

## ANALISIS KELAYAKAN REALISASI SATUAN TEGANGAN LISTRIK DC STANDAR INTERNASIONAL UNTUK PUSLIT KIM-LIPI BERDASARKAN DEFINISI QUANTUM DENGAN KETELITIAN DIBAWAH 0.1 PPM.

Hadi Sardjono

### Abstract

Recently, there are two technical methods for a realization of the international standard of dc voltage unit such as conventional Josephson Voltage Standard (JVS) and Programmable Josephson Voltage Standard (PJVS). These Both methods are capable to generate a dc voltage standard by using a Quantum theory which is defined as  $V_J = nN(hf/2e)$ . It is proved through this research that the realization of PJVS is more visible to be implemented in Puslit KIM-LIPI. The visibility of this PJVS is supported by it cheaper operational budget, it ordinary of operation technics, it measurement accuracy of 112 nV, and it lower accuracy ratio againts the standard cell of 0.006 : 1.

**Keywords:** visibility analyses, international standard, dc voltage unit

### 1. PENDAHULUAN

JVS atau *Josephson Voltage Standard* adalah sebuah sistem yang bisa membangkitkan tegangan listrik dc standar ( $V_{dc}$  standar) sesuai dengan tingkat eksitasi daya RF (frekuensi radio) pada sejumlah deretan berlapis antara bahan Superkonduktor dan isolator. Apabila deretan tersebut dalam keadaan bekerja maka indikasi pembangkitan tegangan listrik dc ( $V_J$ ) sebesar  $nN(hf/2e)$  yang dapat diperoleh berdasarkan karakteristik  $I$  sebagai fungsi dari  $V$  (tegangan), dimana  $I$  adalah arus bias.

Seiring dengan perjalanan waktu, perkembangan teknologi di bidang metrologi khususnya di bidang  $V_{dc}$  standar yang berbasis Quantum pun memasuki era kedua yaitu dari era JVS konvensional (JVS) ke era JVS tak konvensional (*Programmable JVS/PJVS*). Secara teknis kedua sistem ini dibedakan oleh metode pencatutan arus bias di mana untuk JVS konvensional dilakukan secara manual dan untuk PJVS dilakukan secara terprogram. Akan tetapi apabila ditinjau dari sisi ekonomisnya maka letak perbedaannya ada pada metode pengkondisian suhu operasional chip yaitu untuk JVS menggunakan Helium cair dan untuk PJVS menggunakan gas Helium.

Dari tahun 1980 sampai dengan sekarang, Puslit KIM-LIPI telah menetapkan besaran satuan kelistrikan  $V_{dc}$  direalisasikan oleh nilai rata rata dari sekelompok sel standar tipe zener. Nilai rata rata ini kemudian dijadikan sebagai nilai acuan besaran standar  $V_{dc}$  tertinggi di Indonesia atau sebagai standar nasional Indonesia. Spesifikasi teknis yang dimiliki oleh sel standar berdasarkan karakterisasi yang telah dilakukan secara rutin menunjukkan bahwa kestabilannya mencapai 2 ppm per tahun<sup>1)</sup>.

Untuk mempertahankan nilai kestabilan ini perlu dilakukan kalibrasi ke tingkat standar yang lebih tinggi ke Lembaga Metrologi Internasional. Proses pemeliharaan kompetensi setingkat di bawah standar internasional ini selain membutuhkan biaya yang cukup tinggi juga memakan waktu yang cukup lama.

Menurut pengamatan penulis, tingkat perkembangan kompetensi kemetrologian di Puslit KIM-LIPI khususnya untuk besaran  $V_{dc}$  standar dilakukan dengan 2 proses penelitian yaitu penelitian reguler (*reguler research*) yang berbasis sel standar dan penelitian lanjut (*advance research*) yang berbasis JVS. Pencapaian kompetensi ini dipergunakan untuk menciptakan kondisi mutu mantap yang mampu melakukan pemeliharaan ketelitian sel standar (standar sekunder) dan mampu meningkatkan kompetensi setara Internasional merealisasikan besaran  $V_{dc}$  berbasis Quantum berupa JVS (*Josephson Junction Standard*).

Setelah dilakukan penelitian kelayakan melalui dua proses pengukuran langsung terbukti bahwa secara ekonomis PJVS jauh lebih menguntungkan karena untuk operasional pengukuran dengan JVS telah memerlukan Helium cair sebanyak 60 liter/56 jam kerja sedangkan dengan PJVS hanya memerlukan gas Helium sejumlah 2.2 MPa/50000 jam kerja. Secara teknis PJVS dan JVS masing-masing mampu menghasilkan ketelitian pengukuran sebesar 112 nV dan 36 nV pada rentang tegangan listrik 10.000 000 volt. Walaupun PJVS memiliki ketelitian lebih rendah sebesar 20 nV terhadap JVS namun secara kompetensi sudah cukup berarti karena pendesiminisasian ketelitian ke sel standar bisa naik mencapai 3 digit yaitu dari sebesar 17  $\mu$ V menjadi 112 nV.

## 2. PRINSIP DASAR PEMBANGKITAN VDC BERBASIS QUANTUM.

Pada tahun 1911, Kamerlingh Onnes mengungkapkan berdasarkan Analisis laboratorium di Leiden bahwa Merkuri kehilangan sifat listrik resistif nya ketika didinginkan pada titik dingin Helium sebesar 4.2 K (-169°C). Fenomena baru ini dinamakan Superkonduktifitas. Tahun berikutnya dilanjutkan dengan pengungkapan untuk elemen-elemen metalika lainnya yang bersifat superkonduktifitas jika dikondisikan pada suhu rendah, tipikalnya antara 0.1 dan 9.2 K<sup>2)</sup>.

Pada 1962 sebelum masehi, Josephson menerbitkan artikel dampak Superkonduktifitas bersama Esaki and Giaever dan mendapat anugerah Nobel pada tahun 1973. Kontribusi mereka adalah prediksi *supercurrent* yang dapat mengalir antara dua elektrode superkonduktor yang dipisahkan dengan lapisan isolator yang sangat tipis (~10 Å) dan disebut jungsi SIS (*Superconductor-Insulator-Superconductor*).

Setahun berikutnya prediksi tersebut dibuktikan secara eksperimental dan disebut sebagai efek Josephson. Walaupun perhitungan sebenarnya untuk batas isolator namun sekarang sudah jelas bahwa efek Josephson menjadi lebih populer<sup>2)</sup>.

Ketika dua elektrode superkonduktor dikopel lemah oleh sebatas terowongan yang sempit dengan metal sederhana maka akan terjadi aliran *supercurrent* antara kedua elektrode superkonduktor tersebut. *Supercurrent*  $I_{sc}$  yang mengalir pada jalur lemah tersebut diberikan oleh Josephson sebagai fasa-arus *sebesar*,

$$I_{sc} = I_c \sin(\phi) \dots\dots\dots(1)$$

Dalam relasi tersebut variabel  $\phi$  menunjukkan beda fasa antara kedua elektrode elektrode superkonduktor dan variabel  $I_c$  menunjukkan aliran *supercurrent* maksimum yang melewati jalur lemah yang disebut sebagai arus kritis. Jika arus dialirkan melewati lapisan jungsi tersebut maka akan dihasilkan tegangan jatuh listrik. Dari persamaan (1) dapat dijelaskan bahwa jika beda fasa antara superkonduktor sama dengan 0 (nol) maka tidak akan terjadi aliran arus pada jungsi. Pada kondisi lain, jika beda fasa sebesar  $+\pi/2$  maka arus kritis akan tercapai.

### 2.1 Jungsi SNS yang Bisa Dikontrol.

Pada dasarnya arus kritis  $I_c$  adalah konstan sesuai dengan spesifikasi jungsi Josephson yang tergantung pada ketentuan jalur lemahnya. Sistem jungsi bisa memodifikasi  $I_c$  ke dalam terminal ganda (deret) jungsi S-N-S (*superconductor normal metal superconductor*)

dengan mereaksikan langsung pada keadaan (states) mekanika kuantum yang membawa *supercurrent* sehingga menciptakan sebuah transistor superkonduktor.

Pada sebuah jungsi SNS ada hubungan kuat antara energi elektron dalam metal normal N dan besar arus kritis  $I_c$ . Hal ini mengakibatkan munculnya pernyataan bahwa perjalanan *supercurrent* dalam sebuah jungsi SNS Josephson beda sekali dengan kasus SIS di mana perjalanan *supercurrent* terjadi melalui mekanika kuantum pen tunnel an dari sepasang tembaga dari satu superkonduktor ke yang lainnya. Dalam daerah normal sebuah jungsi SNS membentuk keadaan mekanika kuantum yang diakibatkan oleh kedekatan elektrode elektrode. Keadaan ini disebut Keadaan Batas Andreev (*Andreev bound states*) yang membawa *supercurrent* melalui daerah jungsi normal<sup>2)</sup>. Formasi tunak tersebut memungkinkan selama transportasi elektron terjadi dalam daerah normal yaitu koherensi fasa seperti fasa elektron yang datang dari satu sisi jungsi tertentu memiliki nilai terdefinisi kedatangan pada sisi lain. Pada struktur struktur metal, panjang koherensi fasa atau panjang koherensi akan bertambah dengan berkurangnya suhu yaitu dalam order mikron 0.1 K untuk ketebalan 50 nm kawat metal.

Hubungan antara arus kritis (Supercurrent) jungsi dan energi elektron dalam region normal (N) yang terdapat dalam jungsi SNS dapat dimengerti sebagai aliran *Supercurrent* di sebuah jungsi SNS yang disebut keadaan batas Andreev (*Andreev bound states*). Penghuni elektron di tingkat energi yang sama atau *state* yang sama dapat memblok *state* tersebut untuk transportasi *supercurrent*. Jadi, energi distribusi elektron dalam metal normal ditentukan Andreev *bound states* adalah tersedia untuk transportasi *supercurrent*. Dari sini terjadi hubungan langsung antara distribusi energi elektron dan arus kritis jungsi.

Kergantungan arus kritis sebuah jungsi Josephson SNS dari energi elektron dibentuk oleh suhu. Jika suhu jungsi SNS bertambah maka arus kritis berkurang. Pada tahun 1998 Morpurgo mengungkapkan bahwa kemungkinan terjadinya reaksi langsung energi elektron dalam area metal normal jungsi SNS adalah dengan memasang elektrode tambahan. Sehingga *Supercurrent* dapat dikontrol dengan mengatur suhu elektron pada area normal jungsi SNS.

### 2.2 Jungsi $\pi$

Ditetapkan sebuah kanal kontrol “ideal” yang secara prinsip berupa kawat metal yang dihubungkan ke penampungan ideal. Penampungan memiliki dua fungsi :

- Fungsi dimana semua elektron diemisikan dari penampungan ke kawat yang memiliki energi distribusi yang diberikan oleh distribusi Fermi-Dirac pada suhu penampungan atau masuknya elektron dari kawat kepenampungan ditermalisasi sepenuhnya sedemikian pula sebelum masuk ke kawat lagi.
- Fungsi dimana penurunan termis kedua penampungan dilakukan. Panas yang didiseminasikan kedalam penampungan dan kawat di buang dengan cepat dan untuk membebaskan penampungan agar menuju ke kondisi suhu yang sama digunakan bak refrigerator.

Distribusi energi elektron kawat metal yang tersebar dihubungkan diantara penampungan-penampungan dimana tegangan listrik  $V_c$  diaplikasikan. Ketergantungan sejumlah interaksi elektron elektron kawat merupakan pendistribusian energi elektron. secara termis dengan suhu ditinggikan atau sebuah distribusi langkah ganda.

Secara umum, lintasan transportasi elektron dikawat halus metal adalah tersebar. Bagian terlepas elastis rata rata jauh lebih pendek dari panjang kawat. Walaupun tanpa dicatu tegangan listrik kawat, penampungan dalam keadaan setimbang dan tidak ada jaringan aliran arus melalui kawat, tetapi elektron elektron menembus dari penampungan dengan sebuah formasi acak. Jika tegangan listrik  $V_c$  kecil dicatukan ( $\sim mV$ ), proses penembusan ini dilanjutkan dengan membentuk jaringan kecil arus elektron. Arus partikel jaringan ini menjadi diabaikan apabila dibandingkan dengan gerakan acak elektron elektron, karena energi Fermi untuk metal ( $\sim 1eV$ ) jauh lebih tinggi daripada energi ekstra yang disuplai  $V_c$  ke elektron elektron<sup>2</sup>. Ditengah tengah kawat akan selalu ditemukan sejumlah elektron yang datang dari sisi kanan dan sebanding dengan sejumlah elektron yang datang dari penampungan kiri.

Keberadaan penyebaran elektron-photon merupakan dua situasi yang berbeda dan hal ini akan muncul jika :

- Elektron-elektron berinteraksi dengan kuat antar satu dengan yang lainnya. Secara detailnya dapat diformulasikan sebagai waktu penembusan lewat kawat  $t_D$  merangsang waktu perinteraksian elektron elektron  $t_{e-e}$ . Energi ekstra tegangan listrik

aplikasi  $V_c$  didistribusikan balik diantara mereka (elektron-elektron), menghasilkan sebuah distribusi energi Fermi-Dirac sistem elektron dengan suhu efektif  $T_{eff}$ .

- Pertukaran energi antara elektron elektron kawat adalah sangat kecil  $t_D < t_{e-e}$ . Elektron elektron mempertahankan energinya ketika terjadi proses pembalikan kawat. Pendistribusian energi elektron ditengah tengah kawat adalah superposisi normalisasi ulang pendistribusian energi kedua penampungan, yang dikumpulkan ulang sebuah struktur langkah ganda jika  $V_c$  melampaui rambatan termis dari pendistribusian energi dalam penampungan. Jelas bahwa pendistribusian energi elektron adalah non-termis.

#### *Jungsi $\pi$ yang Dapat Dikontrol.*

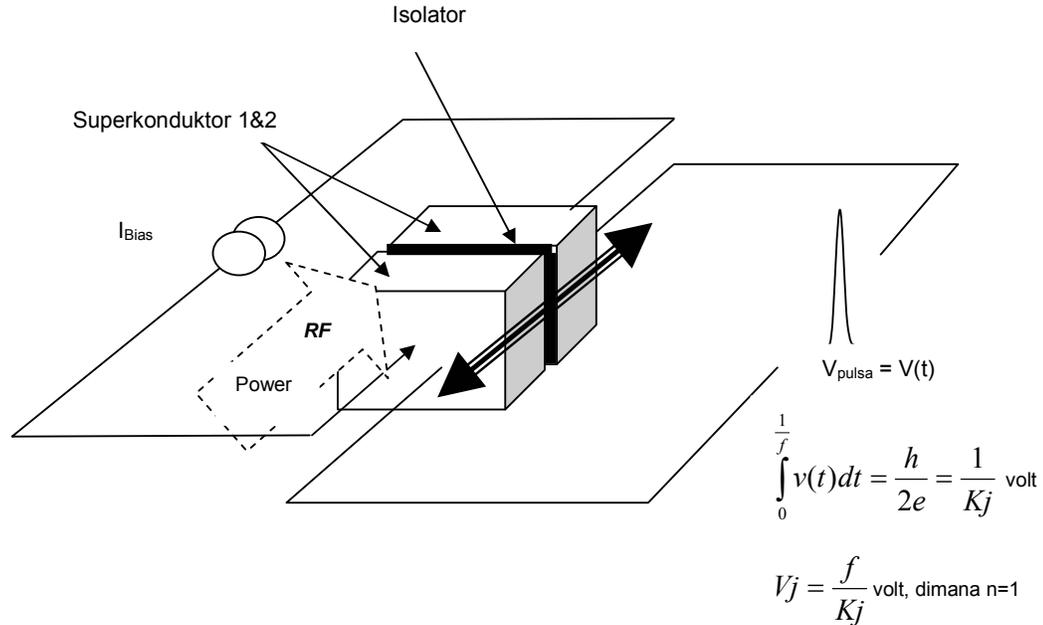
Dua penampungan yang tebal dan besar membentuk pola dasar sebuah kawat *mesoscopic* dengan panjang  $L$  yang memiliki dua bentangan ditengah - tengahnya. Bentangan bentangan ditutupi dengan dua elektrode Niobium, sehingga membentuk sebuah jungsi SNS ditengah tengah kanal kontrol. Untuk hubungan fasa supercurrent sekarang diberikan oleh  $I_{sc} = - I_c \sin(\varphi) = I_c \sin(\varphi + p)$

#### *Aplikasi jungsi- $\pi$ untuk sistem.*

Keadaan arus nol dengan fasa  $\pi$  antara dua elektrode elektrode superkonduktor :

Walaupun jungsi-jungsi  $p$  diketahui dari superkonduktor-superkonduktor dengan  $-T_c$  tinggi dan SFS jungsi-jungsi Josephson dengan  $F$  sebuah ferromagnet cair, tetapi di sistem ini dijelaskan hanya salah satu yang memungkinkan dapat melakukan pengontakan antara kondisi konvensional dan kondisi- $\pi$ . Perbandingan detail secara teori telah dapat diperlihatkan bahwa ukuran supercurrent di  $\pi$ -state dapat tereduksi oleh penyebaran elektron elektron kawat emas. Hal ini dapat diperbaiki dengan menggunakan material lainnya seperti tembaga atau perak. Batas waktu penyebaran sesungguhnya dari elektron elektron sebuah jungsi- $\pi$  metal telah diukur, dan menunjukkan kondisi transisi pada suhu sampai dengan 4.2 K dengan *supercurrent* yang sangat kecil.

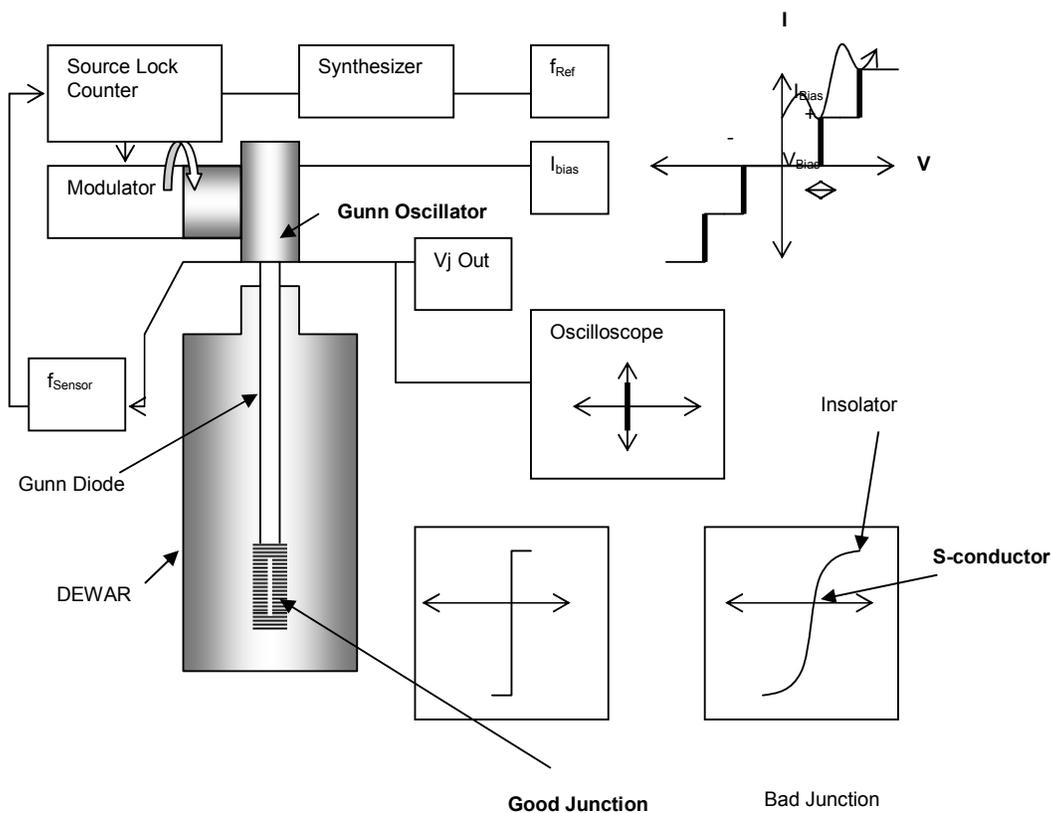
### 3. PRINSIP DASAR PENGUKURAN SISTEM SIS KONVENSIONAL



Gambar 1 Prinsip Dasar Pembangkitan Vdc Berdasarkan Sistem *Josephson Voltage Sistem* (JVS Konvensional).

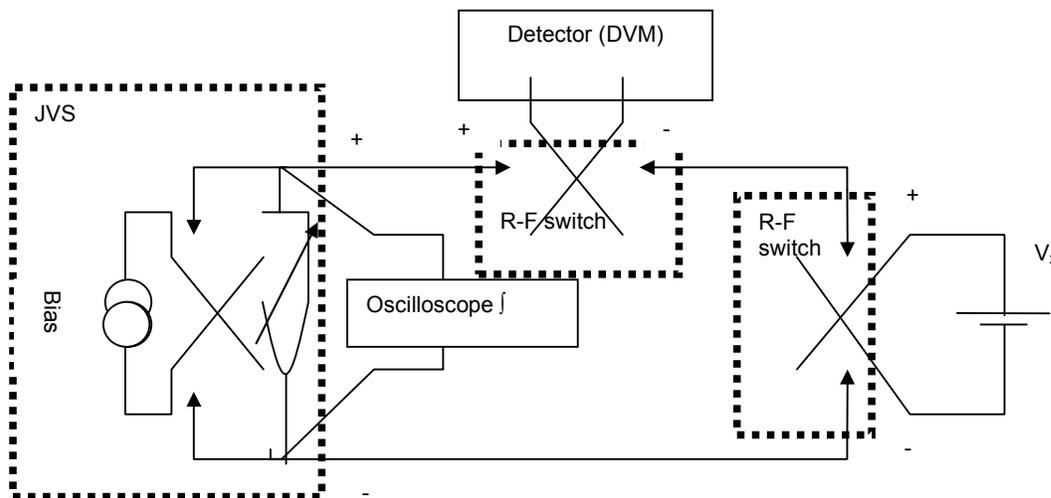
Keterangan gambar :

- $V_{pulsa} = V_j = n.f/K_j$ , dimana  $K_j = 2e/h$
- $V_j$  : Tegangan listrik emf Josephson Junction
- $v(t)$  : amplitudo tegangan output sebagai fungsi t.
- $n$  : Jumlah deret
- $f$  : Frekuensi ( $f = 75 \text{ GHz}$ )
- $K_j$  : Konstanta JJ ( $= 483597.9 \text{ GHz/V}$ )
- $e$  : jumlah aliran muatan elektron
- $h$  : konstanta Plank's



Gambar 2 Rangkaian Dasar Sistem Pembangkitan V<sub>dc</sub>

### 3.1 Rangkaian Pengukuran Berbasis JVS<sup>3)</sup>



Gambar 3 Sistem Pengukuran Sel Standar (V<sub>x</sub> Atau UUC) Menggunakan JVS (Josephson Voltage System Konvensional)

**3.2 Mengset Sistem dan Sistem Pengukuran**

*Mengset bagian mekanik*

1. Lepas pengikat kantong *silica* kristal dari ujung batang Gunn-diode dimana jungsi berada.
2. Segera masukkan batang Gunn-diode kedalam DEWAR yang berisi Helium cair sebanyak 60 liter secara perlahan-lahan. Proses pendinginan ini menghasilkan tekanan ruang dalam DEWAR karena proses kondensasi yang terjadi begitu cairan Helium menyentuh batang Gunn-diode. Tekanan lebih ruang DEWAR dapat dijaga secara baik berdasarkan penurunan batang Gunn-diode yang disertai dengan pembukaan valve pembuangan ketika indikasi valve kontrol terbuka.
3. Agar pada saat operasi pembangkitan tegangan listrik tidak terjadi pembuangan debit Helium berlebih maka seal antara batang Gunn-diode dan leher Dewar harus dijaga sebaik-baiknya.
4. Jika sistem terkondisi bebas bocor maka sekali pengisian dapat dioperasikan selama 168 jam (7 hari) sedangkan sekali pengukuran dibutuhkan waktu paling lama 168 jam (7 hari).

*Proses pengukuran*

Sebuah pengukuran antara sistem *Josephson Voltage System* (JVS) tipe SIS dan sebuah sel standar (Zener Diode) tipe JF-732B telah dilakukan dengan metode perbandingan. Sistem pengukuran ini selalu dilakukan dalam rangka untuk mendesiminasikan nilai standar tegangan listrik dc 10 V.

1. Frekuensi standar yang diperoleh dari laboratorium Frekuensi dikuatkan terlebih dahulu dengan menggunakan Penguat Daya sebagai eksitasi Daya RF yang dilakukan dengan menyetel Synthesizer pada frekuensi 75.000 000 GHz.

2. Output frekuensi di baca oleh Counter dan di Lock.
3. Mengatur  $I_{bias}$  untuk mendapatkan step tegangan listrik keluaran JJ dan mengatur  $V_{bias}$  untuk mendapatkan kualitas konstan JJ.
4. Mencari tegangan listrik konstan jungsi sebesar rentang yang diinginkan (1 V atau 10 V) pada polaritas tegangan listrik pengukuran tertentu dengan bantuan sebuah Oscilloscope dan DVM 8.5 digit dan mencatat penunjukan frekuensi Synthesizer.
5. Mengatur polaritas pengukuran berikutnya dilanjutkan dengan mengatur daya RF dan menyetel Synthesizer untuk keluaran frekuensi eksitasi.
6. Ulangi langkah 3 sampai dengan 4.
7. Loncatan step tegangan listrik JJ pada saat pembacaan tegangan listrik output yang diikuti oleh loncatan beda tegangan listrik antara  $V_j$  dan  $V_x$  yang ditunjukkan oleh Detektor dapat ditanggulangi dengan mengatur daya RF.

Data hasil pengukuran kemudian diproses secara matematis untuk mendapatkan 2 nilai yaitu tegangan listrik sebenarnya yang dibangkitkan oleh JVS. Nilai JVS ini selanjutnya digabung dengan nilai selisih antara nilai JVS sehingga nilai UUC dapat diperoleh sebagaimana perhitungan berikut,

$$f = 75\,726\text{ GHz}$$

$$V_j = 9.999\,959\text{ volt}$$

$$K_j = 483\,597.9\text{ GHz/V}$$

$$n = \frac{V_j \times K_j}{f} = \frac{9.999959 \times 483597.9}{75.726} = 63861$$

Tabel 1 Hasil Pengukuran 1

	Detector +	Detector -
DUT -	10 000 0363	10 000 0368
DUT +	10 000 0364	10 000 0360

$$f_m = \frac{100000363 + 100000368 + 100000364 + 100000360}{4} = 100000365.75$$

$$V_{j-1} = \frac{n \times f_m}{K_j} = \frac{63861 \times (75.726 \times \frac{100000365.75}{10000000})}{483597.9} = 9.999\,951\,971\text{ volt}$$

Tabel 2 Hasil Pengukuran 2

	Detector +	Detector -
DUT +	10 000 0364	10 000 0361
DUT -	10 000 0364	10 000 0367

$$f_m = \frac{100000364 + 100000361 + 100000367 + 100000364}{4} = 100000364$$

$$V_{j-2} = \frac{n \times f_m}{K_j} = \frac{63861 \times (75.726 \times \frac{100000364}{10000000})}{483597.9} = 9.999\ 951\ 796 \text{ volt}$$

$$V_j \text{ rata-rata} = \frac{V_{j-1} + V_{j=2} + \dots + V_{j-n}}{n} \text{ volt}$$

Dan nilai ketidakpastian pengukuran baik tipe A (*Experimental Standard Deviation of Measurement* atau ESDM) maupun tipe B atau secara keseluruhan yang disebut sebagai nilai

ketidakpastian lanjut dapat diperoleh seperti berikut:

Tabel 3 Data Hasil Pengukuran JVS

Data 1 (MHz)	Data 2(MHz)	Data 3 (MHz)	Data 4 (MHz)	Data 5 (MHz)	
10.0000365	10.0000363	10.0000364	10.0000364	10.0000365	
10.0000361	10.0000368	10.0000361	10.0000367	10.0000360	
10.0000364	10.0000364	10.0000364	10.0000365	10.0000364	
10.0000368	10.0000360	10.0000367	10.0000361	10.0000368	
10.00003645	10.00003638	10.00003640	10.00003643	10.00003643	Rata-rata

Berdasarkan beberapa variabel yang telah ditetapkan sebagai,

$$T_B \text{ (time base)} = 10.00000 \text{ MHz}$$

$$V_j = 9.999959 \text{ V}$$

$$K_j = 483597.9 \text{ GHz/V}$$

$$F_s \text{ (Frekuensi sensor)} = 75.726275 \text{ GHz}$$

$$n \text{ (jumlah jungsi)} = 63861.3$$

maka nilai ESDM dapat diperoleh sebagai berikut:

Tabel 4 Hasil Perhitungan ESDM

No.	V <sub>j</sub> (V)	Xi-Xm	(Xi-Xm) <sup>2</sup>
1	9.999951846	3.50E-08	1.22E-15
2	9.999951771	-4.00E-08	1.60E-15
3	9.999951796	1.00E-08	1.00E-16
4	9.999951821	1.00E-08	1.00E-16
5	9.999951821	1.00E-08	1.00E-16
Mean (V)	= 9.999951811	3.50E-08	1.22E-15
SD	= 2.80E-08	Siq.(Xi-Xm) <sup>2</sup> = 3.12E-15 V	
ESDM	= 1.25E-08		

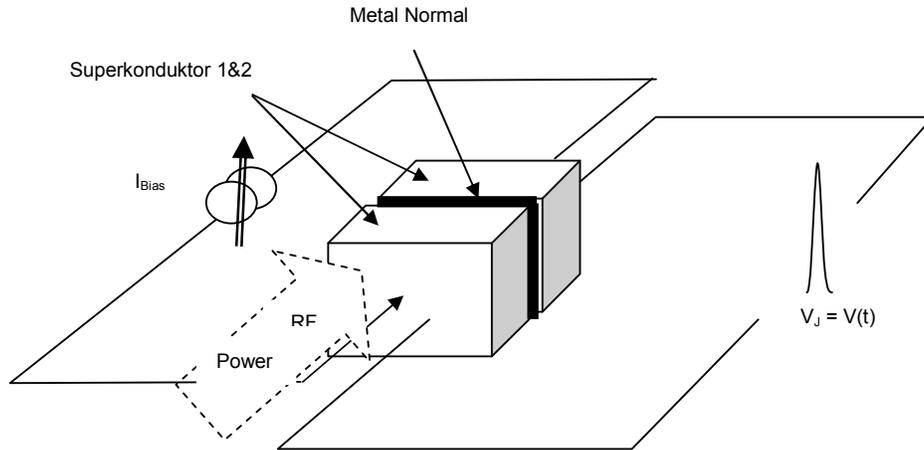
Tabel 5 Perhitungan Ketidakpastian Lanjut

Sumber Ketdpstian	$U_{Lanj-atau}$ $U_i$ (nV)	Probabilitas Distribusi	Derajat Kebebasan	Tipe	$u_i$ (nV)	Koef. Sens.(c)	$c.u$	$c^2.u^2$
Fluktuasi acak	$U_1$	T	4	A	13.0	1	13.0	169.0
Frekuensi glb.mikro	$U_2$	Segi-3	$10E^{+21}$	B	4.1	1	4.1	16.7
Kebocoran	$U_3$	Segi-4	$10E^{+21}$	B	0.6	1	0.6	0.3
Termis Residual	$U_4$	T	$10E^{+21}$	A	1.0	1	1.0	1.0
Detektor NanoVolt	$U_5$	Segi-4	$10E^{+21}$	B	1.0	1	1.0	1.0
							$U_{comb.} = 13.7$ nV	
							$DOF_{eff} = 4.9$	
							$CF(k) = 2.6$ (CL95%)	
							$U_{exp} = 35.6$ nV	

Berdasarkan perhitungan diatas<sup>4)</sup> dapat diperoleh sebuah argumentasi teknis bahwa sistem pengukuran sel standar dengan

menggunakan sebuah sistem JVS mampu mencapai ketelitian sampai 35.6 nV.

**4. PRINSIP DASAR PENGUKURAN SISTEM SNS TAK-KONVENSIONAL (PROGRAMMABLE)**



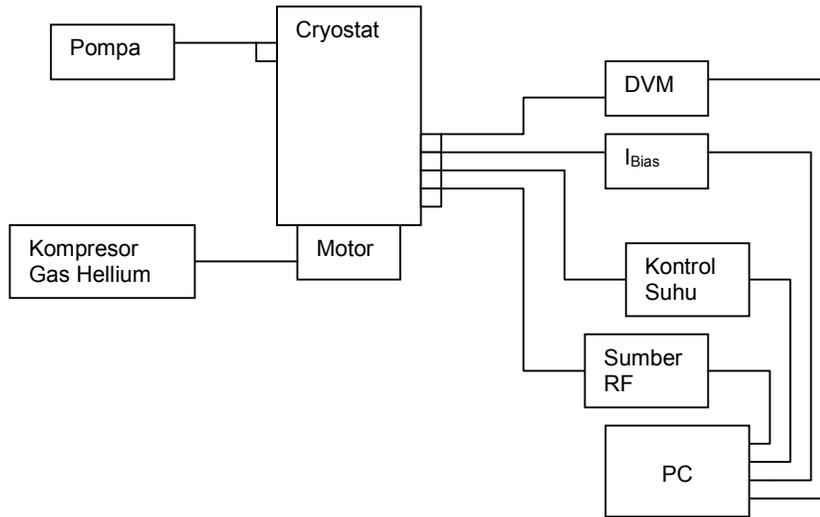
Gambar 4 Prinsip Dasar Pembangkitan Vdc Berdasarkan Sistem Jungsi SNS JVS Tak-Konvensional (PJVS Atau Programmable Josephson Voltage System)

Keterangan gambar:

$$V_j^{5)} = f.N_{JJ}/K_j = 68 \times N \quad (-157 \leq N \leq 157)$$

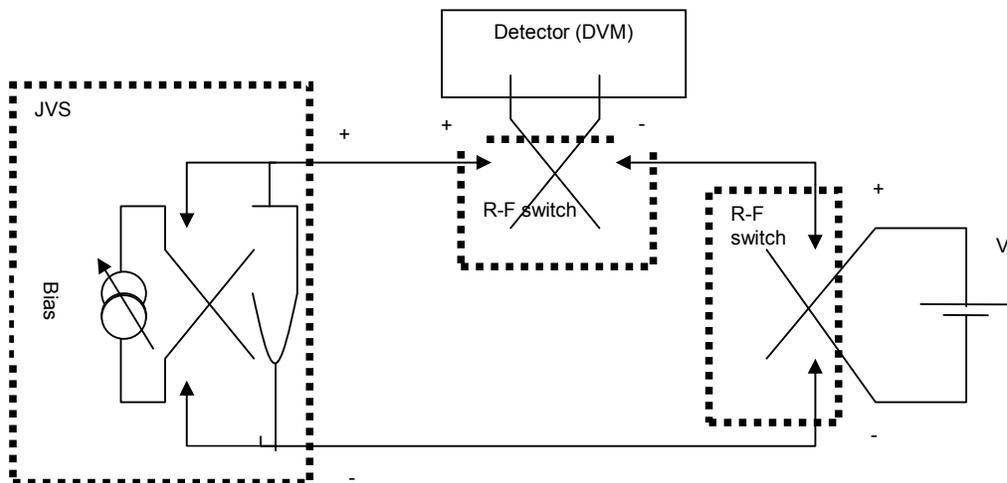
dimana  $N_{JJ} = 2048 \times N$

- $V_j$  : Tegangan listrik emf Josephson Junction
- $n$  : Jumlah deret
- $f$  : Frekuensi ( $f = 16$ . GHz)
- $e$  : jumlah aliran muatan elektron
- $h$  : konstanta Plank's



Gambar 5 Rangkaian Dasar Sistem Pembangkitan VDC Programmable JVS (*Josephson Voltage System* Tak-Konvensional)

#### 4.1 Rangkaian Pengukuran Berbasis PJVS



Gambar 6 Sistem Pengukuran Sel Standar ( $V_x$  atau UUC) Menggunakan PJVS (*Programmable Josephson Voltage System*) Konvensional

#### 4.2 Mengset Sistem dan Sistem Pengukuran

Sebuah pengukuran antara sistem Programmable Josephson Voltage System (PJVS) tipe SNS dan sebuah sel standar (Zener Diode) tipe JF-732B dapat dilakukan dengan metode perbandingan. Sistem pengukuran ini selalu dilakukan dalam rangka untuk

mendesiminasi nilai standar tegangan listrik dc 10 V

*Mengset bagian mekanik*

1. Mengkoneksi jungsi pada dudukan yang tersedia di ujung Gunn Diode dan terletak di dalam tangki Cryostat (DEWAR).
2. Mengkondisikan ruang Cryostat dengan mengisi gas Helium yang dikontrol oleh

sebuah kompresor. Proses pendinginan ini dihasilkan oleh tekanan ruang dalam Cryostat sebesar 2.3 kPa. Tekanan lebih ruang Cryostat dapat dijaga secara baik berdasarkan pembukaan regulator valve pembuangan kompresor ketika indikasi valve kontrol melebihi 2.3 kPa.

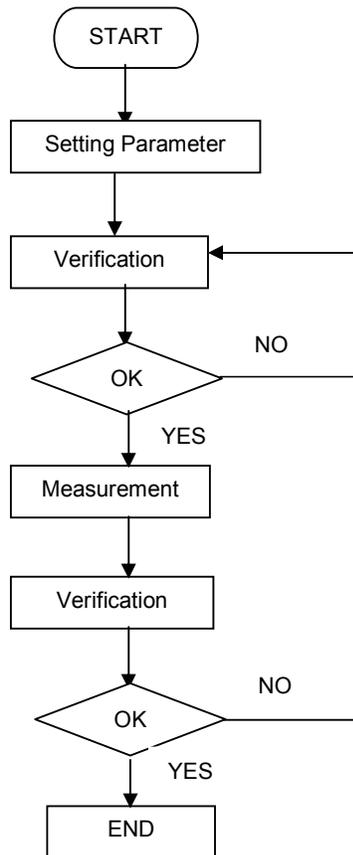
3. Agar pada saat operasi pembangkitan tegangan listrik tidak terjadi pembuangan debit gas Helium maka valve utama dan valve bantu pada Cryostate harus dijaga sebaik-baiknya pada posisi tertutup.
4. Jika sistem terkondisi bebas bocor maka sekali pengisian dapat dioperasikan selama 50000 jam sedangkan sekali pengukuran dibutuhkan waktu paling lama 48 jam (2 hari).

*Proses pengukuran*

1. Frekuensi standar yang diperoleh dari laboratorium Frekuensi dikuatkan terlebih dahulu dengan menggunakan Penguat Daya sebagai eksitasi Daya RF pada frekuensi 16 GHz.
2. Output frekuensi dapat di baca oleh Counter.

3. Menjalankan program yang telah tersedia dengan menggunakan komputer *Notebook* langkah pembangkitan tegangan listrik JJ untuk 1V atau 10V dan langkah pengukuran secara terurut diantaranya Verifikasi ke 1 (proses eliminasi gangguan internal jungsi), Pengukuran, Verifikasi ke 2 Hasil pengukuran.

Pada prinsipnya proses pengukuran PJVS terhadap sel standar dilakukan sama seperti halnya yang dilakukan pada sistem pengukuran JVS konvensional yaitu pengukuran polaritas maju (*Forward*) dan polaritas membalik (*Reverse*)<sup>6</sup>. Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan sebanyak 4 kali (sesuai dengan keperluan) yang masing masing pengukuran diperoleh berdasarkan 10 pengukuran polaritas maju dan polaritas mundur dimana secara perangkat lunak telah terprogram untuk melakukan analisis data (lihat Gambar 4) pula telah menghasilkan nilai pengukuran sebesar  $V_j = 9.999\ 979\ 648\ V$  dan nilai ketidakpastian atau ESDM sebesar  $\pm 37\ nV$ .



Gambar 7 Bagan Alir Program Proses Pengukuran Sistem PJVS

Nilai ESDM merupakan nilai ketidakpastian tipe A yang apabila digabung dengan sumber sumber ketidakpastian lainnya (tipe B) dapat diperoleh sebuah nilai ketidakpastian lanjut yang dianggap sebagai tingkat kompetensi sistem pengukuran. Seperti terlihat pada Tabel 5 berikut

ini menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian lanjut sebesar 111.5 nV

Tabel 6 Perhitungan Ketidakpastian Lanjut

Sumber Ketdpstian	$U_{Lanj.}$ atau $U_i$ (nV)	Probabilitas Distribusi	Derajat Kebeb asan	Tipe	$u_i$ (nV)	Koef. Sens.(c)	$c.u$	$c^2.u^2$
Fluktuasi acak	$U_1$	T	3	A	37.0	1	37.0	1369.0
Frekuensi glb.mikro	$U_2$	Segi-3	$10E^{+21}$	B	12.3	1	12.3	151.3
Kebocoran	$U_3$	Segi-4	$10E^{+21}$	B	1.8	1	1.8	3.2
Termis Residual	$U_4$	T	$10E^{+21}$	A	3.0	1	3.0	9.0
Detektor NanoVolt	$U_5$	Segi-4	$10E^{+21}$	B	1.0	1	1.0	1.0
							$u_{comb.} = 39.2$ nV	
							$DOF_{eff} = 4$	
							$CF(k) = 2.85$ (CL95%)	
							$U_{exp} = 111.5$ nV	

### 5. ANALISIS DATA

Sampai saat ini, Puslit KIM-LIPI telah memiliki 8 buah sel standar yang masing masing sel standar memiliki dua rentang ukur yaitu 1.018 000 V dan 10.000 000 V. Untuk sementara ini, tingkat ketelitian yang bisa dicapai untuk masing masing rentang ukur adalah 1.7 nV dan 17 nV . Metode pemeliharaan ketelitian dilakukan secara grup dan berkala satu tahun sekali. Sebagai standar utamanya diambil salah satu sel standar yang secara berkala pula yaitu dua atau tiga tahun sekali dikalibrasi ke Laboratorium Metrologi Internasional atau NMI (*National Measurement Institute*) luar negeri. Proses pemeliharaan ini selain membutuhkan dana yang tidak sedikit (menurut pengalaman pada tahun 2004 biaya kalibrasi membutuhkan dana AUSS\$ 1500 + uang transport pengiriman) juga membutuhkan waktu yang cukup lama (menurut pengalaman pada tahun yang sama bisa menghabiskan waktu 1 tahun).

Sebagai sebuah laboratorium kelistrikan yang berada didalam sebuah Lembaga Pengukuran Nasional (NMI atau *National Measurement Institute*) yang dalam hal ini bertanggungjawab untuk memelihara ketelitian satuan ukuran tegangan listrik dc sebagai

standar Nasional dan mendiseminasikannya ke standar laboratorium kalibrasi maka secara teknis harus dilandasi oleh tingkat kompetensi yang maksimal yang bertaraf internasional. Menurut kondisi kompetensi yang berbasis sel standar sudah dimulai sejak tahun 1980 an dan peluang untuk melangkah kedepan menuju tingkat standar realisasi telah dibuka oleh Lembaga maka berikutnya diperlukan proses persiapan yang matang baik sesuai dari sisi pertimbangan teknis maupun ekonomis.

Sejak tahun 1960 an, standar realisasi tegangan listrik dc standar telah dilandasi oleh sebuah teorema Quantum. Adapun prinsip dasar pembangkitan  $V_J$  (tegangan listrik dc Josephson) yang sesuai dengan teorema Quantum dapat dilakukan dengan menggunakan dua model yaitu model JVS konvensional atau model JVS tak-konvensional (PJVS). Agar bisa diperoleh faktor penggunaan yang efektif maka perlu dibuktikan melalui peninjauan baik dari sisi teknis maupun ekonomis (lihat Tabel 6). Berdasarkan hasil peninjauan proses pengukuran yang dilakukan langsung oleh peneliti terhadap kedua metode tersebut di atas ternyata masing masing memiliki kelebihan dan kekurangan tertentu.

Tabel 7 Perbandingan Pembangunan Sistem JVS Konvensional dan JVS Tak Konvensional

Unsur penilaian Sistem JVS	Biaya operasional	Proses pengukuran	Kemampuan pengukuran	Rasio ketelitian dengan sel std	Rasio Harga
Konvensional	Mahal	komplek	Sangat teliti	36 nV : 17 μV	1
Programmable Tak-konvensional	Murah	Sederhana	Cukup teliti	112 nV : 17 μV	0.5

Keterangan tabel:

- Biaya operasional: model JVS membutuhkan media pendingin DEWAR sebanyak 60 liter Helium cair yang sampai saat ini harus diperoleh secara import dari luar negeri. Sejumlah tersebut hanya bisa dipergunakan untuk satu kali proses pengukuran. Model JVS membutuhkan media pendingin gas Helium sebanyak 2 MPa (dengan persediaan yang ada pada saat pembelian sebanyak 200 barg atau 9.1 m<sup>3</sup>) yang dapat diperoleh dari dalam negeri dan lebih murah. Sekali pengisian dapat dipergunakan untuk proses pengukuran sebanyak banyaknya (sekali proses pengukuran membutuhkan waktu 24 jam sedangkan umur gas dalam tangki cryostat bisa mencapai 50000 jam).
- Proses pengukuran: Penggunaan JVS konvensional dalam sistem pengukuran sel standar bisa membutuhkan waktu maksimal 5 hari karena dilakukan secara manual. Penggunaan PJVS cukup maksimal dua hari kerja (24 jam) karena dilakukan secara otomatis.
- Kemampuan pengukuran: JVS konvensional bisa melakukan pengukuran dengan ketelitian mencapai  $\frac{37}{112} \times 100 \% = 33 \%$  lebih kecil dibandingkan PJVS.
- Rasio ketelitian terhadap sel standar: sesuai dengan tingkatan realisasi dan ketelitian yang dicantumkan pada bagan ketertelusuran untuk satuan tegangan listrik dc standar maka sel standar berada di tingkatan kedua dibawah JVS. Dari hasil penelitian ini, tingkatan realisasi ini dapat dinyatakan dalam bentuk nilai rasio yaitu sebesar 36 nV : 17 μV (0.002 : 1) untuk metode JVS terhadap Sel Standar dan 112 nV : 17 μV (0.006 : 1) untuk metode PJVS terhadap Sel Standar.
- Rasio harga: penetapan nilai ini diambil secara riil berdasarkan nilai pembulatan

harga sebenarnya PJVS dan harga termurah JVS konvensional yaitu antara 2 : 1.

## 6. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah dilakukan penelitian kelayakan terhadap dua sistem JVS yaitu model konvensional dan tak-konvensional (PJVS) baik dari sudut Analisis teknis maupun ekonomis maka dapat disimpulkan bahwa standar realisasi satuan kelistrikan Vdc yang paling layak untuk dibangun di Puslit KIM-LIPI adalah sistem PJVS. Demikian juga halnya dari segi kepentingan perawatan ketelitian dapat dilakukan dengan cara bergabung dalam program pembangunan antar laboratorium metrologi Nasional negara lainnya yang penyelenggaraannya dilakukan secara rutin dan tanpa dipungut biaya. Data hasil perbandingan tersebut kemudian didokumentasikan sebagai nilai standar Nasional yang didiseminasikan ke tingkat standar dibawahnya yang diwakili oleh sel standar. Selanjutnya nilai sel standar ini didiseminasikan ke instrumen instrumen standar yang berketelitian lebih rendah yang dimiliki oleh laboratorium laboratorium kalibrasi yang ada di Indonesia.

Mengingat pada proses pemeliharaan ketelitian PJVS ini melibatkan keikutsertaan negara lain sehingga harus dilakukan proses pengiriman instrumen transfer standar maka perlu dipersiapkan secara mantap dari sisi teknis dan secara matang dari sisi transportasi.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Hadi Sardjono, "Penetapan Ketelitian Sistem Pengukuran Tegangan DC Standar Nasional 1 V Pada Ketelitian 1.7 ppm", Instrumentasi – Publikasi Ilmiah HIMII, ISSN-0125 – 9202 Volume 30 No. 1 Januari – Juni 2006.
2. Jorden A. Van Dam, Yuli V. Nazarov, Erik P. A. M. Bakkers, Silvano De Franceschi & Leo P. Kouwenhoven, "Supercurrent reversal in

- Quantum dots*“, Nature International Weekly Journal of Science, Nature Publishing Group, 22 June 2006.
3. Kyu-Tae Kim, In Seon Kim, Yong Myung Cho, Rae Duk Lee, Jong Chul Park, *“Establishment of Josephson Array Voltage Standard Sistem at KRISS”*, IEEE Transaction On Instrumentation and Measurement, Vol. 40, No. 2, April 1991.
  4. KT Kim, MS Kim, Y. Chong, WS Kim, W. Song, *“Uncertainty Evaluation of Josephson Voltage Standard in the Level Of  $10^{-10}$ ”*, *The Korean Superconductivity Society*, Vol. 9(1), 1-125, 2007.
  5. H. Yamamory, H. Ishizaki, and A. Shoji, *“10 V Programmable Josephson Voltage Standard Circuits Using NbN/TiNx/NbN/TiNx/NbN Double-Junction Stacks”*, Appl. Phys. Lett., Vol, 88, pp. 0042503\_1-3, Jan.2006.
  6. T. Yamada, Y. Muramaya, H. Yamamori, H. Sasaki, A. Shoji, A. Iwasa, H. Nishinaka, and Y Nakamura, *“Comparison Of a 10-V Programmable Josephson Voltage Standard and A SIS-based Josephson Voltage Standard Using a Zener Diode”*, Nanoelectronics Research Institute, National Metrology Institute of Japan, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, 2008, Japan.

#### BIODATA

##### R. Hadi Sardjono

Dilahirkan di Bangkalan, 21 April 1960. Menamatkan jenjang Pasca Sarjana, Opto-elektroteknika dan Aplikasi Laser, Universitas Indonesia pada tahun 1991. Penulis adalah Peneliti Madya dalam Metrologi Kelistrikan sejak 2003 dengan profesi Metrologi Kelistrikan. Alamat Penulis adalah Puslit KIM-LIPI, Komplek PUSPIPTEK, Cisauk, Tangerang 15320 – BANTEN/7560658 ext. 3058.