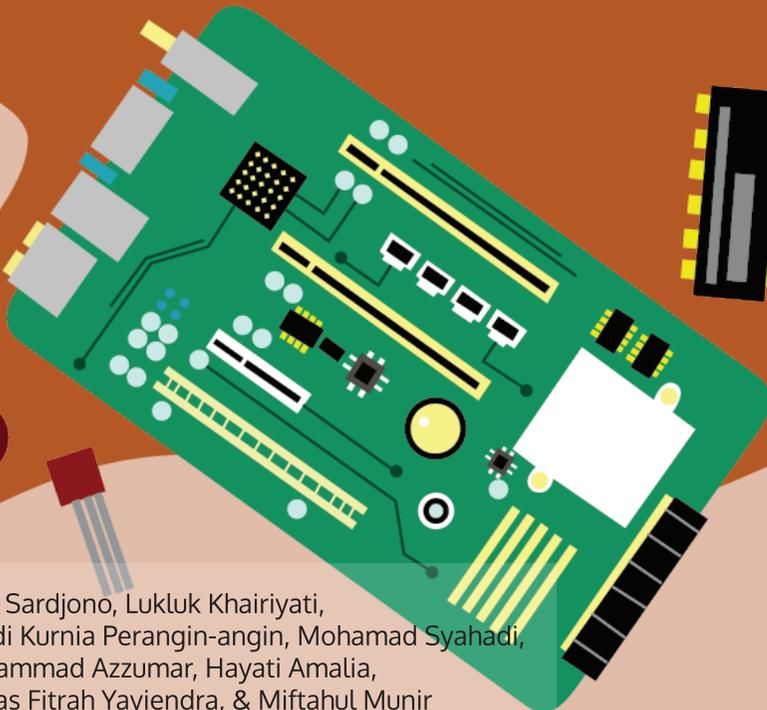


Metrologi Kelistrikan Terapan

Untuk Laboratorium Kalibrasi di Industri dan Perguruan Tinggi



Hadi Sardjono, Lukluk Khairiyati,
Windi Kurnia Perangin-angin, Mohamad Syahadi,
Muhammad Azzumar, Hayati Amalia,
Nibras Fitrah Yaiendra, & Miftahul Munir

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Metrologi Kelistrikan Terapan

Untuk Laboratorium Kalibrasi Di Industri Dan Perguruan Tinggi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Metrologi Kelistrikan Terapan

Untuk Laboratorium Kalibrasi Di Industri Dan Perguruan Tinggi

Hadi Sardjono, Lukluk Khairiyati,
Windi Kurnia Perangin-angin, Mohamad Syahadi,
Muhammad Azzumar, Hayati Amalia,
Nibras Fitrah Yaiendra, & Miftahul Munir

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2021 Badan Standardisasi Nasional
Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Metrologi Kelistrikan Terapan: Untuk Laboratorium Kalibrasi di Industri dan Perguruan Tinggi/Hadi Sardjono, Lukluk Khairiyati, Windi Kurnia Perangin-angin, Mohamad Syahadi, Muhammad Azzumar, Hayati Amalia, Nibras Fitrah Yaienda, dan Miftahul Munir-Jakarta: LIPI Press, 2021.

xviii hlm. + 110 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-496-206-7 (cetak)

978-602-496-205-0 (e-book)

1. Metrologi
2. Kelistrikan
3. Kalibrasi

621.37

Copyeditor : Tantrina Dwi Aprianita
Proofreader : Sonny Heru Kusuma
Penata isi : Astuti Krisnawati dan Rahma Hilma Taslima
Desainer sampul : Meita Safitri

Cetakan pertama : Juli 2021



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp.: (021) 573 3465
e-mail: press@mail.lipi.go.id
website: lipipress.lipi.go.id
 LIPI Press
 @lipi_press
 lipi.press



Bekerja sama dengan
Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia
Pusrisbang SDM, Badan Standardisasi Nasional (BSN),
Komplek PUSPIPTEK, Gedung 420, Setu,
Setu Tangerang Selatan, Banten (15314).
Telp: 0217560533,
e-mail: sekre.pusrisbang@bsn.go.id
website : <http://bsn.go.id>.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
PENGANTAR PENERBIT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
PRAKATA	xvii
BAB I METROLOGI KELISTRIKAN	1
A. Besaran Kelistrikan.....	2
B. Fungsi Metrologi Kelistrikan.....	3
BAB II METROLOGI TEGANGAN DAN ARUS AC.....	5
A. AC-DC Transfer Standard Sebagai Standar Tegangan AC	8
B. Metode AC-DC Transfer Standard.....	9
C. Ketertelusuran Tegangan AC dan Arus AC.....	15
D. Prosedur Kalibrasi Besaran Tegangan AC Menggunakan Thermal Transfer Standard (TTS).....	16
E. Studi Kasus Kalibrasi dan Analisis Ketidakpastian Pengukuran Tegangan AC	25

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB III	METROLOGI RESISTANSI.....	31
A.	Perkembangan Resistor Standar.....	33
B.	Resistor Standar	36
C.	Konfigurasi Pengukuran	43
D.	Metode Pengukuran dan Kalibrasi.....	49
E.	Studi Kasus Resistansi dan Analisis Ketidakpastian Pengukuran Resistansi	57
F.	Ketertelusuran Resistansi	68
BAB IV	METROLOGI DAYA FREKUENSI RADIO.....	71
A.	Karakteristik Daya Frekuensi Radio.....	71
B.	Pengukuran Daya Frekuensi Radio	72
C.	Prinsip Dasar Pengukuran Daya Frekuensi Radio	72
D.	Studi Kasus Analisis Ketidakpastian Pengukuran Daya Frekuensi Radio	76
BAB V	KOMPETENSI PENGUKURAN METROLOGI KELISTRIKAN	87
A.	Laboratorium Metrologi Kelistrikan Nasional	88
B.	Laboratorium Kalibrasi Kelistrikan	89
C.	Laboratorium Kalibrasi Kelistrikan Industri	89
D.	Laboratorium Kalibrasi Kelistrikan Perguruan Tinggi	90
BAB VI	PENUTUP	91
A.	Tegangan dan Arus	92
B.	Resistansi	94
C.	Daya Frekuensi Radio	95
	DAFTAR PUSTAKA	97
	INDEKS	101
	BIOGRAFI PENULIS	105

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Rangkaian Sistem Parameter Listrik	2
Gambar 2.	Rangkaian Sistem Tenaga Listrik.....	3
Gambar 3.	Karakteristik Sinyal AC dan DC.....	7
Gambar 4.	AC-DC Thermal Converter Tipe Elemen	9
Gambar 5.	Skematik dari Tipe SJTC Element.....	10
Gambar 7.	Skematik <i>Thin-film</i> MJTC	12
Gambar 8.	<i>AC-DC Thermal Transfer Tipe Solid State</i>	13
Gambar 9.	Karakteristik frekuensi dari <i>thermal converter</i>	14
Gambar 10.	Ketertelusuran tegangan AC pada Laboratorium Metrologi Nasional di Indonesia.....	15
Gambar 11.	Ketertelusuran Arus AC pada Laboratorium Metrologi Nasional di Indonesia.	15
Gambar 12.	Skematik diagram untuk kalibrasi sumber tegangan AC dengan menggunakan TTS.....	17
Gambar 13.	Realisasi Kolom Merkuri untuk Ohm.....	33
Gambar 14.	Jembatan Quadrature	34
Gambar 15.	Resistor Standar	34
Gambar 16.	Sistem Quantum Hall Resistance dari MI-Kanada.....	35

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 17.	Perkembangan dari Resistor Standar	36
Gambar 18.	Terminal pada Resistor Standar	37
Gambar 19.	Struktur Internal Resistor Standar	38
Gambar 20.	Resistor standar di mana a. resistor standar nominal tetap, b. dekade resistor, c. Resistor transfer standar, d. High resistor standar, dan e. Kalibrator Multifungsi.	42
Gambar 21.	Salah satu tipe resistor standar yang dikondisikan dalam bak oli.....	43
Gambar 22.	Skematik Konfigurasi Rangkaian Pengukuran Dua-Terminal	44
Gambar 23.	Ilustrasi Pengukuran Resistor Menengah dan Tinggi	46
Gambar 24.	Skematik konfigurasi 3T dengan menghubungkan <i>outer</i> pada kabel koaksial ke <i>guard</i>	47
Gambar 25.	Skematik Konfigurasi 4T	48
Gambar 26.	Blok Diagram Sederhana Ohmmeter	50
Gambar 27.	Pengabelan Ohmmeter dan Resistor	52
Gambar 28.	Diagram Skematis dari DCCB	56
Gambar 29.	Skema pengukuran metode substitusi.....	63
Gambar 30.	Ketertelusuran Pengukuran Resistansi	68
Gambar 31.	Rantai Ketertelusuran Pengukuran Daya Frekuensi Radio	73
Gambar 32.	Teknik Dasar Pengukuran Daya Frekuensi Radio	74
Gambar 33.	Transmisi daya frekuensi radio dari sumber sinyal ke power sensor.	74
Gambar 34.	Blok Diagram Pengukuran Daya Frekuensi Radio	75
Gambar 35.	Pengukuran Daya Frekuensi Radio Signal Generator	77
Gambar 36.	Diagram Ketertelusuran secara Umum	88



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai ambang batas tegangan masukan TTS F792A yang diperbolehkan.....	19
Tabel 2. Waktu tunak yang direkomendasikan untuk setiap rentang masukan	19
Tabel 3. Sertifikat kalibrasi tegangan DC yang dikeluarkan oleh MFC pada titik ukur 1 Volt.....	26
Tabel 4. Sertifikat Kalibrasi TTS pada Titik Ukur 1 Volt 40 Hz	26
Tabel 5. Data Pengukuran untuk Kalibrasi Tegangan AC pada MFC menggunakan TTS.....	27
Tabel 6. Bujet-Bujet Ketidakpastian yang Berhasil Dievaluasi	29
Tabel 7. Contoh Hasil Pengukuran pada ohmmeter kemampuan $6\frac{1}{2}$ digit	58
Tabel 8. Contoh bujet ketidakpastian pengukuran ukuran.....	62
Tabel 9. Contoh Hasil Pengukuran Menggunakan Metode Substitusi	63
Tabel 10. Hasil Perhitungan Rasio.....	64
Tabel 11. Bujet ketidakpastian untuk pengukuran ohmmeter	69
Tabel 12. Hasil Pengukuran Daya Frekuensi Radio Signal Generator..	78

Tabel 13. Koreksi Daya Frekuensi Radio Signal Generator.....	79
Tabel 14. Ketidakpastian Terentang Pengukuran Daya Radio Frekuensi.....	85
Tabel 15. Hasil Kalibrasi Daya Frekuensi Radio	85

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku ini memberikan informasi dan pemahaman terkait jenis peralatan atau standar yang digunakan, metode secara lebih mendalam untuk lingkup metrologi kelistrikan khusus parameter tegangan arus AC, resistansi, dan daya frekuensi radio. Bahkan, dalam buku ini juga dijelaskan bagaimana proses pengukuran dan contoh-contoh pengukuran serta sumber-sumber yang memengaruhi pengukuran yang digunakan dalam analisis ketidakpastian.

Hadirnya buku ini diharapkan dapat menjadi alternatif bahan bacaan mengenai metrologi kelistrikan bagi pemerhati mutu energi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

maupun akademisi. Selain itu, tingkat kompetensi yang diperoleh diharapkan bisa sebanding dengan kemampuan pengukur minimal staf laboratorium kalibrasi, laboratorium industri, dan laboratorium perguruan tinggi.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.



KATA PENGANTAR

Salah satu elemen penting dalam keberhasilan implementasi konsep industri 4.0 adalah ketersediaan energi listrik yang cukup, baik dari sisi kuantitas maupun kualitas. Kecukupan kuantitas dan kualitas energi listrik tersebut berdampak langsung kepada kelancaran proses produksi dan bahkan berpengaruh kepada mutu produk yang dihasilkan oleh industri nasional.

Untuk memastikan agar kuantitas dan kualitas energi listrik yang digunakan memenuhi persyaratan yang dibutuhkan dalam proses produksi, diperlukan instrumen ukur kelistrikan yang andal dan personel pelaksana yang kompeten. Keandalan instrumen ukur kelistrikan dibuktikan dengan hasil kalibrasi yang tertelusur ke sistem internasional sehingga dapat diketahui kesesuaian instrumen tersebut dengan proses pengukuran yang akan dilakukan. Kompetensi personel dapat ditingkatkan melalui pelatihan dan penyediaan sumber pengetahuan atau publikasi ilmiah, baik berupa buku, makalah, audio, maupun video.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Laboratorium Standar Nasional Satuan Ukuran (SNSU) BSN, selain mempunyai tugas untuk menyediakan ketertelusuran pengukuran nasional melalui layanan kalibrasi, juga mempunyai tugas untuk meningkatkan kemampuan pengukuran nasional melalui program diseminasi ilmu pengetahuan dan teknologi pengukuran, baik berupa pelatihan, seminar, maupun publikasi ilmiah. Publikasi ilmiah, baik berupa buku, makalah, audio, maupun video, memungkinkan diseminasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkelanjutan dan dengan jangkauan yang lebih luas dibandingkan pelatihan dan seminar. Penerbitan buku *Metrologi Kelistrikan Terapan: Untuk Laboratorium Kalibrasi di Industri dan Perguruan Tinggi* ini merupakan wujud nyata dari komitmen BSN untuk mengemban tugas tersebut.

Buku ini merupakan hasil karya para peneliti SNSU Kelistrikan yang berada di Laboratorium SNSU Kelistrikan dan Waktu BSN. Para penulis telah terlibat secara langsung dalam pengembangan standar pengukuran, sistem pengukuran dan sistem kalibrasi besaran kelistrikan serta terlibat dalam kegiatan uji banding kemampuan pengukuran dan kalibrasi tingkat internasional di bawah koordinasi Kepala Laboratorium SNSU Kelistrikan dan Waktu. Kompetensi dan pengalaman panjang yang dimiliki para penulis yang terlibat dalam penyusunan buku ini merupakan jaminan bagi mutu substansi yang dibahas.

Diharapkan, buku yang berisi prinsip-prinsip dasar metode pengukuran untuk besaran kelistrikan ini dapat menjadi alternatif bahan bacaan tentang metrologi kelistrikan bagi pemerhati mutu energi maupun akademisi, di tengah minimnya sumber bacaan berbahasa Indonesia untuk bidang ini. Buku yang mengulas secara rinci analisis data hasil pengukuran ini diharapkan juga dapat meningkatkan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

kompetensi para praktisi pengukuran dalam menggunakan maupun mengkalibrasi peralatan ukur kelistrikan sehingga akan berkontribusi pada peningkatan jaminan mutu hasil pengukuran besaran kelistrikan dalam rangka memenuhi kecukupan kuantitas dan kualitas energi listrik nasional yang diperlukan dalam keberhasilan implementasi konsep industri 4.0.

Puspiptek, September 2020
Laboratorium SNSU Termoelektrik dan Kimia
Direktur,

Dr. Ghufron Zaid

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PRAKATA

Alhamdulillah *rabbi'l'alamin*, segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Yang Maha Penyayang. Tanpa karunia-Nya, mustahil buku ini terselesaikan mengingat waktu yang begitu ketat antara tugas dan kewajiban lain yang bersamaan hadir. Penulis benar-benar merasa tertantang untuk mewujudkan naskah buku ini sebagai bagian untuk mempertahankan slogan pribadi, banyak memberi banyak menerima.

Buku ini ditulis berdasarkan keinginan penulis yang sering mengamati karakteristik penggunaan energi listrik di Indonesia yang makin hari makin terbatas. Di lain pihak, para pengguna makin meningkat dengan efisiensi yang kurang optimal. Berdasarkan kondisi tersebut, penulis berusaha menyusun buku ini agar efisiensi optimum dengan memuat beragam teknik pengukuran dan analisis data di lingkup tegangan, arus, dan resistansi dari frekuensi rendah sampai radio.

Terselesaikannya penulisan buku ini juga tidak terlepas dari bantuan beberapa pihak. Karena itu, penulis menyampaikan terima kasih pada Kepala Pusrisbang serta Kedeputusan SNSU dan jajarannya karena telah memberikan kepercayaan tersebut. Penulis berkeyakinan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

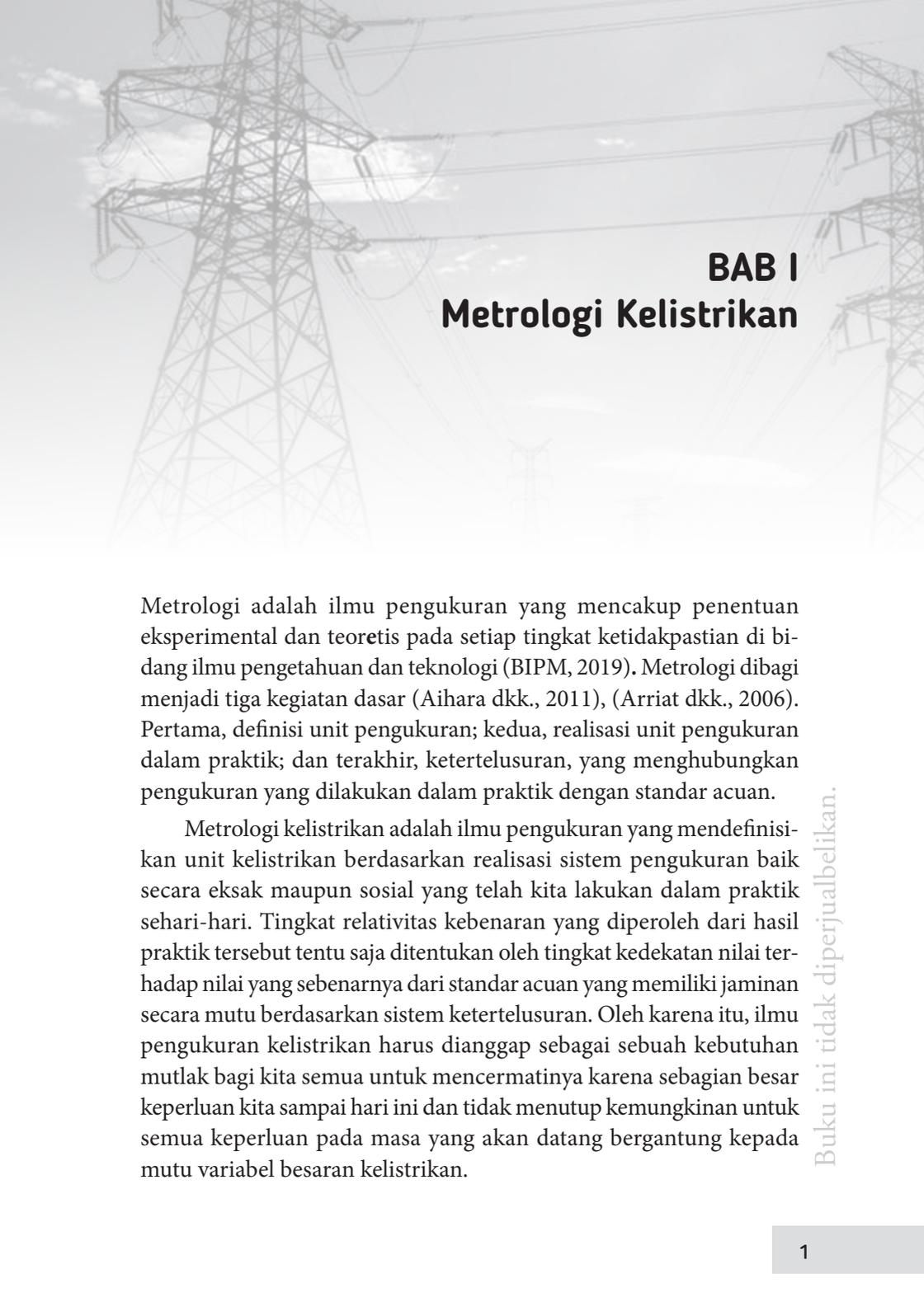
bahwa itu dapat mendukung penulis dalam upaya meningkatkan kualitas diri dan karya untuk waktu yang akan datang. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kepala BSN yang telah memberikan dukungan dari sisi sarana maupun prasarana. Selain itu, penulis juga tidak lupa pula menyampaikan rasa terima kasih kepada segenap pengelola laboratorium metrologi kelistrikan atas semua bantuan, motivasi, dan saran-sarannya.

Meskipun telah berusaha untuk menghindari kekurangan-kekurangan, penulis menyadari juga bahwa buku ini masih mempunyai kelemahan sebagai kekurangannya. Karena itu, penulis berharap agar pembaca berkenan menyampaikan kritikan. Dengan segala pengharapan dan keterbukaan, penulis menyampaikan rasa terima kasih dengan setulus tulusnya. Kritik merupakan perhatian agar dapat menuju kesempurnaan. Akhir kata, penulis berharap agar buku ini dapat membawa manfaat kepada pembaca. Secara khusus, penulis berharap semoga buku ini dapat menginspirasi generasi bangsa ini khususnya masyarakat industri, laboaratorium kalibrasi, dan perguruan tinggi agar menjadi generasi yang tanggap dan tangguh. Jadilah generasi yang bermartabat, kreatif, dan mandiri.

Serpong, Juni 2020.

Tim Penyusun

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB I

Metrologi Kelistrikan

Metrologi adalah ilmu pengukuran yang mencakup penentuan eksperimental dan teoretis pada setiap tingkat ketidakpastian di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi (BIPM, 2019). Metrologi dibagi menjadi tiga kegiatan dasar (Aihara dkk., 2011), (Arriat dkk., 2006). Pertama, definisi unit pengukuran; kedua, realisasi unit pengukuran dalam praktik; dan terakhir, ketertelusuran, yang menghubungkan pengukuran yang dilakukan dalam praktik dengan standar acuan.

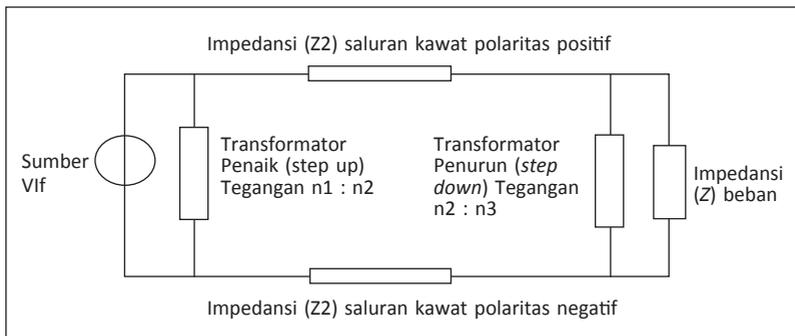
Metrologi kelistrikan adalah ilmu pengukuran yang mendefinisikan unit kelistrikan berdasarkan realisasi sistem pengukuran baik secara eksak maupun sosial yang telah kita lakukan dalam praktik sehari-hari. Tingkat relativitas kebenaran yang diperoleh dari hasil praktik tersebut tentu saja ditentukan oleh tingkat kedekatan nilai terhadap nilai yang sebenarnya dari standar acuan yang memiliki jaminan secara mutu berdasarkan sistem ketertelusuran. Oleh karena itu, ilmu pengukuran kelistrikan harus dianggap sebagai sebuah kebutuhan mutlak bagi kita semua untuk mencermatinya karena sebagian besar keperluan kita sampai hari ini dan tidak menutup kemungkinan untuk semua keperluan pada masa yang akan datang bergantung kepada mutu variabel besaran kelistrikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

A. BESARAN KELISTRIKAN

Di dalam besaran kelistrikan terdapat beberapa parameter (komponen) yang dapat kita uraikan dan dapat digambarkan ke dalam sebuah sistem rangkaian listrik (Gambar 1). Beberapa parameter tersebut secara tidak langsung telah kita kenal dalam kehidupan sehari-hari berupa beberapa besaran listrik berupa besaran arus listrik dengan satuan ampere, besaran tegangan listrik dengan satuan volt, besaran resistansi listrik dengan satuan ohm, besaran frekuensi listrik dengan satuan hertz dan besaran energi listrik dengan satuan *watthour*. Implementasi dari variabel variabel besaran kelistrikan tersebut dapat disederhanakan melalui proses analogi kedalam sebuah aktivitas sistem rangkaian listrik yang dalam hal ini dikenal sebagai sebuah sistem teknik tenaga listrik. Pada sistem tenaga listrik tersebut dapat diuraikan komponen-komponen rangkaian listriknya yang terdiri dari sebuah sumber pembangkit tenaga listrik, sebuah panel gardu listrik, sebuah sistem saluran listrik dan sebuah sistem beban listrik (Gambar 2).

Kualitas listrik yang tersedia dalam hal ini di bawah tanggung jawab Perusahaan Listrik Negara (PLN) ditentukan oleh kualitas peralatan peralatan listrik yang terpasang pada rangkaian sistem tenaga listrik. Peralatan peralatan listrik yang terkait pada proses penyediaan listrik tersebut terdiri dari beberapa sumber, yaitu sumber tegangan,

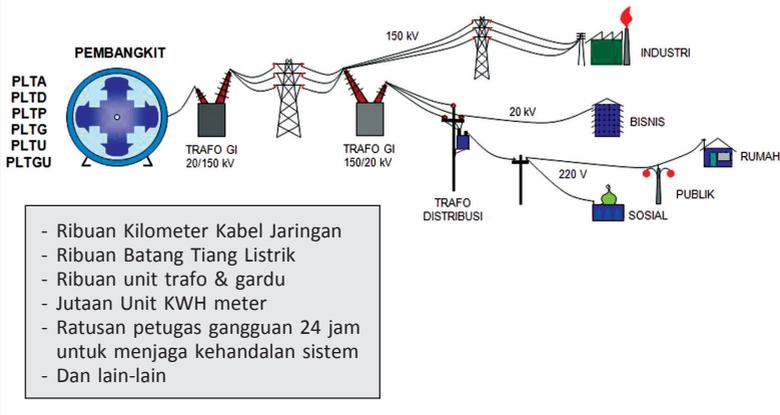


Sumber: Hasil Olahan Penulis (2019)

Gambar 1. Rangkaian Sistem Parameter Listrik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAGAIMANA LISTRIK SAMPAI DI RUMAH KITA



Sumber: El (2016)

Gambar 2. Rangkaian Sistem Tenaga Listrik

sumber arus, sumber impedansi, sumber frekuensi jala-jala, dan sumber frekuensi radio (*RF Power*). Perlu diketahui pula bahwa sumber energi yang secara umum kita kenal adalah merupakan gabungan dari beberapa besaran yaitu besaran tegangan listrik, besaran arus listrik, dan besaran waktu (yang sebagai fungsi dari besaran frekuensi listrik).

B. FUNGSI METROLOGI KELISTRIKAN

Telah kita ketahui bersama bahwa lembaga perguruan tinggi, industri, dan laboratorium kalibrasi memiliki tupoksi masing-masing, yaitu mempelajari tentang teori instrumentasi kelistrikan, menerapkan instrumentasi kelistrikan untuk efisiensi produksi, dan memantau efektivitas instrumentasi kelistrikan. Kompetensi metrologi kelistrikan yang diperoleh dari ulasan dalam buku ini memiliki tiga lingkup kepentingan sekaligus, yaitu untuk pengenalan instrumentasi standar kelistrikan, pengenalan analisis ketidakpastian pengukuran besaran kelistrikan, dan penguasaan manajemen instrumen standar kelistrikan. Dengan demikian, penguasaan materi buku ini dibutuhkan agar

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dapat melanjutkan misi dari ketiga lembaga tersebut dengan efektif ke ruang berikutnya, yaitu ruang implementasi.

Kualitas (ketelitian) nilai ketiga lingkup kelistrikan tersebut dapat dicapai jika pelaku bisnis di bidang pembangkitan (PLN) sebagai produsen listrik, industri sebagai konsumen listrik, laboratorium kalibrasi sebagai institusi pelayanan kalibrasi dan perguruan tinggi sebagai calon teknisi atau peneliti di bidang-bidang tersebut mengikuti perkembangan dan mengimplementasikan metrologi kelistrikan secara kontinu. Untuk menghadapi dinamika perkembangan teknologi pengukuran yang seirama dengan tuntutan kompetensi untuk mendapatkan ketelitian di masing-masing kemampuan bidang, makin dibutuhkan peningkatan pembelajaran yang konsisten. Apalagi menghadapi zaman nanoteknologi yang tentu saja sangat membutuhkan kemampuan kemetrolagian yang cukup serius. Salah satu komponen penyediaan adalah dengan menyediakan buku teori praktis ilmu pengetahuan metrologi kelistrikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB II

Metrologi Tegangan dan Arus AC

Pada akhirnya, agar besaran listrik yang sebenarnya bisa sampai ke rumah kita, kualitas peralatan-peralatan listrik yang terlibat dalam proses penyediaan listrik harus terawat kualitasnya dengan menggunakan peralatan-peralatan standar ukuran kelistrikan. Di sisi berikutnya, peralatan-peralatan standar ukuran kelistrikan ini tentu saja sudah dijamin kebenarannya berdasarkan bagan ketertelusuran metrologi kelistrikan yang dimiliki oleh Lembaga Metrologi Nasional di Indonesia yang tertelusur ke standar internasional.

Sesuai dengan tujuan dari penulisan buku ini, tim penulis menyampaikan materi ulasan terkait dengan metrologi kelistrikan melibatkan tiga bidang laboratorium metrologi kelistrikan nasional, yaitu metrologi tegangan dan arus AC, metrologi resistansi, dan metrologi daya frekuensi radio. Masing-masing bidang didukung oleh tiga ulasan materi pokok, yaitu instrumentasi standar, analisis ketidakpastian, dan diseminasi ketelitian berupa sistem rangkaian pengukuran.

Komponen pembangkit pada sistem tenaga listrik adalah alat pembangkit tenaga listrik yang dapat membangkitkan besaran tegangan listrik pada frekuensi 50/60 Hz. Besaran tegangan listrik yang

dibangkitkan oleh pembangkit listrik ini bervariasi tergantung dari penggerak mula yang dipergunakan apakah berupa aliran air pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA), tekanan uap pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), tekanan gas (PLTG), dorongan angin atau bayu (PLTB).

Implementasi dari sumber-sumber pembangkit ini dapat dilakukan dengan cara pemasangan beban dengan jarak jauh (melalui saluran transmisi), menengah (saluran distribusi), dan pendek (saluran atau instalasi rumah) sehingga membentuk rangkaian tertutup dan menghasilkan besaran arus listrik. Pemasangan beban pada frekuensi 50/60 Hz dapat berupa parameter impedansi jika penggunaannya adalah beban industri (gedung).

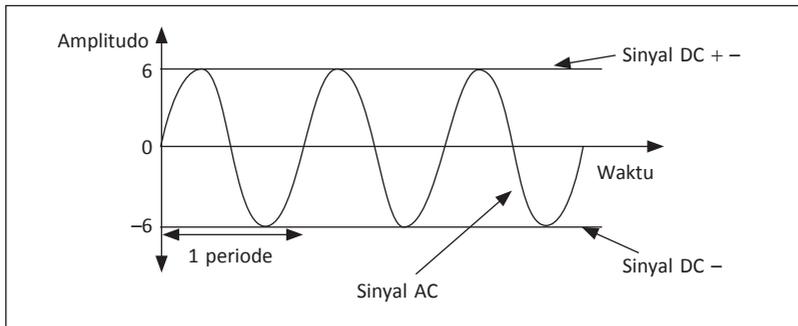
Secara umum, parameter tegangan listrik dan parameter arus listrik muncul jika terdapat sebuah rangkaian listrik tertutup. Sebuah rangkaian listrik tertutup selalu terdiri dari dua komponen, yaitu komponen sumber dan komponen beban. Di sisi lain, dalam sebuah sistem pengukuran besaran arus listrik maupun tegangan listrik dapat dikenal dua tipe peralatan (instrumentasi) listrik yaitu instrumentasi sumber dan instrumentasi ukur (meter). Apabila kita menyimak Gambar 1 dan 2 akan diperoleh ilustrasi sebuah sistem pengukuran yang terdiri dari sumber tegangan listrik, sumber arus listrik, dan frekuensi listrik baik ketika dibangkitkan oleh pembangkit, dinaikkan dan diturunkan oleh transformator, disalurkan oleh saluran transmisi, disalurkan oleh saluran distribusi distribusi, maupun diserap oleh beban (industri dan perumahan).

Semua parameter-parameter yang dihasilkan oleh sistem tenaga listrik pada Gambar 2 tersebut adalah jenis *Alternating Current* (AC). Sistem tenaga listrik ini bisa menghasilkan parameter-parameter DC jika sebelum dimasukkan ke kutub beban dipasang sistem *converter* yang mampu mengubah sinyal dari AC ke *Direct Current* (DC) pada sisi *output* transformator dan berakhir di *input* beban. Dengan demikian, lingkup pengukuran pada parameter-parameter arus listrik

dan tegangan listrik bisa berupa tegangan AC, tegangan DC, arus AC, dan arus DC.

Baik amplitudo sinyal AC maupun DC memiliki karakteristik masing-masing sebagai fungsi dari waktu. Karakteristik sinyal AC memiliki amplitudo yang selalu berubah secara periodik di sepanjang waktu, sedangkan sinyal DC memiliki amplitudo yang selalu tetap di sepanjang waktu (Gambar 3). Pada dasarnya, kualitas instrumentasi untuk besaran tegangan listrik maupun arus listrik dibangun agar dapat dipergunakan untuk mengukur atau membangkitkan perubahan amplitudo sinyal dengan ketentuan frekuensi satu periode (dianggap stabil disepanjang periode). Ruang lingkup pengukuran di metrologi tegangan listrik dan arus listrik dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu tegangan/arus rendah, tegangan/arus menengah, dan tegangan/arus tinggi. Amplitudo sinyal dari masing-masing kategori tersebut secara kuantitas sebesar $<$ (lebih kecil dari) 220 mV, 220 mV–1000 V, $>$ (lebih tinggi dari) 1 kV.

Pada sistem pengukuran metrologi kelistrikan dikenal dua status instrumentasi dalam sebuah rangkaian sistem pengukuran, yaitu instrumentasi standar (STD) dan instrumentasi *Unit Under Calibration* (UUC). Instrumentasi STD dapat berupa sumber sinyal maupun alat ukur sinyal dan demikian pula berlaku untuk UUC. Sebuah sistem pengukuran besaran AC maupun DC yang terdiri dari rangkaian



Sumber: Nabu (2013)

Gambar 3. Karakteristik Sinyal AC dan DC

kedua instrumentasi tersebut dapat menghasilkan beberapa metode pengukuran (kalibrasi).

Dari beberapa sistem pengukuran (kalibrasi) maupun metode pengukuran yang ada khususnya dalam metrologi kelistrikan telah terdapat sebuah sistem pengukuran yang menggunakan metoda *AC-DC transfer*. Metode ini digunakan untuk menurunkan nilai tegangan AC dengan menggunakan prinsip *thermal*.

A. AC-DC TRANSFER STANDARD SEBAGAI STANDAR TEGANGAN AC

Standar tegangan dan arus AC adalah salah satu dasar dari standar di lingkup kelistrikan yang banyak digunakan sebagai acuan untuk berbagai macam industri seperti elektronik, ketenagalistrikan, peralatan elektronik untuk informasi dan komunikasi dan masih banyak industri-industri lainnya yang masih berkaitan dengan lingkup dasar kelistrikan ini. Sebagai contoh daya listrik adalah lingkup turunan dari tegangan, arus, dan *phase*. Daya listrik tersebut saat ini menjadi salah satu kebutuhan vital bagi keberlangsungan kegiatan manusia ternyata masih sangat membutuhkan pengembangan atas kehandalan dan akurasi dari standar tegangan dan arus AC.

Metode yang digunakan untuk menurunkan nilai tegangan dan arus AC dengan tingkat presisi dan akurasi yang tinggi adalah dengan menggunakan *AC-DC transfer method*. Metode tersebut menggunakan *thermal AC-DC converter (thermal converter)* sebagai media untuk membandingkan sebuah tegangan AC dengan sebuah standar tegangan DC. Untuk standar tegangan DC sendiri tertelusur pada standar primer *Joshepson voltage standard*. *Thermal converter* memiliki kemampuan untuk membandingkan *joule heating* antara tegangan AC dan DC pada level 0,1 ppm (Aihara dkk., 2011). Sampai saat ini *AC-DC transfer standard* telah menjadi standar primer bagi laboratorium Lembaga Metrologi Nasional untuk standar tegangan dan arus AC.

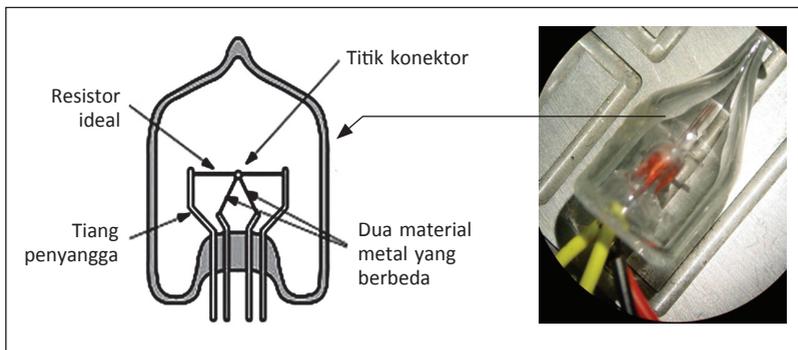
B. METODE AC-DC TRANSFER STANDARD

1. Definisi AC-DC Difference

Tegangan AC didefinisikan dengan akar rata-rata kuadrat atau *root-mean square* (rms) dari gelombang sinusoidal seperti pada persamaan di bawah ini:

$$V_{AC}(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{V(t)\}^2 dt} \quad \text{Persamaan 1}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, maka dapat dimungkinkan untuk membandingkan tegangan AC dengan tegangan DC berdasarkan daya listrik. Pada *thermal method*, tegangan DC dan AC secara bergantian disuplai pada komponen *heater* dari *AC-DC thermal converter*. *heater* tersebut memiliki sifat fisis berupa elemen resistor ideal yang apabila dari kedua tiang penyangganya dialiri arus listrik menghasilkan efek Thomson berupa gradien suhu dengan waktu tertentu akan menghasilkan efek joule berupa energi panas. Apabila energi panas dari elemen resistor ini dikopel secara fisis oleh sebuah titik konektor kemudian dialirkan ke titik koneksi sepasang lengan konduktor yang terbuat dari dua jenis logam yang berbeda maka terjadi efek termokopel. Jumlah energi panas dari elemen resistor (*heater*) dibandingkan dengan cara mengukur suhu dari *heater* menggunakan termokopel dengan output berupa *electromotive force* (EMF).



Sumber: Halawa dan Al-Rashid (2010)

Gambar 4. AC-DC Thermal Converter Tipe Elemen

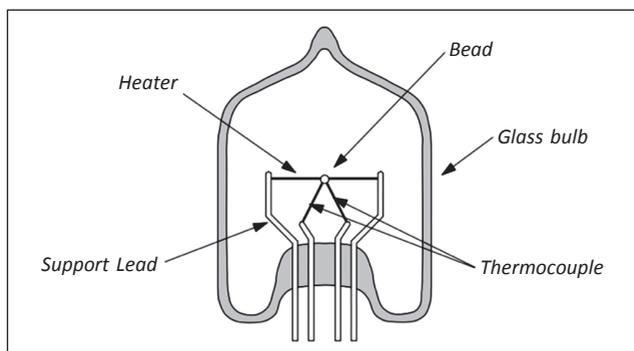
Ketika tegangan AC dan DC dengan nilai yang sama disuplai ke *AC-DC thermal converter* ideal maka *output* EMF akan bernilai sama. Namun, pada kenyataannya, tidak ada *AC-DC thermal converter* yang ideal karena *output* EMF dipengaruhi oleh *non-joule heating* dan karakteristik frekuensi dari sirkuit *heaternya*. Dengan demikian, di sini akan muncul nilai beda (*difference value*) yang disebut sebagai *AC-DC difference*.

2. Thermal Converter

Berikut ini ada 4 tipe *AC-DC thermal converter* yang telah dikembangkan sampai saat ini:

a. Single-junction AC-DC thermal converter (SJTC)

Tipe SJTC mulai dikembangkan pada tahun 1950. SJTC terdiri dari kawat *heater* (*heater wire*) atau elemen resistor dan sebuah termokopel. Ini dinamakan *single junction thermal converter* karena menggunakan sepasang termokopel. Sebuah filamen *heater* dan termokopel diletakkan di sebuah *vaccum-shielded glass bulb*. Termokopel disentuhkan tepat di tengah dari *heater* menggunakan *bead* yang terbuat dari *glass* atau keramik seperti pada Gambar 5.



Sumber: Halawa dan Al-Rashid (2010)

Gambar 5. Skematik dari Tipe SJTC Element

b. Multi-junction AC-DC thermal converter (MJTC)

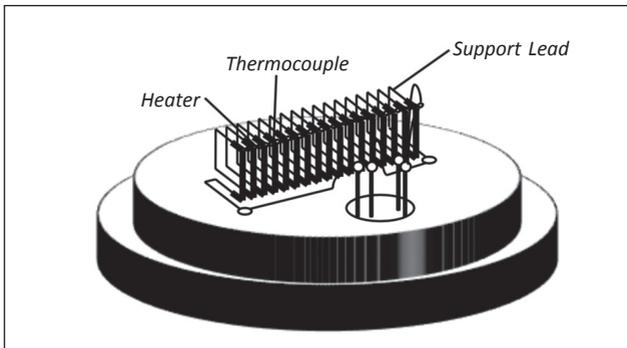
MJTC dikembangkan di tahun 1970 sampai 1980. MJTC didesain untuk mengurangi *thermoelectric effect* pada frekuensi 1 kHz yang terjadi pada tipe SJTC. MJTC terdiri dari banyak termokopel sepanjang *heater* yang bertujuan untuk mendapatkan distribusi suhu yang seragam (*uniform*) pada *heater*-nya. Karena distribusi suhunya seragam, maka *thermoelectric effect* sepanjang *heater* dapat berkurang. Kekurangan dari MJTC adalah strukturnya yang rumit sehingga sulit untuk diproduksi massal dan mudah putus.

c. Thin-film Multi-junction AC-DC thermal converter (Thin-film MJTC)

Pengembangan *thin film multi junction thermal converter* dimulai sekitar tahun 1980 ketika teknologi *micromachining* saat itu sedang banyak digunakan, *heater* dan *hot-junctions* dari termokopel dibuat dari $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ dan *clod-junction* dari termokopel dibuat dari Si-substrate. Kelebihan dari Thin-film MJTC adalah cocok untuk produksi secara massal.

d. Solid-state thermal RMS sensor

Solid state rms sensor tidak menggunakan termokopel melainkan menggunakan dependensi suhu dari *base-emitter junction voltage*



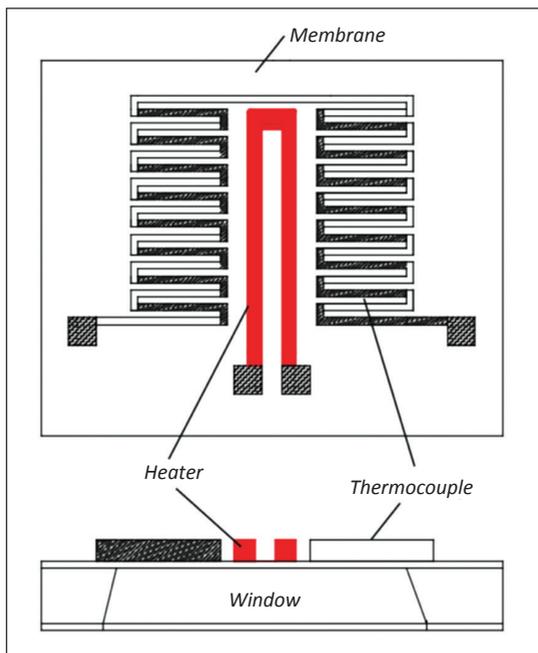
Sumber: Fujiki dkk. (2015)

Gambar 6. Skematik Multi-junction Thermal Converter

Buku ini tidak diperjualbelikan.

(V_{BE}) pada transistor sebagai devise sensor suhu untuk mendeteksi suhu pada *heater*. Pada tipe ini nilai ketidakpastiannya lebih besar dibanding dengan tipe-tipe yang lain tetapi tipe ini lebih handal karena dilengkapi proteksi terhadap *over current*. Komersial dari tipe ini adalah fluke 792A dengan nilai ketidakpastiannya sekitar 1 ppm dan bersifat *multi-range* karena mampu beroperasi untuk rentang tegangan 2 mV sampai dengan 1.000 V dengan frekuensi di antara 10 Hz sampai dengan 1 MHz.

Laboratorium nasional untuk metrologi kelistrikan telah memelihara ketelitian pengukuran dari tipe SJTC dan *Solid-state thermal RMS sensor* (Fluke 792A) dengan menempatkan tipe SJTC sebagai standar utama yang tertelusur ke standar Internasional, sedangkan untuk tipe *Solid-state thermal RMS sensor* ketelitian pengukurannya diperoleh dengan jalan kalibrasi internal terhadap tipe SJTC.



Sumber: Fujiki dkk. (2015)

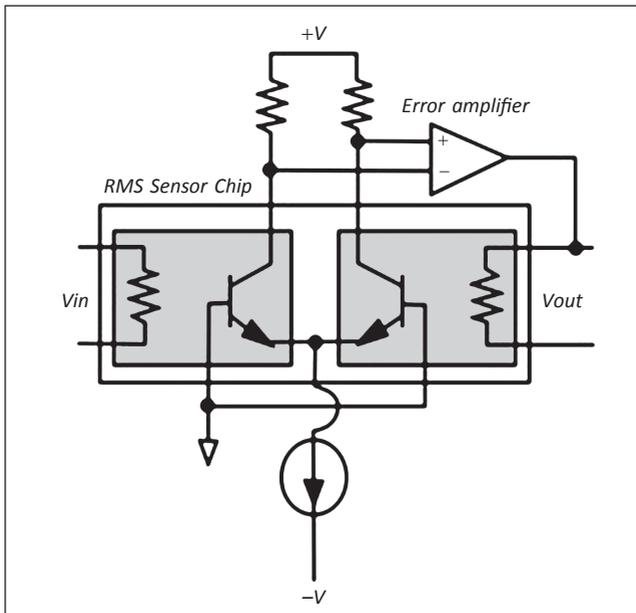
Gambar 7. Skematik *Thin-film* MJTC

Buku ini tidak diperjualbelikan.

3. Karakteristik AC-DC Difference

Ada 3 faktor utama yang memengaruhi karakteristik *AC-DC difference* tipe SJTC, yaitu:

- a. *Thermoelectric effect (DC offset)*: pada saat arus dc mengalir melalui *heater* dari SJTC, maka akan terjadi *non joule heating/cooling* di sepanjang *heater* disebabkan adanya *thermoelectric effect* seperti *Thomson dan peltier effect*. *Thomson dan peltier effect* pada *heater* dapat menyebabkan kenaikan suhu dari *heater* tersebut tidak simetri sehingga dapat menyebabkan perbedaan emf dari termokopel meskipun *hot junction* terletak di titik tengah *heater*. Hal ini karena tipe SJTC masih berupa konstruksi yang sederhana, terdapat sebagian kecil nilai ac-dc difference terjadi karena *thermoelectric effect* tersebut. Di sisi lain, pada tipe MJTC,



Sumber: Silveira dkk. (2018)

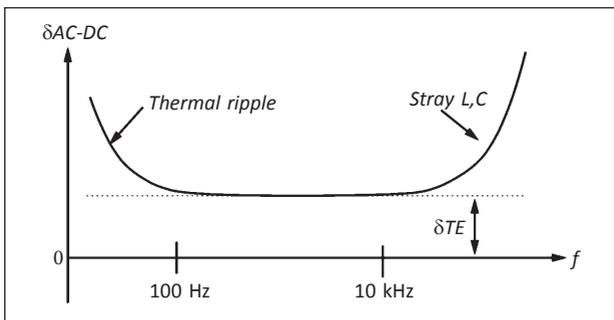
Gambar 8. AC-DC Thermal Transfer Tipe Solid State

Buku ini tidak diperjualbelikan.

thermoelectric effect tersebut dapat dikurangi sekitar $< 0,1$ ppm karena adanya distribusi suhu yang merata pada *heater*.

- b. Karakteristik frekuensi tinggi: pada rentang frekuensi tinggi di atas 10 kHz, untuk tipe SJTC terdapat *skin effect* dari konduktor dan *stray inductance* dan *capacitance* pada input sirkuit yang berubah menjadi semakin besar. Di sisi lain, tipe MJTC akan muncul karakteristik tersebut pada rentang frekuensi yang lebih tinggi karena *dielectric loss* pada *twisted bifilar heater*.
- c. Karakteristik frekuensi rendah: pada rentang frekuensi di bawah 10 Hz, untuk tipe SJTC sebuah *frequency thermal ripple* terbentuk karena tidak cukup adanya *thermal inertia*. Di sisi lain, pada tipe MJTC muncul pada frekuensi rendah yg lebih kecil dikarenakan adanya perbaikan linieritas pada input dan outputnya.

Karakteristik frekuensi dari SJTC dan MJTC pada full rentang frekuensi seperti pada Gambar 9. *Thermoelectric effect* yang terjadi pada mode DC memberikan *offset* pada *AC-DC difference*. Untuk karakteristik frekuensi rendah dan tinggi mengalami penurunan di bawah 1 ppm pada rentang frekuensi 100 Hz dan 10 kHz, sedangkan dominasi *thermoelectric effect* terjadi pada sekitar 1 kHz.



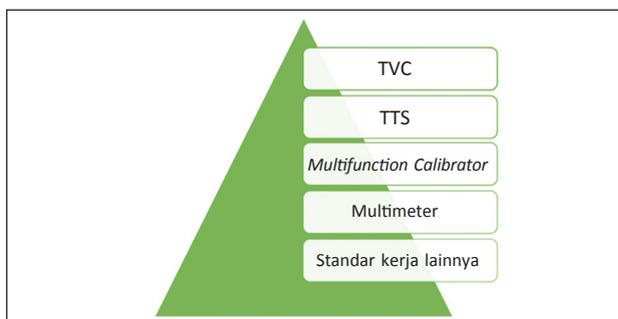
Sumber: Fujiki dkk. (2015)

Gambar 9. Karakteristik frekuensi dari *thermal converter*

C. KETERTELUSSURAN TEGANGAN AC DAN ARUS AC

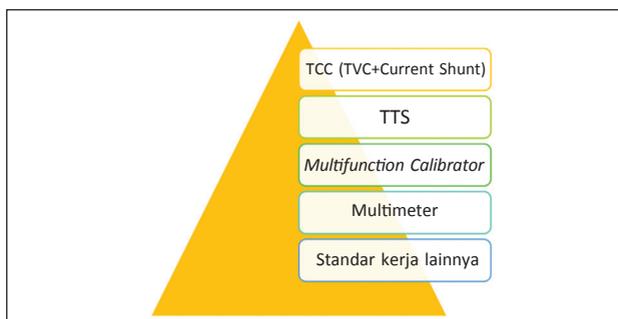
Sistem ketertelusuran yang dimiliki oleh tegangan AC dan arus AC di Laboratorium Metrologi Nasional secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Seperti yang terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 standar utama yang dimiliki oleh Laboratorium Metrologi Nasional di Indonesia pada parameter tegangan AC adalah *Thermal Voltage Converter* (TVC) yaitu AC-DC *thermal converter* tipe SJTC, dan standar utama



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2015)

Gambar 10. Ketertelusuran tegangan AC pada Laboratorium Metrologi Nasional di Indonesia.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2015)

Gambar 11. Ketertelusuran Arus AC pada Laboratorium Metrologi Nasional di Indonesia.

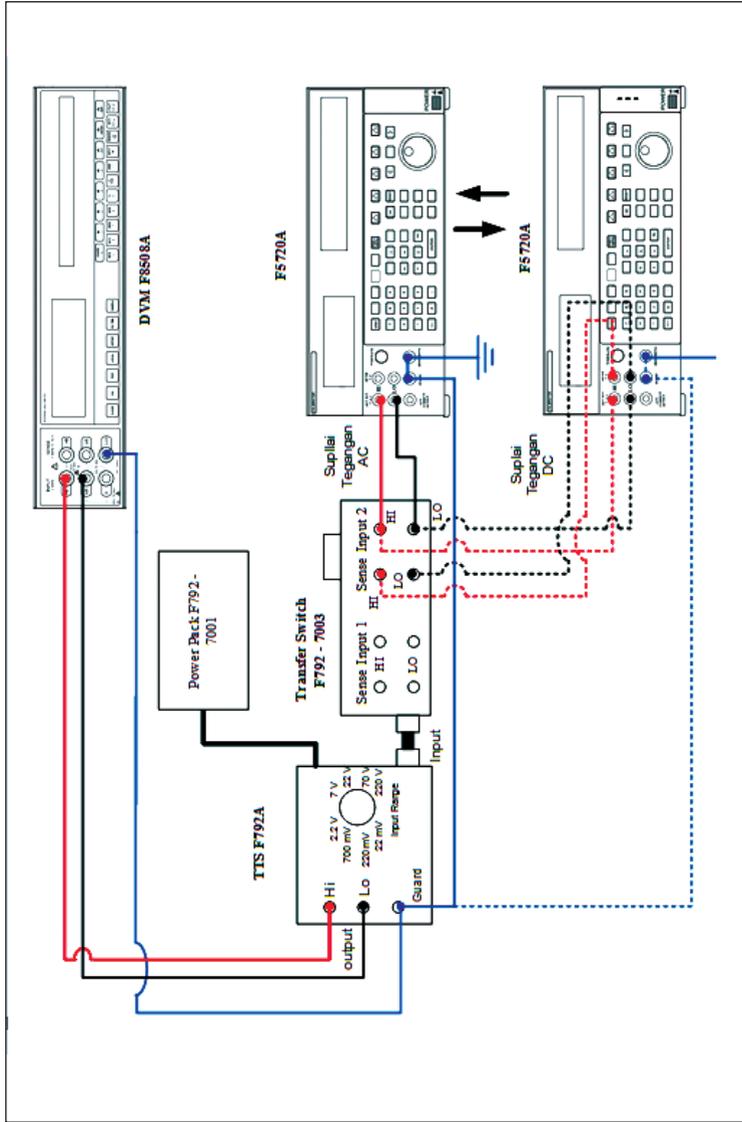
untuk parameter arus AC adalah thermal current converter (TCC) yang merupakan gabungan dari TVC dan *current shunt*. Standar utama ini dapat dikalibrasi ke Laboratorium Metrologi Nasional di luar negeri atau dilakukan interkomparasi untuk membandingkan nilainya dengan Laboratorium Metrologi Nasional di negara lain. Kemudian nilai yang dimiliki oleh standar utama akan didiseminasikan ke standar di bawahnya secara berurutan sampai ke standar kerja lainnya.

Pada ketertelusuran tegangan dan arus AC yang dimiliki oleh Lembaga Metrologi Nasional di Indonesia, standar utama yang digunakan adalah TVC, nilai beda (*difference value*) yang dimiliki oleh TVC akan didiseminasikan ke standar sekunder yaitu *thermal transfer standard* (TTS) fluke 792A yaitu tipe *solid state rms sensor*. Selanjutnya nilai beda yang dimiliki oleh TTS akan didesiminasikan ke standar kerja yang lain seperti pada *multifunction calibrator*. *Multifunction calibrator* adalah sumber yang dapat membangkitkan berbagai parameter kelistrikan seperti tegangan AC/DC, arus AC/DC, resistansi, kapasitansi dan induktansi. Melalui analisis secara matematis, dapat ditentukan nilai koreksi dan ketidakpastian tegangan AC pada sebuah *multifunction calibrator*. Kemudian nilai koreksi dan ketidakpastian ini dapat didesiminasikan ke standar lain, seperti ke *multimeter*.

Seperti halnya dengan tegangan AC, dalam pengukuran dan kalibrasi arus AC terdapat sistem standar yang disebut dengan *AC-DC Transfer Standards*. Standar utama yang digunakan dalam sistem ini dinamakan *thermal current converter* yang pada dasarnya adalah sebuah TVC yang dikopel dengan *current shunt*.

D. PROSEDUR KALIBRASI BESARAN TEGANGAN AC MENGGUNAKAN THERMAL TRANSFER STANDARD (TTS)

Skematik diagram untuk mengkalibrasi tegangan AC keluaran dari suatu sumber tegangan AC ditunjukkan oleh Gambar 12. Dalam proses kalibrasi ini, digunakan sebuah sumber tegangan F5720A yang dapat mengeluarkan sinyal tegangan AC maupun DC. Tidak seperti parameter tegangan AC, parameter tegangan DC pada F5720A ini



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2019)

Gambar 12. Schematik diagram untuk kalibrasi sumber tegangan AC dengan menggunakan TTS. Buku ini tidak diperjualbelikan.

telah terkalibrasi sehingga dapat diketahui nilai aktualnya. Dalam metode kalibrasi ini, nilai yang dicari adalah koreksi dan ketidakpastian nilai tegangan AC yang dikeluarkan oleh sumber tegangan F5720A. Selain sumber tegangan, dibutuhkan juga sebuah *transfer switch* model F792A-7003, sebuah AC-DC *thermal transfer standard* (TTS) model F792A lengkap dengan *power pack* F792A-7001 yang berfungsi sebagai baterai untuk suplai daya, dan sebuah *digital voltage meter* (DVM) tipe F8508A yang akan digunakan untuk membaca tegangan keluaran dari TTS F792A.

Metode yang digunakan dalam kalibrasi ini disebut dengan metode transfer termis. Sebelum melakukan kalibrasi, dalam penggunaan metode ini, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan:

1. TTS F792A harus dioperasikan tanpa terhubung ke jala-jala listrik. Oleh karena itu, sebelum pengukuran dilakukan, pastikan *power pack* F792A-7001 telah terisi daya dengan menghubungkannya terlebih dahulu dengan jala-jala listrik (*charging*) selama minimal 16 jam. Pengisian daya ini dikontrol oleh suatu sikuit didalam *power pack* F792-7001 yang melindunginya dari *overcharged*.
2. Terdapat beberapa rentang pada TTS F792A yang harus dipilih pada saat pengukuran dengan memutar knob yang terdapat pada TTS F792A. Titik ukur yang disuplai oleh sumber tegangan F5720A, baik AC maupun DC, harus lebih kecil dari pada rentang TTS yang dipilih.
3. Terdapat nilai batasan maksimum untuk tegangan yang mampu diterima oleh TTS F792A untuk setiap rentang yang ditunjukkan oleh Tabel 1. Suplai tegangan AC maupun DC dari sumber tegangan F5720A tidak boleh melebihi nilai ambang batas tersebut. Jika melebihi, akan mengakibatkan kerusakan pada TTS F792A.

Kestabilan nilai yang dikeluarkan oleh TTS F792A baru akan tercapai jika telah dioperasikan selama waktu tertentu yang disebut dengan waktu tunak. Waktu tunak ini berbeda-beda bergantung dari

merek dan tipe dari TTS yang digunakan. Untuk TTS F792A yang digunakan pada contoh pengukuran di buku ini, waktu tunaknya disajikan oleh Tabel 2.

Tabel 1. Nilai ambang batas tegangan masukan TTS F792A yang diperbolehkan

Rentang Masukan		Tegangan Masukan (RMS)	Ambang Batas	
22	mV	2 to 22 mV	+ 3	V
220	mV	22 to 220 mV	+ 3	V
700	mV	220 to 700 mV	+ 3	V
2.2	V	700 mV to 2.2 V	+ 50	V
7	V	2.2 to 7 V	+ 50	V
22	V	7 to 22 V	+ 50	V
70	V	22 to 70 V	+ 130	V
220	V	70 V to 220 V	+ 250	V
1000	V	200 to 1000 V	+ 1000	V

Sumber: Fluke Corporation (2006)

Tabel 2. Waktu tunak yang direkomendasikan untuk setiap rentang masukan

Rentang Masukan		Waktu Tunak yang Direkomendasikan (detik)
22	mV	60
220	mV	60
700	mV	60
2.2	V	30
7	V	30
22	V	30
70	V	30
220	V	30
1000	V	30

Sumber: Fluke Corporation (2006)

Adapun langkah-langkah untuk pengukurannya sebagai berikut:

1. Sebelum pengukuran dilakukan, dilakukan pengondisian suhu dan kelembapan terhadap peralatan-peralatan yang digunakan terlebih dahulu. Pengondisian suhu dilakukan dalam kondisi OFF selama minimal 12 jam sebelum pengukuran pada rentang suhu 20–26 (°C) dan kelembapan relatif kurang dari 75%.
2. Hubungkan kabel power sumber tegangan F5720A dan DVM F8508A ke sumber jala-jala listrik.
3. Nyalakan sumber tegangan F5720A dan DVM F8508A. Kedua alat ini harus sudah dipanaskan minimal 4 jam sebelum dioperasikan.
4. Lepaskan kabel pada *power pack* F792A-7001 apabila masih terhubung ke sumber jala-jala listrik.
5. Lakukan pengenalan pada sumber tegangan F5720A dan DVM F8508A jika tersedia fungsi untuk *zeroing*.
6. Rangkai pengabelan sesuai dengan skematik diagram yang disajikan oleh Gambar 12.
7. Pada metode komparasi termis yang digunakan pada buku ini, tegangan AC yang ingin dicari nilai koreksinya dan tegangan DC yang menjadi *reference* disuplai dari alat yang sama, yaitu F5720A. Oleh karena itu, F5720A akan menyuplai tegangan AC dan DC pada TTS F792A secara bergantian. Skematik diagram pengabelan pada saat F5720A menyuplai tegangan AC ditunjukkan oleh garis lurus pada Gambar 12. Sedangkan pengabelan pada saat F5720A menyuplai tegangan DC ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 12.
8. Seperti yang terlihat pada Gambar 13, sebelum melakukan pengabelan, terlebih dahulu hubungkan *transfer switch* F792A-7003 pada TTS F792A menggunakan konektor *coaxial* tipe N. Selanjutnya, untuk menyuplai tegangan AC pada TTS F792A, terminal keluaran HI dan Lo pada F5720A dihubungkan pada terminal

masuk Hi dan Lo *transfer switch* 792A-7003. Keluaran tegangan dari TTS F792A kemudian dibaca menggunakan DVM F8508A dengan menggunakan pengabelan 2 kawat: terminal keluaran Hi dan Lo TTS F792A masing-masing dihubungkan dengan terminal masukan Hi dan Lo DVM F8508A.

9. Untuk menyuplai tegangan DC pada TTS F792A, terminal keluaran Hi, Lo, sense Hi, dan sense Lo masing-masing dihubungkan dengan terminal masukan Hi, Lo, sense Hi, dan sense Lo *transfer switch* 792A-7003. Sama dengan poin 8, keluaran tegangan dari TTS F792A kemudian dibaca oleh DVM F8508A dengan menggunakan pengabelan 2 kawat.
10. Tegangan keluaran TTS model F792A yang digunakan untuk kalibrasi pada buku ini mempunyai nilai keluaran maksimum 2 Volt DC untuk setiap rentang, baik ketika TTS F792A disuplai oleh tegangan DC maupun AC. Karena itu, rentang DVM F8508A selalu diatur pada rentang 2 Volt DC atau di atasnya.
11. Untuk masing-masing titik ukur tegangan AC pada satu frekuensi, pengukuran dilakukan untuk 5 siklus dimana setiap siklus terdiri atas tiga step pengukuran dengan urutan AC, DC+, dan DC-.
12. Pengukuran pada step pertama, yaitu pengukuran terhadap tegangan AC, dilakukan sesuai dengan pengabelan yang dijelaskan pada poin 8. Titik ukur yang diatur ada F5720A adalah titik ukur tegangan AC beserta frekuensinya yang akan dicari nilai koreksi dan ketidakpastiannya. Titik ukur ini selanjutnya disebut dengan *Vac_{nom}*. Nilai pembacaan tegangan DC pada DVM F8508A ketika TTS F792A disuplai dengan *Vac_{nom}* disebut dengan *Eac* yang kemudian dicatat pada suatu lembar kerja.
13. Sebelum melanjutkan ke step kedua (DC+), set nilai *Eac* pada fungsi konstan (c) pada F5720A. Fungsi konstan (c) ini berfungsi untuk meyimpang suatu nilai tertentu pada memori DVM F8508A, sehingga nilai berapapun yang dibaca oleh DVM

Buku ini tidak diperjualbelikan.

selanjutnya akan dikurang oleh nilai c tersebut. Oleh karena itu, tanpa memutuskan suplai tegangan AC dari F5720A, penunjukan nilai pada DVM F8508A sekarang mendekati nol.

14. Matikan suplai tegangan AC dari F5720A pada TTS F792A.
15. Pengukuran pada step kedua, yaitu pengukuran terhadap tegangan DC+, dilakukan sesuai dengan pengabelan yang dijelaskan pada poin 9. Nilai tegangan DC+ yang diset pada F5720A, disebut dengan V_{dc+} , pertama-tama adalah nilai sama dengan nilai V_{ac_nom} namun tanpa frekuensi. Ketika disuplai nilai V_{dc+} , DVM F8508A membaca nilai keluaran dari TTS F792A yang selanjutnya disebut sebagai E_{dc+} . Selanjutnya, nilai V_{dc+} tersebut dilakukan penyesuaian sedemikian rupa sehingga nilai E_{dc+} mendekati nol. Nilai V_{dc+} setelah penyesuaian ini kemudian dicatat pada lembar kerja.
16. Matikan suplai tegangan DC+ dari F5720A pada TTS F792A.
17. Pengukuran pada step ketiga, yaitu pengukuran terhadap tegangan DC-, juga dilakukan sesuai dengan pengabelan yang dijelaskan pada poin 9. Sama seperti pada step pengukuran yang kedua, nilai tegangan DC- yang diset pada F5720A (disebut dengan V_{dc-}) pertama-tama adalah nilai yang sama dengan nilai V_{ac_nom} namun tanpa frekuensi. Ketika disuplai nilai V_{dc-} , DVM F8508A membaca nilai keluaran dari TTS F792A yang selanjutnya disebut sebagai E_{dc-} . Selanjutnya, nilai V_{dc-} tersebut dilakukan penyesuaian sedemikian rupa sehingga nilai E_{dc-} mendekati nol. Nilai V_{dc-} setelah penyesuaian ini kemudian dicatat pada lembar kerja.
18. Matikan suplai tegangan DC- dari F5720A pada TTS F792A.
19. Ulangi langkah 12 sampai dengan 18 sampai dengan 5 kali siklus.

Setelah seluruh tahapan selesai dilakukan dan data-data pengukuran telah didapatkan, dilakukan analisis data untuk mendapatkan

nilai koreksi dan ketidakpastian setiap titik ukur tegangan AC yang disuplai oleh F5720A. Model matematika untuk mencari koreksi nilai penunjukan tegangan AC pada F5720A dengan menggunakan metode komparasi termis ditunjukkan oleh persamaan 2: c_x merupakan nilai koreksi yang didapatkan dari hasil pengukuran yang dihitung dalam satuan ppm dengan menggunakan formulasi pada persamaan 3 dan c_s merupakan nilai beda transfer tegangan AC-DC TTS F792A dalam satuan ppm yang didapatkan dari sertifikat kalibrasi TTS F792A. Pada persamaan 3, V_{dc_nom} merupakan nilai rata-rata dari V_{dc+} dan V_{dc-} , yang diabaikan tanda negatifnya, yang dihitung dengan menggunakan persamaan 4 dan V_{ac_nom} adalah nilai nominal tegangan AC yang ingin dicari nilai koreksi dan ketidakpastiannya.

$$c = c_x + c_s \quad \text{Persamaan 2}$$

$$c_x = \frac{V_{dc_nom} - V_{ac_nom}}{V_{ac_nom}} \cdot 10^6 \quad \text{Persamaan 3}$$

$$V_{dc_nom} = \frac{V_{dc+} + |V_{dc-}|}{2} \quad \text{Persamaan 4}$$

Nilai ketidakpastian yang dicari pada kalibrasi ini adalah ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95%, faktor cakupan $k = 2$, dan dihitung dengan mengacu pada ISO GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*). Berdasarkan persamaan 2, bujet-bujet ketidakpastian pada metode kalibrasi ini bersumber dari parameter c_x dan c_s dengan rincian sebagai berikut:

1. Linieriti sumber tegangan DC yang digunakan (F5720A)

Metode komparasi termis yang digunakan untuk mengkalibrasi tegangan AC keluaran sumber tegangan dengan menggunakan TTS F792A dalam buku ini memanfaatkan linieritas dari sumber tegangan DC. Oleh karena itu, linieritas tersebut merupakan salah satu sumber ketidakpastian dan dicari dengan memanfaatkan sertifikat kalibrasi sumber tegangan DC. Besarnya nilai ketidakpastian tersebut merupakan gabungan antara nilai ketidakpastian sertifikat pada titik yang

bersangkutan dan nilai faktor linieriti dalam satu rentang yang dicari dengan menggunakan interpolasi.

2. Stabilitas jangka pendek dari DVM F8508A

Pada saat melakukan pengukuran, digunakan DVM F8508A untuk membaca nilai keluaran dari TTS F792A. Hasil pembacaan yang digunakan sebagai basis data untuk mencari nilai koreksi dan ketidakpastian dipengaruhi oleh stabilitas pembacaan oleh DVM F8508A dalam kurun waktu kurang dari 24 jam. Selain itu, pada saat melakukan penyesuaian (*tunning*) nilai V_{dc+} maupun V_{dc-} , stabilitas jangka pendek ini juga memengaruhi seberapa jauh bisa dilakukan penyesuaian nilai.

3. Stabilitas jangka pendek dari sumber tegangan DC (F5720A)

Selain dipengaruhi oleh stabilitas jangka pendek dari pembacaan DVM F8508A, nilai nilai V_{dc+} dan V_{dc-} yang didapatkan setelah proses penyesuaian (*tunning*), juga dipengaruhi oleh stabilitas dari sumber tegangan DC untuk kurun waktu kurang dari 24 jam.

4. Pembacaan skala terkecil (resolusi) DVM F8508A

DVM F8508A yang digunakan mempunyai batasan resolusi dalam membaca nilai-nilai yang diumpankan padanya. Batasan resolusi ini memengaruhi sejauh mana pelaksana kalibrasi bisa melakukan penyesuaian (*tunning*) dan memengaruhi berapa residu pengukuran yang tidak mungkin bisa dihindari ketika *tunning* dilakukan untuk mendapatkan nilai E_{dc+} dan E_{dc-} mendekati nol.

5. Residu hasil pengukuran yang terbaca pada DVM F8508A

Ketika *tunning* nilai V_{dc+} dan V_{dc-} dilakukan, nilai E_{dc+} dan E_{dc-} yang terbaca pada referen multimeter tidak akan mungkin nol sempurna karena terdapat fluktuasi pembacaan oleh DVM F8508A yang tidak mungkin dihindari. Oleh karena itu, nilai residu ini (E_{dc+} dan E_{dc-}) harus diperhitungkan dalam menghitung ketidakpastian pengukuran.

6. Repeatability (ESDM)

Repeatability merupakan satu-satunya ketidakpastian pada metode ini yang di evaluasi dengan menggunakan tipe A dan dicari dengan menggunakan persamaan 5 di mana V_i adalah V_{dc_nom} pada siklus ke i , V_{ave} adalah V_{dc_nom} rata-rata untuk 5 siklus pengukuran, dan n adalah jumlah siklus pengukuran.

$$ESDM = \frac{SD}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_{ave})^2}}{\sqrt{n}} \quad \text{Persamaan 5}$$

7. Sertifikat kalibrasi TTS F792A

Nilai ketidakpastian ini didapatkan dari sertifikat kalibrasi TTS F792A.

8. Drift TTS F792A

Seiring berjalannya waktu, performansi dari TTS F792A dapat berubah disebabkan oleh banyak faktor baik eksternal maupun internal yang tidak bisa dihindari. Hal ini berarti bahwa tegangan keluaran TTS F792A pada saat pengukuran juga dapat berubah dari waktu ke waktu (*drifting*). Idealnya, perubahan ini harus terus direkam dengan jeda waktu tertentu untuk mengetahui sejauh mana perubahan nilai *drifting*-nya dan diperhitungkan sebagai salah satu sumber ketidakpastian. Namun, jika pengukuran secara berkala tersebut belum bisa dilakukan, nilai *drift* ini dapat juga dicari dengan menggunakan nilai spesifikasi yang tercantum dalam *instruction manual*.

E. STUDI KASUS KALIBRASI DAN ANALISIS KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN TEGANGAN AC

Di sebuah laboratorium kalibrasi terdapat sebuah sumber tegangan yang mampu menyuplai tegangan DC dan AC yang disebut *multifunction calibrator* (MFC). Parameter tegangan DC pada MFC tersebut telah terkalibrasi pada titik 1 Volt dengan detail yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sertifikat kalibrasi tegangan DC yang dikeluarkan oleh MFC pada titik ukur 1 Volt

Rentang <i>Range</i>	Penunjukan Alat <i>Instrumen Indication</i>		Koreksi <i>Correction</i>		Ketidakpastian <i>Uncertainty</i>	
2.2 V	1.000 000 0	V	0.000 002 8	V	0.000 009 5	V
	-1.000 000 0	V	-0.000 002 0	V	0.000 009 6	V
	1.018 000 0	V	0.000 003 3	V	0.000 009 7	V
	1.800 000 0	V	0.000 008	V	0.000 016	V
	-1.800 000 0	V	-0.000 007	V	0.000 016	V
	2.000 000 0	V	0.000 009	V	0.000 029	V
	-2.000 000 0	V	-0.000 007	V	0.000 029	V

Sumber: Faisal (2019)

Personel laboratorium ingin mengkalibrasi parameter tegangan AC pada MFC tersebut pada titik ukur yang sama, yaitu 1 Volt 40 Hz, dengan menggunakan *thermal transfer standard* (TTS) yang mereka punya. TTS ini juga telah terkalibrasi pada titik 1 Volt dan 40 Hz dengan detail yang ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Sertifikat Kalibrasi TTS pada Titik Ukur 1 Volt 40 Hz

Tegangan Nominal		Frekuensi		Beda Tegangan AC/DC		Ketidakpastian	
1	V	40	Hz	2.5	ppm	5	ppm

Sumber: Budovsky dan Marais (2015)

Untuk membaca nilai tegangan DC keluaran TTS, digunakan sebuah *reference multimeter* (RMM) dan didapatkan data pengukuran sebagai berikut.

Sebelum menghitung berapa nilai koreksi penunjukan tegangan AC pada MFC pada titik ukur 1 Volt dan 40 Hz dengan menggunakan persamaan 2 dan 3, nilai V_{dc_nom} harus dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan rumus pada persamaan 4: nilai V_{dc+} dan V_{dc-} merupakan nilai rata-rata dari data yang didapatkan hingga siklus ke-5. Mengacu pada hasil pengukuran yang disajikan oleh Tabel 5, didapatkan nilai V_{dc+} dan V_{dc-} adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Data Pengukuran untuk Kalibrasi Tegangan AC pada MFC Menggunakan TTS

Vac_nom: 1 V

Frekuensi: 40 Hz

Siklus ke-	Eac	Vdc+	Edc+	Vdc-	Edc-
1	0,8621660 V	0,9999660 V	0,0000000 V	-0,9999640 V	0,0000004 V
2	0,8621644 V	0,9999656 V	0,0000002 V	-0,9999632 V	0,0000002 V
3	0,8621608 V	0,9999637 V	0,0000003 V	-0,9999608 V	0,0000006 V
4	0,8621632 V	0,9999662 V	0,0000004 V	-0,9999643 V	0,0000002 V
5	0,8621559 V	0,9999597 V	0,0000003 V	-0,9999574 V	0,0000007 V

Sumber: Hasil Pengambilan Data Penulis (2019)

$$V_{dc+} = \frac{0,9999660 + 0,9999656 + 0,9999637 + 0,9999662 + 0,9999597}{5}$$
$$= 0,9999642 \text{ V}$$

$$V_{dc-} = \frac{(-0,9999640) + (-0,9999632) + (-0,9999608) + (0,9999643) + (-0,9999574)}{5}$$
$$= -0,9999619 \text{ V}$$

Dengan demikian, didapatkan nilai V_{dc_nom} adalah sebagai berikut.

$$V_{dc_nom} = \frac{0,9999642 + (0,9999619)}{2} = 0,9999631 \text{ V}$$

Nilai V_{dc_nom} kemudian dimasukkan pada persamaan 3 dan didapatkan nilai c_x sebagai berikut.

$$c_x = \frac{V_{dc_nom} - V_{ac_nom}}{V_{ac_nom}} \cdot 10^6$$

$$c_x = \frac{0,9999631 - 1}{1} \cdot 10^6$$

$$c_x = -37 \text{ [ppm]}$$

Berdasarkan sertifikat kalibrasi TTS yang ditunjukkan oleh Tabel 4, didapatkan nilai beda tegangan AC/DC nya (c_s) pada titik ukur 1 Volt 40 Hz adalah sebesar 2,5 ppm. Oleh karena itu, dengan menggunakan formulasi pada persamaan 2, didapatkan nilai koreksi penunjukan level tegangan AC pada nominal 1 Volt 40 Hz sebagai berikut:

$$c = c_x + c_s$$

$$c = -37 + 2,5$$

$$c = -34 \text{ [ppm]}$$

Seperti yang telah dijabarkan pada subbab 2.2, ketidakpastian pada kalibrasi ini dihitung dengan menggunakan prinsip-prinsip yang terdapat pada ISO GUM dan didapatkan hasil perhitungan yang disajikan oleh Tabel 6.

Dengan demikian, pada titik ukur tegangan AC sebesar 1 Volt dan frekuensi 40 Hz yang dikeluarkan oleh MFC, dengan menggunakan metode komparasi termis, didapatkan nilai koreksinya adalah sebesar -34 ppm atau -0,000034 Volt dengan ketidakpastian pengukuran sebesar 35 ppm atau 0,000035 Volt.

Tabel 6. Bujet-Bujet Ketidakpastian yang Berhasil Dievaluasi

Sumber Ketidakpastian	Ketidakpastian Baku	Distribusi Probabilitas/ Metode Evaluasi (A,B)	Koefisien Sensitivitas	Kontribusi Ketidakpastian	Derajat Kebebasan
X_i	$u(x_i)$		c_i	$u(R_i)$	u_i
Linieriti sumber tegangan DC (MFC)	2,3 ppm	normal/ tipe B	1	2,3	1000000000
Stabilitas jangka pendek dari RMM	0,48 ppm	normal/ tipe B	1	0,48	1000000000
Stabilitas jangka pendek dari sumber tegangan DC (MFC)	2,9 ppm	normal/ tipe B	1	2,9	1000000000
Pembacaan skala terkecil (resolusi) RMM	0,029 ppm	rectangular/ tipe B	1	0,029	1000000000
Residu hasil pengukuran yang terbaca pada RMM	0,20 ppm	rectangular/ tipe B	1	0,20	1000000000
Repeatability (ESDM)	1,3 ppm	Tipe A	1	1,3	4
Sertifikat kalibrasi TTS	2,5 ppm	normal/ tipe B	1	2,5	1000000000
Drift TTS	17 ppm	rectangular/ tipe B	1	17	1000000000
Ketidakpastian Gabungan:				18	ppm
Derajat Kebebasan Efektif:				169301	
Faktor Cakupan pada Tingkat Kepercayaan 95%				2,0	
Ketidakpastian Bentangan (Faktor Cakupan 95%):				35	ppm

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2019)



BAB III Metrologi Resistansi

Menurut mekanika kuantum terdapat dua konstanta dasar yang disebut sebagai konstanta Planck (h) dan muatan elektro (e) yang telah dikukuhkan dalam sebuah konferensi internasional di bidang metrologi sebagai satuan sistem internasional terevisi pada tahun 2019. Ketika itu besaran ampere pun didefinisikan sebagai gaya sebesar 2×10^{-7} newton per meter panjangnya yang dihasilkan oleh dua utas kawat konduktor, dengan penampang diabaikan, yang sejajar terpisah 1 meter dengan panjang tak hingga dan terletak diruang hampa. Di sisi lain, besaran volt didefinisikan sebagai beda potensial yang dibangkitkan di antara dua titik pada kabel penghantar yang membawa arus konstan sebesar 1 ampere dan terdapat daya yang hilang sebesar 1 watt. Demikian pula besaran ohm telah didefinisikan sebagai hambatan listrik di antara dua titik konduktor ketika terdapat perbedaan potensial konstan sebesar 1 volt dan menghasilkan arus sebesar 1 ampere sehingga konduktor tersebut tidak berfungsi sebagai fungsi gaya gerak listrik.

Definisi satuan nasional standar ukuran (SNSU) resistansi yang tertinggi, untuk sementara ini, masih mengacu pada definisi 1 ampere seperti tersebut berdasarkan kesepakatan CIPM (*Comité*

Internationaldes Poids et Mesures) pada tahun 1946. Kemudian dengan menggunakan hukum Kirchoff bahwa $V = R.I$, maka besaran resistansi dapat dinyatakan sebesar hasil bagi antara besaran tegangan terhadap besaran arus yang mengalir pada R.

Resistor merupakan salah satu komponen elektronik yang berfungsi sebagai penghambat arus listrik dan jika resistor dipakai dalam suatu rangkaian elektronika dapat berfungsi menghambat atau mengurai aliran arus listrik dan sekaligus bertindak untuk menurunkan level tegangan listrik dalam rangkain tersebut. Pada dasarnya setiap bahan penghantar atau konduktor memiliki sifat menghambat arus listrik sehingga besaran hambatan listrik pada penghantar atau konduktor dipengaruhi beberapa faktor yang pada umumnya dinyatakan dengan persamaan yang digunakan ditunjukkan pada persamaan 6 berikut.

$$R = \rho \times \frac{l}{A}$$

Persamaan 6

R adalah resistansi konduktor (Ω),

ρ adalah resistivitas (Ωm),

l adalah panjang (m), dan

A adalah luas penampang (m^2).

Dengan demikian, dengan persamaan di atas ditunjukkan bahwa besarnya hambatan suatu penghantar tergantung pada:

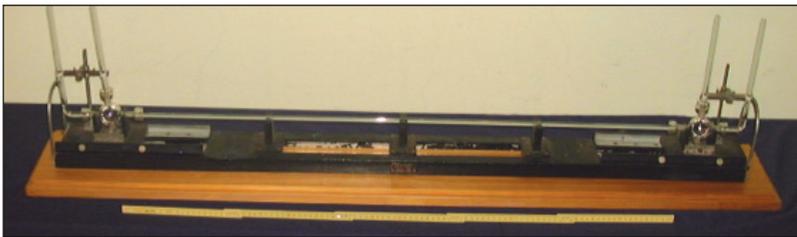
- Jenis bahan: contohnya tembaga, memiliki nilai resistansi yang lebih rendah dibandingkan dengan baja.
- Suhu: nilai resistansi akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu pada penghantar.
- Panjang penghantar: makin panjang suatu penghantar, makin tinggi pula nilai resistansinya.
- Luas penampang: makin kecil diameter suatu penghantar, makin tinggi pula nilai resistansinya (Kho, 2020).

A. PERKEMBANGAN RESISTOR STANDAR

Pada tahun 1893, nilai ohm secara internasional diperoleh dengan merealisasikan: R (resistansi) dari kolom merkuri dengan penampang seragam yang memiliki panjang 160,3 cm dan massa 14,4521 g pada kondisi suhu es yang mencair; yang didapatkan nilai ohm sama dengan $1,00049 \Omega$, dengan nilai akurasi dari realisasi ohm dengan kolom merkuri ini adalah sebesar 20 ppm dan dengan koefisien suhu sekitar 880 ppm/K, yang sistemnya ditunjukkan pada Gambar 13.

Di sisi lain pada rentang tahun 1967 sampai dengan 1990: penentuan resistansi DC dilakukan dengan pengukuran absolut kapasitansi berdasarkan *cross* kapasitor melalui jembatan *quadrature* yang dalam sistem tersebut membandingkan dua 1000 pF kapasitor dengan dua 100 k Ω dan nilai rasio dua kapasitor 1000 pF dan dua resistor 100 k Ω dapat dihitung berdasarkan perbedaan dari dua pengukuran yang dilakukan (Jerry dkk., 1998). Jembatan *quadrature* ditunjukkan pada Gambar 14.

Kemudian seiring perkembangan zaman, realisasi resistansi berdasarkan standar *self* induktor yang resistor standar sudah dalam bentuk tabung dengan menggunakan bahan manganin. Bahan manganin ini digunakan sebagai kontruksi pada tipe resistor Reichsanstalt, Rosa dan Thomas dan yang telah dipelihara sejak tahun 1901. Jenis ini rata-rata ini standar deviasinya sekitar 0,01 ppm dan untuk koefisien suhu berkisar 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, sedangkan untuk kestabilannya berkisar



Sumber: Kaneko (2014)

Gambar 13. Realisasi Kolom Merkuri untuk Ohm

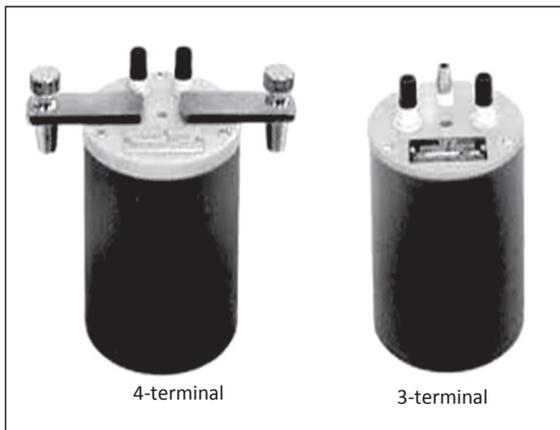
3 ppm/year. Untuk jenis resistor dengan bahan mangin ditunjukkan pada Gambar 15.

Di sisi lain, sejak tahun 1990, standar resistansi kuantum berdasarkan kuantum efek hall yang ditemukan oleh Edwin Hall pada tahun 1879, sedangkan pada tahun 2006 di Sub Direktorat Sandar Nasional Satuan Ukuran Kelistrikan dan Waktu (dahulu Subbidang Metrologi



Sumber: Kaneko (2014)

Gambar 14. Jembatan Quadrature

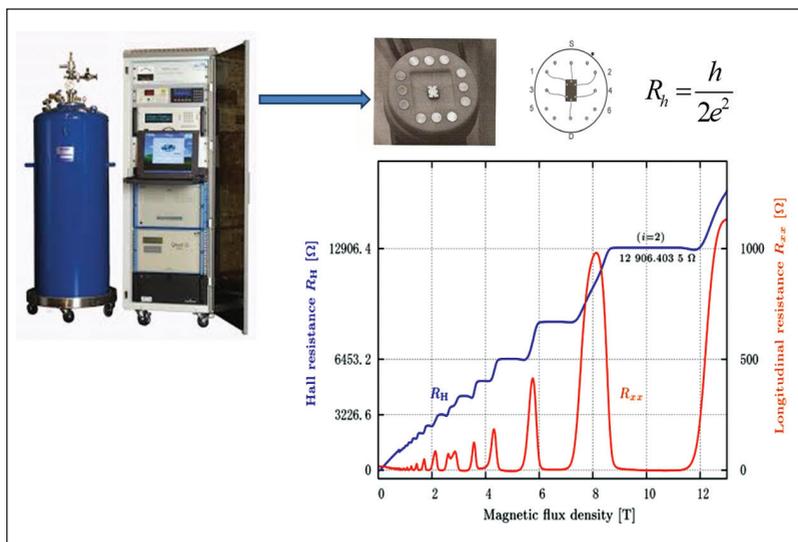


Sumber: Yokogawa Test dan Measurement Corporation (2020)

Gambar 15. Resistor Standar

Buku ini tidak diperjualbelikan.

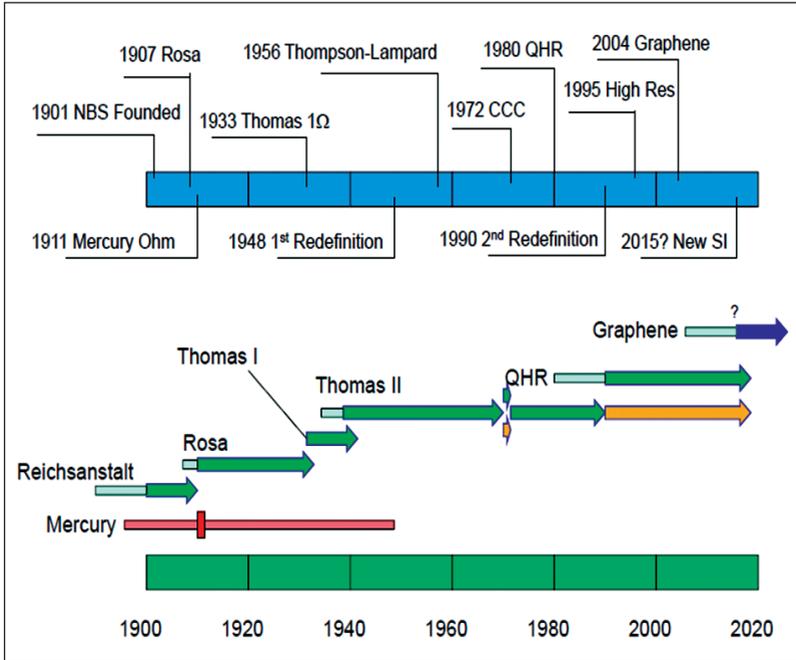
Kelistrikan Pusat Penelitian Metrologi LIPI) memiliki standar primer untuk resistor standar dengan menggunakan efek hall yaitu sistem *quantum hall resistance* (QHR) yang sistemnya ditunjukkan pada Gambar 16. Sistem QHR adalah sebuah sistem pembangkit resistor standar dengan resistansi berdasarkan konstanta von klitzing dengan persamaan $R_h = R_H/i = h/ie^2$ dimana h/ie^2 disebut konstanta von klitzing, h adalah konstanta planck, e adalah muatan elektron, i adalah bilangan bulat positif, $i=1,2,3$ dengan nilai resistansi hall 25812,807 Ω , resistansi hall (R_H). Sistem QHR yang dimiliki ini beroperasi pada $i = 2$ dan suhu 1,2 K (-271,8 $^{\circ}\text{C}$) sehingga memiliki nilai resistansi hall (R_H) sebesar 12 906,403 5 Ω dengan nilai akurasi yang bisa dicapai adalah lebih kecil dari 0,02 ppm. Nilai suhu tersebut dapat dicapai dengan menggunakan sistem pendingin *cryogenic* yang menggunakan Helium cair sebanyak 55 liter hal tersebut digunakan untuk pengkondisian referensi atau sample yang ditempatkan pada sebuah dewar dengan kapasitas dewar 55 liter agar suhu mencapai 1,2 kelvin, dan medan magnet 8 T sampai 9 T yang disuplai integral magnet. Sistem QHR



Sumber: MI (2017b)

Gambar 16. Sistem Quantum Hall Resistance dari MI-Kanada

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Kaneko (2014)

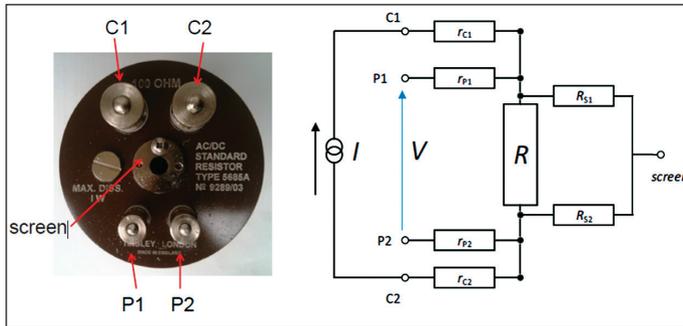
Gambar 17. Perkembangan dari Resistor Standar

ini beroperasi selama 3–7 hari untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan.

Perkembangan tentang resistor standar dilihat pada Gambar 17 menunjukkan perkembangan resistor standar dari tahun ke tahun sampai dengan saat ini. Pada umumnya merek dari resistor standar berdasarkan dari peneliti yang menemukan atau membuat resistor standar tersebut.

B. RESISTOR STANDAR

Sebuah resistor standar pada umumnya memiliki 2, 3, 4, dan 5 terminal, gambaran rangkaian ekuivalen dari resistor standar ditunjukkan pada Gambar 18. Rangkaian ekuivalen pada resistor standar DC ini memadai untuk berbagai nilai resistansi dan desian resistor



Sumber: Jones (2015)

Gambar 18. Terminal pada Resistor Standar

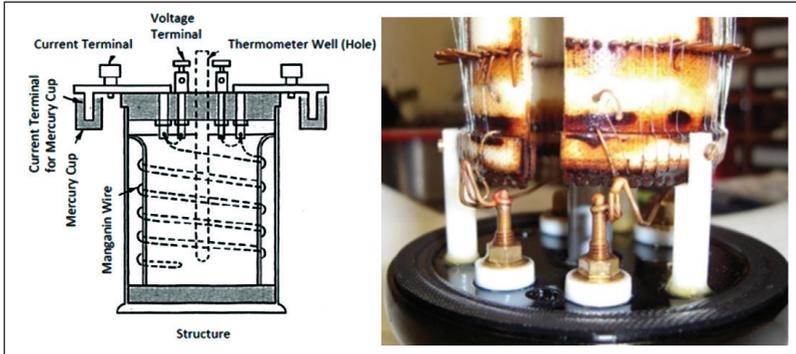
(perhatikan tanda lingkaran hitam merupakan koneksi tetap internal dan lingkaran terbuka merupakan terminal eksternal yang tersedia untuk koneksi sehingga dapat dihubungkan secara bebas). Insulasi Kebocoran resistansi yang terjadi pada *screen*, yaitu R_{s1} dan R_{s2} , selain itu kebocoran resistansi dapat terjadi pada sepanjang elemen resistansi. Pada prakteknya, sebuah resistor dapat dirancang dengan menggunakan 2 hingga 5 terminal tergantung pada nilai relatif dari resistansi linkage internal (r_{C1} , r_{P1} , ...) dan kebocoran resistansi pada (R_{s1} , R_{s2}) ke nilai resistansi dasar, R .

Di sisi lain, sebuah resistor standar dengan empat terminal akan berkerja ketika terminal arus ($C1$ dan $C2$) dan potensial ($P1$ dan $P2$) terpisah maka pengukuran, R (resistansi), dapat didefinisikan tanpa bergantung pada nilai resistansi kabel eksternal yang terhubung dengan resistansi internal. Kecuali jika *screen* terhubung ke sumber arus maka resistansi kebocoran menjadi bagian dengan nilai R yang diukur karena nilai tersebut timbul secara paralel dengan R (Jones, 2015).

Struktur internal dari sebuah resistor standar ditunjukkan pada Gambar 19 yang menggambarkan lilitan dari kawat manganin yang digunakan untuk membuat sebuah resistor standar.

Salah satu contoh wujud tampilan koneksi internal dalam sebuah resistor standar $1\text{ k}\Omega$ dari bahan *toroidal wound*. Dari Gambar 19

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Jones (2015)

Gambar 19. Struktur Internal Resistor Standar

sebelah kanan ditunjukkan koneksi dari terminal ke elemen tahanan dirancang sedemikian rupa sehingga tidak ada tekanan mekanis yang memengaruhi dan dapat didefinisikan sebagai 4-terminal resistor. Pengukuran telah didefinisikan pada kebal terhadap variasi yang terdapat pada timah eksternal dan kontak resistansi.

Dalam sebuah praktik, jika kita melakukan hubungan pengabelan ke terminal dan longgar pada saat pemasangan pada panel, kemudian dilakukan pengetatan koneksi pada terminal tersebut, maka akan menyebabkan variasi nilai resistansi sebesar $5 \mu\Omega/\Omega$ sehingga perlu diperhatikan pada saat melakukan koneksi pada sebuah resistor standar dan dapat memeriksa bahwa terminal tidak longgar.

Selain dari konstruksinya, keandalan sebuah resistor standar dapat ditentukan dari jenis material yang digunakan. Berikut beberapa jenis material yang digunakan:

1. *Wirewound* (WW)

Wirewound merupakan bahan untuk resistor yang dibuat dengan lilitan kawat resistansi berbentuk spiral di sekitar inti mental nonkonduktif. Resistor dengan bahan ini tidak cocok untuk aplikasi pada frekuensi > 50 kHz.

Resistor *wirewound* pada umumnya diproduksi untuk resistor dengan presisi tinggi atau untuk aplikasi daya tinggi. Kelebihan resistor ini adalah *noise* rendah, kuat dan suhu yang stabil. Nilai resistansi tersedia dari $0,1\Omega$ hingga $100\text{ k}\Omega$ dengan akurasi antara 0,001 dan 20%.

2. Resistor komposisi karbon (CCR)

Elemen resistifnya terbuat dari campuran partikel karbon halus dan bahan keramik nonkonduktif. Makin banyak bahan karbonnya makin rendah pula nilai resistansi atau nilai hambatannya. Resistor dengan bahan komposisi karbon sangat andal, tetapi memiliki akurasi yang jelek dengan toleransi maksimum sekitar 5%. Sampai tahun 1960-an resistor ini digunakan sebagai standar untuk aplikasi umum.

3. Resistor dari bahan Film Karbon

Resistor terdiri dari film tipis karbon yang diendapkan subtrat isolator yang dipotong berbentuk spiral. Tersedia dari nominal $1\ \Omega$ sampai dengan $10\text{ M}\Omega$. Akurasi jenis resistor ini mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan komposit karbon. Aplikasi dari jenis resistor dengan bahan ini adalah untuk Radar, *x-ray*, dan *power supply*.

4. Film Oxide Metal

Bahan resistor yang memiliki sifat bahan resistif dan merupakan kombinasi dari bahan keramik dan logam disebut sebagai Cermet. Stabilitas, koefisien suhu dan toleransi lebih baik daripada film karbon. Toleransi khas resistor ini antara 0,5% dan 2% dengan koefisien suhu antara 50 dan 100 ppm/K .

5. Bahan Foil

Resistor diciptakan pada tahun 1960-an dan masih termasuk tipe yang paling akurat dan stabil sampai hari ini. Jenis bahan resistor ini memiliki koefisien suhu resistansi yang sangat rendah dan digunakan untuk aplikasi dengan persyaratan presisi tinggi. Resistor dengan bahan foil ini terbuat dari *alloy* yaitu bahan yang terbuat dari dua atau

lebih elemen logam untuk melindungi dari kerusakan. Pada umumnya bahan yang digunakan adalah nikel, kromanium karena bahan-bahan ini memberikan ketahanan resistansi yang tinggi terhadap arus listrik (Jerry dkk, 1998).

Di sisi lain, berdasarkan *Classification of Services in Electricity of Magnetism, The BIPM key comparison database* pengelompokan resistansi dibagi menjadi 3 kelompok berdasarkan rentang nilai dari resistor standar antara lain:

a. Resistansi rendah

Rentang rendah mencakup nominal resistor standar lebih kecil dari 1Ω ($<1 \Omega$), dan pada umumnya $R_s=1\Omega$ dan $R_x \leq 100 \text{ m}\Omega$ yang mana R_s adalah resistor standar acuan dan R_x ada resistor standar yang diuji dengan menggunakan jembatan DCC sebagai alat ukurnya. Pengaturan pengukuran resistansi rendah membutuhkan sumber arus tinggi yang diperoleh secara eksternal dari sumber arus.

Alat ukur yang digunakan untuk pengukuran rentang rendah adalah digital microohmmeter, jembatan DCC dengan range extender dan power supply. Di sisi lain konfigurasi pengukuran dengan menggunakan pengukuran 2 kawat atau 4 kawat metode pengukuran langsung, pengukuran tidak langsung atau rasio.

Sumber-sumber kesalahan pengukuran dapat berasal dari pengabelan (*lead Resistance*) biasanya setiap kabel memiliki nilai resistansi tertentu, pengaruh suhu, pengaruh arus yang diberikan pada saat pengukuran. Aplikasi Resistor standar rendah digunakan untuk mengevaluasi resistor daya tinggi, pemutus sirkuit, *switch*, bus bar, kabel dan konektor, dan elemen perlawanan lainnya dan pada umumnya digunakan pada aplikasi untuk pengukuran yang pada umumnya ditemuin di bidang pekerjaan untuk pemeriksaan instalasi pengabelan.

b. Resistansi menengah

Nominal resistansi menengah ini sering banyak digunakan pada aplikasi di bidang dalam rekaya elektronik. Terdapat banyak alat ukur

yang presisi di pasaran yang dapat mencakupi rentang ini dengan beberapa operasi dalam ketelitian dalam per sejuta (ppm) atau lebih. Aplikasi khusus yang sering menggunakan rentang menengah pada nominal 1 sampai 10 k Ω adalah untuk pengukuran suhu dengan menggunakan termometer resistansi dan atau resistor standar rentang menengah biasa digunakan untuk *resistance temperature detector* (RTD) sebagai sensor suhu (Metherall, 2000).

Rentang menengah melingkupi nominal resistor standar dari 1 Ω sampai 1 M Ω , pada umumnya dengan menggunakan pengukuran jembatan DCC (*Direct Current Comparator*) menggunakan **$R_s = 1 \Omega$ dan $R_x \leq 1 M\Omega$** : R_s adalah resistor standar acuan dan R_x ada resistor standar yang diuji. Pengaturan pengukuran pada rentang ini membutuhkan sumber arus yang relatif rendah yaitu 100 mA–0,03 mA. Alat ukur yang digunakan pada rentang ini dapat menggunakan digital multimeter, jembatan DCC. Di sisi lain konfigurasi pengukuran 2 kawat atau 4 kawat dengan metode pengukuran langsung, pengukuran tidak langsung atau rasio.

Sumber-sumber kesalahan pengukuran dapat berasal dari pengabelan, pengaruh suhu, pengaruh arus yang diberikan, selain dari hasil pengulangan data dan sertifikat standar acuan.

c. Resistansi tinggi

Pengukuran dari nominal resistansi tinggi umumnya digunakan untuk proses pengujian kualitas dari insulasi listrik atau untuk melakukan pengukuran arus yang sangat kecil dan dapat digunakan untuk *insulation tester*. Rentang kemampuan untuk resistansi standar adalah dari 10 M Ω sampai 1 P Ω , sedangkan pengaturan pengukuran untuk rentang tinggi ini membutuhkan sumber tegangan yang 100 V–1000 V.

Alat ukur yang digunakan adalah digital multimeter, jembatan DCC, dan teraohmmeter. Konfigurasi yang digunakan untuk pengukuran adalah pengukuran 2, 3 kawat dengan metode pengukuran langsung, substitusi atau rasio.

Sumber-sumber kesalahan pengukuran dapat berasal dari pengabelan, pengaruh suhu, pengaruh tegangan yang diberikan, sedangkan jenis-jenis resistor standar yang digunakan sebagai standar acuan untuk dilaboratorium kalibrasi pada umumnya memiliki beberapa jenis. Berikut dijelaskan jenis-jenis resistor standar:

1) Dikondisikan dalam ruangan terbuka

Hal yang dimaksud dengan dikondisikan di dalam ruang terbuka adalah pengondisian dari resistor standar didapat diletakkan pada ruangan yang terkondisi suhu sesuai dengan persyaratan yang dibutuhkan. Ada beberapa jenis resistor standar yang dikondisikan dalam ruangan terbuka ditunjukkan pada Gambar 20.

2) Dikondisikan dalam bak oli

Beberapa jenis resistor standar dalam pemeliharaannya agar terjaga maka harus dikondisikan pada sebuah bak oli yang pada umumnya diisi dengan menggunakan media oli putih, hal ini untuk menjaga keseragaman suhu tertentu sesuai dengan kestabilan dari jenis resistor standar yang ada.

Berikut ini tipe dari resistor standar yang harus dikondisikan dalam bak oli ditunjukkan pada gambar 21. Tipe resistor standar yang dikondisikan ini pada umumnya dari nominal 1 m Ω sampai 1 G Ω .



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 20. Resistor standar di mana a. resistor standar nominal tetap, b. dekade resistor, c. Resistor transfer standar, d. High resistor standar, dan e. Kalibrator Multifungsi.



Sumber: MI (2017a)

Gambar 21. Salah satu tipe resistor standar yang dikondisikan dalam bak oli.

C. KONFIGURASI PENGUKURAN

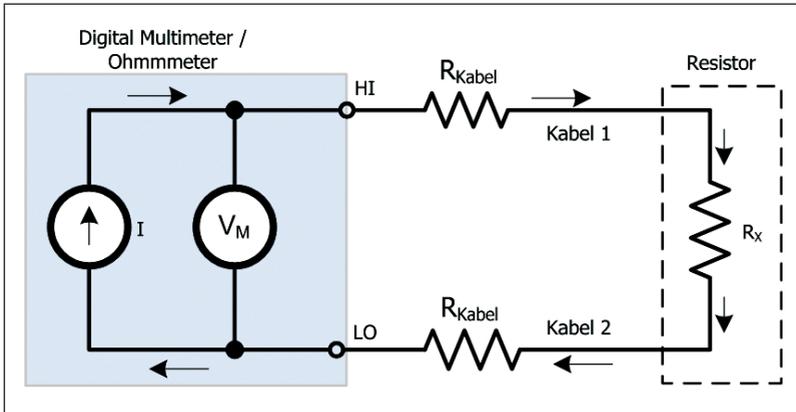
Terdapat beberapa pengoneksian yang digunakan untuk menghubungkan *unit under test* (UUT) ke terminal alat ukur. Karena setiap pengoneksian memiliki kelebihan dan kekurangan, maka pengoneksian yang paling tepat harus dapat dipilih berdasarkan jenis UUT dan berdasarkan akurasi pengukuran yang dikehendaki. Konfigurasi pengukuran tersebut antara lain:

1. Konfigurasi Dua-Kawat (2-wire)

Konfigurasi pengukuran 2-kawat (2-kabel) ini merupakan konfigurasi yang paling sederhana yaitu dengan mengoneksikan 2-terminal resistor ke 2-terminal ohmmeter menggunakan sepasang kabel. Skematik sederhana konfigurasi pengukuran 2-kawat ditunjukkan pada Gambar 22.

Di konfigurasi 2-kawat ini, sirkuit arus dan tegangan pada ohmmeter berada dalam 1 terminal keluaran yang sama. Konfigurasi ini menyebabkan adanya kesalahan yang diakibatkan terukurnya

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 22. Skematik Konfigurasi Rangkaian Pengukuran Dua-Terminal

resistansi kabel secara seri bersamaan dengan pengukuran resistor. Selain itu, menggunakan konfigurasi ini, memungkinkan terjadinya resistansi bocor (*leakage resistance*) saat penghubungan ujung *probe* kabel kepada terminal resistor, seperti tangan yang memegang material *probe* saat melakukan pengukuran resistansi sehingga mengakibatkan resistansi tubuh terhubung paralel (*shunt*) terhadap resistor yang diukur. Oleh karena itu, konfigurasi ini sering diketahui sebagai konfigurasi sederhana, tetapi dapat menyebabkan banyak terjadinya kesalahan ukur.

Prinsip kerja ohmmeter adalah menyuplai arus (I) kepada resistor (R_x) kemudian membaca tegangan jatuhnya (V_M) dan dikalkulasi secara matematis nilai resistornya ($R = \frac{V_M}{I}$).

Di sisi lain, analisis rangkaian adalah sebagai berikut: VM merupakan tegangan yang dibaca digital multimeter/ohmmeter dan I merupakan arus kerja yang diberikan oleh digital multimeter/ohmmeter. Karena pengukuran menggunakan konfigurasi 2-kawat sehingga arus akan mengalir melalui kabel 1 kemudian melalui resistor R_x kemudian melalui kabel 2 dan baru akan kembali ke ohmmeter. Oleh karena itu tegangan yang terbaca V_M menjadi:

$$V_M = I \cdot (R_{Kabel1} + R_x + R_{Kabel2}) \quad \text{Persamaan 7}$$

Dengan demikian, nilai resistansi yang terukur dan tertampil di ohmmeter adalah R_M yaitu

$$\begin{aligned} R_M &= \frac{V_M}{I} \\ &= R_{Kabel1} + R_x + R_{Kabel2} \\ R_M &= R_x + (R_{Kabel1} + R_{Kabel2}) \end{aligned} \quad \text{Persamaan 8}$$

Adanya tambahan resistansi akibat kabel 1 dan kabel 2, menjadikan ohmmeter tidak hanya menampilkan nilai dari R_x namun terdapat tambahan nilai resistansi dari Kabel 1 dan Kabel 2 (Janesch, n.d.). Kesalahan ini akan sangat signifikan berpengaruh pada pengukuran 10 ohm kebawah dengan keakurasian terbaik yang dapat dicapai sebesar 1%.

Akurasi ini dapat ditingkatkan dengan cara melakukan proses pengenolan (*zeroing/komparasi termising*). Proses pengenolan adalah mengukur nilai resistansi kabel yang digunakan saat pengukuran resistor dengan cara menghubungkan (*short*) ujung kedua kabel, kemudian nilainya digunakan untuk mengoreksikan nilai ukur resistor dengan cara dikurangi secara matematis. Sebagai contoh:

Jika dilakukan proses pengenolan, maka akan diperoleh nilai resistansi kabel sebesar $(R_{kabel1} + R_{kabel2}) \Omega$, sehingga ketika nilai ukur resistor yang sebelumnya:

$$R_M = R_x + (R_{kabel1} + R_{kabel2}) \quad \text{Persamaan 9}$$

kemudian dikoreksikan dengan nilai pengenolan, maka

$$R_M = R_x + (R_{kabel1} + R_{kabel2}) - (R_{kabel1} + R_{kabel2}) \quad \text{Persamaan 10}$$

$$R_M = R_x \quad \text{Persamaan 11}$$

Dengan demikian, didapatkannya nilai yang terukur (R_M) bernilai sama dengan nilai dari R_x itu sendiri tanpa ada tambahan nilai resistansi lain.

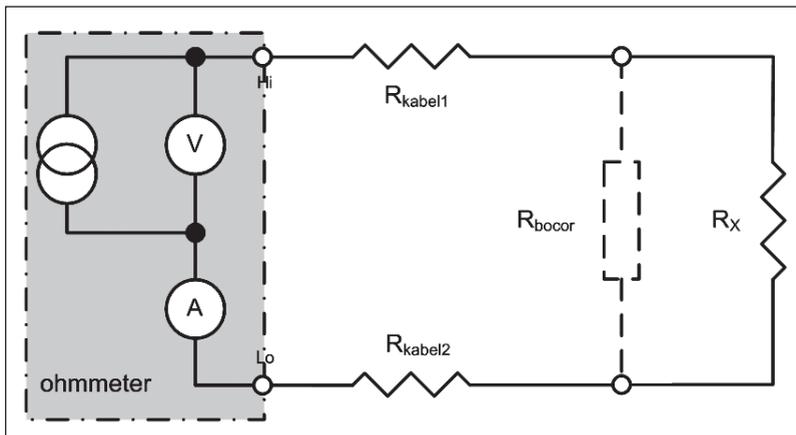
Hal yang perlu diketahui, proses pengenalan ini sudah menjadi fungsi fitur pada digital multimeter sehingga pengguna tidak perlu melakukan pengenalan dengan cara mencatat dikarenakan sudah otomatis tersimpan. Pencatatan dilakukan pada menggunakan multimeter yang tidak memiliki memori internal, seperti *hand-held* multimeter.

Adapun kesalahan yang diakibatkan terdapatnya resistansi bocor akibat *shunt* resistansi, terutama pada pengukuran resistor menengah dan tinggi, dapat diilustrasikan sebagai Gambar 23 berikut.

Adanya resistansi bocor yang terhubung paralel (*shunt*) mengakibatkan adanya arus bocor yang mengalir melaluinya, sehingga menyebabkan arus ukur yang melalui R_x tidak memiliki besaran yang sama dengan arus yang diterima oleh ammeter A. Maka nilai R_x yang terukur (setelah proses pengenalan) sebesar:

$$R_M = \frac{V}{I_A} = \frac{I_X \cdot R_X}{(I_{bocor} + I_X)} \quad \text{Persamaan 12}$$

Berdasarkan ilustrasi tersebut, keakurasian hasil pengukuran dari konfigurasi 2-kawat ini sangat dipengaruhi juga oleh besarnya arus bocor. Besarnya arus bocor dipengaruhi oleh besarnya nominal R_x ,



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 23. Ilustrasi Pengukuran Resistor Menengah dan Tinggi

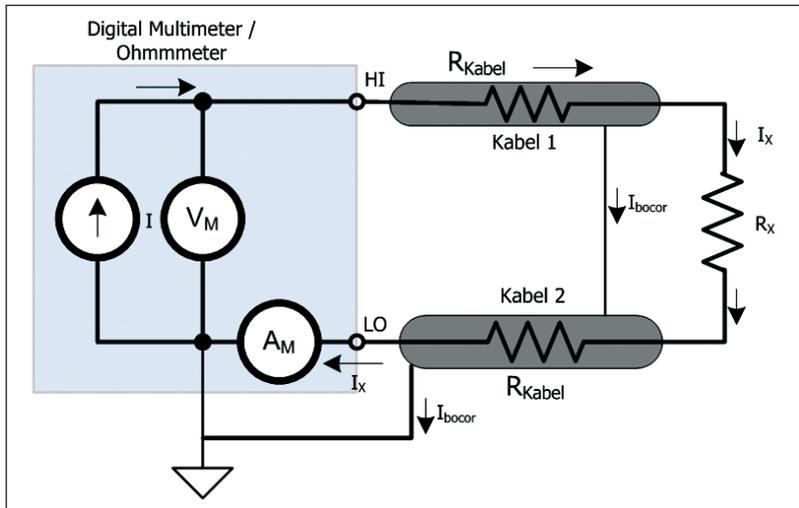
Buku ini tidak diperjualbelikan.

makin besar nominal R_x maka besarnya arus yang mengalir di R_{bocor} akan makin besar, dan membuat tingkat keakurasian dari pengukuran tersebut makin menurun. Akurasi ini dapat ditingkatkan dengan cara melakukan *guarding* pada sirkuit pengukuran, atau yang dikenal dengan pengukuran 3-terminal/3-kawat, yang akan dibahas di subbab berikutnya.

2. Konfigurasi Tiga-Kawat (3-wire)

Konfigurasi 3-kawat merupakan 2-kawat + *guarding*. Konfigurasi ini menggunakan kabel 1-pair + *shield* agar dapat mengatasi efek dari arus bocor. Bagian sebelah luar dari konduktor (*shield*) dari kabel dihubungkan ke terminal *guard*.

Berdasarkan ilustrasi Gambar 24, arus bocor (I_{bocor}) mengalir melalui *screen* dan dialirkan ke *guard* sehingga tidak mengalir ke ammeter (A_M). Oleh karena itu, arus bocor tersebut tidak terukur ammeter dan tidak memengaruhi nilai resistansi yang diukur.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2020)

Gambar 24. Skematik konfigurasi 3T dengan menghubungkan *outer* pada kabel koaksial ke *guard*.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

$$R_M = \frac{V}{I_A} = \frac{I_X \cdot R_X}{I_X}$$

Persamaan 13

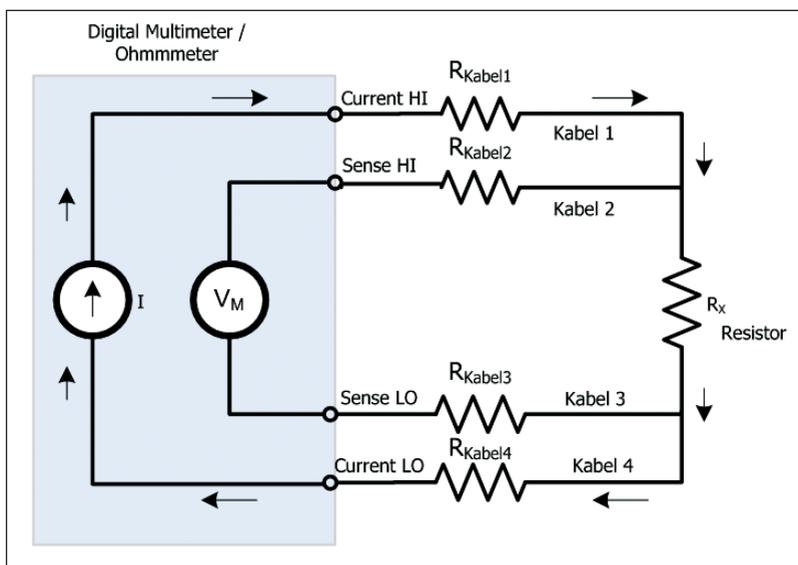
$$R_M = R_X$$

Persamaan 14

3. Konfigurasi Empat-kawat (4T)

Karena adanya keterbatasan rentang pengukuran dengan menggunakan metode konfigurasi dua kawat, pendekatan yang berbeda digunakan untuk rentang pengukuran pada resistansi rendah untuk mengurangi efek resistansi timbul pada UUT. Untuk mengukur UUT dengan nilai resistansi yang sama dengan atau kurang dari 1 k Ω , dapat menggunakan konfigurasi empat-kawat yang ditunjukkan pada Gambar 25.

Analisis rangkaian pada konfigurasi pengukuran 4, meskipun arus tetap mengalir melalui kabel 1 dan kabel 2, tetapi pada V_M hanya



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 25. Skematik Konfigurasi 4T

Buku ini tidak diperjualbelikan.

mengukur tegangan jatuh pada R_x secara langsung, oleh karena itu nilai tegangan jatuh sama dengan arus (I) yang mengalir dikalikan nilai resistansi UUT (R_x).

$$V_M = I \cdot R_x \quad \text{Persamaan 15}$$

Dengan demikian, nilai resistansi yang tertampil pada digital multimeter/ohmmeter adalah:

$$\begin{aligned} R_M &= \frac{V_M}{I} \\ &= R_x \\ R_M &= R_x \end{aligned} \quad \text{Persamaan 16}$$

Jadi nilai yang ditampilkan pada ohmmeter hanya akan nilai R_x saja.

D. METODE PENGUKURAN DAN KALIBRASI

Secara pengertian singkat, kalibrasi adalah suatu pengukuran dengan tujuan untuk menetapkan hubungan antara nilai besaran yang ditunjukkan oleh sistem ukur (UUT) dan nilai yang diukur oleh standar. Di dalam buku ini dijelaskan mengenai metode-metode pengukuran atau kalibrasi yang sering digunakan oleh lab-lab kalibrasi maupun industri untuk mendapatkan ketertelusurannya, yaitu metode langsung, metode tidak langsung, metode substitusi, dan metode jembatan.

1. Metode Pengukuran Langsung

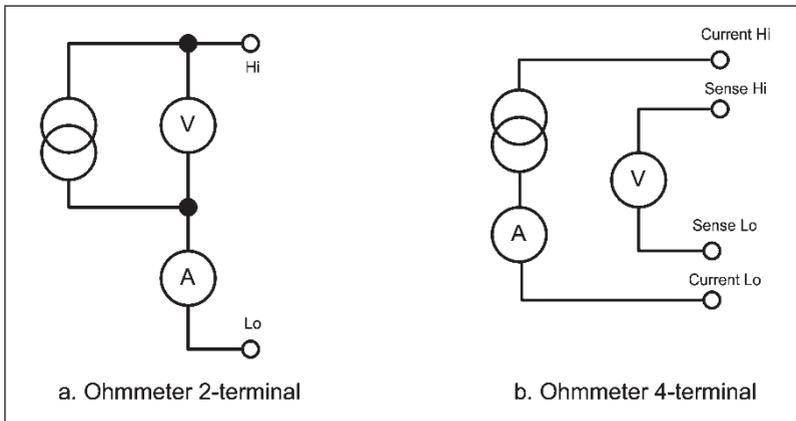
Metode ini mengukur langsung nilai resistansi dari suatu resistor menggunakan ohmmeter. Sistem pengukuran ini terdiri dari sebuah referen multimeter (atau lebih dikenal dengan sebutan digital multimeter dengan fungsi sebagai ohmmeter) dan sebuah resistor standar, serta digital thermometer (sebagai alat bantu pemantau suhu ruang).

a. Prinsip Kerja Ohmmeter

Prinsip kerja ohmmeter merupakan implementasi prinsip kerja *I-V method*. Prinsip kerja *I-V method* adalah menentukan nilai resistansi

sebuah resistor secara matematis dengan terukurnya tegangan jatuh pada resistor dan nilai arus yang mengalir melalui resistor tersebut. Gambar 26 membuat sketsa rangkaian sederhana dari komponen utama ohmmeter, yang mana gambar 26 (a) merincikan ohmmeter dengan penyetelan 2-terminal dan (b) merincikan dengan penyetelan 4-terminal. V merupakan sebuah voltmeter ideal yang membuat arus tidak mengalir melaluinya, dan A merupakan sebuah ammeter ideal yang memiliki tegangan jatuh yang sangat kecil (dapat diabaikan).

Dalam praktiknya, prinsip kerja ohmmeter terbagi menjadi dua jenis berdasarkan implementasi sinyal keluarannya, yaitu sinyal keluaran arus dan sinyal keluaran tegangan. Ohmmeter dengan sinyal keluaran arus memiliki fungsi menjaga arus yang keluar agar tetap konstan, sedangkan dengan sinyal keluaran tegangan memiliki fungsi menjaga tegangan yang dikeluarkan bernilai tetap. Biasanya penggunaan ohmmeter dengan sinyal keluaran arus digunakan pada ohmmeter yang memiliki rentang rendah, menengah, dan rentang tinggi terbatas hingga $1\text{ G}\Omega$, sedangkan ohmmeter dengan sinyal keluaran berupa tegangan digunakan pada ohmmeter pengukuran resistansi tinggi ($1\text{ M}\Omega$ ke atas) seperti teraohmmeter.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2020)

Gambar 26. Blok Diagram Sederhana Ohmmeter

Buku ini tidak diperjualbelikan.

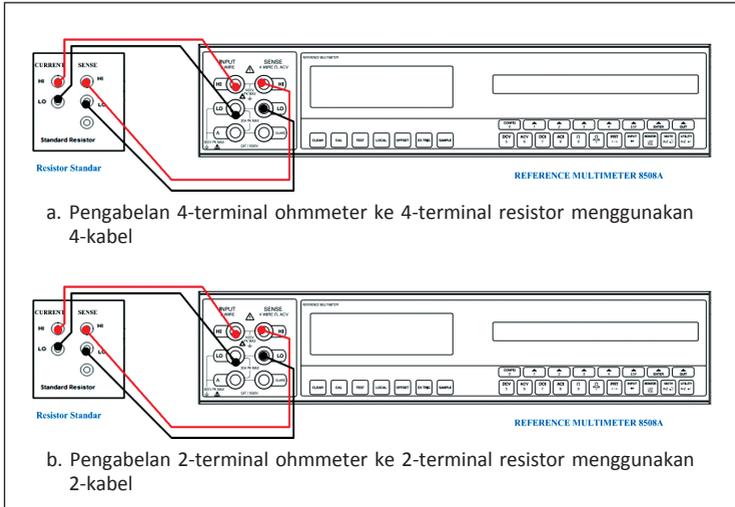
b. Prosedur pengukuran

Hal-hal yang perlu diketahui sebelum melakukan pengukuran adalah mengetahui spesifikasi peralatan yang digunakan. Pertama, kemampuan ohmmeter dalam memberikan sinyal arus/tegangan keluaran dan kemampuan maksimum resistor dalam menerima arus/tegangan maksimum. Hal tersebut dikarenakan sebagai tindakan pencegahan kerusakan pada resistor yang diakibatkan arus yang diberikan ohmmeter melebihi batas maksimum yang diperbolehkan resistor. Kedua, mengondisikan ohmmeter dan resistor dalam keadaan yang diperbolehkan berdasarkan spesifikasi teknis pabrikan maupun berdasarkan panduan mutu yang telah ditetapkan.

Setelah memastikan spesifikasi pada alat, langkah berikutnya melakukan pengukuran. Berikut adalah langkah-langkah pengukurannya:

- 1) Hidupkan ohmmeter dan diamkan untuk melakukan pemanasan (*warm-up*) selama periode waktu tertentu, biasanya 1–2 jam, untuk mendapatkan kehandalan yang optimum dari alat tersebut.
- 2) Atur rentang ohmmeter sesuai dengan nominal resistor yang ingin diukur, dengan tujuan agar dapat menghasilkan hasil ukur yang paling tepat. Selain itu, pengaturan rentang ohmmeter dilakukan juga untuk memastikan arus/tegangan yang diberikan ohmmeter masih di dalam batasan arus/tegangan yang diperbolehkan spesifikasi teknis resistor.
- 3) Atur konfigurasi ohmmeter, seperti resolusi, filter, dan 4- atau 2-terminal.
- 4) Lakukan proses pengenalan.
- 5) Hubungkan ohmmeter dengan resistor dengan kabel ukur, seperti yang ditunjukkan di Gambar 27.

Hal penting yang perlu diketahui adalah penghubungan (jumlah kabel/kawat) antara ohmmeter dan resistor bukan bergantung pada jumlah terminal dari ohmmeter dan resistor, melainkan bergantung pada tingkat keakuratan dan kepresisian yang ingin



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 27. Pengabelan Ohmmeter dan Resistor

dicapai. Selain itu, jumlah terminal keduanya tidak perlu sama. Misalnya, resistor 2-terminal dapat diukur dengan ohmmeter 4-terminal menggunakan 4-kabel (4-wire), dan sebaliknya.

- 6) Mencatat kondisi suhu dan kelembapan ruang
- 7) Lakukan pengukuran dan pencatatan nilai hasil pengukuran pada lembar kerja. Lakukan pengulangan sebanyak 5 kali pengukuran.

c. Kalibrasi

- 1) Kalibrasi Reference Multimeter (Digital Multimeter)

Resistor standar acuan dikoneksikan ke reference multimeter untuk diukur besar nilai dari resistor tersebut. Nilai yang terbaca oleh reference multimeter merupakan nilai pembacaan reference multimeter atas resistor standar acuan. Untuk mengetahui koreksi pengukuran nilai yang ditampilkan oleh reference multimeter, dilakukan perhitungan sebagai berikut pada persamaan 17:

$$C_{RM} = (R_S + \delta R_{SD} + \delta R_{ST}) - (R_M + \delta R_{MRes}) \quad \text{Persamaan 17}$$

- R_M : Nilai resistor yang terbaca di reference multimeter
- R_S : Nilai kalibrasi dari resistor standar
- δR_{Mres} : Koreksi dari resolusi reference multimeter
- δR_{SD} : Koreksi drift resistor standar yang diukur
- δR_{ST} : Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang diukur

Persamaan 17 merupakan persamaan koreksi antara nilai sebenarnya resistor standar acuan yang digunakan dengan pembacaan reference multimeter.

2) Kalibrasi Resistor Standar

Tujuan kalibrasi resistor standar adalah mencari tahu koreksi terhadap nilai nominal. Untuk mengetahui koreksinya dilakukan perhitungan sebagai berikut pada persamaan 18:

$$C_{RX} = (R_M + C_{RM} + \delta R_{MRes} + \delta R_{MD}) - (R_X + \delta R_{XT} + \delta R_{XRound})$$

Persamaan 18

- R_M : Nilai resistor yang terbaca di reference multimeter
- C_{RM} : Koreksi meter dari sertifikat kalibrasi
- δR_{MRes} : Koreksi dari resolusi reference multimeter
- δR_{MD} : Koreksi drift reference multimeter
- R_X : Nominal resistor standar yang diukur
- δR_{XT} : Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang diukur

Persamaan 18 merupakan persamaan koreksi antara nilai pembacaan nilai resistor standar menggunakan reference multimeter terkalibrasi dengan nominalnya.

2. Metode Tidak Langsung

Metode tidak langsung merupakan pengukuran resistor standar yang hampir sama dengan metode langsung, yaitu penerapan dari prinsip kerja *I-V method*. Namun, perbedaan dengan metode langsung

adalah metode tidak langsung menggunakan voltmeter dan ammeter terpisah. Dengan demikian penggunaan metode ini sangat dipengaruhi langsung oleh keakuratan dari voltmeter dan ammeter yang digunakan. Hasil kalibrasi menggunakan metode ini adalah koreksi resistor standar terhadap nominalnya. Untuk mengetahui koreksinya dilakukan perhitungan sebagai berikut pada persamaan 19:

$$C_{RX} = \frac{(V_M + C_{VM} + \delta V_{MRes} + \delta V_{MD})}{(I_M + C_{IM} + \delta I_{MRes} + \delta I_{MD})} - (R_X + \delta R_{XT}) \quad \text{Persamaan 19}$$

- V_M : Nilai tegangan yang terbaca di reference multimeter
- C_{VM} : Koreksi meter untuk tegangan dari sertifikat kalibrasi
- δV_{MRes} : Koreksi dari resolusi reference multimeter untuk tegangan
- δV_{MD} : Koreksi drift reference multimeter untuk tegangan
- I_M : Nilai arus yang terbaca di reference multimeter
- C_{IM} : Koreksi meter untuk arus dari sertifikat kalibrasi
- δI_{MRes} : Koreksi dari resolusi reference multimeter untuk arus
- δI_{MD} : Koreksi drift reference multimeter untuk arus
- R_X : Nominal resistor standar yang diukur
- δR_{XT} : Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang diukur

3. Metode Substitusi

Metode substitusi merupakan suatu pengukuran resistor standar (R_X) yang dilakukan dengan cara dibandingkan dengan pengukuran resistor standar acuan (yang telah dikalibrasi - R_S) menggunakan multimeter (sebagai alat bantu) dalam bentuk rasio, kemudian nilai resistor standar yang diukur dapat diketahui dengan menghitung rasio dikali dengan nilai sertifikat kalibrasi resistor standar R_S , yang secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C_{RX} = \frac{r \cdot (1 + \delta r_{res}) \cdot R_S (1 + \delta R_{ST}) (1 + \delta R_{SD})}{(1 + \delta R_{XT})} - R_X \quad \text{Persamaan 20}$$

dengan

$$r = \frac{R_{XM}}{R_{SM}}$$

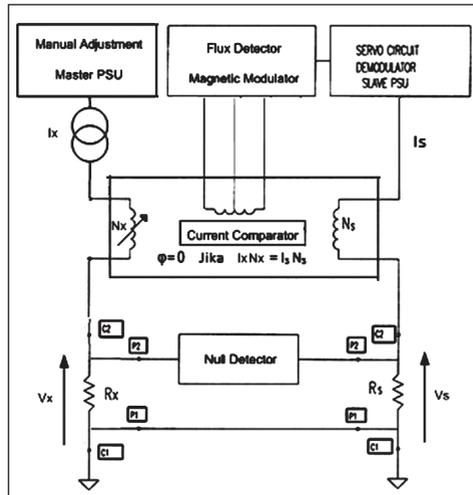
Persamaan 21

- r : Rasio dari nilai resistansi R_x yang terbaca di referen multimeter dengan nilai resistansi R_s yang terbaca di referen multimeter yang sama
- δr_{Res} : Koreksi dari resolusi rasio
- R_s : Nilai kalibrasi dari resistor standar acuan
- δR_{ST} : Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar acuan
- δR_{SD} : Koreksi *drift* resistor standar acuan
- R_x : Nominal resistor standar yang diukur
- δR_{XT} : Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang diukur

4. Metode Jembatan

Direct Current Comparator Bridge (DCCB) merupakan peralatan yang digunakan untuk mengukur suatu resistor yang belum diketahui nilainya dalam bentuk rasio atas resistor yang telah diketahui nilainya, atau yang biasa dikenal dengan metode jembatan. DCCB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28 terbangun atas trafo dengan modulator inti magnetik toroidal ganda, perisai magnetik yang mengelilingi inti modulator dan dengan beberapa belitan (*multiple winding*).

Beberapa belitan tersebut terdiri dari belitan primer, belitan sekunder dan belitan detektor. Lengan pertama yaitu belitan sekunder yang sejumlah N_s lilitan (*turns*), dan lengan kedua yaitu belitan primer yang sejumlah N_x lilitan (*turns*), membawa aliran arus untuk diperbandingkan. Pengukuran dilakukan pada keadaan ketika kedua lengan untuk *ampere-turns* bernilai sama dan saling berbeda polaritas, sehingga akan didapati resultan *flux* yang berharga nol pada inti trafo. Pada keadaan resultan *flux* sama dengan nol, maka arus I_x dan arus I_s mencapai kondisi:



Sumber: Guildline Instruments Limited (2002)

Gambar 28. Diagram Skematis dari DCCB

$$\frac{I_x}{I_s} = \frac{N_s}{N_x} \quad \text{Persamaan 22}$$

Resultan ini dapat dimonitor oleh *flux detector* melalui belitan detektor N_D .

Dalam pengukuran, arus I_x ditentukan melalui pengaturan sedemikian sehingga untuk mencapai resultan flux sama dengan nol (Randolph dkk., 2003), jumlah belitan primer yang sejumlah N_x lilitan akan menyesuaikan agar persamaan 22 tercapai. Pada keadaan ini syarat keseimbangan keduanya harus dipenuhi, dimana, arus I_x yang mengalir melalui belitan N_x dan R_x memiliki potensial yang sama dengan arus I_s yang mengalir melalui belitan N_s dan R_s , ($V_x = V_s$), sehingga R_x , R_s , I_x , dan I_s akan saling terkait. Secara matematis keseimbangan kedua dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$I_x \cdot R_x = I_s \cdot R_s \quad \text{Persamaan 23}$$

Berdasarkan persamaan 22 dan 23, maka hubungan R_x dan R_s dapat dinyatakan sebagai mana ditunjukkan pada persamaan 24 berikut:

$$\Gamma = \frac{N_x}{N_s} = \frac{R_x}{R_s} \quad \text{Persamaan 24}$$

Γ adalah rasio yang ditampilkan DCCB saat pengukuran.

E. STUDI KASUS RESISTANSI DAN ANALISIS KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN RESISTANSI

Pada subbab ini akan dijelaskan dengan beberapa contoh studi kasus.

1. Kalibrasi digital multimeter (ohmmeter) dengan metode langsung

Ketertelusuran ohmmeter dapat mengacu ke resistor standar yang memiliki ketelitian lebih tinggi, seperti fiks resistor, multifungsi kalibrator, dan dekade resistor.

Dalam studi kasus ini dilakukan kalibrasi ohmmeter 6,5 digit di titik 1 k Ω . Ohmmeter dikalibrasi dengan fix resistor standar 1 k Ω yang memiliki ketertelusuran ke SI di bulan Oktober 2018 dengan nilai kalibrasinya sebesar 1,0000404 k $\Omega \pm 0,0000024$ k Ω . Ohmmeter tersebut dikalibrasi di ruangan terkondisi dengan perubahan suhu di kisaran 2 $^\circ$ C. Resistor standar yang digunakan merupakan resistor Tinsley bertipe 5685.

a. Perhitungan koreksi ohmmeter

Koreksi ohmmeter dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 25 di atas, yaitu

$$C_{RM} = (R_s + \delta R_{SD} + \delta R_{ST}) - (R_M + \delta R_{MRes}) \quad \text{Persamaan 25}$$

Dengan setiap koreksi yang memengaruhi pengukuran diasumsikan bernilai 0, nilai sertifikat kalibrasi 1 k Ω sebesar 1,0000404 k $\Omega \pm 0,0000024$ k Ω , dan nilai rata-rata pembacaan ohmmeter sebesar

1,0000255 kΩ sehingga nilai koreksi ohmmeter hasil kalibrasi tersebut sebesar: $C_{RM} = 1.0000404 - 1.0000255 = 0.0000149k\Omega$

1) Evaluasi ketidakpastian

Analisis data pengukuran merupakan komponen-komponen ketidakpastian individu yang perlu diperhitungkan terdiri dari:

- Kesalahan acak/ESDM

Ketelitian dari hasil pengukuran akan didapatkan dengan mengevaluasi data pengukuran berdasarkan *Experimental of standard deviation of Measurement* (ESDM) sebesar:

$$ESDM = \frac{\text{Standar Deviasi (SD)}}{\sqrt{\text{jumlah pengukuran}}} \quad \text{Persamaan 26}$$

dengan SD adalah standar deviasi dan n adalah jumlah pengukuran yang dilakukan. Di sisi lain nilai standar deviasi (SD) dapat dihitung menggunakan persamaan 3 berikut

Tabel 7 Contoh Hasil Pengukuran pada ohmmeter kemampuan $6\frac{1}{2}$ digit

No	Hasil pengukuran (kΩ)
1	1,000025
2	1,000026
3	1,000026
4	1,000025
5	1,000026
6	1,000026
7	1,000025
8	1,000025
9	1,000025
10	1,000026

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_1^n (R_x - \bar{R}_x)^2}{n-1}}$$

Persamaan 27

Nilai SD dan ESDM dapat dihitung menggunakan data pengukuran pada tabel 8. Dengan tahapan pertama sebelum menghitung SD dan ESDM adalah dengan menentukan nilai rata-rata dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 8 pada persamaan 24.

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r}{n} = 1,000026 \text{ k}\Omega$$

Persamaan 28

Setelah menghitung rata-rata didapatkan nilai SD dan ESDM dengan menggunakan persamaan 22 dan persamaan 23. SD sama dengan 0,00000053kΩ, dan nilai ESDM adalah 0,00000017 kΩ. Nilai ketidakpastian tipe A ini atau ESDM dilambangkan dengan $u_1=0,00000017 \text{ k}\Omega$

- Resolusi

Ketidakpastian dari resolusi pembacaan didapat dari perubahan digit pada hasil pengukuran: 0,000001, dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian resolusi pembacaan alat yang digunakan adalah:

$$0,000001 \times 0,5 = 0,0000005$$

$$u_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{5,0 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 0,00000029 \text{ k}\Omega$$

Persamaan 29

- Nilai ketidakpastian standar acuan Resistor standar; dari sertifikat kalibrasi:

$$1,0000404 \text{ k}\Omega \pm 0,0000024 \text{ k}\Omega$$

dengan asumsi distribusi normal maka ketidakpastian resistor standar yang digunakan adalah:

$$u_3 = \frac{u_3}{2} = \frac{2,4 \times 10^{-6}}{2} = 0,0000012 \text{ k}\Omega \quad \text{Persamaan 30}$$

- Perubahan Suhu

Standar Resistor; dari spesifikasi diketahui temperatur koefisien-nya adalah: $\alpha = -0,069 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ dengan perubahan suhu selama pengukuran $^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} u_4 &= \alpha \cdot \Delta T = (-0,69 \times 1 \times 10^{-6}) \times 2 \\ &= -1,36 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad \text{Persamaan 31}$$

dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian akibat perubahan suhu standar adalah:

$$u_4 = \frac{U_4}{\sqrt{3}} = \frac{1,36 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 7,85 \cdot 10^{-8} \text{ k}\Omega \quad \text{Persamaan 32}$$

- Pengaruh perubahan waktu (drift)

Standar resistor ternyata mengalami perubahan nilai setiap waktunya; dari spesifikasi diketahui perubahan terhadap waktu pertahun, maka dalam kurun waktu ± 1 tahun akan berpengaruh sekitar

$$\begin{aligned} u_5 &= c_{drift} \cdot \Delta \text{time} = (6 \times 1 \times 10^{-6}) \times 1 \\ &= 6,0 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad \text{Persamaan 33}$$

Dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian akibat perbedaan waktu saat resistor dikalibrasi dan saat digunakan menjadi acuan adalah

$$u_5 = \frac{U_5}{\sqrt{3}} = \frac{6,0 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 3,5 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega \quad \text{Persamaan 34}$$

b. Laporan Pengukuran

Proses terakhir dari sebuah proses diseminasi resistor standar acuan ke ohmmeter adalah dengan membuat sebuah laporan pengukuran. Berdasarkan ISO GUM hasil ukur harus dicantumkan dalam sebuah

laporan kalibrasi yaitu nilai rata-rata, nilai ketidakpastian pengukuran yang merupakan gabungan dari nilai ketidakpastian pengukuran Tipe A dan Tipe B, nilai tingkat kepercayaan yang ditentukan oleh penetapan jenis distribusi dari suatu hasil pengukuran yang membentuk luas area sebaran data yang masing-masing memiliki batasan tertentu, kemudian yang terakhir adalah harus terdapat nilai faktor cakupan merupakan faktor numerik yang digunakan sebagai pengali ketidakpastian gabungan.

Di sisi lain, berdasarkan persyaratan ISO 17025 pada klausul 7.8.2.1, dalam sebuah laporan pengukuran harus terdapat beberapa informasi, kecuali laboratorium punya alasan tersendiri untuk tidak menampilkan dikarenakan untuk meminimalkan kemungkinan dari kesalahpahaman. Beberapa informasi yang harus ada dalam sebuah laporan adalah judul (laporan kalibrasi, laporan pengujian atau laporan *sampling*), nama dan alamat laboratorium, lokasi aktivitas proses diseminasi dilakukan, identifikasi yang unik, metode yang digunakan, tanggal pengukuran dan tanggal terbitnya laporan (Badan Standardisasi Nasional, 2018). Penulisan tabel sumber ketidakpastian dan setelah melakukan perhitungan ketidakpastian (ketidakpastian terentang) dan kemudian membuat laporan ketidakpastian.

Tabel bujet ketidakpastian untuk diseminasi ketelitian resistor standar acuan ke Ohmmeter berdasarkan pengukuran langsung ditunjukkan pada Tabel 8.

3. Kalibrasi parameter resistansi *multifunction calibrator* dengan menggunakan resistor standar

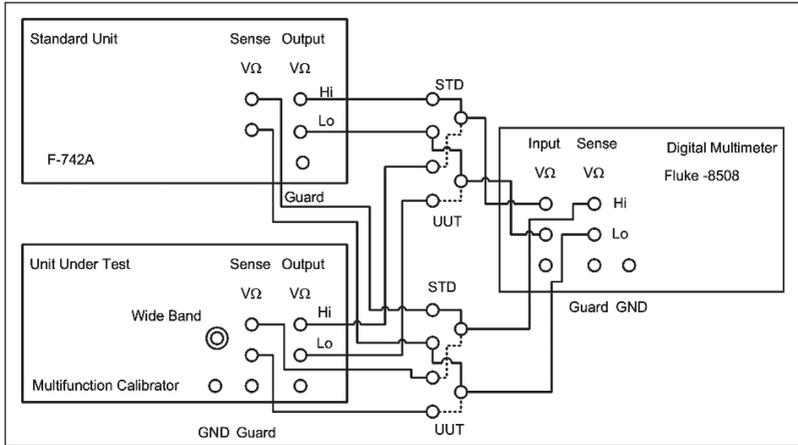
Dalam studi kasus ini, dilakukan kalibrasi resistansi multifunction calibrator di titik 1 k Ω . *Multifunction calibrator* (UUC) dikalibrasi dengan fix resistor standar (STD) 1 k Ω yang memiliki ketertelusaran ke SI di bulan oktober 2018 dengan nilai kalibrasinya sebesar 1,0000404 k $\Omega \pm 0,0000024$ k Ω . Proses kalibrasi dilakukan di ruangan terkondisi dengan perubahan suhu di kisaran 2°C.

Tabel 8. Contoh bujiet ketidakpastian pengukuran ukuran

Type	Unit/ Satuan	Distribusi	Simbol	Ketidak- pastian/ U	Cov. Factor/ Pembagi	Derajat ke- bebasan/ vi	Std. Un- cert/ ui	Sens. Coeff/ ci	$(c_{i,u})^2$	$(c_{i,u})/v_i$
Repeatability	A kohm	Normal	$u_1(X)$	5,3,E-07	3,16	9E+00	1,67,E-07	1	2,8E-14	8,6E-29
Serifikat Standar	B kohm	Normal	$u_2(X)$	2,4,E-06	2	1E+99	1,20,E-06	1	1,4E-12	2,1E-123
Resolusi	B kohm	Rect (Segi-4)	$u_3(X)$	5,0,E-07	1,73	1E+99	2,89,E-07	1	8,3E-14	6,9E-126
Perubahan Suhu	B kohm	Rect (Segi-4)	$u_4(X)$	-1,4,E-07	1,73	1E+99	-7,85,E-08	1	6,2E-15	3,8E-128
Drift	B kohm	Rect (Segi-4)	$u_3(X)$	6,0,E-06	1,73	1E+99	3,46,E-06	1	1,2E-11	1,4E-121
Jumlah									1,4E-11	8,6E-29
Ketidakpastian gabungan , uc									3,68E-06	
Derajat Kebebasan Efektif, veff									2143840	
Pembagi untuk 95% CL									1,96	
Ketidakpastian terentang , U95									0,0000072 kohm	

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Gambar 29. Skema pengukuran metode substitusi

Tabel 9. Contoh Hasil Pengukuran Menggunakan Metode Substitusi

Hasil pembacaan oleh Ohmmeter (kΩ)					
Resistor Standar (STD)	1.0000336	1.0000337	1.0000335	1.0000333	1.0000332
Multifunction Calibrator (UUC)	1.0000094	1.0000093	1.0000096	1.0000092	1.0000091

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Resistor standar yang digunakan merupakan resistor fluke bertipe 742A ohmmeter yang digunakan merupakan reference multimeter Fluke 8508. Seperti yang telah dijelaskan di subbab sebelumnya, berikut merupakan skema pengukuran metode substitusi.

a. Perhitungan koreksi UUC

Koreksi UUC dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 35 berikut ini, yaitu

$$C_{RX} = \frac{r \cdot (1 + \delta r_{res}) \cdot R_S (1 + \delta R_{ST}) (1 + \delta R_{SD})}{(1 + \delta R_{XT})} - R_X \quad \text{Persamaan 35}$$

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dan

$$r = \frac{R_{XM}}{R_{SM}} \quad \text{Persamaan 36}$$

Dengan setiap koreksi yang memengaruhi pengukuran diasumsikan bernilai 0, nilai sertifikat kalibrasi 1 kΩ sebesar 1,0000404 kΩ ± 0,0000024 kΩ, dan nilai rata-rata rasio sebagai berikut.

Sehingga nilai koreksi resistansi *multifunction calibrator* tersebut sebesar 0,000016 kΩ.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Rasio

rasio 1	rasio 2	rasio 3	rasio 4	rasio 5	rata-rata
0.999976	0.999976	0.999976	0.999976	0.999976	0.999976

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

b. Evaluasi ketidakpastian

Analisis data pengukuran merupakan komponen-komponen ketidakpastian individu yang perlu diperhitungkan terdiri dari:

1) Kesalahan acak/ESDM

Ketelitian dari hasil pengukuran akan didapatkan dengan mengevaluasi data pengukuran berdasarkan *Experimental of standard deviation of Measurement* (ESDM) sebesar:

$$ESDM = \frac{\text{StandarDeviasi (SD)}}{\sqrt{\text{jumlah pengukuran (n)}}} \quad \text{Persamaan 37}$$

Dengan SD adalah standar deviasi dan n adalah jumlah pengukuran yang dilakukan. Di sisi lain, nilai Standar Deviasi (SD) dapat dihitung menggunakan persamaan 38 berikut.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_1^n (R_x - \bar{R}_x)^2}{n-1}} \quad \text{Persamaan 38}$$

Nilai SD dan ESDM dapat dihitung menggunakan data pengukuran pada Tabel 1. dengan tahapan pertama sebelum menghitung SD dan ESDM adalah dengan menentukan nilai rata-rata dari hasil perhitungan rasio yang ditunjukkan pada Tabel 11 pada persamaan 39.

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r}{n} = 0,999976 \quad \text{Persamaan 39}$$

Setelah menghitung rata-rata didapatkan nilai SD dan ESDM dengan menggunakan persamaan 37 dan persamaan 38. SD sama dengan $0,0000002 \Omega/\Omega$, sehingga diperoleh nilai u_1 adalah $8,1e-8 \Omega/\Omega$. Dan koefisien sensitivitas c_1 diperoleh dari turunan pertama persamaan 39 terhadap rasio r , yaitu sebesar $1,0000404 \text{ k}\Omega$.

2) Resolusi

Ketidakpastian dari resolusi pembacaan didapat dari perubahan digit pada hasil pengukuran: $0,000001$, dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian resolusi pembacaan alat yang digunakan adalah:

$$0,000001 \times 0,5 = 0,0000005$$

$$u_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{5,0 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 0,00000029 \Omega / \Omega \quad \text{Persamaan 40}$$

Dan koefisien sensitivitas c_2 diperoleh dari turunan pertama persamaan 40 terhadap rasio δr_{Res} , yaitu sebesar $1,00001626 \text{ k}\Omega$.

3) Nilai ketidakpastian standar acuan

Resistor standar; dari sertifikat kalibrasi:

$$1,0000404 \text{ k}\Omega \pm 0,0000024 \text{ k}\Omega$$

dengan asumsi distribusi normal maka ketidakpastian resistor standar yang digunakan adalah:

$$u_3 = \frac{U_3}{2} = \frac{2,4 \times 10^{-6}}{2} = 0,0000012 \text{ k}\Omega$$

Persamaan 41

dan koefisien sensitifitas c_3 diperoleh dari turunan pertama persamaan 41 terhadap rasio R_s , yaitu sebesar $0,999976 \Omega/\Omega$.

4) Perubahan suhu

Standar Resistor; dari spesifikasi diketahui temperatur koefisien-nya adalah: $\alpha = -0,069 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Dengan perubahan suhu selama pengukuran 2°C .

$$u_4 = \alpha \cdot \Delta t = (-0,069 \times 10^{-6}) \times 2 \\ = -1,38 \times 10^{-7} \Omega / \Omega$$

Persamaan 42

dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian akibat perubahan suhu standar adalah:

$$u_4 = \frac{U_4}{\sqrt{3}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 7,85 \cdot 10^{-8} \Omega / \Omega$$

Persamaan 43

Dan koefisien sensitivitas c_4 diperoleh dari turunan pertama persamaan 42 terhadap rasio δR_{ST} , yaitu sebesar $1,00001626 \text{ k}\Omega$.

5) Pengaruh perubahan waktu (drift)

Standar Resistor ternyata mengalami perubahan nilai setiap waktunya. Dari spesifikasi diketahui perubahan terhadap waktu pertahun, maka dalam kurun waktu ± 1 tahun akan berpengaruh sekitar

$$U_5 = c_{drift} \cdot \Delta time = (6 \times 10^{-6}) \times 1 = 6,0 \times 10^{-6} \Omega / \Omega$$

Persamaan 44

dengan asumsi distribusi segi-4, maka ketidakpastian akibat perbedaan waktu saat resistor dikalibrasi dan saat digunakan menjadi acuan adalah

$$u_5 = \frac{U_5}{\sqrt{3}} = \frac{6,0 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 3,5 \times 10^{-6} \Omega / \Omega$$

Persamaan 45

dan koefisien sensitivitas c_5 diperoleh dari turunan pertama persamaan 44 terhadap rasio δR_{SD} , yaitu sebesar 1,00001626 k Ω .

6) Pengaruh perubahan suhu

Pada UUT yang berupa multifungsi kalibrator tidak perlu diberikan jika saat melakukan pengukuran suhu ruangan dikondisikan pada rentang 19 °C – 24 °C. Dengan demikian sumber ketidakpastian dari pengaruh perubahan suhu pada UUT adalah nol.

c. Perhitungan ketidakpastian bentangan

1) Menentukan ketidakpastian gabungan U

Ketidakpastian gabungan dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$u_c(C_X) = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (c_i \cdot u_i)^2} \quad \text{Persamaan 46}$$

2) Menentukan nilai faktor cakupan atau nilai k dapat dilakukan dengan menggunakan tabel $t = f(v, \gamma)$ yang diturunkan atas dasar penguraian fungsi distribusi t-Student: n merupakan derajat kebebasan efektif dengan menggunakan persamaan empiris untuk tingkat kepercayaan (γ)=95%.

$$t = 1,95996 + \frac{2,37356}{v} + \frac{2,918745}{v^2} + \frac{2,54662}{v^3} + \dots \quad \text{Persamaan 47}$$

atau menggunakan fungsi internal program aplikasi spreadsheet (excel)

$$t = \text{TINV} (P, v)$$

$$P = 1 - \gamma$$

d. Penulisan tabel sumber ketidakpastian

Setelah melakukan perhitungan ketidakpastian (ketidakpastian terentang), kemudian membuat laporan ketidakpastian. Tabel bujet ketidakpastian untuk Diseminasi ketelitian resistor standar acuan ke Ohmmeter berdasarkan pengukuran langsung ditunjukkan pada

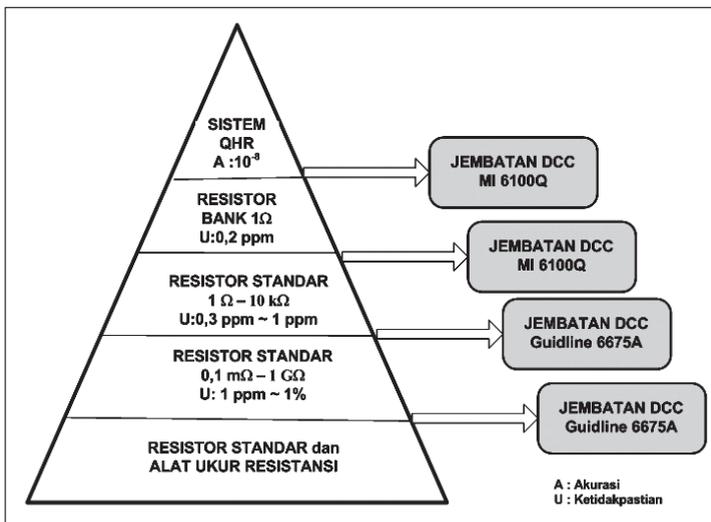
Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 11. Dari Tabel tersebut diperoleh nilai ketidakpastian dari contoh kalibrasi $1 \text{ k}\Omega$ adalah sebesar $0,0000007 \text{ 2 k}\Omega$.

F. KETERTELUSURAN RESISTANSI

Gambaran umum terkait ketertelusuran resistansi dari standar primer/ tertinggi sampai dengan sampai dengan standar kerja yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 30 bagan ketertelusuran berikut ini.

Dari bagan ketertelusuran standar tertinggi/primer adalah sistem QHR dengan nominal $12,9 \text{ K}\Omega$ dapat didiseminasikan ke resistor standar 1Ω yang akan dijadikan resistor bank dengan jumlah 7 buah menggunakan jembatan DCC. Kemudian dengan menggunakan jembatan DCC kita dapat mendiseminasikan resistor bank ke resistor standar dengan rentang nominal $1 \text{ m}\Omega$ – $1 \text{ G}\Omega$ dengan menggunakan alat ukur berupa jembatan DCC, sedangkan untuk rentang yang tinggi resistor standar dapat didiseminasikan menggunakan alat ukur berupa meter yang dikenal dengan nama teraohmmeter. Dari resistor standar kita dapat mendiseminasikan ke resistor standar dengan akurasi kasar dan ke alat ukur resistansi.



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2008)

Gambar 30. Ketertelusuran Pengukuran Resistansi

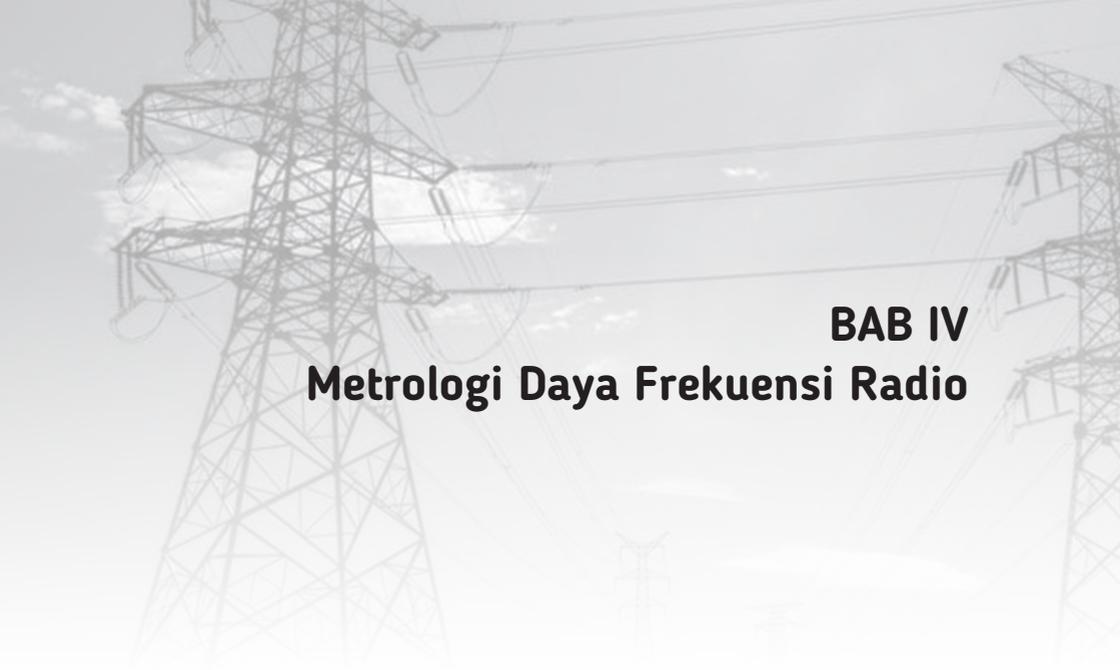
Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 11. Bujet ketidakpastian untuk pengukuran ohmmeter

	Type	Unit/ Satuan	Distribusi	Simbol	Ketidakpastian/U	Cov. Factor/ Pembagi	Derajat Ke- bebasan/ vi	Std. Uncert/ ui	Sens. Coeff/ci	$c_i \cdot u_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$	$(c_i \cdot u_i) / v_i$
Pengula- ngan data	A	k Ω	Normal	$u_1(X)$	8,1E-08	2,2	9,00E+00	3,6E-08	1,0000404	3,63E-08	1,32E-15	1,94E-31
Resolusi	B	k Ω	Rect (Segi-4)	$u_2(X)$	5,0E-07	1,73	1,00E+99	2,9E-07	1,0000163	2,89E-07	8,33E-14	6,94E-126
Serifikat Standar	B	k Ω	Normal	$u_3(X)$	2,40E-06	2,00	1,00E+99	1,2E-06	0,999976	1,20E-06	1,44E-12	2,07E-123
Perubahan Suhu STD	B	k Ω	Rect (Segi-4)	$u_4(X)$	1,38E-07	1,73	1,00E+99	8,0E-08	1,0000163	7,97E-08	6,35E-15	4,03E-128
Drift STD	B	k Ω	Rect (Segi-4)	$u_5(X)$	6,00E-06	1,73	1,00E+99	3,5E-06	1,0000163	3,46E-06	1,20E-11	1,44E-121
Perubahan Suhu UUC	B	k Ω	Rect (Segi-4)	$u_5(X)$	0	1,73	1,00E+99	0,0E+00	1,0000163	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
									Jumlah		1,35E-11	1,94E-31
									Ketidakpastian gabungan , uc		3,68E-06	
									Derajat Kebebasan Efektif, veff		9,46E+08	
									Pembagi untuk 95% CL		1,96	
									Ketidakpastian teren- tang, U95		0,00000072 k Ω	

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2016)

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB IV

Metrologi Daya Frekuensi Radio

A. KARAKTERISTIK DAYA FREKUENSI RADIO

Daya frekuensi radio atau biasa disebut juga sebagai *radio frequency* (RF) *power* merupakan parameter yang sangat penting dalam mendesain suatu sistem dan peralatan elektronik yang bekerja pada frekuensi radio. Frekuensi radio berada dalam rentang 3 kHz sampai dengan 300 GHz (Fantom, 1990). Performansi peralatan elektronik dapat diuji salah satunya dengan pengukuran keluaran daya alat tersebut. Dalam dunia telekomunikasi dan penerbangan yang beroperasi pada frekuensi radio, kualitas sinyal bergantung pada daya dari sinyal tersebut. Daya sinyal yang terlalu kecil menyebabkan kualitas sinyal menjadi buruk. Hal ini dikarenakan sinyal dipengaruhi oleh *noise* (Agilent Technologies, 2005). Daya yang terlalu besar mengakibatkan performansi yang tidak linier dan terjadi distorsi, bahkan dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan yang digunakan. *Level* daya yang terlalu tinggi juga menyebabkan pembuangan energi yang berlebihan serta menambah biaya operasional. Oleh sebab itu, untuk mengetahui nilai daya frekuensi radio yang sebenarnya diperlukan sistem pengukuran yang akurat.

B. PENGUKURAN DAYA FREKUENSI RADIO

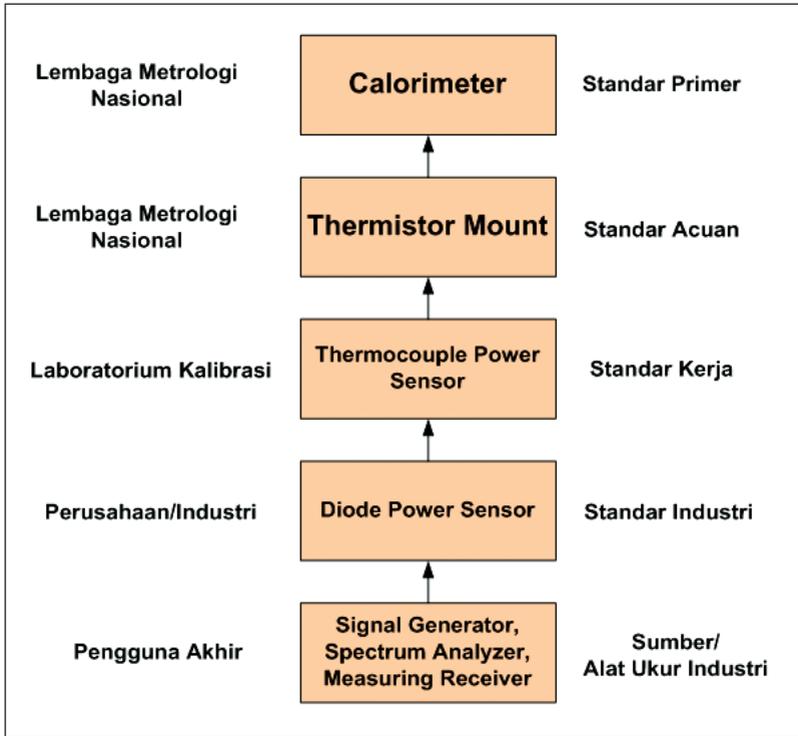
Standar acuan, instrumen alat bantu, dan metode pengukuran merupakan aspek yang harus dipertimbangkan dalam pengukuran daya frekuensi radio. Standar acuan yang digunakan harus tertelusur ke Sistem Satuan Internasional (SI) melalui standar primer daya frekuensi radio. Instrumen alat bantu dan metode pengukuran yang akurat, tertelusur, dan dapat digunakan secara berkelanjutan.

Standar primer atau standar tertinggi untuk pengukuran daya frekuensi radio adalah *calorimeter*. Gambar 31 menunjukkan rantai ketertelusuran pengukuran daya frekuensi radio. *Calorimeter* merupakan jenis perangkat pengukur perubahan panas (*heat measuring instrument*). *Calorimeter* disebut juga sebagai *thermal device* yang mengukur perubahan suhu akibat adanya rangsangan dari suatu sumber panas atau sumber sinyal. Secara umum terdapat 3 jenis *calorimeter*, yaitu *microcalorimeter*, *dry load calorimeter* dan *flow calorimeter* (Fantom, 1990). *Microcalorimeter* merupakan jenis standar primer yang banyak digunakan oleh Lembaga Metrologi Nasional atau *National Metrology Institute* (NMI).

RF *power sensor* merupakan salah satu peralatan utama yang digunakan dalam pengukuran daya frekuensi radio. Pada dasarnya, alat ini merupakan sebuah komponen detektor untuk daya pada frekuensi tinggi. Fungsi dari RF *power sensor* adalah untuk mendeteksi adanya daya frekuensi radio. RF *power sensor* mengonversi daya frekuensi radio ke sinyal DC atau sinyal frekuensi rendah (*lower frequency*) sehingga dapat diukur oleh RF *power meter*. Pada umumnya RF *power sensor* terdiri dari 3 jenis, yaitu *thermistor mount*, *thermocouple power sensor*, dan *diode power sensor* (Introduction, 2008). Setiap jenis memiliki keunggulan dan kelemahannya masing-masing.

C. PRINSIP DASAR PENGUKURAN DAYA FREKUENSI RADIO

Pada dasarnya daya frekuensi radio dapat diukur dengan menggunakan kombinasi RF *power sensor* dan RF *power meter*. Teknik dasar pengukuran daya frekuensi radio dapat dilihat pada Gambar 32. Daya



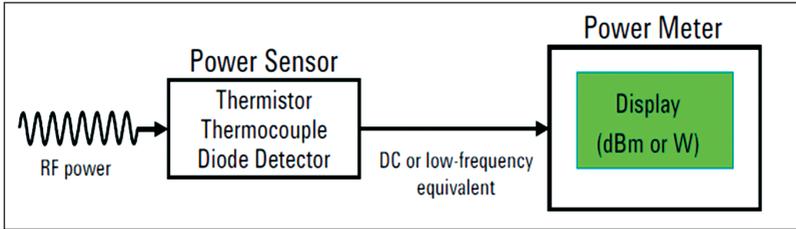
Sumber: Hasil Olahan Penulis (2017)

Gambar 31. Rantai Ketertelusuran Pengukuran Daya Frekuensi Radio

frekuensi radio atau RF *power* dari sumber sinyal dideteksi oleh RF *power sensor* dan diukur oleh RF *power meter* dalam satuan watt atau dBm.

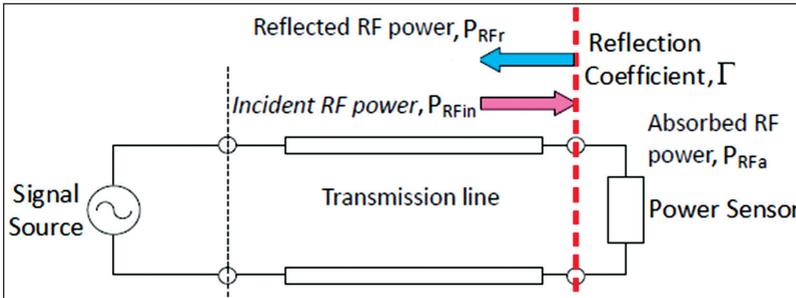
Gambar 33 menunjukkan perjalanan transmisi daya frekuensi radio dari sumber sinyal (*signal source*) ke RF *power sensor*, tidak semua daya yang dikirimkan dapat diserap oleh RF *power sensor*. Hal tersebut dikarenakan adanya mismatch impedance pada hubungan konektor RF *power sensor* dengan saluran transmisi dan konektor sumber sinyal dengan saluran transmisi sehingga menyebabkan adanya daya yang dipantulkan, dan dinyatakan dalam koefisien refleksi. Persamaan 48

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Agilent Technologies (2005)

Gambar 32. Teknik Dasar Pengukuran Daya Frekuensi Radio



Sumber: Shimaoka (2012)

Gambar 33. Transmisi daya frekuensi radio dari sumber sinyal ke power sensor.

menunjukkan hubungan antara *incident RF power*, *absorbed RF power* dan *reflected RF power* (Collier & Skinner, 2007)(Shimaoka, 2012).

$$P_{RFin} = P_{RFa} + P_{RFr} \quad \text{Persamaan 48}$$

Di mana:

P_{RFin} = RF *power* yang dikirimkan ke *power sensor* (*incident RF power*),

P_{RFa} = RF *power* yang diserap oleh *power sensor* (*absorbed RF power*),

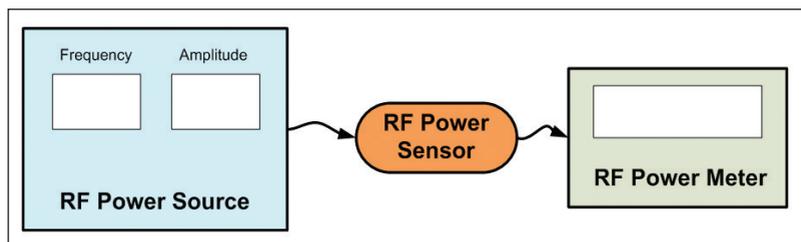
P_{RFr} = RF *power* yang dipantulkan oleh *power sensor* (*reflected RF power*).

Daya frekuensi radio atau RF *power* merupakan nilai *power* yang dihasilkan oleh suatu sumber sinyal RF (*RF source*) atau nilai *power* yang terukur oleh alat ukur (*meter*). Pengukuran daya frekuensi radio dilakukan pada sumber dan alat ukur RF, seperti *signal generator*, *transmitter*, *oscillator*, *spectrum analyzer*, RF *power meter* dan lain-lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diagram blok sistem pengukuran daya frekuensi radio ditunjukkan pada Gambar 34. Pengukuran daya frekuensi radio menggunakan metode *direct measurement*. Pengukuran daya frekuensi radio bertujuan untuk menentukan nilai keluran daya absolut dari sebuah sumber sinyal. Nilai daya sebenarnya belum diketahui sehingga diperlukan pengukuran untuk menentukan nilai sebenarnya. RF *power meter* digunakan sebagai standar dalam mengukur daya pada sumber sinyal (Perangin-angin, 2018). RF *power meter* tersebut telah dikalibrasi terlebih dahulu ke standar yang lebih tinggi untuk memperoleh ketertelusuran pengukuran. Keluaran sumber sinyal dideteksi oleh RF *power sensor* dan diukur oleh RF *power meter*. Pada umumnya sumber sinyal merupakan satu alat saja, seperti *signal generator* atau *oscillator*. Dalam beberapa sistem, sumber sinyal dapat berupa gabungan beberapa alat, seperti pada sistem *transmitter*. Sumber sinyal terdiri dari kombinasi *signal generator*, *transmission line*, *amplifier*, *directional coupler*, dan lain-lain. Gabungan alat-alat tersebut disebut sebagai sumber sinyal.

Pada pengukuran daya untuk RF *power meter*, sumber sinyal RF seperti *signal generator* dijadikan sebagai standar. RF *power meter* dapat juga berupa *measuring receiver* dan *spectrum analyzer*. Sumber sinyal tersebut harus sudah dikalibrasi ke standar yang lebih tinggi. RF *power sensor* mendeteksi keluaran nominal daya dari sumber sinyal dan diukur oleh RF *power meter*, sehingga dapat diketahui koreksi pembacaannya dengan menggunakan persamaan 49. Koreksi adalah nilai yang ditambahkan pada penunjukan alat, untuk mendapatkan



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2017)

Gambar 34. Blok Diagram Pengukuran Daya Frekuensi Radio

Buku ini tidak diperjualbelikan.

nilai besaran yang sesungguhnya (Introduction, 2008). Secara matematis, koreksi merupakan hasil pengurangan nilai standar dan alat yang dikalibrasi atau *unit under calibration* (UUC). Dalam hal ini, koreksi merupakan hasil pengurangan nominal sumber sinyal RF dengan penunjukan RF *power meter*. Ketika RF *power meter* digunakan sebagai alat ukur maka setiap hasil pengukurannya harus dikoreksi sebesar nilai koreksi pada sertifikat kalibrasinya.

$$C = S - T$$

Persamaan 49

C = koreksi terhadap penyimpangan alat,

S = nilai standar,

T = penunjukan alat.

D. STUDI KASUS ANALISIS KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN DAYA FREKUENSI RADIO

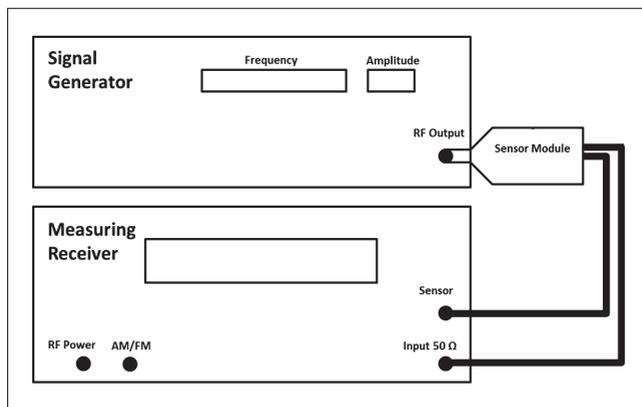
Pada pengukuran daya frekuensi radio, peralatan yang digunakan dapat diklasifikasikan menjadi sumber (*source*) dan alat ukur (*meter*). Sumber daya frekuensi radio antara lain adalah *signal generator*, *oscillator* dan RF *source* lainnya, sedangkan alat ukurnya antara lain adalah RF *power meter*, *measuring receiver*, dan *spectrum analyzer*. Pada studi kasus ini dibahas pengukuran daya frekuensi radio pada *signal generator* menggunakan *measuring receiver* yang telah tertelusur ke standar primer.

Signal generator merupakan peralatan yang menghasilkan sinyal elektrik dalam bentuk gelombang. Pengukuran daya pada *signal generator* sesuai dengan rentang spesifikasi level *power* (amplitudo) dan frekuensi. Misalnya spesifikasi amplitudo -20 dBm sampai dengan 15 dBm, dan pada frekuensi 10 MHz sampai dengan 18 GHz. Kalibrasi atau pengukuran *signal generator* bertujuan untuk menentukan koreksi nilai nominal daya pada *signal generator* tersebut. Kegiatan dilakukan dengan membandingkan nilai nominal daya *signal generator* dengan hasil pengukuran standar *measuring receiver*.

Peralatan yang diperlukan dalam pengukuran daya frekuensi radio dalam studi kasus ini terdiri dari *signal generator* yang merupakan alat yang dikalibrasi (UUC), *measuring receiver* sebagai standar, serta beberapa alat bantu, seperti *thermo hygrometer* untuk mengukur suhu dan kelembapan, kabel tipe-N, kabel BNC, adaptor tipe N ke BNC. Metode pengukuran menggunakan *direct measurement*. Keluaran daya dari *signal generator* diukur secara langsung menggunakan *measuring receiver*. Kondisi ruangan diatur dalam suhu $23 \pm 2^\circ\text{C}$ dan kelembapan $<70\%$. Sebelum pengukuran maka dilakukan *warming up* pada alat terlebih dahulu selama 2 jam untuk mendapatkan hasil yang optimal. Gambar 35 menunjukkan diagram blok pengukuran daya frekuensi radio pada *signal generator*. Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali pada setiap titik ukur daya.

Tabel 12 menunjukkan contoh hasil pengukuran daya *signal generator* pada 9 titik pengukuran. Masing-masing titik diambil 10 data. Setelah pengukuran selesai maka dilakukan analisis data dan perhitungan ketidakpastian pengukuran.

Pada analisis data dilakukan perhitungan nilai rata-rata hasil pengukuran dan koreksi terhadap daya *signal generator*. Nilai rata-



Sumber: Hasil Olahan Penulis (2017)

Gambar 35. Pengukuran Daya Frekuensi Radio Signal Generator

Tabel 12. Hasil Pengukuran Daya Frekuensi Radio Signal Generator

Nominal Alat		Penunjukan Standar (dBm)									
Daya	Frekuensi										
-10 dBm	10 MHz	-10,01	-10,00	-10,01	-9,99	-10,00	-10,01	-10,00	-9,99	-10,01	-10,01
-10 dBm	50 MHz	-10,01	-10,00	-10,01	-10,02	-10,01	-10,01	-10,00	-10,01	-10,01	-10,01
-10 dBm	100 MHz	-10,01	-10,01	-10,02	-10,01	-10,02	-10,02	-10,01	-10,02	-10,01	-10,01
0 dBm	10 MHz	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0 dBm	50 MHz	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,01
0 dBm	100 MHz	-0,01	0,01	0,02	-0,01	0,00	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,01
10 dBm	10 MHz	10,02	10,01	10,01	10,01	10,02	10,01	10,02	10,02	10,01	10,02
10 dBm	50 MHz	10,00	10,01	10,01	10,02	10,02	10,01	10,00	10,01	10,02	10,01
10 dBm	100 MHz	9,99	10,00	10,01	10,01	10,00	9,99	9,99	10,00	10,01	10,01

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2018)

rata penunjukan standar *measuring receiver* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 50.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{10}}{10} \quad \text{Persamaan 50}$$

di mana:

\bar{x} = rata-rata daya

x_i = level daya ke i

n = jumlah data pada satu titik ukur

Koreksi nilai daya frekuensi radio *signal generator* dapat dikalkulasi menggunakan persamaan 51. Koreksi merupakan nilai yang ditambahkan pada alat, untuk mendapatkan nilai besaran yang sebenarnya. Nilai koreksi dapat diperoleh dengan mengurangi nilai standar dengan nilai alat yang dikalibrasi. Koreksi pada daya *signal generator* terlihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Koreksi Daya Frekuensi Radio Signal Generator

Nominal Alat		Penunjukan Standar (dBm)	Koreksi (dBm)
Daya (dBm)	Frekuensi (MHz)		
-10	10	-10,003	-0,003
-10	50	-10,009	-0,009
-10	100	-10,014	-0,014
0	10	0,013	0,013
0	50	0,004	0,004
0	100	-0,002	-0,002
10	10	10,015	0,015
10	50	10,011	0,011
10	100	10,001	0,001

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2018)

$$K = S - T$$

Persamaan 51

K = Koreksi

S = Nilai penunjukan standar (*measuring receiver*)

T = Nilai nominal alat (*signal generator*)

Ketidakpastian pengukuran didefinisikan sebagai suatu parameter, terkait dengan hasil pengukuran, yang mencirikan sebaran nilai-nilai yang dapat dianggap mewakili besaran yang diukur (JCGM, 2008). Ketidakpastian pengukuran juga menggambarkan besarnya kesalahan yang mungkin terjadi pada hasil pengukuran. Dengan demikian, ketidakpastian pengukuran menunjukkan kualitas pengukuran. Pada umumnya, sumber-sumber ketidakpastian antara lain berasal dari standar, benda ukur (alat yang dikalibrasi), alat bantu, metode pengukuran, lingkungan, personel, dan sumber-sumber lainnya.

Menurut jenisnya ketidakpastian dibagi menjadi dua, yaitu tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A merupakan nilai ketidakpastian yang dievaluasi dengan menggunakan metode analisis statistik, sedangkan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

ketidakpastian tipe B merupakan nilai ketidakpastian yang dievaluasi dengan cara lain selain analisis statistik yaitu dengan cara diestimasi berdasarkan asumsi-asumsi tertentu. Ketidakpastian yang termasuk dalam tipe A adalah ketidakpastian dari nilai pengukuran berulang. Ketidakpastian yang termasuk dalam tipe B antara lain adalah ketidakpastian akibat keterbatasan resolusi alat, ketidakpastian standar, dan lain-lain. Langkah-langkah dalam mengevaluasi ketidakpastian pengukuran adalah sebagai berikut.

1. Membuat model matematis pengukuran
2. Menganalisis sumber-sumber ketidakpastian
3. Melakukan evaluasi ketidakpastian baku (*standard uncertainty*) untuk setiap komponen menurut jenisnya, yaitu tipe A atau tipe B
4. Menghitung ketidakpastian baku gabungan (*combined standard uncertainty*)
5. Menentukan ketidakpastian terentang (*expanded uncertainty*)
6. Melaporkan ketidakpastian pengukuran

Dalam merumuskan model matematis maka tentukan besaran ukur dan besaran-besaran masukannya (*input quantities*). Hubungan fungsional antara besaran ukur dan *input* dibuat dalam rumusan, seperti persamaan 52.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Persamaan 52}$$

Model matematis dalam pengukuran daya frekuensi radio adalah seperti dalam persamaan 49. Model matematis tersebut diperoleh berdasarkan sistem pengukuran yang digunakan. Berdasarkan model matematis ini, sumber-sumber ketidakpastian yang dominan antara lain adalah ketidakpastian pengukuran berulang (*repeatability*), ketidakpastian standar (sertifikat kalibrasi *measuring receiver*), dan ketidakpastian resolusi *measuring receiver*.

Perhitungan ketidakpastian berulang yang merupakan tipe A, dapat dikalkulasi dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.

- Menghitung nilai rata-rata, \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Persamaan 53}$$

- Mengkalkulasi simpangan baku, $s(x_i)$

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Persamaan 54}$$

- Ketidakpastian pengukuran berulang, U_r

$$u_r = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad \text{Persamaan 55}$$

Sebagai contoh pada titik pengukuran 0 dBm, 50 MHz, nilai ketidakpastian berulangnya adalah:

$$\bar{x} = 0,004 \text{ dBm}$$

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,008944$$

$$u_r = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0,008944}{\sqrt{10}} = 0,002828$$

Perhitungan ketidakpastian tipe B dapat dilakukan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Menentukan sebaran (distribusi) dari sumber ketidakpastian
Distribusi menggambarkan peluang munculnya hasil pengukuran. Terdapat tiga jenis distribusi yang sering digunakan dalam pengukuran daya frekuensi radio yaitu: normal (*Gauss*), segitiga (*triangular*), dan segiempat (*rectangular/uniform*).
- Kalkulasi simpangan baku (*standard deviation*)
 - Distribusi normal

$$s(x_i) = \frac{U}{2} \quad \text{Persamaan 56}$$

- Distribusi segitiga

$$s(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad \text{Persamaan 57}$$

- Distribusi segiempat

$$s(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Persamaan 58}$$

U = ketidakpastian dari sertifikat kalibrasi standar,

a = rentang paruh.

- Ketidakpastian baku tipe B

$$u_i = s(x_i) \quad \text{Persamaan 59}$$

Pada contoh ini, ketidakpastian standar diperoleh dari sertifikat kalibrasi *measuring receiver*. Misalnya sertifikat kalibrasi *measuring receiver* pada titik pengukuran 0 dBm, 50 MHz memiliki ketidakpastian 0,0063 dBm. Sumber ketidakpastian dari sertifikat kalibrasi memiliki distribusi normal. Ketidakpastian standar pada titik pengukuran tersebut adalah:

$$u_s = \frac{U}{2} = \frac{0,0063}{2} = 0,00315$$

Ketidakpastian resolusi alat ukur diperoleh sesuai dengan resolusi pada *measuring receiver*. Resolusi dari alat digital memiliki distribusi segiempat. Sebagai contoh ketidakpastian resolusi pada titik pengukuran 0 dBm, 50 MHz.

$$\text{Rentang paruh} = \frac{0,01}{2}$$

$$\text{Ketidakpastian resolusi, } u_{res} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,002887$$

Untuk alat ukur digital, ketidakpastian resolusi dapat dihitung secara langsung sebagai berikut.

$$u_{res} = \frac{\text{resolusi}}{2\sqrt{3}} \quad \text{Persamaan 60}$$

Di sisi lain untuk alat ukur digital, ketidakpastian resolusi dapat dihitung sebagai berikut:

$$u_{res} = \frac{\text{resolusi}}{2\sqrt{6}} \quad \text{Persamaan 61}$$

Setelah nilai ketidakpastian baku dari setiap sumber ketidakpastian diketahui maka tahapan selanjutnya adalah menghitung ketidakpastian baku gabungan atau biasa juga disebut sebagai ketidakpastian gabungan. Ketidakpastian baku gabungan merupakan gabungan dari semua ketidakpastian baku yang telah dievaluasi. Dalam ketidakpastian baku gabungan, semua sumber-sumber ketidakpastian diubah ke dalam satuan yang sama dengan satuan besaran ukur. Koefisien sensitivitas mengubah semua komponen ketidakpastian sehingga mempunyai satuan yang sama dengan besaran ukurnya. Koefisien sensitivitas menunjukkan seberapa sensitif besaran ukur terhadap pengaruh dari suatu input. Koefisien sensitivitas dapat ditentukan melalui turunan pertama model matematis pengukuran terhadap masing-masing inputnya, seperti pada persamaan 62.

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad \text{Persamaan 62}$$

Pada pengukuran daya frekuensi radio, pada umumnya koefisien sensitivitas untuk semua komponen input adalah 1. Ketidakpastian baku gabungan dapat dikalkulasi menggunakan persamaan 63.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i u_i)^2} = \sqrt{u_r^2 + u_s^2 + u_{res}^2} \quad \text{Persamaan 63}$$

Untuk memperoleh nilai hasil pengukuran pada suatu rentang yang dinyatakan oleh ketidakpastian, maka ketidakpastian baku gabungan dikalikan dengan suatu faktor cakupan. Faktor cakupan dapat dipilih atau dihitung sehingga menyatakan suatu tingkat kepercayaan. Pada pengukuran daya frekuensi radio, dipilih faktor cakupan (*coverage factor*), $k=2$ dan pada tingkat kepercayaan (*confidence level*) = 95%. Ketidakpastian terentang ditentukan menggunakan persamaan

64. Nilai ketidakpastian yang dilaporkan pada sertifikat kalibrasi adalah ketidakpastian terentang. Tabel 14 merupakan ketidakpastian terentang dalam pengukuran ini.

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c$$

Persamaan 64

Dalam melaporkan ketidakpastian maka nilai ketidakpastian dibulatkan sedemikian rupa sehingga banyaknya angka penting (*significant digit*) maksimal dua digit. Oleh karena itu, ketidakpastian pengukuran dapat terdiri dari satu atau dua digit angka penting. Dalam konteks ketidakpastian, pembulatan dilakukan ke atas. Sebagai contoh ketidakpastian 0,005347 maka jika dibulatkan dalam dua angka menjadi 0,0054, dan jika dibulatkan dalam satu angka penting menjadi 0,006. Nilai rata-rata penunjukan alat ukur dibulatkan sedemikian rupa, sehingga jumlah digit angka di belakang koma sesuai dengan resolusinya. Nilai koreksi dibulatkan sedemikian rupa sehingga jumlah digit angka di belakang koma sesuai dengan jumlah digit ketidakpastiannya. Tabel 15 merupakan contoh laporan hasil kalibrasi daya frekuensi radio.

Tabel 14. Ketidakpastian Terentang Pengukuran Daya Radio Frekuensi

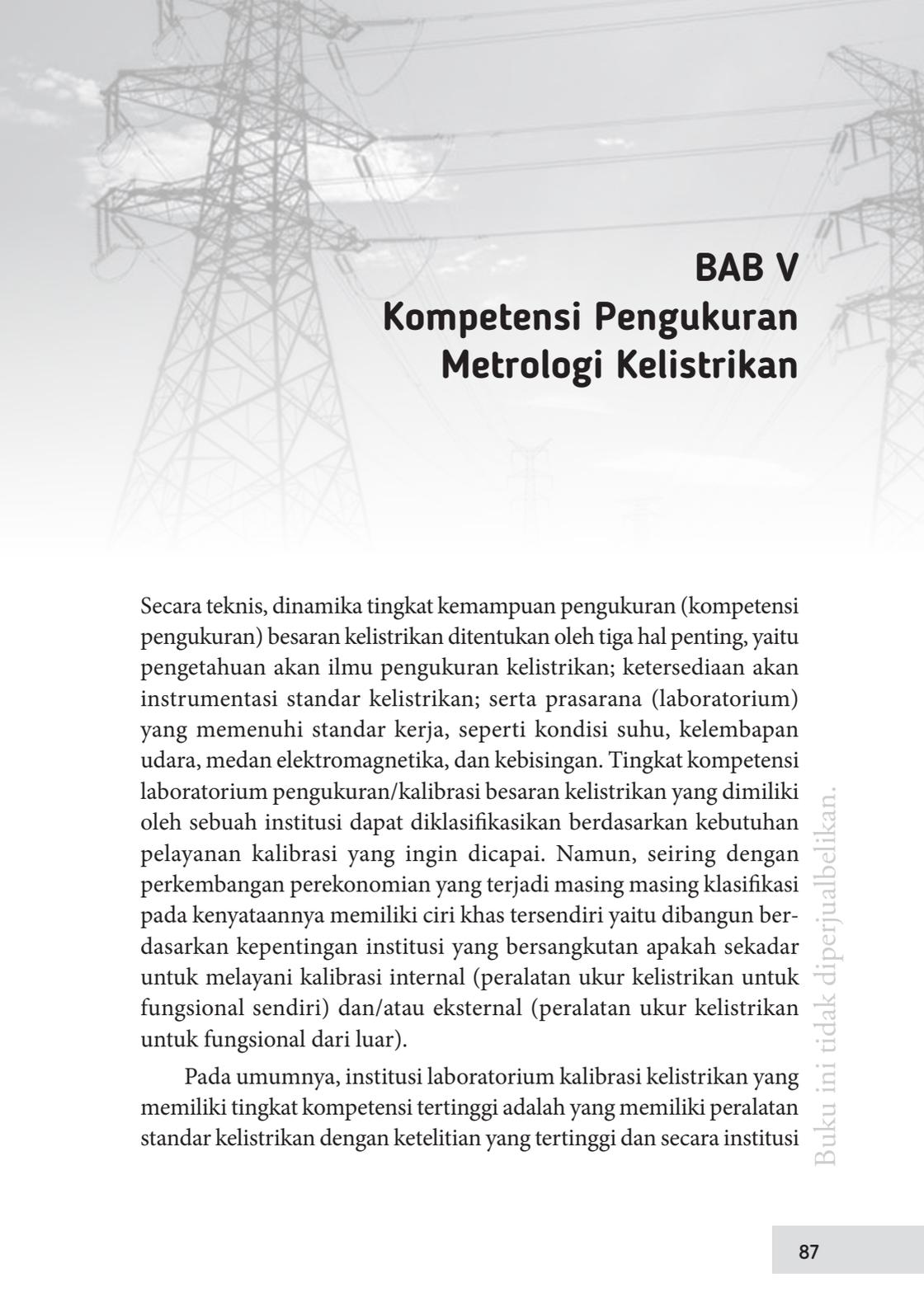
Nominal Alat		ur (dBm)	us (dBm)	ures (dBm)	uc (dBm)	U (dBm)
Daya (dBm)	Frekuensi (MHz)					
-10	10	0,002603	0,00065	0,002887	0,003941	0,007883
-10	50	0,001795	0,00115	0,002887	0,003589	0,007177
-10	100	0,001633	0,00165	0,002887	0,003704	0,007409
0	10	0,001581	0,00260	0,002887	0,004194	0,008389
0	50	0,002828	0,00315	0,002887	0,005124	0,010248
0	100	0,003887	0,00370	0,002887	0,006094	0,012188
10	10	0,001667	0,00435	0,002887	0,00548	0,010961
10	50	0,002333	0,0055	0,002887	0,006635	0,013271
10	100	0,002769	0,0075	0,002887	0,0085	0,0170

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2018)

Tabel 15. Hasil Kalibrasi Daya Frekuensi Radio

Nominal Alat		Koreksi		Ketidakpastian	
<i>Instrument Nominal</i>		<i>Correction</i>		<i>Uncertainty</i>	
-10 dBm	10 MHz	-0,003	dBm	0,008	dBm
-10 dBm	50 MHz	-0,009	dBm	0,008	dBm
-10 dBm	100 MHz	-0,014	dBm	0,008	dBm
0 dBm	10 MHz	0,013	dBm	0,009	dBm
0 dBm	50 MHz	0,004	dBm	0,010	dBm
0 dBm	100 MHz	-0,002	dBm	0,012	dBm
10 dBm	10 MHz	0,015	dBm	0,011	dBm
10 dBm	50 MHz	0,011	dBm	0,013	dBm
10 dBm	100 MHz	0,001	dBm	0,017	dBm

Sumber: Hasil Olahan Penulis (2018)



BAB V

Kompetensi Pengukuran Metrologi Kelistrikan

Secara teknis, dinamika tingkat kemampuan pengukuran (kompetensi pengukuran) besaran kelistrikan ditentukan oleh tiga hal penting, yaitu pengetahuan akan ilmu pengukuran kelistrikan; ketersediaan akan instrumentasi standar kelistrikan; serta prasarana (laboratorium) yang memenuhi standar kerja, seperti kondisi suhu, kelembapan udara, medan elektromagnetika, dan kebisingan. Tingkat kompetensi laboratorium pengukuran/kalibrasi besaran kelistrikan yang dimiliki oleh sebuah institusi dapat diklasifikasikan berdasarkan kebutuhan pelayanan kalibrasi yang ingin dicapai. Namun, seiring dengan perkembangan perekonomian yang terjadi masing masing klasifikasi pada kenyataannya memiliki ciri khas tersendiri yaitu dibangun berdasarkan kepentingan institusi yang bersangkutan apakah sekadar untuk melayani kalibrasi internal (peralatan ukur kelistrikan untuk fungsional sendiri) dan/atau eksternal (peralatan ukur kelistrikan untuk fungsional dari luar).

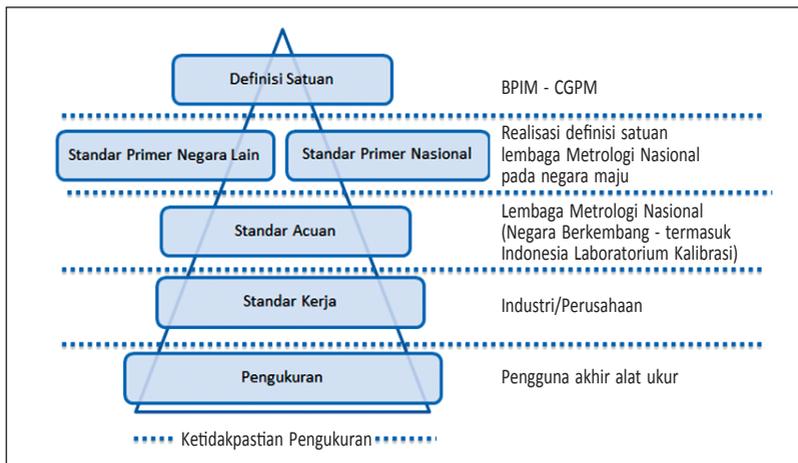
Pada umumnya, institusi laboratorium kalibrasi kelistrikan yang memiliki tingkat kompetensi tertinggi adalah yang memiliki peralatan standar kelistrikan dengan ketelitian yang tertinggi dan secara institusi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

berada di bawah lingkungan kelembagaan negara seperti Indonesia sehingga disebut sebagai laboratorium metrologi nasional (NMI) dan sebagai NMI telah diakui secara internasional melalui Mutual CIPM MRA. Mutual Recognition Arrangement (MRA) CIPM dibuat oleh International Committee of Weights and Measures (CIPM) di bawah kewenangan yang diberikan kepadanya dalam Meter Convention oleh BIPM. Berikutnya diikuti oleh institusi-institusi swasta lainnya yaitu industri dan perguruan tinggi yang melakukan pelayanan internal dan eksternal serta khusus untuk melakukan pelayanan eksternal yaitu laboratorium kalibrasi, seperti terlihat pada diagram ketertelusuran di bawah ini.

A. LABORATORIUM METROLOGI KELISTRIKAN NASIONAL

Orientasi pelayanan kalibrasi kelistrikan bersifat internal dan eksternal. Melakukan pelayanan kalibrasi internal yang bersifat pemeliharaan ketelitian mandiri terhadap peralatan-peralatan standar kelistrikan yang berjenjang ketelitiannya seperti pada Gambar 36. Jenjang ketelitian dapat digambarkan melalui sebuah bagan ketertelusuran yang



Sumber: BSN (2007)

Gambar 36. Diagram Ketertelusuran secara Umum

Buku ini tidak diperjualbelikan.

menggambarkan peralatan standar kelistrikan dari yang berketelitian paling tinggi berupa PJVS (*programmable josephson junction system*) dan QHS (*quantum hall system*) hingga yang terendah berupa standar primer (*standard cells*), standar sekunder (*multifunction calibrator*), dan standar kerja (*reference multimeter*). Ketelitian standar primer mencapai 0,1 ppm dapat dipelihara dengan cara kalibrasi ke laboratorium kelistrikan nasional negara lain, sedangkan standar sekunder dan standar kerja dilakukan kalibrasi mandiri. Pelaksanaan kalibrasi mandiri biasanya dapat ditempuh melalui dua cara yaitu proses kalibrasi dan proses penelitian.

B. LABORATORIUM KALIBRASI KELISTRIKAN

Orientasi pelayanan kalibrasinya adalah eksternal yaitu melayani kalibrasi peralatan ukur yang dimiliki oleh pihak luar baik industri maupun perguruan tinggi. Laboratorium kalibrasi ini memiliki tingkat kompetensi setingkat di bawah laboratorium metrologi nasional mencapai instrumen kelistrikan bertipe *multifunction calibrator*. Ketelitian ukur peralatan standar yang dipergunakan untuk pelayanan kalibrasi berada setingkat di bawah atau lebih rendah dari tingkat ketelitian peralatan standar kelistrikan yang dimiliki oleh laboratorium kelistrikan metrologi nasional. Untuk menjaga ketelitian peralatan standar yang dimilikinya dapat dilakukan dengan cara kalibrasi ke laboratorium metrologi nasional maupun ke NMI negara lain.

C. LABORATORIUM KALIBRASI KELISTRIKAN INDUSTRI

Orientasi pelayanan kalibrasi bersifat internal dan eksternal. Pada dasarnya implementasi pelayanan internal dijadikan sebagai prioritas utama diantaranya untuk mengkalibrasi peralatan utama bertipe *multifunction calibrator* atau *reference multimeter* dengan ketelitian di bawah milik laboratorium kalibrasi kelistrikan yang dipergunakan untuk membantu pada proses produksi sehingga dapat menghasilkan produk yang berkualitas dan tidak jarang dipergunakan juga untuk proses QC (*quality control*). Jika ternyata waktunya me-

mungkinan maka baru dilakukan kalibrasi eksternal yang ditawarkan oleh perguruan tinggi maupun industri lainnya.

D. LABORATORIUM KALIBRASI KELISTRIKAN PERGURUAN TINGGI

Orientasi pelayanan kalibrasinya adalah internal, yaitu melayani kalibrasi peralatan ukur kelistrikan bertipe *digital multimeter* yang dimiliki oleh laboratorium kelistrikan yang dipergunakan untuk mata kuliah pengukuran peralatan kelistrikan maupun penelitian. Ada beberapa perguruan tinggi yang memiliki peralatan standar dengan ketelitian yang terpelihara dan memiliki sumber daya manusia yang cukup kompeten sehingga melakukan pelayanan kalibrasi eksternal.

Kualitas hasil pelayanan kalibrasi instrumen kelistrikan yang dimiliki oleh ketiga kompetensi milik laboratorium kalibrasi, industri maupun perguruan tinggi tersebut perlu dijaga dan/atau dikembangkan dengan cara mengikuti dan mempelajari perkembangan ilmu pengetahuan pengukuran yang dimiliki oleh laboratorium yang memiliki kompetensi lebih tinggi, sebagai contoh laboratorium metrologi nasional. Melalui media pelatihan atau langsung secara individu kompetensi laboratorium dapat dikembangkan dengan materi, baik teori pengukuran (buku ini), maupun praktik yang telah memiliki laboratorium metrologi kelistrikan nasional.



BAB VI

Penutup

Sudah tidak diragukan lagi bahwa perkembangan penduduk di Indonesia yang selaras dengan perkembangan teknologi yang ada membutuhkan energi listrik yang bermutu. Ketersediaan sumber energi listrik yang terbatas dapat diimbangi oleh penggunaan instrumen listrik yang terukur dan berkualitas sehingga dapat meningkatkan efektivitas penggunaan energi listrik perlengkapan kehidupan yang mayoritas berupa peralatan listrik. Secara ilmu kelistrikan, energi listrik dianalogikan sebagai kumpulan beberapa variabel, yaitu variabel tegangan, arus, impedansi, dan daya. Di sisi lain, secara ilmu pengukuran, tingkat ketelitian dari keempat variabel kelistrikan tersebut di atas dapat diperoleh dengan menguasai ilmu pengukuran (metrologi) kelistrikan.

Pada buku ini telah dibahas mengenai metrologi kelistrikan yang terkait dengan variabel-variabel tersebut secara kualitas. Ukuran kualitas yang dimaksud di sini adalah suatu nilai yang diperoleh berdasarkan proses pengukuran berupa nilai nominal dan nilai ketidakpastian pengukuran. Metode-metode pengukuran terkait variabel tersebut disajikan di dalam buku ini dapat menjamin bahwa

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan penguasaan materi yang baik akan membekali seseorang dapat mengukur, menganalisis, mengenali nilai sebenarnya daripada energi listrik terpakai. Kami menyadari bahwasanya beberapa contoh sistem pengukuran yang telah sempat disajikan dalam buku ini bisa dianggap oleh pembaca kurang memadai. Namun, pada dasarnya dengan terkuasainya materi buku ini para pembaca akan merasakan dapat dengan lebih mudah mengembangkan diri untuk menghadapi kasus kasus pengukuran dengan tingkat ketelitian berbeda beda. Selain itu, kompetensi yang diperoleh atas penguasaan buku ini dapat diverifikasi dengan cara melakukan uji banding antara laboratorium. Dalam buku ini difokuskan membahas beberapa besaran kelistrikan berikut.

A. TEGANGAN DAN ARUS

Secara sadar atau tidak, ternyata kita telah menggunakan energi listrik untuk mengoperasikan instrumen listrik baik yang berkaitan dengan kegiatan praktikum instrumentasi pada perguruan tinggi, produksi pada lingkup industri, maupun jasa pengukuran pada laboratorium kalibrasi. Tingkat ketelitian (kualitas) instrumen tegangan dan arus yang dipergunakan oleh ketiga lembaga tersebut dapat diklasifikasi berdasarkan kualitas lingkup pekerjaan dari ketiga lembaga tersebut sehingga secara standardisasi dapat dikenal sebagai standar kerja, standar industri, dan standar laboratorium. Di sisi lain, secara fungsi kerja instrumen tegangan dan arus terdapat dua tipe yaitu instrumen sumber dan instrumen meter.

Praktisi perguruan tinggi sering membutuhkan instrumen meter voltmeter atau ammeter untuk mengukur kemampuan komponen komponen kelistrikan tertentu sekedar untuk mengetahui apakah komponen tersebut dapat berfungsi menyerap tegangan (melewatkan arus) sesuai dengan spesifikasi yang dimiliki. Terkadang mereka juga menggunakan sumber tegangan atau arus untuk mengetahui apakah rangkaian tertentu dapat berfungsi dengan benar atau komponen aktif (motor) tertentu dapat menghasilkan putaran dengan benar. Pengukuran terhadap komponen atau kumpulan komponen listrik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

(komponen pasif) dan komponen aktif yang kualitasnya cukup menggunakan tingkat ketelitian standar kerja. Selain itu sifat implementasi instrumen dibutuhkan untuk merealisasikan materi kurikulum yang mempelajari terkait instrument kelistrikan.

Praktisi industri yang misinya terkait dengan kualitas hasil produksi membutuhkan kemampuan operasional instrumen yang berkualitas di atas perguruan tinggi (sedang) dan kontinuitas kerja (beban kerja) untuk jangka panjang. Agar proses produksi dapat menghasilkan luaran yang memenuhi kualitas dan kuantitas maka dibutuhkan perawatan kualitas instrumen voltmeter maupun instrumen ammeter yang periodikal. Efisiensi proses produksi pada industri dapat berhasil ketika hasil produksi telah dijamin oleh dukungan kualitas instrumen yang terjaga, baik dalam hal ketelitian maupun kestabilannya. Dari sudut pandang kualitas, instrumen ini dapat dikelompokkan kedalam tingkat standar industri.

Praktisi laboratorium lebih mengedepankan proses pelayanan yang memerlukan legalitas moral (kepercayaan) sehingga selain melakukan proses pengukuran terhadap meter (voltmeter dan ammeter) maupun sumber (tegangan dan arus) seperti yang dilakukan oleh praktisi perguruan tinggi maupun industri juga harus dapat membuktikan bahwa kompetensinya telah terukur melalui proses uji banding antar laboratroiium atau ILC (*inter-laboratory comparison*). Kualitas instrumen yang dimiliki oleh laboratorium kalibrasi pada umumnya berada di bawah standar milik Lembaga Metrologi Nasional. Selain memiliki kemampuan pemeliharaan kualitas instrumen standar milik sendiri maupun milik kedua lembaga sebelumnya, juga kompetensinya perlu dipantau secara periodik.

Dari ulasan ketiga praktisi tersebut di atas, yang jelas, masing masing memiliki instrumen ukur dan kemampuan ukur yang berbeda. Namun, pada prinsipnya dalam sebuah rangkaian pengukuran baik besaran tegangan maupun arus personel pengukur harus menguasai (paham) pada pengertian dasar kelistrikan bahwa pada pengukuran

besaran tegangan yang benar tidak diperbolehkan adanya aliran arus dalam rangkaian pengukuran. Di sisi lain, untuk pengukuran arus yang benar tidak diperbolehkan adanya tegangan tembus dalam rangkaian pengukuran. Kondisi rangkaian pengukuran yang ideal ini secara tidak langsung akan diperoleh melalui proses latihan mengidentifikasi kesalahan pengukuran melalui contoh-contoh pengukuran yang tersurat di dalam bab tegangan dan arus.

B. RESISTANSI

Menurut ilmu kelistrikan yang telah kita kenal selama ini dapat dijelaskan bahwa di dalam sebuah sistem rangkaian pengukuran selalu terdapat besaran-besaran tegangan listrik, arus listrik, beban listrik, dan daya listrik. Komponen resistor adalah besaran yang berada pada beban listrik. Kualitas resistor menentukan kualitas tegangan listrik atau kualitas arus yang mengalir dalam sebuah sistem rangkaian listrik. Keberadaan sistem rangkaian listrik yang dilibatkan dalam lingkup kerja perguruan tinggi, industri dan laboratorium kalibrasi dapat disesuaikan berdasarkan skala kualitas komponen beban (resistor) yang terlibat.

Seperti besaran kelistrikan yang lainnya bahwa resistor juga memiliki tingkatan kualitas resistor berdasarkan standar kerja, industri dan laboratorium. Baik ohmmeter maupun sumber resistor memiliki kualitas dan lingkup pengukuran yang beragam. Pengukuran yang berada di komunitas perguruan tinggi memang paling banyak ragam komponennya karena umumnya bereksperimen pada pembuatan rangkaian listrik yang banyak ragamnya pula. Namun, karena kualitas komponen yang dilibatkan adalah pada skala% maka skala kualitas instrumen yang dipergunakan secara kebutuhan adalah standar kerja.

Di komunitas industri yang terkait dengan prinsip efisiensi terhadap penggunaan daya listrik yang dikerjakan oleh komponen resistor sebagai komponen pengontrol aliran arus baik sebagai pembatas suplai arus motor listrik (komponen aktif) maupun sebagai pemutus arus atau *current shunt* sistem jaringan (komponen pasif). Kualitas

arus yang dipergunakan untuk menjaga kualitas mutu produk suatu industri sangat ditentukan oleh metode pemeliharaan kualitas instrumen ukur maupun instrumen pembatas arus yang memadai pula. Metode pemeliharaan kualitas instrumen standar industri ini dapat diperoleh dengan menjaga tingkat kompetensi pengukuran resistor yang cukup dengan pengetahuan dasar seperti materi yang terdapat dalam buku ini.

Pemantauan kualitas resistor yang dipergunakan oleh praktisi perguruan tinggi maupun industri dapat dilakukan oleh laboratorium kalibrasi. Laboratorium kalibrasi memiliki standar instrument ohmmeter atau sumber resistor yang standardisasinya lebih tinggi dibandingkan dengan kedua lembaga tersebut dan tentu saja harus memiliki tingkat kompetensi minimal sebanding dengan penguasaan materi yang terdapat dalam buku ini. Dengan demikian personel laboratorium dapat secara lengkap menuangkannya sebagai materi inti, selain materi lainnya terkait kondisi ruang dan persyaratan laboratorium lainnya, ke dalam sebuah prosedur pengukuran.

C. DAYA FREKUENSI RADIO

Pada saat ini kualitas merupakan hal yang mutlak harus diperhatikan untuk menjaga efisiensi dan efektivitas penggunaan energi listrik. Kualitas sinyal untuk peralatan telekomunikasi dan penerbangan salah satunya bergantung pada daya yang beroperasi dalam frekuensi radio. Daya yang rendah mengakibatkan kualitas sinyal yang sangat buruk karena dipengaruhi oleh *noise*. Sebaliknya, pemberian daya yang sangat tinggi menyebabkan distorsi, dan kerusakan instrument. Daya yang terlalu besar melebihi spesifikasi yang ditentukan berakibat pada pemborosan energi sehingga menambah biaya operasional dalam suatu industri. Oleh karena itu, sistem pengukuran yang akurat dan handal harus dibangun untuk mengetahui nilai daya frekuensi radio yang sebenarnya pada suatu alat dalam industri telekomunikasi, penerbangan dan industri lainnya yang menggunakan peralatan frekuensi radio.

Buku ini pada dasarnya menyajikan materi sistem pengukuran kelistrikan dengan tujuan agar pembaca memperoleh tingkat kompetensi yang cukup mampu diujibandingkan (uji kompetensi). Tingkat kompetensi yang diperoleh sebanding dengan kemampuan pengukur minimal staf laboratorium kalibrasi, laboratorium industri, dan laboratorium perguruan tinggi. Selain itu dengan pengenalan instrumen instrumen ukur dan sedikit filosofi mengenai metrologi, pembaca dapat mendirikan dan bahkan mengembangkan sebuah laboratorium kalibrasi.

Tim penulis sangat optimistis dengan harapan penyajian materi yang cukup sederhana ini dapat membekali pembaca baik secara langsung (autodidak) yaitu sebagai staf sebuah laboratorium maupun tidak langsung (referensi) untuk menghadapi pelatihan teknik pengukuran kelistrikan dalam rangka untuk mendirikan laboratorium. Tentunya diharapkan ada masukan masukan yang bersifat kritis untuk meningkatkan kualitas buku ini sehingga ke depan dapat menambah kualitas kompetensi yang diperoleh para pembaca.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agilent Technologies. (2005). *Power measurement basics*. Agilent Technologies.
- Aihara, S., Bathias, C., Araki, T., Bayreuther, G., Ashida, M., Bertsche, B., ... Winchester, M. (2011). *Springer handbook of metrology and testing*. (H. Czichos, T. Saito, & L. Smith, Eds.) (2nd ed.). London: Springer Heidelberg Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16641-9>.
- Arriat, J. -Y., Erard, L., Koch, C., Lanneau, P., Larquier, B., Magana, J.-F., ... Virieux, J. -M. (2006). *Metrology in industry: The key for quality*. (D. Placko, Ed.) (1st ed.). London: ISTE Ltd.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2018). *SNI ISO/IEC 17025:2017, persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi* (Vol. 2020). Jakarta: BSN.
- BIPM. (2019). *What is metrology?* Diakses pada 21 Februari 2019 dari <https://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/>.
- Budovsky, I. F., & Marais, E. L. (2015). *Measurement report on thermal transfer standard: Fluke model 792A*. NSW.
- Collier, R. J., & Skinner, A. D. (2007). *Microwave measurements* (3rd ed.). London: The Institution of Engineering and Technology.

- El, S. (2016). *Bagaimana listrik sampai di rumah kita?* Diakses pada 1 Maret 2020 dari <https://www.listrik-praktis.com/2016/03/bagaimana-listrik-sampai-di-rumah-kita.html>.
- Faisal, A. (2019). *Sertifikat kalibrasi multifunction calibrator fluke 5720A*. Tangerang Selatan.
- Fantom, A. (1990). *Radio frequency & microwave power measurement*. (A. E. Bailey, O. C. Jones, & A. C. Lynch, Eds.) (7th ed.). London: Peter Peregrinus Ltd.
- Fluke Corporation. (2006). *Instruction manual of AC/DC transfer standard 792A*. Everett: Fluke Corporation.
- Fujiki, H., Amagai, Y., & Sasaki, H. (2015). Development of thin-film multi-junction thermal converters-Establishing metrological traceability system for AC voltage standard. *Synthesiology English Edition*, 8(3), 113–132. https://doi.org/10.5571/SYNTHENG.8.3_113.
- Guildline Instruments Limited. (2002). *Technical manual for rescal 3.4 model 6675/A*. Guildline Instruments. Ontario.
- Halawa, M., & Al-Rashid, N. (2010). Performance of single junction thermal voltage converter (SJTV) at 1 MHz via equivalent electrical circuit simulation. Dalam *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (631–636). Cambridge: IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSIM.2010.120>.
- Introduction, I. (2008). *Fundamentals of RF and microwave measurements (Part 4): An overview of agilent instrumentation for RF/microwave power measurements*. USA: Agilent Technologies, Inc.
- Janesch, J. (n.d.). Two-wire vs four-wire resistance measurements: Which configuration makes sense for your application? *Keithley Instruments, Inc.*, 2.
- JCGM. (2008). *JCGM 100 : 2008, evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (1st ed.). <https://doi.org/10.1373/clinchem.2003.030528>.
- Jeffery, A., Elmquist, R. E., Shields, J. Q., Cage, L. H., Lee, M. E., Shields, S. H., & Dziuba, R. F. (1998). Determination of the von Klitzing constant and the fine-structure constant through a comparison of the quantized hall resistance and the ohm derived from the NIST calculable capacitor. *Metrologia*, 35, 83–96.
- Jones, K. (2015). *Medea training: Electrical standards*. Manila.

- Kaneko, N. (2017). Review of quantum electrical standards and benefits and effects of the implementation of the 'Revised SI'. *IEEEJ Trans*, 12, 627–637.
- Kho, D. (2020). *Pengertian hambatan listrik (resistansi listrik)*. Diakses pada 1 Maret 2020 dari <https://teknikelektronika.com/pengertian-hambatan-listrik-resistansi-listrik/>.
- Metherall, P. (2000). A guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz. *Physiological Measurement*, 21, 425. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/21/3/701>.
- MI. (2017a). MI-type standard model 9210A. *Measurements International*, 2.
- MI. (2017b). Transportable & affordable QHR standard model 6800A. *Measurements International*, 1–4.
- MI. (2019). Metrology is our science, accuracy is our business. *Measurements International*, 1–2.
- Nabu, A. H. (2013). *Sinyal listrik (gelombang tegangan dan arus yang terdapat pada suatu rangkaian listrik)*. Diakses pada 1 Maret 2020 dari <https://harisnabu.wordpress.com/2013/05/11/sinyal-listrik/>.
- Perangin-angin, W. K. (2018). Establishment of RF power sensor calibration at RCM-LIPI. Dalam *018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)* (1–2). Paris: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501170>.
- Physics and Radio-Electronics. (2019). *Resistors*. Diakses pada 18 Mei 2019 dari <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/passive-components/resistors/resistors.html>.
- Shimaoka, K. (2012). RF power standards in NMIJ and understanding calibration factor. *The Third Country Training Programme on Strengthening of Measurement Standards Institutes of Asia Pacific Countries*.
- Silveira, F. A., Souza, R. M., & Landim, R. P. (2018). Power-law interpolation of AC-DC differences. *ArXiv: Instrumentation and Detectors*.
- Yoogawa Test & Measurement Corporation. (2020). *Standard resistors 2792A*. Diakses pada 15 Agustus 2020 dari <https://tmi.yokogawa.com/id/solutions/products/portable-and-bench-instruments/dc-precision-measuring/2792-standard-resistors/>.

INDEKS

- AC, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15,
16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25,
26, 27, 28, 98, 99, 109
- AC-DC, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16,
18, 23, 99
- AC-DC converter (thermal con-
verter), 8
- AC-DC transfer standard, 8, 9
- Acuan, 1, 8, 40, 41, 42, 52, 53, 54,
55, 59, 60, 61, 65, 66, 67, 72
- Amplitudo, 7, 76
- Beban, 2, 6, 93, 94
- Calorimeter, 72
- Cermet, 39
- Confidence, 83
- Coupler, 75
- Cryogenic, 35
- Current shunt, 16, 94
- Daya, 5, 8, 9, 18, 31, 39, 40, 71, 72,
73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80,
81, 83, 84, 85, 90, 91, 94, 95,
106, 107, 108, 109
- DC, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16,
18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26,
28, 29, 33, 36, 72, 98, 99, 109
- Deviasi, 58, 64
- Distribusi, 6, 11, 14, 59, 60, 61, 65,
66, 67, 81, 82
- Drift, 25, 53, 54, 55, 60, 66
- Dry load, 72
- Efek, 9, 34, 35, 47, 48
- Electromotive force (EMF), 9
- ESDM, 25, 29, 58, 59, 64, 65
- Flow, 72
- Frekuensi, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12,
14, 21, 22, 28, 38, 71, 72, 73,
74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 83,
84, 95, 107

Helium cair, 35
 Hot-junctions, 11
 Impedance, 73, 99
 ISO GUM, 23, 28, 60
 Jembatan quadrature, 33
 Joshepson voltage standard, 8
 Kawat manganin, 37
 Ketertelusuran, 1, 5, 15, 16, 68, 72, 73, 75, 88
 Ketidakpastian, 1, 3, 5, 16, 18, 23, 24, 25, 28, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 69, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 91
 Konfigurasi, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 51
 Level, 71
 Measuring, 72, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 99
 Metode, 8, 18, 20, 23, 25, 28, 40, 41, 48, 49, 53, 54, 55, 57, 61, 63, 72, 75, 79, 91, 95
 Metode komparasi termis, 20, 23, 28
 Metrologi, 1, 3, 5, 8, 15, 16, 31, 34, 35, 71, 72, 87, 88, 93, 105, 106, 107, 108, 109, 110
 MJTC, 11, 12, 13, 14
 NMI, 72, 88, 89
 Noise, 39, 71, 95
 Nominal, 23, 28, 39, 40, 41, 42, 46, 47, 51, 53, 68, 75, 76, 79, 91
 Peltier effect, 13
 Pengukuran, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 33, 37, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96
 Periode, 7, 51
 Power pack, 18, 20
 Probe, 44
 Quantum hall resistance, 35
 Rasio, 33, 40, 41, 54, 55, 57, 63, 65, 66, 67
 Realisasi Kolom Merkuri, 33
 Receiver, 75, 76, 77, 79, 80, 82
 Rentang, 12, 14, 18, 19, 20, 21, 24, 33, 40, 41, 48, 50, 51, 67, 68, 71, 76, 82, 83
 Resistansi, 2, 5, 16, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 55, 61, 64, 68, 99
 Resistor, 9, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 46, 52, 53, 57, 59, 60, 63, 65, 66, 106
 Resolusi, 24, 29, 51, 53, 54, 55, 59, 65, 80, 82, 83
 RMS sensor, 11, 12
 SI, 57, 61, 72, 99
 SJTC, 10, 11, 12, 13, 14, 15
 Solid-state thermal, 11, 12
 Spectrum, 74, 75, 76

Standar, 1, 3, 5, 7, 8, 12, 15, 16, 31,
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40,
41, 42, 43, 49, 52, 53, 54, 55,
57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65,
66, 67, 68, 72, 75, 76, 77, 78,
79, 80, 82, 87, 88, 89, 90, 92,
93, 94, 95
Standar acuan, 72
STD, 7, 61, 63, 69
Stray inductance, 14
TCC, 16
Thermal converter, 8, 9, 10, 11, 14,
15
Thermoelectric effect, 13, 14
Transformator, 6
TVC, 15, 16
UUC, 7, 43, 48, 49, 61, 63, 67, 69,
76, 77
Waktu tunak, 18, 19

BIOGRAFI PENULIS

Ir. R. Hadi Sardjono, M.Eng.Sc.,

Badan Standardisasi Nasional

Penulis dilahirkan di Bangkalan, 21 April 1960. Penulis menamatkan Sarjana di Universitas Brawijaya Jurusan Teknik Elektro pada tahun 1986 dan memperoleh gelar Master of Engineering Science di Universitas Indonesia Jurusan Opto-Elektronika dan Aplikasi Laser yang bekerja sama dengan PTB Jerman pada tahun 1991. Penulis telah menerbitkan dua buah buku dengan Judul *Metrologi Tegangan Listrik: Ketertelusuran dan Implementasi* yang diterbitkan pada tahun 2015 dan *Metrologi Kelistrikan untuk Besaran Arus dan Tegangan* pada tahun 2014. Penulis telah bekerja di Pusat Penelitian Metrologi LIPI pada tahun 1987 dan saat ini bekerja di Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN sejak 2019 sebagai Peneliti Utama. Selain sebagai peneliti, penulis juga telah menjadi asesor laboratorium kalibrasi sejak tahun 2000 sampai sekarang.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Lukluk Khairiyati, M.T.,

Badan Standardisasi Nasional

Lahir di Kulonprogo, 29 November 1979. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di Universitas Gadjah Mada Jurusan Teknik Elektro pada Tahun 2002–2004 dan mendapatkan Beasiswa Pascasarjana KRT 2012 untuk melanjutkan Pendidikan Master di Universitas Indonesia Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2012 sampai 2014. Penulis telah bekerja di Pusat Penelitian Metrologi LIPI dari tahun 2006 sampai tahun 2019 dan melanjutkan bekerja di Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN sampai saat ini. Di tempat kerja, penulis berprofesi sebagai peneliti muda dan berpengalaman menjadi koordinator Program Penelitian Intensif Kemenristek pada tahun 2011 dengan Judul “Diseminasi Nilai Standar Resistor 1 Ohm berbasis *Quantum Hall Resistance* untuk Mencapai Ketelitian Lebih Kecil dari 0,3 ppm” dan sebagai koordinator Program Penelitian DIPA dengan judul “Pengembangan Pengukuran Resistansi Tinggi 3 Terminal sampai dengan 1 G Ω berbasis *Direct Current Comparator Bridge* (DCCB)”. Selain sebagai peneliti, penulis juga telah menjadi asesor laboratorium kalibrasi sejak tahun 2016 sampai sekarang dan menjadi asesor peneliti sejak tahun 2020 sampai sekarang.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Mohamad Syahadi, M.S.Ee.,

Badan Standardisasi Nasional

Lahir di Demak, 13 Juni 1983. Penulis telah menamatkan Pendidikan Sarjana di Universitas Diponegoro Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2008 dan melanjutkan Pendidikan Master di Korea Advance Institute of Science and Technology (KAIST) Korea Selatan Jurusan Electrical Engineering Bidang Ilmu Nanophotonic pada Tahun 2018 sampai 2020. Penulis bergabung dengan Pusat Penelitian Metrologi LIPI pada tahun 2011 dan dilanjutkan bekerja di bawah Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN pada tahun 2019 sampai sekarang. Saat ini penulis berprofesi sebagai peneliti dan berpengalaman sebagai Koordinator Program Penelitian DIPA 2014 dengan Judul “Membangun tingkat unjuk kerja Sistem Pengukuran Thermal Converter pada frekuensi di bawah 1 Mhz dengan ketelitian dan Karakterisasi Kurva Plateau pada Sistem Pengukuran Standar Nasional Vdc Berbasis PJVS (Sistem Tegangan Josephson Terprogram) dengan Ketelitian di bawah 0,1 ppm” pada tahun 2015. Selain itu, penulis juga telah menjadi tenaga ahli laboratorium kalibrasi SNI ISO/IEC 17025: 2017 sejak 2016.



Windi Kurnia Perangin-angin, M.Sc.,

Badan Standardisasi Nasional

Dilahirkan di Bangun Setia, 20 Agustus 1986. Penulis telah mengenyam Pendidikan Sarjana di Universitas Indonesia Jurusan Teknik Elektro pada Tahun 2008–2010 dan melanjutkan Pendidikan Master di University of Science and Technology Korea Selatan Jurusan Science of Measurement Bidang Ilmu Electromagnetic Korea Selatan



Buku ini tidak diperjualbelikan.

pada tahun 2015–2017. Penulis bergabung dengan Pusat Penelitian Metrologi sejak Tahun 2011 dan selanjutnya bergabung dengan Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN sejak tahun 2019 sampai sekarang. Di BSN, penulis berprofesi sebagai peneliti muda dan berpengalaman menjadi Koordinator Program Penelitian yang didanai oleh INSINAS pada tahun 2018 yang berjudul “Sistem Otomasi Kalibrasi Stopwatch/Timer untuk Mendukung Pengukuran Waktu Pada Industri Pengolahan Pangan Untuk Ibu Hamil dan Menyusui” dan pada tahun 2019 yang berjudul “Pengembangan Sistem Pengukuran Daya Frekuensi Radio yang Menunjang Peningkatan SNI untuk Mendukung Hasil Litbang Kesehatan”. Selain sebagai peneliti, penulis juga berprofesi sebagai asesor peneliti sejak tahun 2020 sampai sekarang.

Muhammad Azzumar, M.T.,

Badan Standardisasi Nasional

Dilahirkan di Jakarta, 26 Juni 1990. Penulis menamatkan Pendidikan Sarjana di Universitas Indonesia Jurusan Teknik Elektro tahun 2012 dan memperoleh gelar master di Universitas Indonesia Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2013 melalui Program Fast Track. Penulis bergabung di Pusat Penelitian Metrologi LIPI pada tahun 2014 sampai 2019 dan selanjutnya bekerja di bawah Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN sampai sekarang. Saat ini, Penulis berprofesi sebagai peneliti muda dan berpengalaman sebagai Koordinator pada Penelitian didanai oleh INSINAS yang berjudul “Pengembangan Sistem Kallibrasi Multifunction Calibrator untuk Mendukung Penerapan Standar Nasional Indonesia SNI IEC: 60904–2 dalam Penjaminan Mutu Fotovoltaik”.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Hayati Amalia, S.T.,

Badan Standardisasi Nasional

Penulis dilahirkan di Kediri, Jawa Timur, pada tanggal 21 September 1990. Penulis menamatkan pendidikan sarjana di bidang Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada Tahun 2012. Penulis mulai bergabung di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada satuan kerja Pusat Penelitian Metrologi LIPI (P2M LIPI) di tahun 2015. Pada tahun 2019, karena adanya peraturan pemerintah yang mengharuskan P2M LIPI untuk bergabung pada Badan Standardisasi Nasional (BSN), afiliasi penulis berpindah dari LIPI ke BSN dan hingga sekarang bekerja di bawah Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN. Saat ini, penulis berprofesi sebagai peneliti pertama dan menjadi pelaksana teknis kalibrasi di Laboratorium SNSU Kelistrikan dan Waktu BSN dengan spesialisasi pada tegangan dan arus AC/DC



Nibras Fitriah Yayienda, S.T.,

Badan Standardisasi Nasional

Dilahirkan di Surabaya, 21 Juli 1991. Penulis menamatkan Pendidikan Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Fisika pada Tahun 2013. Penulis bergabung di Penelitian Metrologi LIPI pada tahun 2015 sampai 2019 dan selanjutnya bekerja di bawah Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia BSN sampai sekarang. Saat ini, penulis berprofesi sebagai peneliti pertama dan menjadi pelaksana teknis kalibrasi di Laboratorium SNSU BSN.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Miftahul Munir, S.T, M.S.E,
Badan Standardisasi Nasional

Lahir di Jambi 13 Juli 1987. Penulis menamatkan Pendidikan Sarjana Teknik Elektro (S.T.) di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2010 dan memperoleh gelar *Master of Science in Electrical Engineering* (M.S.E.) di Western Michigan University, Amerika Serikat pada tahun 2019. Penulis

bergabung di Pusat Penelitian Metrologi LIPI pada tahun 2014 sampai 2019 dan selanjutnya bekerja di bawah Pusat Riset dan Pengembangan SDM BSN sampai sekarang. Saat ini, Penulis memegang jabatan fungsional peneliti ahli pertama dan menjadi pelaksana teknis kalibrasi di Laboratorium SNSU BSN.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Metrologi Kelistrikan Terapan

Untuk Laboratorium Kalibrasi di Industri dan Perguruan Tinggi

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sebuah layanan kalibrasi atau pengukuran dan semakin banyaknya kebutuhan terkait sebuah dokumen acuan dalam ilmu pengukuran atau metrologi oleh masyarakat, sedangkan pengetahuan tentang terapannya secara mendalam terkait jenis peralatan yang digunakan dalam pengukuran, proses pengukuran, metode dan analisis ketidakpastian belum banyak ditemui, maka dibuatlah buku ini agar dapat digunakan sebagai panduan dalam proses kalibrasi bidang metrologi kelistrikan khususnya.

Buku ini memberikan informasi dan pemahaman terkait jenis peralatan atau standar yang digunakan, metode secara lebih mendalam untuk lingkup metrologi kelistrikan khusus parameter tegangan arus AC, resistansi, dan daya frekuensi radio. Bahkan, dalam buku ini juga dijelaskan bagaimana proses pengukuran dan contoh-contoh pengukuran serta sumber-sumber yang memengaruhi pengukuran, yang digunakan dalam analisis ketidakpastian.

Secara khusus, buku ini dapat digunakan para teknisi kalibrasi, teknisi laboratorium industri dalam proses kalibrasi untuk parameter tegangan, arus, resistansi, dan daya frekuensi radio. Buku ini juga dapat digunakan sebagai sumber referensi untuk berbagai kalangan, bahkan untuk para praktisi di perguruan tinggi sebagai acuan atau sumber terkait ilmu pengukuran di bidang kelistrikan.



Diterbitkan oleh:

LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI Lt. 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710
Telp.: (021) 573 3465 | Whatsapp 0812 2228 485
E-mail: press@mail.lipi.go.id
Website: lipipress.lipi.go.id | penerbit.lipi.go.id

10.14203/press.234



ISBN 978-602-496-206-7



9 786024 962067

Buku ini tidak diperjualbelikan.