ion chromatography*. Hal ini merupakan tambahan dari opsional metode penentuan yang sebelumnya menggunakan metode turbidimetri (*light scattering method*) pada *Annex JA* dan *neutralization titrimetry* pada *Annex JB*.

Adanya variasi jenis bahan bakar dengan kandungan sulfur yang berbeda serta proses industri, konsentrasi polutan SO_x biasanya relatif rendah beberapa jenis fasilitas cerobong dan menjadi lebih sulit dideteksi apabila menggunakan metode konvensional. Kromatografi ion (IC) dipandang sebagai salah satu pilihan metode analisis yang paling tepat guna penentuan polutan dalam konsentrasi rendah, meskipun rentang ukur dengan metode ini cukup luas. IC merupakan suatu instrument yang memiliki kecepatan, selektivitas (Todorović, Rajaković, & Onjia, 2017), dan sensitivitas yang lebih tinggi (Michalski, 2016), serta mampu mengukur analit pada konsentrasi rendah (Nesterenko & Paull, 2017; Small, 2013; Weiss, 2016). Secara prinsip, konsep dasar metode ini adalah pemisahan berdasarkan interaksi muatan positif dan negatif dengan molekul spesifik pada analit ion dengan matriks dalam fase diam (Sarzanini & Bruzzoniti, 2016). Metode ini juga dapat melakukan

deteksi secara simultan dan memiliki kestabilan pada kolom pemisah (Yoshikawa, Uekusa, & Sakuragawa, 2015; Zafirakha, Smolenkov, & Shpigun, 2016).

Di Indonesia, cara uji SO_x pada emisi gas buang sumber tidak bergerak mengacu pada SNI 19-7117.3.1-2005 (BSN, 2005), sementara cara uji SO₂ pada emisi gas buang sumber tidak bergerak merujuk pada metode SNI 7117.18-2009 : Bagian 18 (BSN, 2009). Pengujian SO_x dan SO₂ ini digunakan untuk mengukur pada rentang konsentrasi 5 – 300 ppm (14-860 mg/Nm³). Kedua metode SNI tersebut menggunakan peralatan spektrofotometer secara turbidimetri. Pemilihan metoda alternatif analisis untuk pengujian SO_x maupun SO₂ dipandang perlu. Untuk meningkatkan kemampuan pengujian SO_x, laboratorium P3KLL perlu melakukan verifikasi metode JIS K 0103:2011 *Methods for determination of sulfur oxides in flue gas - Annex JC (normative): Simultaneous analysis method of sulfur hydroxides and hydrogen chloride by ion chromatography* (JIS, 2011). Hasil verifikasi dapat menjadi

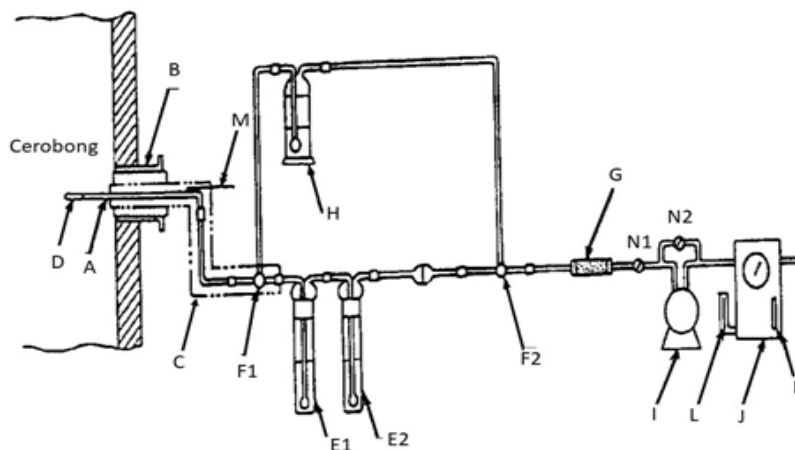
metode analisis alternatif untuk pengujian tersebut.

2. Metodologi

Kajian ini terdiri dari pengambilan contoh uji yang dilakukan bulan September - Oktober 2018 pada fasilitas genset dan proses analisis dilakukan di laboratorium udara Pusat Penelitian dan Pengembangan Kualitas dan Laboratorium Lingkungan – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (P3KLL – KLHK) di Serpong. Metode pengujian mengacu pada JIS K 0103 : 2011. *Methods for determination of sulfur oxides in flue gas : Annex JC*.

2. 1. Peralatan dan bahan

Peralatan pengambilan contoh uji emisi terdiri dari serangkaian peralatan yang dapat dilihat pada Gambar 1. Alat-alat gelas yang dibutuhkan adalah labu ukur 100 mL, labu ukur 50 mL, beaker glass 10 mL, pipet volumetrik, neraca analitik, gelas ukur 100 mL, impinger 250 ml, gelas piala 100 ml, dan botol semprot. Selain itu, instrument analisis yang digunakan adalah kromatografi



Gambar 1. Rangkaian Peralatan Pengambilan Contoh Uji Emisi

Keterangan gambar:

A : pipa pengambil contoh uji	F1, F2 : kran cabang tiga	K : termometer
B : flange	G : tabung pengering	L : manometer
C : elemen pemanas	H : botol pencuci	M : dry gas meter
D : glass wool	I : pompa penghisap	N1 : kran penutup
E1, E2 : botol penyerap	J : gas meter tipe basah atau kering	N2 : kran pengatur kecepatan alir



Gambar 2. Pengambilan Contoh Uji Emisi di Cerobong

ion DIONEX ICS5000. Bahan yang digunakan adalah bahan kimia komersial berkualitas p.a terdiri dari larutan standar SO_4^{2-} 1000 mg/L, larutan eluen kromatografi : 2,7 mM Na_2CO_3 + 0,3 mM NaHCO_3 dan larutan H_2O_2 30%. Sebagai bagian persyaratan verifikasi metode, dilakukan evaluasi kelaikan peralatan pengambilan contoh uji, peralatan gelas, dan instrumen yang memiliki pengaruh signifikan terhadap pengujian SO_2 .

2.2. Pengambilan contoh uji

Sebanyak 50 mL larutan penyerap dimasukkan ke dalam masing-masing impinger 250 ml. Pengambilan contoh uji dilakukan sampai volume total 20 L dengan senantiasa mengatur laju alir gas meter 2 L/ menit. Volume contoh uji gas yang terambil dihitung pada kondisi standar atmosferik (25°C, 760mm Hg) dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_s = V \times \frac{298}{273 + t} \times \frac{(P_a + P_m - P_v)}{760} \dots(1)$$

Keterangan:

- Vs : volume contoh uji gas dalam kondisi normal (L)
- V : volume dari pembacaan gas meter (L)
- Pa : tekanan udara atmosfer (mm Hg)
- Pm : tekanan gauge dibaca pada gas meter (mm Hg)
- Pv : tekanan uap air jenuh pada temperatur t°C (mm Hg)
- t : temperatur gas dibaca pada gas meter (°C)

Setelah pengambilan contoh uji dilakukan, larutan contoh uji dari kedua botol penyerap dipindahkan ke dalam labu ukur 100 mL, dibilas dan diencerkan dengan air suling sampai tanda tera lalu dihomogenkan. Pembuatan larutan blanko diambil dari 100 mL air suling.

2. 3. Instrumen

Analisis contoh uji SO_2 dan blanko dilakukan dengan menggunakan IC DIONEX ICS-5000 yang dilengkapi dengan detektor konduktivitas, dan memiliki ukuran loop sampel 50µL. Kolom separator IonPac AS18 dengan kolom penjaga (*guard column*) IonPac AG18 dan suppressor ASRS-II dioperasikan pada suhu 35°C. Larutan yang digunakan sebagai eluen adalah 2,7 mM Na_2CO_3 dan 0,3 mM NaHCO_3 dengan laju alir 1 L/menit (DIONEX, 2010).

4. Perhitungan

Dalam JIS K0103:2011, konsentrasi oksida sulfur dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C_v = \frac{0.233x(a - b) \times v}{V_s} \times 1000 \dots\dots\dots(2)$$

$$C_w = \frac{0.667x(a - b) \times v}{V_s} \times 1000 \dots\dots\dots(3)$$

$$C_w = C_v \times 2.86 \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- Cv : volume fraksi oksida sulfur (ppm)
- Cw : konsentrasi oksida sulfur sebagai sulfur dioksida (mg/m³)
- a : jumlah ion sulfat sampel (mg SO₄²⁻)
- b : jumlah ion sulfat blanko (mg SO₄²⁻)
- v : volume labu ukur
- Vs : volume contoh gas uji pada 25°C, 760 mmHg (L)
- 0.233 : volume oksida sulfur (SO₂+SO₃)
- 0.667 : berat sulfur dioksida (SO₂)
- 2.86 : massa konsentrasi sulfur dioksida (SO₂)

2. 5. Verifikasi metode

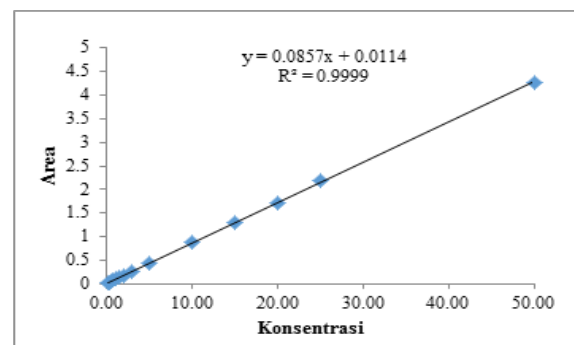
Tahapan verifikasi metode dilakukan dengan pembuatan kurva kalibrasi pada rentang kerja metode sebagaimana tercantum pada JIS K 0103:2011 untuk menghitung batasan metode (*Limit of Detection, LoD*) dan batas kuantifikasi (*Limit of Quantitation, LoQ*). Dari kurva kalibrasi tersebut didapat nilai LoD dan LoQ dalam satuan mg/L. Nilai LoD = *Std. Error* x 3/*slope*, sementara LoQ = *Std. Error* x 10/*slope*. Nilai tersebut harus dikonversi ke dalam satuan udara (mg/Nm³) dengan mempertimbangkan data lapangan saat pengambilan sampel dilakukan. Penentuan batas linearitas (*Limit of Linearity, LoL*) dilakukan dengan pengukuran masing - masing 10 kali terhadap konsentrasi larutan standar terendah dan standar tertinggi (Hadi, 2009). Standar deviasi masing-masing konsentrasi larutan tersebut dihitung dan dilakukan perhitungan uji F serta dibandingkan dengan nilai tabel F. Pengujian akurasi dengan menambahkan larutan spike berupa larutan standar SO₄²⁻ 1 ppm ke dalam larutan contoh uji.

3. Hasil dan Pembahasan

Nilai LoD dan LoQ pengujian gas SO_x dari emisi sumber tidak bergerak menggunakan IC ditentukan melalui pembuatan kurva kalibrasi dengan mengukur area kromatogram pada deret kurva standar skala penuh tanpa blanko. Hasil pengukuran dihitung untuk mencari persamaan garis dan linearitas seperti terlihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Kurva Kalibrasi

No	Konsentrasi (mg/L)	Area
Std-1	0,2	0,0289
Std-2	0,4	0,0396
Std-3	0,6	0,0572
Std-4	0,8	0,0777
Std-5	1,2	0,1105
Std-6	1,6	0,1382
Std-7	2	0,1779
Std-8	3	0,2671
Std-9	5	0,4341
Std-10	10	0,8721
Std-11	15	1,3077
Std-12	20	1,7219
Std-13	25	2,1923
Std-14	50	4,2732



Gambar 3. Kurva Kalibrasi SO₄²⁻

Melalui persamaan regresi linear yang didapatkan dari kurva kalibrasi ini, maka nilai LoD dan LoQ dalam matriks larutan dapat ditentukan.

Tabel 2. Penentuan Linearitas Kurva Kalibrasi dan *Method Slope*

Keterangan	Nilai
<i>Method Slope</i>	0,0857
<i>Intercept</i>	0,0114
<i>Correlation Determination (R)</i>	0,9999
<i>Correlation Coefficient (r)</i>	0,9999
Batas keberterimaan	r ≥ 0,995
Kesimpulan linearitas	Diterima

Tabel 3. Penentuan LoD dan LoQ

Keterangan	Nilai	
<i>Slope</i>	0,0857	
<i>Std. Error</i>	0,0138	
LoD (larutan)	0,4847	
LoQ (larutan)	1,6157	
	Vs (m ³)	(mg/Nm ³)
LoD _(G)	0,02	4
LoQ _(G)	0,02	13

Dari hasil perhitungan batas deteksi melalui kurva kalibrasi tersebut didapatkan nilai LoQ_(G) SO₂ dalam matriks udara sebesar 13 mg/Nm³ setelah dikonversi dengan mempertimbangkan volume udara yang dihisap, suhu udara, tekanan atmosfer, dan tekanan gauge yang dibaca pada gas meter.

Guna menjamin akurasi kurva kalibrasi sesaat setelah terbentuk dan sebelum pengujian contoh, dilakukan pengukuran ulang larutan standar tengah setelah pembuatan kurva kalibrasi. Konsentrasi dihitung berdasarkan persamaan regresi linier yang diperoleh, dengan syarat devias 5% atau %R = 100±5. Hasil Tabel 4. telah memenuhi standar kontrol laboratorium.

Instrumen DIONEX ICS500 mampu mengukur SO₄²⁻ tertinggi pada konsentrasi 100 mg/L, dengan demikian perhitungan konsentrasi SO₂ tertinggi di udara emisi yang dapat terukur adalah sebesar 834 mg/ Nm³. Dalam pembuktian batas linearitas melalui perhitungan Fhitung, pengukuran larutan standar SO₄²⁻ dilakukan pada konsentrasi 50 mg/L untuk menjaga kestabilan kolom pemisah pada instrumen agar tidak menyebabkan penyumbatan dan kerusakan, baik pada kolom maupun suppressor. Di samping itu, hampir tidak pernah pengukuran ditemukan konsentrasi larutan SO₄²⁻ yang cukup tinggi hingga mencapai 100 mg/L. Apabila ada, maka contoh uji tersebut harus dilakukan pengenceran.

Penentuan limit linearitas atau batas kuantifikasi dilakukan untuk melihat kemampuan metode analisis yang memberikan respon proporsional terhadap konsentrasi analit dalam sampel, dimana LoL merupakan batas kadar tertinggi analit dalam pengujian tersebut. Rentang kerja tersebut harus berupa garis linear yang memenuhi perhitungan secara statistika.

Pengukuran yang dilakukan pada

Tabel 4. Pengukuran Larutan Standar Tengah

Larutan standar	Konsentrasi (mg/L)	Area	Kons. hitung (mg/L)	%Rccs
Std-8	3	0,2671	2,9850	99,5

Tabel 5. Penentuan *Limit of Linearity (LoL)*

Kons (mg/L)	Area-1	Area-2	Area-3	Area-4	Area-5	Area-6	Area-7	Area-8	Area-9	Area-10	SD
0,4	0,040	0,039	0,040	0,039	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,00023
50	4,127	4,128	4,127	4,127	4,127	4,127	4,127	4,127	4,127	4,127	0,00011

$$F_{hitung} = \frac{SD_1^2}{SD_2^2} = 0,212$$

Derajat kebebasan, df = n - 1 dan tingkat kepercayaan 99%, α = 0,01 maka Ftabel = F_(0,01; 9; 9) = 3,69754.

Tabel 6. juga merupakan tahapan analisis guna mendapatkan akurasi dan presisi tinggi melalui kedapatulangan (% *recovery*) dan pengulangan analisis.

JIS K 0103:2011 Annex JC (normative) menjelaskan metode analisis SO_x dan HCl secara simultan dengan

menggunakan pelarut H₂O₂ (1+99) yang ditempatkan sebanyak 50 ml secara terpisah dalam 2 botol impinger, dimana volume saat pengambilan contoh uji adalah 20 L. Rentang kerja SO_x dalam metode acuannya yaitu JIS K 0103:2011 adalah sebesar 35 – 829 mg/Nm³, sementara hasil yang didapatkan pada

Tabel 6. Penentuan *Method Detection Limit (MDL)*

Ulangan	Kons.sampel (mg/L)	Kons.sampel+spike (mg/L)	Kons.spike (mg/L)	% Recovery
1	3,111	4,160	1,049	104,9
2	3,011	4,103	1,093	109,3
3	3,279	4,267	0,988	98,8
4	3,243	4,233	0,990	99,0
5	3,200	4,204	1,004	100,4
6	3,235	4,202	0,968	96,8
7	3,246	4,235	0,989	98,9
Rata-rata			1,011	101,1
Standar deviasi (SD)			0,044	
MDL = 3,143 x SD			0,138	
% RSD			4,34	
Batas Keberterimaan				
1) MDL x 10 > Spike		1,38 >1		Diterima
2) MDL < spike		0,138 <1		Diterima
3) %Recovery (100±25)		101		

Tabel 7. Ringkasan Hasil Verifikasi

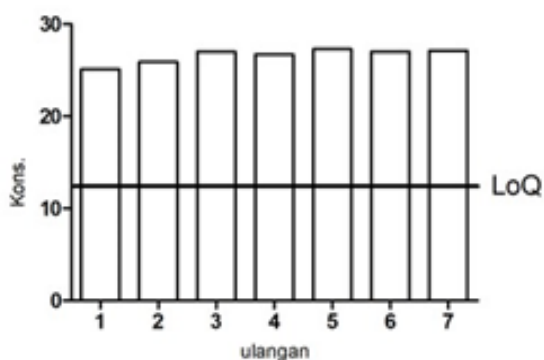
Uraian	Hasil	Batas Keberterimaan	Keterangan
Akurasi	101%	70 - 125 %	Diterima
Batas Deteksi Metode	MDL = 0.138 mg/L dengan kadar target 1 mg/L	MDL estimasi = (4/10) x 0.4 mg/L = 0.16 mg/L	Diterima
	%RSD = 4.34 %	%RSD = 10.70%	Diterima
	%R = 101 %	%R = 70 - 125 %	Diterima
Batas Kuantifikasi	0,439 mg/L	Jika MDL diterima, maka LoQ = 10xSD diterima	Diterima
Batas Linieritas	LoL kurva kalibrasi = 50 mg/L r = 0,9999 Significant F = 6.97193E-25	Uji linearitas: Koefisien (r) ≥ 0.995 Significant F ≤ 0.05	Diterima
	F _{hitung} = 0,212 F _{tabel} = 3.6975 LoL alat IC DIONEX ICS5000 = 100 mg/L	Uji F: F _{hitung} ≤ F _{tabel}	Diterima
Kesimpulan	Metode terverifikasi sesuai persyaratan teknis		

kegiatan ini adalah 13-834 mg/Nm³. Adanya perbedaan nilai limit deteksi yang diperoleh dapat terjadi akibat perbedaan limit deteksi dari sensitivitas instrumen yang digunakan.

Hasil pengujian contoh uji oksida sulfur emisi sumber tidak bergerak di fasilitas genset P3KLL umumnya kecil. Rata-rata pengukuran SO_x menggunakan metode IC adalah 26,6 mg/Nm³ dari hasil pengukuran SO_x sebanyak 7 kali.

Tinggi rendahnya konsentrasi SO_x atau SO₂ dari emisi fasilitas genset akan sangat tergantung pada kualitas bahan bakar. Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan di P3KLL sebelumnya, pengujian IC pada kajian ini memiliki nilai lebih tinggi dengan pengujian menggunakan metode spektrofotometri dengan konsentrasi sebelum dikoreksi oksigen adalah sebesar 10-15 mg/Nm³. Hal ini menjadi agak sulit untuk mengaplikasikan hasil verifikasi metode, karena hasil pengukuran di genset berada pada kisaran mendekati LoD.

Pengujian konsentrasi gas dari emisi sumber tidak bergerak yang pernah dilakukan di P3KLL dengan menggunakan metode analisis IC adalah untuk parameter HCl secara terpisah, tidak simultan (Lestari, Gifrianto, & Hadi, 2017). Apabila sampel banyak mengandung senyawa halogen, maka larutan harus diencerkan sebelum analisis dengan IC. Sampel yang berasal dari cerobong proses berpotensi mengandung berbagai jenis polutan. Teknologi IC



Gambar 4. Hasil pengujian SO_x di fasilitas genset P3KLL

terkini mampu mengatasi permasalahan tersebut dengan adanya kolom *hydroxide-selective anion-exchange, reagent free ion chromatograph eluent generator*, dan *high-capacity electrolytically regenerated suppressor* (Zhang *et al.*, 2012).

Dalam peraturan perundangan tidak tersedia baku mutu SO_x, hanya SO₂. Baku mutu SO₂ untuk fasilitas pembangkit tenaga diesel bahan baku minyak solar bagi usaha dan/atau kegiatan dengan kapasitas ≤ 3 MW (kurang dari sama dengan tiga mega watt) setelah dikoreksi oksigen sebesar 5% dalam keadaan kering menurut P.15/MenLHK/Setjen/ Kum.1/4/2019 adalah 800 mg/Nm³ (KLHK, 2019). Namun demikian, sesuai dengan tujuan verifikasi untuk mendapatkan metoda alternatif SO_x ini, laboratorium mampu melakukan pengujian sesuai persyaratan. Untuk melengkapi masalah konversi SO_x menjadi SO₂, masih perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut dengan mengadopsi beberapa langkah pengujian dari SNI 7117.18-2009. Kajian ini juga dapat diverifikasi lebih lanjut dengan pengukuran gas menggunakan *automatic gas analyzer*.

4. Simpulan

Hasil verifikasi metode pengujian SO_x dalam emisi gas buang sumber tidak bergerak menggunakan kromatografi ion adalah LoD_(G) dan LoQ_(G) sebesar 4 mg/Nm³ dan 13 mg/Nm³, sedangkan LoL = 834 mg/Nm³. Hasil verifikasi telah memenuhi persyaratan teknis.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim sampling laboratorium udara beserta pihak-pihak yang membantu pengujian, dan terutama kepada Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan - KLHK Serpong untuk fasilitas dan dana penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan pada tim editor dan mitra bestari atas masukannya dalam penulisan.

6. Kepengarangan

Peran masing-masing pengarang (*authors*) dalam penulisan ini adalah Penulis ke 1 sebagai konseptor dan penyusun tulisan secara keseluruhan, Penulis ke 2 melakukan verifikasi data dan pembuatan bagian hasil pembahasan, sementara Penulis ke 3 dan ke 4 melakukan proses pengujian dan studi pustaka. Seluruh tim terlibat dalam pengambilan contoh uji.

Daftar Pustaka

- APIS. (2016). Sulphur dioxide : emission and trends. Retrieved from http://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/overview_SO2.htm
- Azimi, M., Feng, F., & Yang, Y. (2018). Air pollution inequality and its sources in SO₂ and NO_x emissions among Chinese provinces from 2006 to 2015. *Sustainability*, 10(2), 367.
- BSN. (2005). SNI 19-7117.3.1-2005 Emisi gas buang sumber tidak bergerak. *Bagian 3: Oksida-oksida sulfur (SOx)- seksi 1 : Cara uji dengan metoda turbidimetri menggunakan spektrofotometri*. Jakarta.
- BSN. (2009). SNI 7117.18-2009 Emisi gas buang – Sumber tidak bergerak. *Bagian 18: Cara uji sulfur dioksida (SO₂) secara turbidimetri menggunakan spektrofotometer*. Jakarta: BSN.
- DIONEX. (2010). Ion chromatography from basis to application. In Dionex (Ed.), *Dionex Ion Chromatography Seminar*. Jakarta.
- Dovrou, E., Lim, C. Y., Canagaratna, M. R., Kroll, J. H., Worsnop, D. R., & Keutsch, F. N. (2019). Measurement techniques for identifying and quantifying hydroxymethanesulfonate (HMS) in an aqueous matrix and particulate matter using aerosol mass spectrometry and ion chromatography. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5303-5315.
- Fu, X., Wang, S., Xing, J., Zhang, X., Wang, T., & Hao, J. (2017). Increasing ammonia concentrations reduce the effectiveness of particle pollution control achieved via SO₂ and NO_x emissions reduction in east China. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(6), 221-227.
- Hadi, A. (2009). *Verifikasi Metode Pengujian Parameter Kualitas Lingkungan*. Jakarta.
- ISO. (1989). ISO 7934 Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of sulfur dioxide - Hydrogen peroxide/barium perchlorate/Thorin method (Vol. ISO 7934). Geneva.
- ISO. (1998). ISO 11632 : Stationary source emissions – Determination of mass concentration of sulfur dioxide – Ion Chromatography. (Vol. ISO 11632). Geneva: ISO.
- Jafarinejad, S. (2016). Control and treatment of sulfur compounds specially sulfur oxides (SOx) emissions from the petroleum industry: a review. *Chemistry International*, 2(4), 242-253.
- JIS. (2011). JIS K 0103 : 2011 Methods for determination of sulfur oxide in flue gas. *Annex JC (normative): simultaneous analysis method of sulfur hydroxides and hydrogen chloride by ion chromatography*. Tokyo: Japan Standard Association.
- KLHK. (2019). Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Thermal P.15/MenLHK/Setjen/Kum.1/4/2019 Lampiran 3. *Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel*. Jakarta: KLHK.
- Lestari, R. P., Gifrianto, R., & Hadi, A. (2017). Penentuan limit deteksi pengujian gas hidrogen klorida (HCl) dari emisi sumber tidak bergerak menggunakan kromatografi ion. *Ecolab*, 11(1), 10. doi://10.20886/jklh.2017.11.1.32-41.
- Lippmann, M. (2020). Sulfur oxides (SOX) SO₂, H₂SO₄, NH₄HSO₄, and (NH₄)₂SO₄. In M. Lippmann (Ed.), *Environmental Toxicants: Human Exposures and Their Health Effects* (pp. 927-971): Wiley Online Library.
- Michalski, R. (2016). *Application of IC-MS and IC-ICP-MS in environmental research*: Wiley Online Library.
- Nesterenko, P. N., & Paull, B. (2017). *Ion chromatography Liquid Chromatography*

- (pp. 205-244): Elsevier.
- Nonomura, M., & Kurita, K. (2011). Simultaneous determination of halogen compounds and sulfur oxides in flue gas by ion chromatography. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 5(4).
- Sarzanini, C., & Bruzzoniti, M. C. (2016). 14 Ion chromatography: Modes for metal ions analysis. *Handbook of HPLC*, 385.
- Small, H. (2013). *Ion chromatography*: Springer Science & Business Media.
- Todorović, Ž., Rajaković, L. V., & Onjia, A. E. (2017). Modelling of cations retention in ion chromatography with methanesulfonic acid as eluent. *Hemijska industrija*, 71(1), 27-33.
- Weiss, J. (2016). *Handbook of Ion Chromatography, 3 Volume Set* (Vol. 1): John Wiley & Sons.
- Yoshikawa, K., Uekusa, Y., & Sakuragawa, A. (2015). Determination of sulphite in wines using suppressed ion chromatography. *Food Chemistry*, 174, 387-391. doi://10.1016/j.foodchem.2014.11.066.
- Zatirakha, A., Smolenkov, A., & Shpigun, O. (2016). Preparation and chromatographic performance of polymer-based anion exchangers for ion chromatography: A review. *Analytica chimica acta*, 904, 33-50.
- Zhang, S., Zhao, T., Wang, J., Qu, X., Chen, W., & Han, Y. (2012). Determination of fluorine, chlorine and bromine in household products by means of oxygen bomb combustion and ion chromatography. *Journal of Chromatographic Science*, 51(1), 65-69. doi://10.1093/chromsci/bms108.