

# SIMULASI PERHITUNGAN NILAI KETIDAKPASTIAN SPESIFIK IMPULS ROKET RX 150 L1000 STANDAR

**Amor Dewanto**

Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN  
are\_more01@yahoo.com

## ABSTRACT

More accurate method to forecast the uncertainty of experimental product have been tested to calculate from specific impuls of RX-150 L1000 Standard. Based on the uncertainty value of 0.0178% from combining several factors such as uncertainty value in thrust, weight of propellant and burning time for during the static test. In several factors of thrust, burning time, and weight of propellant also contain the uncertainty that were ignored in order to simplify calculation.

## ABSTRAK

Suatu metode yang lebih seksama untuk menaksir ketidakpastian hasil-hasil eksperimen telah dicoba untuk menghitung nilai spesifik impuls roket jenis RX-150 L1000 Standar. Didasarkan atas sebuah asumsi bahwa nilai ketidakpastian pada spesifik impuls sebesar 0.0178% merupakan hasil gabungan di antara beberapa faktor penentu ketidakpastian yang berasal dari besar gaya dorong, berat propelan dan waktu bakar yang terjadi sesaat setelah pengujian statik berlangsung. Dari beberapa faktor itu masih mengandung unsur-unsur ketidakpastian yang mempengaruhi besar gaya dorong, berat propelan dan waktu bakar yang diabaikan besarnya untuk mempermudah perhitungannya.

Kata kunci: *Nilai ketidakpastian, Spesifik impuls, Gaya dorong, Berat propelan dan waktu bakar*

## 1 PENDAHULUAN

Untuk mengetahui kinerja motor roket pada saat ini masih memberikan hasil berupa pengukuran gaya dorong dan tekanan ruang bakar. Salah satu data yang dihasilkan dari pengukuran itu adalah Spesifik Impuls yang menentukan kinerja suatu roket. Untuk mencari nilai spesifik impuls dapat dinyatakan dengan perbandingan integrasi dari nilai gaya dorong dan berat propelan dikalikan dengan waktu bakar. Pada pengujian statik roket, nilai spesifik impuls dapat langsung terbaca sesaat setelah roket selesai diujistatikkan yaitu dengan keluarnya beberapa parameter yang mendukung perhitungan spesifik impuls seperti gaya dorong rerata, waktu bakar efektif dan tekanan ruang bakar pada layar komputer. Perolehan data spesifik impuls saat uji statik didapatkan melalui hubungan sensor-sensor dengan

beberapa alat penguat sinyal termasuk komputer. Sensor-sensor itu adalah sensor gaya dorong (*loadcell*) dan sensor tekanan ruang bakar (*pressure transducer*) yang mempunyai spesifikasi tertentu yang memungkinkan terjadinya ketidakpastian pengukuran. Apakah sensor masih mempunyai kualitas sensitivitas yang baik, dan kemudian diperiksa tentang konversinya, penguatannya, semua itu tidak terlepas dari sistem kalibrasi yang akan menentukan layak tidaknya sensor digunakan, karena hal ini akan mempengaruhi sistem perolehan data yang melibatkan ketidakpastian pengukuran. Dalam sistem pengukuran, pencatat data digital (*digital scale*), sistem pengkabelan, dan sensor sangat mendukung satu sama lainnya.

Diperlukan suatu analisa ketidakpastian dalam mengukur setiap instrumen

yang akan digunakan. Hal ini sangat perlu dilakukan mengingat dalam setiap pengukuran di bidang teknologi selalu melibatkan ketidakpastian pengukuran hasil. Ditinjau dari bahasan dasar itu maka sebuah alat perlu diperhatikan akurasi dan sensitivitasnya. Sensitivitas merupakan karakteristik yang bersifat elementer dan akurasi adalah karakteristik gabungan antara sifat elementer, rekayasa, dan *back up* rangkaian yaitu di dalamnya tentang kualitas penguatan, transmisi, data akuisisi, analisa galat (*error*), serta kemungkinan penggunaan sensor jamak (Lawrence A. Klein, 1993).

Masalah yang timbul saat ini berkaitan dengan nilai ketidakpastian yang mempengaruhi hasil pengukuran yang berasal dari peralatan-peralatan pengukur itu. Dengan mengumpulkan beberapa peralatan yang akan dipakai maka satu persatu peralatan itu dapat dianalisis ketidakpastiannya terhadap peralatan lainnya yang berkontribusi terhadap hasil pengukuran. Pada Instalasi Uji Statik Wahana beberapa peralatan sudah lama tidak dikalibrasi oleh pihak terkait sehingga perlu dilakukan kalibrasi ulang.

Solusi dan hasil yang diharapkan adalah diperlukannya suatu peralatan yang terakurasi dengan kegiatan kalibrasi yang benar sehingga hasil nilai ketidakpastian yang mempengaruhi pengukuran dapat dipertanggung-jawabkan.

## 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 Sistem Pengukuran

Kebanyakan sistem pengukuran terdiri atas tiga bagian (J.P Holman, Jasjfi, E., Ir., M.Sc., 1985):

- Tahap detektor – transduser, yang mendeteksi besaran fisika dan melakukan transformasi secara mekanik atau listrik untuk mengubah sinyal (isyarat) menjadi bentuk yang lebih berguna. Secara umum, transduser itu adalah piranti yang dapat mentransformasikan suatu efek fisika menjadi efek fisika

lain. Namun, dalam banyak hal, variabel fisika itu ditransformasikan menjadi sinyal listrik karena dalam bentuk sinyal inilah sinyal itu mudah diukur,

- Tahap antara, yang mengubah sinyal langsung dengan penguatan, penyaringan, atau cara-cara lain, agar didapatkan keluaran yang dikehendaki,
- Tahap akhir atau penutup, yang berfungsi menunjukkan, merekam, dan mengendalikan variabel yang diukur.

Pengukuran adalah hal yang relatif, baik secara teknis maupun non teknis. Pengukuran memerlukan informasi pendukung agar hasil yang tercantum dapat dipertanggungjawabkan. Analisa tentang keadaan, analisa lingkungan parameter yang terukur, analisa data, keakuratan, keabsahan, dan analisa galat (*error*) perlu menyertai hasil suatu pengukuran. Dari segi kualitas suatu pengukuran, banyak hal yang harus diperhatikan, seperti kesalahan pembacaan, analisa galat, dan sejauh mana kalibrasi dilakukan. Dalam pengukuran dikenal 2 jenis kesalahan yaitu rambang (*random error*) dan sistematis (*systematic error*). Kesalahan sistematis menyebabkan pembacaan berulang-ulang mengandung kesalahan yang besarnya hampir sama dan disebabkan oleh pemakaian alat secara terus menerus, sehingga menjadi bergeser pada titik awalnya atau kalibrasinya bergeser. Kesalahan rambang terjadi karena fluktuasi elektronik rambang pada peralatan instrumen yang tidak selalu konstan keadaannya.

### 2.2 Evaluasi Ketidakpastian Untuk Data Pengukuran

Dalam sistem pengujian statik roket yang dilaksanakan oleh instalasi uji statik, seluruh data yang diolah komputer merupakan hasil pengukuran langsung dari komponen-komponen gaya dorong, waktu bakar, dan tekanan ruang bakar. Diperlukan reduksi data karena merupakan hal yang rumit dan biasanya dikerjakan dengan komputer yang

mempunyai program khusus misalnya menggunakan Matlab. Dengan sedikit penyesuaian program itu dapat digunakan untuk menghitung ketidakpastian tanpa harus melakukan penentuan analitik dari turunan parsialnya. Ada beberapa komponen pengukuran yang dilakukan dimana ketidakpastian masing-masing pengukuran dapat dinyatakan dengan nilai kemungkinan yang sama. Jika pada data hasil pengukuran uji statik terdapat variabel bebas (*independent*) maka terdapat nilai  $Y$  yang merupakan suatu fungsi dari seperangkat variabel bebas dari  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

$$Y = Y(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2-1)$$

terdapat ketidakpastian hasil dari nilai fungsi  $Y$  yaitu  $U_Y$  dengan ketidakpastian variabel bebasnya adalah  $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ .

Nilai ketidakpastian impuls spesifik dihasilkan dari kombinasi berbagai faktor yaitu: pengukuran gaya dorong rerata ( $u_{\bar{F}}$ ), waktu bakar aksi ( $u_{t_b}$ ), dan berat propelan ( $u_{W_p}$ ). Ketiga faktor itu dikombinasikan secara RSS (Root Sum Square) berbentuk:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (c_i u_i)^2} \quad (2-2)$$

dengan  $c_1 \dots c_3$  adalah koefisien sensitivitas  $\left(\frac{\partial Y}{\partial x_n}\right)$  dari masing-masing faktor. Sehingga

ketidakpastian dalam pengukuran mempunyai persamaan:

$$U_Y = \left[ \left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2} u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n} u_n\right)^2 \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

dimisalkan seperangkat variabel dari data hasil uji statik diubah ke dalam bentuk  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  maka didapatkan nilai:

$$\begin{aligned} Y(x_1) &= Y(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ Y(x_1 + \Delta x_1) &= Y(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n) \\ Y(x_2) &= Y(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ Y(x_2 + \Delta x_2) &= Y(x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (2-4)$$

untuk nilai  $\Delta x$  yang cukup kecil derivatif parsialnya dapat didekati dengan

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial x_1} &\cong \frac{Y(x_1 + \Delta x_1) - Y(x_1)}{\Delta x_1} \\ \frac{\partial Y}{\partial x_2} &\cong \frac{Y(x_2 + \Delta x_2) - Y(x_2)}{\Delta x_2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

dan nilai ini dapat dimasukkan ke dalam persamaan (2-3) untuk menghitung ketidakpastian hasil.

### 3 METODOLOGI

Prosedur untuk menghitung ketidakpastian hasil nilai impuls spesifik didasarkan atas lima butir sebagai berikut (*Thomas M. Kegel, 1996*):

- Persamaan impuls spesifik yang akan direduksi datanya dijabarkan terhadap fungsi gaya dorong rerata, waktu bakar aksi, dan berat propelan yaitu  $I_{sp} = I_{sp}(\bar{F}, t_b, W_p)$ ,
- Memilih komponen-komponen yang akan dimasukkan ke dalam persamaan reduksi data yang mempunyai hubungan ketidakpastian,
- Menentukan koefisien sensitivitas dari setiap komponen,  $\frac{\partial I_{sp}}{\partial x_n}$  pada butir 2,
- Menghitung nilai numerik dari ketidakpastian dari setiap komponen pada butir 2,
- Menghitung kombinasi atau gabungan nilai numerik yang terdapat pada butir 4 untuk memperoleh nilai numerik dari ketidakpastian.

Pengukuran ketidakpastian dari nilai spesifik impuls didasarkan pada variabel-variabel spesifik impuls ( $I_{sp}$ ) sebagai variabel tak bebas, gaya dorong rerata ( $\bar{F}$ ), waktu bakar aksi ( $t_b$ ), dan berat propelan ( $W_p$ ) masing-masing sebagai variabel bebas. Adapun rumusan dari spesifik impuls adalah:

$$I_{sp} = \frac{\bar{F}}{W_p} t_b \quad (3-1)$$

dari persamaan spesifik impuls (3-1) masing-masing komponen diturunkan secara parsial maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\frac{\partial I_{sp}}{\partial \bar{F}} = \frac{t_b}{W_p}, \quad \frac{\partial I_{sp}}{\partial t_b} = \frac{\bar{F}}{W_p}, \quad \frac{\partial I_{sp}}{\partial W_p} = -\frac{\bar{F}}{W_p^2} t_b \quad (3-2)$$

sesuai persamaan (3-2) di atas diperoleh persamaan turunan parsial dari spesifik impuls terhadap gaya dorong merata, waktu bakar aksi, dan berat propelan. Hasil turunan parsialnya masing-masing disubstitusikan ke dalam persamaan (2-2) didapat hasil sebagai berikut:

$$U_{I_{sp}} = \left[ \left( \frac{\partial I_{sp}}{\partial \bar{F}} \right)^2 (u_{\bar{F}})^2 + \left( \frac{\partial I_{sp}}{\partial t_b} \right)^2 (u_{t_b})^2 + \left( \frac{\partial I_{sp}}{\partial W_p} \right)^2 (u_{W_p})^2 \right]^{1/2} \quad (3-3)$$

atau dapat dijabarkan sesuai hasil turunan parsial persamaan (3-2) menjadi:

$$U_{I_{sp}} = \left[ \left( \frac{t_b}{W_p} \right)^2 (u_{\bar{F}})^2 + \left( \frac{\bar{F}}{W_p} \right)^2 (u_{t_b})^2 + \left( -\frac{\bar{F}}{W_p^2} t_b \right)^2 (u_{W_p})^2 \right]^{1/2} \quad (3-4)$$

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

Untuk mendapatkan hasil perhitungan nilai ketidakpastian dari spesifik impuls ditentukan terlebih dahulu syarat utama dari sistem pengukuran dari variabel-variabel bebas yaitu dengan memasukkan nilai ketidakpastian masing-masing gaya dorong merata ( $\bar{F}$ ), waktu bakar aksi ( $t_b$ ), dan berat propelan ( $W_p$ ). Adapun contoh berkas data rekam dari hasil akhir uji statik menurut data propelan RX-150 L1000 STD tahun 2004:

Waktu Awal di sumbu - X: 12:51:24.87  
 Waktu Akhir di sumbu - X: 12:51:29.75  
 Waktu Akuisisi sepanjang : 5.785433 sb-X detik  
 Waktu Cacahan Runtun : 0.003869 Data detik/data  
 Waktu Bakar di sumbu-X ( $t_b$ ) : 3.003094 detik  
 Massa Propelan : 16.000000 kg

Gaya-dorong merata : 1015.376465 Kgf  
 Gaya-dorong maksimum : 1433.898926 Kgf  
 Tekanan Ruang Bakar merata : 85.968895 kgf/cm<sup>2</sup>  
 Tekanan Ruang Bakar maksimum : 118.357419 kgf/cm<sup>2</sup>  
 Impuls Spesifik - aksi : 220.789022 Detik  
 Tanggal Rekam berkas TEXT ini : 20-7-2004  
 Nama Rekam Berkas : uji15295.txt  
 TEXT ini

Misal untuk koefisien sensitivitas diambil taksiran nilai dari  $u_{\bar{F}}$ ,  $u_{t_b}$ , dan  $u_{W_p}$  masing-masing sebesar 0,25%. Nilai ini diambil dari *datasheetbook* sensor pressure transduser dan loadcell yang mencantumkan nilai ketidakpastian antara 0,03% - 0,25% pada skala penuh (*Omegadyne, Inc., 1996*). Dengan demikian hasil perhitungan dari persamaan (3-3) untuk ketidakpastian spesifik impuls dapat diperoleh hasil dengan penjabaran sebagai berikut:

$$U_{I_{sp}} = \left[ \left( \frac{3,003094}{16} \right)^2 (0,0025)^2 + \left( \frac{1015,376465}{16} \right)^2 (0,0025)^2 + \left( \frac{1015,376465}{16} \times 3 \right)^2 (0,0025)^2 \right]$$

nilai ketidakpastian spesifik impuls  $U_{I_{sp}}$  menghasilkan:  $\sqrt{0,031666} = 0,17794$ .

Dari hasil ini kemudian dibagi dengan nilai impuls spesifik yang terdapat dari data uji statik yang diukur secara langsung sebesar 220,789022 detik.

Terdapat hasil  $\frac{U_{I_{sp}}}{I_{sp}} = 0,0001779$  atau

0,0178% yang merupakan nilai perambatan ketidakpastian gabungan atau ketidakpastian fraksional. Dari keseluruhan hitungan diperoleh nilai ketidakpastian hasil  $\pm 0,0178\%$ .

### 4.2 Pembahasan

Nilai  $\pm 0,0178\%$  merupakan nilai anggapan dari simulasi ketidakpastian

yang telah dihitung berdasarkan hasil data perolehan uji statik roket RX-150 L1000 STD. Nilai ini tidak mewakili keseluruhan data yang terdapat pada database uji statik. Pada umumnya pengukuran parameter gaya dorong dan tekanan ruang bakar pengujian statik masing-masing menggunakan satu peralatan pengukur yang digunakan untuk keseluruhan perangkat pengamatan sehingga kesalahan yang terdapat dalam pengukuran itu hanya terduplik satu kali, berapa kalipun bacaan itu diulangi sehingga eksperimen itu merupakan eksperimen sampel-tunggal.

Terdapat beberapa kesalahan yang sering menyebabkan ketidakpastian dalam pengukuran di antaranya : selalu ada kekeliruan nyata dalam pemasangan peralatan yang mungkin merusak validitas data, kesalahan tetap (*fixed error*) atau kesalahan sistematis (*systematic error*) yang menyebabkan pembacaan berulang-ulang mengandung kesalahan yang besarnya hampir sama dan sebabnya tidak diketahui, kesalahan rambang (*random error*) karena fluktuasi elektronik rambang pada peralatan.

Dengan perolehan nilai  $\pm 0,0178\%$  dari perhitungan persamaan (2-3) maka persamaan ini dapat digunakan untuk melakukan analisa apakah ada ketidaktelitian pada peralatan mengingat kalibrasi peralatan harus ditera secara berkala. Akan tetapi terdapat asumsi bahwa sama buruknya menaksir ketidakpastian terlalu besar atau terlalu kecil. Taksiran terlalu kecil memberikan rasa aman yang semu, sedangkan taksiran yang terlalu besar akan menyebabkan banyak hasil-hasil yang ditolak. Adapun nilai rentang taksiran yang dapat diterima antara 0,03%-0,25% sesuai referensi *datasheetbook* sensor *pressure transducer* dan *loadcell* pada skala penuh (*Omegadyne, Inc., 1996*).

Pembahasan mengenai perencanaan eksperimen dapat melibatkan

beberapa metode terbaik untuk mengukur variabel eksperimen tertentu. Analisa itu dapat juga menunjukkan bagaimana memperbaiki ketelitian menyeluruh suatu pengukuran dengan memperbaiki variabel tertentu yang kritis dalam proses pengukuran.

## 5 KESIMPULAN

- Berdasarkan perhitungan dari persamaan (2-3) maka nilai ketidakpastian 0,0178% adalah hasil yang terlalu kecil untuk dapat diterima karena secara teoritis hal ini di luar nilai taksiran yang mempunyai rentang 0,03% - 0,25% pada skala penuh (*Omegadyne, Inc., 1996*). Selain itu adanya kemungkinan ketidakakuratan pada peralatan dapat menimbulkan hasil pengukuran ketidakpastian menyimpang dari teori sehingga perlu dilakukan kalibrasi secara berkala,
- Nilai perambatan ketidakpastian dalam hasil  $U_{I_{sp}}$  yang diramalkan oleh persamaan (2-3) bergantung pada pangkat dua ketidakpastian dalam variabel bebas  $(u_{\bar{F}}, u_{t_b}, u_{W_p})$ . Hal ini berarti bahwa jika ketidakpastian salah satu variabel jauh lebih besar daripada ketidakpastian dalam variabel lainnya maka ketidakpastian terbesar adalah yang menonjol, sedangkan yang lain mungkin dapat diabaikan,
- Oleh karena nilai perambatan pangkat dua di atas, hanya nilai besar yang menonjol maka usaha untuk memperbaiki hasil eksperimen secara keseluruhan haruslah dilakukan dengan memperbaiki instrumentasi dan teknik eksperimen yang berhubungan dengan ketidakpastian yang relatif besar.

## DAFTAR RUJUKAN

- J.P Holman., Jasjfi, E., Ir., M.Sc., 1985. *Metode Pengukuran Teknik*, edisi ke-4 Terjemahan, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Lawrence A. Klein, 1993. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, Vol. 29, No. 2, April 1993.

Omegadyne, Inc., 1996. *Loadcell Design*, <http://www.omega.com/>, download Agustus 2007.

Thomas M. Kegel., 1996. *Basic Measurement Uncertainty*, <http://www.ceesi.com/>, download September 2007.