

---

---

# PENGEMBANGAN SISTEM KALIBRASI DAYA UNTUK ALAT ELEKTROMEDIK PADA RENTANG FREKUENSI RADIO

## *Development of Power Calibration System for Electromedical Devices in the Range of Radio Frequency*

Windi Kurnia Perangin-angin

Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia - Badan Standardisasi Nasional  
Kompleks Puspiptek Setu, Tangerang Selatan, Banten  
e-mail: windi@bsn.go.id

Diterima: 3 Maret 2021, Direvisi: 20 April 2021, Disetujui: 22 Juli 2021

### Abstrak

Alat-alat kesehatan seperti alat radiologi, alat fisioterapi dan alat elektromedik lainnya memiliki fitur berupa daya yang bekerja dalam rentang frekuensi radio. Kalibrasi daya untuk alat kesehatan elektromedik dalam rentang frekuensi radio sangat penting karena menyangkut keamanan dan kualitas dari penggunaan alat kesehatan tersebut. Kegiatan kalibrasi melalui pengukuran pada *output* daya dari alat fisioterapi juga diperlukan untuk mendapatkan hasil terapi yang optimal bagi pasien. Kebutuhan kalibrasi tersebut sejalan dengan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 62 Tahun 2017 yang menyebutkan bahwa alat kesehatan elektromedik dan radiologi perlu dikalibrasi secara periodik sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan. Belum tersedianya sistem kalibrasi daya untuk alat elektromedik pada frekuensi radio yang memadai di Indonesia menyebabkan stakeholder terkait mengirimkan peralatannya untuk dikalibrasi ke pabrik pembuat atau *supplier* yang memiliki ketertelusuran pengukuran di negara lain. Oleh karena itu, Badan Standardisasi Nasional yang mempunyai fungsi pengelolaan standar nasional satuan ukuran harus membangun ketertelusuran sistem pengukuran daya frekuensi radio di Indonesia. Sistem kalibrasi daya untuk alat elektromedik pada frekuensi radio telah dikembangkan dengan metode *direct comparison transfer* yang bekerja pada rentang frekuensi 10 MHz sampai dengan 3 GHz. Modifikasi pada metode *direct comparison transfer* telah menghasilkan pengukuran alat kesehatan elektromedik yang lebih akurat, dan ketidakpastian pengukuran yang lebih kecil. Sistem kalibrasi tersebut telah digunakan untuk kalibrasi alat elektromedik pada rentang frekuensi radio yang berfungsi untuk menunjang kesehatan masyarakat.

**Kata kunci:** kalibrasi alat kesehatan, daya frekuensi radio, ketertelusuran pengukuran, kualitas.

### Abstract

*Medical devices such as radiology, physiotherapy, and other electromedical devices have feature of power that works in radio frequency range. Calibration of power for electromedical devices in the radio frequency range is very important because it involves safety and quality of the medical device. The calibration activities through measurement of the power output of physiotherapy tools are also needed to obtain optimal therapeutic results for patients. The calibration is in accordance with the Regulation of the Minister of Health of the Republic of Indonesia Number 62 of 2017 which states that electromedical and radiological medical devices should be calibrated periodically in accordance with the regulations. The unavailability of a calibration system of power for electromedical devices in the radio frequency range in Indonesia causes certain stakeholders send their equipment for calibration to manufacturers or suppliers that have measurement traceability to other countries. Therefore, the National Standardization Agency of Indonesia that has function of managing the national measurement standard should build traceability of the radio frequency power measurement system in Indonesia. The calibration system of power for electromedical devices in the range of radio frequency has been developed using direct comparison transfer method which works in the frequency range of 10 MHz to 3 GHz. Modifications to the direct comparison transfer method have resulted in more accurate measurement of the electromedical devices, and smaller measurement uncertainty. The calibration system has been used to calibrate electromedical devices in the radio frequency range which has function to support public health.*

**Keywords:** calibration of medical devices, radio frequency power, measurement traceability, quality.

## 1. PENDAHULUAN

Alat kesehatan memiliki kaitan dengan pemanfaatan daya frekuensi radio atau biasa disebut sebagai *radio frequency (RF) power*. Peralatan kesehatan seperti alat radiologi dan fisioterapi memiliki fitur berupa daya yang bekerja dalam rentang frekuensi radio. Kalibrasi daya

untuk alat kesehatan pada rentang frekuensi radio selayaknya dilakukan untuk memastikan keakuratan alat yang menyangkut keamanan dan kesehatan bagi pengguna. Kegiatan kalibrasi melalui pengukuran pada *output* daya dari alat fisioterapi juga diperlukan untuk mendapatkan hasil terapi yang optimal bagi pasien. Kebutuhan kalibrasi tersebut sejalan dengan Peraturan

Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 62 Tahun 2017 dalam Pasal 43 menyebutkan bahwa “Untuk menjamin mutu, keamanan, dan kemanfaatan alat kesehatan elektromedik dan radiologi perlu dilakukan kalibrasi alat secara periodik sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan (Menkes, 2017). Untuk memenuhi peraturan tersebut maka diperlukan sistem pengukuran yang akurat sehingga kehandalan alat kesehatan elektromedik dan radiologi dapat dibuktikan melalui proses kalibrasi.

Di sisi lain, kualitas alat kesehatan yang buruk dapat memberikan hasil pemeriksaan yang tidak akurat sehingga dapat membahayakan kesehatan pasien (Ladanza, 2019), (Gomez, 2019). Oleh sebab itu, kalibrasi alat kesehatan seharusnya dilakukan secara berkelanjutan dan hal ini dapat dilakukan melalui sistem pengukuran yang memiliki ketertelusuran ke Sistem Satuan International (SI unit) melalui standar acuan.

Di sisi lain belum tersedianya sistem pengukuran daya frekuensi radio yang memadai di Indonesia menyebabkan stakeholder terkait mengirimkan peralatannya untuk dikalibrasi ke pabrik pembuat atau *supplier* yang memiliki ketertelusuran pengukuran di negara lain. Badan Standardisasi Nasional (BSN) memiliki fungsi untuk membangun dan menjaga ketertelusuran standar nasional satuan ukuran di Indonesia, termasuk pengukuran daya frekuensi radio. Hal tersebut tertuang dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2018 yang menyatakan bahwa BSN menjalankan tugas salah satunya dalam pengelolaan standar nasional satuan ukuran (Perpres, 2018).

Ketertelusuran pengukuran daya frekuensi radio di Indonesia dibutuhkan oleh berbagai bidang industri, antara lain pada bidang kesehatan. Stakeholder terkait, seperti Balai Pengamanan Fasilitas Kesehatan (BPFK) – Kementerian Kesehatan Republik Indonesia telah berkoordinasi dengan Kedeputan Standar Nasional Satuan Ukuran (SNSU) BSN untuk melakukan kalibrasi peralatan-peralatan yang memiliki besaran daya frekuensi radio. Oleh karena itu, BSN perlu membangun ketertelusuran sistem pengukuran daya frekuensi radio.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem kalibrasi daya untuk alat kesehatan elektromedik dalam rentang frekuensi 10 MHz sampai dengan 3 GHz. Sistem ini digunakan untuk kalibrasi peralatan yang memiliki parameter daya frekuensi radio pada alat kesehatan elektromedik sehingga dapat diketahui tingkat akurasi alat tersebut.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Alat yang beroperasi pada frekuensi radio berada dalam rentang 3 kHz sampai dengan 300 GHz (Fantom, 1990). Daya frekuensi radio merupakan nilai daya yang berasal dari suatu sumber sinyal frekuensi radio yang terukur oleh *RF power meter* (Zhang, 2013). Pengukuran daya frekuensi radio berfungsi untuk menentukan nilai daya frekuensi radio dari sebuah peralatan, termasuk alat kesehatan. Dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan untuk menentukan nilai daya frekuensi radio pada alat elektromedik. Kalibrasi daya frekuensi radio dimaksudkan untuk menguji kebenaran alat ukur kesehatan elektromedik dengan cara membandingkan hasil pengukurannya dengan nilai dari suatu standar acuan yang telah tertelusur ke SI unit.

RF power sensor merupakan alat yang berfungsi untuk mendeteksi adanya daya frekuensi radio (Wong, 2012). Dalam penggunaannya RF power sensor dilengkapi dengan RF power meter. RF power meter berfungsi untuk mengukur daya frekuensi radio yang dideteksi oleh RF power sensor (Weidman, 1996), (Díaz-Chao, 2016). Hasil pengukuran dengan RF power sensor digunakan sebagai standar acuan untuk kalibrasi alat kesehatan elektromedik dan radiologi.

Faktor kalibrasi adalah besaran yang menunjukkan tingkat keakuratan sebuah RF power sensor dalam menyerap daya frekuensi radio (Kang, 2018). Dalam kondisi ideal, faktor kalibrasi bernilai 1 atau 100 % yang menunjukkan bahwa *RF power sensor* dapat menyerap seluruh daya yang dikirimkan dari sumber sinyal (Fantom, 1990). Faktor kalibrasi dari alat yang dikalibrasi atau *device under test* (DUT) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1). Dalam menentukan faktor kalibrasi dari sebuah *RF power sensor* diperlukan nilai daya frekuensi radio dan koefisien refleksi.

$$K_D = K_S \left( \frac{P_D}{P_{MD}} \right) \left( \frac{P_{MS}}{P_S} \right) \left( \frac{|1 - \Gamma_{GE} \Gamma_D|}{|1 - \Gamma_{GE} \Gamma_S|} \right)^2 \quad (1)$$

dimana:

- $K_D$  = faktor kalibrasi DUT *power sensor*
- $K_S$  = factor kalibrasi standar *power sensor*
- $P_D$  = daya frekuensi radio yang diukur oleh DUT *power meter*
- $P_S$  = daya frekuensi radio yang diukur oleh standar *power meter*

- $P_{MD}$  = daya frekuensi radio yang diukur oleh *monitoring power meter* saat DUT *power sensor* dihubungkan ke *measuring port*
- $P_{MS}$  = daya yang diukur oleh *monitoring power meter* saat standar *power sensor* dihubungkan ke *measuring port*,
- $\Gamma_{GE}$  = *equivalent source mismatch power splitter*,
- $\Gamma_S$  = koefisien refleksi standar *power sensor*,
- $\Gamma_D$  = koefisien refleksi DUT *power sensor*.

Koefisien refleksi adalah perbandingan amplitudo antara sinyal yang dipantulkan oleh alat penerima dengan sinyal yang dikirimkan oleh sebuah sumber sinyal. Koefisien refleksi menggambarkan nilai daya frekuensi radio yang dipantulkan (Shan, 2012). Koefisien refleksi yang besar menunjukkan hasil pengukuran yang tidak akurat serta berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran yang besar (Mubarak, 2018). Pengukuran koefisien refleksi dilakukan pada RF *power sensor* dan *power splitter*. Koefisien refleksi *power splitter* biasa disebut sebagai *equivalent source mismatch* (Juroshek, 1997), (Li, 2013)

### 3. METODE PENELITIAN

Sistem kalibrasi daya pada alat elektromedik menggunakan metode *direct comparison transfer*. Beberapa alat elektromedik memiliki RF *power sensor* beserta RF *power meter* yang dapat dikalibrasi menggunakan sistem pada penelitian ini. Selain itu pada alat kesehatan elektromedik terdapat sumber daya frekuensi radio, dimana sumber daya tersebut dikalibrasi dengan menggunakan metode pengukuran langsung.

Gambar 1 menunjukkan sistem pengukuran RF *power sensor* alat elektromedik. Sedangkan Gambar 2 merupakan pengukuran koefisien refleksi RF *power sensor* dan *power splitter* menggunakan *vector network analyzer* (VNA). Pengukuran koefisien refleksi RF *power sensor* hanya menggunakan satu port VNA, sedangkan untuk *power splitter* diperlukan dua port VNA (Bianco, 2013), (Stumper, 2014). Nilai faktor kalibrasi dikalkulasi menggunakan persamaan (1) yang melibatkan nilai besaran daya frekuensi radio dan koefisien refleksi.

Pada umumnya metode *direct comparison transfer* terdiri dari peralatan sebagai berikut: *signal generator*, *power splitter*, standar

RF *power sensor*, standar RF *power meter*, *monitoring RF power sensor*, *monitoring RF power meter*, DUT RF *power sensor*, dan DUT RF *power meter* (Crowley, 2015), (Agilent, 2008). Pada penelitian ini telah dilakukan modifikasi pada metode *direct comparison transfer* dengan menambahkan alat ukur berupa *voltmeter*. Pada konvensional *direct comparison transfer*, hasil pengukuran standar RF *power sensor* dan *monitoring RF power sensor* langsung dalam besaran daya yang diukur oleh RF *power meter* (Perangin-Angin, 2018). Dalam sistem ini, pengukuran dilakukan dalam besaran tegangan yang diukur oleh *digital voltmeter*. Hasil pengukuran dalam tegangan dikonversi ke daya dengan menggunakan persamaan (2). Dengan adanya *digital voltmeter* maka diharapkan dapat menghasilkan pengukuran yang lebih akurat. Hal ini merupakan pengaruh dari tingkat keakuratan *digital voltmeter* yang lebih baik dibandingkan RF *power meter*.

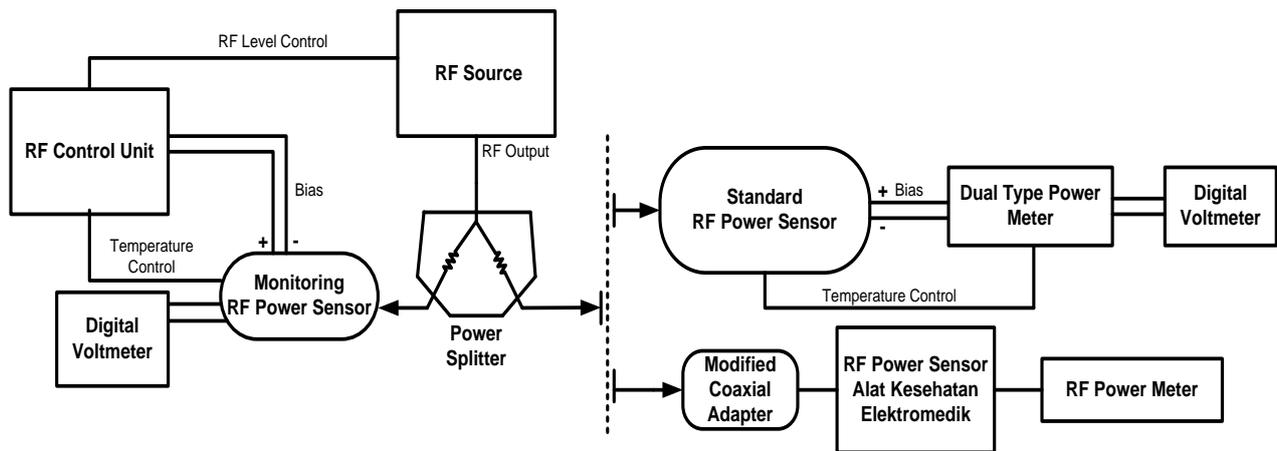
$$P = \frac{V_1^2 - V_2^2}{200} \quad (2)$$

dimana:

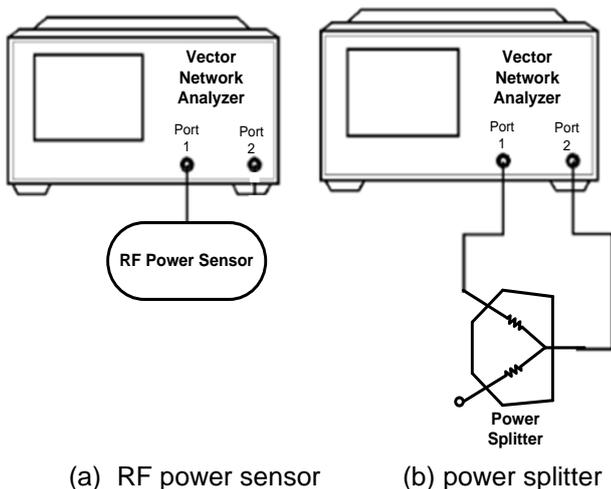
- P = daya frekuensi radio
- $V_1$  = Pembacaan *voltmeter* terhadap hasil pengukuran saat daya tidak dikirimkan (RF OFF)
- $V_2$  = Pembacaan *voltmeter* terhadap hasil pengukuran saat daya dikirimkan (RF ON)
- 200 = nominal resistansi *Dual Type Power Meter / RF control unit*

Sistem pengukuran dilakukan secara otomatis menggunakan program yang dibangun secara mandiri. Data pengukuran diambil secara otomatis dengan menggunakan program visual studio C#. Modifikasi tersebut adalah perbedaan penelitian ini dengan sistem pengukuran daya frekuensi radio yang telah ada.

Dalam proses kalibrasi terdapat konektor alat kesehatan elektromedik yang tidak match dengan konektor *power splitter*. Oleh karena itu, pada sistem ini ditambahkan *adaptor* yang dimodifikasi agar konektor pada alat kesehatan elektromedik dapat dihubungkan dengan *power splitter*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Standar RF *power sensor* yang digunakan dalam penelitian ini telah tertelusur ke Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS).

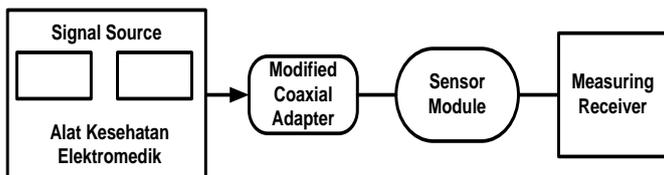


Gambar 1 Sistem pengukuran RF *power sensor* pada alat elektromedik.



(a) RF power sensor (b) power splitter  
Gambar 2 Pengukuran koefisien refleksi.

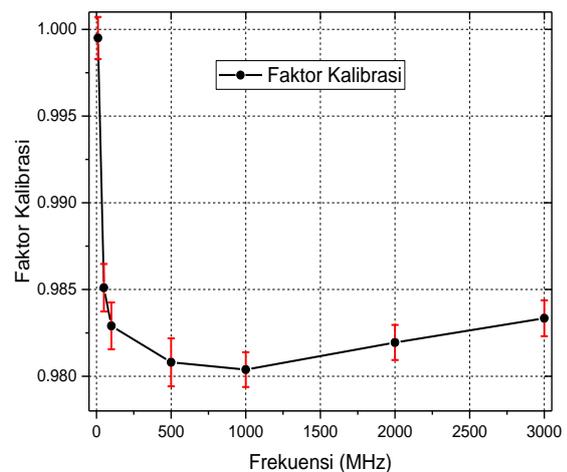
Gambar 3 menunjukkan diagram blok pengukuran sumber daya frekuensi radio untuk alat kesehatan elektromedik. Dalam hal ini perpaduan *measuring receiver* dan *sensor module* yang telah tertelusur ke SI unit melalui KRISS digunakan sebagai standar acuan.



Gambar 3 Diagram blok pengukuran sumber daya frekuensi radio alat kesehatan elektromedik

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem kalibrasi daya untuk alat elektromedik yang bekerja dalam rentang frekuensi radio telah direalisasikan. Gambar 4 menunjukkan hasil kalibrasi RF *power sensor* alat kesehatan elektromedik. Faktor kalibrasi merupakan parameter yang menunjukkan kualitas dari sebuah RF *power sensor*. Dalam hal ini, nilai faktor kalibrasi RF *power sensor* pada alat kesehatan diperoleh dari kalkulasi dengan menggunakan persamaan (1). Pengukuran dilakukan pada frekuensi 10 MHz sampai dengan 3 GHz dan daya 1 mW. Data diambil sebanyak 10 kali pada setiap titik ukur dengan standar deviasi 0,0018 pada rentang tersebut.



Gambar 4 Faktor kalibrasi RF *power sensor* alat elektromedik.

## Pengembangan Sistem Kalibrasi Daya untuk Alat Elektromedik pada Rentang Frekuensi Radio (Windi Kurnia Perangin-angin)

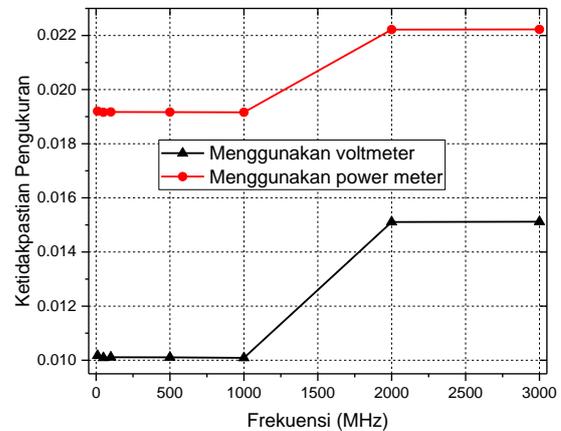
Nilai faktor kalibrasi sebuah RF *power sensor* berada dalam rentang 0 sampai dengan 1 atau diantara 0 % sampai dengan 100% (Kang, 2018). Nilai 0 menunjukkan bahwa tidak ada daya yang diserap oleh RF *power sensor*, sedangkan nilai 1 menunjukkan bahwa semua daya yang dikirim oleh sumber sinyal dapat diserap dengan baik oleh RF *power sensor*. Dari hasil pengukuran RF *power sensor* alat kesehatan elektromedik dapat dilihat bahwa pada frekuensi rendah, alat tersebut mempunyai kemampuan menyerap daya lebih baik dan mendekati 100% dari daya yang dikirimkan. Namun pada frekuensi lebih tinggi kemampuan menyerap RF *power sensor* berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa faktor kalibrasi merupakan fungsi dari frekuensi pengukuran.

Dengan mengetahui hasil kalibrasi RF *power sensor* pada alat kesehatan elektromedik maka dapat diketahui seberapa besar daya yang hilang atau daya yang tidak diserap oleh RF *power sensor* tersebut. Nilai daya sebesar 0,985 atau 98,5 % menunjukkan terdapat 1,5 % daya dari sumber sinyal yang tidak dapat diserap oleh RF *power sensor*. Dengan demikian setelah dikalibrasi maka dapat diketahui kemampuan RF *power sensor* pada alat kesehatan elektromedik dalam menyerap daya.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan ketidakpastian pengukuran RF *power sensor* alat kesehatan elektromedik antara pengukuran langsung dalam daya yang diukur oleh RF *power meter* dengan pengukuran yang dilakukan dalam tegangan oleh *voltmeter*. Pada umumnya daya frekuensi radio langsung diukur menggunakan RF *power meter*. Sedangkan dalam sistem ini, daya dari sumber sinyal diukur dalam tegangan menggunakan *voltmeter* dan kemudian hasil pengukuran dalam tegangan dikonversi menjadi daya menggunakan persamaan (2). Hal ini menjadikan hasil pengukuran yang lebih akurat, karena *digital voltmeter* memiliki ketelitian  $10^{-6}$ , sedangkan RF *power meter* hanya memiliki ketelitian sampai dengan  $10^{-3}$ . Semakin teliti sebuah alat ukur maka hasil kalibrasi akan semakin akurat.

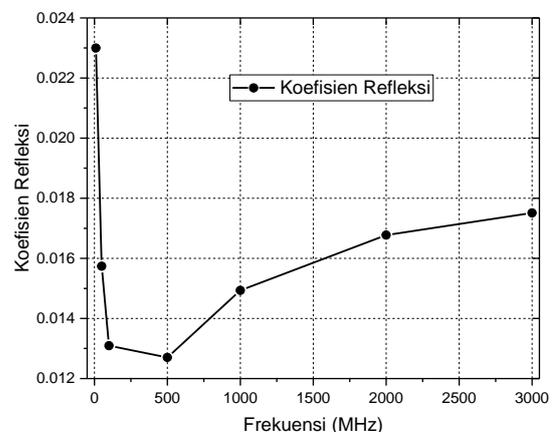
Selain itu pengukuran menggunakan *voltmeter* menjadikan ketidakpastian pengukuran RF *power sensor* yang lebih kecil karena *voltmeter* memiliki resolusi yang lebih baik dibandingkan dengan RF *power meter*. Resolusi alat ukur merupakan salah satu sumber ketidakpastian pengukuran. Resolusi alat ukur yang lebih baik berkontribusi kepada nilai ketidakpastian yang lebih baik. Ketidakpastian pengukuran berkurang dari 0.022 menjadi 0.015

pada rentang frekuensi sampai dengan 3 GHz setelah menggunakan *voltmeter*.



Gambar 5 Perbandingan ketidakpastian pengukuran RF *power sensor* alat elektromedik.

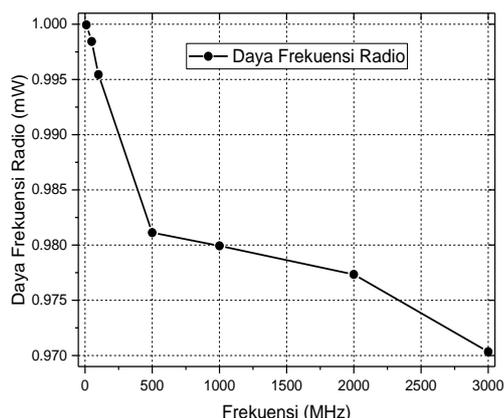
Gambar 6 merupakan koefisien refleksi dari RF *power sensor* alat kesehatan elektromedik. Dalam hal ini, sumber sinyal langsung dihubungkan ke RF *power sensor* seperti pada Gambar 2. Nilai tersebut menunjukkan daya yang dipantulkan kembali ke sumber sinyal. Nilai mutlak koefisien refleksi berada dalam rentang 0 dan 1 (Middelstaedt, 2018). Nilai koefisien refleksi 0 menunjukkan adanya *matching impedance* antara saluran transmisi dengan RF *power sensor*. Hal ini berarti semua power dari sumber sinyal diserap oleh RF *power sensor*. Namun, koefisien refleksi yang bernilai 1 berarti bahwa saluran transmisi dan RF *power sensor* *fully mismatch* sehingga semua daya dipantulkan kembali ke sumber sinyal.



Gambar 6 Koefisien refleksi RF *power sensor* alat elektromedik.

Pada Gambar 6, nilai koefisien refleksi berada dalam rentang 0,0127 sampai dengan 0,0229. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar daya diterima oleh RF power sensor dan hanya sebagian kecil dipantulkan kembali ke sumber sinyal. Pemantulan kembali ke sumber sinyal disebabkan adanya perbedaan impedansi antara sumber sinyal dan saluran transmisi dengan RF power sensor. Pada prakteknya tidak ada koefisien refleksi yang bernilai ideal sebesar 0. Hal ini dikarenakan tidak ada impedansi yang secara sempurna memiliki nilai yang sama antara RF power sensor dengan saluran transmisi.

Gambar 7 merupakan hasil kalibrasi dari sumber daya frekuensi radio alat kesehatan elektromedik. Sumber daya dapat berupa signal generator, oscillator, dan sumber sinyal RF lainnya. Daya yang dikirimkan dari sumber sinyal adalah sebesar 1 mW. Sementara hasil pengukuran standar acuan tidak sama dengan 1 mW. Dari hasil kalibrasi ini diketahui terdapat koreksi terhadap sumber sinyal tersebut. Nilai koreksi pada rentang pengukuran tersebut adalah diantara 0.001 mW sampai dengan 0.031 mW sesuai dengan titik ukurnya. Koreksi tersebut merupakan perbandingan dengan standar acuan yang telah tertelusur ke SI unit. Semakin besar frekuensi maka nilai koreksinya semakin besar juga. Nilai koreksi tersebut selayaknya diterapkan untuk mengkoreksi nilai nominal sumber sinyal ketika digunakan untuk keperluan medis sehingga alat tersebut memberikan nilai yang akurat.



Gambar 7. Daya frekuensi radio sumber sinyal alat elektromedik.

## 5. KESIMPULAN

Sistem kalibrasi daya untuk alat elektromedik yang bekerja pada rentang 10 MHz sampai dengan 3 GHz telah dikembangkan dalam penelitian ini. Sistem tersebut dilengkapi dengan program otomasi, modifikasi metode dan adaptor. Modifikasi terhadap metode yaitu menggantikan pengukuran menggunakan RF power meter dengan voltmeter telah memberikan hasil kalibrasi RF power sensor alat elektromedik yang lebih akurat dan ketidakpastian yang lebih kecil. Ketidakpastian pengukuran pada faktor kalibrasi RF power sensor alat elektromedik berkurang dari 0.022 menjadi 0.015 dalam rentang frekuensi sampai dengan 3 GHz. Berdasarkan hasil kalibrasi maka dapat dilakukan koreksi terhadap sumber daya frekuensi radio alat elektromedik. Nilai koreksi 0.001 mW sampai dengan 0.031 mW sesuai dengan titik ukurnya. Nilai tersebut diterapkan untuk mengoreksi sumber daya sehingga menunjukkan nilai yang akurat. Penelitian selanjutnya diperlukan untuk menambah rentang frekuensi pengukuran.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen BSN yang telah menyediakan sarana dan prasarana dalam melakukan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bianco, F. L., Naldini, G., Amado, J., Chiale, S. and Gonzalez, F. (2013). *Measurement module s parameters for vector network analyzer*. IEEE Latin America Transactions vol. 11, no. 1, pp. 236–241.
- Díaz-Chao, P., Muñoz-Piniella, A. Selezneva, E. and Cuenat, A. (2016). *Precise measurement of the performance of thermoelectric modules*. Measurement Science and Technology, vol. 27, no. 8.
- Fantom, A. (1990). *Radio Frequency & Microwave Power Measurement*. Peter Peregrinus Ltd.
- Gomez, G. (2019). *Traceability Proposal in Calibration of Electrosurgery Equipment*. IEEE Latin America Transactions, vol. 11, no. 1, pp. 365-369.
- Juroshek, J. (1997). *A Direct Calibration Method for Measuring Equivalent Source Mismatch*. Microwave Journal.
- Kang, T. W. Kwon, J. Y. Park, J. Il and Kang, N. W. (2018) *RF and microwave power standards from 10 MHz to 40 GHz over decades*. Journal of Electromagnetic and.

- Engineering Science, vol. 18, no. 2, pp. 88–93.
- Ladanza, E., Pennati, D., Manetti, L., Bocchi, L. and Gherardelli, M. (2019). *FMECA Design Analysis: Risk Management for the Manufacture of a CBCT Scanner*. IEEE Access, vol. 7.
- Li, E. S., Cheng, J. and Lin, Y. (2013). *Measurement Technique for Symmetrical Reciprocal Three-Port Devices Using Two-Port Vector Network Analyzer*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 10, pp. 2773-2783.
- Menkes. (2017). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 62 Tahun 2017 Tentang Izin Edar Alat Kesehatan, Alat Kesehatan Diagnostik In Vitro dan Perbekalan Kesehatan Rumah Tangga.
- Middelstaedt, F., Tkachenko, S. V. and Vick, R. (2018). *Transmission Line Reflection Coefficient Including High-Frequency Effects*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 8, pp. 4115-4122.
- Mubarak, F.A. and Rietveld, G. (2018). *Uncertainty Evaluation of Calibrated Vector Network Analyzers*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 12, pp. 1108 – 1120.
- Perpres. (2018). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2018 Tentang Badan Standardisasi Nasional.
- Shan, Y. and Cui, X. (2012). *RF and Microwave Power Sensor Calibration by Direct Comparison Transfer*. InTech.
- Weidman, M.P. (1996). *Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibration*. NIST Technical Note 1379.
- Perangin-Angin, W. K. (2018). *Establishment of RF Power Sensor Calibration at RCM – LIPI*. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018).
- Stumper, U. and Schrader, T. (2014). *Calibration Method for Vector Network Analyzers Using One or Two Known Reflection Standards*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 6, pp. 1648-1655.
- Wong, K. (2012). *Complete power sensor calibration using a VNA*. ARFTG.
- Zhang, Q., Meng, Y. S., Shan, Y. and Lin, Z. (2013). *Direct comparison transfer of microwave power sensor calibration with an adaptor: Modeling and evaluation*. Progres Electromagnetic Research Letter vol. 38, pp. 25–34,.

