

PENETAPAN NILAI KETIDAKPASTIAN BAKU SISTEM PENGUKURAN METODE TIDAK LANGSUNG SATUAN KELISTRIKAN DAYA SATU FASA PADA SKALA LABORATORIUM

Hadi Sardjono

Abstract

As a national laboratory, Puslit KIM-LIPI has been realised its measurement capability for ac power in form of Power Source System which is performed in combination of an ac voltage source, an ac current source and a phase shifter from 0° up to 360° . Concerning to the accuracy maintenance, it was observed by using an indirect measurement method. This measurement system was involved several equipment standards such as a DMM (Digital Multimeter) and a wattmeter as the load and the voltage and the current value supply by the power source were measured with its accuracy limitation up to 0.8%.

Keywords: measurement uncertainty, single phase power, indirect measurement method.

1. PENDAHULUAN

Sebagai sebuah laboratorium nasional maka Puslit KIM-LIPI telah merealisasikan satuan dasar daya dengan sebuah unit sistem daya standar satu fasa. Realisasi unit ini didukung oleh sebuah sumber tegangan bolak balik (V_{AC}) dengan rentang ukur dari 0 sampai dengan 1000 V, sumber arus bolak balik (I_{AC}) dengan rentang ukur dari 0 sampai dengan 50 A dan sistem pembebanan yang membangkitkan sudut fasa dari rentang 0° sampai dengan 180° . Rentang daya yang dibangkitkan oleh sistem ini adalah sebanding dengan perkalian ketiga satuan tersebut dan memiliki ketelitian mencapai 0.5%.

Seiring dengan maraknya penggunaan peralatan ukur daya fasa tunggal yang terjadi belakangan ini membuat kemampuan ukur (ketelitian ukur) sistem daya standar perlu dipelihara dengan serius. Secara fisual kemampuan ukur dapat diamati berdasarkan kemampuan resolusi ukurnya yang bisa mencapai 10 mW. Sudah barang tentu nilai itu belum dapat dijadikan sebagai jaminan kompetensinya atau dengan kata lain dapat dinyatakan bahwa keabsahan aplikasi sistem daya ini dapat dijamin jika telah didasari oleh sebuah proses pemeliharaan.

Penetapan sebuah metode pengukuran yang disebut metode pengukuran tidak langsung telah dilakukan sebagai alternatif yang paling tepat karena keterbatasan fasilitas standar. Langkah pengukuran yang dilakukan untuk mengukur besar daya sistem pembangkit daya adalah dengan sebuah meter tegangan standar, meter arus standar, dan sebuah beban watt-

meter. Secara teknis langkah ini dapat meningkatkan kemampuan ukur daya melalui pembacaan satuan secara tidak langsung yang diperoleh melalui pembacaan alat ukur standar yang memiliki resolusi lebih tinggi. Pembacaan tegangan dan arus tereksitasi dilakukan dengan menggunakan *Digital Multimeter* (DMM) yang resolusi mencapai $1 \mu V$ dan $1 \mu A$.

Dalam penelitian ini telah direalisasikan sebuah metode ukur untuk memelihara ketelitian sistem sumber daya yang memiliki resolusi mencapai 10 mW. Setelah dianalisa menurut sebuah sistem pengukuran dengan metode tidak langsung maka diperoleh sebuah nilai ketelitian baru untuk sistem daya tersebut sebesar 0.8%.

2. DASAR TEORI

Satuan kelistrikan daya adalah satuan kelistrikan yang diturunkan dari satuan dasar kelistrikan lainnya yaitu tegangan, arus dan sudut fasa. Seperti layaknya satuan kelistrikan lainnya, satuan kelistrikan daya direalisasikan dalam bentuk sumber (pembangkit) atau alat ukur (meter). Oleh karena itu metode pengukurannya dapat dibangun berdasarkan penetapan fungsi apakah meter atau sumber sebagai kalibrator.

Adapun sinyal tegangan, arus dan sudut fasa dalam satuan kelistrikan daya dapat direalisasikan kedalam bentuk diagram sebagai berikut.

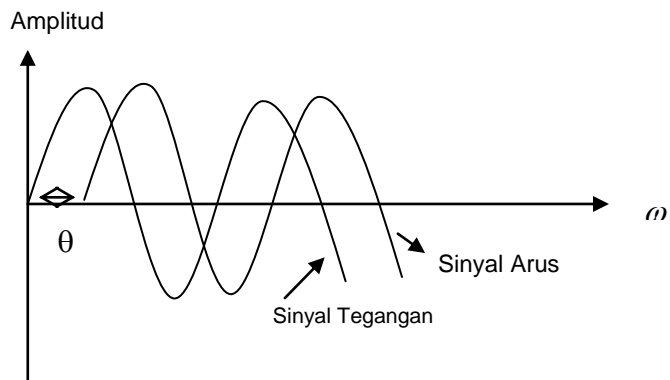
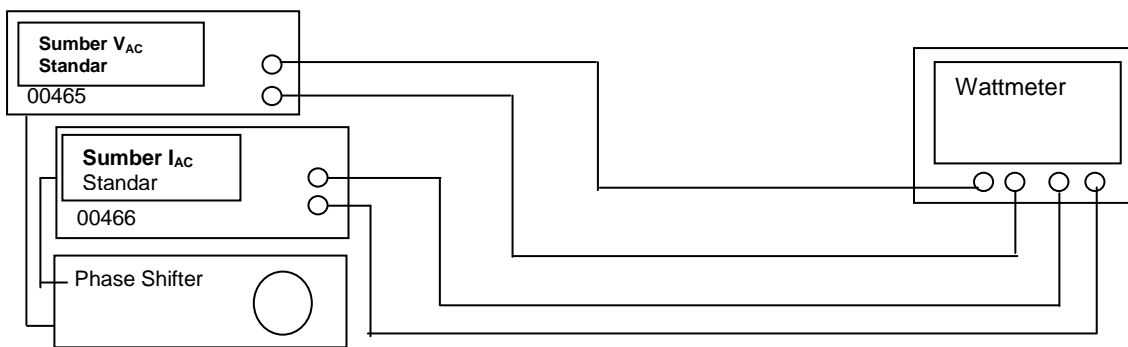
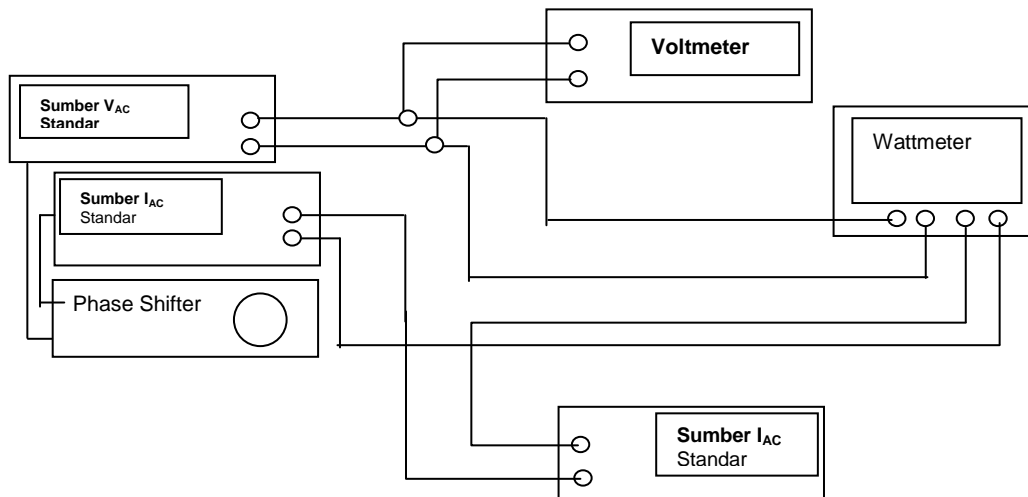


Diagram 1 Diagram Sinor Satuan Tegangan, Arus dan Sudut Fasa



Gambar 1 Rangkaian Sistem Pengukuran Daya Metode Langsung



Gambar 2 Rangkaian Sistem Pengukuran Daya Metode Langsung

2.1 Sistem Pengukuran Daya Metode Langsung

Adalah sebuah sistem pengukuran satuan daya dimana sebagai kalibrator maupun UUC memiliki kemampuan ukur satuan yang sama yaitu daya dengan kemampuan ukur watt.

2.2 Sistem Pengukuran Daya Metode Tidak Langsung

Adalah sebuah sistem pengukuran satuan daya dimana sebagai kalibrator atau UUC tidak

memiliki kemampuan ukur satuan yang sama yaitu dengan kemampuan ukur Volt dan Ampere.

2.3 Proses Pengukuran Daya Metode Tidak Langsung

Secara tidak langsung, pengukuran ini dilakukan melalui dua proses pengukuran. Pada proses pertama (Gambar 1), sumber daya diukur melalui besar arus yang mengalir ke beban (*wattmeter*) kemudian dilanjutkan dengan pengukuran kedua (Gambar 2) yaitu mengukur besar tegangan yang disuplai ke beban (*wattmeter*). Kedua pengukuran ini dilakukan dengan ketetapan pada satu nilai sudut fasa.

Sistem pengukuran dibangun dengan mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan baik untuk sistem pengukuran tegangan maupun pengukuran arus. Dilakukan pengaturan posisi peralatan Standard (Std) dan *Unit Under Calibration* (UUC) sedemikian rupa agar mempermudah pembangunan sistem pengukurannya. Sebelum dilakukan pengukuran, sistem pengukuran distabilisasikan terlebih dahulu secara listrik dan ditunakkan kondisinya dengan lingkungan agar toleransi suhu 18°C sampai dengan 24°C dan *humidity* relatif kurang dari 75% tercapai. Untuk keperluan itu sistem pengukuran memerlukan waktu pemanasan selama tidak kurang dari satu jam.

Peralatan yang dilibatkan dalam proses kalibrasi ini terdiri dari sebuah sistem daya standar (yang terdiri dari YEW-2558 AC *Voltage Calibrator*, YEW-2558 AC *Current Calibrator*, YEW-2558 *Phase Shifter*), *Wattmeter* analog sebagai beban dan *Digital Multi Meter* (DMM) standar.

2.4 Pengukuran Tegangan

Dari sebuah sistem pengukuran tegangan dapat diperoleh data hasil ukur dari hasil pembacaan DMM yang difungsikan sebagai DVM. DVM dipasang secara paralel terhadap rangkaian pengukuran agar tidak terjadi pembebanan pada rangkaian pengukuran (Gambar 3).

2.4.1 Prosedur Kalibrasi

Merangkai peralatan sumber daya UUC dan meter kalibrator dengan menggunakan kabel pengukuran seperti terlihat pada Gambar 1.

Memastikan bahwa kondisi indikator sumber daya and UUC dalam keadaan STANDBY

- a. Memastikan fungsi sumber daya UUC dan meter kalibrator dalam keadaan siap sepenuhnya.
- b. Menentukan rentang sumber daya UUC dan meter kalibrator dengan menetapkan posisi sumber daya terkecil dengan penentuan frekuensi (50 Hz atau 60 Hz atau 400 Hz atau lebih tinggi dengan menggunakan osilator luar) seperti yang dikehendaki dalam titik kalibrasi dalam Tabel 1.
- c. Mengatur rentang sumber daya seperti berikut. Jika rentang sumber daya UUC ditetapkan pada skala 220 V, maka rentang meter kalibrator harus disetel pada tegangan AC sampai 250 volt.
- d. Menyetel kontak *Operate/Standby* sumber daya UUC dan meter kalibrator pada fungsi ON menunggu selama 30 menit untuk menstabilkan pembacaan meter kalibrator dan menyunting data seperti pada Tabel 1.
- e. Menyetel rentang sumber daya pada posisi yang lebih tinggi.
- f. Mengulangi langkah langkah 5 dan 6
- g. Menyetel rentang sumber daya pada rentang tertinggi
- h. Mengulang langkah 5 dan 6.
- i. Mengulang langkah 5 sampai dengan 10 minimal sebanyak 5 kali.
- j. Menyetel kontak *Operate/Standby* STD dan UUC pada fungsi *Standby*.

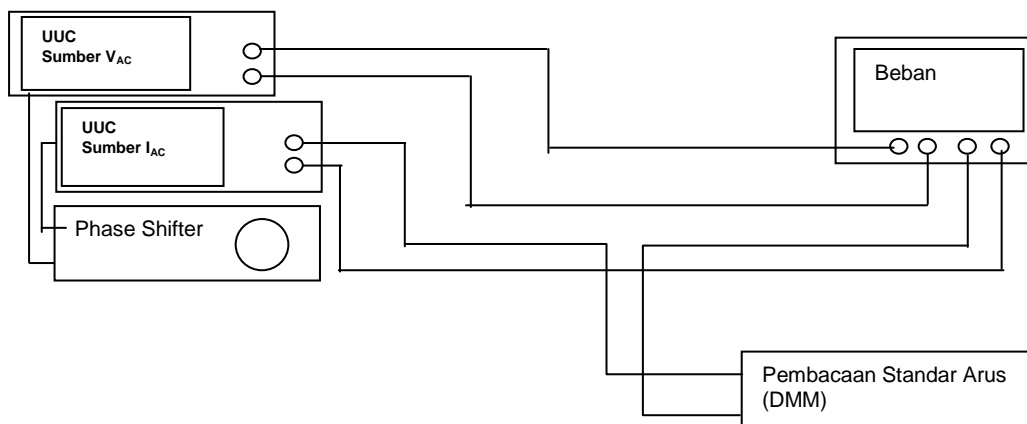
2.5 Pengukuran Arus

Pada sistem pengukuran arus diperoleh data dari hasil pembacaan DMM yang difungsikan sebagai DCM atau *Digital Current Meter* (lihat Gambar 4).

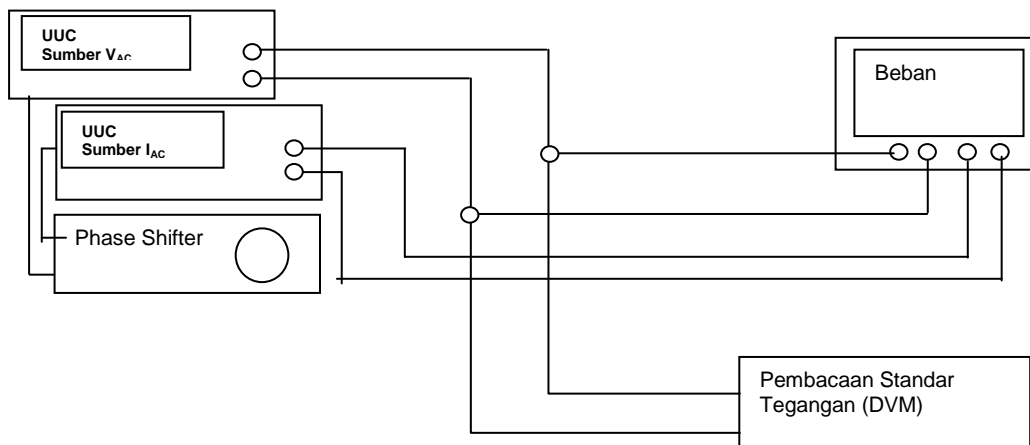
2.5.1 Prosedur Kalibrasi

- a. Merangkai peralatan sumber daya UUC dan meter kalibrator dengan menggunakan kabel pengukuran seperti terlihat pada Gambar 1.
- b. Memastikan bahwa kondisi indikator sumber daya dan UUC dalam keadaan STANDBY
- c. Memastikan fungsi sumber daya UUC dan meter kalibrator dalam keadaan siap sepenuhnya.
- d. Menentukan rentang sumber daya UUC dan meter kalibrator dengan menetapkan posisi sumber daya terkecil dengan penentuan frekuensi (50 Hz atau 60 Hz atau 400 Hz atau lebih tinggi dengan menggunakan osilator luar) seperti yang dikehendaki dalam titik kalibrasi dalam Tabel 1.

- e. Mengatur rentang sumber daya seperti berikut:
Jika rentang sumber daya UUC ditetapkan pada skala 220 V, maka rentang meter kalibrator harus disetel pada tegangan AC sampai 250 volt.
- f. Menyetel kontak Operate/*Standby* sumber daya UUC dan meter kalibrator pada fungsi ON menunggu selama 30 menit untuk menstabilkan pembacaan meter kalibrator dan menyunting data seperti pada Tabel 1.
- g. Menyetel rentang sumber daya pada posisi yang lebih tinggi.
- h. Mengulangi langkah langkah 5 dan 6
- i. Menyetel rentang sumber daya pada rentang tertinggi
- j. Mengulang langkah 5 dan 6.
- k. Mengulang langkah 5 sampai dengan 10 minimal sebanyak 5 kali.
- l. Menyetel kontak *Operate/Standby* STD dan UUC pada fungsi *Standby*.



Gambar 3 Rangkaian Sistem Pengukuran Arus pada Sistem Pengukuran Daya dengan Metode Tidak Langsung



Gambar 4 Rangkaian Sistem Pengukuran Tegangan pada Sistem Pengukuran Daya

Tabel 1 Hasil Pengukuran Sistem Pengukuran Metode Tidak Langsung

No	Pembacaan Daya		Pembacaan Sudut fasa	Pembacaan DMM _{Standar}	
	Tegangan	Arus		Pembacaan Tegangan(V)	Pembacaan Arus (A)
1	120.00	1.0000	0.0872 ⁰	120.10	0.9994
2				120.11	0.9996
3				120.13	0.9997
4				120.12	0.9997
5				120.11	0.9997
6				120.10	0.9998
7				120.14	0.9998
8				120.15	0.9997
9				120.12	0.9998
10				120.13	0.9998
Rerata				120.12	0.9997

3. METODE PENELITIAN

3.1 Analisa Ketidakpastian Pengukuran

3.1.1 Model Matematis

UUC dikoneksi secara langsung dengan meter kalibrator disertai sebuah beban berupa Wattmeter analog.

$$P = f(V, I) = V \cdot I \cdot \cos \theta$$

dimana:

P : daya yang akan dikalibrasi (Watt).

V : tegangan yang terukur oleh DMM (volt).

I : arus yang terukur oleh DMM (Ampere).

$\cos \theta$: pergeseran sudut fasa arus terhadap tegangan (⁰)

3.1.2 Persamaan Ketidakpastian

Besaran input adalah takterkorelasi.

Ketidakpastian kombinasi $u_c(P)$ adalah:

$$u_c^2(P) = \sum_{i=1}^n (\partial P / \partial (f)_i)^2 \times u^2(f)_i$$

Sumber daya disuplai langsung ke voltmeter, ammeter dan beban sebuah wattmeter sehingga kesalahan akibat pembebanan $u_4(P)$ dan koneksi $u_5(P)$ dapat diabaikan (= 0), sehingga komponen komponen ketidakpastian total pengukuran adalah:

$u_1(V)$: ketidakpastian meter tegangan kalibrator.

$u_2(I)$: ketidakpastian meter arus kalibrator,

$u_3(\cos \theta)$: kemampuan baca (readability) $\cos \theta$ meter

$u_4(P)$: kemampuan baca (readability) sumber daya,

Ketidakpastian standar kombinasi menjadi:

$$u_c^2(P) = \{(\partial P / \partial (V))^2 \times u_1^2(V)\} + \{(\partial P / \partial (I))^2 \times u_2^2(I)\} + \{(\partial P / \partial (\cos \theta))^2 \times u_3^2(\cos \theta)\} + \{(\partial P / \partial (P))^2 \times u_4^2(P)\}$$

$$= c_1^2 \times u_1^2(V) + c_2^2 \times u_2^2(I) + c_3^2 \times u_3^2(\cos \theta) + c_4^2 \times u_4^2(P)$$

Koefisien sensitifitas dapat dihitung sebesar :

$$c_1 = c_3 = (\partial P / \partial (V)) = I \cdot \cos \theta$$

$$c_2 = c_4 = (\partial P / \partial (I)) = V \cdot \cos \theta$$

$$c_5 = (\partial P / \partial (\cos \theta)) = -V \cdot I \cdot \sin \theta$$

Ketidakpastian kombinasi menjadi:

$$u_c^2(P) = \sqrt{(I \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_1^2 + (V \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_2^2 + (I \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_3^2 + (V \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_4^2 + (-V \cdot I \cdot \sin \theta)^2 \cdot u_5^2}$$

3.1.3 Evaluasi Tipe A

Pada kasus dimana pembacaan sumber daya UUC stabil dan ketelitian standar meter acuan lebih tinggi dibandingkan dengan UUC maka evaluasi ketidakpastian tipe A dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

Pembacaan Voltmeter,

Tegangan rerata:
$$\overline{(V)} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i)}{n} \quad \text{volt}$$

Deviasi Standar:

$$s_d(\overline{V_i}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \overline{V})^2}{n-1}} \quad \text{volt}$$

Deviasi Standar Rerata:

$$s(\overline{V}) = \frac{s(V_i)}{\sqrt{n}} \quad \text{volt}$$

Ketidakpastian standar tegangan karena efek pembacaan acak (*Experimental Standard Deviation of Measurement /ESDM*) adalah,

$$u_1(V) = \frac{s(\overline{V})}{\mu V}$$

Pembacaan Ammeter,

Arus rerata:
$$\overline{(I)} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i)}{n} \quad \text{volt}$$

Deviasi Standar:

$$s_d(\overline{I_i}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \overline{I})^2}{n-1}} \quad \text{volt}$$

Deviasi Standar Rerata:

$$s(\overline{I}) = \frac{s(I_i)}{\sqrt{n}} \quad \text{volt}$$

Ketidakpastian standar tegangan karena efek pembacaan acak (*Experimental Standard Deviation of Measurement /ESDM*) adalah

$$u_2(I) = \frac{s(\overline{I})}{\mu V}$$

3.1.4 Evaluasi Tipe B

- Kalibrator

Dari spesifikasi kalibrator, ketidakpastian tegangan terpakai masing-masing adalah:

$a_3 = \pm$ (% of reading + % of range), dan

$a_4 = \pm$ (% of reading + % of range)

pada faktor kepercayaan 95%.

Dengan asumsi distribusi normal, faktor cakupan $k=2$, ketidakpastian standar tegangan dan arus terpakai masing-masing adalah:

$u_3((V)) = a_3/2 \quad \mu V$, dan

$u_4((I)) = a_4/2 \quad \mu A$

dengan derajat kebebasan masing-masing adalah:

$\nu_3 = \sim$ dan $\nu_4 = \sim$

- Alat yang dikalibrasi (UUC)

Dari spesifikasi UUC, rentang X ($\cos \theta$) memiliki resolusi y (0.001^0). Selama pembacaan tidak berubah maka diasumsikan batasannya adalah $1/2$ resolusi.

$a_5 = y/2$

Diasumsikan distribusi rektangular, ketidakpastian standar yang terjadi berdasarkan ketidakpastian resolusi UUC adalah:

$u_5 = a_4/\sqrt{3} \quad \mu^0$

dengan derajat kebebasan: $\nu_5 = \sim$

3.1.5 Ketidakpastian Standar Kombinasi uc(P)

Ketidakpastian kombinasi standar daya pada UUC adalah:

$$u_c^2(P) = \sqrt{(I \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_1^2 + (V \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_2^2 + (I \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_3^2 + (V \cdot \cos \theta)^2 \cdot u_4^2 + (-V \cdot I \cdot \sin \theta) \cdot u_5}$$

$$\mu W.$$

dengan derajat kebebasan efektif (EDF).

Derajat kebebasan efektif $\nu_{\text{eff}(P)} \approx \sim$

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{(c_p u_c(P))^4}{\frac{[c_1 u_1(V)]^4}{\nu_1} + \frac{[c_2 u_2(I)]^4}{\nu_2} + \frac{[c_3 u_3(V)]^4}{\nu_3} + \frac{[c_4 u_4(I)]^4}{\nu_4} + \frac{[c_5 u_5(\cos \theta)]^4}{\nu_5}}$$

3.1.6 Ketidakpastian Lanjut uexp

Dari Tabel Student's "t", derajat kebebasan $\nu_{\text{eff}} \approx \sim$, pada tingkat kepercayaan 95%, faktor "t" adalah

$t_{95\%} (\nu_{\text{eff}} \approx \sim) = 2$

oleh karenanya faktor cakupan $k = 2$

Ketidakpastian lanjut adalah:

$u_{\text{exp}} = 2 \times u_c \quad \mu W.$

3.1.7 Tabulasi Anggaran Ketidakpastian Sistem Pengukuran

Tabel 3 Anggaran Ketidakpastian Sistem Pengukuran

Sumber ketidakpastian	Tipe	u_i	Satuan	Nilai ketidakpastian	Koef. Sens.	Distribusi data	Faktor cakupan	Derajat kebebasan
Repeatability V	A	u_1	μV	ESDM	$I \cos \theta$	Normal	1	9
Repeatability I	A	u_2	μA	ESDM	$V \cos \theta$	Normal	2	9
Standar DVM	B	u_3	μV	$\frac{a_3}{\sqrt{3}}$	$I \cos \theta$	Segi-4	$\sqrt{3}$	~
Standar DCM	B	u_4	μA	$\frac{a_4}{\sqrt{3}}$	$V \cos \theta$	Segi-4	$\sqrt{3}$	~
Resolusi Cos θ	B	u_5	μ^0	$\frac{a_5}{\sqrt{3}}$	$V \sin \theta$	Segi-4	$\sqrt{3}$	
Total	Komb.	u_c	μW	$\sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2}$				
Total	Lanjut.	u_{exp}	μW	$2 \cdot u_c$	-	t	2	~

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan Tabel 4 diperoleh berdasarkan nilai nilai yang diperoleh melalui acuan sumber sumber teknis yang sesuai dan spesifikasi teknis peralatan standar yaitu sebagai berikut:

$$u_1 = \text{ESDM}_V = 5260 \mu V$$

$$u_2 = \text{ESDM}_I = 39.6 \mu A$$

$$u_3 \text{ sesuai dengan spesifikasi teknis} = 7.5 \mu V$$

$$u_4 \text{ sesuai dengan spesifikasi teknis} = 0.0003 \mu A$$

$$u_5 \text{ sesuai dengan spesifikasi teknis} = 1165 \mu^0$$

I = nilai rerata hasil pengukuran arus = 0.9997 A

V = nilai rerata hasil pengukuran tegangan = 120.12 V

Cos θ = sudut fasa antara V dan I dibuat konstan = 1

Nilai ketidakpastian pengukuran lanjut adalah tingkat ketelitian sistem pengukuran yang dibangun untuk kalibrasi sumber daya standar yaitu sebesar 7.15 mW atau dapat dinyatakan memiliki nilai kemampuan ukur sampai tingkat 0.8%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Melalui penelitian ini telah diperoleh sebuah rancang bangun sistem pengukuran standar. Daya metode tidak langsung yang melibatkan instrumen ukur (*Digital Multi Meter/DMM*) standar skala laboratorium. Ketelitian sistem pengukuran ini diturunkan berdasarkan identifikasi sumber sumber ketidakpastian standar yang ada dan telah dituangkan kedalam

bentuk tabel "*Budget* ketidakpastian". Tingkat ketelitian sistem pengukuran yang mencapai 0.8% ini dapat dipergunakan untuk memelihara ketelitian sumber daya standar laboratorium.

Aplikasi prinsip dasar pengukuran ini dapat dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan ukur instrumen standar sehingga dapat melayani pengukuran sumber daya yang tingkat ketelitian lebih besar dari 1%.

Tabel 4 *Budget* Ketidakpastian Sistem Pengukuran Daya 120 W Metode Tidak Langsung

Sumber ketidakpastian	Tipe	u_i	satuan	Nilai ketidakpastian	Koefisien Sensitivitas	Distribusi data	Faktor cakupan	Derajat kebebasan
Repeatability V	A	u_1	μV	5260	0.99590163	Normal	1	9
Repeatability I	A	u_2	μA	39.4	119.663603	Normal	2	9
Standar DVM	B	u_3	μV	7.5	0.99590163	Segi-4	$\sqrt{3}$	~
Standar DCM	B	u_4	μA	0.0	119.663603	Segi-4	$\sqrt{3}$	~
Resolusi Cos \square	B	u_5	μ^0	115.5	10.4580563	Segi-4	$\sqrt{3}$	~
Total	Komb.	u_c	μW	7150.4				

DAFTAR PUSTAKA

1. Fluke 2nd edition. 1994. *Calibration. Philosophy in Practice*
2. Expression of Uncertainty, 1992. ISO/IEC/OIML/BIPM
3. USA. March 2000. *Digital Multimeter Operation manual, Agilent 24401A, 5th Edition*
4. Course notes CSIRO. 1995. *Using the ISO "Guide to the expression on of Uncertainty in Measurement /GUM"*

BIODATA

R. Hadi Sardjono, dilahirkan di Bangkalan, 21 April 1960. Penulis menamatkan Pasca Sarjana Bidang Opto-elektroteknika dan Aplikasi Laser, Universitas Indonesia pada tahun 1991. Sejak tahun 2003, penulis menjabat sebagai Peneliti Madya Bidang *Electrical Metrology*.

