

CEK ANTARA SENSITIVITAS MEDAN TEKANAN MIKROFON TIPE LS1P SEBAGAI REALISASI PEMELIHARAAN STANDAR UTAMA BESARAN AKUSTIK

Intermediate Check of Type LS1P Pressure Field Microphone Sensitivity as the Realization for Maintaining the Primary Standard of Acoustics Unit

Dodi Rusjadi TE.

Subbid Akustik dan Getaran, Puslit KIM-LIPI

Diajukan: 14 April 2011, Dinilai: 21 April 2011, Diterima: 9 Agustus 2011

Abstrak

Telah dilaksanakan karakterisasi secara berkala terhadap mikrofon standar laboratorium tipe B&K 4160, nomor seri 873968. Pekerjaan ini dilakukan sebagai realisasi cek antara (*intermediate check*) terhadap standar utama besaran akustik. Dari hasil pengukuran nilai sensitivitas medan tekanan mikrofon pada semua frekuensi yang diukur menunjukkan penurunan sebagai fungsi dari waktu kalibrasi. Perubahan nilai sensitivitas (*drift*) yang dihasilkan oleh mikrofon standar tersebut di atas akan dibahas secara menyeluruh dalam makalah ini.

Kata kunci: cek antara, sensitivitas medan tekanan, mikrofon, standar utama, akustik.

Abstract

The pressure-field sensitivity of laboratory standard microphone type B&K 4160, serial number of 873968 has been periodically characterized. This project is conducted as the realization of intermediate check for primary standard of acoustics unit. From measurement results showed that the values of pressure field microphone sensitivity for all frequencies measured are decreased as the function of calibration time. The sensitivity drift which is performed by the laboratory standard microphone is described in this paper.

Keywords : *intermediate check, pressure-field sensitivity, microphone, primary standard, acoustics.*

1. PENDAHULUAN

Pengukuran akustik telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari saat ini. Terlebih lagi pada abad modern ini peran akustik begitu penting sebagai perlindungan konsumen, perlindungan tenaga kerja, mutu kehidupan masyarakat dan pelestarian lingkungan. Semua pengukuran besaran akustik harus dapat mengkaitkan ke standar primer (utama) melalui suatu rantai tak terputus yang kesemuanya memiliki ketidakpastian yang dinyatakan. Salah satu standar utama besaran akustik adalah mikrofon LS1P harus terpelihara nilai dan ketertelusurannya. "LS" singkatan dari kata laboratorium standard, "1" artinya berdiameter 1 inci dan "P" berasal dari kata *pressure* atau berarti berjenis medan tekanan.

Sejak tahun 1982, Puslit KIM-LIPI telah mempunyai beberapa mikrofon jenis B&K 4160 yang merupakan standar utama besaran akustik. Mikrofon ini berjenis LS1P yang mempunyai rentang frekuensi pengukuran dari 20 Hz sampai dengan 10 kHz. Untuk mempertahankan kestabilan standar ini, maka secara reguler mikrofon-mikrofon tersebut harus dikalibrasi dan

dilihat nilai sensitivitasnya. Nilai sensitivitas untuk sebuah mikrofon dibandingkan berdasarkan waktu kalibrasi untuk menganalisa *drift* standar.

Dalam makalah ini dibahas riwayat kalibrasi sensitivitas medan tekanan salah satu mikrofon primer LS1P yang telah dilakukan dengan metode kalibrasi *reciprocity*, baik yang sudah dilakukan sebelumnya di *National Metrology Institute* (NMI) Jerman (PTB), NMI Korea Selatan (KRISS) dan Puslit KIM-LIPI kemudian hasilnya dibandingkan satu dengan lainnya untuk melihat *drift* standar tersebut. Riwayat kalibrasi di NMI Australia (NMIA) tidak dibahas karena yang dikalibrasi ke NMIA adalah mikrofon B&K 4160 lainnya, bukan nomor seri tersebut di atas.

2. DASAR TEORI

Berdasarkan Keputusan Presiden Nomor 79 tahun 2001, Puslit KIM-LIPI ditetapkan sebagai Pengelola Teknis Ilmiah Standar-standar Nasional Satuan Ukuran (SNSU). Puslit KIM-LIPI sebagai NMI Indonesia, harus memelihara standar primer (utama) maupun standar

sekunder (kedua) yang terkalibrasi untuk menjamin Standar Internasional (SI) yang ada di Indonesia ekuivalen dengan seluruh dunia. Sebagai NMI, Puslit KIM-LIPI bertugas mendiseminasikan SI di Indonesia dan menjalankan misi penelitian dan pengembangan dalam bidang metrologi untuk kepentingan pemerintah, industri maupun masyarakat.

Laboratorium Metrologi Akustik dan Getaran Puslit KIM-LIPI adalah salah satu sub bidang di Puslit KIM-LIPI, mempunyai tugas memelihara standar besaran akustik dan getaran. Standar utama mikrofon yang bertipe LS1P merupakan salah satu dari standar tertinggi pada ketertelusuran bunyi (akustik) harus dikalibrasi dengan teknik kalibrasi yang mempunyai tingkat ketelitian paling tinggi yaitu metode *reciprocity*. Untuk mencari sensitivitas medan tekanan mikrofon, teknik ini dilakukan pada *coupler*, sedangkan untuk mencari sensitivitas medan bebas mikrofon dilakukan pada ruang bebas gema.

Sebagai pengelola teknis ilmiah SNSU, Subbid Metrologi Akustik dan Getaran Puslit KIM-LIPI harus merealisasikan pemeliharaan ketertelusuran besaran akustik. Dengan tugas pokok ini, Subbid Metrologi Akustik dan Getaran Puslit KIM-LIPI harus mengkalibrasi secara periodik standar-standar utama akustik dan getaran yang salah satunya standarnya adalah mikrofon B&K 4160. Sebelumnya, standar-standar ini dikalibrasi ke NMI Jerman (PTB), NMI Australia (NMIA) dan NMI Korea Selatan (KRISS), tetapi hal ini membutuhkan biaya yang tinggi dan waktu lama yaitu paling tidak empat bulan. Untuk memudahkan realisasi pemeliharaan ini, Subbid Metrologi Akustik dan Getaran sejak tahun 2007 dilengkapi dengan sistem kalibrasi *reciprocity* tipe 9699 terbaru yang berbasis PULSE dan merupakan sistem yang lengkap.

Parameter yang dikalibrasi pada mikrofon adalah sensitivitas pada rangkaian terbuka, yang didefinisikan sebagai perbandingan tegangan keluaran pertekanan bunyi pada diafragma sebuah mikrofon. Sensitivitas medan tekanan ini diperlukan untuk pengukuran akustik yang

mempunyai ketelitian tinggi pada daerah frekuensi bunyi yang terdengar. Standar primer dari pengukuran bunyi adalah mikrofon jenis medan tekanan (*pressure field*) yang didefinisikan pada Standar IEC 61094-1: *Measurement microphone Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*. Terdapat dua ukuran mikrofon standar primer, yaitu LS1P untuk ukuran mikrofon 1 inci dan LS2P untuk ukuran mikrofon 0,5 inci, ukuran ini membedakan rentang frekuensi pengukuran.

Subbid Metrologi Akustik & Getaran mempunyai beberapa mikrofon B&K 4160 dan beberapa juga mikrofon tipe 4180, tetapi yang paling lengkap riwayat kalibrasinya adalah B&K 4160 dengan nomor seri 873968 yang berjenis LS1P. Mikrofon tipe B&K 4180 baru dipunyai Puslit KIM-LIPI sejak tahun 1990 sesuai dengan perkembangan kebutuhannya.

2.1. Metodologi Cek Antara

Cek antara direalisasikan dengan melakukan kalibrasi sebuah standar dalam waktu yang berbeda dan menganalisis nilai hasil kalibrasi tersebut. Oleh karena itu, setiap standar yang ada di Subbid Metrologi Akustik dan Getaran Puslit KIM-LIPI harus dikalibrasi secara berkala. Mikrofon standar primer akustik biasanya dikalibrasi dengan metode *reciprocity* yaitu nilai sensitivitas didapat tanpa dibandingkan dengan standar lain dan merupakan metode yang mempunyai tingkat ketelitian tertinggi. Nilai *drift* sebuah standar yang diberikan pada perhitungan ketidakpastian didapat dari hasil analisis kalibrasi berkala tersebut.

2.2. Metode Kalibrasi

Sistem kalibrasi *reciprocity* tipe 9699 berbasis PULSE termasuk *reciprocity calibration apparatus* tipe 5998 (seperti terlihat pada Gambar 1 di bawah), merupakan sistem kalibrasi *reciprocity* generasi ke-enam yang merupakan sistem untuk mengkalibrasi sensitivitas medan tekanan mikrofon standar



Gambar 1 Sistem Kalibrasi *Reciprocity* Tipe 9699 Berbasis Pulse (Generasi Keenam)

Metode absolut ini menggunakan tiga mikrofon, mikrofon 1, mikrofon 2 dan mikrofon 3 yang kesemuanya bersifat *reciprocal*, artinya sensor dapat digunakan sebagai penerima sinyal akustik atau dapat digunakan sebagai pemancar sinyal akustik. Ketiga mikrofon tersebut dipasangkan pada sebuah *coupler* seperti ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah (mikrofon 1-2, 1-3 dan 2-3), mikrofon yang di bawah sebagai pemancar dan mikrofon yang di atas sebagai penerima dari medan bunyi. Satu mikrofon membangkitkan tekanan bunyi (pemancar) pada *coupler* dan diterima oleh mikrofon yang kedua (penerima). Dengan mengukur U_R dan U_C dapat ditentukan impedansi transfer elektrik R_{xy} ($= U_R/U_C$) untuk ketiga pasangan mikrofon tersebut. Dengan mendapatkan R_{12} , R_{13} dan R_{23} maka dari tiga persamaan tersebut dapat ditentukan sensitivitas ketiga mikrofon medan tekanan tersebut ($M_{p,1}$, $M_{p,2}$ dan $M_{p,3}$), karena $V_{a,12} = V_{a,13} = V_{a,23}$, $\kappa_{12} = \kappa_{13} = \kappa_{23}$ dan $P_{s,12} = P_{s,13} = P_{s,23}$. Untuk kalibrasi *reciprocity* yang berlaku untuk pasangan-pasangan mikrofon 1, 2 dan 3 adalah:

$$M_{p,1} \cdot M_{p,2} = \frac{V_{a,12} \cdot R_{12}}{\kappa_{12} \cdot P_{s,12} \cdot C} \dots \dots \dots (1)$$

$$M_{p,1} \cdot M_{p,3} = \frac{V_{a,13} \cdot R_{13}}{\kappa_{13} \cdot P_{s,13} \cdot C} \dots \dots \dots (2)$$

$$M_{p,2} \cdot M_{p,3} = \frac{V_{a,23} \cdot R_{23}}{\kappa_{23} \cdot P_{s,23} \cdot C} \dots \dots \dots (3)$$

dimana:

$M_{p,1}$, $M_{p,2}$ dan $M_{p,3}$ adalah sensitivitas medan tekanan berturut turut mikrofon 1, 2 dan 3

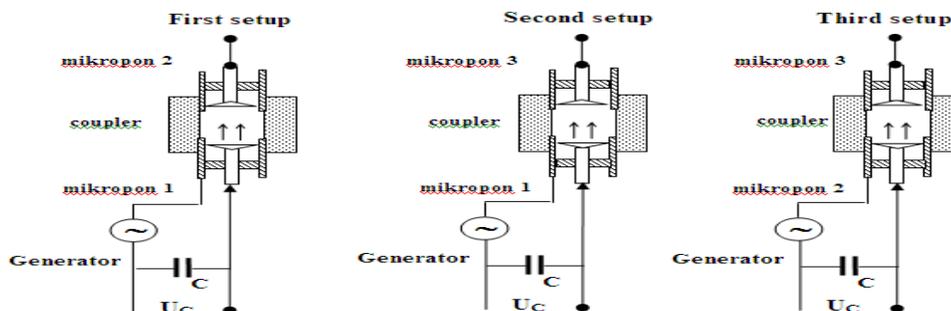
$V_{a,12}$, $V_{a,13}$ dan $V_{a,23}$ adalah akustik transfer volume berturut turut pada pengukuran mikrofon 1-2, 1-3 dan 2-3

R_{12} , R_{13} dan R_{23} adalah perbandingan tegangan yang diukur berturut turut pada mikrofon 1 - 2, 1 - 3 dan 2 - 3

κ_{12} , κ_{13} dan κ_{23} adalah perbandingan kapasitas panas spesifik gas pada ruang coupler berturut turut pada waktu pengukuran 1-2, 1-3 dan 2-3

$P_{s,12}$, $P_{s,13}$ dan $P_{s,23}$ adalah tekanan udara statik pengukuran berturut turut pada mikrofon 1-2, 1-3 dan 2-3, dan

C adalah kapasitansi standar



Gambar 2 Tiga *Setup* Pasangan

2.3. Ketertelusuran

Definisi ketertelusuran dari kamus metrologi internasional adalah nilai hasil pengukuran yang dapat mengaitkannya ke standar yang lebih

tinggi kemudian nasional dan atau internasional melalui suatu rantai tidak terputus dengan ketidakpastian yang dinyatakan.

Ketertelusuran standar akustik sebelum KIM-LIPI dapat melakukan dan diakreditasi untuk mengkalibrasi mikrofon LS1P dan LS2P adalah seperti diagram pada Gambar 3 di bawah. mikrofon standar utama LS1P dan LS2P harus dikalibrasi ke NMI Jerman (PTB), NMI Australia (NMIA) dan NMI Korea Selatan (KRISS).

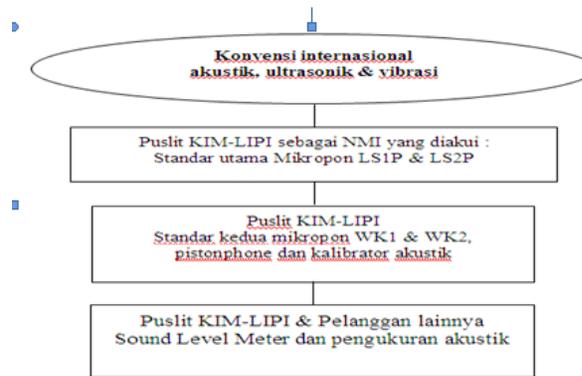
Sedangkan untuk mengkalibrasi standar kedua berupa mikrofon jenis standar kerja (*working standard*) WK1, WK2 dan kalibrator akustik dapat dilakukan di Puslit KIM-LIPI.



Gambar 3 Diagram Ketertelusuran Sebelum ada Fasilitas Reciprocity

Gambar 4 menunjukkan ketertelusuran standar akustik setelah adanya fasilitas kalibrasi mikrofon utama dengan metoda *reciprocity*. Pada diagram ini kalibrasi mikrofon standar

utama LS1P dan LS2P tidak perlu lagi dikalibrasi ke PTB, NMIA atau KRISS.



Gambar 4 Diagram Ketertelusuran Setelah ada Fasilitas *Reciprocity*

2.4. Budget Ketidakpastian

Perhitungan ketidakpastian kalibrasi menggunakan Standar Internasional ISO *Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement* (ISO GUM). ISO GUM mendefinisikan dua macam ketidakpastian, yaitu tipe A dan tipe B yang dibedakan dari metoda evaluasinya. Ketidakpastian tipe A dianalisis dari pengulangan pengukuran sensitivitas mikrofon menggunakan analisis statistik untuk mengevaluasinya, sedangkan tipe B selain analisis statistik dapat ditentukan dari parameter-parameter mikrofon, pengukuran-pengukuran

elektrik, ketidakpastian dimensi *coupler*, kondisi lingkungan, koreksi fisis dan lain-lain.

Ketidakpastian tipe A dianalisis dari lima set pengukuran sensitivitas mikrofon seluruh frekuensi menggunakan simpangan baku dengan derajat kebebasan jumlah pengukuran dikurang satu. Ketidakpastian akibat dari ketidakpastian parameter-parameter mikrofon terdiri dari *front-depth*, *front volume*, *equivalent volume*, frekuensi resonansi dan *loss factor*. Karena riskannya mikrofon maka ketidakpastian parameter-parameter mikrofon ini masih

mengadopsi ketidakpastian yang diberikan pabrik.

Ketidakpastian dari pengukuran elektrik terdiri dari *voltage-ratio*, kapasitans standar, *cross-talk*, tegangan polarisasi, pengukuran frekuensi, *receiver groundshield*, *transmitter groundsheeld* dan distorsi. Ketidakpastian kapasitan standar, tegangan polarisasi dan pengukuran frekuensi dapat ditentukan baik dari kalibrasi standar maupun alat ukur tegangan, sedangkan yang lainnya didapat dari spesifikasi pabrik. Ketidakpastian *coupler* terdiri dari panjang, diameter, volume dan luas permukaan didapat dari sertifikat dan perhitungan turunannya.

3. DATA DAN ANALISIS

3.1. Data Hasil Kalibrasi

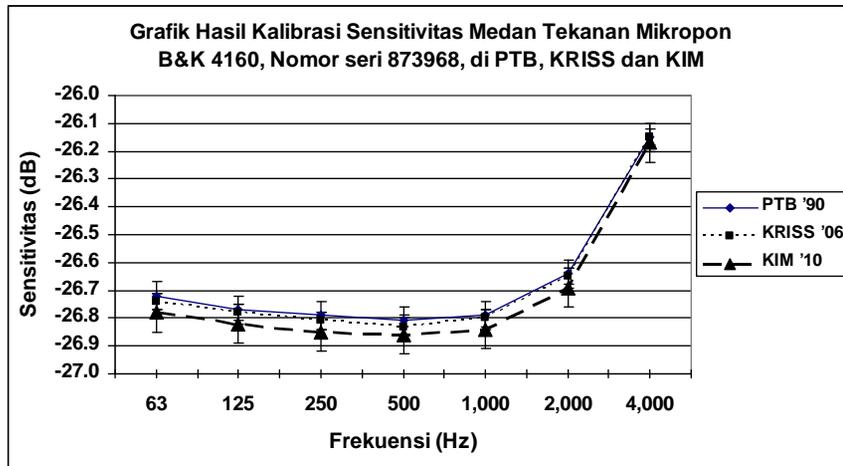
Cek antara atau "*intermediate check*" adalah suatu upaya yang dilakukan untuk memelihara sebuah standar. Standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968 merupakan salah satu standar utama yang dipakai untuk pengukuran besaran akustik. Untuk merealisasikan cek antara terhadap standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968, maka sejak tahun 1982 sampai sekarang dilakukan kalibrasi secara berkala terhadap mikrofon tersebut. Mikrofon tersebut hanya dikalibrasi di PTB Jerman, KRISS Korea Selatan dan Puslit KIM-LIPI, sedangkan di NMI Australia mengkalibrasi mikrofon B&K 4160 dengan nomor seri yang lainnya. Sebagian dari hasil kalibrasi standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968 dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah.

Tabel 1 Data Hasil Cek Antara Sensitivitas Medan Tekanan Mikrofon Tipe B&K 4160 Nomor Seri 873968 Sejak Tahun 1982 di PTB Jerman Hingga 2010 di KIM-LIPI Indonesia.

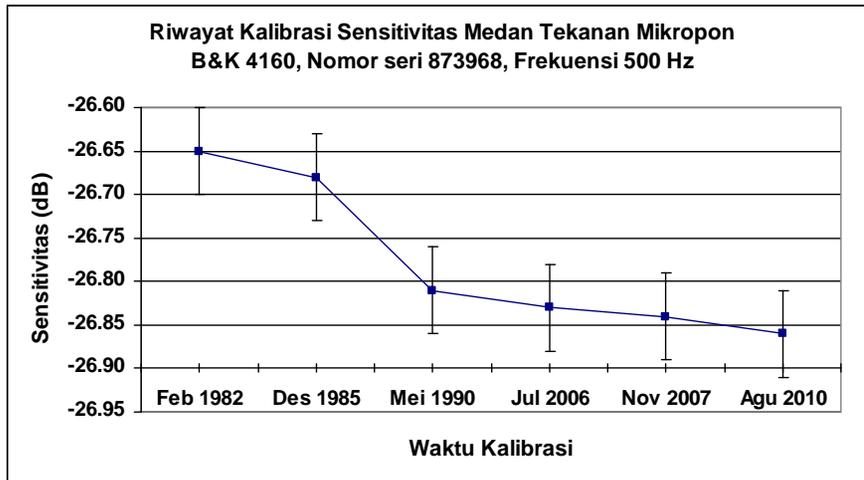
Tempat Kalibrasi	PTB Jerman			KRISS Korsel	Puslit KIM-LIPI Indonesia	
	Feb 1982	Des 1985	Mei 1990	Jul 2006	Nov 2007	Agu 2010
Waktu Kalibrasi						
Frekuensi						
63	-26,58	-26,60	-26,72	-26,74	-26,75	-26,78
125	-26,62	-26,65	-26,77	-26,78	-26,79	-26,82
250	-26,65	-26,67	-26,79	-26,81	-26,83	-26,85
500	-26,65	-26,68	-26,81	-26,83	-26,84	-26,86
1.000	-26,63	-26,66	-26,79	-26,80	-26,82	-26,84
2.000	-26,67	-26,51	-26,64	-26,65	-26,67	-26,69
4.000	-25,94	-26,00	-26,15	-26,15	-26,18	-26,17
Ketidakpastian	0,05	0,03	0,03	0,03	0,07	0,07

Mikrofon tipe B&K 4160 nomor seri 873968 tersebut sudah dipunyai Puslit KIM-LIPI sejak awal, sehingga hasil cek antaranya sudah ada sejak tahun 1982. Selain mikrofon tersebut di atas, Puslit KIM-LIPI mempunyai mikrofon B&K 4160 yang lainnya, tetapi hasil cek antaranya masing-masing hanya dilakukan dua

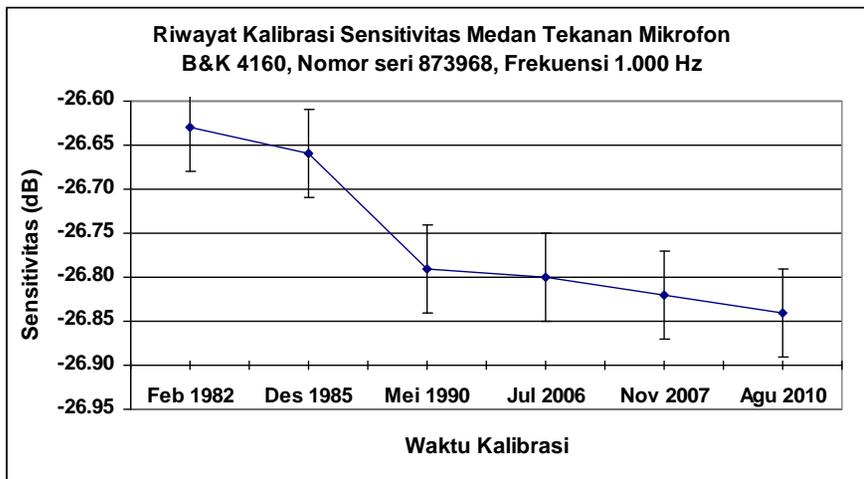
kali atau bahkan satu kali. Sesuai dengan perkembangannya, Puslit KIM-LIPI juga mempunyai mikrofon tipe LS2P atau tipe B&K 4180 yang mempunyai rentang frekuensi hingga 20 kHz.



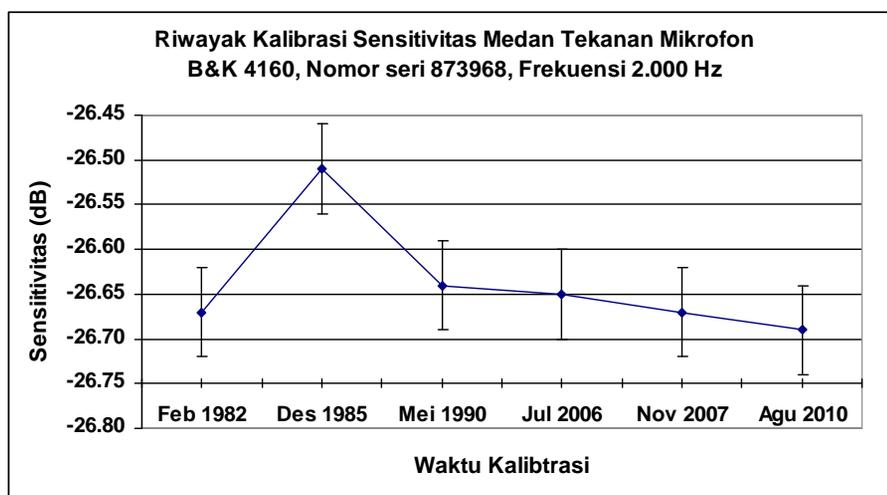
Gambar 5 Grafik Hasil Kalibrasi Mikrofon B&K 4160, di PTB, KRISS dan KIM.



Gambar 6 Grafik Kalibrasi Mikrofon Frekuensi 500 Hz.



Gambar 7 Grafik Kalibrasi Mikrofon Frekuensi 1.000 Hz.



Gambar 8 Grafik Kalibrasi Mikrofon Frekuensi 2.000 Hz.

3.2. Analisis

Gambar 5 merupakan grafik hasil cek antara sensitivitas medan tekanan mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968 yang merupakan standar utama besaran akustik LS1P. Grafik tersebut menampilkan hasil kalibrasi PTB tahun 1990, hasil kalibrasi KRIS tahun 2006 dan hasil kalibrasi KIM-LIPI tahun 2010. Dari grafik tersebut terlihat jelas secara umum mempunyai pola sensitivitas yang sangat mirip, dengan perbedaan kurang lebih 0,03 dB. Lebih jauh dapat dilihat hasil kalibrasi dari ketiga NMI (PTB, KRIS dan Puslit KIM-LIPI) menghasilkan nilai yang cukup berdekatan yaitu mempunyai perbedaan paling besar 0,04 dB kurang dari ketidakpastian yang diberikan sebesar 0,07 dB. Berdasarkan data tersebut di atas, dapat dinyatakan bahwa hasil kalibrasi dari ketiga NMI memiliki kesesuaian yang cukup baik.

Gambar 6, 7 dan 8 adalah grafik hasil cek antara sensitivitas medan tekanan mikrofon berturut-turut pada frekuensi 500 Hz, 1000 Hz dan 2000 Hz, terhadap standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968. Cek antara dilakukan dalam kurun waktu mulai tahun 1985 sampai dengan 2010. Sedang untuk analisis perhitungan *drift* sensitivitas mikrofon digunakan data hasil kalibrasi mulai tahun 1990, karena tahun sebelumnya masih menggunakan peralatan *Reciprocity Calibration Apparatus* generasi pertama yang masih harus menggunakan gas hydrogen untuk frekuensi di atas 1 kHz. Dari grafik hasil pengukuran terlihat bahwa nilai sensitivitas mikrofon mengalami penurunan yang cukup sistematis dan penurunan nilai sensitivitas terjadi pada seluruh frekuensi pengukuran. Namun penurunan yang paling tajam terjadi pada periode tahun 1985

sampai dengan tahun 1990. Penyebab terjadinya penurunan tersebut adalah karena pada kurun waktu sebelum tahun 1990, kalibrasi mikrofon masih menggunakan peralatan *Reciprocity Calibration Apparatus* generasi pertama yang masih menggunakan analog dengan ketelitian yang rendah dibandingkan dengan peralatan *Reciprocity Calibration Apparatus* generasi setelah tahun 1990 yang menggunakan sistem digital dengan ketelitian tinggi. Terlihat pada grafik tersebut perubahan nilai sensitivitas sebesar 0,003 dB jauh lebih kecil dari ketidakpastian yang diusulkan sebesar 0,07 dB. Perubahan yang sama ini terjadi pada seluruh frekuensi pengukuran, sebagai contoh pada grafik yang diberikan yaitu pada frekuensi 500 Hz, 1000 Hz dan 2000 Hz.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pada kurun waktu dari tahun 1985 sampai dengan tahun 2010, standar mikrofon tipe B&K 4160 nomor seri 873968, mengalami perubahan sensitivitas (*drift*) sebesar 0,0025 dB per tahun. Sedangkan nilai ketidakpastian hasil kalibrasi mikrofon adalah antara 0,03 dB sampai dengan 0,07 dB. Sehingga dengan terjadinya nilai *drift* sebesar 0,0025 dB tersebut tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai ketidakpastian hasil kalibrasi mikrofon. Dengan demikian dapat diusulkan bahwa standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968 kondisinya masih sangat baik untuk dijadikan sebagai standar utama dalam pengukuran besaran akustik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kalibrasi standar mikrofon type B&K 4160, nomor seri 873968 yang dilakukan oleh tiga NMI, yaitu: PTB Jerman, KRISS Korea Selatan dan KIM-LIPI Indonesia, menghasilkan nilai yang cukup berdekatan, yaitu yaitu mempunyai perbedaan paling besar 0,04 dB kurang dari ketidakpastian yang diberikan sebesar 0,07 dB. Berdasarkan data tersebut, dapat dinyatakan bahwa hasil kalibrasi dari ketiga NMI memiliki kesesuaian yang cukup baik.

Pengamatan perubahan nilai sensitivitas terhadap standar mikrofon telah dilakukan dari tahun 1985 hingga tahun 2010, tetapi untuk keperluan analisis diambil dari data tahun 1990 hingga tahun 2000 karena sejak tahun 1990 mempunyai sedikit perubahan. Berdasarkan hasil evaluasi, menunjukkan bahwa dalam kurun waktu di atas, standar mikrofon tersebut mengalami perubahan nilai sensitivitas (*drift*) hanya sebesar 0,0025 dB per tahun. Sedangkan nilai ketidakpastian hasil kalibrasi mikrofon adalah antara 0,03 dB sampai dengan 0,07 dB. Sehingga dengan terjadinya nilai drift sebesar 0,0025 dB tersebut tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai ketidakpastian yang dihasilkan oleh alat standar tersebut. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa standar mikrofon tipe B&K 4160, nomor seri 873968 kondisinya masih sangat baik untuk dijadikan sebagai standar utama dalam pengukuran besaran akustik.

DAFTAR PUSTAKA

- Brül & Kjær, Nærum. (1998). *Technical Documentation, Reciprocity Calibration System Type 9699 Including Reciprocity Calibration Apparatus Type 5998*.
- (2003). *Instruction Manual, Condenser Microphones One-Inch Type 4160 and Half-Inch Type 4180*.
- (2003). *Instruction Manual, Reciprocity Calibration Apparatus Type 4143*.
- (2003). *Product Catalogue, Microphone & Conditioning*.
- Erawan, D. & Akil, H. A. (2006). Konsep Ketertelusuran Hasil Pengukuran dan Implementasinya di Indonesia, Prosiding PPI Standardisasi-BSN, Jakarta.
- International Electrotechnical Commission. (2000). *Standar IEC 61094-1, Measurement microphone – Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*, Geneva.
- International Electrotechnical Commission. (2009). *Standar IEC 61094-2, Electroacoustics - Measurement microphone – Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*, Geneva.
- ISO Publication. (2008). *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Geneva.
- Rusjadi, D. TE. & Suwandi, A. (2002). *Traceability of Sound Measurement at The Acoustics Laboratory Indonesia Institute of Sciences*. Prosiding PPI Standardisasi-BSN. Jakarta.
- Rusjadi, D. TE., Akil, H. A. Suwandi, A. & Suwono. (2004). *Pressure Reciprocity Calibration of One Inch Primary Standard Microphone Type B&K 4160*, Proceedings 2nd ISMPAEM. Tangerang.
- Rusjadi, D. TE. & Akil, H. A. (2009). Sistem 9699 Berbasis PULSE untuk Kalibrasi Reciprocity sensitivitas Medan Tekanan Mikrofon Standar Primer. Instrumentasi Volume 33.