

# Kaedah Relatif Untuk Penentuan Nilai Pembetulan Medan Bebas Mikrofon Pengukuran Bunyi

Wan Aziz Wan Salleh<sup>a\*</sup>, Nordin Jamaludin<sup>b</sup>, Mohd Jailani Mohd Nor<sup>b</sup>

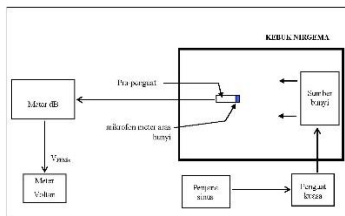
<sup>a</sup>Makmal Metrologi Kebangsaan, SIRIM Berhad, Bandar Baru Salak Tinggi, 43900 Sepang, Selangor, Malaysia

<sup>b</sup>Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

\*Corresponding author: wanaziz@sirim.my

## Article history

Received :30 August 2012  
Received in revised form :  
2 August 2013  
Accepted :15 August 2013



## Abstract

A free-field correction value is a value used to convert the sound pressure response of measuring microphones during calibration from pressure field response to free-field response. A relative comparison method for determination of this correction value has been developed as an alternative to the established absolute methods. Pressure response has been compared relatively with free-field response. Microphone's response was obtained by comparison with laboratory standard microphone where the free-field correction value is known. Both microphones were sequentially exposed to the same sound pressure level in free field and pressure field and AC voltages were measured. The free field is generated inside an anechoic chamber and pressure field using a sound calibrator. The correction values of two measuring microphones with known free-field correction value given by the manufacturer were measured for method validation. Both results were compared and show the agreement within the uncertainties and this proved the relative method can be applied.

**Keywords:** Free-field correction; free-field calibration of microphone; pressure calibration of microphone; measuring microphone; relative method

## Abstrak

Nilai pembetulan medan bebas adalah nilai yang digunakan untuk menukarkan sambutan tekanan mikrofon pengukuran bunyi semasa tentukan kepada sambutan medan bebas. Kaedah perbandingan relatif telah dibangunkan untuk menentukan nilai pembetulan medan bebas sebagai pilihan kepada kaedah mutlak yang sediaada. Sambutan medan tekanan telah dibandingkan secara relatif dengan medan bebas. Sambutan mikrofon di dalam setiap medan diperolehi secara perbandingan dengan mikrofon standard makmal yang telah diketahui nilai pembetulan medan bebasnya. Kedua-dua mikrofon didedahkan secara berturutan kepada sumber bunyi dengan aras tekanan bunyi yang sama di dalam medan bebas dan medan tekanan dan voltan keluaran AC akan diukur. Medan bebas dihasilkan di dalam kubuk nirgema dan medan tekanan di dalam pengganding penentukur bunyi. Nilai pembetulan medan bebas untuk dua mikrofon yang telah diketahui nilainya dari pembuat telah ditentukan dan dibandingkan untuk tujuan pengesahan kaedah. Keputusan perbandingan kedua-dua mikrofon yang saling menepati setelah mengambil kira ketidakpastiannya menunjukkan kaedah relatif boleh digunakan.

**Kata kunci:** Pembetulan medan bebas; tentukan medan bebas mikrofon; tentukan medan tekanan mikrofon; mikrofon pengukuran; kaedah relatif

© 2013 Penerbit UTM Press. All rights reserved.

## 1.0 PENDAHULUAN

Mikrofon pengukuran adalah alat untuk mengesan tekanan bunyi bagi mendapatkan aras tekanan bunyi sama ada di dalam persekitaran medan bebas atau medan tekanan. Mikrofon yang digunakan bersama meter aras bunyi biasanya adalah mikrofon medan bebas. Untuk pengukuran yang jitu, mikrofon beserta meter aras bunyi perlu ditentukur secara berkala oleh makmal tentukan. Tentukan biasanya dibuat dengan menggunakan

penentukur bunyi [1] seperti yang dinyatakan di dalam buku pengendalian alat. Tentukan ini dilakukan dengan mendedahkan mikrofon kepada sumber bunyi di dalam medan tekanan. Sumber bunyi dijana oleh pengayun di dalam penentukur bunyi dan dikeluarkan melalui pengganding (*coupler*). Aras tekanan bunyi dan frekuensi boleh dipilih dengan hanya menekan butang yang tersedia. Oleh itu proses tentukan tekanan adalah mudah dan cepat [2].

Bagi mikrofon medan bebas, tentukan tekanan memberikan keputusan yang tidak tepat kerana medan yang tidak sepadan. Sambutan mikrofon di dalam medan tekanan akan sekata pada frekuensi rendah dan akan berkurang daripada yang sepatutnya sebagaimana di dalam medan bebas apabila frekuensi bertambah. Perbezaan sambutan dari yang sepatutnya ini mempunyai nilai dari 0.0 dB pada 500 Hz dan menaik sehingga kira-kira 10.0 dB pada frekuensi 27 kHz dan nilai ini dipanggil nilai pembetulan medan bebas [3, 4]. Nilai ini bergantung kepada reka bentuk mikrofon seperti ukurlilit, grid pelindung, ciri-ciri diafragma, sudut tuju rambatan dan jarak gelombang atau frekuensi sumber bunyi. Bagi mengelakkan ketidaktepatan ini, pembetulan perlu dibuat menggunakan nilai tersebut supaya keputusan tentukan tekanan dapat ditukarkan kepada medan bebas. Walau bagaimanapun nilai pembetulan tersebut tidak dapat diperolehi kerana tidak dibekalkan oleh pembuat [2] atau pihak lain. Oleh itu tentukan medan bebas perlu dijalankan.

Tentukan medan bebas [5] dijalankan secara perbandingan berturutan dengan mikrofon standard makmal. Ianya melibatkan dua proses pengukuran. Pengukuran yang pertama adalah untuk mikrofon standard makmal dan yang keduanya untuk mikrofon yang ditentukan. Tentukan memerlukan persekitaran medan bebas yang boleh diperolehi di dalam kebuk nirgema. Selain daripada itu, tentukan medan bebas memerlukan sistem yang terdiri daripada mikrofon standard makmal, penjana sinus (*sine generator*), penguat kuasa (*power amplifier*), sumber bunyi (*speaker*), meter voltan dan pembekal kuasa mikrofon atau penguat pengukur untuk menukarkan aras tekanan bunyi kepada voltan AC. Oleh itu proses tentukan di dalam medan bebas memakan masa yang lebih lama dan menyebabkan kos bertambah [2].

Oleh itu kajian ini akan mencadangkan kaedah untuk mendapatkan nilai pembetulan tersebut. Ianya akan menggabungkan kedua-dua kaedah tentukan medan bebas dan tentukan medan tekanan bagi mendapatkan nilai perbezaan antara kedua-dua kaedah. Seterusnya nilai perbezaan ini akan digunakan di dalam tentukan tekanan yang telah diketahui lebih mudah. Apabila nilai tersebut digunakan, keputusan tentukan medan tekanan dapat ditukarkan kepada keputusan medan bebas bagi mendapatkan keputusan tentukan yang tepat.

## 2.0 PENENTUAN NILAI PEMBETULAN MEDAN BEBAS

Pada awalnya Bruel & Rasmussen [6] dari Bruel & Kjaer ada menyatakan perbezaan di antara sambutan medan bebas dengan sambutan tekanan mikrofon. Perbezaan ini ditentukan melalui pengukuran kepekaan (*sensitivity*) mikrofon sebagai fungsi frekuensi yang diperolehi dari kaedah kesalingan (*reciprocity*) medan bebas dan membandingkannya dengan pengukuran sambutan tekanan menggunakan kaedah penggerak elektrostatik (*elektrostatik actuator*). Bagaimanapun mereka tidak menyatakan perbezaan ini sebagai nilai pembetulan medan bebas.

Bruel *et al.* [7] telah membuat pengukuran yang sama seperti Bruel & Rasmussen [6] ke atas mikrofon keluaran Bruel & Kjaer dan menyatakan perbezaan di antara sambutan bebas dan tekanan sebagai nilai pembetulan medan bebas. Frederiksen Gramtorp [8], Bruel & Kjaer [9] dan Fujimori *et al.* [10] dan telah menyatakan hubungan di antara sambutan medan tekanan dan sambutan medan bebas sebagai:

$$\text{pembetulan medan bebas} = \text{Sambutan medan bebas} - \text{sambutan medan tekanan} \quad (1)$$

Sambutan ini pula boleh diungkapkan sebagai kepekaan atau aras tekanan bunyi dengan unitnya adalah di dalam desibel (dB). Jika kepekaan digunakan, pembetulan medan bebas (FFCor) adalah perbezaan di antara kepekaan di dalam medan bebas (SFF) dengan kepekaan di dalam medan tekanan (SPF) bagi mikrofon yang sama.

$$FFCor = SFF - SPF \quad (2)$$

Oleh itu bagi menentukan pembetulan medan bebas (FFCor), kepekaan medan bebas dan kepekaan medan tekanan masing-masingnya perlu ditentukan terlebih dahulu.

### A. Penentuan Kepekaan Medan Bebas

Terdapat dua kaedah yang telah dijalankan di dalam menentukan kepekaan medan bebas mikrofon iaitu:

Kaedah FF1: Kaedah primer menggunakan teknik salingan seperti yang diterangkan di dalam standard IEC 61094-3 [11] dan dilaksanakan oleh Frederiksen & Gramtorp [8] dari Bruel & Kjaer.

Kaedah FF2: Kaedah sekunder untuk mikrofon standard kerja seperti yang dilaporkan oleh Hanes [5] di dalam laporan teknikalnya.

### B. Penentuan Kepekaan Medan Tekanan

Terdapat lima kaedah yang telah dijalankan untuk menentukan kepekaan tekanan mikrofon:

Kaedah PF1: Kaedah primer menggunakan teknik salingan seperti yang diterangkan di dalam standard IEC 61094-2 [12].

Kaedah PF2: Kaedah sekunder untuk mikrofon standard kerja yang dijalankan di dalam pengganding tekanan seperti yang diterangkan di dalam standard IEC 61094-5 [13].

Kaedah PF3: Kaedah sekunder untuk mikrofon standard kerja di dalam pengganding aktif seperti di dalam laporan teknikal oleh Jarvis [14].

Kaedah PF4: Kaedah sekunder melalui perbandingan dengan mikrofon standard makmal menggunakan penentukur bunyi pelbagai frekuensi sebagai sumber bunyi [2,15].

Kaedah PF5: Menggunakan penggerak elektrostatik seperti yang dilakukan oleh Gramtorp [2], Bruel & Rasmussen [6], Bruel *et al.* [7] dan Frederiksen & Gramtorp [8].

### C. Penentuan Pembetulan Medan Bebas

Terdapat tiga kaedah yang telah dijalankan untuk menentukan pembetulan medan bebas:

Kaedah FFC1: Kaedah primer seperti yang dinyatakan di dalam IEC 61094-7 [16] untuk mikrofon standard makmal yang memenuhi IEC 61094-1 [17] iaitu perbezaan kepekaan FF1 dan PF1.

Kaedah FFC2: Penentuan perbezaan kepekaan di antara kaedah primer menggunakan teknik salingan FF1 dengan sambutan penggerak elektrostatik PF5 seperti yang dijalankan oleh Bruel & Kjaer [18] dan Bruel *et al.* [7].

Kaedah FFC3: Penentuan perbezaan kepekaan di antara kaedah FF2 dengan sambutan penggerak elektrostatik PF5 seperti yang diterangkan oleh Frederiksen & Gramtorp [8].

## 3.0 KAEDAH KAJIAN

Kaedah penentuan nilai pembetulan medan bebas seperti yang dibincangkan di 2 (C) adalah kaedah mutlak. Di dalam kaedah ini, kepekaan medan bebas dan medan tekanan masing-masing perlu ditentukan terlebih dahulu sebelum dikira perbezaannya. Kaedah penentuan nilai pembetulan medan bebas yang

dicadangkan di dalam kajian ini adalah kaedah yang baru dibangunkan iaitu kaedah perbandingan relatif. Perbandingan dibuat secara relatif di antara kepekaan medan bebas dan medan tekanan. Kepekaan mikrofon untuk setiap medan pula diperolehi melalui perbandingan dengan mikrofon standard makmal yang telah diketahui nilai pembetulan medan bebasnya. Mikrofon standard makmal yang digunakan adalah berjenama Bruel Kjaer model 4180.

Kaedah penentuan yang dicadangkan oleh kajian ini adalah berdasarkan kepada kaedah FF2 untuk pengukuran medan bebas dan kaedah PF4 untuk pengukuran medan tekanan. Kaedah FF2 adalah pengukuran kepekaan mikrofon secara perbandingan dengan mikrofon standard makmal iaitu Bruel & Kjaer 4180. Medan bebas dihasilkan di dalam kebuk nirgema dengan saiz dalaman 6 m panjang, 6 m lebar dan 4 m tinggi. Hingar latar belakang di dalam kebuk nirgema adalah 14 dB dan frekuensi penggalan adalah 60 Hz [19]. Sumber bunyi dijana dari pembesar suara sepaksi (*coaxial*) berdiameter 10 inci dengan sambutan frekuensi dari 60 Hz hingga 18 kHz. Jarak antara mikrofon dengan sumber bunyi adalah 1 m. Kaedah PF4 adalah pengukuran kepekaan mikrofon di dalam medan tekanan menggunakan penentu bunyi. Dalam kajian ini, penentu bunyi pelbagai frekuensi Bruel & Kjaer 4226 akan digunakan, model yang sama yang digunakan oleh Gramtorp [2]. Kajian ini dijalankan di makmal tentukan akustik di SIRIM Berhad.

Prinsip penentuan kepekaan mikrofon  $S_{Mic}$  secara perbandingan dengan mikrofon standard makmal adalah berdasarkan kaedah PF4 dan kaedah perbandingan mutlak seperti yang dinyatakan oleh Wong [20] iaitu:

$$S_{Mic} = S_{4180} + 20 \log \left( \frac{V_{Mic}}{V_{4180}} \right) + \Delta C + \Delta E + \Delta V \quad (3)$$

di mana

$S_{Mic}$  adalah kepekaan mikrofon

$S_{4180}$  adalah kepekaan mikrofon standard makmal B&K 4180 yang telah diketahui dari siji tentukan

$V_{Mic}$  adalah voltan ulang-alik yang diukur oleh mikrofon meter aras bunyi

$V_{4180}$  adalah voltan ulang-alik yang diukur oleh mikrofon standard makmal B&K 4180

$\Delta C$  adalah faktor kemuatan (*capacitance*) kedua-dua mikrofon dan pra-penguat

$\Delta V$  adalah faktor isipadu berkesan kedua-dua mikrofon apabila berada di dalam medan bunyi

$\Delta E$  adalah faktor persekitaran di mana komponen yang kritikal adalah suhu dan kelembapan bandingan

Bagi perbandingan mikrofon dengan mikrofon standard makmal B&K 4180 di dalam medan bebas (FF) di dalam kebuk nirgema, persamaan (3) menjadi;

$$S_{FFMic} = S_{FF4180} + 20 \log \left( \frac{V_{FFMic}}{V_{FF4180}} \right) + \Delta C_{FF} + \Delta E_{FF} + \Delta V_{FF} \quad (4)$$

Bagi perbandingan mikrofon dengan mikrofon standard makmal B&K 4180 di dalam pengganding penentu bunyi di dalam medan tekanan (PF), persamaan (3) menjadi;

$$S_{PFMic} = S_{PF4180} + 20 \log \left( \frac{V_{PFMic}}{V_{PF4180}} \right) + \Delta C_{PF} + \Delta E_{PF} + \Delta V_{PF} \quad (5)$$

Perbandingan relatif dibuat antara kepekaan mikrofon di dalam medan bebas dan medan tekanan dengan persamaan (4) tolak persamaan (5) dan menghasilkan;

$$S_{FFMic} - S_{PFMic} = S_{FF4180} - S_{PF4180} + 20 \log \left( \frac{V_{FFMic}}{V_{FF4180}} \right) - 20 \log \left( \frac{V_{PFMic}}{V_{PF4180}} \right) + \Delta C_{FF} - \Delta C_{PF} + \Delta E_{FF} - \Delta E_{PF} + \Delta V_{FF} - \Delta V_{PF} \quad (6)$$

Nilai faktor  $\Delta C_{FF}$  dan  $\Delta C_{PF}$  sebenarnya adalah sama kerana komponen mikrofon dan pra-penguat yang sama digunakan di dalam medan bebas dan medan tekanan. Faktor  $\Delta E$  adalah faktor persekitaran di mana komponen yang kritikal adalah suhu, tekanan dan kelembapan bandingan. Jika komponen ini tidak malar (*constant*) sepanjang pengukuran, ini boleh mempengaruhi kepekaan mikrofon B&K 4180 dan mikrofon yang diuji serta aras tekanan bunyi penentu bunyi B&K 4226 mengikut nilai pekali masing-masing. Pekali persekitaran ini boleh diperolehi dari buku pengendalian alat berkenaan. Nilai pembetulan yang disebabkan oleh perubahan keadaan persekitaran semasa ujian sebanyak 1°C untuk suhu, 5 hPa untuk tekanan sekeliling dan 5 % untuk kelembapan bandingan sepanjang pengukuran di dalam medan bebas dan medan tekanan telah dikira. Didapati nilai-nilai pembetulan tersebut adalah kurang daripada 0.01 dB. Oleh itu dapatlah disimpulkan bahawa faktor  $\Delta E$  di dalam medan bebas dan juga medan tekanan boleh diabaikan kerana ianya tidak memberikan kesan yang bererti (*significant*). Maka persamaan (6) sekarang menjadi:

$$S_{FFMic} - S_{PFMic} = S_{FF4180} - S_{PF4180} + 20 \log \left( \frac{V_{FFMic}}{V_{FF4180}} \right) - 20 \log \left( \frac{V_{PFMic}}{V_{PF4180}} \right) + \Delta V_{FF} - \Delta V_{PF} \quad (7)$$

Dari persamaan (2), bagi mikrofon B&K 4180, hubungan di antara pembetulan medan bebas ( $FFC_{Or4180}$ ), kepekaan medan bebas ( $S_{FF4180}$ ) dan kepekaan medan tekanan ( $S_{PF4180}$ ) adalah;

$$FFC_{Or4180} = S_{FF4180} - S_{PF4180} \quad (8)$$

Dari persamaan (2) juga, bagi mikrofon meter aras bunyi, hubungan di antara pembetulan medan bebas ( $FFC_{OrMic}$ ), kepekaan medan bebas ( $S_{FFMic}$ ) dan kepekaan medan tekanan ( $S_{PFMic}$ ) adalah;

$$FFC_{OrMic} = S_{FFMic} - S_{PFMic} \quad (9)$$

Dengan memasukkan  $FFC_{Or4180}$  dari persamaan (8) dan  $FFC_{OrMic}$  dari persamaan (9) ke dalam persamaan (7) akan menghasilkan

$$FFC_{OrMic} = FFC_{Or4180} + 20 \log \left( \frac{V_{FFMic}}{V_{FF4180}} \right) - 20 \log \left( \frac{V_{PFMic}}{V_{PF4180}} \right) + \Delta V_{FF} - \Delta V_{PF} \quad (10)$$

Sekarang komponen  $S_{FF4180}$ ,  $S_{PF4180}$ ,  $S_{FFMic}$  dan  $S_{PFMic}$  sudah tidak ada lagi. Oleh itu menggunakan kaedah ini, nilai bagi komponen tersebut sudah tidak perlu untuk diketahui lagi. Nilai  $\Delta V_{PF}$  bergantung kepada  $V_c$ ,  $V_{4180}$  dan  $V_{Mic}$  melalui persamaan di bawah [20].

$$\Delta V_{PF} = 20 \log \left[ V_c / (V_c + V_{4180} - V_{Mic}) \right] \quad (11)$$

di mana

$V_c$  adalah isipadu berkesan pengganding penentu bunyi iaitu sekitar  $30 \text{ cm}^3$  [21]

$V_{4180}$  adalah isipadu berkesan mikrofon B&K 4180 iaitu  $9.3 \text{ mm}^3$  [22]

$V_{Mic}$  adalah isipadu berkesan mikrofon yang diuji iaitu dengan nilai tipikal  $40 \text{ mm}^3$  [9]

Mengikut Wong [20], nilai  $\Delta V_{PF}$  boleh diabaikan jika isipadu berkesan pengganding penentu bunyi  $V_c$  jauh lebih besar dari isipadu berkesan mikrofon B&K 4180 dan mikrofon yang diuji. Seandainya nilai isipadu berkesan mikrofon  $V_{Mic}$  tidak diketahui,  $\Delta V_{PF}$  boleh diabaikan kerana nilai  $V_c$  jauh lebih besar dari  $V_{4180}$  dan  $FFCor_{Mic}$  yang diperolehi akan digunakan semula semasa tentukan bagi gabungan mikrofon tersebut dengan penentu bunyi yang sama. Faktor  $\Delta V_{FF}$  pula adalah sifar kerana isipadu ruang medan bebas iaitu  $144 \text{ m}^3$  yang jauh lebih besar daripada isipadu mikrofon iaitu  $40 \text{ mm}^3$ .

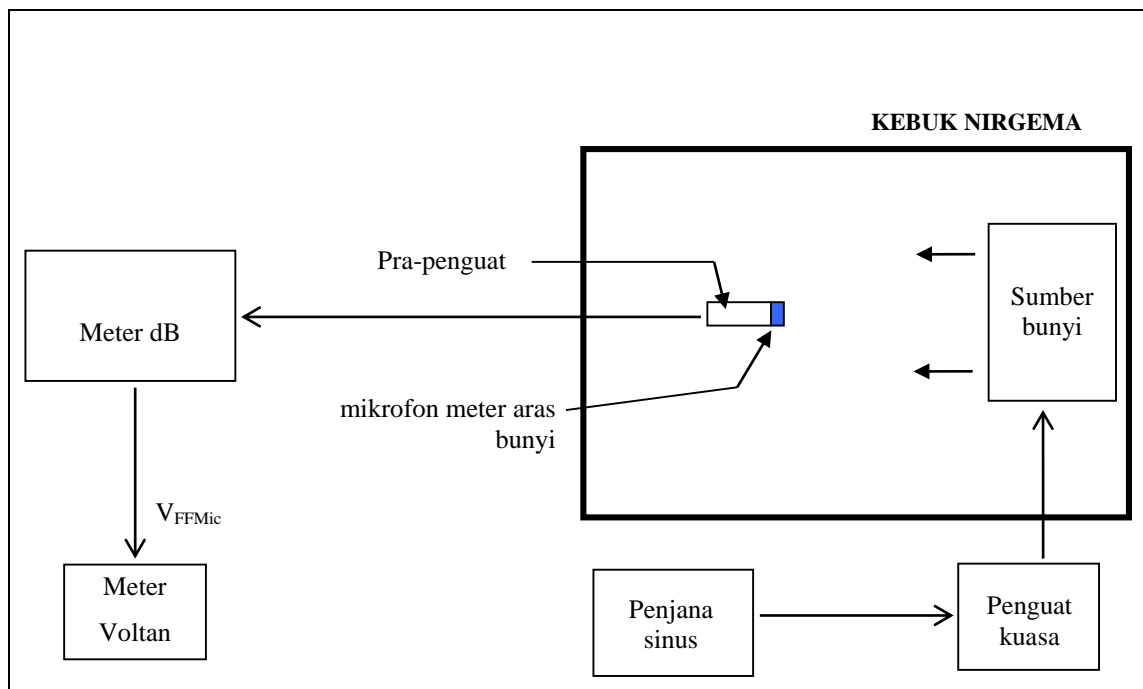
Persamaan (10) sekarang menjadi

$$FFCor_{Mic} = 20 \log V_{FFMic} - 20 \log V_{FF4180} + 20 \log V_{PF4180} - 20 \log V_{PFMic} + FFCor_{4180} \quad (12)$$

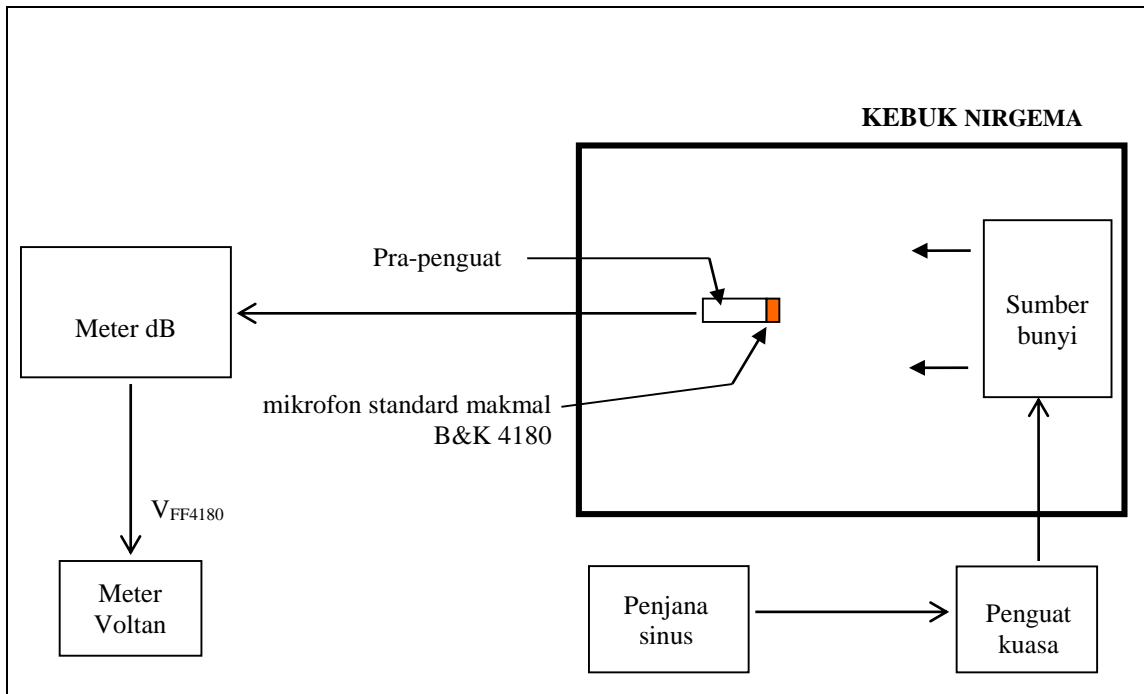
Oleh itu bagi mendapatkan nilai  $FFCor_{Mic}$ , terdapat empat pengukuran yang perlu dijalankan. Keempat-empat pengukuran itu adalah yang pertamanya untuk mengukur nilai  $V_{FFMic}$ , keduanya untuk  $V_{FF4180}$ , ketiganya untuk  $V_{PF4180}$  dan yang keempat untuk mengukur  $V_{PFMic}$ . Nilai  $FFCor_{4180}$  iaitu nilai pembetulan medan bebas mikrofon standard makmal B&K 4180 boleh diperolehi daripada standard IEC 61094-7 [16].

Susun atur sistem pengukuran bagi mendapatkan  $V_{FFMic}$  dan  $V_{FF4180}$  di dalam medan bebas serta  $V_{PF4180}$  dan  $V_{PFMic}$  di dalam medan tekanan masing-masing ditunjukkan di dalam Rajah 1, Rajah 2, Rajah 3 dan Rajah 4. Kedua-dua mikrofon meter aras bunyi dan juga mikrofon standard makmal Bruel & Kjaer 4180 masing-masing akan didedahkan kepada aras tekanan bunyi ujian yang sama secara berturutan.

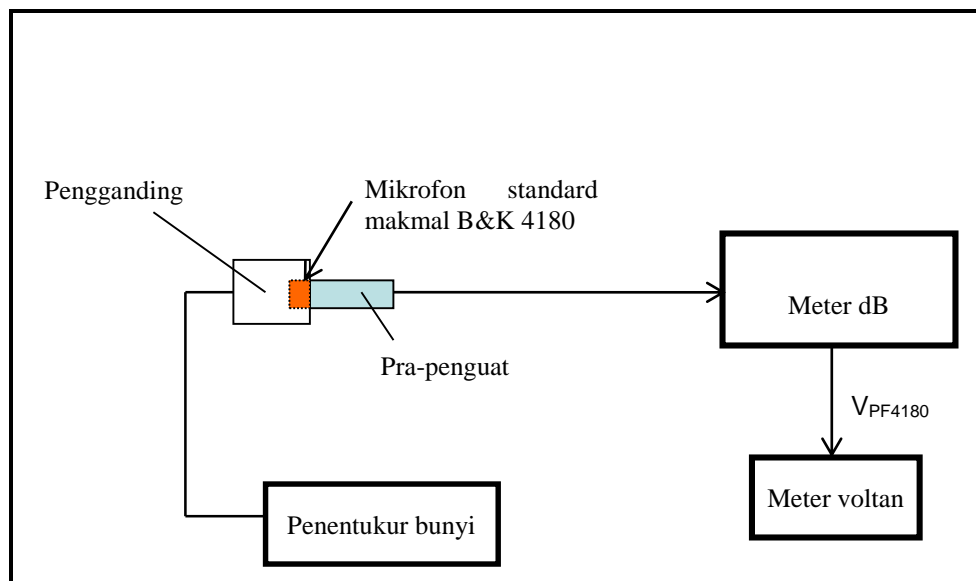
Sebelum pengukuran dijalankan, ujian kestabilan dan kebolehulangan telah dijalankan terhadap sistem pengukuran medan bebas dan medan tekanan bagi memastikan sistem berkeupayaan untuk dijalankan pengukuran bagi menentukan nilai pembetulan medan bebas. Sistem ini termasuklah penjana sinus, penguat kuasa, sumber bunyi, persekitaran, mikrofon standard makmal, meter dB dan meter voltan.



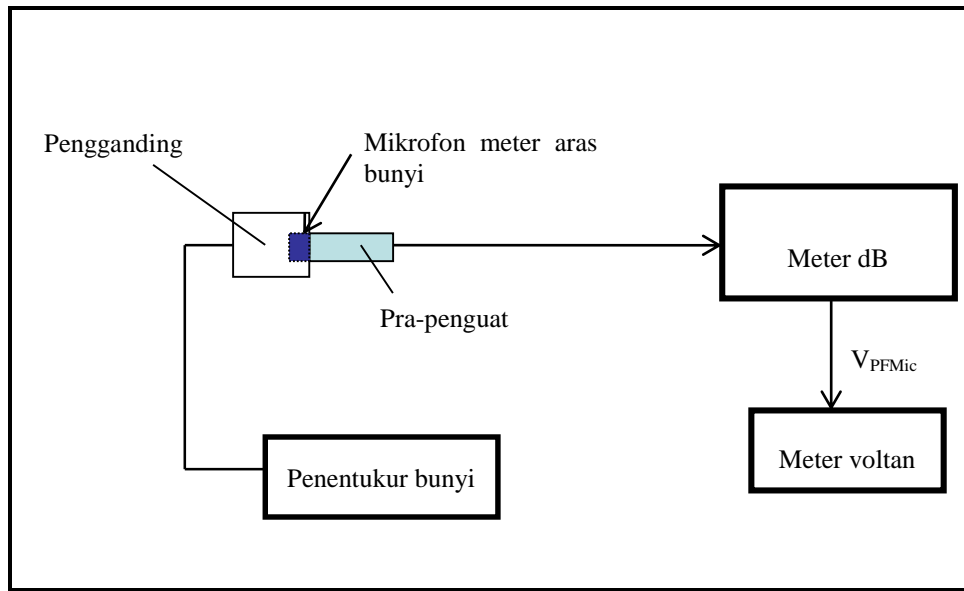
Rajah 1 Susun atur bagi pengukuran  $V_{FFMic}$  di dalam medan bebas di dalam kebuk nirgema



Rajah 2 Susun atur bagi pengukuran  $V_{FF4180}$  di dalam medan bebas di dalam kebuk nirgema



Rajah 3 Rajah skematik susun atur bagi pengukuran  $V_{PF4180}$  di dalam medan tekanan di dalam pengganding penentukur bunyi



**Rajah 4** Rajah skematik susun atur bagi pengukuran  $V_{PFMic}$  di dalam medan tekanan di dalam pengganding penentukur bunyi

Bagi memastikan kaedah yang dicadangkan boleh diterima pakai, satu pengesahan (*validation*) kaedah akan dijalankan. Pengesahan dilakukan dengan membandingkan nilai pembetulan medan bebas mikrofon dan ketakpastian yang diperolehi daripada kajian ini dengan mikrofon yang telah diketahui nilai pembetulan medan bebas dan ketakpastiannya yang diberikan oleh pembuat Bruel & Kjaer [23] beserta ketakpastiannya [18]. Model mikrofon yang dipilih untuk pengesahan kaedah adalah model 4188 dan model 4176. Ketakpastian di dalam kajian ini dikira mengikut ISO/IEC Guide 98-3 [24]. Perbandingan dilakukan dengan mendapatkan nilai En seperti yang dinyatakan oleh ISO/IEC 17043 [25]. Kaedah yang dicadangkan oleh kajian ini boleh diterima pakai jika nilai mutlak En adalah kurang daripada 1.

#### 4.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Berdasarkan ujian kestabilan dan kebolehulangan yang telah dijalankan terhadap sistem pengukuran medan bebas dan medan tekanan, didapati kedua-dua sistem mempunyai kestabilan dan kebolehulangan yang lebih baik daripada 0.03 dB dan nilai ini adalah lebih kecil daripada unit terkecil meter aras bunyi iaitu 0.1 dB. Ini menunjukkan kedua-dua sistem mempunyai keupayaan untuk digunakan bagi menentukan nilai pembetulan medan bebas.

Nilai pengukuran  $V_{FF4180}$ ,  $V_{FFMic}$ ,  $V_{PF4180}$  dan  $V_{PFMic}$  dan nilai pembetulan medan bebas ( $FFCor_{Mic}$ ) yang telah dikira untuk mikrofon B&K 4188 ditunjukkan di dalam Jadual 1. Nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi adalah dari 0.02 dB pada frekuensi 500 Hz dan menaik sehingga 7.07 dB pada frekuensi 12.5 kHz.

**Jadual 1** Keputusan pengukuran untuk mikrofon Bruel & Kjaer model 4188

Frekuensi [Hz]	$V_{FF4180}$ [mV]	$V_{FFMic}$ [mV]	$V_{PF4180}$ [mV]	$V_{PFMic}$ [mV]	$FFCor_{4180}$ [dB]	$FFCor_{Mic}$ [dB]
500	154.904	352.260	157.998	358.279	0.00	0.02
1000	150.634	339.245	157.678	353.927	0.08	0.11
2000	155.849	344.379	158.636	348.520	0.28	0.33
4000	145.346	301.636	159.729	324.704	1.03	1.21
8000	147.398	229.489	165.828	250.514	3.62	3.88
12500	154.817	145.318	175.111	161.695	6.92	7.07

Nilai pengukuran  $V_{FF4180}$ ,  $V_{FFMic}$ ,  $V_{PF4180}$  dan  $V_{PFMic}$  dan nilai pembetulan medan bebas ( $FFCor_{Mic}$ ) yang telah dikira untuk mikrofon B&K 4176 ditunjukkan di dalam Jadual 2. Nilai

pembetulan medan bebas yang diperolehi adalah dari 0.03 dB pada frekuensi 500 Hz dan menaik sehingga 7.19 dB pada frekuensi 12.5 kHz.

**Jadual 2** Keputusan pengukuran untuk mikrofon Bruel & Kjaer model 4176

Frekuensi [Hz]	V <sub>FF4180</sub> [mV]	V <sub>FFMic</sub> [mV]	V <sub>PF4180</sub> [mV]	V <sub>PFMic</sub> [mV]	FFCor <sub>4180</sub> [dB]	FFCor <sub>Mic</sub> [dB]
500	155.044	630.461	156.389	634.080	0.00	0.03
1000	150.286	609.190	156.096	626.036	0.08	0.17
2000	155.775	617.631	156.976	611.540	0.28	0.43
4000	146.797	542.939	157.699	556.451	1.03	1.44
8000	137.608	383.151	163.404	416.130	3.62	4.39
12500	148.918	285.954	165.436	308.065	6.92	7.19

Nilai-nilai pembetulan medan bebas dan ketakpastian bagi mikrofon Bruel & Kjaer model 4188 dari kajian ini bersama dengan nilai pembetulan medan bebas [23] beserta ketakpastian yang diperolehi daripada sistem tentukan Bruel & Kjaer [18]

telah digunakan untuk mengira nilai En mengikut ISO/IEC 17043 [25]. Nilai-nilai tersebut bagi mikrofon model 4188 ditunjukkan di dalam Jadual 3. Nilai-nilai mutlak En yang diperolehi adalah dari 0.11 hingga 0.32 bergantung kepada frekuensi.

**Jadual 3** Nilai pembetulan medan bebas (FFCor), ketakpastian dan En untuk mikrofon Bruel & Kjaer Type 4188

Frekuensi ujian [Hz]	FFCor dari kajian [dB]	Ketakpastian dari kajian [dB]	FFCor yang diperolehi dari B&K [dB]	Ketakpastian dari B&K [dB]	Nilai mutlak En
500	0.02	0.06	0.0	0.02	0.32
1000	0.11	0.08	0.10	0.05	0.11
2000	0.33	0.12	0.35	0.1	0.13
4000	1.21	0.14	1.25	0.2	0.16
8000	3.88	0.23	4.00	0.3	0.32
12500	7.07	0.36	7.20	0.4	0.24

Nilai-nilai pembetulan medan bebas dan ketakpastian bagi mikrofon Bruel & Kjaer model 4176 dari kajian ini bersama dengan nilai pembetulan medan bebas [23] beserta ketakpastian yang diperolehi daripada sistem tentukan Bruel & Kjaer [18]

telah digunakan untuk mengira nilai En mengikut ISO/IEC 17043 [25]. Nilai-nilai tersebut bagi mikrofon model 4176 ditunjukkan di dalam Jadual 4. Nilai-nilai mutlak En yang diperolehi adalah dari 0.21 hingga 0.47 bergantung kepada frekuensi.

**Jadual 4** Perbandingan nilai pembetulan medan bebas (FFCor) untuk mikrofon Bruel & Kjaer Type 4176

Frekuensi ujian [Hz]	FFCor dari kajian [dB]	Ketakpastian dari kajian [dB]	FFCor yang diperolehi dari B&K [dB]	Ketakpastian dari B&K [dB]	Nilai mutlak En
500	0.03	0.06	0.0	0.02	0.47
1000	0.17	0.08	0.15	0.05	0.21
2000	0.43	0.12	0.5	0.1	0.45
4000	1.44	0.14	1.35	0.2	0.37
8000	4.39	0.22	4.5	0.3	0.30
12500	7.19	0.35	7.35	0.4	0.30



Nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi seperti di dalam Jadual 1 dan Jadual 2 adalah bertambah mengikut frekuensi. Ini adalah disebabkan oleh dua faktor utama iaitu jarak gelombang bunyi dan reka bentuk mikrofon medan bebas. Fenomena ini ada diterangkan oleh Bruel & Kjaer [3] dan Nielsen [4].

Kajian ini bukan bertujuan untuk menjelaskan kewujudan nilai pembetulan medan bebas kerana ianya telah dikaji oleh Bruel & Rasmussen [6], Bruel *et al.* [7] dan Frederiksen & Gramtorp [8]. Sebaliknya kajian ini bertujuan untuk mencadangkan kaedah baru di dalam menentukan nilai pembetulan medan bebas tersebut.

Kaedah sedia ada untuk menentukan nilai pembetulan medan bebas adalah dengan menentukan perbezaan di antara kepekaan medan bebas mutlak dengan kepekaan tekanan mutlak mikrofon. Nilai pembetulan medan bebas yang ditentukan di dalam kajian ini adalah perbezaan relatif di antara kepekaan medan bebas dengan kepekaan tekanan yang masing-masingnya dibandingkan dengan mikrofon standard makmal B&K 4180. Jadi nilai kepekaan mutlak mikrofon yang diuji ( $S_{FFmic}$  dan  $S_{PFmic}$ ) dan mikrofon standard makmal B&K 4180 ( $S_{FF4180}$  dan  $S_{PF4180}$ ) adalah tidak perlu lagi untuk diketahui. Oleh itu kedua-dua mikrofon tersebut dan juga alat-alat lain seperti meter dB dan meter voltan yang digunakan di dalam pengukuran tidak perlu ditentukan. Manakala nilai kemuatan mikrofon dan pra-penguat serta isipadu berkesan mikrofon seperti di dalam persamaan (3) tidak perlu untuk diketahui kerana nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi akan digunakan hanya untuk kombinasi mikrofon dan pengganding yang sama sahaja.

Dari keputusan untuk kedua-dua model mikrofon, didapati nilai mutlak  $E_n$  yang digunakan untuk membandingkan nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi dari kajian ini dengan nilai yang diberikan oleh pembuat Bruel & Kjaer untuk semua frekuensi adalah kurang dari 1. Ini bermaksud bahawa keputusan nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi dari kajian ini untuk semua frekuensi adalah menepati nilai yang diberikan oleh pembuat setelah mengambil kira ketakpastiannya. Seterusnya ini bermaksud kaedah yang digunakan di dalam kajian ini boleh diterima pakai.

## 5.0 KESIMPULAN

Dalam kajian ini, kaedah perbandingan relatif untuk menentukan nilai pembetulan medan bebas mikrofon pengukuran telah dicadangkan. Nilai  $E_n$  yang diperolehi yang kurang dari 1 menunjukkan bahawa keputusan nilai pembetulan medan bebas yang diperolehi menggunakan kaedah yang dicadangkan oleh kajian ini boleh diterima. Oleh itu dapat disimpulkan bahawa kaedah relatif seperti yang dicadangkan boleh digunakan untuk menentukan nilai pembetulan medan bebas mikrofon pengukuran. Kaedah ini pula adalah lebih mudah kerana nilai kepekaan mutlak mikrofon yang diuji dan mikrofon standard makmal, nilai kemuatan mikrofon dan pra-penguat serta nilai isipadu berkesan mikrofon tidak perlu untuk diketahui.

## Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Makmal Metrologi Kebangsaan, SIRIM Berhad dan Universiti Kebangsaan Malaysia di atas sokongan di dalam menjayakan penyelidikan ini.

## Rujukan

- [1] IEC 60942-2003. 2003. *Electroacoustics—Sound Calibrators*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [2] Gramtorp, J. 2003. Fast Determination of Free-field response of Sound Level Meters Conforming to IEC 61672. *The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. 1175–1182.
- [3] Bruel & Kjaer. *Measuring Microphones*. BA 7216-15. Lecture Note. Naerum. 17.
- [4] Nielsen, T. G. 1995. Microphone Selection and Use. Dalam G. S. K. Wong dan T. F. Embleton (Edt). *AIP Handbooks of Condenser Microphones*. New York: American Institute of Physics. 257–286.
- [5] Hanes, P. 2000. NPL Report CMAM 57. *Methods of Free-field Calibration of Working Standard Microphones by Comparison Techniques*. UK: National Physical Laboratory.
- [6] Bruel, P.V. dan Rasmussen, G. 1959. Free-field Response of Condenser Microphones, Technical Review No.1-1959. *New Condenser Microphones*. Naerum: Bruel & Kjaer. 12–17.
- [7] Bruel, P. V., Rasmussen, G., Morris, A. dan Mowry, J. 1959. Measuring the Free-field Correction for a new Condenser Microphone. *Journal of Acoustical Society of America*. 31(11): 1570–1570.
- [8] Frederiksen, E. dan Gramtorp, J. 1996. Measurement of Microphone Free-field Corrections and determination of their Uncertainties. *Technical Review No 1 -1996*, edited by H. K. Zaveri, Denmark: Bruel & Kjaer. 9–18.
- [9] Bruel & Kjaer. 1996. Microphone Theory. *Technical Documentation: Microphone Handbook, Vol. 1: Theory*, BE 1447-11. Naerum: Chapter 2.
- [10] Fujimori, T., Horiuchi, R. & Sato, S. Free-field Correction for Laboratory Standard Microphones of Type LS2aP. *AIST Bulletin of Metrology Vol.2. No.4*, National Metrology Institute of Japan. 493–495.
- [11] IEC 61094-3. 1995-11. *Measurement Microphones - Part 3: Primary Method for Free-field Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [12] IEC 61094-2. 1992. *Measurement Microphones - Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [13] IEC 61094-5. 2001. *Measurement Microphones - Part 5: Methods for Pressure Calibration of Working Standard Microphones by Comparison*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [14] Jarvis, D. 1996. Methods for Determining the Pressure Sensitivity of Working Standard Microphones. *A Report On Euromet Project A311, NPL Report CIRA(EXT) 010*. UK: National Physical Laboratory.
- [15] Bruel & Kjaer. 1996. Calibration in *Technical Documentation: Microphone Handbook, Vol. 1: Theory*. BE 1447-11. Naerum: Chap. 6.
- [16] IEC 61094-7. 2006. *Measurement Microphones - Part 7: Values for the Difference Between Free-field and Pressure Sensitivity Levels of Laboratory Standard Microphones*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [17] IEC 61094-1. 2001. *Measurement Microphones - Part 1: Specifications for Laboratory Standard Microphones*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [18] Bruel & Kjaer. 2003. Calibration Uncertainty in Bruel & Kjaer SLM Calibration System Type 9600 : System Verification. Naerum: Chap. 6.
- [19] Suh, S.J., Suh, J.G. & Kwon, H.S. 2003. *Acoustic Characteristics of Anechoic Chamber and Semi-anechoic Chamber in SIRIM*. Korea Research Institute of Standards and Science
- [20] Wong, G. S. K. 1995. Comparison Methods for Microphone Calibration in *AIP Handbooks of Condenser Microphones*. Dalam G. S. K. Wong dan T. F. Embleton (Edt). New York: American Institute of Physics. 215-222.
- [21] Bruel & Kjaer 1990. Instruction Manual. Multifunction Acoustic Calibrator 4226. Denmark.
- [22] Bruel & Kjaer 1991. Instruction Manual. Condenser Microphones Types 4160 and 4180. Denmark.
- [23] Bruel & Kjaer. 1996. *Sound Level Meter Calibration System Type 9600 Ver July 11*. Denmark.
- [24] ISO/IEC Guide 98-3, 2008. *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)*. Geneva: ISO.
- [25] ISO/IEC 17043, 2010. *Conformity assessment – General Requirements for Proficiency Testing*. Geneva: ISO.