

PENGARUH FREKUENSI DAYA RADIO FREKUENSI PADA STANDAR NASIONAL V_{DC} BERKETELITIAN LEBIH BAIK DARI 0.1 ppm. *The influence of Radio Frequency Power To The National Standard of V_{DC} With Accuracy better than 0.1 ppm*

R. Hadi Sardjono

Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi – LIPI
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang 15314, Banten
e-mail: sar_djono@yahoo.com

Diterima: 4 Februari 2013, Direvisi: 13 Mei 2013, Disetujui: 3 Juni 2013

Abstrak

Nilai standar V_{DC} Nasional yang berada di Laboratorium metrologi Kelistrikan Puslit. KIM – LIPI merupakan hasil proses pembangkitan tegangan dengan prinsip teorema kuantum berupa sebuah *Programmable Josephson Voltage System (PJVS)*. Menurut teorema kuantum, nilai V_{DC} yang dibangkitkan oleh sistem Josephson ini ditentukan oleh variabel jumlah deret (n) *Superconductor Insulator Superconductor (SIS)* dan frekuensi daya gelombang mikro (f). Penelitian ini dilakukan untuk menetapkan secara kuantitas tingkat perubahan ketelitian PJVS dan tingkat ketertelusurannya. Berdasarkan hasil pengamatan terhadap proses pengukuran sebuah sel standar dengan PJVS dapat disimpulkan bahwa dari pengaruh komponen frekuensi dengan implementasi frekuensi berbasis Cesium telah dapat meningkatkan ketelitian pengukuran pada rentang 1 V dan 10 V masing masing sebesar 15 % dan 55 %. Peningkatan ketelitian ini dapat menyederhanakan bagan ketertelusuran besaran V_{DC} dari PJVS ke frekuensi standar.

Kata Kunci : Radio frekuensi, standar nasional V_{DC} , ketelitian.

Abstract

The default values of V_{DC} National standard that located in Electrical Metrology Laboratory of Puslit. KIM - LIPI is the result of voltage generation process by principle quantum theorems form a PJVS (Programmable Josephson Voltage System). According to quantum theorem, V_{DC} value generated by Josephson system is determined by a variable number of rows (n) SIS (superconductor insulator superconductor) and microwave power frequency (f). This research was conducted to determine the accuracy level of PJVS quantitatively and its traceability level. Based on the observation of the process of measuring a standard cell with PJVS can be concluded that the influence of the frequency components of the frequency-based implementation of Cesium has been increased the measurement accuracy in the range of 1 V and 10 V respectively 15% and 55%. The increase in accuracy can be simplified the V_{DC} traceability chart from PJVS to standard frequencies.

Key words : Radio frequency, V_{DC} national standard, accuracy.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada metrologi kelistrikan terdapat dua jenis pembangkit standar V_{DC} yang telah dipercaya sebagai standar acuan sebuah laboratorium yaitu sistem sel standar dan sistem Tegangan Josephson (*Josephson Voltage System/ JVS*). Sesuai dengan perkembangan teknologi yang terjadi maka tingkat ketelitian sel standar ini menjadi berada dibawah JVS walaupun secara sejarah merupakan generasi standar pertama untuk satuan tegangan. Sel standar ini telah dibangun berdasarkan proses pembangkitan yaitu secara kimia dan secara elektronik, sedangkan JVS dibangun berdasarkan proses kuantum.

Saat ini kompetensi Puslit. KIM – LIPI di bidang standar V_{DC} telah meningkat dari tipe sel standar menjadi tipe Programmable Josephson Voltage System (PJVS) yaitu JVS berbasis terprogram. Tingkatan ketelitian V_{DC} yang dimiliki oleh PJVS ini adalah yang tertinggi di Indonesia sehingga dapat dinyatakan sebagai standar nasional. Secara teknologi, PJVS ini setara dengan standar internasional JVS karena sama sama berlandaskan teorema kuantum. Oleh karenanya, ketelitian semua peralatan standar besaran V_{DC} yang ada di laboratorium metrologi kelistrikan Puslit. KIM – LIPI telah dapat dipelihara secara mandiri (tidak tergantung dengan standar NMI negara lain).

Menurut prinsip teorema kuantum, ketelitian standar V_{DC} yang dibangkitkan oleh PJVS ditentukan oleh dua komponen utama yaitu komponen material dan frekuensi. Sifat

komponen material direalisasikan berupa susunan sejumlah (n) deret material superkonduktor isolator dan superkonduktor (SIS), sedangkan komponen frekuensi berupa sinyal daya gelombang mikro. Pada proses pembangkitan standar V_{DC} , PJVS ini membutuhkan daya gelombang mikro yang beroperasi pada frekuensi sebesar 15.698 426 720 GHz dan yang diperoleh dari sebuah unit *multiplier* berinputan 10 MHz. Frekuensi *input* tersebut diperoleh dari sebuah sumber osilator yang terpadu di dalam sistem PJVS berupa sebuah unit *multiplier*. Oleh karena itu, peningkatan kemantapan standar V_{DC} berbasis PJVS ini dapat diperoleh dengan cara menganalisis ketelitian frekuensi melalui proses kalibrasi sel standar sehingga bersamaan dengan itu pula dapat diperoleh sebuah bagan ketertelusuran V_{DC} mandiri.

1.2 Tujuan.

Unit *multiplier* yang terpadu di dalam sistem PJVS memiliki sub-unit pembangkit daya gelombang mikro (tipe osilator kristal) dengan frekuensi sebesar 10 MHz. *Output* unit *multiplier* ini dirancang untuk memiliki spesifikasi teknis peningkat frekuensi hingga mencapai 16 GHz. Peningkatan ketelitian nilai frekuensi *Input* yang diperoleh dari frekuensi standar nasional berbasis Cesium maka dapat dipastikan akan meningkatkan pula ketelitian *output* unit *multiplier* sehingga dapat diperoleh juga peningkatan ketelitian standar V_{DC} yang dibangkitkan oleh PJVS.

Selama ini PJVS adalah turunan dari frekuensi yang bersumber osilator internal sistem. Agar sumber osilator ini tetap terpelihara ketelitiannya harus dijaga agar tetap *traceable ke* frekuensi standar nasional. Sesuai dengan tujuan dari penelitian yang di dukung penuh dari pihak management Puslit KIM – LIPI dalam program DIPA 2012 ini, maka dilakukan pengembangan sistem pengukuran dengan membangun sistem interkoneksi yang baik antara sistem PJVS dan unit frekuensi standar nasional. Dua tujuan yang dihasilkan oleh capaian penelitian ini adalah tercapainya peningkatan ketelitian dan penyederhanaan bagan ketertelusuran dari PJVS yang langsung *traceable ke* standar frekuensi nasional yang berbasiskan cesium seperti yang telah terlihat pada Gambar 9.

2. TINJAUAN PUSATAKA

2.1 Prinsip Dasar Standar Tegangan Kuantum.

Pada mekanika kuantum, sifat-sifat benda dijelaskan dalam bentuk fungsi gelombang. Sama seperti dua gelombang bisa di dalam atau keluar dari fase, keadaan kuantum materi elektron secara individual (dalam kasus superkonduktor, *array* seluruh elektron yang berbagi fase yang sama) bervariasi dari titik ke titik tergantung pada lingkungan atom. Hal ini dapat mengakibatkan efek yang khas yaitu menghilangkan sifat resistansi pada bahan semikonduktor.

Jika dua potong bahan superkonduktor yang sama dipisahkan oleh sebuah lapisan isolasi yang sangat tipis, arus akan mengalir di seluruh penghalang jika ada perbedaan fasa antara dua belah pihak. Pengaturan ini, yang disebut persimpangan Josephson yang besarnya ditentukan oleh tingkat sensitifitas perbedaan fasa. Perbedaan fasa ini dapat diciptakan terhadap beberapa deret lapisan superkonduktor dan isolator melalui proses pengkondisian dari luar materi bahan berupa daya gelombang mikro pada frekuensi yang ditetapkan sehingga diperoleh nilai V_{DC} atau V_p sebagai berikut:

$$V_p = n \cdot \frac{h}{2e} \cdot \omega_p \dots\dots (1)$$

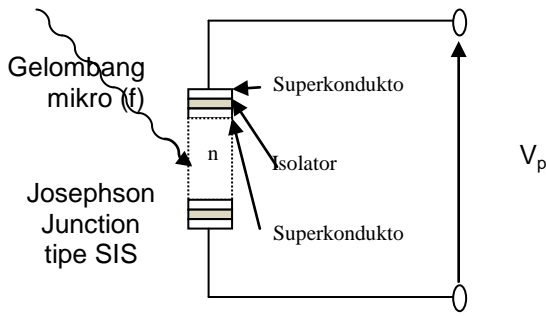
di mana,

- V_p Tegangan *Output* Josephson, volt
- h Konstanta Plank's,
- e Muatan elektron,
- n Jumlah deret susunan superkonduktor dan isolator, dan
- ω_p Frekuensi daya gelombang mikro Josephson.

Jika ω_p diuraikan menjadi sebesar $2\pi f$ dan karena nilai frekuensi dapat diatur sesuai dengan kebutuhan maka secara umum persamaan (1) diatas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_p (f) = n (h/2e) 2\pi f \dots\dots (2)$$

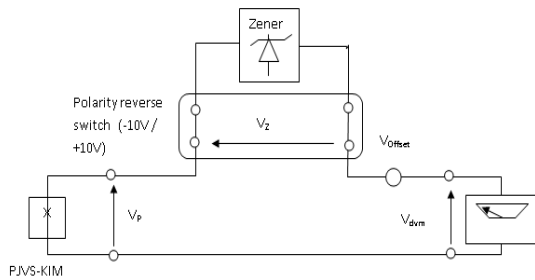
Dengan demikian maka dapat dikatakan bahwa V_p ditentukan oleh frekuensi gelombang mikro. Penentuan ketelitian frekuensi gelombang mikro bias menetapkan ketelitian tegangan yang dibangkitkan. Korelasi kedua variabel ini secara perangkat keras dapat digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Prinsip dasar sistem tegangan Josephson (*Josephson Voltage System/ JVS*).

2.2 Karakterisasi PJVS Berbasis Frekuensi.

Proses pengukuran yang menjadi dasar untuk memperoleh karakteristik PJVS adalah sistem pengukuran langsung dengan metode Nol. Implementasi sistem pengukuran metode Nol ini bisa menunjukkan nilai beda tegangan melalui penggunaan sebuah meter tegangan *digital* (*Digital Voltage Meter/ DVM*), yang apabila digambarkan secara blok diagram seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Rangkaian pengukuran V_{DC} sel standar berbasis PJVS dengan frekuensi osilator.

Tegangan yang terbaca pada DVM adalah sebesar V_{DVM} yang dapat didefinisikan berdasarkan hukum Kirchof Tegangan bahwa jumlah total tegangan dalam rangkaian tertutup sebesar nol sebagaimana terlihat pada persamaan berikut,

$$V_{PJVS} - V_z + V_{off} - V_{DVM} = 0 \quad \dots (3)$$

atau

$$V_{DVM} = V_{PJVS} - V_z + V_{off} \quad \dots (4)$$

di mana,

V_z : Nilai tegangan sel standar (dioda zener), volt

V_{off} : Nilai tegangan *offset*, volt

Pada proses kalibrasi sistem mengatur tegangan PJVS untuk meminimisasi nilai absolut daripada V_{DVM} . Beda tegangan antar tegangan zener (V_z) dan PJVS (V_{PJVS}) dapat dimonitor sesuai dengan persamaan (4). Sedangkan *offset voltmeter* dan atau tegangan listrik termal (*thermoelectric voltage*) mengakibatkan pembangkitan tegangan *offset* (V_{off}) di titik persambungan antar kawat. Untuk melawan tegangan *offset*, pembalikan polaritas beda tegangan sistem rangkaian pengukuran dilakukan dari normal ke membalik dan sebaliknya. Nilai normal dan membalik ini dapat dinyatakan sebagai,

$$\text{Normal} : V_{pjvs} - V_z + V_{off} = V_{DVMN} \quad \dots (5)$$

$$\text{Membalik} : -V_{pjvs} + V_z + V_{off} = V_{DVMR} \quad \dots (6)$$

Pembalikan polaritas dapat dilakukan dua cara yaitu dengan membalik polaritas zener V_z menggunakan kontak pemilih manual (otomatis) atau dengan membalik polaritas arus bias (I_b) dari PJVS.

Penghapusan V_{off} pada persamaan (5) dan (6) dapat dilakukan dengan cara penyederhanaan kalkulus sebagai berikut,

$$V_{DVMN} - V_{DVMR} = 2(V_{PJVS} - V_z)$$

$$V = V_{DVMN} - \frac{V_{DVMN} + V_{DVMR}}{2} \quad \dots (7)$$

$$V_{off} = \frac{V_{DVMN} + V_{DVMR}}{2}$$

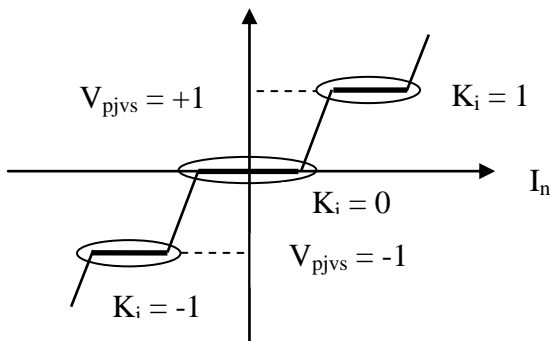
V_z dalam persamaan (7) adalah nilai hasil kalibrasi yang dihitung dari tegangan PJVS V_{pjvs} dan pemantauan tegangan (V_{DVMN} dan V_{DVMR}). Satu siklus pengukuran terdiri dari empat pengukuran dengan formasi polaritas Normal \rightarrow Membalik \rightarrow Membalik \rightarrow Normal. Nilai V_z ditetapkan oleh setiap siklusnya sedangkan sistem mengulang pengukuran siklus dan dihitung rata rata dari beberapa pengukuran V_z tersebut.

Metode Nol dapat meminimisasi kesalahan pengukuran dikarenakan oleh pengabaian V_{DVMN} dan V_{DVMR} yang kecil. Sedangkan tegangan V_{pjvs} ditentukan untuk memperoleh tingkat ketelitian yang tinggi sesuai dengan penetapan jumlah *array* (deret) Superkonduktor–Isolator–Superkonduktor (SIS). Apabila terdapat sejumlah *array* SIS (n) yang secara fisis dinyatakan sebagai deretan jungsi Josephson (*Josephson Junction Array/ JJA*) yang terbagi dan terdiri dari sejumlah n pembagi tegangan (kanal) yang sebanding dengan 2^n (Gambar 4) maka akan dibangkitkan tegangan total sebesar V_{pjvs} ketika arus bias I_n dialirkan.

Masing - masing dari beberapa pembagi tegangan tersebut merupakan tegangan tegangan kanal yang dapat diperoleh dengan nilai nilai K_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) yang masing masing dijumlahkan sebagai berikut:

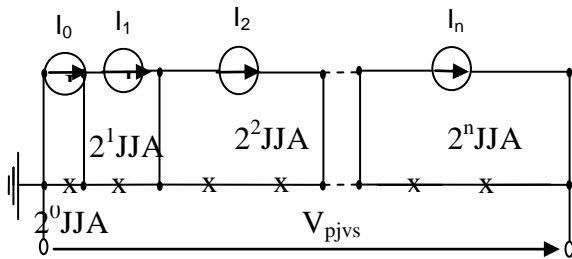
$$V_{pjvs} = \frac{h \cdot f_{pjvs}}{2 \cdot e} (K_0 \cdot 2^0 + K_1 \cdot 2^1 + \dots + K_n \cdot 2^n) \dots (8)$$

dengan nilai konstan pembagi tegangan sebesar $K_i = -1, 0, 1$. Secara operasional tegangan V_{pjvs} ini dapat diperoleh dengan sangat teliti melalui pengaturan nilai konstan pembagi K_i yang didasari oleh hubungan antara variabel I_n dan jumlah array formasi SIS (n) seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Kestabilan V_{pjvs} berdasarkan pengaturan I_n dan n .

Sedangkana secara rangkaian listrik, ormulasi (8) dapat dijelaskan dengan Gambar 4.



Gambar 4 Rangkaian listrik V_{pjvs} dari beberapa deret formasi SIS

Menurut Gambar 4 kondisi V_{pjvs} diperoleh berdasarkan pengaturan variabel K_i yang nilainya ditentukan oleh jumlah array (n) yang diaktifkan dan arus bias (I_b) yang dialirkan. Nilai V_{pjvs} ini adalah nilai tegangan yang dihasilkan oleh JVS konvensional yang memiliki kondisi sinyal berbentuk analog. Oleh karena JVS yang dibahas dalam penelitian ini adalah milik laboratorium metrologi kelistrikan Puslit KIM – LIPI yang berbasis terprogram (*Programmable Josephson Voltage System/ PJVS*) maka nilai analog ini kemudian dikonversi dengan menggunakan konverter A/D menjadi nilai diskrit.

Nilai V_{pjvs} yang telah dihasilkan berupa sinyal diskrit tersebut kemudian diproses secara digital dengan menggunakan komputer.

2.3 Tinjauan Ketelitian Sistem PJVS

Dari persamaan (8) dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$V_{pjvs} = C_{pjvs} \cdot f_{pjvs} \cdot K_i \dots (9)$$

dengan,

- C_{pjvs} : nilai konstanta PJVS.
- f_{pjvs} : nilai frekuensi gelombang mikro, Hz.
- K_i : nilai ketetapan jumlah Array dan arus bias.

Nilai ketetapan jumlah array dan arus bias dapat diperoleh berdasarkan proses algoritma yang dilakukan secara komputerisasi. Batasan validasi dilakukan pada saat arus bias I_b yang dipergunakan dapat menghasilkan kondisi “Saphiro”, setelah melintasi sejumlah kanal yang telah ditetapkan dan menghasilkan nilai tegangan V_{pjvs} murni yang tidak melebihi batas antara $-0,1 \mu V$ dan $0,1 \mu V$. Tegangan V_{pjvs} murni ini merupakan nilai tegangan PJVS yang diperoleh tanpa dicampuri oleh tegangan sisa pada array akibat adanya fluk sisa yang terjebak pada array.

Nilai ketelitian tegangan yang dihasilkan oleh PJVS dapat diturunkan dengan menyederhanakan persamaan (9) menjadi persamaan sebagai berikut:

$$V_{pjvs} \pm \Delta_{pjvs} (\Delta_{C_{pjvs}}, \Delta_{f_{pjvs}}, \Delta_{K_{pjvs}}) = (C_{pjvs} \pm \Delta_{C_{pjvs}}) \cdot (f_{pjvs} \pm \Delta_{f_{pjvs}}) \cdot (K_i \pm \Delta_{K_{pjvs}}) \dots (10)$$

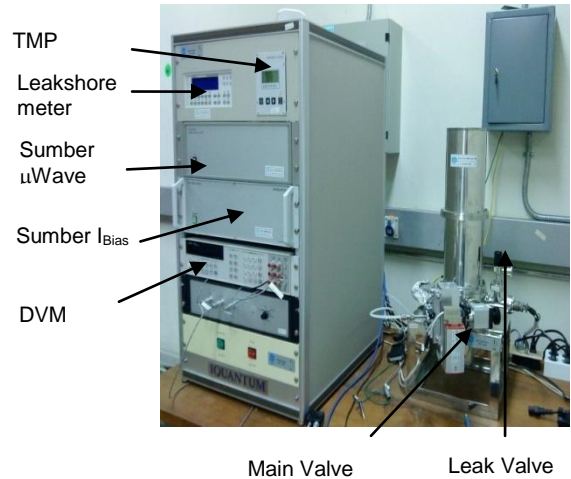
di mana,

- $\Delta_{C_{pjvs}}$ nilai ketelitian konstanta PJVS.
- $\Delta_{f_{pjvs}}$ nilai ketelitian frekuensi gelombang mikro.
- $\Delta_{K_{pjvs}}$ nilai ketelitian arus bias dan material SIS.

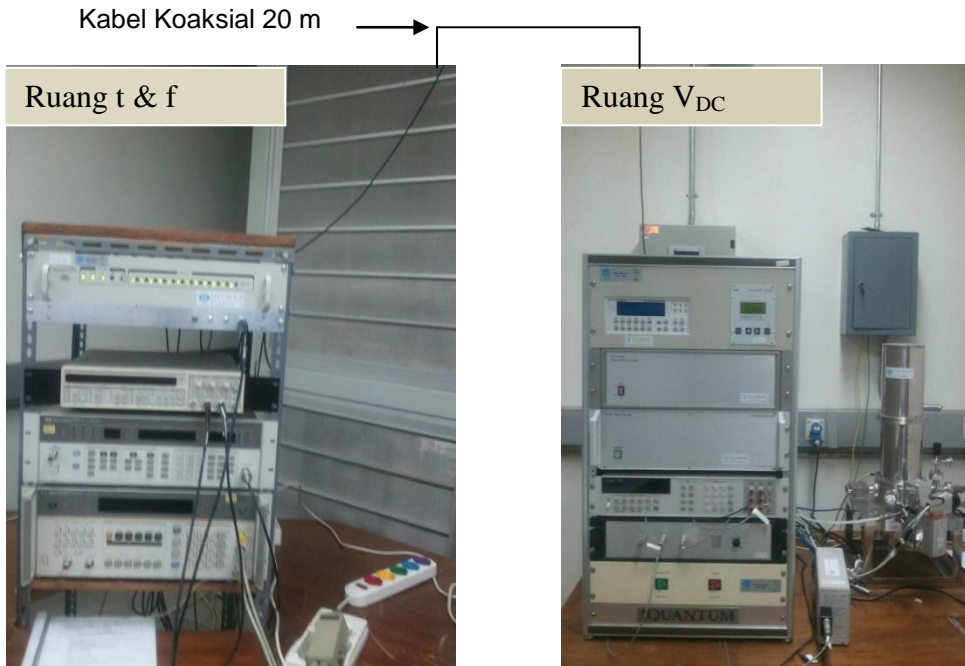
Secara fisika, nilai ketelitian konstanta PJVS yang dipengaruhi oleh muatan elektron materi SIS dapat diabaikan karena nilainya sangat kecil sekali bila dibandingkan dengan nilai ketelitian frekuensi gelombang mikro, arus bias maupun material SIS. Sedangkan nilai ketelitian arus bias dan material SIS masing masing telah ditetapkan ketelitian arus bias secara program sebesar $< 10^{-7} V$ (0,1 ppm) dan modul chip yang tidak pernah berubah. Dengan demikian maka ketelitian tegangan yang dibangkitkan oleh PJVS (V_{pjvs}) secara berarti hanya dipengaruhi oleh ketelitian frekuensi gelombang mikro.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini telah dilakukan analisis ketelitian nilai tegangan PJVS dengan membandingkan implementasi frekuensi gelombang mikro dari dua sumber yaitu osilator internal (berada dalam sistem PJVS) dan osilator external (berada diluar sistem PJVS). Osilator eksternal berasal dari sumber frekuensi standar Cesium yang disalurkan dari ruang standar frekuensi dan waktu melalui kabel koaksial RG 58 sepanjang 20 m (Gambar 5). Sedangkan osilator internal adalah sebuah unit pembangkit frekuensi yang berada dalam satu sistem PJVS (Gambar 6).



Gambar 5 Sistem pengukuran PJVS berbasis frekuensi Internal



Gambar 6 Sistem pengukuran PJVS berbasis frekuensi eksternal.

Proses perbandingan ini, secara kalkulus dengan tingkat ketelitian tegangan PJVS dapat dihitung dengan cara menyederhanakan persamaan (10) terlebih dahulu sebagai berikut,

$$\Delta_{PJVS}^2(\Delta_{C_{pjs}}, \Delta_{f_{pjs}}, \Delta_{K_{pjs}}) = \Delta_{C_{pjs}}^2 + \Delta_{f_{pjs}}^2 + \Delta_{K_{pjs}}^2 \dots (11)$$

Oleh karena pada proses perbandingan ini tidak merubah variabel variabel yang terkait lainnya maka tingkat perubahan ketelitian yang terjadi dapat dihitung secara kalkulus sebagai berikut.

$$\frac{\Delta_{PJVS-Internal}^2(\Delta_{C_{pjs}}, \Delta_{f_{pjs}}, \Delta_{K_{pjs}}) = \Delta_{C_{pjs}}^2 + \Delta_{f_{pjs-Internal}}^2 + \Delta_{K_{pjs}}^2}{\Delta_{PJVS-Eksternal}^2(\Delta_{C_{pjs}}, \Delta_{f_{pjs}}, \Delta_{K_{pjs}}) = \Delta_{C_{pjs}}^2 + \Delta_{f_{pjs-Eksternal}}^2 + \Delta_{K_{pjs}}^2} \dots (12)$$

$$(\Delta_{f_{pjs-Eksternal}}^2) = \Delta_{f_{pjs-Internal}}^2 : \Delta_{f_{pjs-Eksternal}}^2$$

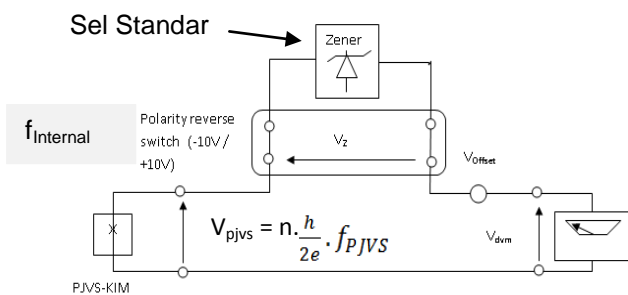
dengan,

$$\Delta_{C_{pjs}}^2 : \Delta_{C_{pjs}}^2 = 1$$

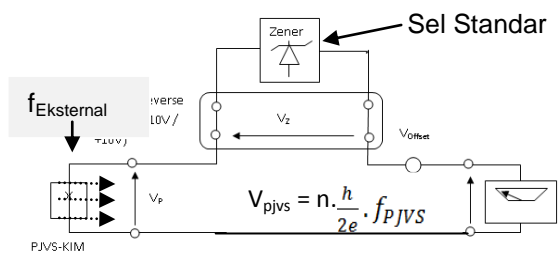
$$\Delta_{K_{pjs}}^2 : \Delta_{K_{pjs}}^2 = 1$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengukuran diseminasi telah dilakukan dari PJVS ke sebuah sel standar yang sekaligus difungsikan sebagai standar transfer. Nilai yang diperoleh standar transfer ini kemudian di diseminasikan pula ke sebuah grup sel standar sehingga diperoleh nilai rata-rata yang berperan sebagai nilai standar sekunder untuk besaran V_{DC} untuk rentang 1 V dan 10 V. Pembangkitan V_{DC} dari PJVS untuk proses pengukuran ini dilakukan berdasarkan implementasi nilai frekuensi dari osilator kristal (Tabel 1) sebagai frekuensi internal dan nilai frekuensi dari standar Cesium (Tabel 2) sebagai frekuensi eksternal. Kedua proses pengukuran ini masing-masing dilakukan berdasarkan rangkaian pengukuran yang sama akan tetapi berbeda berdasarkan implementasi frekuensinya (Gambar 7 dan Gambar 8).



Gambar 7 Rangkaian pengukuran sel standar berbasis PJVS dengan frekuensi Internal.



Gambar 8 Rangkaian pengukuran sel standar berbasis PJVS dengan frekuensi eksternal.

Berdasarkan rangkaian pengukuran diatas (Gambar 8) dan setelah proses pengukuran dilakukan berdasarkan implementasi frekuensi internal maka diperoleh data data pengukuran untuk rentang 10 V dan 1 V seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengukuran sel standar dengan PJVS berbasis $f_{Internal}$

No	Rentang ukur (V)	Hasil Pengukuran	
		Nilai Ukur (V)	Std. Dev
1	10	9,999 980 562	1,69E-07
2	10	9,999 979 982	1,96E-07
3	10	9,999 977 541	1,33E-07
4	1.018	1,018 014 477	6,47E-06

Berdasarkan kepentingan analisis yang dilakukan untuk penelitian ini hanya menyangkut pada salah satu variabel yang terkait saja maka ekuivalensi pada variabel variabel lainnya dipenuhi dengan melakukan prosedur pengukuran yang sama. Apabila sistem pengukuran sel standar berbasis PJVS ini dilakukan dengan frekuensi gelombang mikro yang berasal dari standar Cesium (eksternal) maka diperoleh data hasil pengukuran seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil pengukuran sel standar dengan PJVS berbasis $f_{Eksternal}$

No	Rentang ukur (V)	Hasil Pengukuran	
		Nilai Ukur (V)	Std Dev (V)
1	10	9,999 981 160	1,06E-07
2	10	9,999 979 648	7,39E-08
3	10	9,999 977 905	1,01E-07
4	1,018	1,018 011 062	2,38E-07
5	1,018	1,018 007 550	1,20E-08
		1,018 009 531	4,67E-08

Analisis tingkat ketelitian standar V_{DC} berbasis PJVS

Ketelitian nilai hasil pengukuran dapat ditentukan dengan memperhatikan nilai standar deviasi dari hasil pengukuran pada proses diseminasi dari PJVS ke sebuah sel standar. Hasil pengukuran yang diperoleh dari proses penelitian ini adalah berasal dari implementasi 2 frekuensi yaitu dengan frekuensi internal (dari osilator kristal) dan frekuensi eksternal (dari standar frekuensi Cesium). Kedua implementasi ini dilakukan pada sebuah sistem pembangkitan V_{DC} yang berbasis PJVS yang sama dan telah diperoleh tingkat ketelitian dari masing-masing implementasi seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Ketelitian Hasil Pengukuran sel standar berbasis PJVS

No	Rentang ukur (V)	Hasil Pengukuran	
		PJVS menggunakan $f_{Internal}$ (V)	PJVS menggunakan $f_{Eksternal}$ (V)
1	10	1,69E-07	1,06E-07
		1,96E-07	7,39E-08
		1,33E-07	1,01E-07
Nilai rata rata	1.018	1,66E-07	9,35E-08
		6,47E-06	2,38E-07
Nilai rata rata			1,20E-08
			4,67E-08
Nilai rata rata		6,47E-07	9,88E-08

Tingkat perbaikan nilai ketelitian hasil pengukuran sel standar berbasis PJVS antara implementasi frekuensi internal dan eksternal, secara kuantitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (12) yang disederhanakan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \Delta_{pjvs-Internal}^2 (\Delta_{f_{pjvs-Internal}}) : \Delta_{pjvs-Eksternal}^2 (\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}^2) \\ = \Delta_{f_{pjvs-Internal}}^2 : \Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}^2 \text{ atau} \\ \frac{\Delta_{pjvs-Internal}}{\Delta_{pjvs-Eksternal}} = \frac{\Delta_{f_{pjvs-Internal}}}{\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}} \end{aligned}$$

Hasil proses kalibrasi sel standar untuk rentang pengukuran 10 V yang dilakukan dengan kondisi suplai tegangan Jala-jala dilepas (sel standar berada pada kondisi operasional baterai)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{pjvs-Internal}}{\Delta_{pjvs-Eksternal}} &= \frac{\Delta_{f_{pjvs-Internal}}}{\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}} \\ \Delta_{pjvs-Eksternal} &= \Delta_{pjvs-Internal} \cdot \frac{\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}}{\Delta_{f_{pjvs-Internal}}} \\ \Delta_{pjvs-Eksternal} &= \Delta_{pjvs-Internal} \cdot \frac{9,4E^{-8}}{1,7E^{-7}} \end{aligned}$$

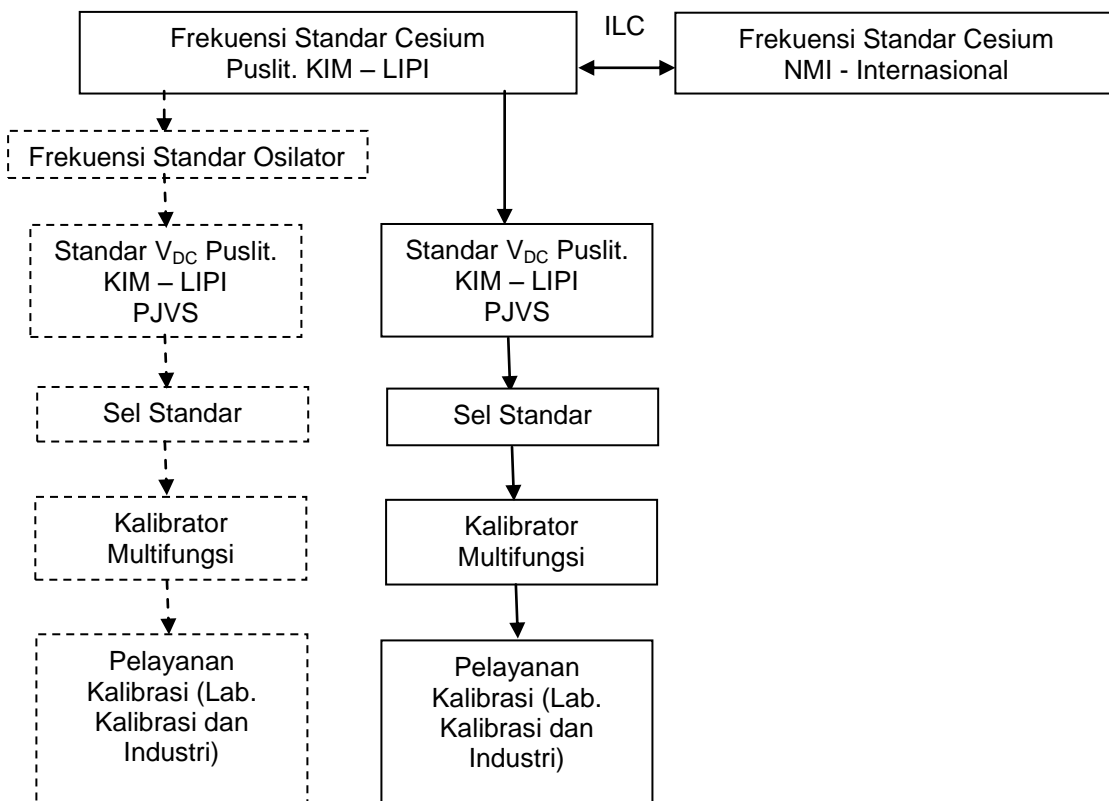
$$\Delta_{pjvs-Eksternal} = \Delta_{pjvs-Internal} \cdot 0,55$$

Hasil proses kalibrasi sel standar untuk rentang pengukuran 1V yang dilakukan dengan kondisi suplai tegangan Jala-jala dilepas (sel standar berada pada kondisi operasional baterai)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{pjvs-Internal}}{\Delta_{pjvs-Eksternal}} &= \frac{\Delta_{f_{pjvs-Internal}}}{\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}} \\ \Delta_{pjvs-Eksternal} &= \Delta_{pjvs-Internal} \cdot \frac{\Delta_{f_{pjvs-Eksternal}}}{\Delta_{f_{pjvs-Internal}}} \\ \Delta_{pjvs-Eksternal} &= \Delta_{pjvs-Internal} \cdot \frac{9,9E^{-8}}{6,5E^{-7}} \end{aligned}$$

$$\Delta_{pjvs-Eksternal} = \Delta_{pjvs-Internal} \cdot 0,15$$

Tingkat perbaikan ketelitian yang dihasilkan dari proses analisis terhadap standar V_{DC} berbasis PJVS berdasarkan implementasi frekuensi internal dan frekuensi eksternal pada rentang pengukuran 10 V dan 1 V masing masing adalah sebesar 55 % dan 15 %. Nilai perbaikan ketelitian standar V_{DC} yang telah dicapai oleh penelitian ini sekaligus menyederhanakan bagan keterkaitan dibidang V_{DC} . Penyederhanaan bagan keterkaitan ini menunjukkan bahwa kompetensi laboratorium metrologi kelistrikan telah meningkat satu langkah maju karena PJVS terkait langsung pada standar frekuensi Cesium.



Gambar 9 Bagan ketertelusuran V_{DC} Puslit. KIM – LIPI dengan implementasi $f_{Internal}$ $f_{Eksternal}$ (garis penuh)

5. KESIMPULAN

Hasil penelitian telah diperoleh berdasarkan proses karakterisasi besaran V_{DC} terhadap dua titik ukur sel standar yang masing masing sebesar 1,018 V dan 1 V. Pengamatan tingkat ketelitian telah dilakukan terhadap PJVS dengan dua implementasi frekuensi daya gelombang mikro yaitu dari osilator internal dan eksternal berbasis Cesium. Sehingga dapat disimpulkan bahwa implementasi osilator eksternal berbasis Cesium telah dapat meningkatkan ketelitian sel standar dengan titik ukur 1,018 V dan 10 V masing masing sebesar 15 % dan 55 %. Dengan demikian maka *traceability chart* untuk besaran V_{DC} menjadi lebih sederhana yaitu dari tingkat PJVS langsung ke standar frekuensi Nasional yang berbasis cesium.

Ada dua hal yang perlu dilakukan dalam hal pemeliharaan ketelitian pada besaran V_{DC} ini yaitu secara internal yang disebut sebagai pemeliharaan mandiri dan secara eksternal yang disebut sebagai pemeliharaan kompetensi. Interval waktu pemeliharaan mandiri dapat dilakukan dengan mengacu pada karakteristik masing masing instrumentasi standar sedangkan untuk ILC (*Inter-laboratory Comparison*) minimal 5 tahun sekali dan disesuaikan dengan jadwal ILC yang diterbitkan oleh BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terimakasih atas dukungan langsung maupun tidak langsung yang diberikan oleh rekan rekan dan pihak management Puslit KIM – LIPI di dalam Proyek DIPA – 2012 sehingga pelaksanaan penelitian untuk meningkatkan kemampuan pengukuran tegangan DC berbasis PJVS di laboratorium metrologi kelistrikan Puslit. KIM - LIPI dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Shoji, H. Yamamori, M. Ishizaki, S.P.Benz, and P.D. Dresselhaus (2003), "Operation of a NbN-based programmable Josephson standard chip with a compact refrigeration system", , IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, pp.919-921.
- A short course for calibration laboratory staff (1994), "Using The ISO Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement", CSIRO Division of Applied Physics, Melbourne Branch, Clayton, ver. 3.3.

- C.A. Hamilton and Y. H. Tang. (1999), "Evaluating the uncertainty of Josephson Voltage standard", , *Metrologia*, ,36,53-58.
- H. Yamamori, M. Itoh, H. Sasaki, A. Shoji, S.P. Benz, and P.D. Dresselhaus, *Supercond.* (2001), "All-NbN digital – to - analog converters for a programmable voltage standard",. *Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 1048-1051.
- Hadi Sardjono (2010), "Metode Diseminasi Standar Nasional V_{DC} Berbasis PJVS – KIM Dengan Ketelitian Sampai Dengan 0,2 ppm", *Jurnal STANDARDISASI – Majalah Ilmiah Standardisasi*, Vol. 12, No.2, 89 - 96.
- Join Quantuj Institute, <http://jqj.umd.edu/news/102-an-stm-to-measure-phase-differences-in-superconductors.html>.
- Karl-Peter Lallmann. (2002) "Josephson-Voltage Standard in a working calibration laboratory", Fluke Deutschland GmbH, Heinrich-Hertz-Strasse 11, 34123 Kassel / Germany.
- T Yamada, H Sasaki, H Yamamori and A Shoji. (2008). "Demonstration of a 10 V programmable Josephson voltage standard system based on a multi-chip technique", *Supercond. Sci. Techno.*
- V.Kose, F. Melchert," Quantenmaße in der elektrischen Meßtechnik", VCH, postfach 101161, D-6940 Weinheim (Bundesrepublik Deutschland)
- Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). (2008) "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement", First edition September, JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections.