

Realisasi Skala Suhu ITS-90 Rentang 0 °C ~ 961,78 °C dengan SPRT di Puslit KIM-LIPI



**Tesis ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelas Magister
Sains yang disusun oleh:**

**Nama : Suherlan
NPM : 0606001512**

**PROGRAM PASCA SARJANA FISIKA INSTRUMENTASI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
JAKARTA
2009**

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Suherlan

NPM : 0606001512

Program Studi : Fisika Instrumentasi

Judul Tesis : Realisasi Skala Suhu ITS-90 Rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dengan SPRT di Puslit KIM-LIPI

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Pasca Sarjana Fisika Instrumentasi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. rer. nat. Martarizal _____

Pembimbing II : Drs. Anang Chusno Trijanto, M.T. _____

Penguji I : Dr. Santoso Soekirno _____

Penguji II : Dr. Sastra Kusuma Wijaya _____

Penguji III : Dr. Ering Poernomo Setianto _____

Depok, 28 Mei 2009

Universitas Indonesia

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah dengan segala keterbatasan penelitian ini telah selesai dilakukan di Puslit KIM-LIPI sebagai tesis pada PPS Fisika Instrumentasi FMIPA UI. Keterbatasan waktu, pengetahuan dan fasilitas teknis yang ada baik di Puslit KIM-LIPI ataupun di Universitas Indonesia menjadi kendala berlarutnya penelitian ini. Namun demikian tidak pernah ada hasil penelitian yang sempurna karena selalu ada kekurangan yang insya Allah akan diperbaiki pada tahap berikutnya.

Realisasi ITS-90 merupakan usaha untuk mengimplementasikan suatu skala suhu yang telah disepakati melalui konvensi internasional dan direkomendasikan untuk diadopsi oleh seluruh laboratorium suhu di setiap negara di dunia. Di Indonesia sendiri baru Puslit KIM-LIPI sebagai lembaga metrologi nasional yang mampu merealisasikan skala suhu ini. Melalui KEPPRES No. 7/1989 Puslit KIM-LIPI diberikan mandat untuk mengelola standar nasional untuk satuan ukur termasuk besaran suhu.

Hasil pengukuran dan kalibrasi pada skala suhu ini akan dibandingkan dengan negara lain untuk mendapatkan kesepakatan berupa pengakuan secara internasional. Untuk negara-negara di Asia Pasifik, uji banding biasanya dilakukan melalui program APMP (*Asia Pacific Metrology Program*) di bawah pengawasan biro internasional untuk ukuran dan timbangan yaitu BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*).

Masih banyak kekurangan yang harus diperbaiki pada penelitian dan tulisan ini, oleh karena itu besar harapan Penulis untuk mendapatkan saran dan kritik dari semua kalangan khususnya yang berkompeten dalam bidang ini. Semoga penelitian dan tulisan ini bermanfaat bagi banyak orang dan menjadi amal kebaikan buat Penulis dan semua pihak yang telah banyak membantu selama kegiatan penelitian ini untuk mendapatkan pahala dari Allah SWT.

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Suherlan
NPM : 0606001512
Program Studi : Fisika Instrumentasi
Fakultas : Program Pasca Sarjana FMIPA UI
Jenis Karya : Tesis

menyatakan, demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif** (*Non-Exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah Saya yang berjudul:

**Realisasi Skala Suhu ITS-90 Rentang 0 °C ~ 961,78 °C
Dengan SPRT di Puslit KIM-LIPI**

Dengan hak ini Universitas Indonesia berhak mengelola karya ilmiah ini dalam bentuk pangkalan data (*database*) dan berhak menyebarkan atau mempublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari Saya selama tetap mencantumkan nama Saya sebagai penulis dan sebagai pemilik hak cipta. Segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran hak cipta dalam karya ilmiah ini menjadi tanggung jawab Saya pribadi.

Demikian pernyataan ini Saya buat dengan sebenar-benarnya.

Depok, 28 Mei 2009

Yang menyatakan :

(Suherlan)

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Suherlan
Program Studi : Fisika Instrumentasi
Judul : Realisasi Skala Suhu ITS-90 Rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dengan SPRT di Puslit KIM-LIPI

Realisasi ITS-90 di Puslit KIM-LIPI dilakukan pada rentang suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan termometer standar SPRT. Titik tetap yang diukur yaitu titik tripel H_2O , titik leleh Ga dengan *plateau* selama 7 jam, titik beku In selama 6 jam, Sn selama 24 jam, Zn selama 14 jam, Al selama 12 jam dan Ag selama 2,5 jam dengan ketidakstabilan suhu $\pm 0,25\text{ mK} \sim \pm 0,5\text{ mK}$. Titik tetap ini kemudian dijadikan standar suhu primer menurut definisi ITS-90. Tiga buah HTSPRT dan 4 buah SPRT diuji dan dikalibrasi dengan metode pengukuran langsung pada sejumlah titik tetap pada rentang W_6 dan sub-rentang W_7, W_8, W_9, W_{10} dan W_{11} . Pengujian dilakukan pada titik leleh Ga dengan $W(29,7646\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 1,11807$ dan pada titik beku Ag dengan $W(961,78\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4,2844$. Hasil ini menunjukkan bahwa semua termometer memenuhi kriteria ITS-90 untuk dijadikan sebagai alat interpolasi pada skala suhu ini. Koefisien-koefisien persamaan ITS-90 yaitu a, b, c dan d diperoleh dari data kalibrasi dan dihitung menggunakan matrik. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama dalam masalah kerataan suhu sel titik tetap, penetapan angka penting dan ketidakpastian pengukuran.

Kata kunci: ITS-90, Titik tetap, SPRT, Kalibrasi

ABSTRACT

Name : Suherlan
Study Program : Physics in the field of instrumentation
Title : Realization of Temperature Scale of ITS-90
in the Range of 0 °C ~ 961,78 °C by SPRTs at Puslit KIM-
LIPI

Realization of ITS-90 at Puslit KIM-LIPI was performed in the temperature range of 0 °C ~ 961,78 °C by standard thermometer SPRT. The number of fixed points which were measured are triple point of H₂O, melting point of Ga with plateau for 7 hours, freezing point of In for 6 hours, Sn for 24 hours, Zn for 14 hours, Al for 12 hours and Ag for 2,5 hours with temperature instability is about ± 0,25 mK ~ ± 0,5 mK. These fixed point sells will be a primary standard of temperature defining on ITS-90. Three pieces of HTSPRTs and 4 pieces of SPRTs were tested and calibrated by direct measuring method on a number of fixed points in the range W_6 and sub range W_7 , W_8 , W_9 , W_{10} and W_{11} . The thermometers were tested on Ga melting point with $W(29,7646 \text{ °C}) \geq 1,11807$ and Ag freezing point with $W(961,78 \text{ °C}) \geq 4,2844$. It is certified that the thermometers can be used as an instrument for interpolation in this temperature scale. The ITS-90 coefficients a, b, c and d are come from data calibration calculated by matrix method. The next important step should be performed to know the immersion profile of the cell, significant number and the uncertainty of measurement.

Key words: ITS-90, Fixed point, SPRT, Calibration

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GRAFIK	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
1. Pendahuluan	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Evolusi Skala Suhu	2
1.3. Skala Suhu Moderen	4
1.4. Tujuan dan Manfaat	6
1.5. Metode dan Batasan	7
2. Teori Dasar dan Literatur	8
2.1. Skala Suhu ITS-90	8
2.1.1. Prinsip dasar ITS-90	8
2.1.2. Definisi titik tetap ITS-90	9
2.1.2.1. Titik tripel air (H ₂ O) suhu 0,01 °C	11
2.1.2.2. Titik leleh gallium (Ga) suhu 29,7646 °C	13
2.1.2.3. Titik beku indium (In) suhu 156,5985 °C	14
2.1.2.4. Titik beku timah (Sn) suhu 231,928 °C	15
2.1.2.5. Titik beku seng (Zn) suhu 419,527 °C	16
2.1.2.6. Titik beku aluminium (Al) suhu 660,323 °C.	16
2.1.2.7. Titik beku perak (Ag) suhu 961,78 °C	17
2.2. Termometer Tahanan Platina (PRT)	17

	halaman
2.2.1. Termometer tahanan platina standar (SPRT)	18
2.2.2. Kriteria SPRT menurut ITS-90	20
2.2.3. Koreksi dan Ketidakpastian SPRT	21
2.2.3.1. Pengaruh tekanan	21
2.2.3.2. Pengaruh hidrostatis	22
2.2.3.3. Pengaruh pemanasan diri (<i>self heating</i>)	23
2.3. Realisasi ITS-90 dengan SPRT	24
2.3.1. Rentang W_6 (0 °C ~ 961,78 °C, titik beku Ag)	24
2.3.2. Sub-rentang W_7 (0 °C ~ 660,323 °C, titik beku Al) ...	26
2.3.3. Sub-rentang W_8 (0 °C ~ 419,527 °C, titik beku Zn) ...	26
2.3.4. Sub-rentang W_9 (0 °C ~ 231,928 °C, titik beku Sn) ...	26
2.3.5. Sub-rentang W_{10} (0 °C ~ 156,5985 °C, titik beku In) ..	27
2.3.6. Sub-rentang W_{11} (0 °C ~ 29,7646 °C, titik leleh Ga) ...	27
3. Karakteristik Standar dan Alat	28
3.1. Sel Standar (Titik Tetap Suhu)	28
3.1.1. Titik tripel H ₂ O model PTB4 S/N 89-222	29
3.1.2. Titik leleh Ga model 5943 S/N Ga 43013	30
3.1.3. Titik beku In model 5924 S/N In 04035	30
3.1.4. Titik beku Sn model 5925 S/N Sn 05065	31
3.1.5. Titik beku Zn model 5926 S/N Zn 06070	32
3.1.6. Titik beku Al model 5907 S/N Al 07096	33
3.1.7. Titik beku Ag model 5908 S/N Ag 08046	33
3.2. Termometer Standar (SPRT)	34
3.2.1. HTSPRT Pt-2,5 Hart-1	35
3.2.2. HTSPRT Pt-2,5 Hart-2	36
3.2.3. SPRT Pt-25 Chino-1	36
3.2.4. HTSPRT Pt-2,5 Chino-2	37
3.2.5. SPRT Pt-25 Iso-1	38
3.2.6. SPRT Pt-25 Iso-2	39
3.2.7. SPRT Pt-25 Iso-3	39
3.3. Media Suhu (Tungku)	40

	halaman
3.4. Jembatan Tahanan DC	42
4. Pengujian dan Kalibrasi	43
4.1. Pengujian Sel Titik Tetap	43
4.1.1. Pengujian Sel H ₂ O model PTB4 S/N 89-222	43
4.1.2. Pengujian Sel Ga model 5943 S/N Ga 43013	45
4.1.3. Pengujian Sel In model 5924 S/N In 04035	46
4.1.4. Pengujian Sel Sn model 5925 S/N Sn 05065	47
4.1.5. Pengujian Sel Zn model 5926 S/N Zn 06070	48
4.1.6. Pengujian Sel Al model 5927 S/N Al 07096	50
4.1.7. Pengujian Sel Ag model 5928 S/N Ag 08046	51
4.2. Kalibrasi SPRT	52
4.2.1. Kalibrasi Hart-2 pada rentang W_6	53
4.2.2. Kalibrasi Chino-2 pada rentang W_6	57
4.2.3. Kalibrasi Hart-1 pada sub-rentang W_7	61
4.2.4. Kalibrasi Chino-1 pada sub-rentang W_7	64
4.2.5. Kalibrasi Iso-3 pada sub-rentang W_8	67
4.2.6. Kalibrasi Iso-2 pada sub-rentang W_9	70
4.2.7. Kalibrasi Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11}	73
5. Hasil dan Pembahasan	77
5.1. Tahanan Versus Suhu	77
5.2. Konversi Suhu ITS-90	80
5.3. Penentuan Angka Penting	80
5.4. Ketidakpastian	82
6. Kesimpulan dan Saran	85
6.1. Kesimpulan	85
6.2. Saran-saran	86
6.3. Ucapan terima kasih	87
Daftar Acuan	88

DAFTAR TABEL

		halaman
Tabel 1.	Perbandingan definisi sejumlah titik tetap pada skala suhu dahulu dan sekarang	5
Tabel 2.	Definisi skala suhu dan titik tetap pada ITS-90	11
Tabel 3.	Pengaruh tekanan terhadap suhu titik tetap ITS-90	21
Tabel 4.	Nilai tetapan C_i dan D_i dari ITS-90	25
Tabel 5.	Spesifikasi tungku titik tetap model 9230 dan 911X buatan Hart Scientific	40
Tabel 6.	Tahanan Hart-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90	38
Tabel 7.	Rasio tahanan Hart-2 pada sub-rentang W_6	39
Tabel 8.	Tahanan Chino-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90	42
Tabel 9.	Rasio tahanan Chino-2 pada sub-rentang W_6	44
Tabel 10.	Tahanan Hart-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90	47
Tabel 11.	Rasio tahanan Hart-1 pada sub-rentang W_7	48
Tabel 12.	Tahanan Chino-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90	51
Tabel 13.	Tahanan Iso-3 pada sejumlah titik tetap ITS-90	55
Tabel 14.	Rasio tahanan Iso-3 pada sub-rentang W_8	56
Tabel 15.	Tahanan Iso-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90	58
Tabel 16.	Rasio tahanan Iso-2 pada sub-rentang W_9	59
Tabel 17.	Tahanan Iso-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90	62
Tabel 18.	Rasio tahanan Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11}	63
Tabel 19.	Koefisien SPRT untuk persamaan ITS-90	66
Tabel 20.	Kesalahan baku SPRT untuk interpolasi secara linear	79
Tabel 21.	Koefisien SPRT untuk persamaan ITS-90 mengacu ke dokumen teknis NIST No.1265	80
Tabel 22.	Koefisien SPRT untuk persamaan ITS-90 berdasarkan ketidakpastian dan aturan angka penting	82
Tabel 23.	Ketidakpastian pengaruh dari tekanan hidrostatik sel titik tetap	82
Tabel 24.	Ketidakpastian pengaruh dari perbedaan tekanan internal sel terhadap tekanan standar 1 atm	83
Tabel 25.	Ketidakpastian karena pengaruh impuritas bahan	83
Tabel 26.	Ketidakpastian karena pemanasan diri pada SPRT Pt-25..	84
Tabel 27.	<i>Budget</i> ketidakpastian tipe B dari setiap sel titik tetap	84

DAFTAR GRAFIK

	halaman
Grafik 1. Pengukuran titik tripel H ₂ O model PTB4 S/N 89-222 dengan Iso-2	44
Grafik 2. <i>Plateau</i> titik leleh Ga model 5943 S/N Ga 43013	45
Grafik 3. <i>Plateau</i> titik beku In model 5924 S/N In 04035	46
Grafik 4. <i>Plateau</i> titik beku Sn, model 5925 S/N Sn 05065	48
Grafik 5. <i>Plateau</i> titik beku Zn model 5926 S/N Zn 06070	49
Grafik 6. <i>Plateau</i> titik beku Al model 5927 S/N Al 07096	50
Grafik 7. <i>Plateau</i> titik beku Ag model 5928 S/N Ag 08046	52
Grafik 8. Pengujian Hart-2 pada titik leleh Ga dan titik beku Ag ...	54
Grafik 9. Tahanan Hart-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn, (e) Al dan (f) Ag	55
Grafik 10. Pengujian Chino-2 pada titik leleh Ga dan titik beku Ag .	57
Grafik 11. Tahanan Chino-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn, (e) Al dan (f) Ag	59
Grafik 12. Pengujian tahanan Hart-1 pada titik leleh Ga	61
Grafik 13. Tahanan Hart-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn dan (e) Al	62
Grafik 14. Pengujian Chino-1 pada titik leleh Ga	64
Grafik 15. Tahanan Chino-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn dan (e) Al	66
Grafik 16. Pengujian Iso-3 pada titik leleh Ga	68
Grafik 17. Tahanan Iso-3 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn dan (d) Zn	69
Grafik 18. Pengujian Iso-2 pada titik leleh Ga	71
Grafik 19. Tahanan Iso-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) In dan (d) Sn	72
Grafik 20. Pengujian Iso-1 pada titik leleh Ga	74
Grafik 21. Tahanan Iso-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H ₂ O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Ga dan (d) In	75
Grafik 22. Perubahan tahanan HTSPRT Pt-2,5 terhadap suhu titik tetap	78
Grafik 23. Perubahan tahanan SPRT Pt-25 terhadap suhu titik tetap..	79

DAFTAR GAMBAR

		halaman
Gambar 1.	Termometer udara pertama (termoskop)	2
Gambar 2.	Termometer cairan dalam gelas pertama	3
Gambar 3.	Prinsip dasar penskalaan ITS-90	10
Gambar 4.	Diagram fasa air murni	12
Gambar 5.	Desain dasar sebuah sel gallium	13
Gambar 6.	Desain dasar sel logam tipe terbuka	15
Gambar 7.	Titik leleh, titik beku dan supercooling dari timah	16
Gambar 8.	Linearitas platina terhadap perubahan suhu	18
Gambar 9.	SPRT tipe kapsul Pt-25 Ω	19
Gambar 10.	Sel titik tripel H ₂ O model 5901C (kiri), titik tetap logam tipe tertutup model 590X (tengah) dan tipe terbuka model 592X (kanan) buatan Hart Scientific ...	29
Gambar 11.	SPRT model 568X (kiri) berikut bentuk sensor Pt-2,5 dan Pt-25 (kanan) buatan Hart Scientific	34
Gambar 12.	Dimensi SPRT Pt-2,5 model 568X buatan Hart Scientific	35
Gambar 13.	Dimensi SPRT Pt-25 model R800-2 buatan Chino Corporation	37
Gambar 14.	Dimensi SPRT Pt-2,5 model R800-3 buatan Chino Corporation	38
Gambar 15.	Dimensi SPRT Pt-25 model 670SQ buatan Isothermal Technology	38
Gambar 16.	Tungku titik tetap model 911X (kiri), tungku <i>annealing</i> model 9117 (tengah) dan <i>dry well</i> model 9230 (kanan) buatan Hart Scientific	41
Gambar 17.	Jembatan tahanan DC model 6010C buatan Measurement Instrument (kiri) dan resistor standar AC/DC model 5430 buatan Tinsley	42
Gambar 18.	Proses pembuatan mantel es pada titik tripel air	44

Bab 1

Pendahuluan

1.1. Latar belakang

Suhu sering diartikan sebagai ukuran panas atau dinginnya suatu benda yang secara mikroskopis menunjukkan atau menggambarkan keadaan termodinamik dari benda tersebut. Secara teknis diperlukan suatu skala untuk pengukuran suhu sebagai hasil kesepakatan bersama. Konvensi internasional telah menetapkan suatu skala suhu untuk diadopsi bersama. Revisi terbaru untuk skala suhu ini dinamakan ITS-90 yang sedang dan sebagian telah dapat direalisasikan di Indonesia melalui berbagai penelitian yang dilakukan di Puslit KIM-LIPI PUSPIPTEK Serpong.

Puslit KIM-LIPI adalah nama singkat dari Pusat Penelitian Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi yaitu salah satu dari sekian banyak pusat penelitian yang berada di lingkungan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Sebagai lembaga metrologi nasional, Puslit KIM-LIPI diberikan mandat oleh pemerintah melalui Keputusan Presiden No. 7 Tahun 1989 (Keppres. No. 7/1989) untuk mengelola standar nasional untuk satuan ukur.

Laboratorium metrologi suhu merupakan bagian dari lembaga ini yang mengelola standar nasional untuk satuan ukur suhu. Lab ini berkewajiban untuk memelihara dan menyebarkan nilai-nilai satuan ukur suhu serta menjamin

ketertelusuran pengukuran suhu di Indonesia. Salah satu kegiatan utama lab ini adalah melakukan penelitian dalam rangka merealisasikan skala suhu terbaru yang diadopsi dan diakui secara internasional.

1.2. Evolusi Skala Suhu

Dalam catatan sejarah, skala suhu pertama kali digunakan oleh seorang tabib kebangsaan Yunani (130 - 200) M untuk identifikasi 8 tingkat watak seseorang. Skala suhu ini digunakan untuk mengenal watak seorang pasien dan pengaruh dari suatu pengobatan. Suhu netral didefinisikan sebagai campuran yang seimbang dari uap air dan es. Karena belum ada termometer maka suhu ditentukan dengan asumsi-asumsi dan perkiraan yang dibantu oleh ahli fisika saat itu. Skala suhu ini kemudian memberikan inspirasi para ahli fisika pada abad 16.

Pada abad ke 16 ditemukan termometer udara pertama yang disebut dengan termoskop. Termometer ini terdiri dari tabung kapiler panjang yang terisi penuh dengan air atau minyak dan terhubung ke bola gelas (lihat Gambar 1). Belum jelas siapa penemu pertama termometer ini, boleh jadi Galileo yang terinspirasi oleh percobaan penematik orang-orang Yunani yaitu Philo dan Hero pada abad pertama dan kedua sebelum masehi.



Gambar 1. Termometer udara pertama (termoskop)

Pada tahun 1641 Ferdinand II dari Tuscany (bagian barat Itali) membuat termometer tertutup (*sealed thermometer*) pertama menggunakan cairan alkohol dari anggur (*wine spirit*) sebagai sensor. Alat inilah yang kemudian dianggap sebagai termometer pertama dengan sensor cairan yang terlindung dari perubahan tekanan udara dan penguapan serta ukuran derajat suhu yang tertera secara tetap pada batang termometer. Pengembangan termometer berikutnya terfokus pada teknik pembuatan khususnya pemilihan cairan sensor dan gelas serta penetapan skala tetap termometer.

Pada awal abad 18 mulailah dibuat termometer cairan dalam gelas yang lebih stabil dengan skala yang *reproducible*. Umumnya skala termometer berpatokan pada sejumlah titik tetap seperti titik leleh salju, suhu normal tubuh manusia dan titik uap air. Skala suhu ini kemudian dibagi dalam beberapa derajat diantara nilai suhu titik tetap yang diinterpolasi dengan ekspansi cairan dalam termometer seperti air raksa dan alkohol dimana diketahui bahwa air raksa lebih linier dibandingkan alkohol. Skala suhu yang umum digunakan pada waktu itu adalah Fahrenheit dan Celcius.



Gambar 2. Termometer cairan dalam gelas pertama

1.3. Skala Suhu Moderen

Pada tahun 1889, *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) pada pertemuan perdananya mengadopsi NHS (*Normal Hydrogen Scale*) sebagai skala suhu internasional pertama yang didasarkan pada 2 titik tetap yaitu titik beku air (273 K) dan titik didih air (373 K). Seiring perkembangan sains, teknologi dan kebutuhan akan pengukuran suhu yang teliti dan akurat maka skala suhu terus berkembang, berevolusi dengan berbagai revisi dan amandemen (lihat Tabel 1). Revisi terbaru skala suhu saat ini adalah ITS-90 yang telah ditetapkan pada tanggal 1 Januari 1990.

ITS-90 adalah skala suhu internasional paling mutakhir yang direkomendasikan oleh CCT (*Comité Consultatif de Thermométrie*) untuk diadopsi secara internasional dan direalisasikan oleh lembaga metrologi nasional setiap negara. CCT sendiri adalah sub-komite teknis bidang termometri yaitu satu dari 8 sub-komite dari CIPM (*Comité International des Poids et Mesures*) yaitu komite dari CGPM yang semuanya berpusat di BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) Sèvres Perancis.

Atas rekomendasi CCT inilah maka pada tanggal 1 Januari 1990 CIPM melalui suatu konferensi menetapkan ITS-90 sebagai skala suhu internasional resmi menggantikan skala suhu sebelumnya yaitu IPTS-68 (*International Practical Temperature Scale of 1968*), IPTS-68 (75) (IPTS-68 yang di-amandemen pada tahun 1975 dengan penambahan titik triple argon untuk skala suhu 83,798 K) dan EPT-76 (tambahan untuk skala suhu 0,5 K ~ 30 K yang dilakukan pada tahun 1976). Sebelumnya CCT juga pernah melakukan hal yang sama dengan skala-skala suhu sebelumnya yaitu: IPTS-48, ITS-48, ITS-27 dan NHS. Perbandingan definisi skala suhu dari beberapa skala tersebut lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 1.

Saat ini Puslit KIM-LIPI sudah mendapatkan pengakuan secara internasional dari BIPM untuk pengukuran suhu pada rentang 0 °C ~ 420 °C (pengukuran suhu pada titik triple H₂O, titik beku Sn dan titik beku Zn). Dengan fasilitas dan pengadaan peralatan baru sepanjang tahun 2007 ~ 2008, Puslit KIM-

Tabel 1. Perbandingan definisi sejumlah titik tetap pada skala suhu dahulu dan sekarang

Titik tetap	NHS	ITS-27	ITS-48	IPTS-48	IPTS-68	IPTS-68 (75)	EPT-76	ITS-90
Au FP	-	1336,15	1336,15	1336,15	1337,58	1337,58	-	1337,33
Ag FP	-	1233,65	1233,95	1233,95	1235,08	1235,08	-	1234,93
Al FP	-	-	-	-	-	-	-	933,473
S BP	-	717,75	717,75	717,75	-	-	-	-
Zn FP	-	-	-	(692,655)	692,73	692,73	-	692,677
Sn FP	-	-	-	-	(505,1181)	(505,1181)	-	505,078
In FP	-	-	-	-	-	-	-	429,7485
H ₂ O BP	373	373,15	373,15	373,15	373,15	373,15	-	-
Ga MP	-	-	-	-	-	-	-	302,9146
H ₂ O TP	-	-	-	(273,16)	273,16	273,16	-	273,16
H ₂ O FP	273	273,15	273,15	-	-	-	-	-
Hg TP	-	-	-	-	-	-	-	234,3156
O ₂ BP ^a	-	90,18	90,18	90,18	90,188	90,188	-	-
Ar TP	-	-	-	-	-	(83,798)	-	83,8085
O ₂ TP	-	-	-	-	54,361	54,361	-	54,3584
Ne BP	-	-	-	-	27,102	27,102	21,102	-
Ne TP	-	-	-	-	-	-	24,5591	24,5561
H ₂ BP	-	-	-	-	20,28	20,28	20,2734	20,3
H ₂ BP ^b	-	-	-	-	17,042	17,042	17,0373	17,0
H ₂ TP	-	-	-	-	13,81	13,81	13,8044	13,8033
Pb SP	-	-	-	-	-	-	7,1999	-
⁴ He BP	-	-	-	-	-	-	4,2221	4,2
In SP	-	-	-	-	-	-	3,4145	-
³ He BP	-	-	-	-	-	-	-	3,2
Al SP	-	-	-	-	-	-	1,1796	-
Zn SP	-	-	-	-	-	-	0,851	-
Cd SP	-	-	-	-	-	-	0,519	-

Keterangan:

Suhu dinyatakan dalam satuan K

FP = *Freezing point* (titik beku pada tekanan 101,325 kPa)

MP = *Melting point* (titik leleh pada tekanan 101,325 kPa)

BP = *Boiling point* (titik uap pada tekanan 101,325 kPa)

BP^a = Tahun 1975 menjadi titik kondensasi, BP^b = tekanan uap pada tekanan 33,3306 kPa

TP = *Triple point* (titik tripel)

SP = *Superconductive transition point* (titik transisi superkonduktif)

LIPI seharusnya sudah dapat melebarkan rentang suhu dengan merealisasikan skala suhu dari $-189\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 962\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pengukuran suhu dari titik tripel Ar sampai titik beku Ag).

1.4. Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini merupakan bagian dari tugas Puslit KIM-LIPI sebagai lembaga metrologi nasional yang mempunyai tujuan sama yaitu merealisasikan skala suhu internasional yang paling mutakhir dalam hal ini ITS-90 di Indonesia dan menjamin ketertelusurannya sehingga mendapatkan pengakuan secara internasional.

Dalam lingkup internal penelitian ini juga bertujuan meningkatkan kompetensi Puslit KIM-LIPI dalam bidang pengukuran dan kalibrasi suhu. Hal ini akan berpengaruh besar terhadap masyarakat industri terutama lab-lab kalibrasi suhu yang ada di Indonesia dimana secara tidak langsung juga meningkatkan kompetensi mereka dalam mutu produk ataupun jasa pengukuran dan kalibrasi suhu.

Secara nasional adalah tugas Puslit KIM-LIPI untuk menjaga dan menjamin ketertelusuran pengukuran suhu di Indonesia. sehingga melalui kegiatan interkomparasi realisasi skala suhu dengan negara lain khususnya kegiatan APMP, insya Allah penelitian ini akan mendapatkan pengakuan secara internasional. Pada tahun 2000 silam Puslit KIM-LIPI mengikuti interkomparasi pada kegiatan APMP untuk titik tripel H_2O , titik beku Sn dan Zn dengan ketidakpastian $\pm 0,004\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alhamdulillah sampai saat ini mendapatkan pengakuan untuk pengukuran tersebut dan sudah terdaftar dalam Appendix C BIPM: <http://www.bipm.org>.

Saat ini pengukuran besaran suhu dengan termometer kontak yang tertelusur secara langsung ke SI melalui Puslit KIM-LIPI baru pada rentang ukur $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan ketidakpastian $\pm 0,004\text{ }^{\circ}\text{C}$. Penelitian ini meningkatkan kemampuan rentang ukur menjadi $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan ketidakpastian $\pm 0,002\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 0,006\text{ }^{\circ}\text{C}$ yaitu dengan mengganti dan melengkapi sejumlah titik

tetap dengan sistim yang lebih baik diantaranya: titik tripel H₂O (isotopik terkoreksi), titik beku In, Sn, Zn, Al dan Ag (tekanan terkoreksi).

1.5. Metode dan Batasan

Secara umum realisasi skala suhu ini menggunakan metode-metode yang mengacu ke dokumen ITS-90. Realisasi sel titik tetap suhu dilakukan dengan mengukur *plateau* titik leleh, titik beku atau titik tripel menurut definisi ITS-90. SPRT diuji dan dikalibrasi dengan metode pengukuran secara langsung pada sejumlah titik tetap suhu pada rentang dan sub-rentang suhu yang juga sudah ditetapkan dalam dokumen ITS-90. Evaluasi ketidakpastian menggunakan metode standar yang mengacu ke dokumen ISO-GUM (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*).

ITS-90 mendefinisikan skala suhu dengan sejumlah titik tetap dari suatu material dalam keadaan setimbang fasa (*equilibrium state*) Skala ini mencakup definisi sejumlah titik tetap dari suhu -270,15 °C (suhu tekanan uap He) sampai 1084,62 °C (suhu titik beku Cu). Karena keterbatasan waktu, pengetahuan dan fasilitas yang ada di Puslit KIM-LIPI maka penelitian ini dibatasi hanya pada rentang suhu 0,01 °C (suhu titik tripel H₂O) sampai 961,78 °C (suhu titik beku Ag). Kegiatan penelitian ini meliputi realisasi sejumlah titik tetap menurut definisi ITS-90 dilanjutkan dengan pengujian dan kalibrasi sejumlah SPRT dengan metode pengukuran titik tetap suhu.

Bab 2

Teori Dasar dan Literatur

2.1. Skala Suhu ITS-90

Pada prinsipnya, suhu didefinisikan secara lengkap dengan termodinamik yaitu ilmu sains yang membahas tentang panas. Tetapi pada umumnya termometer yang berbasis hukum termodinamik kurang praktis dan akurat dalam proses pengukuran suhu. Oleh karena itu komunitas pengukuran internasional membuat definisi skala suhu praktis yang *reproducible* untuk memenuhi dan merespon kebutuhan sains, bisnis dan kesehatan. Secara berkala skala suhu ini direvisi sehingga dapat memenuhi kebutuhan rentang suhu yang lebar, mendekati skala suhu termodinamik, mudah dan praktis untuk semua pengguna. Revisi terakhir skala suhu internasional dilakukan pada tahun 1990 yang dikenal dengan nama singkat ITS-90.

2.1.1. Prinsip dasar ITS-90

Dilihat dari bentuk konstruksinya ITS-90 merupakan skala ordinal yang berurut berdasarkan suatu definisi atau standar. Skala ini dirancang untuk dapat mendekati suhu termodinamik sebagai bagian dari 7 skala metrik yang ada di SI. Skala ini dapat memenuhi rentang suhu dari 0,65 K sampai suhu tertinggi yang dapat terukur secara praktis berdasarkan hukum radiasi Planck. Pendekatan skala suhu ini terutama didasarkan pada 3 komponen berikut:

1. Sejumlah titik tetap sebagai standar

Titik tetap bisa berupa titik leleh, titik beku, titik uap ataupun titik tripel dari suatu material murni yang ditetapkan berdasarkan parameter-parameter termodinamik sebagai definisi suhu standar. Titik tetap ini harus mempunyai reproduksibilitas yang baik dan diharapkan dapat mendekati suhu termodinamik.

2. Termometer sebagai alat interpolasi

ITS-90 menggunakan 4 jenis termometer standar dengan reproduksibilitas yang baik sebagai alat interpolasi skala yaitu: termometer tekanan uap helium (He), termometer gas hidrogen (H) atau helium, termometer tahanan platina (PRT) dan termometer radiasi. Semua termometer ini dikalibrasi dengan sejumlah titik tetap menurut aturan ITS-90.

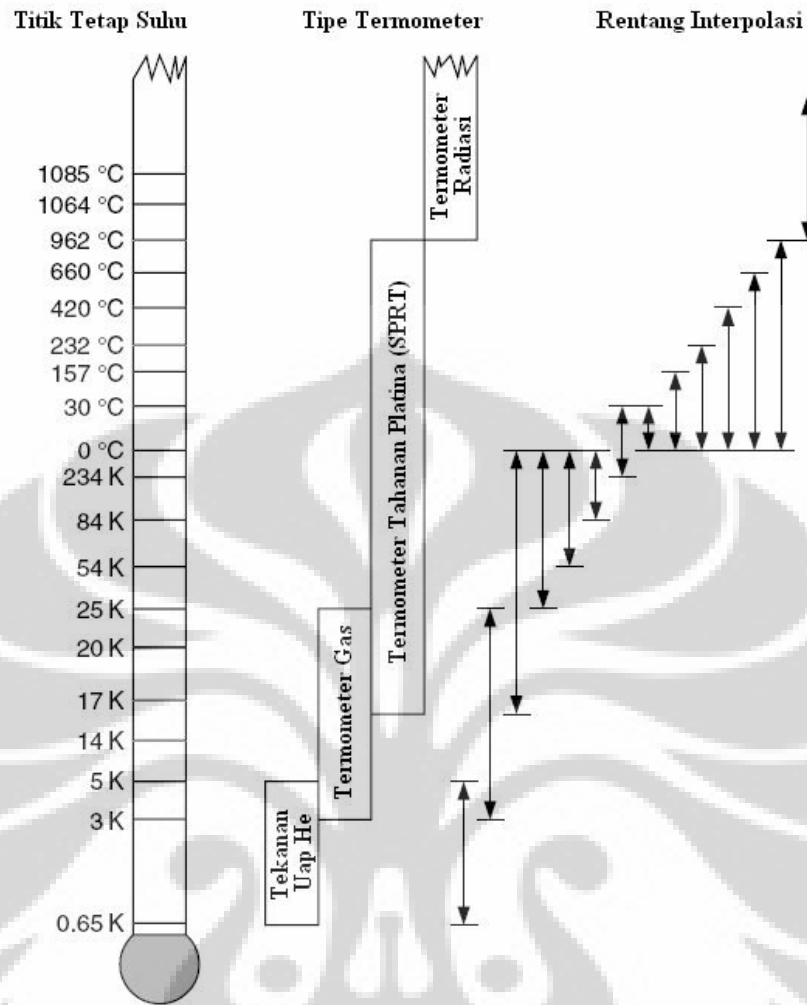
3. Persamaan interpolasi

Hasil pengukuran termometer pada sejumlah titik tetap digunakan untuk membuat suatu persamaan interpolasi. Persamaan ini berfungsi untuk pembacaan suhu antar titik tetap dan sebagai konversi suhu dari besaran lain. Hampir separuh persamaan interpolasi yang ada di ITS-90 merupakan interpolasi Lagrange.

Seluruh komponen tersebut di atas ditetapkan menurut kriteria-kriteria ITS-90. Keterkaitan komponen satu dengan yang lainnya secara garis besar dapat dilihat pada Gambar 3.

2.1.2. Definisi titik tetap ITS-90

ITS-90 dirancang oleh CCT berdasarkan hasil penelitian khususnya dari lembaga metrologi nasional seluruh dunia. Saat ini CCT terdiri dari 9 kelompok kerja (WG = *work group*) dan 1 kelompok aksi (TG = *task group*). Diantara kelompok kerja tersebut adalah CCT-WG1 dan CCT-WG4 yang paling berperan dalam penentuan skala suhu. Skala suhu ini mempunyai struktur dasar yang sama seperti skala praktis sebelumnya (IPTS-68, ITS-48 dan ITS-27) yaitu melakukan pendekatan



Gambar 3. Prinsip dasar penskalaan ITS-90

terhadap skala suhu termodinamik dengan sejumlah definisi suhu (titik tetap) dan termometer standar sebagai alat interpolasi di antara titik tetap suhu tersebut. Definisi sejumlah titik tetap ITS-90 dapat dilihat pada Tabel 2.

ITS-90 dibuat untuk memperbaiki kekurangan dan keterbatasan pada skala suhu sebelumnya diantaranya yaitu penambahan batas terendah skala suhu 13,81 K (titik tripel H_2) menjadi 3,2 K (titik uap 3He), memperkecil ketidakpastian relatif terhadap suhu termodinamik, *non-uniqueness* dan *irreproducibility* khususnya pada rentang suhu $t_{68} = 630,74 \text{ °C} \sim 1064,43 \text{ °C}$ dimana termokopel Pt-10%Rh/Pt digunakan sebagai alat ukur standar untuk interpolasi. Pada ITS-90 termokopel ini kemudian diganti dengan SPRT Pt-2,5 atau Pt-0,25 pada rentang W_6 yaitu $t_{90} = 0 \text{ °C} \sim 961,78 \text{ °C}$. [1]

Tabel 2. Definisi sejumlah titik tetap pada ITS-90

Material	Kondisi setimbang termal	Suhu		$W_i(T_{90})$
		T_{90} (K)	t_{90} (°C)	
He	VP	3 ~ 5	-270,15 ~ -268,15	
e-H ₂	TP	13,8033	-259,3467	0,00119007
e-H ₂ (or He)	VP (or CVGT)	≈ 17	≈ -256,15	
e-H ₂ (or He)	VP (or CVGT)	≈ 20,3	≈ -252,85	
Ne	TP	24,5561	-248,5939	0,00844974
O ₂	TP	54,3584	-218,7616	0,09171804
Ar	TP	83,8058	-189,3442	0,21585975
Hg	TP	234,3156	- 38,8344	0,84414211
H ₂ O	TP	273,16	0,01	1,00000000
Ga	MP	302,9146	29,7646	1,11813889
In	FP	429,7485	156,5985	1,60980185
Sn	FP	505,078	231,928	1,89279768
Zn	FP	692,677	419,527	2,56891730
Al	FP	933,473	660,323	3,37600860
Ag	FP	1234,93	961,78	4,28642053
Au	FP	1337,33	1064,18	
Cu	FP	1357,77	1084,62	

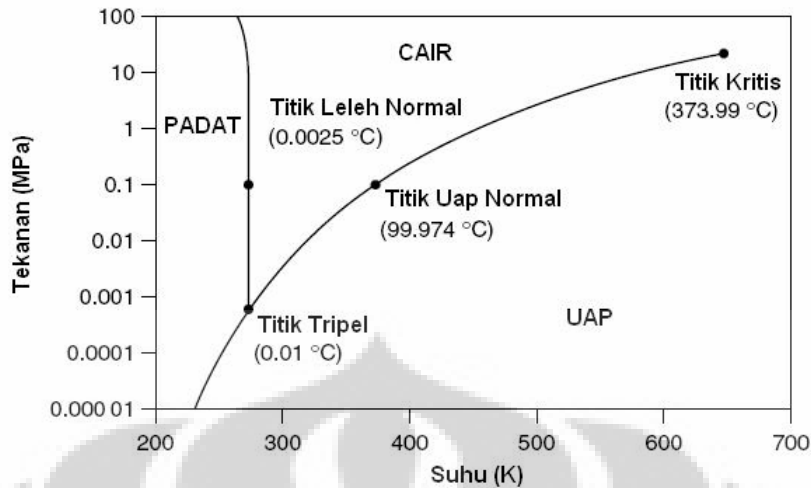
2.1.2.1. Titik tripel air (H₂O) suhu 0,01 °C

Titik triple H₂O adalah suatu keadaan termodinamik dimana 3 fase air murni yaitu padat, cair dan uap secara bersamaan berada pada kesetimbangan termal (lihat Gambar 4). Titik tetap ini merupakan definisi dasar dari ukuran satuan kelvin (K) yang dikenal dengan KTTS (*Kelvin Thermodynamic Temperature Scale*) yang diusulkan W.T. Kelvin pada tahun 1848 dan atas rekomendasi CCT maka pada tahun 1954 CGPM mengadopsi definisi ini sebagai satuan suhu termodinamik.

Definisi dari ukuran satuan kelvin (K) tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$1 \text{ K} = \frac{1}{273,16} \times T(\text{titik tripel H}_2\text{O})$$

Suhu titik tripel H₂O menurut definisi ITS-90 nilainya 273,16 K yaitu 0,01 °C lebih tinggi dari titik beku H₂O (0 °C atau 273,15 K). Dalam realisasi ITS-90 titik tetap ini berfungsi sebagai suhu acuan untuk rasio tahanan SPRT. Air yang digunakan pada sel ini adalah air murni dengan komposisi isotopik tertentu



Gambar 4. Diagram fasa air murni

sesuai standar V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). Standar ini menetapkan komposisi isotopik ^1H , ^2H , ^{16}O , ^{17}O dan ^{18}O yang terkandung dalam H_2O dengan perbandingan sebagai berikut:

$$(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{V-SMOW}} = 155,76 \pm 0,10 \text{ ppm}$$

$$(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}} = 2005,20 \pm 0,43 \text{ ppm}$$

$$(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}} = 379,9 \pm 1,6 \text{ ppm}$$

Perbedaan rasio isotopik yang terkandung dalam H_2O menimbulkan simpangan terhadap standar V-SMOW dan secara konvensional dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\delta^2\text{H} = \frac{[(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{sampel}} - (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{V-SMOW}}]}{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{V-SMOW}}} \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{[(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sampel}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}]}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}} \quad (2)$$

$$\delta^{17}\text{O} = \frac{[(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sampel}} - (^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}]}{(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}} \quad (3)$$

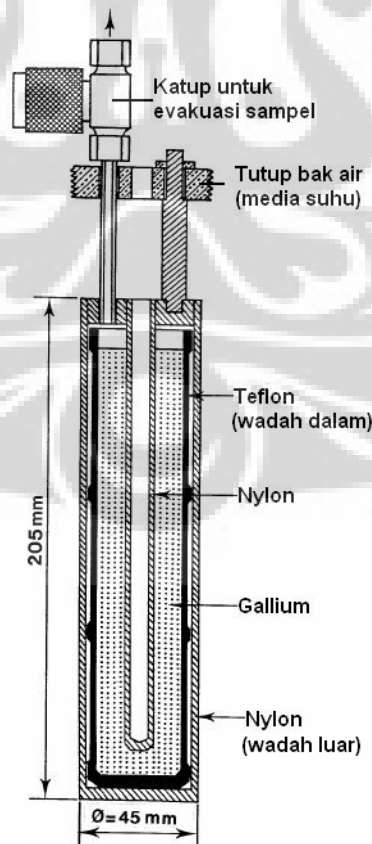
Biasanya simpangan $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^{17}\text{O}$ dinyatakan dalam per mil (‰). Perbedaan suhu titik triple H_2O (ΔT) karena perbedaan komposisi isotopik dapat dihitung dengan fungsi linier dari nilai-nilai δ sebagai berikut:

$$\Delta T = T_{\text{terukur}} - T_{\text{V-SMOW}} = A^2\text{H} \times \delta^2\text{H} + A^{17}\text{O} \times \delta^{17}\text{O} + A^{18}\text{O} \times \delta^{18}\text{O} \quad (4)$$

dimana $A^2\text{H} = 628 \pm 20 \mu\text{K}$ dan $A^{18}\text{O} = 641 \pm 50 \mu\text{K}$ adalah tetapan depresi isotopik yang diperoleh dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh Kiyosawa pada tahun 1991. Sementara pengukuran tetapan $A^{17}\text{O}$ sulit dilakukan sehingga diperkirakan mendekati nilai $57 \pm 5 \mu\text{K}$. [3]

2.1.2.2. Titik leleh gallium (Ga) suhu 29,7646 °C

ITS-90 menetapkan titik leleh Ga sebagai standar primer untuk suhu 29,7646 °C. Sel ini terbuat dari logam Ga dengan kemurnian 99,99999% (7N) yang sudah tersedia di pasaran. Pada prinsipnya titik tetap Ga dapat direalisasikan sebagai titik leleh atau titik beku dengan perbedaan suhu $\pm 0,1 \text{ mK}$ [1].



Gambar 5. Desain dasar sebuah sel gallium

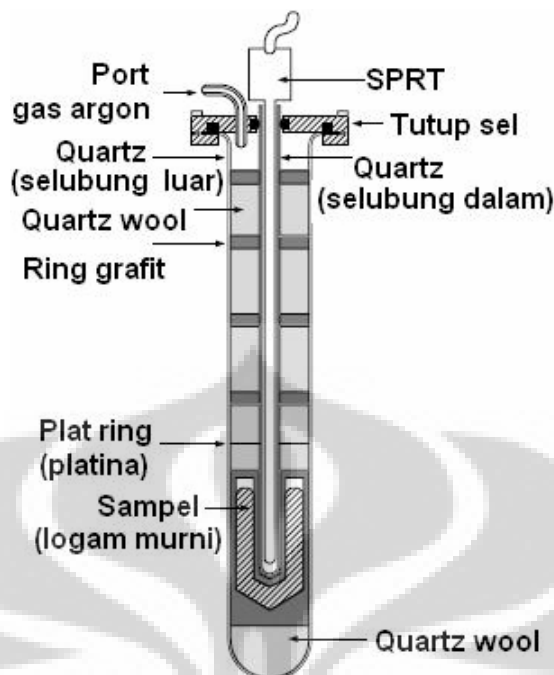
Tetapi secara teknis titik leleh Ga lebih mudah direalisasikan mengingat suhu *supercooling* Ga bisa mencapai 25 °C hingga 70 °C tergantung jenis plastik yang digunakan sebagai wadah sel tersebut. Gambar 5 menunjukkan desain dasar sebuah sel gallium yang diusulkan oleh NIST Amerika untuk ITS-90.

Logam Ga akan mengembang sampai 3% volume semula selama proses pembekuan sehingga wadah sel Ga harus terbuat dari bahan plastik yang fleksibel. Bahan plastik seperti polyethylene, polypropylene atau polytetrafluoroethylene cukup fleksibel pada suhu 30 °C sehingga sangat baik digunakan sebagai wadah sel Ga. Sebagai wadah kedua umumnya digunakan nylon, gelas atau stainless steel yang diatur tekanan di dalamnya mendekati 1 atm selama proses pelelehan atau pembekuan. Logam Ga mempunyai tetapan cryoscopic pertama 0,00732/K sehingga titik beku Ga dengan kemurnian 99,9999% akan lebih rendah sebesar 0,01 mK dibandingkan Ga murni 100%. [1]

2.1.2.3. Titik beku indium (In) suhu 156,5985 °C

ITS-90 menetapkan titik beku In sebagai standar primer untuk suhu 156,5985 °C. Sel ini terbuat dari logam In dengan kemurnian 99,9999% (6N) atau lebih tinggi yang sudah tersedia di pasaran. Logam In mempunyai titik beku cukup rendah sehingga proses pelelehan dan pembekuan dapat dilakukan dalam wadah dari bahan plastik suhu tinggi seperti polytetrafluoroethylene (teflon), polyimide/amide atau dari bahan lain seperti gelas borosilikat, stainless steel dan grafit.

Logam In tersedia secara komersial dalam bentuk pelet kecil, kawat dan batangan. Sampel ini kemudian dimasukkan ke dalam wadah berbentuk tabung untuk dijadikan sebuah sel titik tetap. Tetapan cryoscopic pertama indium adalah 0,00212/K sehingga titik beku indium dengan kemurnian 99,9999% mendekati 0,5 mK lebih rendah dari indium murni 100% [1]. Desain dasar sel indium sama halnya dengan sel titik tetap logam lainnya. Untuk sel tipe terbuka (*open cell*) seperti pada Gambar 6, wadah grafit yang berisi sampel logam murni diletakan dalam tabung kuarsa dan dipelihara dengan gas argon pada tekanan mendekati 1 atm saat proses pelelehan dan pembekuan.

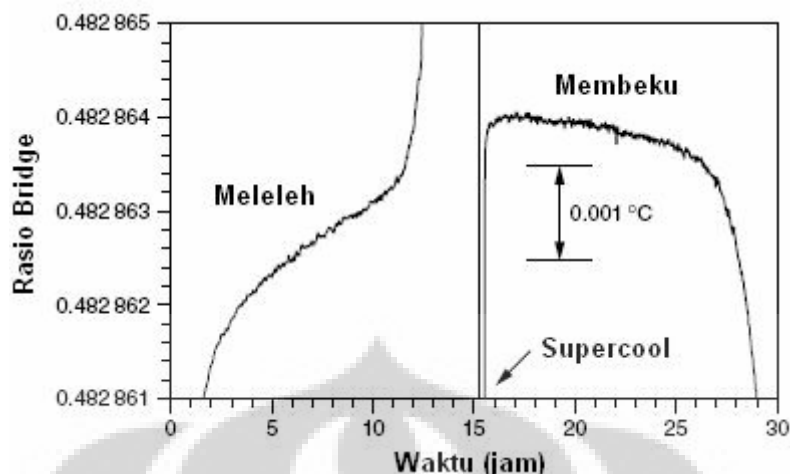


Gambar 6. Desain dasar sel logam tipe terbuka

2.1.2.4. Titik beku timah (Sn) suhu 231,928 °C

ITS-90 menetapkan titik beku Sn sebagai standar primer untuk suhu 231,928 °C. Sel ini terbuat dari logam Sn dengan kemurnian 99,9999% (6N) yang sudah tersedia di pasaran. Wadah sel umumnya terbuat dari grafit disamping juga bahan lain yang dapat tetapi jarang digunakan seperti boron nitrida (BN). Suhu *supercooling* Sn umumnya sekitar 25 °C atau lebih sehingga untuk memperoleh titik beku biasanya harus diawali dengan mengangkat sel keluar dari tungku untuk mempercepat proses pendinginan.

Logam Sn untuk bahan pembuatan sel biasanya tersedia dalam bentuk pelet kecil dan batangan. Tetapan cryoscopic pertama timah adalah 0,00329/K sehingga titik beku timah dengan kemurnian 99,9999% mendekati 0,3 mK lebih rendah dari timah murni 100% [1]. Desain dasar sel titik beku timah sama halnya dengan titik beku logam lainnya yaitu terbuat dari wadah grafit yang berisi sampel timah murni dan diletakkan dalam tabung quartz yang diisi gas argon (lihat Gambar 6). Gambar 7 menunjukkan grafik sel titik tetap timah ketika meleleh, mengalami *supercooling* dan akhirnya membeku.



Gambar 7. Titik leleh, titik beku dan *supercooling* dari timah

2.1.2.5. Titik beku seng (Zn) suhu 419,527 °C

ITS-90 menetapkan titik beku Zn sebagai standar primer untuk suhu 419,527 °C. Sel ini terbuat dari logam Zn dengan kemurnian 99,9999% (6N) yang sudah tersedia di pasaran. Wadah sel umumnya terbuat dari grafit disamping juga bahan lain yang dapat tetapi jarang digunakan seperti boron nitrida (BN). Suhu *supercooling* Zn umumnya sekitar 0,02 °C sampai 0,06 °C sehingga tidak seperti halnya dengan sel Sn maka sel Zn tidak perlu diangkat dari tungku. Wadah sel umumnya terbuat dari bahan grafit disamping juga bahan lain yang dapat tetapi jarang digunakan seperti boron nitrida. Logam Zn untuk bahan pembuatan sel umumnya tersedia dalam bentuk pelet atau batangan. Tetapan cryoscopic pertama seng adalah 0,00185/K sehingga titik beku seng dengan kemurnian 99,9999% mendekati 0,5 mK lebih rendah dari seng murni 100%. [1]

2.1.2.6. Titik beku aluminium (Al) suhu 660,323 °C

ITS-90 menetapkan titik beku Al sebagai standar primer untuk suhu 660,323 °C. Sel ini terbuat dari logam Al dengan kemurnian 99,9999% (6N) yang telah tersedia di pasaran. Wadah sel terbuat dari bahan grafit dengan kemurnian tinggi. Suhu *supercooling* Al umumnya sekitar 1 °C sampai 2 °C sehingga proses inisialisasi titik beku bisa dilakukan dalam tungku tanpa harus mengangkatnya keluar.

Aluminium sangat reaktif terutama pada batas suhu lelehnya dimana pada kondisi cair logam ini dapat melarutkan banyak logam lainnya. Disamping itu aluminium juga dapat bereaksi dengan kelembaban membentuk suatu oksida dan mengikat hidrogen. Senyawa Al_4C_3 dan aluminium oksikarbida pernah ditemukan dalam sel Al setelah dipanaskan pada suhu $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Karena reaktivitas kimia dari aluminium sangat tinggi maka grafit yang berisi sel Al harus dilindungi dengan tabung fused silica (quartz).

Tabung ini kemudian diisi dengan gas argon atau helium pada tekanan 1 atm untuk menghilangkan reaksi dengan kelembaban, hidrogen, oksigen, hidrokarbon dan material lainnya yang memungkinkan beraksi dengan aluminium cair. Sel Al tidak boleh dipanaskan lebih dari $5\text{ }^\circ\text{C}$ di atas titik bekunya. Tetapan cryoscopic pertama aluminium adalah $0,00149/\text{K}$ sehingga titik beku aluminium kemurnian 99,9999% mendekati $0,7\text{ mK}$ lebih rendah dari Al murni 100%. [1]

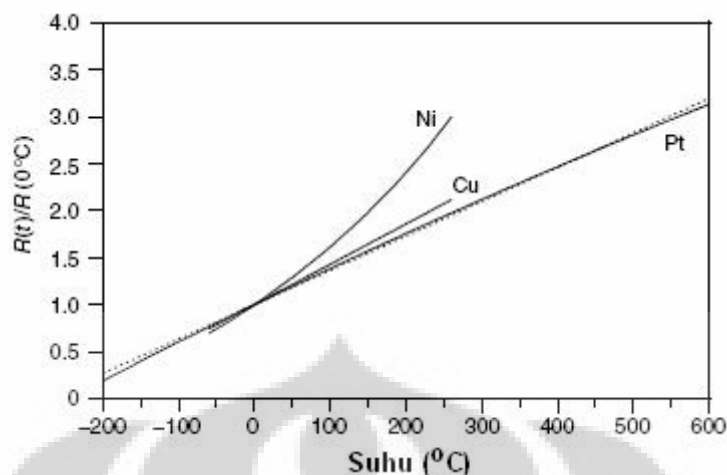
2.1.2.7. Titik beku perak (Ag) suhu $961,78\text{ }^\circ\text{C}$

ITS-90 menetapkan titik beku Ag sebagai standar primer untuk suhu $961,78\text{ }^\circ\text{C}$. Sel ini terbuat dari logam perak dengan kemurnian 99,9999% (6N) yang biasanya tersedia di pasaran dalam bentuk pelet. Wadah sel terbuat dari grafit kemurnian tinggi. Suhu *supercooling* Ag umumnya lebih dari $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ sehingga proses inialisasi titik beku bisa langsung dilakukan dalam tungku.

Oksigen diketahui dapat larut dalam cairan perak membentuk senyawa Ag_2O yang menyebabkan titik beku perak menjadi lebih rendah. Tetapan cryoscopic pertama dari perak sangat kecil yaitu $0,000891/\text{K}$ sehingga titik liquidus dari perak dengan kemurnian 99,9999% akan lebih rendah mendekati $1,1\text{ mK}$ dari perak murni 100%.

2.2. Termometer Tahanan Platina (PRT)

Termometer tahanan platina atau lebih dikenal dengan nama PRT (*Platinum Resistance Thermometry*) merupakan sensor suhu yang sangat istimewa. Dalam berbagai bentuknya termometer ini dapat mengukur suhu pada rentang $-260\text{ }^\circ\text{C}$



Gambar 7. Linearitas platina terhadap perubahan suhu

sampai 962°C dengan akurasi mendekati 1 mK . Termometer ini banyak sekali digunakan dalam berbagai aplikasi pengukuran suhu, karena disamping harganya terjangkau, PRT juga sangat presisi dan akurat dibandingkan termometer lainnya.

Tidak seperti sensor suhu lainnya, PRT memerlukan stimulasi luar dalam teknik pengukuran arus dan tegangan sensor untuk kemudian dapat diketahui nilai tahanannya. Hal ini akan menambah terjadinya kesalahan terkait dengan alat ukur tahanan yang digunakan. Walaupun demikian untuk saat ini PRT masih menjadi termometer kontak terbaik dengan akurasi yang sangat baik. Linearitas PRT juga diketahui sangat baik karena sensor ini dibuat dari lilitan kawat platina murni yang diproteksi dari kontaminasi udara luar. Gambar 7 menunjukkan linearitas logam platina terhadap perubahan suhu dibandingkan logam lain seperti nikel dan tembaga.

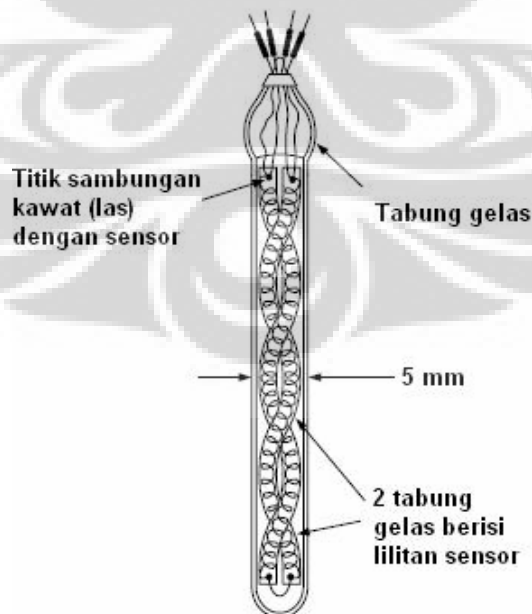
2.2.1. Termometer tahanan platina standar (SPRT)

Terdapat 3 tipe SPRT dengan konstruksi berbeda yang digunakan sebagai alat interpolasi pada skala suhu ITS-90 yaitu:

1. SPRT tipe kapsul (*capsule SPRT*) yang dapat digunakan pada rentang suhu $13,8\text{ K}$ sampai 157°C . Bentuknya kecil dengan panjang sekitar 50 mm sampai 60 mm dan diameter 5 mm (lihat Gambar 8). Pada umumnya SPRT ini diisi

dengan gas helium pada tekanan 30 kPa untuk meningkatkan kontak termal dan respon waktu dari sensor. Sensor ini umumnya mempunyai tahanan nominal $25,5 \Omega$ pada titik tripel air.

2. SPRT tipe laras panjang (*long-stem SPRT*) dapat digunakan pada rentang suhu 84 K sampai $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari gelas atau quartz dengan panjang sekitar 450 mm dan diameter 8 mm. Lilitan kawat sensor umumnya sama dengan tipe kapsul dengan nilai tahanan nominal sekitar $25,5 \Omega$. Selubung sensor umumnya diisi dengan gas mulia yang dicampur dengan oksigen dengan tekanan parsial 2 kPa. Konsentrasi ini dipilih untuk mengontrol keadaan oksidasi pada kawat platina dan mencegah impuritas pada platina karena pengaruh oksidasi. Untuk menghindari hal tersebut maka SPRT tipe ini dibatasi penggunaannya sampai suhu $660 \text{ }^\circ\text{C}$ saja.
3. SPRT suhu tinggi atau sering disingkat dengan HTSPRT (*High Temperature SPRT*) adalah SPRT tipe laras panjang yang dibuat khusus untuk aplikasi suhu tinggi sampai $962 \text{ }^\circ\text{C}$. Selubung dan komponen pendukung sensor hampir semuanya terbuat dari quartz. HTSPRT mempunyai nilai tahanan nominal $0,25 \Omega$ lebih rendah dari tipe lainnya untuk mengurangi pengaruh kebocoran arus listrik (*noise*) selama pengukuran.



Gambar 8. SPRT tipe kapsul Pt- 25Ω

2.2.2. Kriteria SPRT menurut ITS-90

ITS-90 menetapkan kriteria untuk SPRT diantaranya adalah elemen sensor harus terbuat dari bahan platina murni dengan kontruksi bebas muai (*strain-free*). Rasio tahanan pada titik leleh Ga terhadap titik tripel H₂O yaitu $W(29,7646\text{ }^{\circ}\text{C})$ harus lebih besar atau sama dengan 1,11807 [1] seperti persamaan berikut:

$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{R(29,7646^{\circ}\text{C})}{R(0,01^{\circ}\text{C})} \geq 1,11807 \quad (5)$$

Untuk SPRT yang digunakan sampai suhu tinggi (*High Temperature SPRT*) maka rasio tahanan pada titik beku Ag terhadap titik tripel H₂O yaitu $W(961,78\text{ }^{\circ}\text{C})$ harus lebih besar atau sama dengan 4,2844 [1] seperti persamaan berikut:

$$W(961,78^{\circ}\text{C}) = \frac{R(961,78^{\circ}\text{C})}{R(0,01^{\circ}\text{C})} \geq 4,2844 \quad (6)$$

Rentang suhu SPRT sangat tergantung dari desain termometer tersebut dimana umumnya sebuah SPRT tidak bisa digunakan pada seluruh rentang suhu untuk aplikasi pengukuran akurasi tinggi ($U < \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$). Untuk pengukuran pada rentang suhu (-259,3467 ~ 231,928) °C dapat menggunakan SPRT tipe kapsul (*capsul-type SPRT*) dengan tahanan nominal 25,5 Ω pada suhu 0,01 °C. Tipe SPRT laras panjang (*long-stem SPRT*) dapat digunakan pada rentang suhu (-196,15 ~ 660,323) °C dan untuk rentang suhu (660,323 ~ 961,78) °C harus menggunakan SPRT untuk aplikasi suhu tinggi yaitu HTSPRT (*High Temperature SPRT*) yang mempunyai nilai tahanan nominal 0,25 Ω atau 2,5 Ω pada suhu 0,01 °C. [1]

Ketika SPRT digunakan pada suhu tinggi (di atas 660 °C) biasanya akan terjadi kebocoran arus pada isolasi kawat platina (*lead wire*) yang sangat signifikan dan hal ini dapat diibaratkan seperti resistor yang terhubung sejajar (*parallel*). Efek ini dapat dikurangi bila tegangan antar kawat dibuat rendah yaitu dengan desain tahanan SPRT yang cukup rendah pula (0,25 Ω ~ 2,5 Ω).

SPRT dengan selubung proteksi terbuat dari bahan gelas borosilikat atau *stainless steel* dapat digunakan sampai batas suhu 420 °C. Jika selubung proteksi terbuat dari bahan *inconel* maka SPRT dapat digunakan sampai batas suhu 660 °C. Untuk SPRT suhu tinggi (HTSPRT) maka selubung proteksi harus terbuat dari *fused silica (quartz)* yang dapat digunakan sampai suhu 962 °C. [1]

2.2.3. Koreksi dan Ketidakpastian SPRT

2.2.3.1. Pengaruh tekanan

Suhu titik beku, titik leleh dan titik uap suatu sel titik tetap berubah terhadap tekanan. ITS-90 mendefinisikan skala suhu titik tetap tersebut pada tekanan 1 atm atau 101,325 kPa (kecuali untuk titik uap H₂ ditetapkan pada tekanan 33,3306 kPa). Koreksi diperlukan bila tekanan titik tetap tersebut tidak sama dengan 101,325 kPa selama proses pengukuran. Secara umum koreksi tekanan adalah ΔP yaitu perbedaan tekanan terukur terhadap tekanan standar ($\Delta P = P_{\text{terukur}} - P_0$). P_0 diketahui sebagai tekanan standar atmosfer 1 atm atau sebesar 101,325 kPa.

Tabel 3. Pengaruh tekanan terhadap suhu titik tetap ITS-90

Titik tetap	t_{90} (°C)	dT/dP ($\times 10^8$ K/Pa)*	dT/dh ($\times 10^3$ K/m)
e-H ₂ TP	-259,3476	34	0,25
Ne TP	-248,539	16	1,9
O ₂ TP	-218,7916	12	1,5
Ar TP	-189,3442	25	3,3
Hg TP	-38,8344	5,4	7,1
H ₂ O TP	0,01	-7,5	-0,73
Ga MP	29,7646	-2,0	-1,2
In FP	156,5985	4,9	3,3
Sn FP	231,928	3,3	2,2
Zn FP	419,527	4,3	2,7
Al FP	660,323	7,0	1,6
Ag FP	961,78	6,0	5,4
Au FP	1064,18	6,1	10
Cu FP	1084,62	3,3	2,6

* satuan ini sama dengan mK/atm

Koreksi suhu karena pengaruh tekanan ΔT_p dapat diperoleh menggunakan persamaan (3) dimana dT/dP adalah rata-rata perubahan suhu terhadap tekanan pada suatu titik tetap yang nilainya dapat diperoleh dari dokumen ITS-90 (lihat Tabel 3).

$$\Delta T_p = \frac{dT}{dP} (P_{\text{terukur}} - P_0) \quad (7)$$

Ketidakpastian dari koreksi suhu karena pengaruh tekanan pada SPRT dapat diperoleh menggunakan persamaan (4) dimana $u_{P,\text{terukur}}$ adalah ketidakpastian pada pengukuran tekanan yang dalam hal ini menggunakan *pressure gauge* digital dengan resolusi pembacaan 0,01. Ketidakpastian ini dapat dicari menggunakan persamaan (5).

$$u_{T,P}^2 = \left(\frac{dT}{dP} \right)^2 u_{P,\text{terukur}} \quad (8)$$

$$u_{P,\text{terukur}} = \frac{\frac{1}{2} \times \text{Resolusi}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

2.2.4. Pengaruh hidrostatik

Definisi skala suhu titik tetap ITS-90 terletak pada daerah permukaan material murni dimana terjadi transisi fase suatu zat. Dalam prakteknya sensor SPRT diletakan pada bagian paling bawah dari sebuah sel titik tetap sehingga terjadi jarak sejauh h dihitung dari bagian tengah sensor terhadap permukaan material sel. Jarak h ini ($h = h_{\text{liq}} - h_{\text{SPRT}}$) menjadi koreksi suhu karena pengaruh hidrostatik ΔT_{hyd} yang dapat diperoleh menggunakan persamaan (6).

$$\Delta T_{\text{hyd}} = \frac{dT}{dh} (h_{\text{liq}} - h_{\text{SPRT}}) \quad (10)$$

Ketidakpastian dari koreksi suhu karena pengaruh hidrostatik pada SPRT dapat diperoleh menggunakan persamaan (7) dimana $u_{h,\text{liq}}$ dan $u_{h,\text{SPRT}}$ adalah ketidakpastian elevasi dalam pengukuran kedalaman permukaan sel dan panjang

sensor SPRT. Ketidakpastian-ketidakpastian ini dapat diperoleh menggunakan persamaan yang identik dengan persamaan (5) sebelumnya.

$$u_{\text{hyd}}^2 = \left(\frac{dT}{dh} \right)^2 (u_{\text{h,liq}} + u_{\text{h,SPRT}}) \quad (11)$$

2.2.5. Pengaruh pemanasan diri (*self heating*)

Sensor SPRT merupakan komponen pasif yang harus dialiri arus listrik ketika mengukur tahanannya. Secara teknis aliran arus listrik menimbulkan daya disipasi yang akan menaikkan suhu sensor dari dalam dirinya sendiri (*self heating*). Koreksi pemanasan diri dilakukan dengan metode pengukuran tahanan SPRT pada 2 arus eksitasi yang berbeda. Pada sensor Pt-2,5 pengukuran dilakukan pada arus 5 mA dan $5\sqrt{2}$ mA sedangkan untuk sensor Pt-25 dilakukan pada arus 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA. Kesalahan pengukuran suhu karena pengaruh ini dapat dihitung menggunakan persamaan (8).

$$\Delta T_{\text{sh}} = \frac{R(t)I^2}{h} \quad (12)$$

dimana $R(t)$ adalah tahanan elemen sensor pada suhu t , I adalah arus eksitasi pada sensor dan h adalah konstanta disipasi yang nilainya berkisar antara (1~1000) $\text{mW}^\circ\text{C}^{-1}$. Koreksi tahanan karena pemanasan diri ΔR_{sh} dapat juga dihitung menggunakan persamaan (9)

$$\Delta R_{\text{sh}} = R(i\sqrt{2}) - R(i) \quad (13)$$

dimana i adalah arus eksitasi dari jembatan tahanan dalam mA.

Ketidakpastian koreksi suhu pada arus eksitasi 0 mA atau u_{T_0} dapat diperoleh menggunakan persamaan (10), dimana u_T adalah ketidakpastian pada suhu T , I_1 dan I_2 adalah arus eksitasi pada elemen sensor.

$$u_{T_0} = \frac{(I_1^4 + I_2^4)^{\frac{1}{2}}}{|I_1^2 - I_2^2|} u_T \quad (14)$$

2.3. Realisasi ITS-90 dengan SPRT

Realisasi ITS-90 adalah suatu usaha untuk mengimplementasikan skala suhu yang telah disepakati melalui konvensi internasional dan direkomendasikan untuk diadopsi oleh seluruh lab suhu di setiap negara di dunia. Secara utuh skala ini dapat direalisasikan dalam rentang dan sub-rentang suhu yang sudah ditetapkan dalam dokumen ITS-90 (lihat Gambar 3). Penelitian ini merealisasikan skala suhu ITS-90 pada rentang 0 °C ~ 961,78 °C beserta sub-rentang yang ada didalamnya dan menggunakan SPRT sebagai alat interpolasinya.

2.3.1. Rentang W_6 (0 °C ~ 961,78 °C, titik beku Ag)

Pada rentang suhu (0 ~ 961,78) °C, persamaan untuk fungsi acuan $W_r(t_{90})$ adalah sebagai berikut:

$$W_r(t_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i [(t_{90} - 754,15)/481]^i \quad (15)$$

Fungsi kebalikan yang ekivalen dengan persamaan ini mempunyai kesalahan sebesar $\pm 0,00013$ °C adalah sebagai berikut:

$$t_{90} = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \{ [W_r(t_{90}) - 2,64]/1,64 \}^i \quad (16)$$

dimana nilai tetapan C_0 , D_0 , C_i dan D_i diperoleh dari dokumen ITS-90 seperti dapat dilihat pada Tabel 4.

Jika SPRT akan digunakan pada rentang suhu 0 °C ~ 961,78 °C maka harus dikalibrasi pada titik tripel H₂O (0,01 °C), titik beku Sn (231,928 °C), Zn (419,527 °C), Al (660,323 °C) dan Ag (961,78 °C). Fungsi simpangan untuk rentang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta W_6(t_{90}) = a_6 [W(t_{90}) - 1] + b_6 [W(t_{90}) - 1]^2 + c_6 [W(t_{90}) - 1]^3 + d [W(t_{90}) - W(660,323^\circ\text{C})]^2 \quad (17)$$

Tabel 4. Nilai tetapan C_i dan D_i

Tetapan	Nilai	Tetapan	Nilai
C_0	2,781 572 54	D_0	439,932 854
C_1	1,646 509 16	D_1	472,418 020
C_2	-0,137 143 90	D_2	37,684 494
C_3	-0,006 497 67	D_3	7,472 018
C_4	-0,002 344 44	D_4	2,920 828
C_5	0,005 118 68	D_5	0,005 184
C_6	0,001 879 82	D_6	-0,963 864
C_7	-0,002 044 72	D_7	-0,188 732
C_8	-0,000 461 22	D_8	0,191 203
C_9	0,000 457 24	D_9	0,049 025

Koefisien a_6 , b_6 dan c_6 dapat dihitung dari data kalibrasi pada titik tripel H_2O ($0,01\text{ }^\circ\text{C}$) sampai dengan titik beku Al ($669,323\text{ }^\circ\text{C}$) dimana akan diperoleh 3 buah persamaan dengan 3 peubah yaitu koefisien yang akan hitung (a_6 , b_6 dan c_6). Ketiga persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk matrik orde 3 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta W_6(t_{90})_{Sn} \\ \Delta W_6(t_{90})_{Zn} \\ \Delta W_6(t_{90})_{Al} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [W(t_{90})-1]_{Sn} & [W(t_{90})-1]_{Sn}^2 & [W(t_{90})-1]_{Sn}^3 \\ [W(t_{90})-1]_{Zn} & [W(t_{90})-1]_{Zn}^2 & [W(t_{90})-1]_{Zn}^3 \\ [W(t_{90})-1]_{Al} & [W(t_{90})-1]_{Al}^2 & [W(t_{90})-1]_{Al}^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_6 \\ b_6 \\ c_6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap komponen maka dapat diperoleh nilai koefisien a_6 , b_6 dan c_6 .

Koefisien d dapat dihitung setelah nilai koefisien a_6 , b_6 dan c_6 diperoleh. Perhitungan tersebut menggunakan data kalibrasi SPRT pada titik beku Ag ($961,78\text{ }^\circ\text{C}$). Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$d = \frac{\Delta W_6(t_{90})_{Ag} - a_6 [W(t_{90})-1]_{Ag} - b_6 [W(t_{90})-1]_{Ag}^2 - c_6 [W(t_{90})-1]_{Ag}^3}{[W(t_{90})_{Ag} - W(660,323^\circ\text{C})]^2} \quad (19)$$

2.3.2. Sub-rentang W_7 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$, titik beku Al)

Untuk SPRT yang digunakan pada sub-rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$, termometer tersebut harus dikalibrasi pada titik tripel H_2O ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik beku Sn ($231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$), Zn ($419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan Al ($660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$). Fungsi simpangan pada rentang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta W_7(t_{90}) = a_7 [W(t_{90}) - 1] + b_7 [W(t_{90}) - 1]^2 + c_7 [W(t_{90}) - 1]^3 \quad (20)$$

Koefisien a_7 , b_7 dan c_7 identik dengan koefisien a_6 , b_6 dan c_6 pada sub-rentang W_6 dan dengan metode yang sama mengacu ke persamaan (9) maka nilai koefisien tersebut dapat diperoleh.

2.3.3. Sub-rentang W_8 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$, titik beku Zn)

Untuk SPRT yang digunakan pada sub-rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$, termometer tersebut harus dikalibrasi pada titik tripel H_2O ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik beku Sn ($231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan titik beku Zn ($419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$). Fungsi simpangan untuk rentang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta W_8(t_{90}) = a_8 [W(t_{90}) - 1] + b_8 [W(t_{90}) - 1]^2 \quad (21)$$

Koefisien a_8 dan b_8 dapat dihitung dari data kalibrasi pada titik beku Sn ($231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan Zn ($419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$) dimana akan diperoleh 2 buah persamaan dengan 2 peubah yaitu a_8 dan b_8 . Kedua persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk matrik orde 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta W_8(t_{90})_{\text{Sn}} \\ \Delta W_8(t_{90})_{\text{Zn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [W(t_{90}) - 1]_{\text{Sn}} & [W(t_{90}) - 1]_{\text{Sn}}^2 \\ [W(t_{90}) - 1]_{\text{Zn}} & [W(t_{90}) - 1]_{\text{Zn}}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_8 \\ b_8 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap komponen maka dapat diperoleh nilai koefisien a_8 dan b_8 .

2.3.4. Sub-rentang W_9 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$, titik beku Sn)

Untuk SPRT yang digunakan pada sub-rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$, termometer tersebut harus dikalibrasi pada titik tripel H_2O ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik beku In ($156,5985$

°C) dan titik beku Sn (231,928 °C). Fungsi simpangan untuk rentang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta W_9(t_{90}) = a_9[W(t_{90}) - 1] + b_9[W(t_{90}) - 1]^2 \quad (23)$$

Koefisien a_9 dan b_9 identik dengan koefisien a_8 dan b_8 pada sub-rentang W_8 . Koefisien-koefisien ini dihitung dari 2 persamaan dari rasio tahanan pada titik beku In dan Sn. Dengan metode yang sama yaitu mengacu ke persamaan (13) dan data kalibrasi pada masing-masing titik tetap maka nilai koefisien tersebut dapat diperoleh.

2.3.5. Sub-rentang W_{10} (0 °C ~ 156,5985 °C, titik beku In)

Untuk SPRT yang digunakan pada sub-rentang 0 °C ~ 156,5985 °C, termometer tersebut harus dikalibrasi pada titik tripel H₂O (0,01 °C) dan titik beku In (156,5985 °C). Fungsi simpangan untuk rentang tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta W_{10}(t_{90}) = a_{10}[W(t_{90}) - 1] \quad (24)$$

Koefisien a_{10} dapat dihitung dari data kalibrasi pada titik beku In (156,5985 °C) dengan persamaan sebagai berikut:

$$a_{10} = \frac{\Delta W_{10}(t_{90})_{\text{In}}}{[W(t_{90}) - 1]_{\text{In}}} \quad (25)$$

2.3.6. Sub-rentang W_{11} (0 °C ~ 29,7646 °C, titik beku Ga)

Untuk SPRT yang digunakan pada sub-rentang W_{11} (0 °C ~ 29,7646 °C), termometer tersebut harus dikalibrasi pada titik tripel H₂O (0,01 °C) dan titik leleh Ga (29,7646 °C). Fungsi simpangan untuk sub-rentang W_{11} identik dengan persamaan (15) pada sub-rentang W_{10} yaitu sebagai berikut:

$$\Delta W_{11}(t_{90}) = a_{11}[W(t_{90}) - 1] \quad (26)$$

Koefisien a_{11} dapat dihitung dari data kalibrasi pada titik leleh Ga (29,7646 °C) dengan persamaan sebagai berikut:

$$a_{11} = \frac{\Delta W_{11}(t_{90})_{\text{Ga}}}{[W(t_{90}) - 1]_{\text{Ga}}} \quad (27)$$

Bab 3

Karakteristik Standar dan Alat

3.1. Sel Standar (Titik Tetap Suhu)

Sel standar atau titik tetap suhu adalah bentuk fisik dari definisi skala suhu dalam hal ini ITS-90. Untuk realisasi skala suhu pada rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan termasuk sub-rentang di dalamnya diperlukan sejumlah titik tetap yaitu titik tripel H_2O ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik leleh Ga ($29,7646\text{ }^{\circ}\text{C}$), titik beku In ($156,5985\text{ }^{\circ}\text{C}$), Sn ($231,928$), Zn ($419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$), Al ($660,523\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan Ag ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$). Desain standar untuk setiap sel titik tetap dijelaskan secara rinci dalam dokumen ITS-90 (lihat Gambar 5 dan 6).

Sel titik tetap dapat dibuat sendiri atau membeli dari produsen peralatan suhu seperti Hart Scientific, Pond Engineering, Yellow Spring, Isothermal Technology dan beberapa perusahaan lainnya. Umumnya sel ini dibuat dalam 2 tipe yaitu tipe tertutup (*sealed/close cell*) dan tipe terbuka (*open cell*). Sel tertutup mempunyai desain lebih sederhana, mudah dioperasikan dan koreksi tekanan disesuaikan dengan desain pabrik. Sel terbuka lebih rumit dalam desain karena memerlukan sistem vakum untuk mengatur tekanan internal sel sehingga pengukuran suhu lebih akurat.

Sebagian besar sel titik tetap di Puslit KIM-LIPI dibeli dari Hart Scientific, beberapa sel juga dibeli dari Pond Engineering, Yellow Spring dan ada juga yang



Sumber: Katalog Hart Scientific

Gambar 10. Sel titik triplel H₂O model 5901C (kiri), titik tetap logam tipe tertutup model 590X (tengah) dan tipe terbuka model 592X (kanan) buatan Hart Scientific dibuat sendiri di Puslit KIM-LIPI yaitu titik beku Sn, Zn dan Al sebagai standar sekunder. Beberapa contoh sel titik tetap model 590X dan 592X buatan Hart Scientific dapat dilihat pada Gambar 10.

Sel titik tetap model 590X (5904, 5905, 5906, 5907 dan 5908) adalah sel tipe tertutup yang kemudian dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka yaitu model 592X (5924, 5925, 5926, 5927 dan 5928). Modifikasi dilakukan dengan mengganti tabung kuarsa (*quartz tube*) tipe tertutup dengan sistim tipe terbuka sehingga memungkinkan sirkulasi gas argon dan mengaturnya pada tekanan standar atmosfer (101,325 kPa). Model 5943 adalah titik tetap Ga tipe tertutup dengan tabung stainless steel yang tidak dapat dimodifikasi dan diatur tekanannya.

3.1.1. Titik triplel H₂O model PTB4 S/N 89-222

Sel titik triplel H₂O model PTB4 S/N 89-222 adalah hibah dari PTB (*Physikalisch Technische Bundesanstalt*) Jerman. PTB merupakan lembaga metrologi nasional Jerman yang telah banyak memberi bantuan kepada Puslit KIM-LIPI di era tahun

80-an. PTB4 diperkirakan dibuat sekitar tahun 1989 sesuai kode nomor seri pada sel dan dijadikan sebagai standar suhu 0,01 °C dengan ketidakpastian $\pm 0,0005$ °C.

Tidak banyak informasi yang bisa diperoleh dari sel ini sehingga komposisi isotopik hanya diperkirakan dari perbedaan suhu terhadap standar V-SMOW (ΔT) dan sifat meteorik air yaitu hubungan pendekatan $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 0,01$ dan $1 + \delta^{17}\text{O} = (1 + \delta^{18}\text{O})^{0,528}$ [3]. Dengan menggunakan persamaan (1), (2), (3), (4) dan sifat meteorik air maka dapat diperkirakan komposisi isotopik sel PTB4 sebagai berikut:

$$(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{PTB4}} = 0,00026532$$

$$(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{PTB4}} = 0,00217899$$

$$(^{17}\text{O}/^{18}\text{O})_{\text{PTB4}} = 0,0002180$$

3.1.2. Titik leleh Ga model 5943 S/N Ga 43013

Sel titik leleh Ga yang digunakan adalah model 5943 dengan S/N Ga 43013 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI dan dijadikan sebagai standar primer untuk suhu 29,7646 °C mulai tahun 2001. Titik leleh Ga model 5943 terbuat dari logam Ga dengan kemurnian 99,99999%+ (7N+) yang diisi dengan gas argon 99,999% (5N) dengan tekanan internal 86,00 kPa [3]. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten yaitu Alfa Aesar® dan PRAXAIR Dist. Inc.

Sel ini pertama kali diuji dan dikalibrasi di lab metrologi Hart Scientific dan mendapat sertifikasi sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu 29,76474 °C $\pm 0,0001$ °C. Nilai $\pm 0,0001$ °C adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan (*confidence level*) 95% dengan faktor cakupan (*coverage factor*) $k=2$. [6]

3.1.3. Titik beku In model 5924 S/N In 04035

Sel titik beku In yang digunakan adalah model 5924 S/N In 04035 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. Titik

beku In merupakan standar primer untuk suhu 156,5985 °C menurut definisi ITS-90. Sel ini terbuat dari indium dengan kemurnian tinggi (99,9999%+), grafit (99,9995%+) dan diisi dengan gas argon (99,999%+) sesuai dengan kriteria yang ditetapkan ITS-90. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten.

Sel titik beku In model 5924 S/N In 04035 pada awalnya adalah sel tipe tertutup dengan dalam pencelupan (*immersion depth*) untuk termometer 195 mm. Sel ini mempunyai tekanan dalam sekitar 83,60 kPa selama proses pembekuan. Selanjutnya sel dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka dengan tujuan untuk memudahkan pengaturan dan pengukuran tekanan dalam sel selama proses pelelehan ataupun pembekuan. Desain dan ukuran sel sebelum dan sesudah modifikasi lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 10.

Sel ini sudah diuji dan dikalibrasi dengan metode analisa titik beku dan perbandingan langsung dengan standar In 8012 di lab metrologi Hart Scientific dan dinyatakan sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu titik beku 156,5982 °C ± 0,0006 °C. Nilai ± 0,0006 °C adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan k=2.

3.1.4. Titik beku Sn model 5925 S/N Sn 05065

Sel titik beku Sn yang digunakan adalah model 5925 S/N Sn 05065 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. Titik beku Sn merupakan standar primer untuk suhu 231,928 °C menurut definisi ITS-90. Sel ini terbuat dari timah dengan kemurnian tinggi (99,9999%+), grafit (99,9995%+) dan diisi dengan gas argon (99,999%+) sesuai dengan kriteria yang ditetapkan ITS-90. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten yaitu INMS Chemical Metrology of Canada, Carbone of America dan PRAXAIR Dist. Inc.

Sel titik beku Sn model 5925 S/N Sn 05065 pada awalnya adalah sel tipe tertutup dengan dalam pencelupan untuk termometer 195 mm. Sel ini mempunyai tekanan dalam sekitar 85,20 kPa selama proses pembekuan. Selanjutnya sel

dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka dengan tujuan untuk memudahkan pengaturan dan pengukuran tekanan dalam sel selama proses pelelehan ataupun pembekuan. Desain dan ukuran sel sebelum dan sesudah modifikasi lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 10.

Sel ini sudah diuji dan dikalibrasi dengan metode analisa titik beku dan perbandingan langsung dengan standar Sn 9021 di lab metrologi Hart Scientific dan dinyatakan sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu titik beku $231,9278 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,0005 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai $\pm 0,0005 \text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k=2$.

3.1.5. Titik beku Zn model 5926 S/N Zn 06070

Sel titik beku Sn yang digunakan adalah model 5926 S/N Sn 06070 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. Titik beku Sn merupakan standar primer untuk suhu $419,527 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menurut definisi ITS-90. Sel ini terbuat dari seng dengan kemurnian tinggi (99,9999%+), grafit (99,9995%+) dan diisi dengan gas argon (99,999%+) sesuai dengan kriteria yang ditetapkan ITS-90. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten.

Sel titik beku Zn model 5906 S/N Zn 06070 pada awalnya adalah sel tipe tertutup dengan dalam pencelupan untuk termometer 195 mm. Sel ini mempunyai tekanan dalam sekitar 85,80 kPa selama proses pembekuan. Selanjutnya sel dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka dengan tujuan untuk memudahkan pengaturan dan pengukuran tekanan dalam sel selama proses pelelehan ataupun pembekuan. Desain dan ukuran sel sebelum dan sesudah modifikasi lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 9.

Sel ini sudah diuji dan dikalibrasi dengan metode analisa titik beku dan perbandingan langsung dengan standar Zn 06033 di lab metrologi Hart Scientific dan dinyatakan sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu titik beku $419,5268 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,0010 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai $\pm 0,0010 \text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k=2$.

3.1.6. Titik beku Al model 5907 S/N Al 07096

Sel titik beku Al yang digunakan adalah model 5907 S/N Al 07096 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. Titik beku Sn merupakan standar primer untuk suhu 660,323 °C menurut definisi ITS-90. Sel ini terbuat dari seng dengan kemurnian tinggi (99,9999%+), grafit (99,9995%+) dan diisi dengan gas argon (99,999%+) sesuai dengan kriteria yang ditetapkan ITS-90. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten.

Sel titik beku Al model 5907 S/N Al 07096 pada awalnya adalah sel tipe tertutup dengan dalam pencelupan untuk termometer 195 mm. Sel ini mempunyai tekanan dalam sekitar 85,60 kPa selama proses pembekuan. Selanjutnya sel dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka dengan tujuan untuk memudahkan pengaturan dan pengukuran tekanan dalam sel selama proses pelelehan ataupun pembekuan. Desain dan ukuran sel sebelum dan sesudah modifikasi lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 10.

Sel ini sudah diuji dan dikalibrasi dengan metode analisa titik beku dan perbandingan langsung dengan standar Al 8026 di lab metrologi Hart Scientific dan dinyatakan sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu titik beku 660,3222 °C \pm 0,0015 °C. Nilai \pm 0,0015 °C adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan k=2.

3.1.7. Titik beku Ag model 5908 S/N Ag 08046

Sel titik beku Ag yang digunakan adalah model 5908 S/N Ag 08046 buatan Hart Scientific. Sel ini dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. Titik beku Ag merupakan standar primer untuk suhu 961,78 °C menurut definisi ITS-90. Sel ini terbuat dari perak dengan kemurnian tinggi (99,9999%+), grafit (99,9995%+) dan diisi dengan gas argon (99,999%+) sesuai dengan kriteria yang ditetapkan ITS-90. Tingkat kemurnian material secara kimia sudah diuji dan mendapat sertifikasi dari lab-lab yang berkompeten yaitu Honeywell, Carbone of America dan PRAXAIR Dist. Inc.

Sel titik beku Ag model 5928 S/N Ag 08046 pada awalnya adalah sel tipe tertutup (model 5908) dengan kedalaman pencelupan (*immersion depth*) untuk termometer 195 mm. Sel ini mempunyai tekanan dalam sekitar 84,70 kPa selama proses pembekuan. Selanjutnya sel dimodifikasi di Puslit KIM-LIPI menjadi sel tipe terbuka dengan tujuan untuk memudahkan pengaturan dan pengukuran tekanan dalam sel selama proses pelelehan ataupun pembekuan. Desain dan ukuran sel sebelum dan sesudah modifikasi dapat dilihat pada Gambar 10.

Sel ini sudah diuji dan dikalibrasi dengan metode analisa titik beku dan perbandingan langsung dengan standar Ag 8020 di lab metrologi Hart Scientific dan dinyatakan sebagai standar primer menurut definisi ITS-90 dengan suhu titik beku $961,7799 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,0024 \text{ } ^\circ\text{C}$. Nilai $\pm 0,0024 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah ketidakpastian pengukuran pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k=2$.

3.2. Termometer Standar (SPRT)

SPRT adalah termometer tahanan sebagai alat standar untuk interpolasi skala suhu pada rentang dan sub-rentang yang sudah ditetapkan dalam ITS-90. Sensor SPRT berupa lilitan kawat dari bahan platina murni dengan diameter disesuaikan dengan tipe sensor yang diinginkan. Tipe Pt-2,5 dan Pt-25 digunakan sebagai standar karena dengan diameter kawat lebih besar sensor ini lebih stabil sedangkan tipe Pt-100, Pt-500 dan Pt-1000 umumnya digunakan untuk keperluan industri.



Sumber: Katalog Hart Scientific

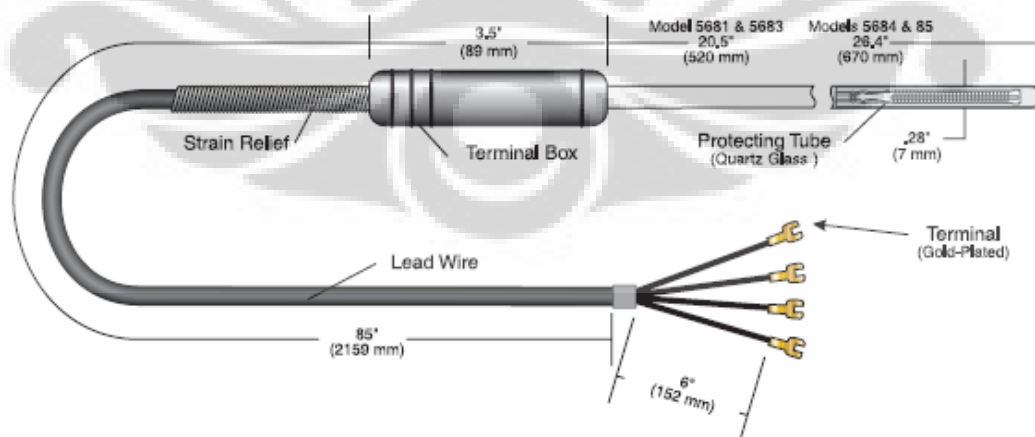
Gambar 11. SPRT model 568X (kiri) berikut bentuk sensor Pt-2,5 dan Pt-25 (kanan) buatan Hart Scientific

Semua SPRT yang digunakan untuk pengukuran suhu titik tetap dibeli dari produsen peralatan suhu yaitu Hart Scientific, Isothermal Technology dan Chino. Disamping itu beberapa SPRT dibeli dari perusahaan lain yaitu Kun Ming Metrology Centre, Rosemount dan Leed & North.

Untuk memudahkan identifikasi SPRT tersebut diberi kode berdasarkan pabrik pembuatnya diantaranya buatan Isothermal technology diberi kode Iso-1 untuk model 670 S/N 155, Iso-2 untuk model 670 S/N 136 dan Iso-3 untuk model 670 S/N 160. Buatan Chino diberi kode Chino-1 untuk model R800-2 S/N RS955-11 dan Chino-2 untuk model R800-3 S/N RS90Z-7. Buatan Hart Scientific diberi kode Hart-1 untuk model 5685 S/N 1105 dan Hart-2 untuk model 5685 S/N 1107.

3.2.1. HTSPRT Pt-2,5 Hart-1

Hart-1 adalah SPRT Pt-2,5 model 5685 S/N 1105 buatan Hart Scientific yang dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal $2,5 \Omega$ pada titik tripel air dan dapat digunakan untuk aplikasi pengukuran suhu tinggi sehingga dikenal juga dengan nama HTSPRT. Hart-1 dapat digunakan pada rentang ukur $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1070 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk rentang W_6 ($0 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78 \text{ }^{\circ}\text{C}$) atau sub-rentang W_7 ($0 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323 \text{ }^{\circ}\text{C}$) pada ITS-90.



Gambar 12. Dimensi HTSPRT Pt-2,5 model 568X buatan Hart Scientific

Sensor Pt-2,5 terbuat dari lilitan kawat platina murni berdiameter 0,2 mm dengan sensitivitas $0,01 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter 7 mm dengan panjang 680 mm. Dimensi SPRT model 568X lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 12 [3]. Dalam penelitian ini Hart-1 berfungsi sebagai cek standar untuk titik tetap Al.

3.2.2. HTSPRT Pt-2,5 Hart-2

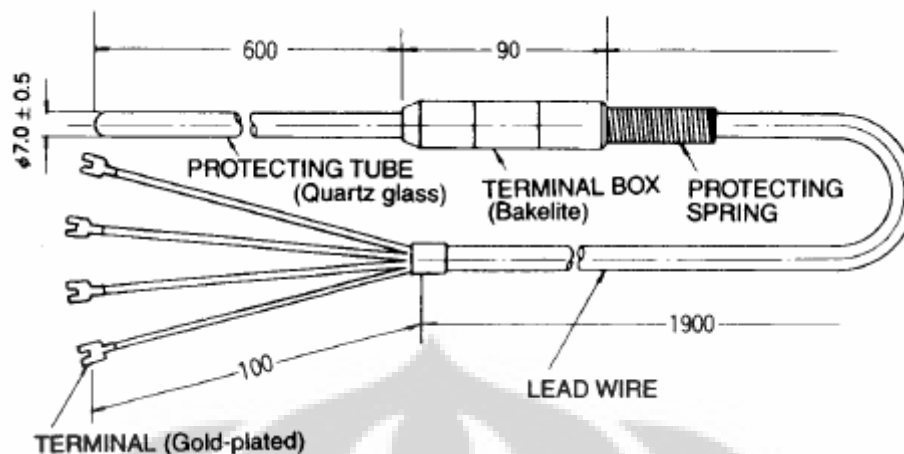
Hart-2 adalah SPRT Pt-2,5 model 5685 S/N 1107 buatan Hart Scientific yang dibeli oleh Puslit KIM-LIPI pada bulan November 2007. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal $2,5 \Omega$ pada titik tripel air dan dapat digunakan untuk aplikasi pengukuran suhu tinggi seperti halnya Hart-1.

Hart-2 dapat digunakan pada rentang ukur $0^{\circ}\text{C} \sim 1070^{\circ}\text{C}$ dan dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk rentang W_6 ($0^{\circ}\text{C} \sim 961,78^{\circ}\text{C}$) atau sub-rentang W_7 ($0^{\circ}\text{C} \sim 660,323^{\circ}\text{C}$) pada ITS-90. Sensor Pt-2,5 terbuat dari lilitan kawat platina murni berdiameter 0,2 mm dengan sensitivitas $0,01 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa (*quartz glass*) berdiameter 7 mm dengan panjang 680 mm. Dimensi SPRT model 568X lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 11 [3]. Secara umum SPRT Hart-2 mempunyai spesifikasi dan riwayat standar yang sama dengan Hart-1. Dalam penelitian ini Hart-2 dikalibrasi sampai suhu $961,78^{\circ}\text{C}$ (titik beku Ag) sesuai fungsinya sebagai termometer cek standar untuk titik tetap Ag.

3.2.3. SPRT Pt-25 Chino-1

Chino-1 adalah SPRT Pt-25 model model R800-2 S/N RS955-11 buatan Chino Corporation. Belum diketahui secara pasti kapan SPRT ini dibuat dan kemudian mulai dipakai sebagai standar di Puslit KIM-LIPI. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal $(25,5 \pm 1) \Omega$ pada titik tripel air [4] dan biasa digunakan untuk aplikasi pengukuran suhu menengah (*long stem* SPRT).

Chino-1 dapat digunakan pada rentang $(-183 \sim 661)^{\circ}\text{C}$ dan dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu pada sub-rentang W_5 ($-38,8344^{\circ}\text{C} \sim 29,7646^{\circ}\text{C}$),



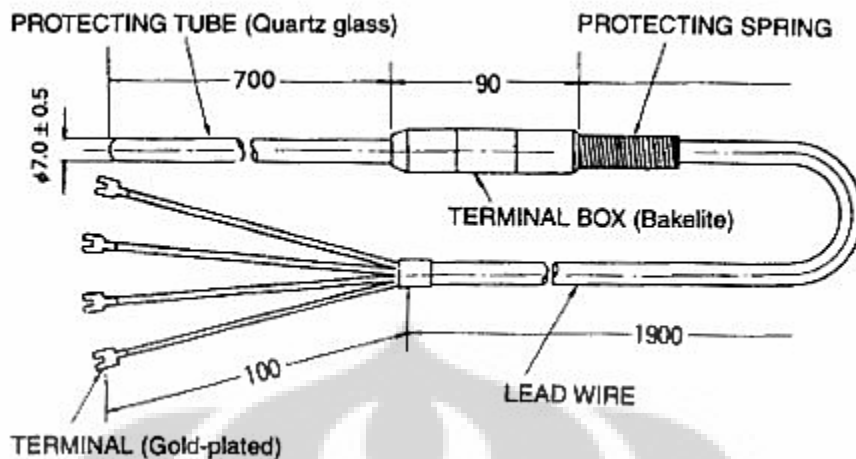
Gambar 13. Dimensi SPRT Pt-25 model R800-2 buatan Chino Corporation

W_7 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$), W_8 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$), W_9 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$), W_{10} ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 156,5985\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan W_{11} ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 29,7646\text{ }^{\circ}\text{C}$) pada ITS-90 dengan ketidakpastian tipikal $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sensor Pt-2,5 terbuat dari lilitan kawat platina murni dengan sensitivitas $0,1\ \Omega/^{\circ}\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter ($7,0 \pm 0,5$) mm dengan panjang 600 mm. Dimensi SPRT model R800-2 lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 13. [4]

3.2.4. HTSPRT Pt-2,5 Chino-2

Chino-2 adalah SPRT Pt-2,5 model R800-3 S/N RS90Z-7 buatan Chino Corporation. Belum diketahui secara pasti kapan SPRT ini dibuat dan kemudian mulai dipakai sebagai standar di Puslit KIM-LIPI. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal ($2,55 \pm 0,1$) Ω pada titik tripel air [4] dan dapat digunakan untuk aplikasi pengukuran suhu tinggi sehingga dikenal juga dengan nama HTSPRT.

Chino-2 dapat digunakan pada rentang ukur $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 962\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk rentang W_6 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) atau sub-rentang W_7 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$) pada ITS-90 dengan ketidakpastian tipikal $\pm 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sensor Pt-2,5 terbuat dari lilitan kawat platina murni dengan sensitivitas $0,01\ \Omega/^{\circ}\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter ($7,0 \pm 0,5$) mm dengan panjang 700 mm. Dimensi SPRT model R800-3 lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 14. [4]

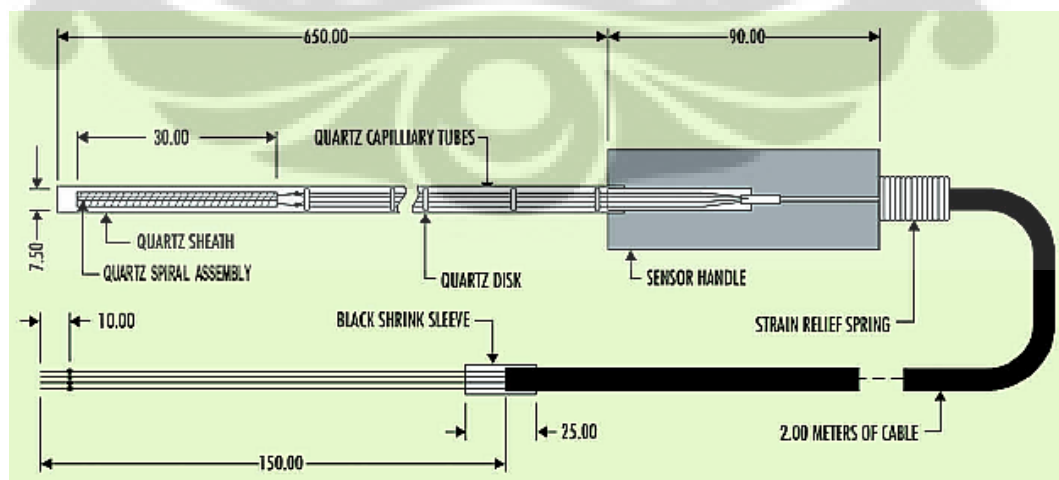


Gambar 14. Dimensi HTSPRT Pt-2,5 model R800-3 buatan Chino Corporation

3.2.5. SPRT Pt-25 Iso-1

Iso-1 adalah SPRT Pt-25 model 670 S/N 155 buatan Isothermal Technology. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal 25,5 Ω pada titik tripel air. Dibeli oleh Puslit KIM-LIPI sekitar bulan Juni 2002 dan pertama kali diuji sebagai standar di lab NTPL Inggris pada tanggal 1 Mei 2002 dengan nilai rasio tahanan pada titik leleh Ga $W(29,7646) = 1,11810 (\geq 1,11807)$. [6]

Iso-1 dapat digunakan pada rentang ukur (-200 ~ 670) $^{\circ}\text{C}$ dan dapat dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk sub-rentang W_4 (-189,3442 $^{\circ}\text{C}$



Gambar 15. Dimensi SPRT Pt-25 model 670SQ buatan Isothermal Technology

$\sim 0,01$ °C), W_5 (-38,8344 °C \sim 29,7646 °C), W_7 (0 °C \sim 660,323 °C), W_8 (0 °C \sim 419,527 °C), W_9 (0 °C \sim 231,928 °C), W_{10} (0 °C \sim 156,5985 °C) dan W_{11} (0 °C \sim 29,7646 °C) pada ITS-90.

Sensor Pt-25 terbuat dari lilitan kawat platina murni dengan panjang elemen 30 mm dan sensitivitas $0,1 \Omega/^\circ\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter 7,5 mm dengan panjang 650 mm. Dimensi SPRT model 670SQ lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 15. [5]

3.2.6. SPRT Pt-25 Iso-2

Iso-2 adalah SPRT Pt-25 model 670 S/N 136 buatan Isothermal Technology. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal $25,5 \Omega$ pada titik tripel air. Dibeli oleh Puslit KIM-LIPI sekitar bulan November 2002 dan pertama kali diuji sebagai standar di lab NTPL Inggris pada tanggal 2 Oktober 2001 dengan nilai rasio tahanan pada titik leleh Ga $W(29,7646) = 1,11809 (\geq 1,11807)$. [6]

Iso-2 dapat digunakan pada rentang ukur (-200 \sim 670) °C dan dapat dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk sub-rentang W_4 (-189,3442 °C \sim 0,01 °C), W_5 (-38,8344 °C \sim 29,7646 °C), W_7 (0 °C \sim 660,323 °C), W_8 (0 °C \sim 419,527 °C), W_9 (0 °C \sim 231,928 °C), W_{10} (0 °C \sim 156,5985 °C) dan W_{11} (0 °C \sim 29,7646 °C) pada ITS-90.

Sensor Pt-25 terbuat dari lilitan kawat platina murni dengan panjang elemen 30 mm dan sensitivitas $0,1 \Omega/^\circ\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter 7,5 mm dengan panjang 650 mm. Dimensi SPRT model 670SQ lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 15. [5]

3.2.7. SPRT Pt-25 Iso-3

Iso-3 adalah SPRT Pt-25 model 670 S/N 160 buatan Isothermal Technology. SPRT ini mempunyai nilai tahanan nominal $25,5 \Omega$ pada titik tripel air. Dibeli oleh Puslit KIM-LIPI sekitar bulan Juni 2002 dan pertama kali diuji sebagai standar di lab NTPL (*Northern Temperature Primary Laboratory*) Inggris pada

tanggal 1 Mei 2002 dengan nilai rasio tahanan pada titik leleh Ga $W(29,7646) = 1,11812 (\geq 1,11807)$. [5]

Iso-3 dapat digunakan pada rentang ukur (-200 ~ 670) °C dan dapat dijadikan alat standar untuk interpolasi suhu untuk sub-rentang W_4 (-189,3442 °C ~ 0,01 °C), W_5 (-38,8344 °C ~ 29,7646 °C), W_7 (0 °C ~ 660,323 °C), W_8 (0 °C ~ 419,527 °C), W_9 (0 °C ~ 231,928 °C), W_{10} (0 °C ~ 156,5985 °C) dan W_{11} (0 °C ~ 29,7646 °C) pada ITS-90.

Sensor Pt-25 terbuat dari lilitan kawat platina murni dengan panjang elemen 30 mm dan sensitivitas 0,1 $\Omega/^\circ\text{C}$. Selubung sensor terbuat dari tabung gelas kuarsa berdiameter 7,5 mm dengan panjang 650 mm. Dimensi SPRT model 670SQ lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 15. [6]

3.3. Media Suhu (Tungku)

Tungku titik tetap berfungsi sebagai media dan sumber panas untuk merealisasikan sejumlah titik tetap logam pada suhu di atas 0 °C yaitu titik leleh Ga, titik beku In, Sn, Zn, Al dan Ag. Tungku ini mempunyai desain khusus dengan kerataan suhu pada sumbu vertikal lebih baik dari 0,05 °C dan kontrol suhu sangat presisi dan akurat. Bentuk fisik dan spesifikasi teknis beberapa tungku titik tetap yang digunakan dalam penelitian ini secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 16 dan Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi tungku titik tetap model 9230 dan 911X buatan Hart

Scientific

Model tungku	Nomor Seri	Rentang suhu (°C)	Kerataan suhu (°C)	Fungsi
9230	A15004	15 ~ 35	± 0,03	Realisasi titik leleh Ga
9114	A3A069	100 ~ 680	± 0,02	Realisasi titik beku In
9114	A76147	100 ~ 680	± 0,02	Realisasi titik beku Sn
9116	A47021	400 ~ 1100	± 0,2	Realisasi titik beku Zn
9115A	A76005	550 ~ 1000	± 0,03	Realisasi titik beku Al
9115A	A77038	550 ~ 1000	± 0,05	Realisasi titik beku Ag
9117	A77966	300 ~ 1100	± 0,5	Annealing SPRT

Untuk realisasi titik tetap In dan Sn digunakan tungku model 9114 dengan 3 daerah kontrol suhu (*three zone controller*) yaitu bagian utama, atas dan bawah tungku. Suhu 3 daerah ini dapat diatur untuk memperoleh kerataan suhu yang paling baik (lihat Lampiran 1). Titik tetap Zn direalisasikan dengan tungku model 9116 dengan 1 daerah kontrol suhu (*single zone controller*) dengan kerataan suhu kurang memadai $\pm 0,2$ °C (lihat Lampiran 1). Hal ini dilakukan karena keterbatasan tungku yang dapat digunakan di Puslit KIM-LIPI. Sesuai spesifikasi seharusnya realisasi titik tetap Zn menggunakan tungku model 9114 dengan kerataan suhu lebih baik.

Tungku model 9115A digunakan untuk aplikasi suhu tinggi yaitu realisasi titik tetap Al dan Ag. Tungku ini mempunyai desain khusus dengan meletakkan tabung sodium (*sodium heat pipe*) di dalamnya. Proses konveksi cairan sodium di dalam tabung tersebut sangat efektif meratakan suhu tungku sampai $\pm 0,03$ °C (lihat Lampiran 1). Untuk realisasi titik leleh Ga digunakan tungku kecil (*dry well*) model 9230 yang menggunakan elemen Peltier sebagai pemanas sekaligus pendingin.



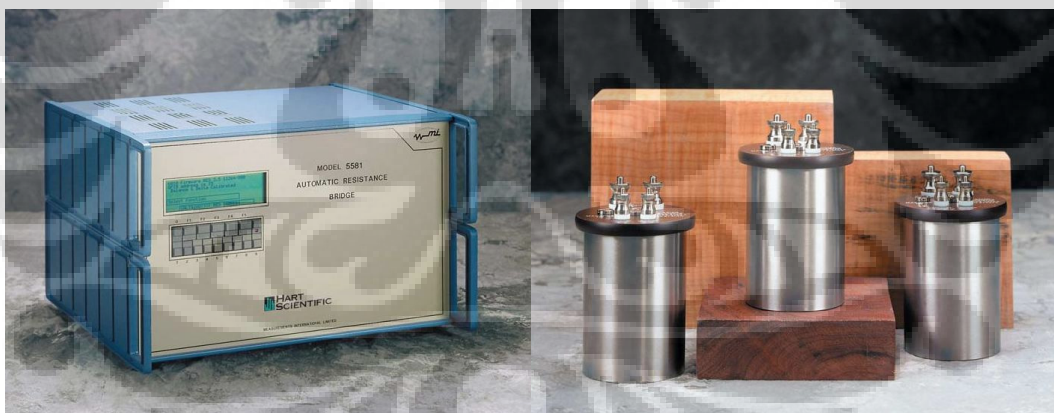
Sumber: Katalog Hart Scientific

Gambar 16. Tungku titik tetap model 911X (kiri), tungku *annealing* model 9117 (tengah) dan *dry well* model 9230 (kanan) buatan Hart Scientific

3.4. Jembatan Tahanan DC

Jembatan tahanan (*Resistance Bridge*) DC digunakan untuk mengukur tahanan SPRT selama proses pengukuran suhu pada sejumlah titik tetap. Metode ini cukup presisi dan akurat untuk mengukur tahanan SPRT yaitu dengan membandingkan tahanan terukur terhadap nilai tahanan suatu resistor standar yang dijaga pada suhu $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ di dalam bak minyak (*white oil*). Tahanan SPRT diukur pada arus 1 mA dan $\sqrt{2}\text{ mA}$ untuk Pt-25 dan pada arus 5 mA dan $5\sqrt{2}\text{ mA}$ untuk Pt-2,5.

Model 6010C adalah jembatan tahanan DC buatan Measurement International yang dapat mengukur rasio tahanan sampai $14 : 1$ dengan akurasi bisa lebih baik dari $\pm 0,05\text{ ppm}$ (lihat Gambar 16). Alat ini dapat dioperasikan secara manual atau otomatis dimana kontrol dan akusisi data dilakukan secara terprogram oleh komputer dengan antarmuka IEEE 488. Arus eksitasi maksimum bisa mencapai 150 mA namun untuk aplikasi termometri hanya digunakan arus maksimum $10\sqrt{2}\text{ mA}$ yaitu untuk SPRT dengan sensor Pt-0,25.



Sumber: Katalog Hart Scientific

Gambar 17. Jembatan tahanan DC model 6010C buatan Measurement Instrument (kiri) dan resistor standar AC/DC model 5430 buatan Tinsley

Resistor standar yang digunakan adalah model 5430 buatan Tinsley dengan nilai tahanan nominal $10\ \Omega$ untuk pengukuran tahanan SPRT Pt-2,5 dan tahanan nominal $25\ \Omega$ untuk SPRT Pt-25. Resistor ini adalah tipe AC/DC yang dapat digunakan untuk aplikasi arus AC maupun DC (lihat Gambar 17).

Bab 4

Pengujian dan Kalibrasi

4.1. Pengujian Sel Titik Tetap

Pengujian sel titik tetap dilakukan dengan mengukur plato titik tripel, titik leleh atau titik beku sel. Karakteristik yang diukur diantaranya lamanya plato dan kestabilan suhu pada proses tersebut.

4.1.1. Pengujian Sel H₂O model PTB4 S/N 89-222

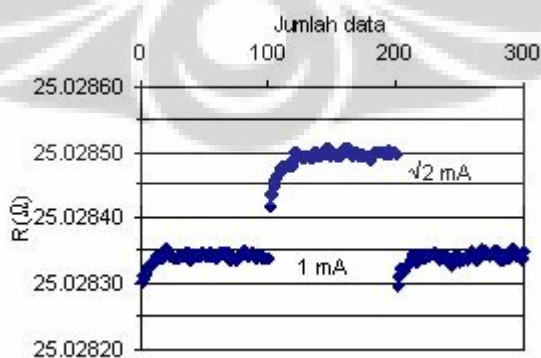
Dalam kondisi awal sel H₂O seluruhnya berupa air murni yang divakum melalui proses *degassing* sehingga terbebas dari sisa gas (*residue*). Pengujian biasanya dilakukan dengan melihat ukuran gelembung gas yang kecil dan bunyi ‘klik’ ketika sel dihentikan. Titik tripel H₂O diperoleh dengan membentuk mantel es di dalam sel sehingga terdapat 3 fase air dalam saat bersamaan. Banyak metode untuk membentuk mantel es di dalam sel diantaranya dengan memasukan es kering (*dry ice*) atau nitrogen cair ke dalam lubang ukur sel (*thermometer well*).

Gambar 18 memperlihatkan proses pembuatan mantel es menggunakan sebuah reservoir dingin berisi campuran es kering dan alkohol. Batang reservoir yang berfungsi sebagai pendingin (*cooler*) dimasukan kedalam sel untuk membentuk mantel es di sekeliling bagian dalam sel. Setelah mantel es terbentuk secara merata di sekeliling lubang ukur sel sel H₂O dipelihara di dalam



Gambar 18. Proses pembuatan mantel es pada titik tripel air

bak es selama kurang lebih 1 ~ 3 hari untuk mengurangi *stress* pada struktur es yang baru terbentuk. Pengujian dilakukan dengan mengukur keseragaman dan kestabilan suhu sel titik tripel air dengan termometer standar (SPRT). Contoh hasil pengukuran titik tripel H₂O dapat dilihat pada Grafik 1.

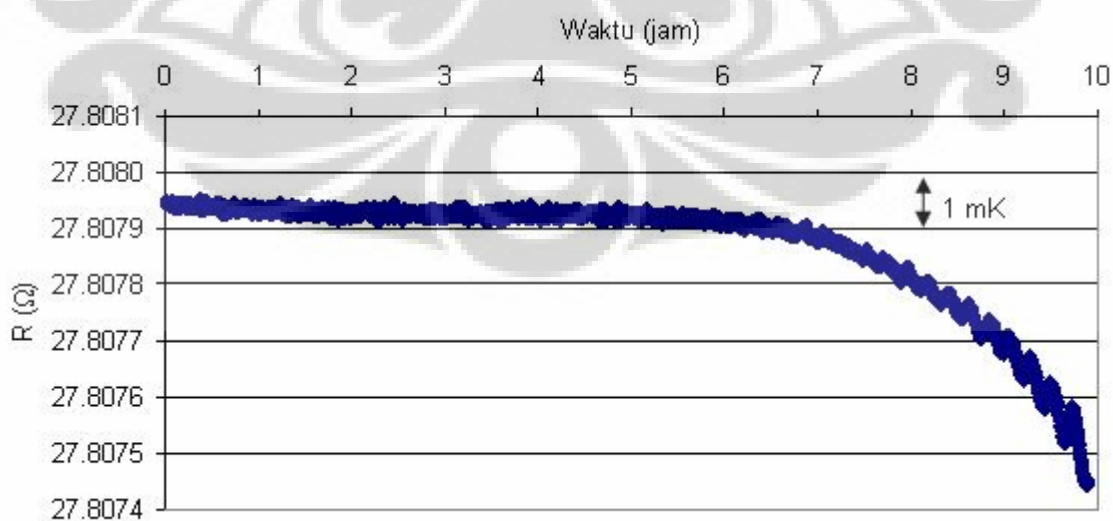


Grafik 1. Pengukuran titik tripel H₂O model PTB4 S/N 89-222 dengan Iso-2

4.1.2. Pengujian Sel Ga model 5943 S/N Ga 43013

Realisasi titik leleh Ga model 5943 S/N 43013 dilakukan secara semi otomatis di dalam tungku suhu rendah (*dry well*) model 9230 S/N A15004. Sebelum dimasukan ke dalam tungku sel Ga dibekukan secara bertahap (*slow freeze method*) terlebih dahulu. Dalam proses ini $\frac{1}{4}$ bagian sel dimasukan ke dalam bak es selama 30 menit, berikutnya $\frac{1}{2}$ bagian sel selama 30 menit dan terakhir $\frac{3}{4}$ bagian sel selama 30 menit juga sehingga total waktu pembekuan secara bertahap sekitar 1,5 jam [3]. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh material gallium di dalam sel dapat membeku secara merata.

Proses berikutnya dilakukan didalam tungku secara otomatis sampai terbentuk titik leleh Ga. Proses pelelehan sel dimulai dari bagian luar (*outer*) terlebih dahulu kemudian secara bertahap ke bagian dalam sampai meleleh seluruhnya (*molten*). Teknik ini biasanya dilakukan dengan membuat kondisi pelelehan ganda (*double melt method*) yaitu dengan memanaskan bagian luar sel dengan tungku dan batang pemanas (*heater probe*). *Plateau* titik leleh Ga diukur dengan SPRT Pt-25 yaitu Iso-1 selama kurang lebih 10 jam. Pada grafik 2 dapat dilihat bahwa proses pelelehan terjadi sekitar 6 jam dengan ketidakstabilan suhu (*instability*) lebih kecil dari 1 mK. Hasil pengukuran titik leleh Ga selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 2.

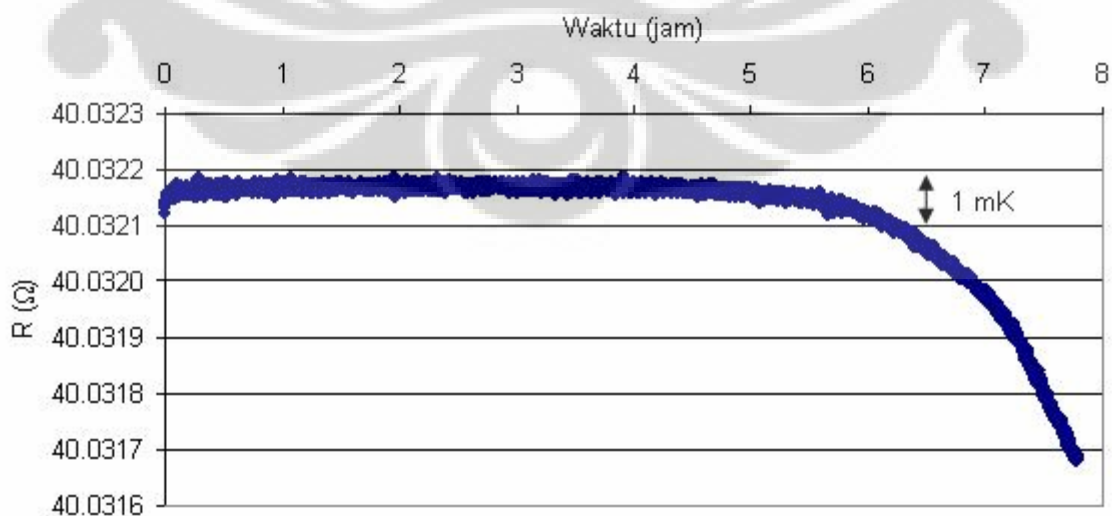


Grafik 2. *Plateau* titik leleh Ga model 5943 S/N Ga 43013

4.1.3. Pengujian Sel In model 5924 S/N In 04035

Realisasi titik beku In model 5924 S/N In 04035 dilakukan di dalam tungku model 9114 S/N A3A069. Metode yang digunakan adalah pengukuran *plateau* titik beku In dengan SPRT Pt-25. Dalam metode ini sel In dipanaskan dalam tungku sampai suhu 151 °C (5 °C di bawah titik leleh In) dengan kenaikan suhu 5 °C/menit. Pada suhu tersebut harus dipastikan bahwa kerataan suhu sel In dalam tungku harus lebih kecil dari $\pm 0,02$ °C. Hal ini dapat dipastikan dengan mengukur suhu tersebut terlebih dahulu dengan SPRT Chino-1. Setelah itu suhu tungku dinaikan sampai 161 °C (5 °C di atas titik leleh In) dengan kenaikan suhu 3 °C/menit sampai material In di dalam sel seluruhnya meleleh. Proses ini dikenal juga dengan istilah *over-heating*.

Proses berikutnya adalah menurunkan suhu tungku sampai 158,59 °C (2 °C di atas titik leleh In) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit. Kondisi ini terus dijaga sampai stabil selama ± 2 jam. Berikutnya suhu diturunkan sampai 154,59 °C (2 °C di bawah titik leleh In) dengan penurunanan suhu 0,1 °C/menit. Selama proses ini suhu terus dimonitor sampai terjadi kondisi *supercooling* dimana suhu sel turun secara drastis sampai di bawah titik bekunya. Masukkan batang kuarsa (*quartz rod*) dari suhu ruang ke dalam sel selama ± 2 menit kemudian ukur kembali sel In dengan SPRT. Biasanya *plateau* titik beku terjadi 5 menit setelahnya dan kondisi stabil terjadi setelah 20 menit.



Grafik 3. *Plateau* titik beku In model 5924 S/N In 04035

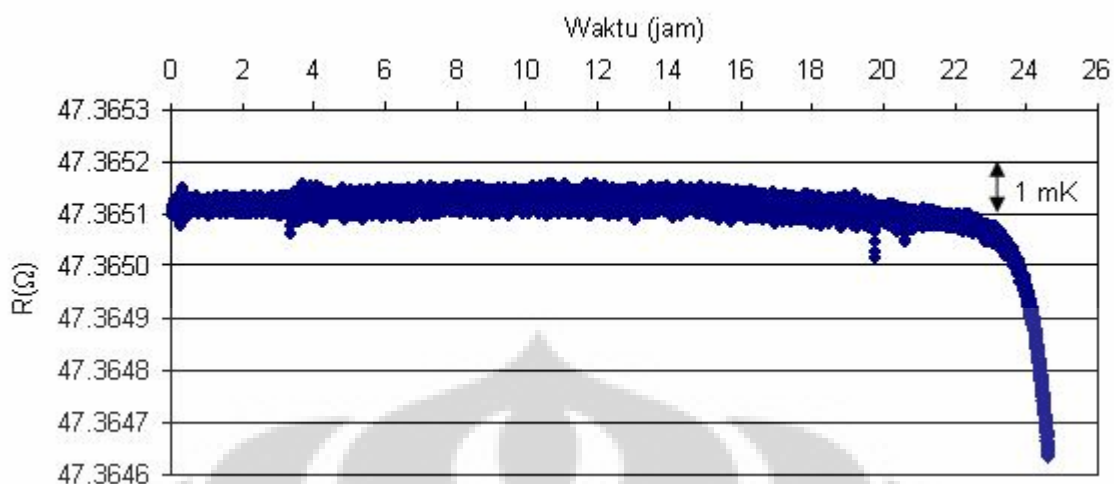
Setelah *plateau* terbentuk suhu tungku dinaikan sampai 156,59 (0,5 °C di bawah titik beku In) kemudian diukur dengan SPRT Iso-1 sebagai cek standar untuk sel In dan direkam dengan komputer selama kurang lebih 8 jam. Hasil pengukuran *plateau* titik beku In selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 3.

Grafik 3 menunjukkan bahwa proses pembekuan sel In terjadi selama kurang lebih 6 jam dengan ketidakstabilan suhu lebih kecil dari 1 mK. Selama proses realisasi sel titik In selalu divakum, dicuci dan diisi dengan gas argon kemurnian tinggi (99,999%) kemudian diatur pada tekanan standar atmosfer (101,325 kPa) pada saat pelelehan dan pembekuan sel.

4.1.4. Pengujian Sel Sn model 5925 S/N Sn 05065

Realisasi titik beku Sn model 5925 S/N Sn 05065 dilakukan di dalam tungku model 9114 S/N A76147. Metode yang digunakan sama yaitu pengukuran *plateau* titik beku dengan SPRT Pt-25. Sel Sn dipanaskan dalam tungku sampai suhu 226 °C (5 °C di bawah titik leleh Sn) dengan kenaikan suhu 5 °C/menit. Pada suhu tersebut harus dipastikan bahwa kerataan suhu sel Sn dalam tungku harus lebih kecil dari $\pm 0,02$ °C. Hal ini dapat dipastikan dengan mengukur suhu tersebut terlebih dahulu dengan SPRT Pt-25 Chino-1. Setelah itu suhu tungku dinaikan sampai 236 °C (5 °C di atas titik leleh Sn) dengan kenaikan suhu 3 °C/menit sampai material Sn di dalam sel seluruhnya meleleh.

Kemudian suhu tungku diturunkan sampai 233,92 °C (2 °C di atas titik leleh Sn) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit. Kondisi ini terus dijaga sampai stabil selama ± 2 jam. Berikutnya suhu diturunkan sampai 229,92 °C (2 °C di bawah titik leleh Sn) dengan penurunanan suhu 0,1 °C/menit. Selama proses ini suhu terus dimonitor sampai terjadi kondisi *supercooling*. Setelah itu 2 batang kuarsa dari suhu ruang dimasukkan ke dalam sel masing-masing selama ± 2 menit kemudian sel Sn diukur kembali dengan SPRT. Biasanya *plateau* titik beku terjadi 5 menit setelahnya dan kondisi stabil terjadi setelah 20 menit.



Grafik 4. *Plateau* titik beku Sn, model 5925 S/N Sn 05065

Setelah *plateau* terbentuk suhu tungku dinaikan sampai 231,42 ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ di bawah titik beku Sn) kemudian diukur dengan SPRT Iso-2 sebagai cek standar untuk sel Sn dan direkam dengan komputer selama kurang lebih 26 jam. Hasil pengukuran *plateau* titik beku In selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 4.

Grafik 4 menunjukkan bahwa proses pembekuan sel Sn terjadi selama kurang lebih 24 jam dengan ketidakstabilan suhu di bawah 1 mK. Selama proses realisasi sel titik Sn selalu divakum, dicuci dan diisi dengan gas argon kemurnian tinggi (99,999%) kemudian diatur pada tekanan 101,325 kPa pada proses pelelehan dan pembekuan.

4.1.5. Pengujian Sel Zn model 5926 S/N Zn 06070

Realisasi titik beku Zn model 5926 S/N Zn 06070 dilakukan di dalam tungku model 9116 S/N A47021. Secara teknis tungku ini kurang memadai untuk realisasi titik tetap Zn karena kerataan suhunya mencapai $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hal ini terpaksa dilakukan karena keterbatasan tungku yang tersedia di Puslit KIM-LIPI. Metode yang digunakan sama dengan titik tetap sebelumnya yaitu pengukuran *plateau* titik beku dengan SPRT Pt-25.

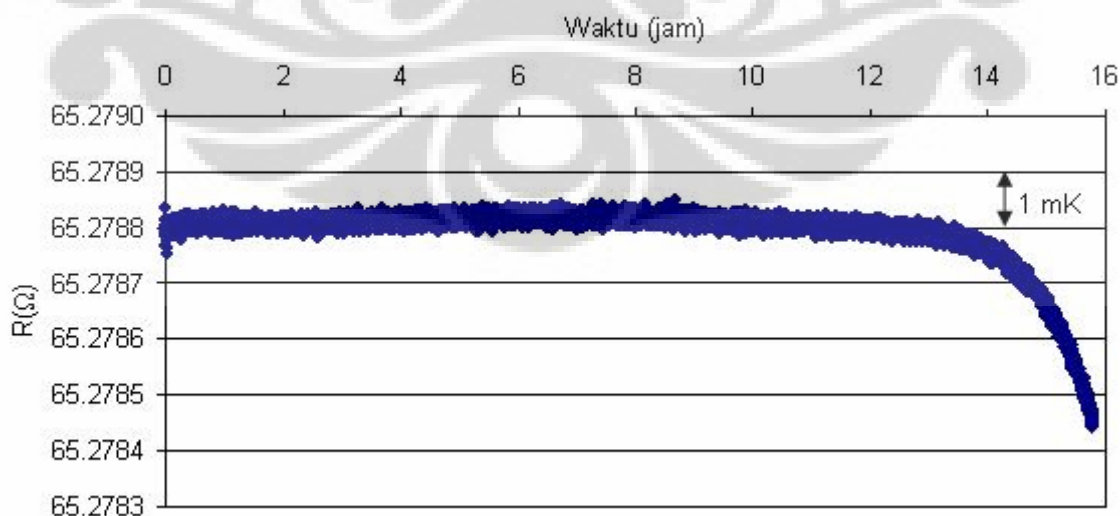
Sel Zn dipanaskan dalam tungku sampai suhu $414\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$ di bawah titik leleh Zn) dengan kenaikan suhu $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Setelah itu suhu tungku dinaikan lagi

sampai 424 °C (5 °C di atas titik leleh Zn) dengan kenaikan suhu 3 °C/menit sampai material Zn di dalam sel seluruhnya meleleh. Kemudian suhu tungku diturunkan sampai 421,52 °C (2 °C di atas titik leleh In) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit. Kondisi ini terus dijaga sampai stabil selama ± 2 jam.

Berikutnya suhu diturunkan sampai 417,52 °C (2 °C di bawah titik leleh Zn) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit. Selama proses ini suhu terus dimonitor sampai terjadi kondisi *supercooling*. Sebuah batang kuarsa dari suhu ruang dimasukkan ke dalam sel selama ± 2 menit kemudian sel Zn diukur kembali dengan SPRT. Biasanya *plateau* titik beku terjadi 5 menit setelahnya dan kondisi stabil terjadi setelah 20 menit.

Setelah *plateau* terbentuk suhu tungku dinaikkan sampai 419,02 (0,5 °C di bawah titik beku Zn) kemudian diukur dengan SPRT Iso-3 sebagai cek standar untuk sel Zn dan direkam dengan komputer selama kurang lebih 16 jam. Hasil pengukuran *plateau* titik beku In selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 5.

Grafik 5 menunjukkan bahwa proses pembekuan sel Zn terjadi selama kurang lebih 14 jam dengan ketidakstabilan suhu di bawah 1 mK. Selama proses realisasi sel titik Zn selalu divakum, dicuci dan diisi dengan gas argon kemurnian tinggi (99,999%) kemudian diatur pada tekanan 101,325 kPa pada proses pelelehan dan pembekuan.



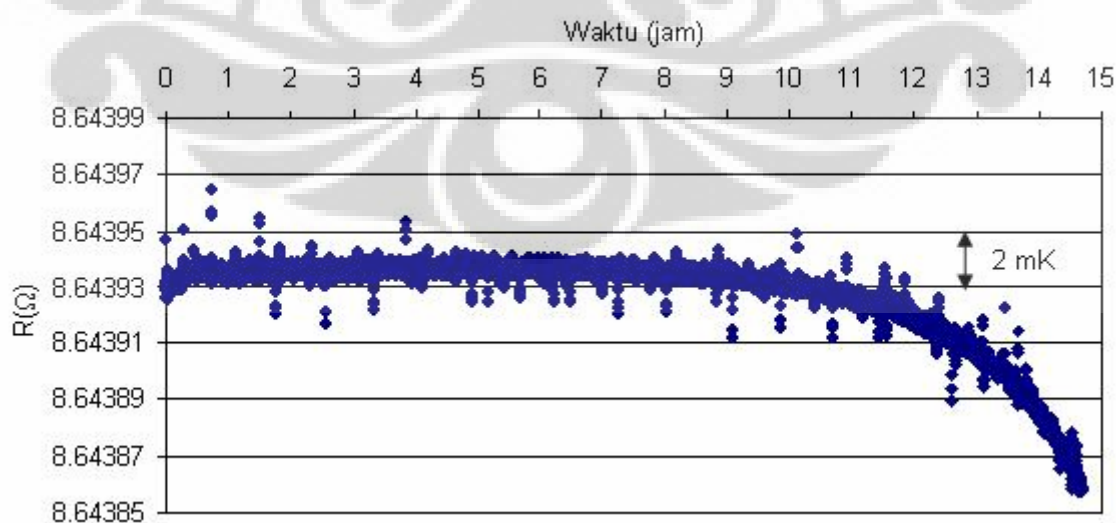
Grafik 5. *Plateau* titik beku Zn model 5906 S/N Zn 0607

4.1.6. Pengujian Sel Al model 5927 S/N Al 07096

Realisasi titik beku Al model 5927 S/N Al 07096 dilakukan di dalam tungku suhu tinggi (*heat-pipe furnace*) yaitu model 9115A S/N A76005. *Plateau* titik beku Al diukur dengan HTSPRT Pt-2,5 Chino-2. Sel Al dipanaskan dalam tungku sampai suhu 655 °C (5 °C di bawah titik leleh Al) dengan kenaikan suhu 5 °C/menit dan kerataan suhu sel dalam tungku harus lebih kecil dari $\pm 0,03$ °C.

Suhu tungku dinaikan sampai 665 °C (5 °C di atas titik leleh Al) dengan kenaikan suhu 3 °C/menit sampai material Al di dalam sel seluruhnya meleleh. Kemudian suhu tungku diturunkan sampai 662,32 °C (2 °C di atas titik leleh Al) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit dan biarkan stabil selama ± 2 jam. Berikutnya suhu diturunkan sampai 659,32 °C (1 °C di bawah titik leleh Al) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit. Ketika terjadi *supercooling*, selanjutnya 2 buah batang kuarsa dari suhu ruang dimasukkan ke dalam sel selama masing-masing ± 2 menit. Kemudian sel Al kembali diukur dengan SPRT.

Setelah *plateau* terbentuk suhu tungku dinaikan sampai 659,82 (0,5 °C di bawah titik beku Al) kemudian sel Al diukur dengan SPRT Hart-1 sebagai cek standar untuk sel Al dan direkam dengan komputer selama kurang lebih 15 jam. Hasil pengukuran *plateau* titik beku Al selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 6.



Grafik 6. *Plateau* titik beku Al model 5907 S/N Al 07096

Grafik 6 menunjukkan bahwa proses pembekuan sel Al terjadi selama kurang lebih 12 jam dengan ketidakstabilan suhu di bawah 2 mK. Banyaknya *noise* yang terjadi selama pengukuran disebabkan karena kebocoran arus pada kawat platina (*lead wire*) yang dominan pada suhu tinggi.

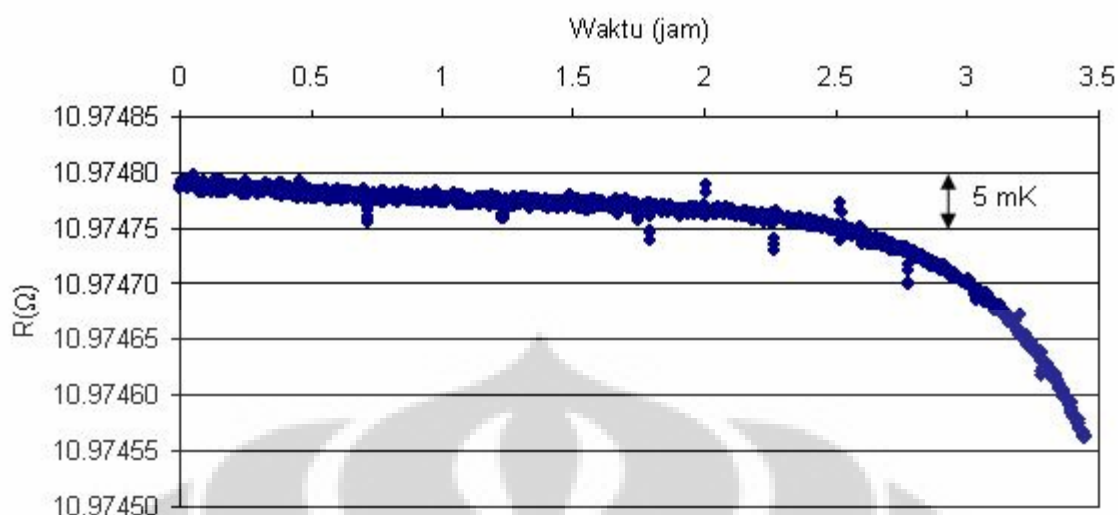
Selama proses realisasi sel titik Al selalu divakum, dicuci dan diisi dengan gas argon kemurnian tinggi (99,999%) kemudian diatur pada tekanan 101,325 kPa pada proses pelelehan dan pembekuan. Proses pemakuman pada sel Al berbeda dengan sel suhu rendah lainnya dimana sel Al tidak boleh divakum tinggi pada suhu di atas 655 °C dan tidak boleh divakum lebih dari 10 s pada saat pelelehan dan pembekuan.

4.1.7. Pengujian Sel Ag model 5928 S/N Ag 08046

Realisasi titik beku Ag menggunakan tungku titik tetap suhu tinggi untuk Ag (*heat-pipe furnace*). *Plato* titik beku Ag diukur dengan HTSPRT (*High Temperature SPRT*) Pt-2,5. Sel Ag dipanaskan sampai suhu 956 °C (5 °C di bawah titik leleh Ag) dengan kenaikan suhu 5 °C/menit dan kerataan suhu sel dalam tungku harus lebih kecil dari $\pm 0,03$ °C.

Suhu tungku dinaikan sampai 966 °C (5 °C di atas titik leleh Ag) dengan kenaikan suhu 3 °C/menit sampai material Ag di dalam sel seluruhnya meleleh. Suhu tungku diturunkan sampai 963 °C (2 °C di atas titik leleh Ag) dengan penurunan suhu 0,1 °C/menit dan biarkan stabil selama ± 2 jam. Suhu diturunkan sampai 960 °C (1 °C di bawah titik leleh Ag) dengan penurunanan suhu 0,1 °C/menit. Ketika terjadi *supercooling* dari sel maka masukan 2 buah batang kuarsa pada suhu ruang ke dalam sel selama masing-masing ± 2 menit kemudian ukur kembali sel Ag dengan HTSPRT Chino-2 Pt-2,5. Biasanya *plato* titik beku terjadi 5 menit setelahnya dan kondisi stabil terjadi setelah 20 menit.

Plato titik beku Ag kemudian diukur dengan HTSPRT Pt-2,5 Hart-2 dan direkam dengan komputer selama kurang lebih 3,5 jam. Grafik 7 menunjukkan bahwa proses pembekuan sel titik beku Ag ini terjadi selama kurang lebih 2,5 jam dengan ketidakstabilan suhu sekitar 5 mK. Banyaknya *noise* yang terjadi selama



Grafik 7. Plateau titik beku Ag model 5928 S/N Ag 0846

pengukuran disebabkan karena kebocoran arus pada kawat platina (*lead wire*) yang dominan pada suhu tinggi. Hasil pengukuran titik beku Ag model 5928 selengkapnya dapat dilihat pada Grafik 7.

Selama proses realisasi sel titik Ag selalu divakum, dicuci dan diisi dengan gas argon kemurnian tinggi (99,999%) kemudian diatur pada tekanan 101,325 kPa pada proses pelelehan dan pembekuan. Proses pemakuman pada sel Ag berbeda dengan sel suhu rendah lainnya dimana sel Ag tidak boleh divakum tinggi pada suhu di atas 956 °C dan tidak boleh divakum lebih dari 10 s pada saat pelelehan dan pembekuan.

4.2. Kalibrasi SPRT

Pengujian dan Kalibrasi dilakukan pada 7 buah SPRT yaitu Hart-1, Hart-2, Chino-1, Chino-2, Iso-1, Iso-2 dan Iso-3. SPRT ini dikalibrasi dengan metode titik tetap yaitu pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap sebagai standar primer sesuai definisi ITS-90. Tahanan SPRT diukur menggunakan jembatan tahanan DC model 6010C S/N 1100689 dengan sebuah saklar otomatis model 4010B S/N 11100727 keduanya buatan Measurement International. Dengan metode pengukuran ini nilai tahanan SPRT dibandingkan terhadap sebuah

resistor standar yang dikondisikan pada suhu 23 °C dalam sebuah media suhu yaitu bak minyak (*white oil*).

Resistor standar AC/DC 25 Ω model 5685A S/N 240097 buatan Tinsley digunakan untuk pengukuran SPRT Pt-25 dan resistor standar 10 Ω model 2794 S/N 54FU2002 buatan Yokogawa digunakan untuk pengukuran SPRT Pt-2,5. Pengukuran tahanan SPRT dilakukan pada arus eksitasi 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA pada SPRT Pt-25 dan arus eksitasi 5 mA dan $5\sqrt{2}$ mA pada SPRT Pt-2,5. Data pengukuran direkam dengan komputer dan disimpan dalam file dengan akhiran *mea* (*.mea). Program akuisisi data yang digunakan adalah MI 6010 versi 7.2.1 dengan antarmuka IEEE 488 menggunakan GPIB buatan National Instrument.

Masing-masing SPRT dikalibrasi pada rentang dan sub-rentang yang sudah ditetapkan pada dokumen ITS-90. SPRT Hart-2 dan Chino-2 dikalibrasi pada rentang W_6 (0 °C ~ 961,78 °C), Hart-1 dan Chino-1 pada sub-rentang W_7 (0 °C ~ 660,323 °C), Iso-3 pada sub-rentang W_8 (0 °C ~ 419,527 °C), Iso-2 pada sub-rentang W_9 (0 °C ~ 231,928 °C) dan Iso-1 dikalibrasi pada 2 sub-rentang yaitu W_{10} (0 °C ~ 156,5986 °C) dan W_{11} (0 °C ~ 29,7646 °C).

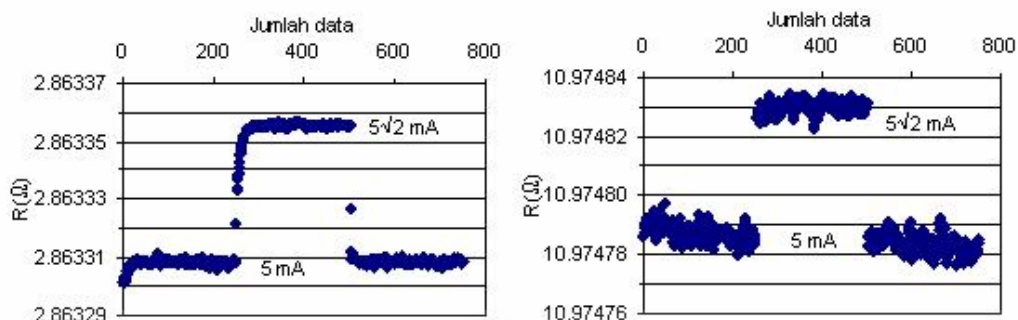
4.2.1. Kalibrasi Hart-2 pada rentang W_6

Tahap 1: Uji kriteria ITS-90

Pengujian Hart-2 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT suhu tinggi (HTSPRT) yaitu nilai $W(29,7646 \text{ °C}) \geq 11807$ dan $W(961,78 \text{ °C}) \geq 4,2844$. Pengukuran tahanan Hart-2 pada kedua titik tetap tersebut dapat dilihat pada Grafik 8.

Mengacu ke persamaan (5) dan (6) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 6 maka diperoleh hasil pengujian Hart-2 sebagai berikut:

$$W(29,7646\text{°C}) = \frac{2,864086 \text{ } \Omega}{2,560860 \text{ } \Omega} = 1,11840 \geq 1,11807$$



Grafik 8. Pengujian Hart-2 pada titik leleh Ga dan titik beku Ag

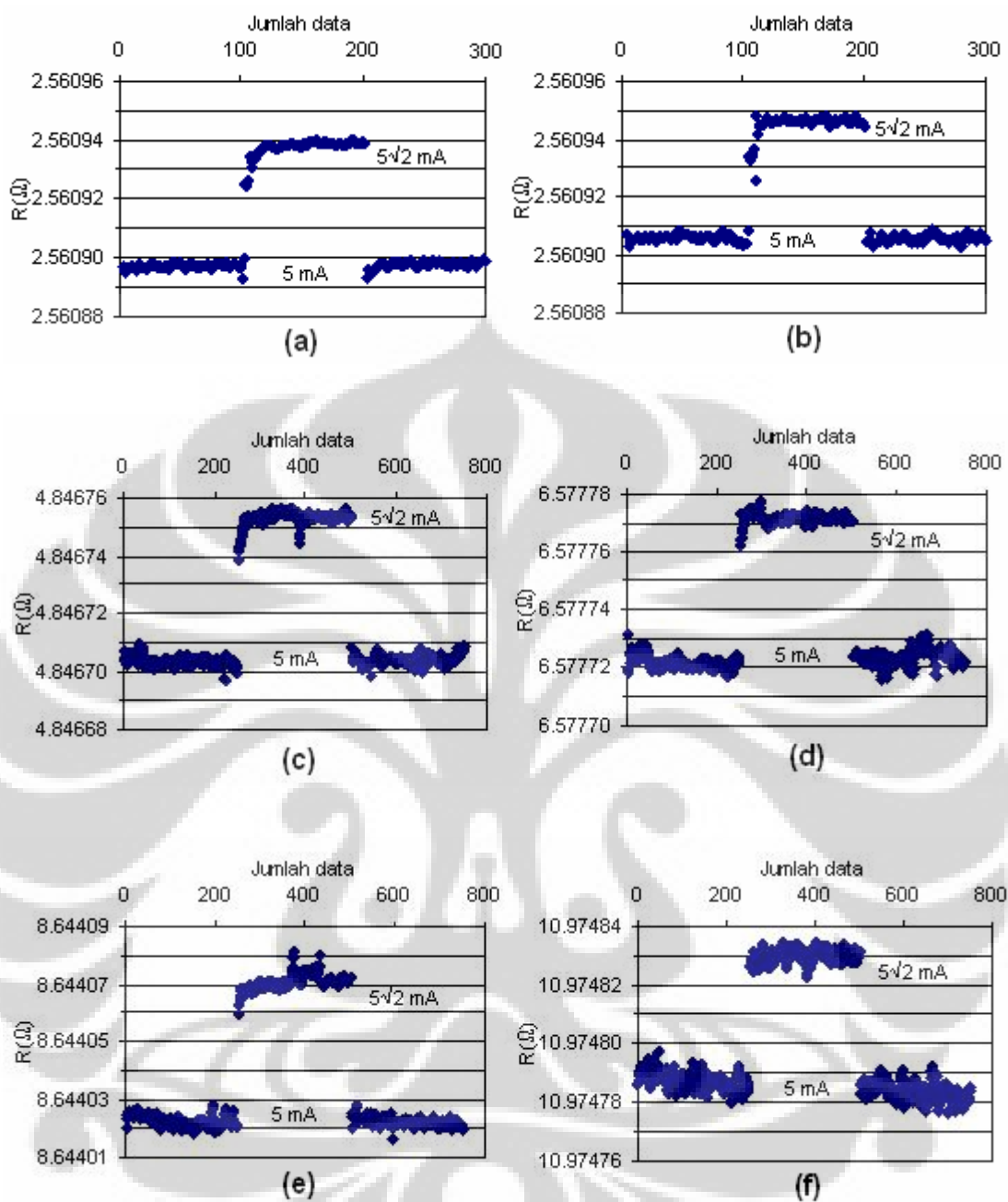
$$W(961,78^{\circ}\text{C}) = \frac{10,974749 \Omega}{2,560860 \Omega} = 4,2855 \geq 4,2844$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SPRT Hart-2 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Hart-2

SPRT Hart-2 dikalibrasi pada rentang W_6 ($0^{\circ}\text{C} \sim 961,78^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku Sn, Zn, Al dan Ag. Pengujian Hart-2 juga dilakukan pada titik leleh Ga dan titik beku Ag sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]

Tahanan Hart-2 diukur menggunakan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 5 mA dan $5\sqrt{2}$ mA. Metode ini digunakan untuk menghitung besar tahanan SPRT pada arus 0 mA (*zero power dissipation*). Data pengukuran direkam komputer dan disimpan dengan nama file: [Hart2-PTB4032508C.meas](#), [Hart2-Ga011908C.meas](#), [Hart2-Sn042208C.meas](#), [Hart2-Zn041508C.meas](#), [Hart2-Al040808C.meas](#) dan [Hart2-Ag040108C.meas](#). Hasil pengukuran tahanan Hart-2 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 9 yang dirangkum pada Tabel 6.



Grafik 9. Tahanan Hart-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn, (e) Al dan (f) Ag

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data pengukuran dan kalibrasi pada Tabel 6 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Hart-2 seperti terangkum pada Tabel 7.

Tabel 6. Tahanan Hart-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	5 mA	$5\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	2,560906	2,560946	0,000040	2,560866	-0,000001	2,560864
Sn FP	4,846704	4,846753	0,000049	4,846654	0,000004	4,846658
H ₂ O TP	2,560906	2,560946	0,000040	2,560866	-0,000001	2,560864
Ga MP	2,864131	2,864181	0,000050	2,864082	0,000005	2,864086
H ₂ O TP	2,560906	2,560946	0,000040	2,560866	-0,000001	2,560864
Zn FP	6,577723	6,577772	0,000049	6,577674	0,000005	6,577679
H ₂ O TP	2,560906	2,560946	0,000040	2,560866	-0,000001	2,560864
Al FP	8,644022	8,644072	0,000050	8,643972	0,000003	8,643974
H ₂ O TP	2,560896	2,560937	0,000040	2,560856	-0,000001	2,560855
Ag FP	10,974785	10,974830	0,000045	10,974739	0,000010	10,974749
H ₂ O TP	2,560898	2,560939	0,000041	2,560857	-0,000001	2,560855

Data rasio tahanan pada Tabel 7 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu ke persamaan (18) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,000208 \\ -0,000375 \\ -0,000591 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,892590 & 0,796716 & 0,711141 \\ 1,568542 & 2,460326 & 3,859125 \\ 2,375418 & 5,642610 & 13,403558 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_6 \\ b_6 \\ c_6 \end{bmatrix}$$

Tabel 7. Rasio tahanan Hart-2 pada sub-rentang W_6

Titik tetap	$\Delta W_6(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$	$[W(t_{90}) - W(660.323 \text{ } ^\circ\text{C})]^2$
Sn FP	-0,000208	0,892590	0,796716	0,711141	-
Zn FP	-0,000375	1,568542	2,460326	3,859125	-
Al FP	-0,000591	2,375418	5,642610	13,403558	-
Ag FP	-0,000850	3,285571	10,794976	35,467658	0,827303

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_6 , b_6 dan c_6 sebagai berikut:

$$a_6 = -2,2792616E-04$$

$$b_6 = -3,7423948E-06$$

$$c_6 = -2,0995264E-06$$

Koefisien d dapat dihitung dari nilai-nilai koefisien a_6 , b_6 , c_6 dan rasio tahanan pada titik beku Ag ($961,78\text{ }^\circ\text{C}$) dari Tabel 6 dengan mengacu ke persamaan (19) maka diperoleh hasil sebagai berikut:

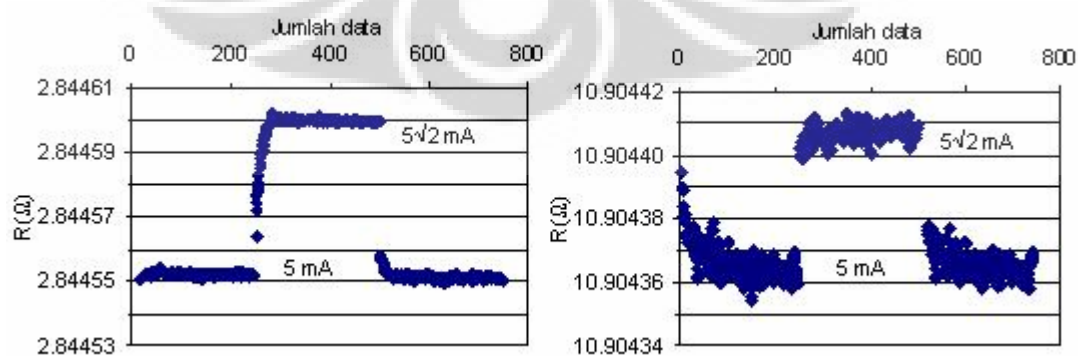
$$d = 1,6975990E-05$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)

4.2.2. Kalibrasi Chino-2 pada rentang W_6

Tahap 1: Uji kriteria ITS-90

Pengujian Chino-2 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT suhu tinggi (HTSPRT) yaitu nilai $W(29,7646\text{ }^\circ\text{C}) \geq 11807$ dan $W(961,78\text{ }^\circ\text{C}) \geq 4,2844$. Pengukuran tahanan Chino-2 pada kedua titik tetap tersebut dapat dilihat pada Grafik 10.



Grafik 10. Pengujian Chino-2 pada titik leleh Ga dan titik beku Ag

Mengacu ke persamaan (5) dan (6) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 8 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{2,844502 \ \Omega}{2,544014 \ \Omega} = 1,11811 \geq 1,11807$$

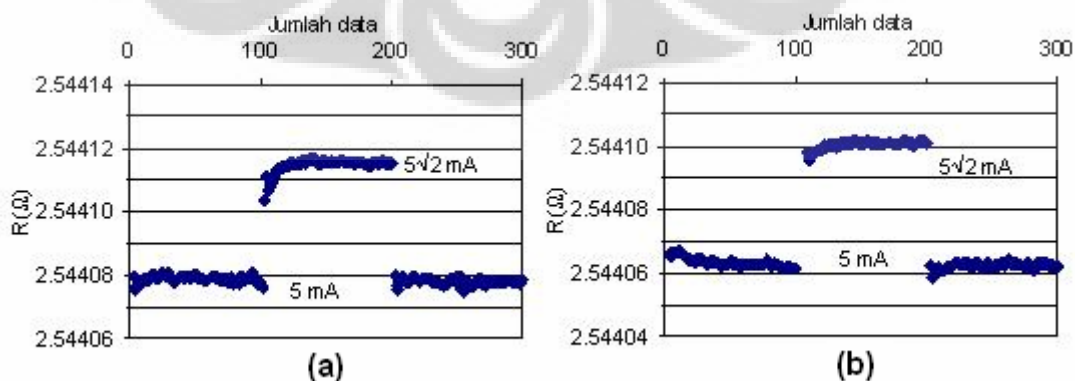
$$W(961,78^{\circ}\text{C}) = \frac{10,904416 \ \Omega}{2,544014 \ \Omega} = 4,2863 \geq 4,2844$$

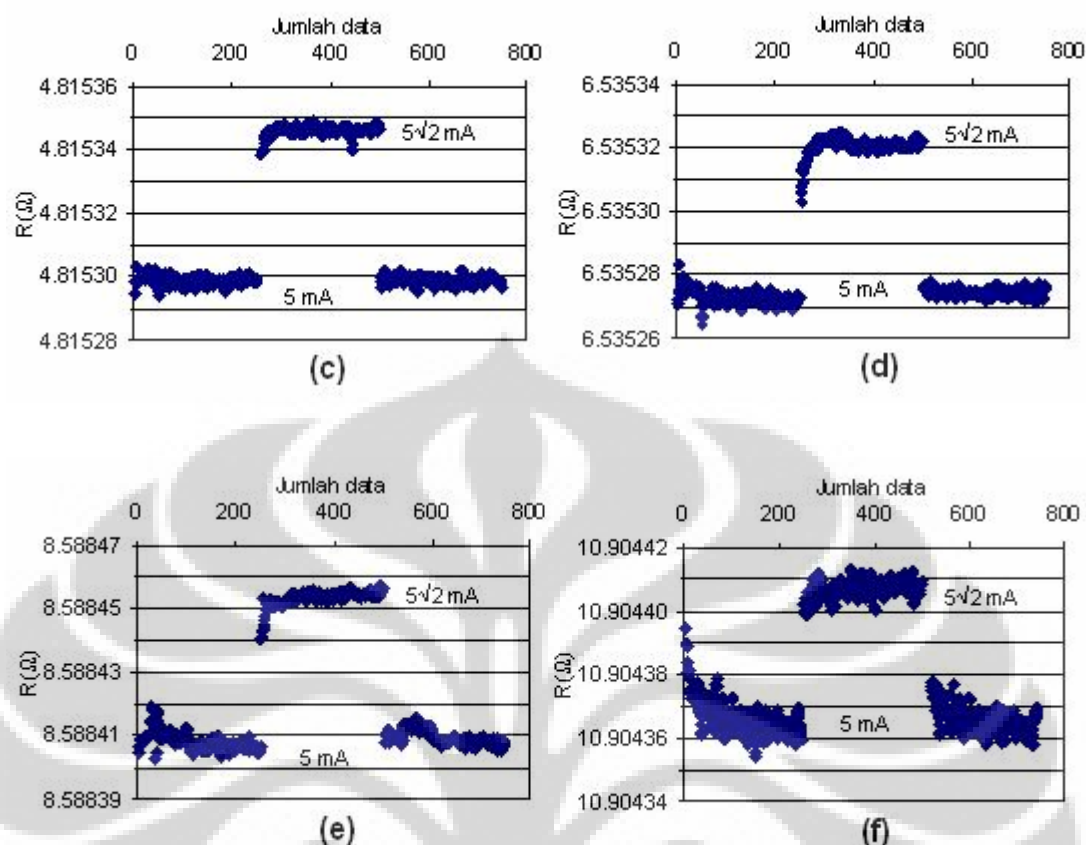
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SPRT Chino-2 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Chino-2

SPRT Chino-2 dikalibrasi pada rentang W_6 ($0^{\circ}\text{C} \sim 961,78^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku Sn, Zn Al dan Ag. Pengujian Chino-2 juga dilakukan pada titik leleh Ga dan titik beku Ag sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]

Tahanan Chino-2 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 5 mA dan $5\sqrt{2} \text{ mA}$. Data pengukuran direkam komputer dan disimpan dengan nama file: [Chino2-PTB4033108C.meas](#), [Chino2-Ga011908C.meas](#), [Chino2-Sn042208C.meas](#), [Chino2-Zn041508C.meas](#), [Chino2-Al040808C.meas](#) dan [Chino2-Ag040108C.meas](#). Hasil pengukuran tahanan Chino-2 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 11 yang dirangkum pada Tabel 8.





Grafik 11. Tahanan Chino-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn, (e) Al dan (f) Ag

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data kalibrasi pada Tabel 8 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Chino-2 seperti terangkum pada Tabel 9.

Data rasio tahanan pada Tabel 9 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu pada persamaan (18) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,000005 \\ -0,000035 \\ -0,000089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,892792 & 0,797078 & 0,711626 \\ 1,568883 & 2,461393 & 3,861637 \\ 2,375920 & 5,644996 & 13,412060 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_6 \\ b_6 \\ c_6 \end{bmatrix}$$

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_6 , b_6 dan c_6 sebagai berikut:

$$a_6 = 2,0552475E-05$$

$$b_6 = -3,2656038E-05$$

$$c_6 = 3,5032968E-06$$

Koefisien d dapat dihitung dari nilai-nilai koefisien a_6 , b_6 , c_6 dan rasio tahanan pada titik beku Ag (961,78 °C) dari Tabel 9 dengan mengacu ke persamaan (19) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$d = 5,2076251E-05$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)

Tabel 8. Tahanan Chino-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	5 mA	$5\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	2,544078	2,544116	0,000038	2,544040	-0,000015	2,544025
Sn FP	4,815299	4,815346	0,000047	4,815252	0,000040	4,815291
H ₂ O TP	2,544078	2,544116	0,000038	2,544040	-0,000015	2,544025
Ga MP	2,844552	2,844600	0,000048	2,844504	-0,000002	2,844502
H ₂ O TP	2,544069	2,544108	0,000039	2,544030	-0,000015	2,544015
Zn FP	6,535273	6,535321	0,000048	6,535226	0,000049	6,535274
H ₂ O TP	2,544063	2,544101	0,000038	2,544024	-0,000015	2,544009
Al FP	8,588408	8,588455	0,000047	8,588360	0,000029	8,588389
H ₂ O TP	2,544068	2,544110	0,000042	2,544026	-0,000015	2,544011
Ag FP	10,904363	10,904408	0,000045	10,904319	0,000097	10,904416
H ₂ O TP	2,544068	2,544110	0,000042	2,544026	-0,000015	2,544011

Tabel 9. Rasio tahanan Chino-2 pada sub-rentang W_6

Titik tetap	$\Delta W_6(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$	$[W(t_{90}) - W(660.323 \text{ } ^\circ\text{C})]^2$
Sn FP	-0,000005	0,892792	0,797078	0,711626	-
Zn FP	-0,000035	1,568883	2,461393	3,861637	-
Al FP	-0,000089	2,375920	5,644996	13,412060	-
Ag FP	-0,000118	3,286303	10,799787	35,491370	0,828636

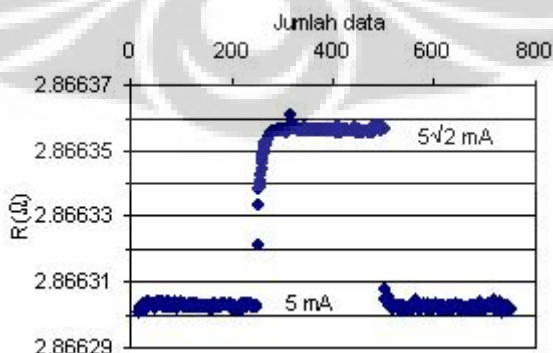
4.2.3. Kalibrasi Hart-1 pada sub-rentang W_7

Tahap 1: Uji criteria ITS-90

Pengujian Hart-1 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah HTSPRT yang akan digunakan untuk aplikasi pengukuran suhu di bawah 660,323 °C (titik beku Al) yaitu nilai W (29,7646 °C) $\geq 1,11807$. Pengukuran tahanan Hart-1 pada titik leleh Ga dapat dilihat pada Grafik 12.

Mengacu ke persamaan (5) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 10 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

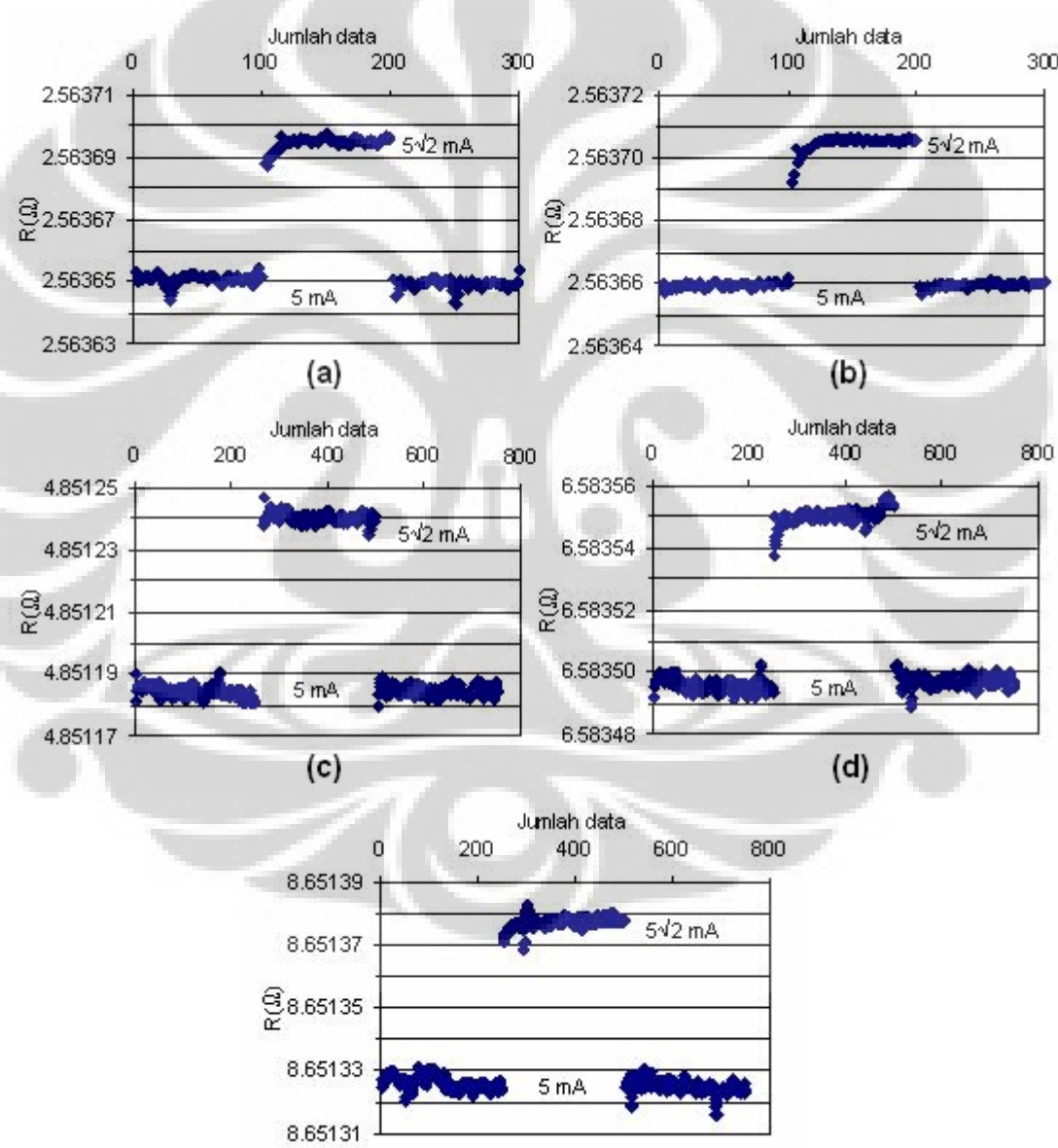
$$W(29,7646^\circ\text{C}) = \frac{2,867114 \text{ } \Omega}{2,563594 \text{ } \Omega} = 1,11839 \geq 1,11807$$

**Grafik 12.** Pengujian tahanan Hart-1 pada titik leleh Ga

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SPRT Hart-1 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Hart-1

SPRT Hart-1 dikalibrasi pada sub-rentang W_7 ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku Sn, Zn dan Al. Pengujian Hart-1 juga dilakukan pada titik leleh Ga sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]



Grafik 13. Tahanan Hart-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H_2O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn dan (e) Al

Tabel 10. Tahanan Hart-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	5 mA	$5\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	2,563650	2,563695	0,000045	2,563605	-0,000015	2,563590
Sn FP	4,851184	4,851240	0,000056	4,851128	0,000040	4,851167
H ₂ O TP	2,563650	2,563695	0,000045	2,563605	-0,000015	2,563590
Ga MP	2,867122	2,867179	0,000057	2,867066	-0,000002	2,867063
H ₂ O TP	2,563660	2,563706	0,000046	2,563614	-0,000015	2,563599
Zn FP	6,583496	6,583552	0,000055	6,583441	0,000049	6,583490
H ₂ O TP	2,563650	2,563695	0,000045	2,563605	-0,000015	2,563590
Al FP	8,651325	8,651378	0,000053	8,651272	0,000029	8,651301
H ₂ O TP	2,563660	2,563706	0,000046	2,563614	-0,000015	2,563599

Tahanan Hart-1 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 5 mA dan $5\sqrt{2}$ mA. Data pengukuran direkam komputer dan disimpan dengan nama file: [Hart1-PTB4032508C.me](#), [Hart1-Ga011908C.me](#), [Hart1-Sn042208C.me](#), [Hart1-Zn041508C.me](#) dan [Hart1-Al040808C.me](#). Hasil pengukuran tahanan Hart-1 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 13 yang dirangkum pada Tabel 10.

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data kalibrasi pada Tabel 10 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Hart-1 seperti terangkum pada Tabel 11. Data rasio tahanan pada Tabel 11 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu pada persamaan (18) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,00046735 \\ -0,00084734 \\ -0,00133218 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,89233033 & 0,79625342 & 0,71052108 \\ 1,56806996 & 2,45884341 & 3,85563851 \\ 2,37467642 & 5,63908808 & 13,39100947 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_7 \\ b_7 \\ c_7 \end{bmatrix}$$

Tabel 11. Rasio tahanan Hart-1 pada sub-rentang W_7

Titik tetap	$\Delta W_7(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$
Sn FP	-0,00046735	0,89233033	0,79625342	0,71052108
Zn FP	-0,00084734	1,56806996	2,45884341	3,85563851
Al FP	-0,00133218	2,37467642	5,63908808	13,39100947

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_7 , b_7 dan c_7 sebagai berikut:

$$a_7 = -5,0268796E-04$$

$$b_7 = -2,3010143E-05$$

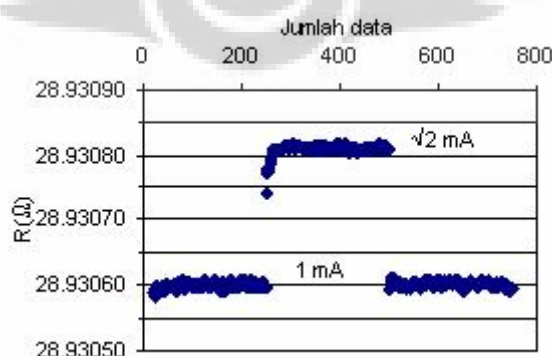
$$c_7 = -6,5019249E-07$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)

4.2.4. Kalibrasi Chino-1 pada sub-rentang W_7

Tahap 1: Uji kriteria ITS-90

Pengujian Chino-1 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT (*long stem* SPRT) yaitu nilai W ($29,7646 \text{ }^\circ\text{C}$) $\geq 1,11807$. Pengukuran tahanan Chino-1 pada titik leleh Ga dapat dilihat pada Grafik 14.

**Grafik 14.** Pengujian Chino-1 pada titik leleh Ga

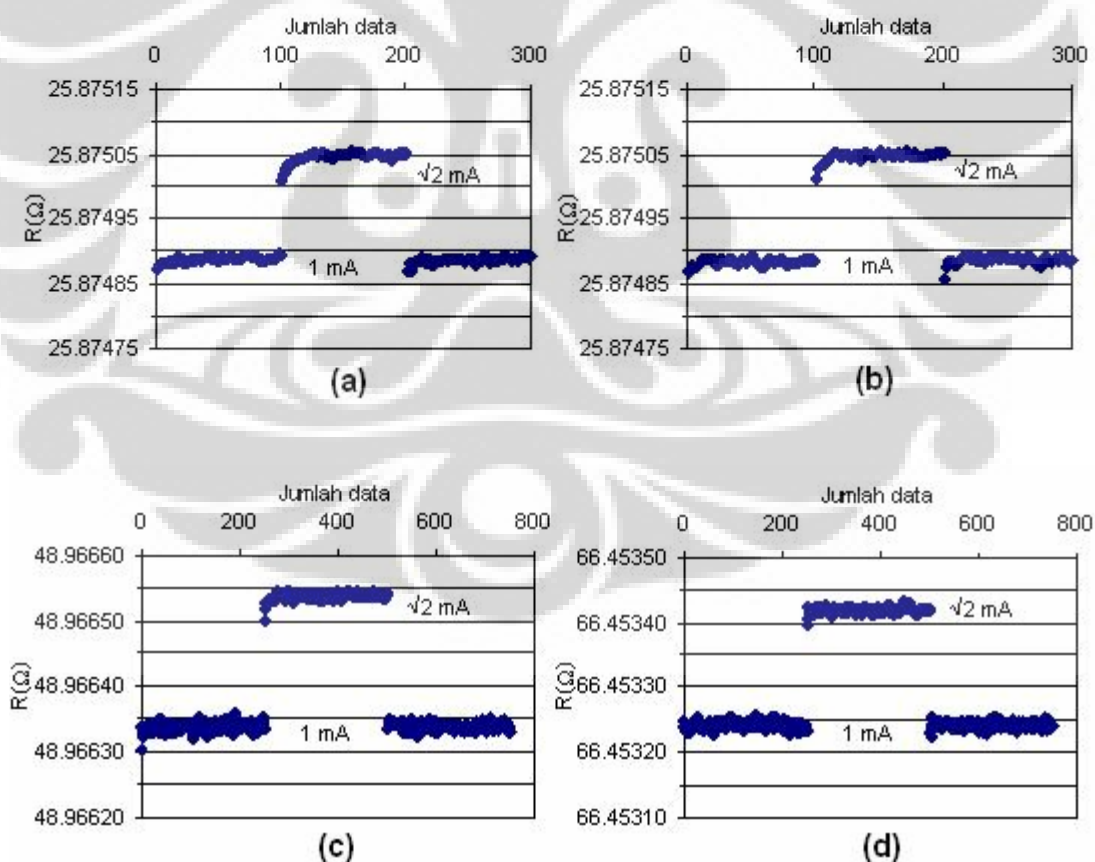
Mengacu ke persamaan (5) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 12 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

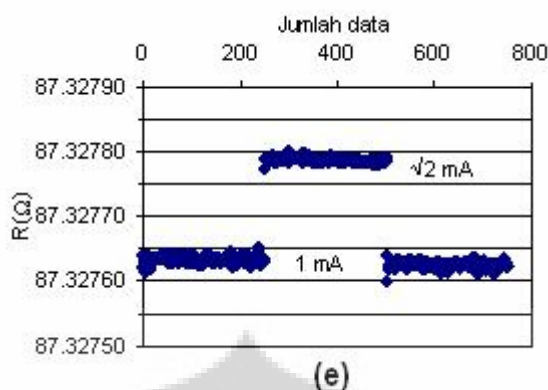
$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{28,930370 \ \Omega}{25,874678 \ \Omega} = 1,11809 \geq 1,11807$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SPRT Chino-1 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Chino-1

SPRT Chino-1 dikalibrasi pada rentang W_7 ($0^{\circ}\text{C} \sim 660,323^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku Sn, Zn dan Al. Pengujian Chino-1 juga dilakukan pada titik leleh Ga sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]





Grafik 15. Tahanan Chino-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn, (d) Zn dan (e) Al

Tahanan Chino-1 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA. Data pengukuran direkam komputer dan disimpan dengan nama file: [Chino1-PTB4042008C.meas](#), [Chino1-Ga011508C.meas](#), [Chino1-Sn042108C.meas](#), [Chino1-Zn041508C.meas](#), dan [Chino1-Al040808C.meas](#). Hasil pengukuran tahanan Chino-1 lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 15 yang dirangkum pada Tabel 12.

Tabel 12. Tahanan Chino-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	1 mA	$\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	25,874885	25,875048	0,000163	25,874722	-0,000015	25,874707
Sn FP	48,966340	48,966539	0,000199	48,966141	0,000040	48,966181
H ₂ O TP	25,874885	25,875048	0,000163	25,874722	0,000040	25,874761
Ga MP	28,930602	28,930809	0,000207	28,930394	-0,000025	28,930370
H ₂ O TP	25,874885	25,875048	0,000163	25,874722	-0,000015	25,874707
Zn FP	66,453243	66,453420	0,000177	66,453065	0,000049	66,453114
H ₂ O TP	25,874889	25,875049	0,000160	25,874729	-0,000015	25,874714
Al FP	87,327630	87,327786	0,000155	87,327475	0,000029	87,327504
H ₂ O TP	25,874764	25,874928	0,000164	25,874601	-0,000015	25,874586

Tabel 13. Rasio tahanan Chino-1 pada sub-rentang W_7

Titik tetap	$\Delta W_7(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$
Sn FP	-0,00036137	0,89243631	0,79644257	0,71077426
Zn FP	-0,00064909	1,56826821	2,45946517	3,85710104
Al FP	-0,00099065	2,37501795	5,64071028	13,39678818

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data pengukuran dan kalibrasi pada Tabel 12 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Chino-1 seperti terangkum pada Tabel 13.

Data rasio tahanan pada Tabel 13 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu pada persamaan (18) Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,00036137 \\ -0,00064909 \\ -0,00099065 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,89243631 & 0,79644257 & 0,71077426 \\ 1,56826821 & 2,45946517 & 3,85710104 \\ 2,37501795 & 5,64071028 & 13,39678818 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_7 \\ b_7 \\ c_7 \end{bmatrix}$$

Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_7 , b_7 dan c_7 sebagai berikut:

$$a_7 = -3,8433690E-04$$

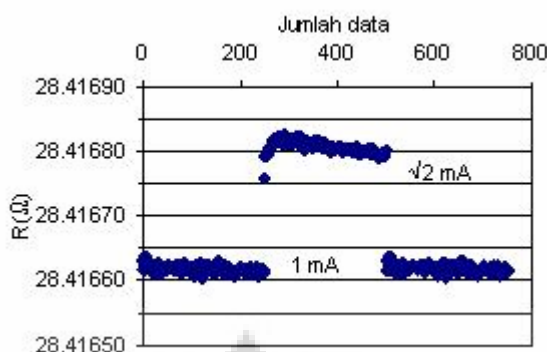
$$b_7 = -2,8652149E-05$$

$$c_7 = 6,2536626E-06$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)

4.2.5. Kalibrasi Iso-3 pada sub-rentang W_8 **Tahap 1: Uji kriteria ITS-90**

Pengujian Iso-3 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT (*long stem SPRT*) yaitu nilai $W(29,7646 \text{ }^\circ\text{C}) \geq 1,11807$.



Grafik 16. Pengujian Iso-3 pada titik leleh Ga

Pengukuran tahanan Iso-3 pada titik leleh Ga dapat dilihat pada Grafik 16. Mengacu ke persamaan (5) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 14 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

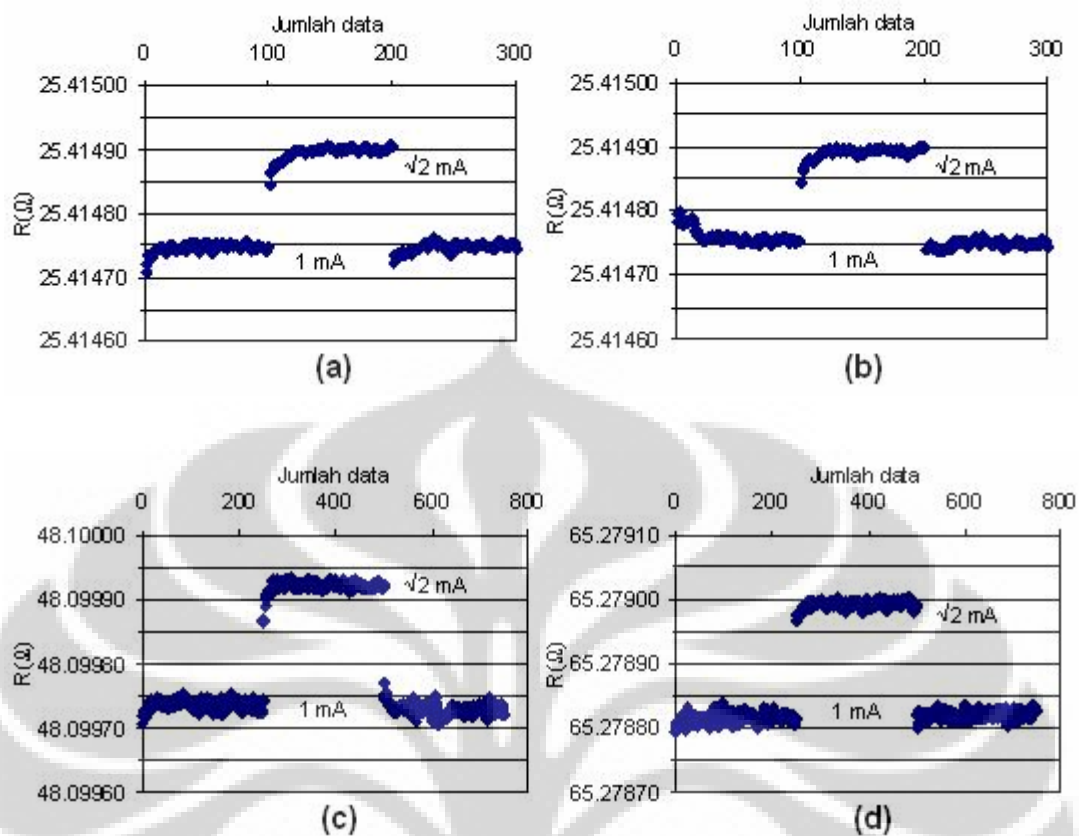
$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{28,416411 \Omega}{25,414602 \Omega} = 1,11811 \geq 1,11807$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SPRT Iso-3 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Iso-3

SPRT Iso-3 dikalibrasi pada rentang W_8 ($0^{\circ}\text{C} \sim 419,527^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku Sn dan Zn. Pengujian Iso-3 juga dilakukan pada titik leleh Ga sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]

Tahanan Iso-3 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA. Data pengukuran direkam komputer dan hasilnya disimpan dengan nama file: [Iso3-PTB4031008AA.meas](#), [Iso3-Ga011508C.meas](#), [Iso3-Sn042208C.meas](#) dan [Iso3-Zn041508F.meas](#). Hasil pengukuran tahanan Iso-3 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 17 yang dirangkum pada Tabel 14.



Grafik 17. Tahanan Iso-3 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Sn dan (d) Zn

Tabel 14. Tahanan Iso-3 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	1 mA	$\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	25,414751	25,414894	0,000143	25,414609	-0,000015	25,414594
Sn FP	28,416617	28,416800	0,000182	28,416435	-0,000025	28,416411
H ₂ O TP	25,414751	25,414894	0,000143	25,414609	0,000040	25,414648
Ga MP	48,099732	48,099921	0,000189	48,099543	0,000040	48,099583
H ₂ O TP	25,414751	25,414894	0,000143	25,414609	-0,000015	25,414594
Zn FP	65,270615	65,270533	-0,000082	65,270697	0,000049	65,270745
H ₂ O TP	25,414779	25,414925	0,000146	25,414633	-0,000015	25,414618

Tabel 15. Rasio tahanan Iso-3 pada sub-rentang W_8

Titik tetap	$\Delta W_8(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$
Sn FP	-0,00020132	0,89259636	0,79672826	-0,00020132
Zn FP	-0,00067931	1,56823799	2,45937038	-0,00067931

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data pengukuran dan kalibrasi pada Tabel 14 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Iso-3 seperti terangkum pada Tabel 15.

Data rasio tahanan pada Tabel 15 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu pada persamaan (22) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,00020132 \\ -0,00067931 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,89259636 & 0,79672826 \\ 1,56823799 & 2,45937038 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_8 \\ b_8 \end{bmatrix}$$

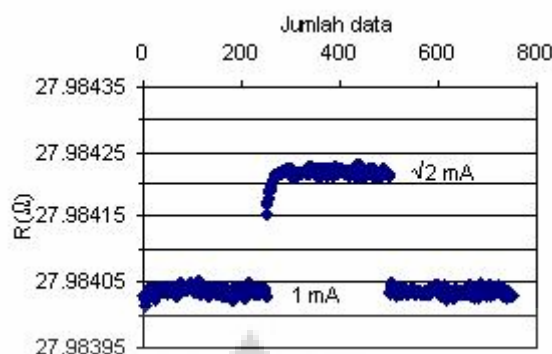
Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_8 dan b_8 sebagai berikut:

$$a_8 = 4,8748467E-05$$

$$b_8 = -3,0729910E-04$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)**4.2.6. Kalibrasi Iso-2 pada sub-rentang W_9** **Tahap 1: Uji kriteria ITS-90**

Pengujian Iso-2 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT (*long stem* SPRT) yaitu nilai W (29,7646 °C) \geq 1,11807. Pengukuran tahanan Iso-2 pada titik leleh Ga dapat dilihat pada Grafik 18.



Grafik 18. Pengujian Iso-2 pada titik leleh Ga

Mengacu ke persamaan (5) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 16 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

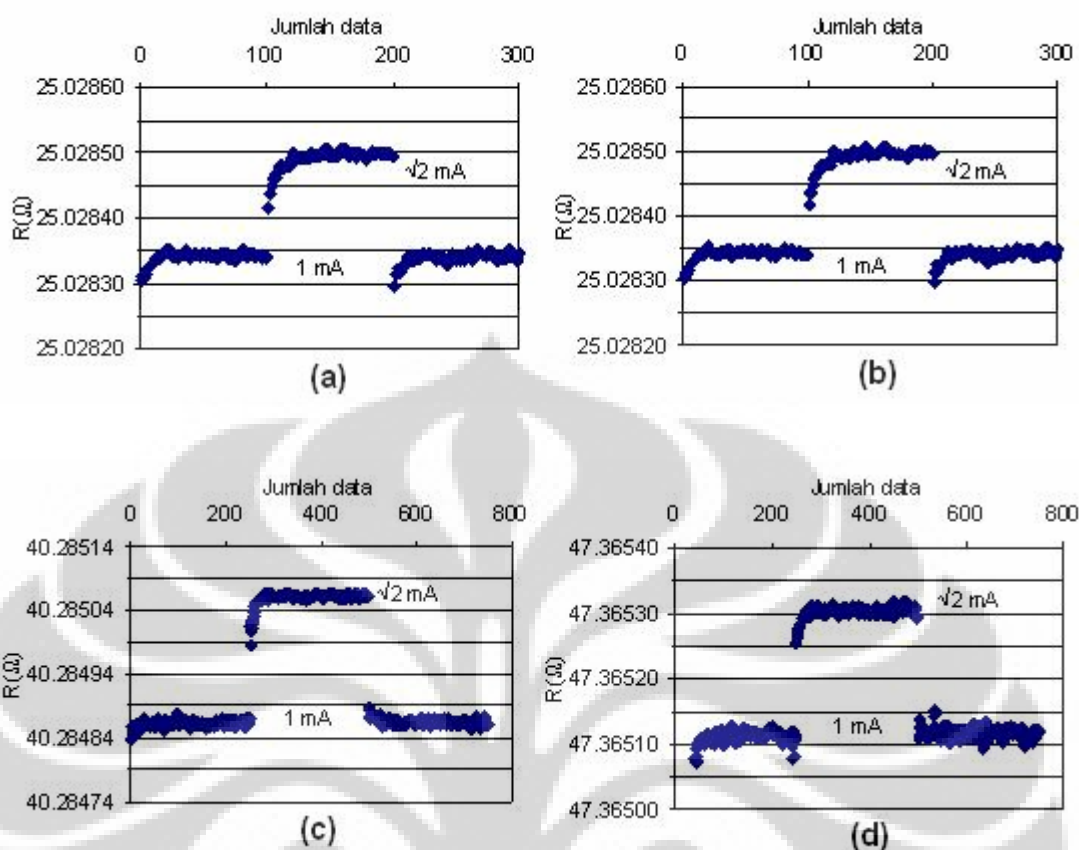
$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{28,416411 \Omega}{25,414602 \Omega} = 1,11811 \geq 1,11807$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SPRT Iso-2 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Iso-2

SPRT Iso-2 dikalibrasi pada rentang W_9 ($0^{\circ}\text{C} \sim 231,928^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O , titik beku In dan Sn. Pengujian Iso-2 juga dilakukan pada titik leleh Ga sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]

Tahanan Iso-2 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA. Data pengukuran dan kalibrasi direkam oleh komputer dan hasilnya disimpan dengan nama file: [Iso2-PTB4030408C1.meas](#), [Iso2-Ga011508C.meas](#), [Iso2-In102408C.meas](#) dan [Iso2-Sn031108C.meas](#). Hasil pengukuran tahanan Iso-2 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 19 yang dirangkum pada Tabel 16.



Grafik 19. Tahanan Iso-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) In dan (d) Sn

Tabel 16. Tahanan Iso-2 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	1 mA	$\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	25,028234	25,028385	0,000151	25,028083	-0,000015	25,028068
Ga MP	27,984036	27,984219	0,000182	27,983854	-0,000025	27,983829
H ₂ O TP	25,028234	25,028385	0,000151	25,028083	0,000059	25,028143
In FP	40,284863	40,285063	0,000200	40,284663	0,000059	40,284723
H ₂ O TP	25,028343	25,028498	0,000155	25,028189	-0,000015	25,028174
Sn FP	47,365113	47,365304	0,000191	47,364922	0,000040	47,364962
H ₂ O TP	25,028234	25,028385	0,000151	25,028083	-0,000015	25,028068

Tabel 17. Rasio tahanan Iso-2 pada sub-rentang W_9

Titik tetap	$\Delta W_9(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$	$[W(t_{90}) - 1]^2$	$[W(t_{90}) - 1]^3$
In FP	-0,28321815	0,60957953	0,37158720	-0,28321815
Sn FP	-0,67644621	0,89247109	0,79650464	-0,67644621

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data pengukuran dan kalibrasi pada Tabel 16 maka dengan menggunakan persamaan (5) pada Bab 2 dapat dihitung rasio tahanan Iso-2 seperti terangkum pada Tabel 17.

Data rasio tahanan pada Tabel 17 dapat ditulis dalam bentuk matrik dengan mengacu ke persamaan (22) pada Bab 2 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -0,28321815 \\ -0,67644621 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,60957953 & 0,37158720 \\ 0,89247109 & 0,79650464 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_9 \\ b_9 \end{bmatrix}$$

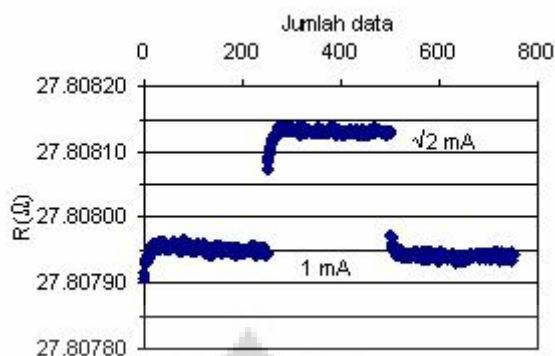
Dengan menghitung matrik diterminan dari setiap peubah maka diperoleh nilai koefisien a_9 dan b_9 sebagai berikut:

$$a_9 = 1,6747127E-01$$

$$b_9 = -1,0369173E+00$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)**4.2.7. Kalibrasi Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11}** **Tahap 1: Uji kriteria ITS-90**

Pengujian Iso-1 dilakukan sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90 untuk sebuah SPRT (*long stem* SPRT) yaitu nilai W (29,7646 °C) \geq 1,11807. Pengukuran tahanan Iso-1 pada titik leleh Ga dapat dilihat pada Grafik 20.



Grafik 20. Pengujian Iso-1 pada titik leleh Ga

Mengacu ke persamaan (5) pada Bab 2 dan dengan memasukan data pengukuran pada Tabel 18 maka diperoleh hasil sebagai berikut:

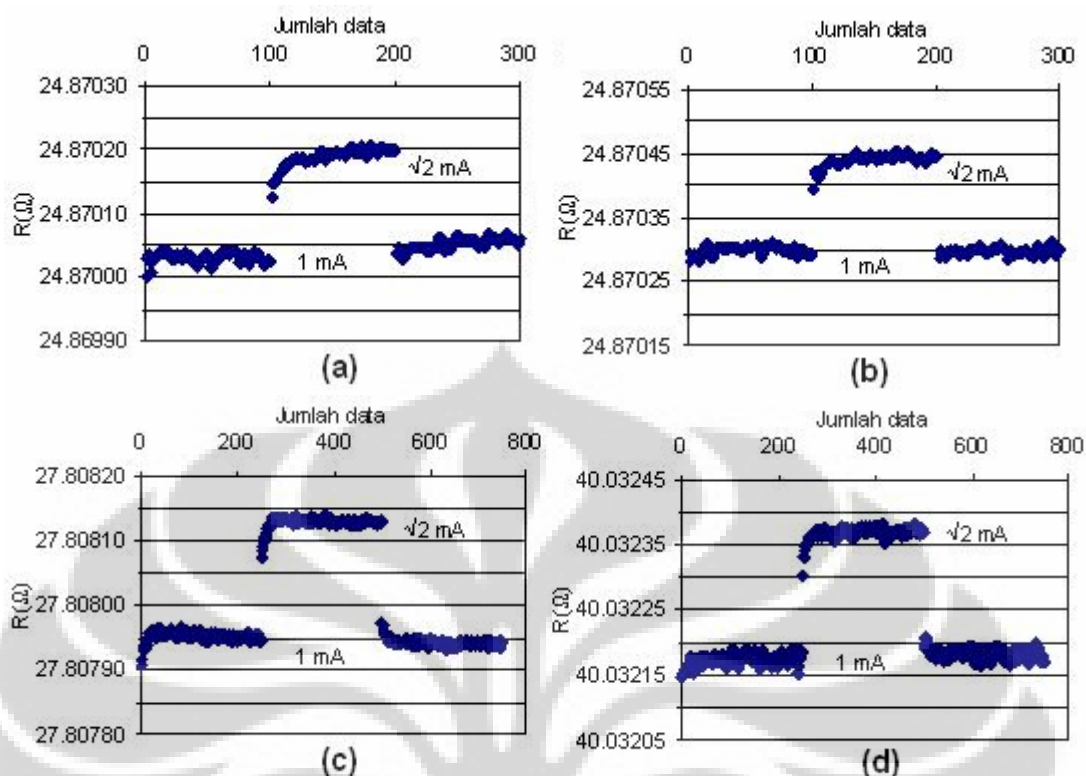
$$W(29,7646^{\circ}\text{C}) = \frac{28,416411 \Omega}{25,414602 \Omega} = 1,11811 \geq 1,11807$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SPRT Iso-1 memenuhi kriteria standar untuk dijadikan alat interpolasi menggunakan persamaan ITS-90.

Tahap 2: Pengukuran tahanan Iso-1

SPRT Iso-1 dikalibrasi pada sub-rentang W_{10} ($0^{\circ}\text{C} \sim 156,5985^{\circ}\text{C}$) dan W_{11} ($0^{\circ}\text{C} \sim 29,7646^{\circ}\text{C}$) dengan pengukuran langsung tahanan SPRT pada sejumlah titik tetap ITS-90 yaitu titik tripel H_2O dan titik beku In untuk sub-rentang W_{10} dan titik tripel H_2O dan titik leleh Ga pada sub-rentang W_{11} . Pengujian Iso-1 juga dilakukan pada titik leleh Ga sesuai kriteria yang ditetapkan ITS-90. [1]

Tahanan Iso-2 diukur dengan jembatan tahanan DC dengan arus eksitasi 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA. Data pengukuran dan kalibrasi direkam oleh komputer dan hasilnya disimpan dengan nama file: [Iso1-PTB4030308C.meas](#), [Iso1-Ga012108C.meas](#) dan [Iso1-In030608C.meas](#). Hasil pengukuran dan kalibrasi tahanan Iso-1 pada sejumlah titik tetap lebih jelas dapat dilihat pada Grafik 21 yang dirangkum pada Tabel 18.



Grafik 21. Tahanan Iso-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90: (a), (b) H₂O sebelum dan sesudah kalibrasi (c) Ga dan (d) In

Tahap 3: Perhitungan Koefisien ITS-90

Mengacu ke data kalibrasi pada Tabel 18 maka dengan menggunakan persamaan (5) dapat dihitung rasio tahanan Iso-1 seperti terangkum pada Tabel 18.

Tabel 18. Tahanan Iso-1 pada sejumlah titik tetap ITS-90

Titik tetap	$R(t_{90})$ terukur (Ω)		ΔR_{sh} (Ω)	$R(t_{90})$ terhitung (Ω)	$\Delta R_p + \Delta R_h$ (Ω)	$R(t_{90})$ terkoreksi (Ω)
	1 mA	$\sqrt{2}$ mA		0 mA		0 mA
H ₂ O TP	24,870227	24,870375	0,000148	24,870079	-0,000015	24,870064
Ga MP	27,807705	27,807887	0,000182	27,807523	-0,000025	27,807498
H ₂ O TP	24,870339	24,870444	0,000104	24,870235	-0,000015	24,870220
In FP	40,032176	40,032371	0,000195	40,031980	0,000059	40,032040
H ₂ O TP	24,870031	24,870197	0,000166	24,869865	-0,000015	24,869850

Tabel 19. Rasio tahanan Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11}

Titik tetap	$\Delta W_{10}(t_{90})$	$[W(t_{90}) - 1]$
	$\Delta W_{11}(t_{90})$	
Ga MP	-0,00002679	-1,00002679
In FP	-0,28314880	-1,28314880

Koefisien a_{10} dan a_{11} dapat dihitung menggunakan persamaan (25) dan (27) pada Bab 2 dengan mengacu ke data kalibrasi pada Tabel 18 dan perhitungan rasio tahanan Iso-1 pada Tabel 19 maka diperoleh sebagai berikut:

$$a_{10} = \frac{-0,00002679}{-1,00002679} = 2,6788511E - 05$$

$$a_{11} = \frac{-0,28314880}{-1,28314880} = 2,2066716E - 01$$

Tahap 4: Evaluasi ketidakpastian (lihat Bab 5)

Bab 5

Hasil dan Pembahasan

5.1 Tahanan Versus Suhu

Seperti telah dijelaskan pada Bab 2 bahwa tahanan platina mempunyai linearitas yang sangat baik terhadap perubahan suhu dibandingkan logam lainnya. Grafik 22 dan 23 menunjukkan hasil pengukuran tahanan SPRT tipe Pt-2,5 (Grafik 22) dan tipe Pt-25 (Grafik 23) terhadap suhu titik tetap pada rentang dan sub-rentang yang telah ditetapkan oleh skala suhu ITS-90.

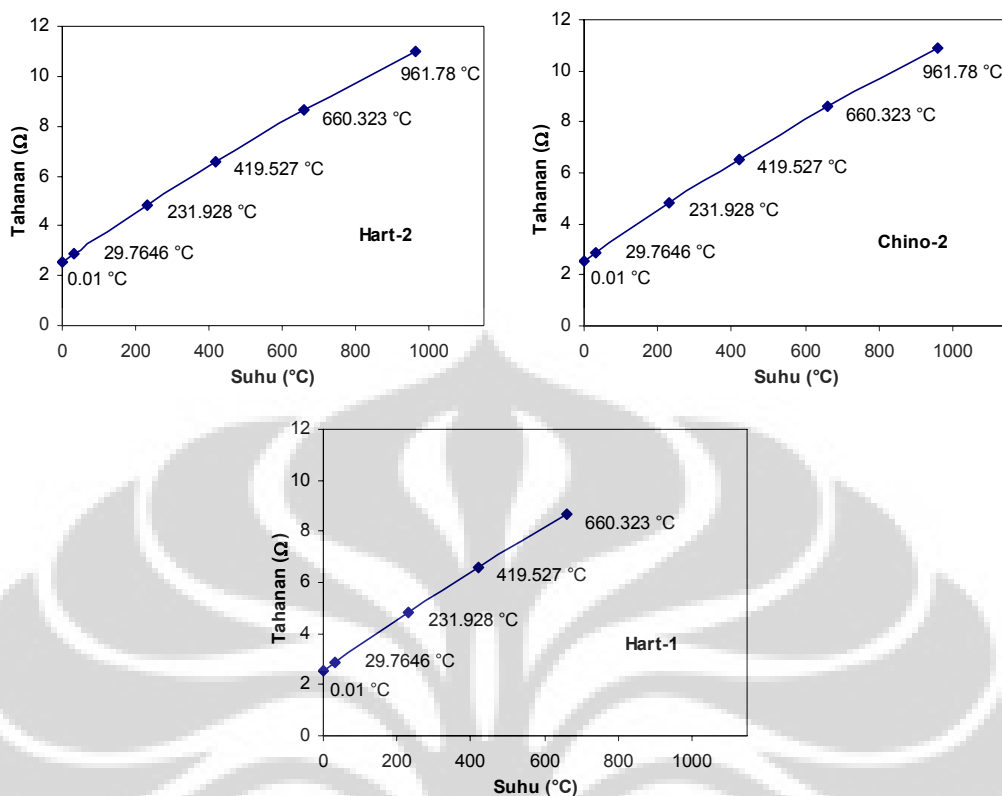
Untuk rentang suhu (0 ~ 961,78) °C berikut sub-rentang suhu di dalamnya, ITS-90 menetapkan persamaan sebagai berikut:

$$W(t_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{(t_{90} - 754.15)}{481} \right]^i \quad (28)$$

dimana $W(t_{90})$ adalah rasio tahanan SPRT pada suhu t_{90} terhadap suhu titik tripel air (0,01 °C) yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$W(t_{90}) = \frac{R(t_{90})}{R(0.01 \text{ } ^\circ\text{C})} \quad (29)$$

Dengan menggabungkan persamaan (28) dan (29) maka akan diperoleh hubungan tahanan SPRT pada suhu t_{90} terhadap perubahan suhu sebagai berikut:

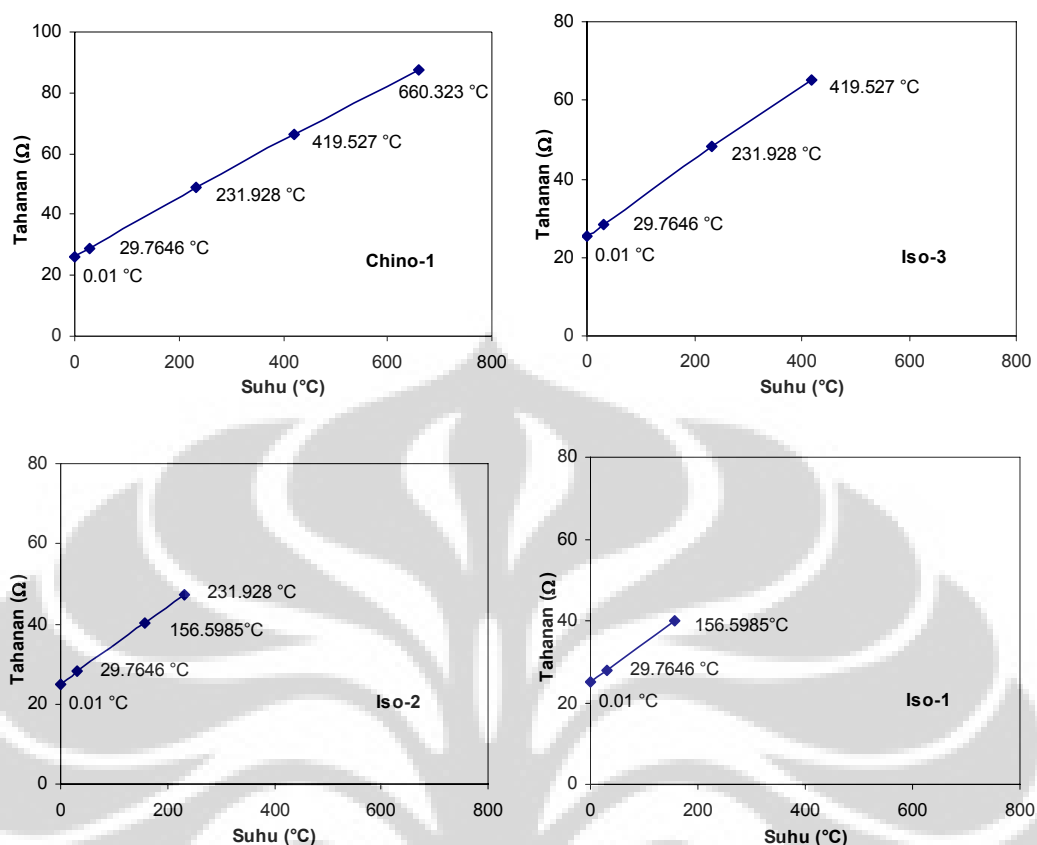


Grafik 22. Perubahan tahanan HTSPRT Pt-2,5 terhadap suhu titik tetap

$$R(t_{90})=R(0,01^{\circ}C) \left\{ C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{(t_{90}-754.15)}{481} \right]^i \right\} \tag{30}$$

dimana koefisien C_0 dan C_i dapat dilihat pada Tabel 4 pada Bab 2.

Saat ini persamaan ITS-90 adalah persamaan terbaik untuk *fitting* kurva tahanan SPRT terhadap perubahan suhu. Ketidakpastian konversi tahanan menjadi suhu dengan persamaan ini adalah $\pm 0,13$ mK [1]. Penggunaan persamaan lain dapat juga dilakukan dengan ketidakpastian yang lebih besar. Persamaan alternatif lain diantaranya Calendar – Van Dussen, NMI Australia, Steint Hart – Hart atau persamaan polinomial biasa. Persamaan Calendar – Van Dussen pernah digunakan sebagai persamaan interpolasi resmi pada skala suhu IPTS-68 dan sampai sekarang masih tetap digunakan untuk aplikasi PRT kelas industri. Persamaan NMI Australia adalah hasil penelitian para metrolog suhu di Australia sedangkan Stein Hart – Hart dibuat produsen alat suhu Hart Scientific USA.



Grafik 23. Perubahan tahanan SPRT Pt-25 terhadap suhu titik tetap

Sebagai bahan perbandingan berikut hasil regresi linear dari ke-7 SPRT tersebut beserta kesalahan bakunya yang dirangkum pada Tabel 20. Kesalahan baku SPRT menjadi lebih besar bila di-interpolasi secara linear dan akan lebih baik bila menggunakan persamaan polinomial pangkat 2 atau pangkat 3.

Tabel 20. Kesalahan baku SPRT untuk interpolasi secara linear

SPRT	Rentang	Kesalahan Baku (Ω)
Hart-1	W_7	0,09
Hart-2	W_6	0,18
Chino-1	W_7	0,90
Chino-2	W_6	0,18
Iso-1	W_{10} dan W_{11}	0,04
Iso-2	W_9	0,10
Iso-3	W_8	0,38

Tabel 21. Koefisien SPRT untuk persamaan ITS-90 mengacu ke dokumen teknis NIST No.1265

SPRT	Rentang	a	b	c	d
Hart-1	W_7	-5,0268796E-04	-2,3010143E-05	-6,5019249E-07	-
Hart-2	W_6	-2,2792616E-04	-3,7423948E-06	-2,0995264E-06	1,697599E-05
Chino-1	W_7	-3,8433690E-04	-2,8652149E-05	6,2536626E-06	-
Chino-2	W_6	2,0552475E-05	-3,2656038E-05	3,5032968E-06	5,2076251E-05
Iso-1	W_{10}	2,6788511E-05	-	-	-
Iso-1	W_{11}	2,2066716E-01	-	-	-
Iso-2	W_9	1,6747127E-01	-1,0369173E-00	-	-
Iso-3	W_8	4,8748467E-05	-3,0729910E-04	-	-

5.2 Konversi Suhu ITS-90

Koefisien-koefisien persamaan ITS-90 (a, b, c dan d) untuk masing-masing SPRT diperoleh dari hasil kalibrasi pada sejumlah titik tetap. Koefisien ini dihitung menggunakan matrik orde 2 atau orde 3 tergantung rentang kalibrasi yang dilakukan. Setiap SPRT dikalibrasi pada rentang dan sub-rentangnya masing-masing yaitu Hart-1 dikalibrasi pada sub-rentang W_7 , Hart-2 pada rentang W_6 , Chino-2 pada rentang W_6 , Chino-1 pada sub-rentang W_7 , Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11} , Iso-2 pada rentang W_9 dan Iso-3 dikalibrasi pada sub-rentang W_8 .

Perhitungan koefisien-koefisien persamaan ITS-90 untuk setiap SPRT sudah dibahas sebelumnya pada Bab 4 dan hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 21. Jumlah digit di belakang koma pada tabel tersebut terdiri dari 7 angka yaitu mengacu ke NIST Amerika [1]. Fungsi koefisien ini sendiri sebetulnya sebagai pendukung untuk persamaan konversi ITS-90 dari masukan (*input*) tahanan SPRT (Ω) menjadi keluaran (*output*) suhu ($^{\circ}\text{C}$ atau K). Jadi yang lebih diperhatikan sebetulnya lebih kepada masukan dan keluarannya.

5.3 Penentuan Angka Penting

ISO GUM menetapkan bahwa nilai ketidakpastian pengukuran atau kalibrasi dinyatakan paling banyak dalam 2 angka penting. Untuk SPRT dengan kriteria

ITS-90, ketidakpastian koefisien-koefisien tersebut umumnya berkisar pada orde μK yaitu sampai 6 atau 7 angka desimal dibelakang koma sehingga dengan aturan ini kita bisa membatasi jumlah digit pada koefisien ITS-90 disesuaikan dengan nilai ketidakpastiannya. Berikut uraian singkat perhitungan ketidakpastian koefisien-koefisien ITS-90 untuk sub-rentang W_8 (0~420) °C, yaitu ketidakpastian untuk a_8 dan b_8 .

$$u^2(a_8) = \left(\frac{\partial a_8}{\partial R(t_{Sn})} \right)^2 u^2[R(t_{Sn})] + \left(\frac{\partial a_8}{\partial R(t_{Zn})} \right)^2 u^2[R(t_{Zn})] \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial a_8}{\partial R(t_{Sn})} \right) = - \frac{\frac{a_8}{R(t_{H_2O})} + 2b_8 \left(\frac{R(t_{Sn})}{R(t_{H_2O})} - 1 \right) \frac{1}{R(t_{H_2O})} - \frac{1}{R(t_{H_2O})}}{\left(\frac{R(t_{Sn})}{R(t_{H_2O})} - 1 \right)} \quad (32)$$

Persamaan (32) berlaku juga untuk suhu titik tetap seng (t_{Zn}) sehingga dengan menggunakan data pengukuran dan kalibrasi akan diperoleh ketidakpastian sebesar $U(a_8) = 0,0000085 \Omega$ dinyatakan dalam 2 angka penting sehingga nilai koefisien dapat ditulis $a_8 = (0,0000487 \pm 0,0000085) \Omega$ atau $(4,87\text{E}-05 \pm 8,5\text{E}-06) \Omega$, data selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 22.

$$u^2(b_8) = \left(\frac{\partial b_8}{\partial R(t_{Sn})} \right)^2 u^2[R(t_{Sn})] + \left(\frac{\partial b_8}{\partial R(t_{Zn})} \right)^2 u^2[R(t_{Zn})] \quad (33)$$

$$\left(\frac{\partial b_8}{\partial R(t_{Sn})} \right) = - \frac{\frac{a_8}{R(t_{H_2O})} + 2b_8 \left(\frac{R(t_{Sn})}{R(t_{H_2O})} - 1 \right) \frac{1}{R(t_{H_2O})} - \frac{1}{R(t_{H_2O})}}{\left(\frac{R(t_{Sn})}{R(t_{H_2O})} - 1 \right)^2} \quad (34)$$

Persamaan (34) berlaku juga untuk suhu titik tetap seng (t_{Zn}) sehingga dengan menggunakan data pengukuran dan kalibrasi akan diperoleh ketidakpastian sebesar $U(b_8) = 0,0000065 \Omega$ dinyatakan dalam 2 angka penting sehingga nilai koefisien dapat ditulis $b_8 = (-0,0003073 \pm 0,0000065) \Omega$ atau $(3,073\text{E}-04 \pm 6,5\text{E}-06) \Omega$. Koefisien ITS-90 dengan aturan ini dapat dilihat pada Tabel 22.

Tabel 22. Koefisien SPRT untuk persamaan ITS-90 berdasarkan ketidakpastian dan aturan angka penting

SPRT	Rentang	a	b	c	d
Hart-1	W_7	-0,0005027	-0,0000230	-0,0000007	-
Hart-2	W_6	-0,0002279	-0,0000037	-0,0000021	0,0000170
Chino-1	W_7	-0,0003843	-0,0000287	0,0000063	-
Chino-2	W_6	0,0000206	-0,0000327	0,0000035	0,0000521
Iso-1	W_{10}	0,0000268	-	-	-
Iso-1	W_{11}	0,2206672	-	-	-
Iso-2	W_9	0,1674713	-1,0369173	-	-
Iso-3	W_8	0,0000487	-0,0003073	-	-

5.4 Ketidakpastian

Sebagian sudah dijelaskan pada Bab 2 berkaitan dengan evaluasi ketidakpastian pengukuran dan kalibrasi untuk SPRT. Mengacu ke dokumen CCT-WG3 tentang evaluasi ketidakpastian SPRT yang baru dikeluarkan pada bulan Juli 2009 dan dari protokol KC-3 interkomparasi SPRT bulan Mei 2000 maka evaluasi ketidakpastian tersebut dapat dirangkum seperti pada Tabel 27.

Mengacu ke persamaan (11) dan data teknis pada Tabel 3 yang sudah dijelaskan sebelumnya pada Bab 2 maka ketidakpastian karena pengaruh hidrostatis pada masing-masing sel titik tetap selengkapnya dirangkum pada Tabel 23. Mengacu ke persamaan (8), (9) dan data pada Tabel 3 pada Bab 2 maka ketidakpastian karena pengaruh perbedaan tekanan internal sel terhadap tekanan standar 1 atm (101,325 kPa) selengkapnya dirangkum pada Tabel 24.

Tabel 23. Ketidakpastian pengaruh dari tekanan hidrostatis sel titik tetap

Fixed Points	dT/dh	$u_{h,liq}$	$u_{h,SPRT}$	u_{hyd}
	(K/cm)	(cm)	(cm)	(μ K)
H ₂ O	-7.3E-06	0.03	0.03	0.30
Ga	-1.2E-05	0.03	0.03	0.49
In	3.3E-05	0.03	0.03	1.3
Sn	2.2E-05	0.03	0.03	0.90
Zn	2.7E-05	0.03	0.03	1.1
Al	1.6E-05	0.03	0.03	0.65
Ag	5.4E-05	0.03	0.03	2.2

Tabel 24. Ketidakpastian pengaruh dari perbedaan tekanan internal sel terhadap tekanan standar 1 atm

Fixed Points	dT/dP	$u_{P,meas}$	u_P
	(K/kPa)	(kPa)	(μ K)
H ₂ O	-0.000075	0.003	0.22
Ga	-0.00002	0.003	0.06
In	0.000049	0.003	0.14
Sn	0.000033	0.003	0.10
Zn	0.000043	0.003	0.12
Al	0.00007	0.003	0.20
Ag	0.00006	0.003	0.17

Ketidakpastian karena pengaruh impuritas bahan (u_{imp}) pada masing-masing sel umumnya dapat diperkirakan dan dihitung dengan metode Roulth seperti pada persamaan (35).

$$u_{imp} = \frac{x_2}{A\sqrt{3}} \quad (35)$$

A adalah tetapan cryoscopic pertama dari bahan (lihat Tabel 25 pada kolom 3), dan x_2 adalah fraksi kemurnian bahan. Dengan persamaan (35) maka ketidakpastian karena pengaruh impuritas dari setiap sel titik tetap dapat dihitung dan dirangkum pada Tabel 25.

Ketidakpastian dari sumber-sumber lain diperkirakan berdasarkan data teknis dan nilai tipikal yang diberikan oleh CCT-WG3 yang perlu diteliti lebih lanjut dan disesuaikan dengan metode serta karakteristik standar dan alat yang digunakan untuk merealisasikan skala suhu ITS-90 di Puslit KIM-LIPI.

Tabel 25. Ketidakpastian karena pengaruh impuritas bahan

Fixed Points	Purity	A	x_2	u_{imp}
	(%)	(K ⁻¹)		(μ K)
H ₂ O	~100	0.00968	-	-
Ga	99.99999	0.00732	1E-07	7.9
In	99.9999	0.00213	1E-06	271
Sn	99.9999	0.00329	1E-06	175
Zn	99.9999	0.00185	1E-06	312
Al	99.9999	0.00149	1E-06	387
Ag	99.9999	0.000891	1E-06	648

Tabel 26. Ketidakpastian karena pemanasan diri pada SPRT Pt-25

Fixed Points	i_1	i_2	u_t	u_{t0}
	(mA)	(mA)	(μ K)	(μ K)
H ₂ O	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
Ga	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
In	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
Sn	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
Zn	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
Al	1	$\sqrt{2}$	2.5	6
Ag	1	$\sqrt{2}$	2.5	6

Dengan mengacu ke persamaan (14) pada Bab 2 dan dari data pengukuran setiap SPRT pada dua arus (1 mA dan $\sqrt{2}$ mA untuk Pt-25, 5 mA dan $5\sqrt{2}$ mA untuk Pt-2,5) maka diperoleh ketidakpastian karena pengaruh pemanasan diri (*self heating*) dari sensor yang selengkapnya dirangkum pada Tabel 26. Nilai ketidakpastian pada HTSPRT Pt-2,5 mempunyai nilai yang hampir sama dengan perbedaan tidak lebih dari 0,1 μ K.

Tabel 27. Budget ketidakpastian tipe B dari setiap sel titik tetap

Fixed points	H ₂ O	Ga	In	Sn	Zn	Al	Ag
Source of uncertainty							
1. Fixed point effects							
1.1. Hydrostatic pressure	0.30	0.49	1.3	0.90	1.1	0.65	2.2
1.2. Residual gas pressure		0.03	0.14	0.10	0.12	0.20	0.17
1.3. Impurities		7.9	271	175	312	387	648
1.4. Isotopic composition	35						
1.5. Strain, crystal defects	300						
1.6. Static thermal effects	10	20	100	100	150	400	1000
1.7. Dynamic thermal effects							
2. SPRT effect							
2.1. Oxidation	400	500	850	1000	1100		
2.2. Strain, vacancies, contamination					50	200	2000
2.3. Insulation leakage	100	20				50	3000
3. Resistance measurement							
3.1. Standard resistor stability	100	100	200	200	300	500	700
3.2. Misc. cable effects	100	100	100	100	100	100	100
3.3. Bridge errors	500	500	500	500	500	600	700
3.4. Self heating correction	6	6	6	6	6	6	6
$u(\mu$ K)	729	722	1052	1158	1297	986	3926
$U(\mu$ K)	1458	1443	2103	2316	2594	1972	7851
$U(\text{mK})$	1.5	1.4	2.1	2.3	2.6	2.0	7.9

Bab 6

Kesimpulan dan Saran

6.1. Kesimpulan

Secara umum realisasi skala suhu pada rentang dan sub-rentang $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan termometer standar SPRT di Puslit KIM-LIPI berjalan lancar dengan hasil cukup baik dalam arti memenuhi kriteria dan definisi ITS-90. Kesimpulan ini diambil berdasarkan serangkaian hasil pengukuran, kalibrasi dan pengujian pada sejumlah titik tetap dan sejumlah SPRT yang digunakan sebagai alat interpolasi pada skala suhu ini.

Titik leleh dan titik beku sel telah diukur dengan waktu *plateau* lebih dari 2 jam sesuai kriteria yang ditetapkan oleh KAN (Komite Akreditasi Nasional) yang disampaikan oleh Assessor internasional D.R. White dari MSL New Zealand ketika proses akreditasi lab suhu di Puslit KIM-LIPI. *Plateau* titik leleh Ga berlangsung selama 7 jam, titik beku In selama 6 jam, Sn selama 24 jam, Zn selama 14 jam, Al selama 12 jam dan Ag selama 2,5 jam dengan ketidakstabilan suhu selama *plateau* $\pm 0,25\text{ mK} \sim \pm 0,5\text{ mK}$.

Semua SPRT yaitu Hart-1, Hart-2, Chino-1, Chino-2, Iso-1, Iso-2 dan Iso-3 telah diuji pada titik leleh Ga dengan hasil $W(29,7646\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 1,11807$. Untuk SPRT suhu tinggi (HTSPRT) yaitu Hart-1, Hart-2 dan Chino-2 dilakukan uji tambahan pada titik beku Ag dengan hasil $W(961,78\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 4,2844$. Hasil ini

menunjukkan bahwa semua SPRT memenuhi kriteria sebagai termometer standar untuk dijadikan alat interpolasi ITS-90.

Koefisien-koefisien persamaan ITS-90 (a, b, c dan d) untuk masing-masing SPRT diperoleh dari hasil kalibrasi pada sejumlah titik tetap. Koefisien ini dihitung menggunakan matrik orde 2 atau orde 3 tergantung rentang kalibrasi yang dilakukan. Setiap SPRT dikalibrasi pada rentang dan sub-rentangnya masing-masing yaitu Hart-1 dikalibrasi pada sub-rentang W_7 , Hart-2 pada rentang W_6 , Chino-2 pada rentang W_6 , Chino-1 pada sub-rentang W_7 , Iso-1 pada sub-rentang W_{10} dan W_{11} , Iso-2 pada rentang W_9 dan Iso-3 dikalibrasi pada sub-rentang W_8 . Hasil perhitungan koefisien untuk setiap SPRT selengkapnya dapat dilihat kembali pada Bab 4.

6.2. Saran-saran

Karena keterbatasan waktu, sarana dan pengetahuan Penulis, banyak hal yang belum tuntas dan belum bisa dilakukan dalam penelitian ini diantaranya masalah ketidakpastian pengukuran, kerataan suhu sel titik tetap selama *plateau* (*immersion profile*) dan masalah penetapan angka penting pada setiap pengukuran dan perhitungan koefisien persamaan ITS-90.

Ketidakpastian merupakan evaluasi dari setiap pengukuran dan perhitungan selama realisasi skala suhu. Masih banyak perbedaan pendapat dalam masalah ini sehingga CCT membentuk WG-8 (*Work Group 8*) untuk membuat panduan resmi yang dapat diadopsi secara internasional. Sementara ini Puslit KIM-LIPI mengacu ke dokumen APMP KC-3 (*Asia Pacific Metrology Program, Key Comparison 3*) untuk estimasi ketidakpastian. Evaluasi ketidakpastian dan pengukuran kerataan suhu sel titik tetap akan dilakukan pada penelitian berikutnya.

Penetapan jumlah angka penting pada setiap pengukuran dan perhitungan koefisien persamaan ITS-90 masih mengacu ke dokumen teknis NIST (*National Institute of Standards and Technology*) No. 1265 [1]. Penetapan angka penting sangat dipengaruhi oleh spesifikasi standar, peralatan ukur dan ketidakpastian

pengukuran. Dalam batas pengetahuan Penulis sampai saat ini belum ada jurnal ataupun hasil penelitian yang membahas masalah ini. Hal ini menjadi inspirasi untuk melakukan penelitian berikutnya.

6.3. Ucapan Terima Kasih

Alhamdulillah, Penulis bersyukur atas segala kemudahan yang Allah berikan selama penelitian dan penulisan tesis ini. Hal ini berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara moril ataupun materil. Penulis ucapkan banyak terima kasih kepada Dr. rer. nat. Martarizal dari Departemen Fisika UI selaku Pembimbing I dan Drs. Anang Chusno Trijanto, M.T. dari Puslit KIM-LIPI selaku Pembimbing II yang telah banyak memberikan inspirasi selama kegiatan penelitian. Juga kepada Dr. Santoso Soekirno, Dr. Sastra Kusuma Wijaya dari Departemen Fisika UI dan Dr. Ering Pornomo Setianto dari Puslit KIM-LIPI yang telah meluangkan waktunya untuk hadir dan menguji pada sidang pascasarjana di Departemen Fisika UI Depok.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kepala Puslit KIM-LIPI beserta segenap jajarannya yang telah banyak memberikan kemudahan selama Penulis menempuh tugas belajar di PPS Fisika UI. Ucapan terima kasih juga Penulis sampaikan kepada rekan-rekan satu profesi khususnya di lab metrologi suhu, tenaga ahli dari KRISS Korea Dr. K. S. Gam dan Mr. M. Zhao dari Hart Scientific. Terakhir Penulis sampaikan salam hangat dan ucapan terima kasih kepada rekan-rekan kuliah S-2 angkatan 2006 semoga selalu sukses.

Daftar Acuan

- [1] Mangum, B.W., Furukawa, G.T., *Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, NIST Technical Note 1265: Center for Chemical Technology NML-NIST, Gaithersburg USA, August 1990.
- [2] Mangum, B.W., *Report on the 17th Session of the Consultative Committee on Thermometry*, Journal of Research of the NIST, Vol. 95 No. 1, January – February 1990.
- [3] H. Preston Thomas, *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, Metrologia 27, 3-10 (1990).
- [4] Nicholas, J.V. & White, D.R. *Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. John Wiley & Sons, 2nd Edition. 2001
- [5] Hart Scientific – Fluke, *Catalog and User Guide*, 2003-2004.
- [6] Chino Corporation, *Performance and Specification of Standard Temperature Sensors*, 2001.
- [7] Isothermal Technology, *Standard Thermometer 670 Range*, 2009.