

UJI KELAYAKAN TITIK TETAP ALUMINUM SEKUNDER BERDASARKAN KEDALAMAN SUPERCOOLING

Properness Test of Secondary Al Fixed Point Based on Supercooling Depth

Beni Adi Trisna dan Arfan Sindhu Tistomo

Puslit PUSLIT KIM-LIPI, Kompleks Puspipstek Serpong Tangerang 15314
e-mail: beni@kim.lipi.go.id

Diterima: 17 Januari 2013, Direvisi: 16 Mei 2013, Disetujui: 3 Juni 2013

Abstrak

Dalam rangka menyediakan pelayanan jasa kalibrasi termokopel tipe *noble metal* dengan titik tetap, Pusat Penelitian Puslit KIM-LIPI telah mengembangkan sel titik tetap aluminium berjenis terbuka sekunder untuk digunakan sebagai standar pada suhu 660,323°C. Efek impuritas diselidiki dengan menerapkan metode kuantitatif, yaitu dengan melihat hubungannya dengan kedalaman *supercooling*. Sebagai hasilnya, kedalaman *supercooling* terendah adalah 0,4332°C yang memenuhi kriteria sebagai standar kalibrasi yang diusulkan oleh CCT BIPM (*Consultative Committee for Thermometry of International Bureau of Weights and Measures*). Selain itu, ketidakpastian pengukuran memberikan nilai 1,5 μV yang sebanding dengan 0,15 °C untuk termokopel tipe S. Oleh karena itu, CMC (*Calibration Measurement Capability*) untuk pengukuran suhu 660,323°C dengan titik tetap Al sekunder adalah 0,15°C. Nilai reproduksibilitas adalah 42 mK yang menunjukkan bahwa kemurnian sel kurang dari 99,99993%.

Kata kunci: termokopel, ITS-90, suhu, ketidakmurnian, kalibrasi

Abstract

In order to provide noble metal thermocouple calibration services by fixed point, Puslit KIM-LIPI has developed a secondary open type aluminum fixed point cell to be used as a standard for temperature 660.323 °C. The impurity effect was investigated by applying a quantitative method, i.e., by seeing its relation with the deep supercooling. As result, the lowest deep supercooling is 0.4332 °C which satisfies the requirement for being a standard calibration proposed by CCT BIPM (Consultative Committee for Thermometry of International Bureau of Weights and Measures). In addition, the uncertainty of measurement gives a value 1.5 μV which is proportional to 0.15 °C for type S thermocouple. Therefore, the CMC (Calibration Measurement Capability) for temperature measurement at 660.323 °C by secondary Al fixed point is 0.15 °C. The reproducibility value is 42 mK show that the purity of the cell is less than 99.99993%.

Keywords: thermocouple, ITS-90, temperature, impurity, calibration

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pusat Penelitian Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi (Puslit KIM-LIPI) sebagai pengelola Teknis Ilmiah Standar Nasional untuk Satuan Ukuran (SNSU) bidang suhu, sampai saat ini telah mampu merealisasikan skala suhu ITS-90 (*International Temperature Scale 1990*) melalui titik tetap, mulai dari titik tripel Argon (189,3442°C) hingga titik leleh kawat palladium (1553,4 °C) pada pengukuran termometer jenis kontak. Titik tetap tersebut digunakan sebagai standar primer bagi kalibrasi *standard platinum resistance thermometer* (SPRT) dan termokopel. SPRT dan termokopel yang telah terkalibrasi tersebut selanjutnya menjadi transfer standar

dan sebagai referensi untuk melakukan kalibrasi termometer kontak kelas industri (termometer gelas, termokopel, termometer tahanan platina industri dan sebagainya).

Akan tetapi seiring dengan perkembangan industri dan laboratorium kalibrasi di Indonesia, muncul permintaan pelayanan jasa kalibrasi termokopel menggunakan titik tetap. Penambahan lingkup baru ini dapat menimbulkan masalah serius bagi ketertelusuran karena termokopel kelas industri tidak terjaga kemurniannya dan dapat mencemari sel titik tetap standar primer. Sebagaimana disampaikan oleh David I Head dan kawan-kawan (2008) bahwa kurva titik beku dari titik tetap aluminium turun dan naik dipengaruhi oleh impuritas.

Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian dan pembuatan titik tetap kelas

sekunder dilakukan dan yang pertama kali dibuat adalah titik tetap Aluminium. Tipe titik tetap ini adalah sel terbuka (*opened cell*).

Selanjutnya realisasi beserta uji kelayakan yang meliputi *reproducibility* dan pengaruh impuritas dilakukan. Di dalam menentukan pengaruh impuritas sebagian besar NMI (*national metrology institute*) menggunakan metode *glow discharge mass spectroscopy* (GDMS) seperti yang dilakukan oleh Widiatmo (2008) dan D'uriš (2008). Sementara dikarenakan keterbatasan terutama terkait dengan pendanaan penelitian serta sepengetahuan penulis hingga saat ini belum ada lembaga di Indonesia yang mampu melakukan analisis GDMS maka Puslit KIM-LIPI memilih cara kuantitatif yaitu dengan melihat pengaruh impuritas melalui keterkaitan antara kemurnian suatu logam dengan kedalaman *supercooling*. Apabila kedalaman *supercooling* pada realisasi titik tetap Al di atas 0,4 K seperti yang disyaratkan oleh CCT BIPM (1990): "*It is important to achieve a high degree of supercooling (> 4 K) for attainment of the plateau temperatures by means of outside nucleated slow freezes*" maka dapat dikatakan bahwa titik tetap tersebut memenuhi kriteria sebagai standar. Head dan kawan-kawan (2008). : "*The freezing curves of the aluminium fixed-point decreased and increased in line with expectations derived from interpolation of previous experiments as increased amounts of impurities were introduced*", walaupun untuk kasus tertentu pengotoran diperlukan untuk mempermudah tehnik realisasi seperti yang dilakukan oleh Jin Tao Zhang dan Y.N Wang (2008): "This deep *supercooling* is inconvenient for the operation of tin freezing-point cells, especially for sealed tin fixed-point cells".

Bahwa impuritas mempengaruhi *supercooling* telah diketahui oleh McLaren dan Murdock (1960) yang kemudian dipertegas oleh Ovsienko, D.Yu (2001).

1.2 Tujuan

Makalah ini bertujuan untuk memaparkan pengujian kelayakan titik tetap aluminium yang telah dibuat oleh Puslit KIM-LIPI dengan melaksanakan evaluasi hubungan antara kedalaman *supercooling* dengan kemurnian sel di mana target kedalaman *supercooling* melebihi 0.4 °C.

Uji kelayakan ini sangat penting dilakukan karena sel tersebut akan digunakan sebagai standar sekunder nasional bagi kalibrasi termokopel tipe *noble metal*.

Tulisan ini juga menyampaikan kemampuan pengukuran Puslit KIM-LIPI pada suhu 660 °C menggunakan titik tetap sekunder tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Efek Impuritas

Suhu terukur pada saat kondisi perubahan fasa pada material murni ditentukan oleh koefisien sensitivitas dan kemurnian material tersebut sesuai dengan persamaan yang diberikan oleh E.Renaot (2008).

$$T_{pure} - T_{obs} = - \sum_i c_{i,F=1}^i \left(\frac{\delta T_l}{\delta c_i^i} \right) / F^{1-k^i} \quad (1)$$

Dimana T_{pure} adalah suhu titik beku dari sampel dengan kemurnian 100%, T_{obs} adalah suhu titik beku sebenarnya dari material tersebut

ketika diukur, c_i^i adalah fraksi molar berkenaan

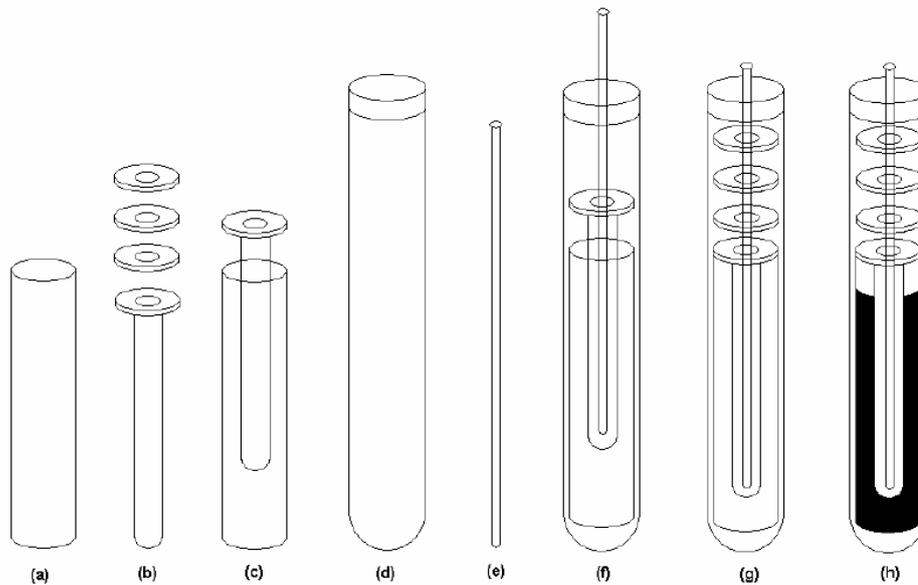
dari impuritas, $\left(\frac{\delta T_l}{\delta c_i^i} \right)$ adalah turunan dari suhu terukur pada kondisi liquid berdasar konsentrasi impuritas jenis i , serta F adalah fraksi material murni yang ada pada kondisi fasa *liquid* tersebut. Sedangkan k adalah parameter penting dalam suatu material yang disebut sebagai koefisien distribusi dan didefinisikan sebagai rasio antara konsentrasi impuritas pada fase solid (c_s) dengan konsentrasi impuritas pada fase *liquid* (c_l) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$k = \frac{c_s}{c_l} \quad (2)$$

Menurut K.D Hill dan S. Rudtsch (2005), apabila target ketidakpastian realisasi titik beku Aluminium adalah 0,5mK, maka dibutuhkan material Aluminium murni dengan tingkat kemurnian 99,99993%. Keterangan ini diaplikasikan pada evaluasi reproduibilitas dari proses realisasi titik beku Aluminium untuk mengetahui sejauh mana kemurnian material Al yang digunakan.

2.2 Sel Titik Tetap Sekunder Al

Pembuatan sel titik tetap Al kelas sekunder membutuhkan material murni Al (99.9999%) sebanyak 202 gram selama dilaksanakan pengisian sel Al.



Gambar 1 (a) *Graphite crucible*, (b) *Graphite thermo-well* dan *graphite disk*, (c) *Graphite crucible* dan *graphite thermo-well* yang dipasangkan, (d) *Quartz tube*, (e) *Quartz well*, (f) Bagian-bagian sel setelah dirakit, (g) Sel sebelum diisi aluminium, (h) Sel setelah diisi aluminium.

Sumber: Suherlan dan Dwi Larassati (2010)

Nilai kemurnian material Al tersebut diperoleh berdasarkan sertifikat pembelian dari PT. Johnson Matthey pada sekitar tahun 1990'an. Sehingga perlu dilaksanakan pengujian ulang kemurnian material murni paska proses produksi sel titik tetap yang baru dibuat pada tahun 2010. Ketinggian material murni di dalam sel adalah sekitar 120 mm. Sel sekunder Al telah direalisasikan untuk pertama kali menggunakan sensor termokopel Tipe S sebagai sensor dan diperoleh plato titik beku selama sekitar 2,5 jam dengan kestabilan suhu $\pm 0,015 \text{ }^\circ\text{C}$ yang seperti dinyatakan oleh Suherlan dan Dwi Larassati (2010).

Sel titik tetap tersebut terdiri dari penampung berupa *graphite crucible* dengan material murni Al terletak didalamnya, *graphite thermo-well* sebagai media untuk meletakkan *quartz well*, sehingga tidak bersentuhan langsung dengan logam murni. Sebagai insulator suhu digunakan beberapa *graphite disk* dan *wool disk*. Kemudian seluruh bagian tersebut dirangkai menjadi satu dan dimasukkan kedalam *quartz tube*, digunakan *quartz tube* agar tidak terjadi perpindahan panas secara radiasi ke luar dari sistem. *Seal Caps* digunakan pada bagian atas *quartz tube* sebagai media pemasangan pipa gas Argon dan sistem vakum. Sehingga tekanan didalam sel dapat diatur ketika proses realisasi dilaksanakan. Sel titik tetap Al buatan puslit KIM-LIPI diilustrasikan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

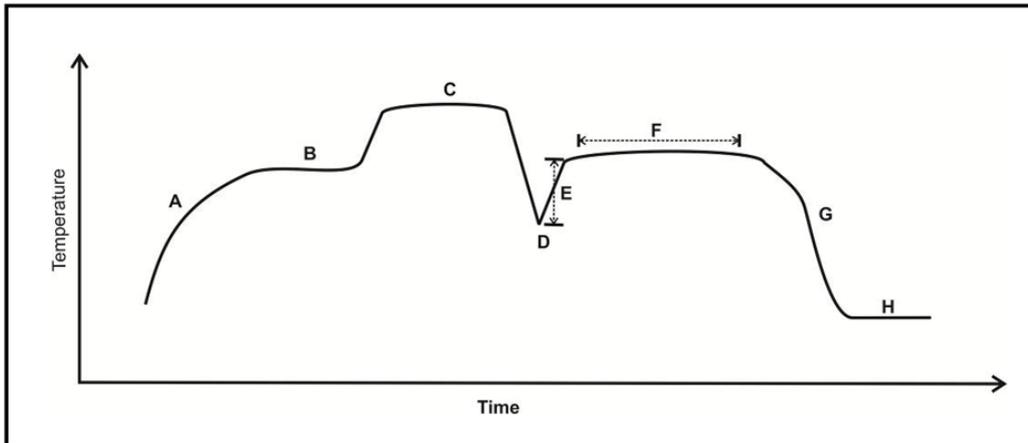
3. METODE PENELITIAN

3.1 Kelayakan Sel

Pengujian kelayakan sel titik tetap Al kelas sekunder dilaksanakan dengan cara melaksanakan realisasi sel tersebut sebanyak 3 kali untuk mendapatkan nilai kedalaman *supercooling* terukur dan kemudian membandingkan nilai tersebut dengan nilai yang telah disebutkan pada literatur CCT-BIPM (2008).

3.2 Proses Realisasi

Sel titik tetap Al kelas sekunder direalisasikan menggunakan tungku dengan konstruksi pemanas *three zone controller* yang berupa pemanas sentral, pemanas bagian atas, dan pemanas bawah. Ketiga pemanas tersebut terlebih dahulu diatur penyimpangan suhu terhadap penunjukan sebenarnya dengan menggunakan SPRT. Keseragaman suhu tungku dijamin lebih kecil dari $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ pada daerah kerja suhu $100 \text{ }^\circ\text{C} \sim 680 \text{ }^\circ\text{C}$ dan stabilitas suhu dijamin $\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ atau lebih baik. Sel titik tetap Al kelas sekunder direalisasikan menggunakan prosedur realisasi titik tetap jenis sel terbuka (*opened cell*). (Fluke Hart Scientific, 2005). Sebagai indikator dengan resolusi tinggi digunakan nanovoltmeter dengan resolusi hingga 1 nanovolt. Termokopel standar tipe S digunakan sebagai sensor ukur beserta titik referensi yang dibuat menggunakan titik leleh es



Gambar 2 Kurva tipikal titik leleh dan beku

Realisasi dimulai dengan dilakukannya proses pemvakuman sel titik tersebut hingga mencapai 10^{-6} torr. Kemudian sel tersebut di panaskan pada suhu 600°C sebagai langkah pemanasan awal atau pre-heating. Proses ini ditunjukkan pada Gambar 2 dengan nomor A. Selama proses pre-heating berlangsung, dilakukan proses pencucian sel dengan cara berulang kali memvakum dan mengisi gas Argon kedalam sel titik tetap tersebut, minimum pencucian dilaksanakan 2 kali setiap proses realisasi. Kemudian setting tungku diubah ke suhu $665,5^{\circ}\text{C}$, setting ini merupakan setting yang lebih tinggi 5°C diatas titik leleh Alumunium ($660,323^{\circ}\text{C}$). Ketika proses menuju 5°C diatas titik leleh Alumunium tersebut suhu terukur didalam sel akan tertahan pada suhu titik leleh Alumunium walaupun suhu tungku telah tercapai 5°C diatas titik leleh, proses ini dinamakan Plato titik leleh logam Alumunium, proses ini ditunjukkan pada Gambar 2, nomor B.

Seketika, setelah tercapai titik leleh maka dilakukan pencucian sel kembali dengan mengganti gas Argon didalam sel dengan gas Argon baru, pada tahap ini pencucian hanya dilaksanakan 1 kali saja. Perbedaan pada pencucian sel yang kedua ini dilakukan dengan menggunakan sistem vakum mekanik selama 10 detik. Ketika dilakukan pengisian Argon murni kedalam sel titik tetap, tekanan didalam sel diatur sedekat mungkin dengan tekanan 1 Atm ($101,323$ kPa). Bila terdapat perbedaan tekanan, maka suhu sel titik tetap dikoreksi menggunakan tabel ITS-90. (Mangum,B.W dan G.T Furukawa, 1990). Sistem vakum dapat dimatikan karena proses selanjutnya tidak memerlukan sistem vakum. Selanjutnya suhu tungku diset 2°C diatas titik leleh. Ketika logam Alumunium murni didalam sel titik tetap telah dalam kondisi meleleh sempurna, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, nomor C. Suhu

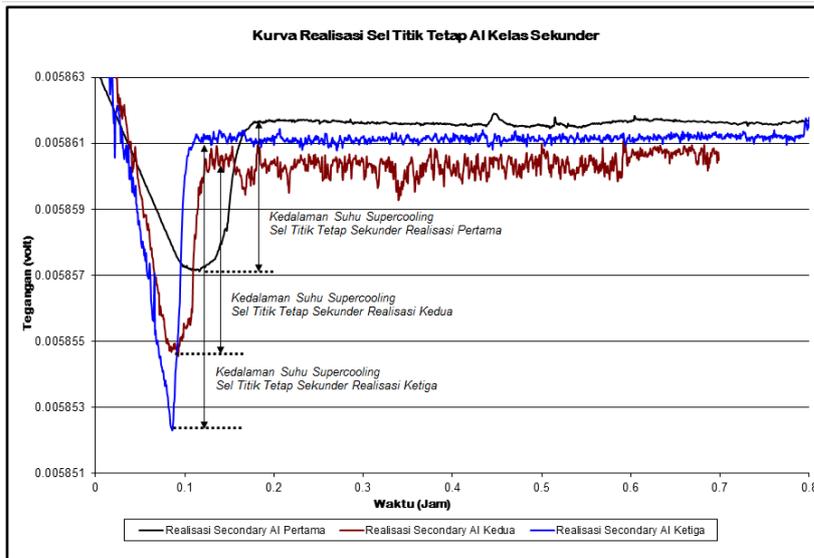
tungku kemudian disetting 2°C dibawah titik beku logam Al. Suhu sel terukur akan turun drastis menuju titik supercool, ditunjukkan pada Gambar 2, nomor D. Setelah tercapai suhu supercool, dan ketika suhu mulai naik menuju titik beku logam Al, maka selama 2 menit batang kuarsa dari suhu ruang dimasukkan ke dalam lubang ukur untuk melakukan inisiasi *inner melt*. Proses ini bertujuan agar logam Al didalam sel dapat membeku secara homogen dari luar kedalam sel dan dari dalam keluar sel secara bersamaan. Kemudian suhu tungku disetting, 1°C dibawah titik beku Al. Kurva plato akan segera diperoleh, ditunjukkan pada Gambar 2, nomor F.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi dan Uji Kelayakan Sel Al

Kedalaman *supercooling* dapat ditentukan dengan melihat titik minimum yaitu ketika titik balik *supercooling* terjadi dan titik maksimum yaitu saat kondisi plato dimulai seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Dari hasil tiga kali proses realisasi sel sekunder Al, diperoleh kedalaman *supercooling* bervariasi seperti ditunjukkan pada Tabel1 dengan kedalaman *supercooling* terpendeknya sekitar $0,4332^{\circ}\text{C}$. Nilai tersebut lebih tinggi dari $0,4^{\circ}\text{C}$ sehingga kriteria kedalaman *supercooling* minimum pada kemurnian material 99,999% terpenuhi.



Gambar 3 Kedalaman *supercooling* realisasi titik tetap al kelas sekunder

Tabel 1 Data kedalaman *supercooling*

Keterangan	Realisasi Pertama	Realisasi Kedua	Realisasi Ketiga
Minimum (v)	0,005857212	0,005854716	0,00585247
Maximum (v)	0,005861544	0,005860515	0,005861271
Kedalaman <i>Supercooling</i> (v)	4,332E-06	5,799E-06	8,801E-06
Kedalaman <i>Supercooling</i> (°C)	0,4332	0,5799	0,8801

Untuk memastikan kemurnian sel titik tetap sekunder tidak berubah, maka metode cek kedalaman *supercooling* dapat dilakukan setiap kali sel titik tetap sekunder ini direalisasikan. Metode ini merupakan pendekatan kuantitatif dan untuk membuktikan kebenarannya hasil pengukuran ini harus dibandingkan dengan pendekatan secara kualitatif dengan membandingkan hasil pengukuran sel titik tetap standar sekunder tersebut terhadap sel titik tetap standar primer atau melaksanakan evaluasi kemurnian sel dengan metode GDMS.

4.2 Ketidakpastian Pengukuran

Pengukuran emf pada plato sel titik tetap Al kelas sekunder dinyatakan dalam fungsi seperti ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$E_{Al} = E(t_{Al}) + \delta E_{PB} + \delta E_{KS} + \delta E_{HF} + \dots + \delta E_{PT} + C_0 \delta E_{TE} + \delta E_{DFT} + \delta E_{INH} \quad (3)$$

Penunjukan tegangan plato pada titik beku Al merupakan hasil dari penunjukan tegangan terukur pada *nanovoltmeter* $\{E(t_{Al})\}$, dengan kontribusi ketidakpastian dari pengukuran berulang, δE_{PB} . Ketidakpastian karena

kemurnian sampel titik tetap δE_{KS} , diestimasi melalui hasil reproduibilitas yang lebih besar dari 0.5 mK maka dapat disimpulkan bahwa kemurnian material terdegradasi lebih besar dari 99,99993%, kemudian apabila dilihat dari kedalaman *supercooling* yang lebih dalam dari 0.4°C sehingga dapat dipastikan kemurnian material setidaknya minimum berada pada lebih besar sama dengan 99,999%. Penulis mengambil kasus terburuk dengan memberi nilai estimasi ketidakpastian karena komponen impuritas adalah 99,999 %.

Ketidakpastian karena profil sel titik tetap Al, δE_{HF} , diestimasi dengan menggunakan persamaan 4.

$$\delta R_{HF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^3 (\Delta_{T_i-T_0 \text{ terukur}} - \Delta_{T_i-T_0 \text{ ITS-90}})^2}{n}} \quad (4)$$

$\Delta_{T_i-T_0 \text{ terukur}}$ merupakan selisih suhu hasil pengukuran pada sel titik tetap untuk kedalaman pencelupan i (T_i) terhadap suhu pada kedalaman di titik 0 cm/ bagian bawah sel titik tetap (T_0).

Tabel 2 Ketidakpastian realisasi sel sekunder Al

Komponen Ketidakpastian	Ketidakpastian Sel Sekunder Al (μV)
<i>Type A</i>	
Pengukuran Berulang, u_{PB}	0,42
Kemurnian Sel, u_{KS} (estimasi kemurnian (99,999%))	0,022
<i>Heat flux</i> , u_{HF}	0,23
<i>Type B</i>	
Sertifikat <i>nanovoltmeter</i> , u_{PT}	0,31
Titik es referensi, u_{TE}	0,03
<i>Drift</i> Termokopel, u_{DFT}	0,18
Inhomogenitas Termokopel, u_{INH}	0,35
Ketidakpastian Terentang ($k=2$)	1,50

Sedangkan $\Delta_{T_i-T_0, ITS-90}$ merupakan selisih suhu tersebut apabila dihitung menggunakan persamaan ITS-90. Pengukuran divariasikan hingga kedalaman 3 cm diatas titik terbawah sel, dengan asumsi bahwa ketika dilakukan pengukuran pencelupan sensor termokopel tidak pernah melebihi 3 cm terhadap bagian bawah sel titik tetap. Ketidakpastian karena sistem pengukuran tegangan, δE_{PT} , diestimasi dengan mengambil nilai ketidakpastian indikator *nanovoltmeter* yang digunakan. Ketidakpastian penggunaan titik es sebagai titik referensi termokopel, $C_0 \delta E_{TE}$, dimana C_0 merupakan koefisien *seebeck* termokopel pada suhu 0°C. Ketidakpastian karena penggunaan titik es sebagai referensi diestimasi dengan memasukkan nilai tipikal 10 mK. Komponen ketidakpastian terakhir merupakan ketidakpastian dari sifat termoelektrik sensor termokopel, yaitu pergeseran/ *drift* termokopel, δE_{DFT} , dan inhomogenitas termokopel, δE_{INH} . Komponen ketidakpastian drift termokopel diestimasi dari setengah dari nilai selisih pengukuran emf pada 3 kali realisasi yang dilakukan. Selama pengukuran profil sel titik tetap Al berlangsung, setengah perbedaan maksimum emf pada sel primer Al digunakan sebagai nilai estimasi kontribusi ketidakpastian ini. Inhomogenitas termokopel diestimasi dengan memvariasikan pengukuran termokopel dari bagian bawah sel hingga kedalaman 15 cm.

Ketidakpastian yang dicantumkan pada Tabel 2 masih dalam besaran tegangan dengan satuan μV . Dengan menggunakan sensitivitas termokopel tipe S di suhu sekitar 600°C yang

bernilai 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, ketidakpastian dalam besaran suhu dapat ditentukan dan menjadi 0,15°C. Nilai ini menjadi CMC dalam kalibrasi termokopel dengan titik tetap sekunder Al.

5. KESIMPULAN

Dari hasil tiga kali realisasi didapatkan kedalaman *supercooling* minimumnya 0,4332°C dimana masih di atas 0,4°C sehingga dapat disimpulkan bahwa titik tetap Al tersebut layak dijadikan standar. Analisa ketidakpastian menghasilkan ketidakpastian terentang sebesar 1,5 μV yang setara dengan 0,15°C. Nilai ini merupakan CMC untuk pengukuran suhu dengan titik tetap Al sekunder di 660,323°C.

Sementara itu hasil reproduibilitas adalah sebesar 0,42 μV atau 42 mK. Nilai ini lebih besar dari 0,5 mK yang berarti bahwa kemurnian material Al sudah terdegradasi lebih besar dari 99,99993%.

Selanjutnya untuk pengembangan kedepan perlu dilakukan perbandingan titik tetap tersebut dengan sel titik tetap Al kelas primer guna mengetahui sejauh mana penyimpangan suhu yang terjadi serta penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi melalui evaluasi kemurnian sel Al dengan *glow discharge mass spectroscopy*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada tim penanggung jawab DIPA 2012 Puslit Puslit KIM-LIPI atas pendanaannya serta kepala subbidang suhu atas arahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- D'uriš , S., J. Ranostaj , R. Palencár. (2008). *Development of Fixed-Point Cells at the SMU*, *Int J Thermophys*, Vol 29, p 861–870.
- Fluke Hart Scientific. (2005). *5924-5929 Metal Freeze Point Cells User's Guide*, Utah: Fluke Hart Scientific
- Head, David I, Patchariya Petchpong, Joe Y. H.Au. (2008). *Effects of Impurities on the Melting Curve of the Aluminium Fixed Point*, *Acta Metrologica Sinica*, , Vol 29 no 4A.
- Hill, K.D., S. Rudtsch. (2005). *Metrologia* 42, L1
- JCGM. (2008). *JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Paris: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP dan OIML.
- Mangum, B.W dan G.T Furukawa. (1990). *Guideline For Realizing The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*. USA: NIST technical note 1265
- McLaren, E.H, E.G. Murdock. (1960). *Can. J. Phys.* 38, 100
- Ovsienko, D.Yu. (2001). *Met. Phy. Adv. Tech*, vol 19, p 457.
- Renaot,E, dkk. (2008). *Int J Thermophys* (2008) 29:852–860, *Influence of Impurities and Filling Protocol on the Aluminum Fixed Point*. Prancis: Springer-Science.
- Suherlan dan Dwi Larassati. (2010). *Pembuatan Sel Titik Tetap Aluminium Sebagai Standar Suhu 660,323 °C*. Prosiding pada Pekan Pertemuan Ilmiah-PUSLIT KIM-LIPI. Tangerang Selatan: KIM-LIPI
- Thomas, H. Preston, P. Bloembergen, T.J. Quinn. (1990). *Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990 (BIPM)*. Paris: BIPM
- Widiatmo, J.V, K. Harada, K.Yamazawa. (2008). *Impurity Effect in Silver-Point Realization*, *Int J Thermophys*, , Vol 29, p 158–170.
- Zhang, J.T dan Y.N Wang. (2008). *Mechanism to Diminish the Supercooling of the Tin Freezing Point by using Graphite Powder*. *Int J Thermophys*, , Vol 29, p 844–851.