

**PERANCANGAN *CHAMBER* DENGAN SUHU TERKONDISI UNTUK FREKUENSI STANDAR PADA KESTABILAN MENCAPAI  $4,6 \times 10^{-15}$**   
***The Chamber Plan with Temperature Conditioned of the Standard Frequency with It Stability Up to  $4,6 \times 10^{-15}$***

**Hadi Sardjono, Boynawan, Ratnaningsih, Lukluk**

Laboratorium Metrologi Kelistrikan, Puslit KIM - LIPI, Cisauk, Cisauk, Tangerang – Banten  
e-mail: sar\_djono@yahoo.com

Diajukan: 3 Maret 2011, Dinilai: 8 Maret 2011, Diterima: 6 April 2011

**Abstrak**

*Cesium beam* dan *Hydrogen Maser* adalah dua tipe pembangkit frekuensi yang ditetapkan sebagai standar nasional oleh laboratorium metrologi Kelistrikan Puslit KIM-LIPI. Ketelitian besar frekuensi ini terjaga oleh proses perbandingan UTC-UTC (KIM) dibawah koordinasi sebuah lembaga metrologi Internasional BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*). Berdasarkan proses perbandingan selama 9 bulan telah terbentuk sebuah karakteristik kestabilan frekuensi melalui sebuah grafik suhu ruang *versus* kesalahan frekuensi relatif, sehingga diperoleh rentang suhu ruang optimum pada kesalahan relatif minimal mencapai  $4,6 \times 10^{-15}$  Hz/Hz. Pencapaian kesalahan frekuensi relatif ini dapat dipelihara dengan pembangunan sebuah ruangan dengan kondisi suhu ruang yang stabil pada  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

**Kata kunci:** suhu kamar, standar frekuensi standar, standar waktu, interkomparasi, kesalahan frekuensi relatif

**Abstract**

*Cesium beam and Hydrogen Maser are two types of frequency generator that is declared as the national standard by electrical metrology laboratory of Puslit KIM-LIPI. The accuracy of this standard frequency was maintained by a comparison process of UTC-UTC (KIM) under an International Metrology Institute of BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) coordination. Based on the comparison process of nine months forms a frequency stability characteristic through a room temperature versus relative frequency error with the result that an optimum room temperature on the minimum relative frequency error up to  $4,6 \times 10^{-15}$  Hz/Hz. These relative error achievement can be maintained by an establishment of chamber with a stable room temperature up to  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ .*

**Keywords:** room temperature, frequency standard, time standard, intercomparison, relative frequency error

**1. PENDAHULUAN**

UTC (Waktu Universal Terkoordinasi atau *Coordinated Universal Time*) yang terjaga BIPM adalah skala waktu yang membentuk basis pendesiminasian terkoordinasi sinyal frekuensi dan waktu. Skala waktu diselaraskan dengan penyisipan "*leap seconds*" untuk menjamin kedekatan mufakat dengan pewaktuan yang berasal dari perotasian bumi. *Leap seconds* ini disisipkan pada penunjukan Perotasian Bumi Internasional dan Pelayanan Sistem Acuan (*International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS*). Perealisasi fisik UTC-UTC (KIM) terjaga di Lembaga Metrologi Nasional Puslit KIM – LIPI sebagai observator (pengamat) yang ikut andil data pewaktu (*clock*) di BIPM.

Secara operasional, di dalam proses sistem pemeliharaan nilai standar frekuensi yang berdasarkan UTC-UTC (KIM) tersebut dapat dibagi menjadi dua bagian utama yaitu bagian

sistem transmisi dan bagian sistem frekuensi standar (lihat Gambar 2). Bagian sistem frekuensi standar yang terdiri dari 3 buah *Cesium Primary Frequency Standard* dan sebuah *Hydrogen Maser* terletak di ruangan Laboratorium Metrologi Time & Frekuensi (Kelistrikan) Puslit. KIM-LIPI. Sistem pengukuran frekuensi standar ini mampu membangkitkan frekuensi standar dengan spesifikasi teknis kestabilan frekuensi mencapai  $< 10^{-14}$ .

Salah satu variabel kondisi yang secara pasti ikut andil dalam proses penjagaan kemantapan UTC-UTC (KIM) adalah kondisi suhu ruang. Walaupun ruang pembangkit frekuensi standar telah terkondisi cukup baik namun pada kenyataannya masih bersifat moderat karena pengkondisian yang dihasilkan masih belum terjaga secara berkesinambungan. Kegagalan proses pengkondisian ruang tersebut pada dasarnya ditimbulkan oleh kegagalan suplai suhu atau listrik sehingga tidak bisa mencapai suhu pada spesifikasi teknis yang

diinginkan yaitu sebesar  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Secara teknis ruang yang masih terkondisi secara moderat tersebut bisa dikembangkan menjadi peruntukan spesifik berdasarkan hasil penelitian ini.

Telah dirancang sebuah sistem pengkondisi ruang yang mampu memelihara kestabilan sistem pengukuran frekuensi standar laboratorium Puslit. KIM-LIPI yang meliputi dua bagian yaitu penetapan suhu dan penetapan ruang. Penetapan suhu telah diperoleh berdasarkan pengukuran UTC-UTC (KIM) selama 7 bulan sebesar  $(23 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ , sedangkan penetapan ruang telah dirancang sebuah *chamber* yang suhunya terkontrol pada batas tersebut penetapan suhu dilakukan berdasarkan pendekatan pola persamaan polynomial tingkat 3 terhadap data kestabilan frekuensi standar.

## 2. SISTEM PENGUKURAN FREKUENSI STANDAR

*Atomic clocks* adalah suatu perangkat penetapan waktu (*time keeping*) terakurat mencapai beberapa sekon selama beberapa ribu tahun. Akurasi ini digunakan untuk mengkalibrasi pewaktu (*clocks*) lainnya berupa instrumentasi penempat waktu. Sistem satuan internasional telah menstandarkan satuan waktu ini sebagai sekon yang dimiliki oleh unit Cesium sejak tahun 1967. Selain itu, *atomic clocks* juga telah dipercayakan juga pada prinsip kerja elemen lain berbentuk uap Hidrogen yang memiliki kestabilan jangka pendek lebih tinggi dan hanya membutuhkan daya operasional maupun biaya yang relatif lebih rendah.

*Atomic clocks* berbasis Cesium dapat mengamati kondisi transisi elektromagnetik di struktur super halus dari atom Cesium-133 yang dipergunakannya sebagai titik acuan untuk pengukuran waktu dan frekuensi. Pewaktu ini mengukur frekuensi dengan ketelitian mencapai 2-3 part in  $10^{14}$  yang berkesesuaian dengan ketelitian pengukuran waktu mencapai 2 ns per hari (1 sekon dalam 1,4 juta tahun).

Standar Cesium (pewaktu atomic cesium) adalah standar frekuensi primer berbasis transisi elektronik antara 2 keadaan dasar superhalus atom Cesium-133 dipergunakan untuk mengontrol luaran (output) frekuensi. Standar ini adalah tipe standar waktu dan frekuensi komersial yang paling teliti sehingga dipersiapkan sebagai standar untuk definisi sekon dalam SI (sistem matrik). Dengan pendefinisian, peradiasian yang dihasilkan oleh pentransisian antara dua kondisi dasar super halus Cesium (keberadaan pengaruh eksternal

seperti medan magnet bumi) memiliki frekuensi sebesar 9.192.631.770 Hz.

Selama waktu adalah berbanding terbalik terhadap frekuensi maka menurunkan dari standar frekuensi ke standar waktu menjadi relatif lebih mudah. Sebuah pewaktu standar mengandung standar frekuensi, sebuah alat pembagi siklus pengosilasian yang dipancarkan oleh standar frekuensi dan sebuah sarana penayangan hasil.

Sampai saat ini, pewaktu cesium mengukur frekuensi dengan ketelitian mencapai 2 sampai dengan  $3 \times 10^{-14}$  (0,000 000 000 000 02 Hz) yang tergantung pada pengukuran waktu dengan ketelitian mencapai 2 ns/hari atau 1s dalam 1.400.000 tahun. Kemampuan ini adalah yang paling teliti pernah diraih oleh kemajuan teknologi saat ini. Sebuah "*cesium clock*" dioperasikan dengan mengekspos atom-atom cesium ke gelombang mikro sampai mencapai vibrasi pada frekuensi resonansinya dan penghitungan berdasarkan siklus sebagai sebuah pengukuran waktu. Keterlibatan frekuensi adalah energi yang diserap dari kejadian photon ketika memicu (*excite*) lapisan elektron terluar dalam atom cesium melompat (pentransisian) dari orbit rendah ke yang lebih tinggi.

Sesuai dengan teori kuantum, atom-atom hanya ada didalam kondisi energi diskrit ("terkuantisasi") tertentu tergantung pada orbit apa dimana nukleanya ditempati elektron-elektronnya. Perbedaan pentransisian dimungkinkan, dimana perubahan electron dan tingkat energi spin nuklir (*hyperfine*) pengesetan orbit terendah disebut kondisi dasar (*Ground State*). Cesium merupakan pemilihan atom terbaik dalam pengukuran karena semua ke 55 elektronnya tetapi lapisan yang paling luar dibatasi untuk mengorbit di kulit kuat elektromagnetik yang stabil. Jadi elektron kulit terluar tidak banyak terganggu dengan yang lainnya. Atom-atom cesium diletakkan dalam vakum yang terbaik sebesar 10 triliunan atm sehingga atom-atom cesium sangat kecil terganggu oleh partikel-partikel lainnya. Semua ini bermaksud bahwa partikel-partikel beradiasi dalam sebuah garis spektral yang panjang gelombangnya atau frekuensinya dapat ditentukan dengan akurat.

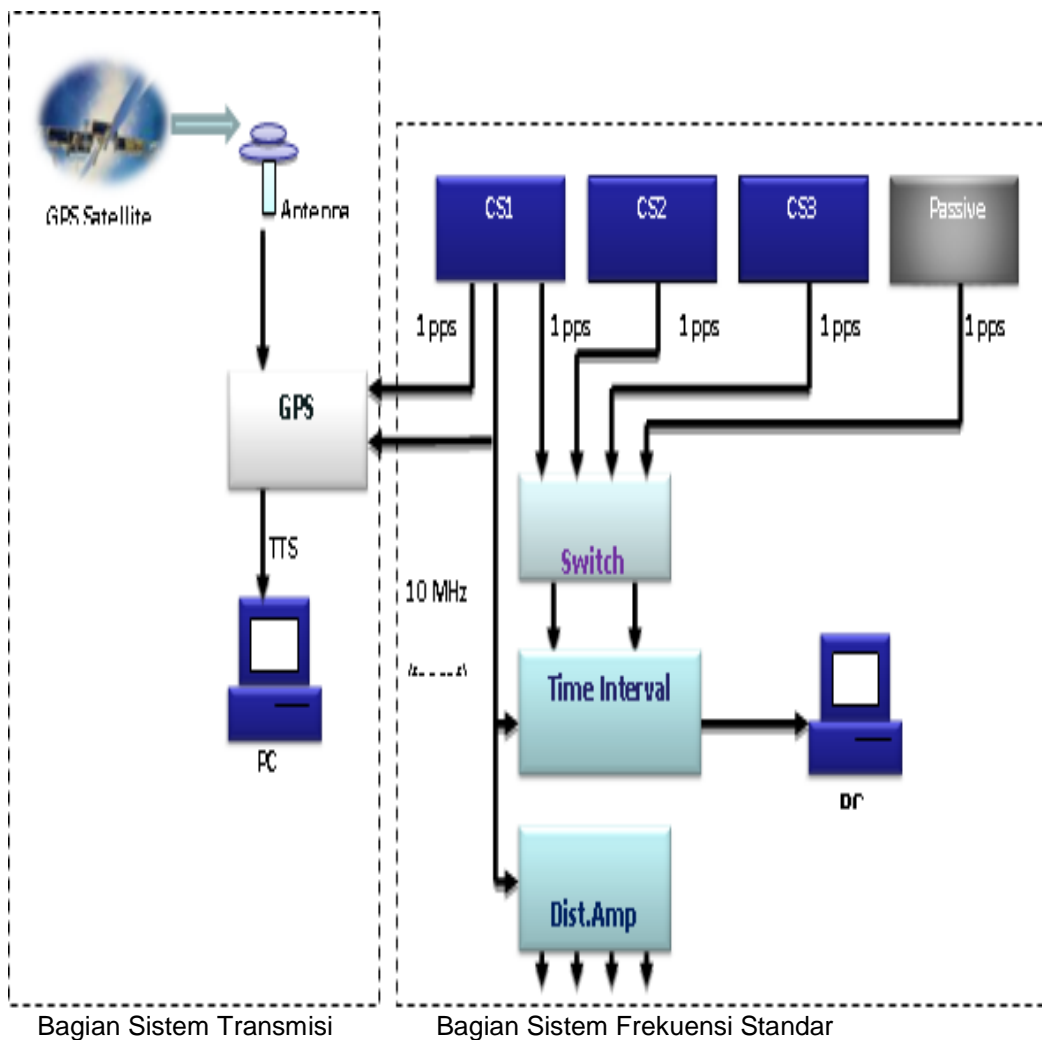
*Cesium clocks* (lihat Gambar 1) perlu diletakkan di dalam ruangan yang suhu dan kelembabannya terjaga ketat untuk meminimisasi gangguan dari perubahan lingkungan yang ekstrim (lebih besar dari  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ). Pengukuran waktu dilakukan dengan peralatan time-interval counter yang membandingkan tiap

clock's time dengan sebuah "Master Clock", di mana frekuensinya dikemudikan untuk menyerasikan waktunya terhadap rerata *clocks* lainnya. Saat ini, pengukuran waktu *atomic* disebut sebagai *Universal Time Coordinated* (UTC). Beberapa cesium *clock* dapat diletakkan terpisah dalam rangka penyinkronan.



Gambar 1 Unit Cesium Beam

Frekuensi standar Puslit KIM-LIPI yang mengacu pada spesifikasi Cesium *Primary Frequency Standard* dan *Hydrogen Maser* memiliki spesifikasi teknis (karakteristik teknis) dengan kestabilan frekuensi mencapai  $< 10^{-14}$ . Kestabilan frekuensi tersebut dapat dijamin optimum jika kondisi suhu kamar ruang pembangkit frekuensi standar cukup stabil yaitu mencapai  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Pada dasarnya, kedua tipe tersebut dibedakan atas kurun kestabilan yang dimilikinya yaitu jangka panjang (per tahun) dan jangka pendek (per 4 bulan). Sebagai lembaga metrologi nasional, Puslit KIM-LIPI telah memiliki sebuah sistem pengukuran frekuensi standar yang didukung oleh beberapa sumber pembangkit frekuensi standar berbasis Cesium 3 buah dan berbasis *Hydrogen Maser* 1 buah (lihat Gambar 2).



Gambar 2 Dua Bagian dalam Sistem Pengukuran Frekuensi Standar di Laboratorium Puslit. KIM-LIPI

Pada dasarnya sistem pengukuran frekuensi standar terdiri dari 2 bagian utama. Pertama adalah bagian sistem transmisi yaitu bagian yang terbentang luas dimana standar frekuensi berakomodasi selama proses propagasi dari atau ke KIM-LIPI (Indonesia) ke atau dari BIPM (Paris). Oleh karena itu, sinyal frekuensi standar yang ditumpangkan ke sinyal pembawa dikirimkan dengan menggunakan media pemancar melalui GPS (Global Position System) menuju pemancar penerima milik koordinator BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) dimana proses komparasi dilakukan. Sudah barang tentu media transmisi udara yang dilaluinya selama diperjalanan memiliki sifat suhu, kelembaban maupun tekanan udara yang berbeda beda. Namun karena pemilihan frekuensi pembawa yang sedemikian rupa ketatnya sehingga tidak mempengaruhi kestabilan frekuensi standar.

Kedua adalah bagian sistem frekuensi standar yaitu sebuah ruangan dimana instrumen standar frekuensi berada dimana sistem pengondisi ruangnya dirancang berdasarkan skala laboratorium dengan pengondisi ruangan yang moderat. Selama ini pengondisian suhu ruang standar frekuensi terkontrol secara terpusat. Pengontrolan dilakukan pada suhu  $23^{\circ}\text{C} + 1^{\circ}\text{C}$  yang moderat sehingga apabila terdapat gangguan disistem pusat maka ruangan standar frekuensi pun ikut terganggu.

### 3. PERANCANGAN RUANG SISTEM FREKUENSI

Fungsi teknis ruang sistem frekuensi membutuhkan proses pengondisian yang dapat bekerja secara terpadu antara 2 bagian utama

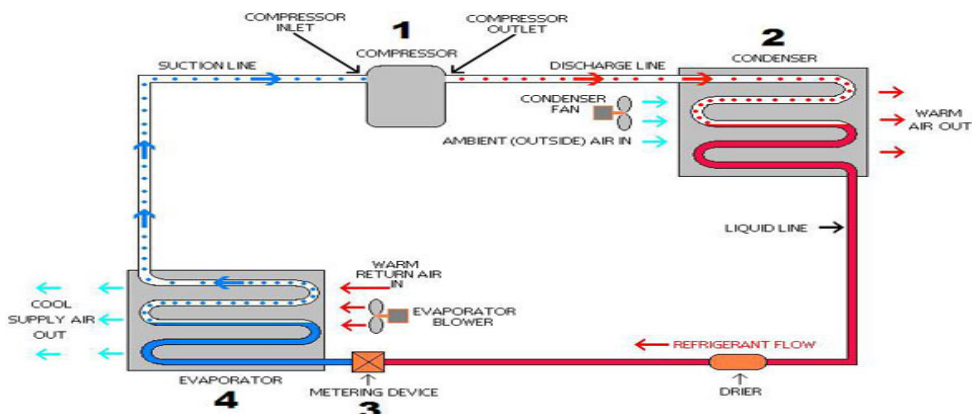
yaitu sistem pengontrol suhu dan ruangan pelindung suhu udara (*chamber*). Spesifikasi teknis yang dibutuhkan oleh sistem frekuensi standar terdapat pada nilai kestabilan frekuensi (waktu) yang dihasilkan sesuai (sebanding) dengan kestabilan suhu ruang. Agar realisasi ruang sistem frekuensi ini berkesesuaian dengan spesifikasi yang dikehendaki maka diperlukan langkah perencanaan yang akurat melalui proses perancangan berbasis hasil pengukuran dari penelitian ini.

#### 3.1. Perancangan Sistem Kontrol Suhu

Perancangan sistem kontrol suhu ruang *chamber* dapat dibangun dengan menggabungkan dua sistem fungsi yaitu sebuah sistem mesin pembangkit suhu dingin (*cooler*) dengan sistem kontrol. Sistem kontrol ini dapat diprogram untuk mengontrol tingkat pembangkitan kedinginan dari mesin.

- Mesin Pendingin.

Mesin pendingin yang akan dipasang dalam ruang *chamber* merupakan mesin pendingin biasa yang dimodifikasi sedemikian rupa sehingga sesuai dengan target yang diinginkan dalam penelitian ini. Modifikasi ini terutama diperlukan untuk memperoleh hasil yang optimum dan serasi dengan sebuah sistem kontrol yang dikembangkan dalam penelitian ini yaitu berbasis PID. Secara rangkaian sistem mesin pendingin ini dapat direalisasikan berdasarkan beberapa blok-blok kerja dimana titik-titik pengontrolan dapat dilakukan. Terdapat 3 titik pengontrolan yang dapat dimanfaatkan oleh sistem kontrol PID yaitu kecepatan (rpm) kompresor, kecepatan (rpm) (kipas/*fan/blower*) dan *valve bypass* dari kompresor ke *metring device* (lihat Gambar 3).



Gambar 3 Rangkaian Sederhana Mesin Pendingin dan Diagram Siklus Kompresor setelah Dimodifikasi

Komponen 1: adalah kompresor yang merupakan jantung sistem pendingin. Kompresor ini mempertahankan pendinginan yang mengalir melalui sistem pada spesifikasi kecepatan alir dan tekanannya. Kompresor ini mengambil uap pendingin kedalam dari sisi tekanan rendah, dan dilepaskan pada tekanan yang jauh lebih tinggi kedalam sisi yang lebih tinggi dari rangkaian. Kecepatan alir melalui sistem akan tergantung pada ukuran unit. Dan tekanan operasional akan tergantung pada pendingin yang dipergunakan dan suhu penguapan yang diinginkan.

Komponen 2: adalah kondensor di mana garis putus-putus warna merah di dalam pipa menggambarkan pelepasan penguapan. Garis merah pejal menggambarkan tekanan tinggi cairan pendingin. Pada dasarnya udara didinginkan oleh pengondisian udara dan sistem pendingin sesuai perancangan, jadi pendinginan akan dikondensasi pada suhu sekitar 25°C–30°C di atas suhu udara lingkungan luar. Ketika uap pendinginan panas (*hot refrigerant vapor*) dilepaskan dari kompresor melintasi kondensor, udara dingin mengalir melalui belitan kondensor menyerap cukup panas dari penguapan yang menyebabkan kondensasi. Jika suhu udara luar 80°C, sistem dirancang sedemikian rupa sehingga suhu pendingin, sebelah kanan titik di mana pertama kali kondensasi, akan sekitar 105°C–115°C.

Untuk mengkondensasi pada suhu yang relatif tinggi dihindaki pendingin ini, karena udara akan relatif sangat dingin terhadap suhu pelepasan penguapan. Yang mana akan mengizinkan energi panas latent dalam penguapan mentransfer melalui udara relatif dingin dan menyebabkan pendingin untuk berkondensasi. Pentransferan panas dari penguapan ke pengaliran udara adalah yang membuat tiupan udara panas keluar dari unit pengondensasi pengondisi udara. Pada tahap ini dalam rangkaian pengondisi udara dan diagram siklus, tekanan tinggi cairan pendingin akan mengalirkan di jalur cair, melalui sebuah filter pengering yang dirancang untuk melindungi kontaminasi dari aliran melalui sistem dan pada *metering device*.

Komponen 3: adalah *Metering Device*, yang dirancang untuk memelihara laju aliran pendingin ke dalam sisi rendah sistem. Jika kapasitas *metering device* yang digunakan salah, atau jika ada masalah dengannya maka kuantitas pendingin yang tidak benar akan mengalir ke penguap (*evaporator*). Ketika pendingin yang lewat melalui *metering device*, ia menurunkan tekanan dari 225 psi sampai sekitar 70 psi. Selain itu juga akan menurunkan suhu dari 110°C sampai sekitar 40°C. Kemudian akan

memulai penguapan dengan segera, kemudian mengeluarkan tembakan kedalam penguap membusa, bergelembung, dan mendidih. Perlu diingat bahwa ia ada di tekanan rendah sehingga ia hanya akan mendidih pada suhu 40°F.

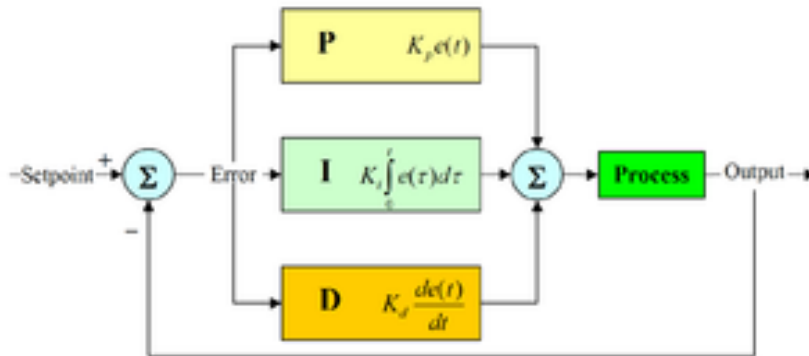
Komponen 4: adalah penguap. Udara yang relatif hangat mengalir melalui belitan penguap sekitar 80°C. Sistem Pendingin Udara dirancang sedemikian rupa sehingga pendingin akan menguapkan ke dalam penguap pada suhu sekitar 40°C, sehingga akan lebih dingin bila dibandingkan dengan udara hangat yang melaluinya. Sistem dirancang sedemikian rupa sehingga panas dalam udara hangat yang mengalir melalui penguap akan diserap oleh kedinginan penguap pendingin.

Integrasi komponen mesin pendingin: adalah merupakan realisasi modifikasi sebuah ac split berkapasitas 1 PK (lihat Gambar 4) sedemikian rupa sehingga secara teknis dapat dikontrol keluaran suhunya dengan unit pengontrol. Unit pengontrol ini bisa menentukan kestabilan keluaran suhu dengan sistem pengaturan secara perangkat lunak yang dilengkapi dengan perangkat keras yang terpadu (lihat penjelasan selengkapnya di bab berikutnya). Bentuk modifikasi ini disesuaikan dengan perancangan yang diinginkan dengan tujuan selain untuk menghasilkan suhu nominal juga suhu kestabilan ruang *chamber*.

- Pengontrol suhu ruang

*Thermostat* yang dipergunakan dalam penelitian ini berkemampuan variatif dimana secara operasional mampu mengatur sejumlah beda panas atau pendinginan yang dihasilkan oleh pemanas atau pendingin, tergantung dari perbedaan antara suhu yang diinginkan ("*setpoint*") dan suhu aktual. Proses meminimisasi *over/undershoot* ini disebut PID dan diimplementasikan dengan menggunakan Pengontrol PID (*PID Controller*).

Pengontrol PID (lihat Gambar 4) atau pengontrol *Proportional–Integral–Derivative* adalah sebuah *loop control* dari mekanisme *feedback* (pengaruh arus balik) yang umum dipergunakan dalam sistem kontrol kelas industri. Sebuah pengontrol PID menghitung nilai "kesalahan" sebagaimana terjadinya perbedaan nilai antara variabel proses terukur dan *setpoint* yang diinginkan. Pengontrol mengusahakan untuk meminimalisasi kesalahan dengan mengatur input proses kontrol. Menurut pengalaman pengontrol PID adalah yang terbaik untuk saat ini. Bagaimanapun juga performa yang paling bagus adalah pada penggunaan parameter-parameter PID didalam perhitungan harus disetel sesuai dengan sifat alami sistem (lihat Gambar 4).



Gambar 4 Diagram Blok Pengontrol PID

Hitungan pengontrol PID melibatkan tiga parameter terpisah, dan oleh karena itu terkadang disebut sebagai kontrol tiga-bentuk yaitu nilai-nilai proposional, integral dan derivatif dengan notasi masing-masing sebagai P, I, dan D. Nilai proposional menentukan reaksi kesalahan arus, nilai integral menentukan reaksi berdasarkan jumlah kesalahan-kesalahan terbaru, dan nilai derivatif menentukan reaksi berdasarkan kadar perubahan kesalahan. Bobot penjumlahan ketiga reaksi ini digunakan untuk mengatur proses melalui sebuah elemen pengontrol seperti posisi *control valve* atau suplai daya dari elemen pemanas. Secara penyelidikan mandiri, nilai ini dapat diinterpretasikan dalam bentuk waktu: P tergantung pada kesalahan terbaru (*present error*), I pada pengakumulasian kesalahan-kesalahan yang lalu (*past errors*), dan D adalah sebuah perkiraan kesalahan-kesalahan mendatang (*future errors*), berdasarkan kadar perubahan arus.

Dengan penyeteman (*tuning*) ketiga konstanta dalam algoritma pengontrol PID, pengontrol dapat menghasilkan rancangan aksi kontrol untuk keperluan proses spesifik. Respon pengontrol dapat dijelaskan dalam bentuk kemampuan respon dari pengontrol terhadap sebuah kesalahan, tingkat dimana pengontrol melakukan *overshoot setpoint* dan tingkat osilasi sistem.

- Karakteristik Pengontrol PID.

Penyensoran suhu dapat dianalogikan sebagai pelaksanaan sebuah pengukuran dari nilai proses atau variabel proses (PV). Suhu yang diinginkan disebut setpoint (SP). Inputan proses (posisi *valve*) disebut variabel termanipulasi (MV). Beda suhu pengukuran dan setpoint disebut kesalahan atau *error* (e), kuantitas tersebut berlaku untuk kondisi seberapa dingin dan panas.

Skematika pengontrol PID terbentuk setelah adanya ketiga bentuk pengoreksian diatas, yang penjumlahannya diwakilkan sebagai variabel yang termanipulasi (MV) seperti berikut:

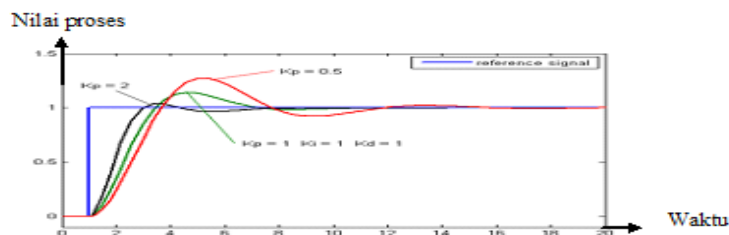
$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \dots \dots \dots (1)$$

di mana :

$P_{out}$ ,  $I_{out}$ , dan  $D_{out}$  adalah kontribusi-kontribusi output dari pengontrol PID dari masing masing seperti yang didefinisikan dalam subbab a, c, dan d berikut dibawah:

- Bentuk Proporsional ( $P_{out}$ )

Bentuk proposional (terkadang disebut *Gain*) membuat perubahan output yang proposional terhadap nilai kesalahan arus. Responsi proposional dapat diatur dengan pengalihan kesalahan sebuah konstanta  $K_p$ , yang disebut *Gain Proporsional (the proportional Gain)* (lihat Gambar 5)



Gambar 5 Diagram PV vs Waktu, untuk Tiga Nilai  $K_p$  ( $K_i$  dan  $K_d$  Dipertahankan Konstan)

Bentuk proposional diberikan oleh:

$$P_{out} = K_p e(t) \dots\dots\dots(2)$$

di mana :

$P_{out}$  adalah bentuk Proposional output

$K_p$  adalah Gain Proposional, sebuah parameter penyeteman

$e$  adalah **Error = SP – PV**

$t$  adalah waktu atau waktu ketika itu (*the present*)

Sebuah hasil *gain* proporsional yang tinggi akan menghasilkan sebuah perubahan output yang besar diberikan berupa perubahan kesalahan. Jika perubahan *gain* proposional terlalu besar bisa mengakibatkan sistem tidak stabil. Atau singkatnya, *gain* yang kecil dalam menghasilkan respon output kecil ke kesalahan input yang besar dan respon pengontrol yang rendah (*sensitive*).

- *Droop*

Kehadiran gangguan, *control* proposional murni tidak akan melakukan *setting* pada nilai targetnya, tetapi akan menguasai kesalahan *Steady State (droop)* yang sebagai fungsi dari *gain* proposional dan *gain* proses. Khususnya, jika *gain* proses–keberadaan *control long-term drift*, seperti pendinginan sebuah *furnace* menuju suhu ruang–dinasikan sebagai  $G$  dan diasumsikan Kesalahan mendekati konstan, kemudian *droop* terjadi ketika *gain* yang konstan ini sama dengan bentuk proposional output,  $P_{out}$  yang kesalahannya linier,  $G = K_p e$ , jadi  $e = G/K_p$ . Hal ini terjadi ketika bentuk proposional, yang mendorong parameter-parameter menuju *set point*, adalah benar-benar *offset* yang diakibatkan oleh *gain* proses, yang menarik

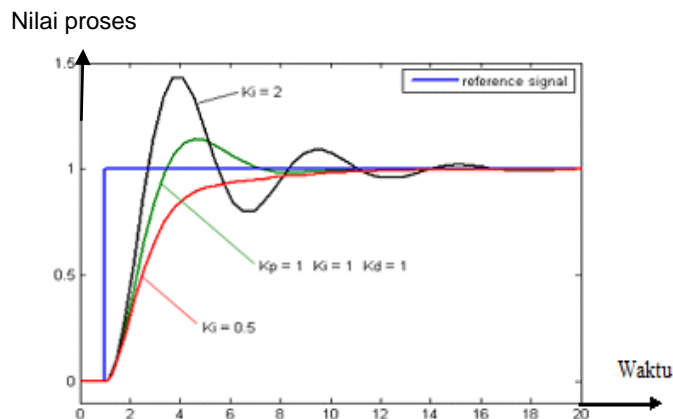
parameter parameter keluar dari *set point*. Jika *gain* proses jatuh, sebagaimana dalam pendinginan, kemudian *steady state* akan di bawah *set point*, yaitu bentuk “*droop*”.

Hanya komponen *drift (long-term average, zero-frequency component)* dari masalah masalah *gain* proses yang akan berubah setiap waktu atau keberadaan perubahan eksternal, contohnya jika suhu ruang berubah, pendinginan akan menjadi lebih cepat atau lambat. *Droop* adalah sebanding dengan *gain* proses and berbanding terbalik dengan *gain*, dan adalah sesuatu cacat yang tidak terelakkan dari kesempurnaan kontrol proposional. *Droop* dapat mereda dengan menambah bentuk *bias*. Tetapkan *setpoint* di atas nilai yang diinginkan, atau dikoreksi dengan menambah bentuk integrasi (sebuah pengontrol *PID controller*), yang secara *adaptif* menghitung *bias* dengan efektif.

Walaupun *droop*, penyeteman kedua teori secara praktis menunjukkan bentuk proposional yang harus berkontribusi cukup besar dari perubahan *output*.

- Bentuk Integral ( $I_{out}$ )

Kontribusi bentuk Integral terkadang disebut *reset* adalah proposional terhadap kedua besar kesalahan dan lama kesalahan. Penjumlahan kesalahan sesaat (*instantaneous error*) selama waktu tertentu (*integrating the error*) memberikan *offset* terakumulasi yang harus sudah dikoreksi sebelumnya. *Offset* terakumulasi ini kemudian dikalikan dengan integral *gain* dan ditambahkan ke output pengontrol. Besar pengkontribusi bentuk Integral keseluruhan aksi control ditentukan oleh integral *gain*,  $K_i$  (lihat Gambar 6).



Gambar 6 Diagram PV vs Waktu, untuk Tiga Nilai  $K_i$  (dengan  $K_p$  dan  $K_d$  Ditahan Konstan)

Bentuk integral dapat diberikan oleh,

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \dots \dots \dots (3)$$

di mana:

$I_{out}$  adalah bentuk Integral output

$K_i$  adalah Integral Gain, penyeteman parameter

$e$  adalah Kesalahan **Error = SP – PV**

$t$  adalah waktu atau waktu sesaat

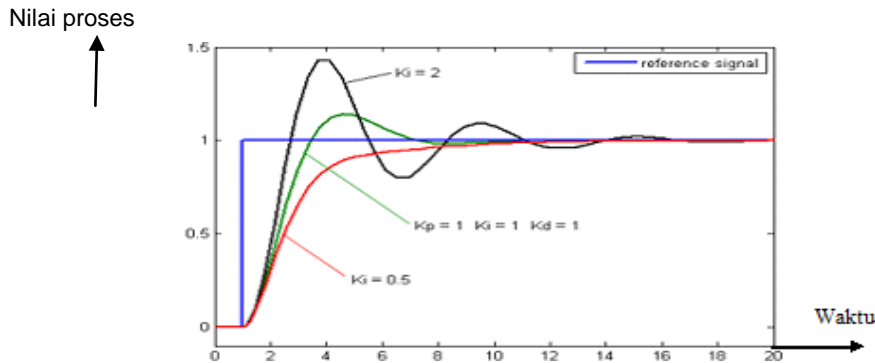
$\tau$  adalah variabel pengintergrasian palsu (*dummy*)

Bentuk integral (ketika ditambahkan ke bentuk Proposional) mempercepat pergerakan proses menuju *setpoint* dan mengeliminasi sisa

kesalahan *steady-state* yang terjadi dengan hanya proposional pengontrol. Bagaimanapun juga, semenjak bentuk Integral merespon kesalahan-kesalah terakumulasi dari masa lalu, itu dapat menyebabkan nilai terbaru meng-*overshoot* nilai *setpoint*.

- Bentuk Derivatif ( $D_{out}$ )

Kerapatan perubahan kesalahan proses dihitung dengan menentukan *slope* kesalahan setiap waktu (yang merupakan turunan pertama dengan masing masing waktunya) dan mengalikan kerapatan perubahan dengan *derivative gain*  $K_d$ . Besar pengkontribusi bentuk *derivative (rate)* ke aksi *control* secara keseluruhan dibentuk oleh *derivative gain*,  $K_d$  (lihat Gambar 7).



Gambar 7 Diagram PV vs waktu, untuk tiga nilai  $K_d$  ( $K_p$  dan  $K_i$  ditahan konstan)

Bentuk derivatif diberikan oleh:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \dots \dots \dots (4)$$

di mana:

$D_{out}$  adalah bentuk derivative output

$K_d$  adalah *derivative gain*, parameter penyeteman

$e$  adalah kesalahan **Error = SP – PV**

$t$  adalah waktu atau waktu sesaat

Bentuk *derivative* memperlambat kerapatan perubahan output pengontrol dan penyebab ini dipastikan mendekati *setpoint* pengontrol. Dari sini, *control derivative* digunakan untuk mengurangi besar *overshoot* yang diproduksi oleh komponen integral dan memperbaiki kombinasi stabilitas pengontrol proses. Bagaimanapun, penderferensialan sinyal memperkuat gangguan (*noise*) dan dengan demikian bentuk dalam pengontrol ini sangat tinggi akan *sensitivity to noise* dalam bentuk kesalahan dan dapat menyebabkan

sebuah proses menjadi tidak stabil jika *noise* dan *gain derivative*-nya cukup besar. Sebagai pendekatan ke pendiferensial digunakan sebuah pembatasan *bandwidth* melalui rangkaian *phase-lead compensator*.

- Integrasi Sistem Kontrol Suhu

Dari penjelasan di atas, mengenai bentuk-bentuk proposional, integral, dan *derivative* dijumlahkan untuk menghitung output pengontrol PID. Jika output pengontrol didefinisikan sebagai  $u(t)$ , bentuk akhir dari algoritma PID adalah:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \dots \dots \dots (5)$$

di mana parameter-parameter penyetalanya adalah:

**Proportional gain,  $K_p$**

Nilai semakin besar secara tipikal mengartikan respon lebih cepat selama kesalahan membesar, semakin besar pula pengkompensasian bentuk proposional. *Gain* proposional yang berlebihan akan memandu proses tidak stabil dan osilasi.



**Integral gain,  $K_i$** 

Nilai semakin besar menyebabkan kesalahan *steady state* tereliminasi secara cepat. *Trade-off* (menjual) membesar dari *overshoot*: jika ada kesalahan negatif terintegral selama respon transien harus terintegrasi dibuang oleh kesalahan positif sebelum mencapai *steady state*.

**Derivative gain,  $K_d$** 

Nilai membesar mengurangi *overshoot*, tetapi memperlambat respons transien dan memungkinkan untuk memandu ketidakstabilan di penguatan *noise* sinyal dalam pendiferensialan kesalahan.

- *Software loop* umum dengan implementasi algoritma PID *algorithm* dalam bentuk nya yang 'ideal dan parallel'
- ```

previous_error = 0
integral = 0
start:
error = setpoint - actual_position
integral = integral + (error*dt)
derivative = (error - previous_error)/dt
output = (Kp*error) + (Ki*integral) + (Kd*derivative)
previous_error = error
wait(dt)
goto start

```

Fungsi fungsi pengontrol suhu yang berbasis PID tersebut dapat direalisasikan secara perangkat keras dengan rangkaian komponen seperti terlihat dalam Gambar 8.

**3.2. Perancangan Ruang *Chamber***

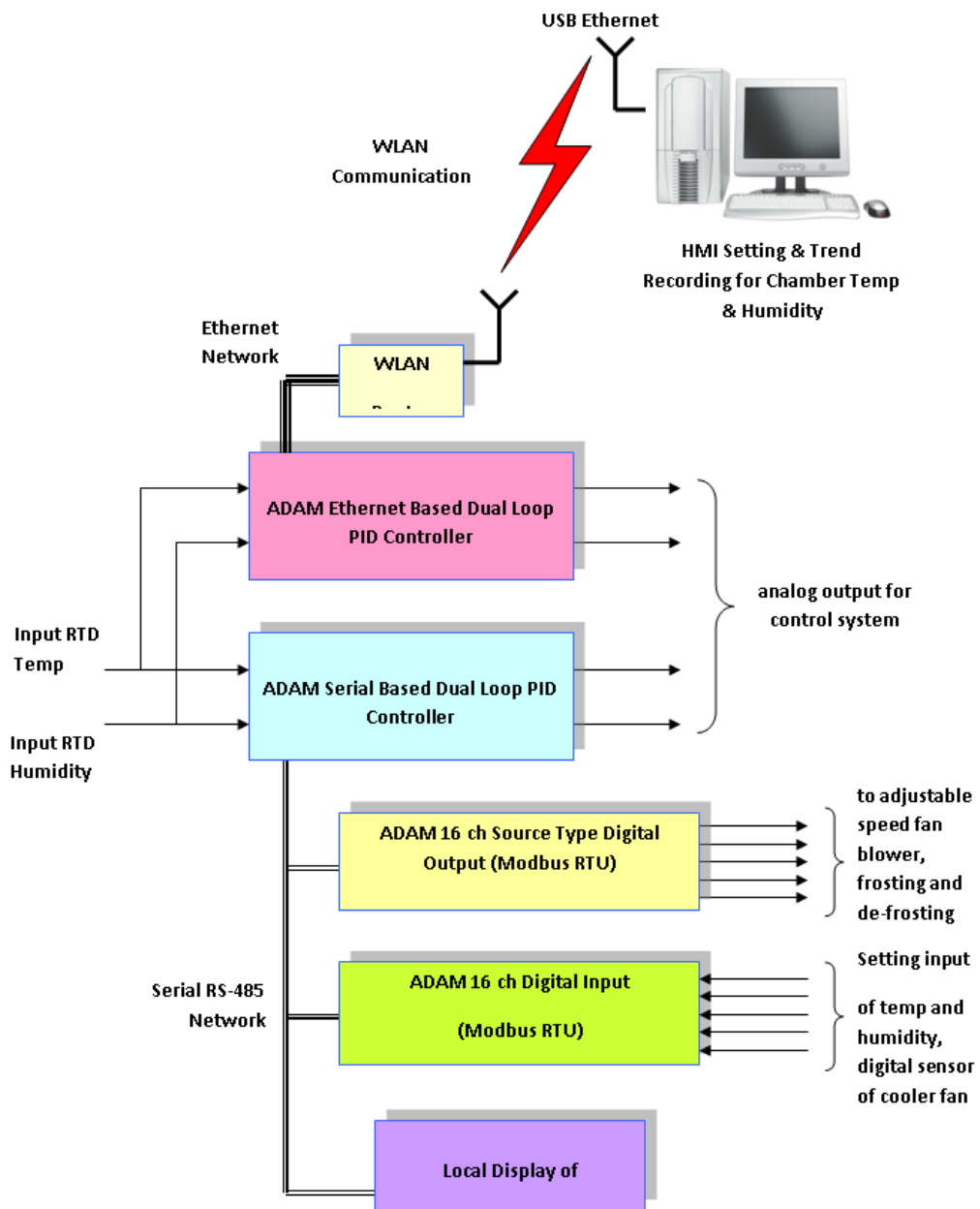
Secara fungsional ruang *chamber* ini terdiri terdiri dari dua bagian utama yaitu ruang yang terkontrol di mana tata letak peralatan standar berada dan ruang yang mengontrol di mana sistem pengontrol suhu berada. Luas ruang yang terkontrol ditentukan berdasarkan spesifikasi ruang yang diperlukan oleh peralatan standar. Sedangkan luas ruang pengontrol ditentukan berdasarkan besar mesin pendingin dan unit

pengontrol elektronik. Kedua ruang ini dibatasi oleh partisi yang kedap udara dan difasilitasi dengan dua lubang (bagian atas dan bagian bawah) yang secara fungsional sebagai inlet dan outlet udara pengontrolan.

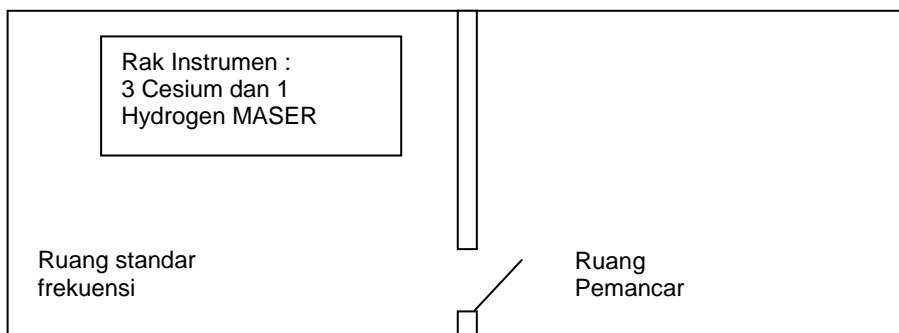
Dengan mengukur (mendeteksi) proses perubahan suhu ruang *chamber* yang didalamnya terdiri dari peralatan–peralatan standar frekuensi dan pergerakan energi panas yang masuk melalui *inlet* dan keluar melalui *outlet* ruangan akan dapat diatur untuk mencapai suatu nilai suhu merata yang diinginkan. Nilai merata suhu yang diinginkan ini dapat dicapai melalui suatu proses teknis yang disebut sebuah siklus kontrol tertutup (*a closed control loop*). Siklus kontrol tertutup ini secara konstan dapat mengakses aliran suhu ruang dan mengontrol pemanas dan/atau mesin pendingin untuk menambah atau mengurangi suhu sesuai dengan penetapan (*setting*) pengguna. Sehingga mampu mengontrol kestabilan suhu ruang mencapai  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Untuk sebuah thermostat sederhana hanya mengkontak pemanas atau mesin pendingin dengan ON atau OFF, dan sementara itu kondisi *overshoot* dan *undershoot* dari merata suhu yang diinginkan harus diperoleh. Pada penelitian ini akan dipergunakan sebuah thermostat yang memiliki kemampuan bervariasi sehingga akan diperoleh beberapa titik pengontrolan pemanasan atau pendinginan tergantung dari beda antara suhu yang diinginkan (*setpoint*) dan suhu sebenarnya (*actual*). Hal ini dilakukan untuk meminimisasi *over* atau *undershoot* dan secara proses disebut PID yang diimplementasikan dengan menggunakan pengontrol PID.

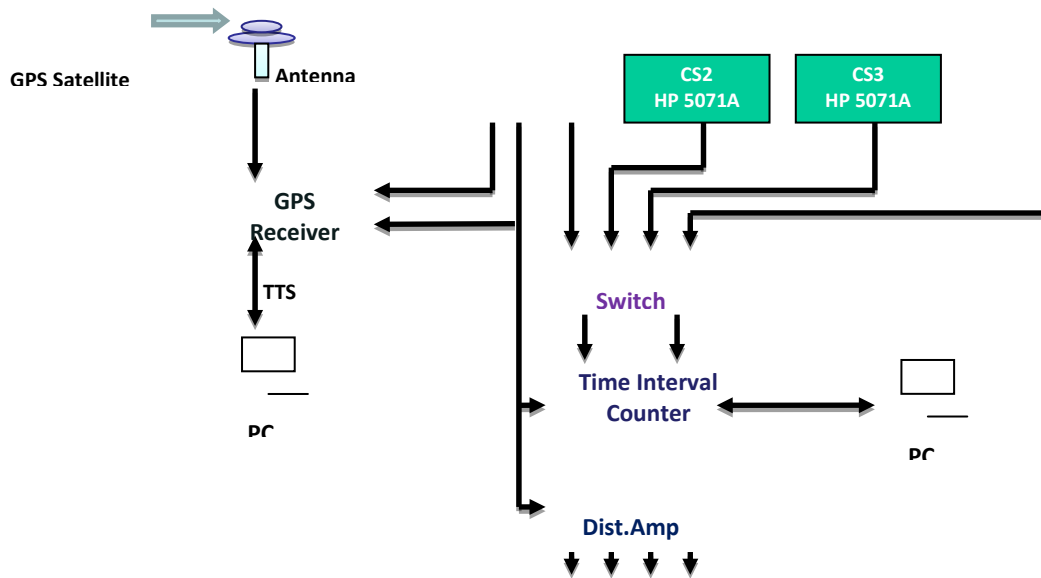
Suhu udara akan bertambah ketika energi panas bergerak kedalamnya, penambahan merata energi kinetik atas atomnya, seperti benda dan udara dalam sebuah ruangan. Energi panas yang meninggalkan suatu benda atau udara menurunkan suhunya. Dari rancangan tersebut dapat direalisasikan secara nyata berdasarkan bagan ruangan (lihat Gambar 9 dan 11) dan bagan posisi sistem standar frekuensi (lihat Gambar 10 dan 12).



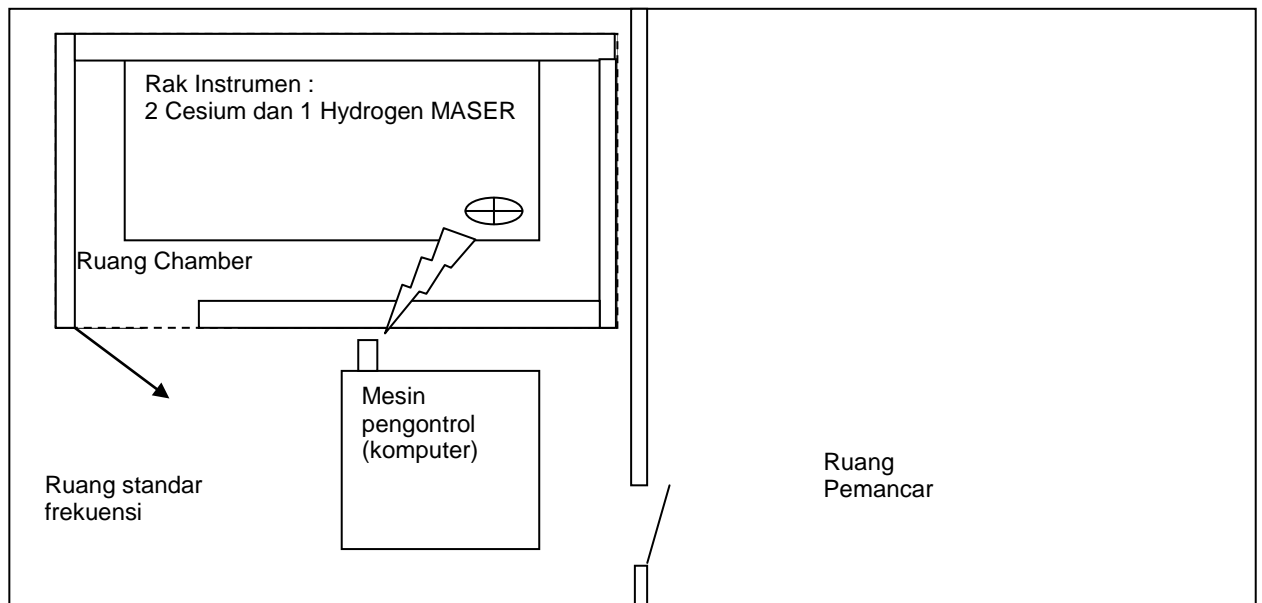
Gambar 8 Skema Realisasi Sistem Kontrol Temperatur dan Kelembaban Chamber



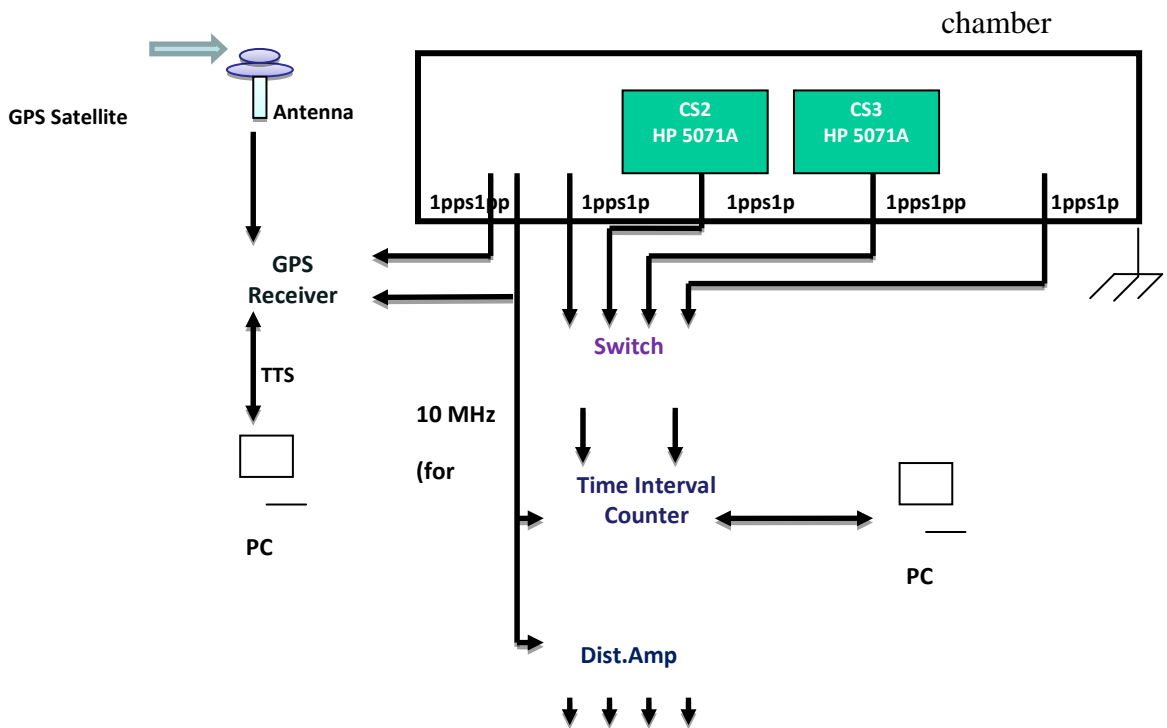
Gambar 9 Skematika Ruang Standar Frekuensi Sebelum Perancangan



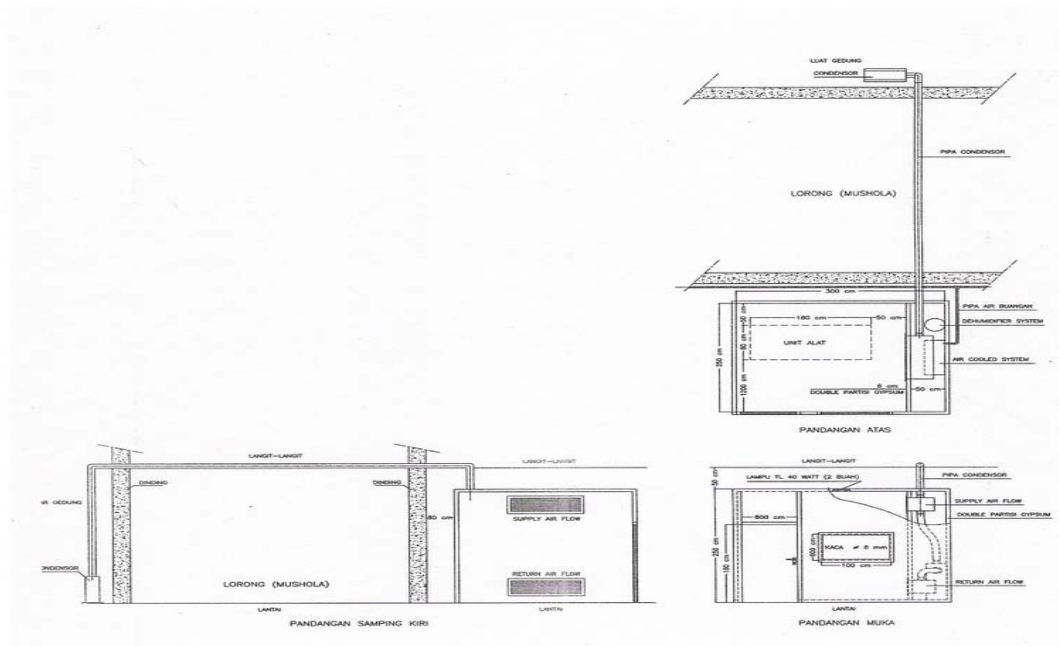
Gambar 10 Pengukuran Frekuensi Standar sebelum Menggunakan *Chamber*



Gambar 11 Skematika Perancangan Ruang Standar Frekuensi



Gambar 12 Pengukuran Frekuensi Standar dengan Menggunakan Chamber



Gambar 13 Print Biru Ruang Standar Frekuensi dengan Suhu Terkondisi



Gambar 14 Realisasi Ruang *Chamber* Standar Frekuensi

Pengaturan suhu udara *chamber* dapat dipenuhi dengan kapasitas mesin pendingin yang minimum sesuai dengan luas ruang berdasarkan rumusan berikut,

$$\text{Kebutuhan BTU} = \frac{(L \times W \times H \times I \times E)}{60} \dots\dots\dots(6)$$

di mana:

L = panjang ruang (dalam ft)

W = lebar ruang (dalam ft)

I = nilai 10 jika ruang berinsulasi (berada di lantai bawah, atau berhimpit dengan ruang lain). Nilai 18 jika ruang tidak berinsulasi (di lantai atas).

H = tinggi ruang (dalam ft)

E = Nilai 16 jika dinding terpanjang menghadap utara; nilai 17 jika menghadap timur; Nilai 18 jika menghadap selatan; dan nilai 20 jika menghadap barat.

1 m = 3,28 ft

Kapasitas AC berdasarkan PK:

AC ½ PK = ± 5.000 BTU/h

AC ¾ PK = ± 7.000 BTU/h

AC 1 PK = ± 9.000 BTU/h

AC 1½ PK = ±12.000 BTU/h

AC 2 PK = ±18.000 BTU/h

Karena ruang *chamber* dirancang dengan lebar = 2,50 m, panjang = 2,50 m dan tinggi 2,00 m maka berarti harus disediakan mesin pendingin berkapasitas 1.764 BTU/h (½ PK).

#### 4. PENETAPAN SUHU RUANG BERBASIS KARAKTERISASI STANDAR FREKUENSI

Frekuensi standar nasional Puslit KIM-LIPI diwakili oleh sebuah nilai rerata yang

dibangkitkan dari 4 buah sumber pembangkit frekuensi cesium dan sebuah *Hydrogen Maser*. Nilai standar ini diperoleh berdasarkan sebuah proses komparasi anggota komite dibawah koordinasi sebuah lembaga metrologi internasional yang disebut *Bureau International Des Poids Measures* (BIPM). Proses komparasi ini dilakukan secara remote dalam interval waktu tertentu dari masing masing sistem pengukuran yang bersifat otomatis. Secara teknis operasionalnya sinkronisasi berbasis komparasi ini dapat dinyatakan sebagai sebuah pemaduan standar waktu sebuah Sistem Penempatan Global (*Global positioning System* frekuensi alamiah atau GPS).

Standar frekuensi cesium atau *Natural-frequency Atomic Frequency Standard* (NAFS) ini pada dasarnya dioperasikan pada frekuensi resonan alamiahnya dalam rangka membangkitkan sinyal frekuensi alamiahnya. Secara sistem unit standar ini terdiri dari sebuah unit frekuensi *synthesizer* (*Frequency Synthesizer Unit*) dan unit mikroprosesor data (Microprocessor Data Unit atau MDU) yang dipadukan dan dikemas kedalam sebuah unit yang terintegral terlindung dari pulsa elektromagnetik. Kelihatan dari pemaduan NAFS, FSUs, dan MDUs ini dipergunakan untuk memperbaiki keandalan dan pemeliharaan unit di *on-line* maupun di *standby*. Detakan pewaktu (*dithered clock*) sinyal frekuensi yang dibangkitkan oleh FSU sesuai dengan detakan algoritma yang dilakukan oleh MDU, dan MDU membangkitkan pengkode (*encode*) data pewaktu dengan menggunakan detakan pewaktu sinyal frekuensi.

Pengukuran frekuensi untuk memperoleh ketelitian pembangkitan frekuensi, kadangkala disebut sebagai ketelitian pewaktu (*timing*

accuracy) dan diberikan dalam ppm (*parts per million*) dari *sample rate* dan dapat ditemukan di *manual* pada umumnya. Biasanya ketika permasalahannya tentang akurasi frekuensi ( $f_a$ ) yang hendak diketahui sebenarnya adalah *frequency error* ( $f_e$ ).

Bentuk persamaan umumnya diberikan sebagai,

$$f_m = f_s \pm f_e = \frac{f_s}{1 \pm f_a} \quad (7)$$

di mana,

$f_m$  adalah frekuensi terukur

$f_s$  adalah frekuensi sinyal, dan

$f_e$  adalah frekuensi error

Sehingga persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi,

$$f_e = f_s \left( \frac{\mp f_a}{1 \pm f_a} \right) \approx f_s \cdot f_a \quad (8)$$

di mana,

$f_a$  adalah akurasi frekuensi.

Sesuai dengan pengajuan interval waktu pengukuran tertentu yang dilakukan oleh Sub. Divisi Laboratorium Kelistrikan maka hasil analisa data pengukuran dari BIPM dapat diperoleh seperti terlihat dalam Tabel 1. Data hasil pengukuran ini diperoleh berdasarkan pengamatan kondisi suhu ruang tertentu yang bervariasi seperti terlihat dalam Tabel 2.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Frekuensi Standar Puslit KIM – LIPI Yang Diambil Dari Publikasi *Circular-T* BIPM berdasarkan Frekuensi TAI & UTC & Kesalahan Interval ke SI

| Periode Pengukuran (Modified Julian Date) | Kesalahan Frekuensi Relatif ( $\times 10^{-15}$ Hz/Hz) | Waktu Pengukuran            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 55224-55254                               | 4,6                                                    | (2010 JAN 28 - 2010 FEB 27) |
| 55254-55284                               | 4,9                                                    | (2010 FEB 27 - 2010 MAR 29) |
| 55284-55314                               | 5,2                                                    | (2010 MAR 29 - 2010 APR 28) |
| 55314-55344                               | 5,2                                                    | (2010 APR 28 - 2010 MAY 28) |
| 55344-55374                               | 6,8                                                    | (2010 MAY 28 - 2010 JUN 27) |
| 55374-55404                               | 4,8                                                    | (2010 JUN 27 - 2010 JUL 27) |
| 55404-55439                               | 5,2                                                    | (2010 JUL 27 - 2010 AUG 31) |
| 55439-55469                               | 5,6                                                    | (2010 AUG 31 - 2010 SEP 30) |

Tabel 2 Kondisi Suhu Ruang Standar Frekuensi Cesium Puslit KIM – LIPI

| MJD                                                  | 55224 | 55254 | 55284 | 55314 | 55344 | 55374 | 55404 | 55439 |
|------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pengukuran suhu dilakukan setiap jam dalam satuan °C | 21    | 20,6  | 21,2  | 21,8  | 20,1  | 22,1  | 23,9  | 24,9  |
|                                                      | 20,8  | 20,8  | 21,1  | 21,8  | 20,2  | 22,2  | 23,8  | 24,7  |
|                                                      | 21    | 20,8  | 21,2  | 21,8  | 20,1  | 22,3  | 23,8  | 24,7  |
|                                                      | 21,1  | 21    | 21,2  | 22,1  | 20,4  | 22,5  | 23,9  | 25,1  |
|                                                      | 21,3  | 21,3  | 21,3  | 22,4  | 20,3  | 22,7  | 24    | 25,4  |
|                                                      | 21,5  | 21,7  | 21,6  | 23    | 20,6  | 22,9  | 24,5  | 25,5  |
|                                                      | 22,4  | 22    | 22    | 23,1  | 20,6  | 23,2  | 24,8  | 25,8  |
|                                                      | 23    | 22,5  | 22,4  | 23,4  | 20,8  | 23,4  | 24,7  | 25,9  |
|                                                      | 22,9  | 22,9  | 22,4  | 23,6  | 21    | 23,6  | 24,7  | 26,3  |
|                                                      | 22,5  | 23,1  | 22,2  | 23,4  | 21    | 23,7  | 24,9  | 26,3  |
|                                                      | 22,3  | 22,7  | 21,9  | 23,5  | 21,3  | 23,7  | 24,3  | 26,1  |
|                                                      | 22,1  | 22,5  | 21,7  | 23,5  | 21,2  | 23,7  | 24    | 26,2  |
|                                                      | 22,1  | 22,3  | 21,6  | 23,5  | 21,1  | 23,7  | 23,8  | 26,1  |
|                                                      | 22    | 22    | 21,6  | 23,4  | 21    | 23,6  | 23,7  | 26,1  |
|                                                      | 21,9  | 22    | 21,4  | 23,4  | 21,1  | 23,6  | 23,5  | 25,7  |
|                                                      | 21,9  | 21,9  | 21,4  | 23,1  | 20,7  | 23,4  | 23,3  | 25,9  |
|                                                      | 21,9  | 21,9  | 21,4  | 22,9  | 21    | 23,4  | 23,1  | 25,9  |
|                                                      | 21,8  | 21,7  | 21,2  | 22,6  | 20,8  | 23,4  | 23    | 25,6  |

| MJD         | 55224 | 55254 | 55284 | 55314 | 55344 | 55374 | 55404 | 55439 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 21,8  | 21,6  | 21,1  | 22,3  | 20,6  | 23,1  | 22,9  | 25,5  |
|             | 21,7  | 21,6  | 21,1  | 22,2  | 20,5  | 23,2  | 22,8  | 25,5  |
|             | 21,6  | 21,4  | 21,1  | 22,1  | 20,6  | 23    | 22,7  | 25,3  |
|             | 21,6  | 21,3  | 21    | 21,8  | 20,5  | 22,9  | 22,6  | 25,3  |
|             | 21,5  | 21,3  | 20,9  | 21,8  | 20,6  | 22,9  | 22,5  | 25,2  |
|             |       | 21,2  | 20,8  | 21,9  | 20,3  |       | 22,5  |       |
| Suhu Rerata | 21,8  | 21,8  | 21,5  | 22,7  | 20,7  | 23,1  | 23,7  | 25,6  |

Catatan : MJD = Modified Julian Date

Kestabilan Frekuensi standar terhadap kondisi suhu ruang dapat diperoleh dengan cara memperhatikan perubahan nilai kesalahan frekuensi (Tabel 1) pada tingkat perubahan

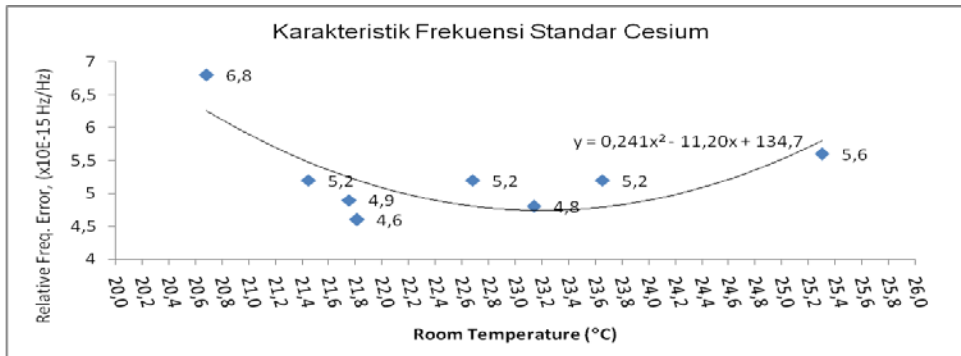
kondisi suhu ruang yang terjadi (Tabel 2), sebagai berikut (Tabel 3).

Tabel 3 Karakteristik Kestabilan Frekuensi vs Suhu Ruang

| Date       | Modified Julian Date (MJD) | Stabilitas Frekuensi ( $\times 10^{-15}$ Hz/Hz) | Ketidakpastian Pengukuran $u_A$ (ns) | Suhu Ruang ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------|----------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 28/01/2010 | 55224                      | 4,6                                             | 3,0                                  | 21,8                              |
| 27/02/2010 | 55254                      | 4,9                                             | 3,0                                  | 21,8                              |
| 29/03/2010 | 55284                      | 5,2                                             | 3,0                                  | 21,5                              |
| 28/04/2010 | 55314                      | 5,2                                             | 3,0                                  | 22,7                              |
| 28/05/2010 | 55344                      | 6,8                                             | 3,0                                  | 20,7                              |
| 27/06/2010 | 55374                      | 4,8                                             | 3,0                                  | 23,1                              |
| 27/07/2010 | 55404                      | 5,2                                             | 3,0                                  | 23,7                              |
| 31/08/2010 | 55439                      | 5,6                                             | 3,0                                  | 25,3                              |

Karakteristik kestabilan frekuensi terhadap perubahan suhu ruang dapat divisualisasikan kedalam bentuk sebuah grafik sebaran data kemudian diestimasi kedalam bentuk garis berbasis persamaan *polynomial* sehingga dapat menghasilkan sebuah ketetapan suhu yang paling efektif untuk sistem pengukuran ini (lihat Grafik 1). Secara limitasi, penetapan kestabilan suhu ruang dapat dilakukan dengan proses penarikan 3 garis vertikal sehingga secara kuantitatif penetapan spesifikasi nilai suhu ruang *chamber* untuk frekuensi standar cesium adalah optimum. Masing-masing garis tersebut difungsikan sebagai sebuah titik nominal suhu ruang dan sepasang titik kestabilan suhu ruang. Dari hasil pengamatan data pengukuran ternyata

menghasilkan sebuah bentuk grafik ini yang dapat dipergunakan sebagai nilai ketetapan bahwa kondisi suhu ruang *chamber* secara nominal harus diatur sebesar  $23,2^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan batas kestabilan suhu ruang dapat dipenuhi berdasarkan spesifikasi teknis perancangan yang direalisasikan dengan sebuah ruang *chamber* (sesuai dengan penjelasan pada bab sebelumnya) yaitu sebesar  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  menunjukkan limitasi nilai suhu berada diantara  $22,2^{\circ}\text{C}$  dan  $24,2^{\circ}\text{C}$ . Pembuktian empiris dari pengaruh perubahan suhu terhadap stabilitas frekuensi standar dalam sistem pengukuran ini dapat ditelusuri berdasarkan spesifikasi panas material Cesium.



Gambar 15 Kestabilan Frekuensi Standar Puslit KIM – LIPI vs Perubahan Suhu Ruang

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil analisa yang telah diuraikan diatas, dapat disimpulkan bahwa pembangunan berupa ruang *chamber* untuk standar frekuensi berbasis cesium dan *Hydrogen Maser* wajib direalisasikan mengingat kondisi suhu ruang yang sudah ada kini bersifat terpusat (*central air conditioner*). Tim peneliti mengucapkan terimakasih atas dukungan penuh dari pihak manajemen Puslit. KIM–LIPI dan jajarannya sehingga kegiatan penelitian ini dapat diselesaikan melalui sebuah program DIKTI 2010. Karakterisasi frekuensi standar berbasis cesium telah dilakukan pada ruang waktu dari bulan Januari sampai dengan September 2010 melalui proses komparasi antar beberapa negara anggota komite waktu & frekuensi dibawah koordinasi BIPM. Optimalisasi kestabilan frekuensi standar ini dapat diperoleh berdasarkan kesalahan frekuensi sebesar  $4,8 \times 10^{-13}$  Hz/Hz dengan ketelitian 3,0 ns pada kestabilan suhu ruang *chamber* sebesar  $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. *Operating and Programming Manual HP 5071A Primary Frequency Standard*.
- Anonim. *Instruction Manual Hydrogen Maser OSA 3500*.
- Araki, M. *Control Systems, Robotics and Automation*. Vol. II ,PID Control. Kyoto University. Japan.
- D. C. McCollum, Jr., Silsbee, Henry,. (1962). *Specific Heats of Rubidium and Cesium between 1.3 and 12°K*. Phys. Rev. 127, 119–120.
- Galison, Peter. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*. New York: W.W. Norton & Company.
- Liang, Y.L. (2009). *Controlling Fuel Annealer Using Computational Verb PID Controllers*". *Proceedings of the 3rd International Conference on Anti-Counterfeiting, Security, and Identification in Communication (IEEE)*: 417–420
- Yang, T. (2005). *Architectures of Computational Verb Controllers: Towards a New Paradigm of Intelligent Control*, *International Journal of Computational Cognition* 3 (2): 74–101.