

Generalized Reduced Gradient Untuk Optimasi Amunisi Kaliber 57 mm C-60 Het

Generalized Reduced Gradient Optimization for Ammunition caliber 57 mm C-60 Het

Muhammad Sjahid Akbar, Bambang Widjanarko Otok, dan Lesti Anggraini
Jurusan Statistika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

ABSTRACT

Ammunition is a tool that works to sabotage or destroy the target. Weapons Laboratory in TNI AL have ammunition caliber 57 mm C-60 Het, with more than 10 years of age. Ammunition caliber 57 mm C-60 Het has three sections, projectile, propellant, and primer. Primary part of this ammunition is not working well, so that it is necessary to repair this section. Repairing of primary part is done by changing the chemical compound AB3, DF3, and GI2. The purpose of this study is to determine chemical composition of primary part, so that it can optimize the sensitivity and detonation. The results show that the optimization begins with model estimation of two response by Ordinary Least Square (OLS). Further, model estimation for each response is transformed into individual desirability function to form joint desirability function. Results optimization caliber ammunition 57 mm C-60 by Generalized Reduced Gradient method (GRG), obtained sensitivity of 9.93 cm and the detonation of 108.68 dB, with composition AB3 compound was 48.8 grams, DF3 compound was 21.0025 grams, and GI2 compound was 17 grams.

Keywords : Ammunition, fungsi desirability, ordinary least square, generalized reduced.

PENDAHULUAN

Amunisi merupakan alat yang berfungsi untuk merusakkan atau menghancurkan sasaran. Berdasarkan ukuran kalibernya, ukuran diameter dari amunisi dibedakan menjadi 3 yaitu amunisi kaliber kecil, sedang, dan besar. Amunisi kaliber sedang menurut Astika (2003) adalah amunisi dengan diameter peluru berukuran 20 mm, 25 mm, 37 mm, dan 57 mm. Bagian pokok penyusun amunisi kaliber sedang meliputi proyektil, propellant, dan primer. Proyektil berfungsi untuk perusakan sasaran, propellant berfungsi mendorong proyektil keluar dari laras dengan tenaga dan kecepatan tertentu, sedangkan bagian primer berfungsi sebagai penyala awal propellant amunisi. Laboratorium Induk Senjata TNI AL memiliki amunisi kaliber sedang yang berusia lebih dari 10 tahun. Amunisi ini memiliki kualitas propellant yang masih baik, namun pada bagian primer sudah tidak berfungsi baik. Mengingat amunisi ini jumlahnya ribuan dan se-penuh-nya dibeli dari luar negeri, maka perlu dilakukan perbaikan kualitas bagian primer supaya amunisi kaliber sedang bisa digunakan lagi.

Perbaikan kualitas bagian primer dilakukan dengan mengganti senyawa kimia pembentuk isian primer amunisi. Senyawa kimia pembentuk primer meliputi senyawa kimia AB3, DF3, dan GI2 (Olsen dalam Astika, 2003). Respon yang ditimbulkan dari isian primer berupa respon sensitivitas dan detonasi. Respon sensitivitas adalah suatu nilai ukur yang menyatakan se-berapa besar reaksi yang ditimbulkan dari aksi yang diper-lakukan terhadap benda. Sedangkan respon detonasi adalah besarnya ledakan yang diukur akibat adanya pem-bebasan energi dari reaksi kimia yang sangat cepat.

Penelitian mengenai amunisi pernah dilakukan oleh Astika (2003) yang memberikan hasil pengaturan dari ketiga senyawa kimia penyusun isian primer untuk amunisi kaliber 57 mm C-60 HET yang dapat mengoptimalkan respon sensitivitas dan detonasi. Optimasi ini dilakukan melalui pendekatan fungsi desirability dengan bantuan software Minitab sehingga diperoleh kondisi optimum untuk respon sensitivitas sebesar 9.609 cm dan respon detonasi sebesar 109.778 dB dengan komposisi senyawa kimia AB3 sebanyak 32.4568 gram, senyawa DF3

sebanyak 46.5091 gram, dan sebanyak GI2 sebesar 42.9995 gram.

Penelitian ini menggunakan data yang sama dengan Astika, tetapi dengan metode yang berbeda. Metode yang digunakan untuk optimasi dalam penelitian ini adalah dengan metode Generalized Reduced Gradient (GRG). Metode GRG menurut Castillo *et al* (1996) adalah metode yang telah digunakan dalam analisis permukaan respon dan telah banyak diaplikasikan di bidang industri.

Permasalahan yang diambil dalam penelitian ini adalah bagaimana melakukan perbaikan kualitas bagian primer amunisi kaliber sedang dengan cara menentukan komposisi senyawa AB3, DF3, dan GI2 yang dapat mengoptimalkan respon sensitivitas dan detonasi. Sesuai dengan permasalahan maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah menentukan komposisi senyawa AB3, DF3, dan GI2 yang dapat mengoptimalkan respon sensitivitas dan detonasi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi dalam perbaikan bagian primer amunisi kaliber 57 mm C-60 HET dan dapat menerapkan alternatif metode optimasi. Analisis hanya dibatasi untuk jenis isian primer amunisi kaliber 57 mm C-60 HET.

Generalized Reduced Gradient Pada Rancangan Box-Behnken

Rancangan Box-Behnken adalah rancangan percobaan untuk metode permukaan respon yang di-temukan oleh George E. P. Box and Donald Behnken pada tahun 1960 (Wikipedia 2007). Rancangan ini untuk menyusun model full kuadrat, dimana hanya menggunakan tiga level pada setiap variabel prediktor (Box dan Behnken 1960). Penggunaan faktor-faktor dalam rancangan Box-Behnken dapat dilakukan dengan dua cara yaitu.

1. Variabel asli: tipe faktor ini adalah level variabel dengan nilai sesungguhnya, misalnya variabel GI2 mempunyai level bawah 17 gr, level tengah 30 gr, dan level atas 43 gr.
2. Variabel koding: penggunaan variabel koding adalah untuk memudahkan perhitungan numerik dalam mencari estimasi parameter (Khuri, 1996). Variabel koding diperoleh melalui persamaan sebagai berikut.

$$x_i^* = \frac{2x_i - (x_{iL} + x_{iH})}{(x_{iH} - x_{iL})} \tag{1}$$

dengan :

- x_i^* = variabel koding untuk variabel asli ke-i;
- x_i = variabel asli ke-i;
- x_{iL} = level rendah dari x_i ;
- x_{iH} = level tinggi dari x_i ;
- i = banyaknya variabel prediktor.

Metode Permukaan Respon (MPR) adalah kumpulan dari teknik matematika dan metode statistika yang berguna untuk memodelkan dan menganalisa masalah-masalah yang terdapat dalam hubungan antara variabel respon dan variabel prediktor yang mempengaruhinya. Selain itu MPR bertujuan mengoptimalkan variabel respon (Myers & Carter 1973). Hubungan antara variabel respon dan faktor-faktor yang mempengaruhi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \tag{2}$$

Model permukaan respon orde dua secara umum dengan k faktor adalah sebagai berikut (Montgomery, 2001).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{3}$$

Taksiran model orde dua adalah sebagai berikut.

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad i = 1, 2, \dots, k \tag{4}$$

Dengan.

- y : variabel respon,
- \hat{y} : taksiran variabel respon,
- x : variabel prediktor, $i = 1, 2, \dots, k$
- β : parameter regresi ,
- b : taksiran parameter regresi;
- ϵ : error

Persamaan (3) untuk n serangkaian pengamatan dapat ditulis dalam bentuk matrik $y = X\beta + \epsilon$, dengan

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T, \quad \epsilon = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \dots \ \epsilon_n]^T$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

dengan meminimumkan kuadrat terkecil diperoleh taksiran parameter β sebagai berikut:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y$$

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(b) &= \text{Var}[(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T y] = \text{Var}[(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T (\mathbf{X}\beta + \varepsilon)] \\
 &= \text{Var}[(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})\beta + (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \varepsilon)] \\
 &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \hat{\sigma}^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

dengan syarat (X^TX) merupakan matrik non singular (Myers 1976).

Pengujian model meliputi pengujian lack of fit dan uji signifikansi parameter baik secara serentak maupun parsial. Pengujian lack of fit adalah suatu prosedur untuk menguji kesesuaian model apabila terjadi pengulangan pada suatu percobaan (Draper & Herzberg 1971).

Pengujian parameter secara serentak dilakukan jika model telah sesuai atau tidak ditemukan adanya lack of fit. Uji parameter serentak digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh dari variabel prediktor secara keseluruhan terhadap variabel respon. Sedangkan uji parsial digunakan untuk mengetahui apakah variabel-variabel prediktor secara individu mempunyai pengaruh yang signifikan atau tidak terhadap variabel respon. Optimasi multirespon merupakan aspek yang penting pada analisis multirespon. Tujuannya adalah untuk menentukan kondisi dari variabel prediktor x_1, x_2, \dots, x_k yang mengoptimalkan atau mendekati nilai optimal dari variabel respon y_1, y_2, \dots, y_m (Park 1996). Ada beberapa pendekatan untuk optimasi multirespon, Derringer & Suich (1980) memperkenalkan konsep desirability, dimana fungsi setiap variabel respon ditransformasi ke fungsi desirability. Fungsi desirability dapat digunakan untuk menentukan prioritas yang berbeda diantara variabel respon. Tipe fungsi desirability individu $d_j(\hat{y}_j(x))$ dikemukakan oleh Derringer & Suich (1980) adalah sebagai berikut.

Memaksimumkan Respon

$$d_j(\hat{y}_j(x)) = \begin{cases} 0 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) < y_{\min j} \\ \left(\frac{\hat{y}_j(x) - y_{\min j}}{T_j - y_{\min j}} \right)^s & , \text{jika } y_{\min j} \leq \hat{y}_j(x) \leq T_j \\ 1 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) > T_j \end{cases}
 \tag{10}$$

Meminimumkan Respon

$$d_j(\hat{y}_j(x)) = \begin{cases} 0 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) > y_{\max j} \\ \left(\frac{y_{\max j} - \hat{y}_j(x)}{y_{\max j} - T_j} \right)^s & , \text{jika } T_j \leq \hat{y}_j(x) \leq y_{\max j} \\ 1 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) < T_j \end{cases}$$

Target is best

$$d_j(\hat{y}_j(x)) = \begin{cases} 0 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) > y_{\max j} \\ \left(\frac{\hat{y}_j(x) - y_{\min j}}{T_j - y_{\min j}} \right)^s & , \text{jika } y_{\min j} \leq \hat{y}_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{y_{\max j} - \hat{y}_j(x)}{y_{\max j} - T_j} \right)^t & , \text{jika } T_j \leq \hat{y}_j(x) \leq y_{\max j} \\ 0 & , \text{jika } \hat{y}_j(x) > y_{\max j} \end{cases}
 \tag{12}$$

dengan

$y_{\min j}$: nilai minimum yang diharapkan dari variabel respon

T_j : nilai target yang diharapkan dari variabel respon

$y_{\max j}$: nilai maksimum yang diharapkan dari variabel respon

s, t : pembobot.

Fungsi desirability pertamakali dikemukakan oleh Harrington (1965), yaitu mendapat pengaturan faktor dengan memaksimumkan nilai D. Metode yang digunakan untuk memaksimumkan D geometric mean. Untuk setiap m variabel respon, suatu fungsi desirability bersama didefinisikan sebagai geometric mean dari fungsi desirability individu sebagai berikut.

$$D(x) = [d_1(\hat{y}_1(x)) \cdot d_2(\hat{y}_2(x)) \cdot \dots \cdot d_m(\hat{y}_m(x))]^{1/m}
 \tag{13}$$

Fungsi desirability selanjutnya dikembangkan oleh Derringer dan Suich (1980), yaitu mengubah suatu masalah multirespon menjadi masalah single respon melalui transformasi secara matematika.

Menurut Castillo *et al.* (1996) persamaan (10), (11) dan (12) meskipun kontinu, memiliki titik dimana tidak ada turunannya (breakpoint), sehingga akan menyebabkan D(x) tidak kontinu. Alasan ini menyebabkan optimasi menggunakan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) (metode yang telah banyak digunakan dalam analisis permukaan respon yang banyak diaplikasikan di bidang industri) tidak bisa diterapkan. Supaya metode GRG tetap dapat diterapkan, maka perlu dilakukan modifikasi fungsi desirability yang non-differentiable, sehingga akan menghasilkan fungsi desirability yang differentiable

Langkah awal dalam membentuk fungsi desirability yang differentiable adalah menentukan jumlah breakpoint. Menurut Castillo *et al.* (1996) jumlah breakpoint

ditentukan adalah melalui plot antara nilai desirability tiap observasi terhadap nilai taksiran dari y . Didefinisikan $\hat{y}_{j(1)}, \hat{y}_{j(2)}, \dots, \hat{y}_{j(n)}$, sebagai nilai-nilai dari \hat{y}_j dimana kon-disi breakpoint terjadi dengan $d_{j(1)}, d_{j(2)}, \dots, d_{j(n)}$ sebagai nilai desirability yang bersesuaian. Jadi $\hat{y}_{j(i)}$ dan $d_{j(i)}$ merupakan koordinat breakpoint. Diasumsikan bahwa $\hat{y}_{j(1)} = \hat{y}_{\min j}$ dan $\hat{y}_{j(n)} = \hat{y}_{\max j}$ dimana $\hat{y}_{j(i)}$ diurutkan dari terkecil (Castillo *et al.* 1996). Fungsi desirability differentiable individu untuk variabel respon \hat{y}_j dengan n breakpoint didefinisikan oleh Castillo *et al.* (1996) sebagai:

$$d_j(\hat{y}_j(x)) = \begin{cases} d_{j(1)} & \hat{y}_j \leq y_1 \\ a_{j(1)} + b_{j(1)}\hat{y}_j & y_{j(1)} \leq \hat{y}_j \leq y_{j(2m)} \\ A_{j(2)} + B_{j(2)}\hat{y}_j + C_{j(2)}\hat{y}_j^2 + D_{j(2)}\hat{y}_j^3 + E_{j(2)}\hat{y}_j^4 & y_{j(2m)} \leq \hat{y}_j \leq y_{j(2p)} \\ a_{j(2)} + b_{j(2)}\hat{y}_j & y_{j(2p)} \leq \hat{y}_j \leq y_{j(3m)} \\ A_{j(3)} + B_{j(3)}\hat{y}_j + C_{j(3)}\hat{y}_j^2 + D_{j(3)}\hat{y}_j^3 + E_{j(3)}\hat{y}_j^4 & y_{j(3m)} \leq \hat{y}_j \leq y_{j(3p)} \\ \vdots \\ a_{j(n-1)} + b_{j(n-1)}\hat{y}_j & y_{j(n-1,p)} \leq \hat{y}_j \leq y_{j(n)} \\ d_{j(n)} & \hat{y}_j > y_{j(n)} \end{cases} \quad (14)$$

keterangan :

$$b_{j(i)} = \frac{d_{j(i+1)} - d_{j(i)}}{\hat{y}_{j(i+1)} - \hat{y}_{j(i)}}$$

$$a_{j(i)} = d_{j(i+1)} - b_{j(i)}\hat{y}_{j(i+1)}$$

$$\hat{y}_{j(im)} = \hat{y}_{j(i)} - \delta y$$

$$y_{j(pm)} = \hat{y}_{j(i)} + \delta y$$

$$\delta y_j = (\hat{y}_{\max j} - \hat{y}_{\min j}) / 50$$

$$A_{j(i)} = d_{j(i)} - B_{j(i)}\hat{y}_{j(i)} - C_{j(i)}\hat{y}_{j(i)}^2 - D_{j(i)}\hat{y}_{j(i)}^3 - E_{j(i)}\hat{y}_{j(i)}^4$$

$$B_{j(i)} = b_{j(i-1)} - 2C_{j(i)}\hat{y}_{j(im)} - 3D_{j(i)}\hat{y}_{j(im)}^2 - 4E_{j(i)}\hat{y}_{j(im)}^3$$

$$C_{j(i)} = \frac{b_{j(i)} - b_{j(i-1)} + 3D_{j(i)}(\hat{y}_{j(im)}^2 - \hat{y}_{j(ip)}^2) + 4E_{j(i)}(\hat{y}_{j(im)}^3 - \hat{y}_{j(ip)}^3)}{2(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(im)})}$$

$$D_{j(i)} = \frac{H_{j(i)} - G_{j(i)}E_{j(i)}}{F_{j(i)}}$$

$$E_{j(i)} = \frac{H_{j(i)} - J_{j(i)}}{I_{j(i)} + G_{j(i)}}$$

$$F_{j(i)} = \frac{3(\hat{y}_{j(im)}^2 - \hat{y}_{j(ip)}^2)}{2(\hat{y}_{j(im)} - \hat{y}_{j(ip)})} (\hat{y}_{j(ip)}^2 - \hat{y}_{j(i)}^2 - 2\hat{y}_{j(im)}(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)})) +$$

$$-3\hat{y}_{j(im)}^2(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)}) - \hat{y}_{j(i)}^3 + \hat{y}_{j(ip)}^3$$

$$G_{j(i)} = \frac{2(\hat{y}_{j(im)}^3 - \hat{y}_{j(ip)}^3)}{\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(im)}} (\hat{y}_{j(ip)}^2 - \hat{y}_{j(i)}^2 - 2\hat{y}_{j(im)}(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)})) +$$

$$-4\hat{y}_{j(im)}^3(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)}) - \hat{y}_{j(i)}^4 + \hat{y}_{j(ip)}^4$$

$$H_{j(i)} = \frac{(b_{j(i)} - b_{j(i-1)})}{2(\hat{y}_{j(im)} - \hat{y}_{j(ip)})} (\hat{y}_{j(ip)}^2 - \hat{y}_{j(i)}^2 - 2\hat{y}_{j(im)}(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)})) +$$

$$-b_{j(i-1)}(\hat{y}_{j(ip)} - \hat{y}_{j(i)}) + a_{j(i)} + b_{j(i)}\hat{y}_{j(ip)} - d_{j(i)}$$

$$I_{j(i)} = \frac{2(\hat{y}_{j(im)}^3 - \hat{y}_{j(ip)}^3)}{\hat{y}_{j(im)} - \hat{y}_{j(ip)}} (\hat{y}_{j(im)}^2 - \hat{y}_{j(i)}^2 - 2\hat{y}_{j(im)}(\hat{y}_{j(im)} - \hat{y}_{j(i)}))$$

$$-4\hat{y}_{j(im)}^3(\hat{y}_{j(im)} - \hat{y}_{j(i)}) + \hat{y}_{j(i)}^4 - \hat{y}_{j(im)}^4$$

Fungsi desirability differentiable bersama dibentuk dari fungsi desirability differentiable individu melalui persamaan (13) kemudian dioptimasi dengan menggunakan metode Generalized Reduced Gradient (GRG).

Metode Generalized Reduced Gradient (GRG) menurut Tang & Xu (2002) adalah metode untuk mendapatkan titik optimum di dalam daerah yang dibatasi (kendala). Metode GRG juga dikemukakan oleh Belegundu (1999) sebagai suatu metode yang sesuai untuk menyelesaikan persamaan dengan kendala non linear. Bentuk umum dari GRG (Bricker 1999) adalah sebagai berikut.

Minimize $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
 dengan kendala
 $h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, j=1, 2, \dots, m$
 $\alpha_i < x_i < \beta_i, i = 1, 2, \dots, n$
 dengan
 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$: fungsi yang dioptimalkan
 $h_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$: kendala
 x : faktor
 α : batas bawah dari faktor
 β : batas atas dari faktor

Teori Amunisi

Amunisi merupakan alat yang berfungsi untuk merusakkan sasaran. Kerja amunisi adalah gabungan antara kerja kimia dan kerja gerak. Berdasarkan ukuran kalibernya, ukuran diameter dari peluru, amunisi dibedakan menjadi 3 yaitu amunisi kaliber kecil, sedang, dan besar. Menurut Astika (2003) amunisi kaliber sedang yaitu amunisi yang berukuran 20 mm, 25 mm, 37 mm, dan 57 mm. Bagian pokok penyusun amunisi kaliber sedang ada 3 macam yaitu bagian proyektil, propellant, dan primer. Proyektil merupakan bagian dari amunisi yang berfungsi untuk perusakan sasaran, yang terdiri dari tudung balistik, ban putar, traser, dan bahan high explosive. Propellant berfungsi mendorong proyektil keluar dari laras dengan tenaga dan kecepatan tertentu. Sedangkan bagian primer berfungsi

sebagai penyala awal propellant amunisi, yang terdiri dari dua bagian yaitu bagian mangkok atau tempat isian primer dan bagian isian primer. Isian primer terdiri dari campuran tiga senyawa kimia sebagai berikut.

Senyawa kimia AB3 adalah suatu senyawa kimia pyroteknik yang termasuk dalam golongan senyawa Low Explosive. Senyawa ini sering digunakan untuk pembuatan isian primer dan dapat menambah sensitivitas serta berfungsi sebagai oksidator.

Senyawa kimia DF3 adalah senyawa kimia Initial Explosive yang tergolong High Explosive dan digunakan untuk memberi pancaran api permulaan.

Senyawa kimia GI2 adalah senyawa pyroteknik yang tergolong senyawa Low Explosive, senyawa ini dalam isian primer berfungsi sebagai bahan bakar dan sebagai bahan sensitivitas.

Pengaruh senyawa kimia AB3, DF3, dan GI2 pada pengisian bagian primer amunisi berupa respon sensitivitas dan respon detonasi (Olsen dalam Astika 2003). Sensitivitas adalah suatu nilai ukur yang menyatakan seberapa besar reaksi yang ditimbulkan dari aksi yang diperlakukan terhadap benda, sedangkan detonasi yaitu besarnya ledakan yang diukur akibat adanya pembebasan energi dari reaksi kimia yang sangat cepat. Level dari ketiga senyawa kimia ini diperoleh dari studi literatur dan eksperimen, dengan perbandingan prosentase senyawa AB3, DF3, dan GI2 harus berada diantara batas atas dan bawah untuk masing-masing senyawa. Apabila prosentase melebihi batas atas atau kurang dari batas bawah, maka campuran isian primer tidak meledak (Astika 2003). Sehingga proses pencampuran ketiga senyawa pembentuk isian primer merupakan proses yang mengandung interaksi diantara ketiga senyawa.

METODE

Sumber data dalam penelitian ini adalah data sekunder hasil penelitian Astika (2003). Data berupa hasil percobaan di Laboratorium Induk Senjata TNI-AL Subsila Amodak Probolinggo dengan menggunakan rancangan percobaan Box-Behnken.

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

- Variabel respon meliputi
- y_1 = sensitivitas terhadap pukulan (cm)
- y_2 = besarnya detonasi (dB)
- Variabel prediktor yaitu :

- x_1 = banyaknya senyawa kimia AB3 (gram)
- x_2 = banyaknya senyawa kimia DF3 (gram)
- x_3 = banyaknya senyawa kimia GI2 (gram):

Tabel 1. Level untuk Variabel Prediktor

Variabel prediktor	Level		
	Atas	Tengah	Bawah
AB3 (x_1)	48.8 gram	29.4 gram	10 gram
DF3 (x_2)	52.50 gram	36.75 gram	21 gram
GI2 (x_3)	43 gram	30 gram	17 gram

Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan Box-Behnken dengan jumlah percobaan sebanyak lima belas kali, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan Percobaan Box-benhken

Variabel asli			Variabel koding		
x_1	x_2	x_3	x_1^*	x_2^*	x_3^*
29.4	36.75	30	0	0	0
10	21	30	-1	-1	0
29.4	52.5	17	0	+1	-1
29.4	36.75	30	0	0	0
48.8	21	30	+1	-1	0
29.4	21	43	0	-1	+1
10	36.75	17	-1	0	-1
48.8	52.5	30	+1	+1	0
29.4	36.75	30	0	0	0
29.4	52.5	43	0	+1	+1
10	52.5	30	-1	+1	0
10	36.75	43	-1	0	+1
48.8	36.75	17	+1	0	-1
48.8	36.75	43	+1	0	+1
29.4	21	17	0	-1	-1

x_1^* = variabel koding untuk senyawa kimia AB3

x_2^* = variabel koding untuk senyawa kimia DF3

x_3^* = variabel koding untuk senyawa kimia GI2

Perhitungan variabel koding untuk ketiga variabel prediktor dilakukan melalui persamaan (1).

Langkah-langkah analisa dalam menyelesaikan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pendugaan model orde dua dengan menggunakan metode OLS (Ordinary Least Square).
2. Menguji kesesuaian model melalui uji lack of fit, karena terjadi pengulangan pada percobaan.
3. Menguji signifikansi parameter melalui uji serentak dan parsial.
4. Menguji asumsi residual meliputi uji asumsi identik, independen, dan berdistribusi normal (0, σ^2).
5. Transformasi model dugaan yang telah diperoleh untuk setiap respon ke dalam fungsi desirability differentiable individu $d_j(Y_j(x))$.

6. Membentuk fungsi desirability differentiable bersama (D(x)) dari setiap fungsi desirability differentiable individu dj(Yj(x)).
7. Menyelesaikan optimasi melalui fungsi (D(x)) dengan metode Generalized Reduced Gradient (GRG).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendugaan Model

Respon sensitivitas dan detonasi dihasilkan dari proses pencampuran antara senyawa AB3, DF3, dan GI2. Proses ini telah dijelaskan sebagai proses yang mengandung interaksi diantara ketiga senyawa. Sehingga pendugaan model untuk kedua respon dilakukan dengan menggunakan rancangan orde dua.

Pendugaan Model Orde Dua untuk Respon Sensitivitas

Pendugaan parameter dilakukan dengan menggunakan metode OLS, sehingga diperoleh model orde dua untuk respon sensitivitas sebagai berikut.

$$\hat{y}_1(x) = 9.5667 - 0.275x_1 - 0.3875x_2 + 0.4375x_3 - 0.1458x_1^2 + 0.4792x_2^2 - 0.3708x_3^2 - 0.3x_1x_2 - 0.2x_1x_3 + 0.225x_2x_3$$

Pengujian Model

a. Pengulangan yang terjadi pada percobaan menyebabkan perlu dilakukan pengujian kesesuaian model dugaan melalui uji lack of fit. Hipotesis untuk uji lack of fit adalah.

H0 : tidak terdapat lack of fit (model sudah sesuai)

H1 : terdapat lack of fit (model tidak sesuai)

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{Statistik uji : } F_{LOF} = MS_{LOF}/MS_{PE}$$

Daerah penolakan: tolak H0 jika $F_{LOF} > F_{0.05(3,2)}$

Tabel 3. Anova Model Orde Dua untuk y_1

Sumber Variasi	db	SS	MS	F	P
Regresi	9	5.61317	0.62369	70.61	0.000
Linear	3	3.33750	1.11250	125.94	0.000
Kuadratik	3	1.55317	0.51772	58.61	0.000
Interaksi	3	0.72250	0.24083	27.26	0.002
Residual	5	0.04417	0.00883		
Lack of Fit	3	0.03750	0.01250	3.75	0.218
Pure Error	2	0.00667	0.00333		
Total	14	5.65733			

Tabel 3 menunjukkan nilai FLOF sebesar 3.75 lebih kecil dari $F_{0.05(3,2)} = 19.16$ sehingga keputusan terima H0. Hal ini berarti

pada taraf signifikan 5% model orde dua untuk respon sensitivitas sudah sesuai.

b. Pengujian parameter secara serentak dilakukan pada model yang telah sesuai dengan hipotesis sebagai berikut.

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_9 = 0$$

H1 : paling tidak ada satu $\beta_i \neq 0$ dengan $i = 1, 2, \dots, 9$

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{Statistik uji : } F_{hitung} = \frac{MS_R}{MS_E}$$

Daerah penolakan: tolak H0 jika $F_{hitung} > F_{0.05(9,5)}$

Tabel 3 menunjukkan nilai Fhitung regresi sebesar $70.61 > F_{0.05(9,5)} = 4.77$ sehingga tolak H0 dan dapat dikatakan bahwa pada taraf signifikan 5 % minimal ada satu variabel prediktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon sensitivitas.

c. Pengujian parameter secara parsial dilakukan untuk mengetahui variabel prediktor mana saja yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon. Hipotesis untuk uji parsial adalah sebagai berikut.

$$H_0 : \beta_i = 0$$

H1 : $\beta_i \neq 0$ dengan $i = 1, 2, \dots, 9$

$$\alpha = 0.05$$

$$\text{Statistik uji : } t_{hitung} = \frac{b_i}{\sqrt{\text{var}(\hat{\beta}_i)}}$$

Daerah penolakan: tolak H0 jika $|t_{hitung}| > t_{(0,025;5)}$.

Tabel 4. Uji Parsial Model Orde Dua untuk y_1

Variabel Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P
x_1	-0.2750	0.03323	-8.276	0.000
x_2	-0.3875	0.03323	11.661	0.000
x_3	0.4375	0.03323	13.166	0.000
x_1^2	-0.1458	0.04891	-2.982	0.031
x_2^2	0.4792	0.04891	9.797	0.000
x_3^2	-0.3708	0.04891	-7.582	0.001
x_1x_2	-0.3000	0.04699	-6.384	0.001
x_1x_3	-0.2000	0.04699	-4.256	0.008
x_2x_3	0.2250	0.04699	4.788	0.005

Tabel 4 menunjukkan bahwa untuk semua variabel prediktor mempunyai nilai $|t_{hitung}| > t_{(0,025;5)} = 2,571$, sehingga tolak H0 dan dapat dikatakan pada taraf signifikan 5%,

setiap variabel prediktor mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap respon sensitivitas.

Pemeriksaan dan Pengujian Residual

a. Pengujian keidentikan residual dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kehomogenan varians residual. Pengujian ini dapat dilakukan melalui uji Glejser.

Tabel 5. Uji Glejser Residual untuk y_1

Variabel Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P
x_1	-0.00	0.00101	-0.00	1
x_2	0.00	0.00101	0.00	1
x_3	-0.00	0.00101	-0.00	1

Tabel 5 menunjukkan bahwa untuk semua variabel prediktor x_1 , x_2 , dan x_3 memiliki nilai $|t_{hitung}| < t(0,025;11) = 2.201$, jadi terima H_0 sehingga dapat dikatakan bahwa semua variabel prediktornya tidak signifikan. Karena semua variabel prediktor tidak signifikan, maka varians residual sudah homogen.

b. Pemeriksaan keindepeden residual bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya korelasi antara residual pada pengamatan ke- i dengan residual pada pengamatan ke- $(i+k)$. Pemeriksaan keindepedenan dapat dilakukan dapat dilakukan dengan Run Test, dengan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : residual independen

H_1 : residual dependen

Statistik Uji : Run hitung = 11

Daerah kritis : Run hitung \leq run Tabel

Kesimpulan :

Nilai run Tabel dilihat pada Table runs test, dengan $n_1 = 8$ dan $n_2 = 7$, diperoleh run Tabel sebesar 4. Karena run hitung = 11 lebih dari run Tabel = 4, maka terima H_0 yang berarti bahwa residual independen.

c. Pengujian residual berdistribusi normal melalui uji Kolmogorov-Smirnov dengan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : residual berdistribusi normal

H_1 : residual tidak berdistribusi normal

$\alpha = 0.05$

Statistik Uji : $D = \sup |S(x) - F_0(x)| = 0.157$

Daerah penolakan : tolak H_0 jika $D > W_{1-0.05}$

Kesimpulan : Nilai $D = 0.157 < W_{1-0.05} = 0.338$, sehingga terima H_0 yang berarti bahwa

pada taraf signifikan 0.05, residual berdistribusi normal.

Pendugaan Model untuk Respon Detonasi

Model orde dua untuk respon detonasi sebagai berikut.

$$\hat{y}_2(x) = 108.680 - 1.920x_1 - 2.323x_2 + 3.583x_3 - 2.913x_1^2 + 3.078x_2^2 - 2.608x_3^2 - 2.240x_1x_2 - 1.445x_1x_3 + 1.940x_2x_3$$

Pengujian Model

a. Pengulangan yang terjadi pada percobaan menyebabkan perlu dilakukan pengujian kesesuaian model dugaan melalui uji lack of fit. Hipotesis untuk uji lack of fit adalah.

H_0 : tidak terdapat lack of fit (model sudah sesuai)

H_1 : terdapat lack of fit (model tidak sesuai)

$\alpha = 0.05$

Statistik uji :

$$F_{LOF} = MS_{LOF} / MS_{PE}$$

Daerah penolakan: tolak H_0 jika $F_{LOF} > F_{0.05(3,2)}$

Tabel 6. Anova Model Orde Dua untuk y_2

Sumber Variasi	db	SS	MS	F	P
Regresi	9	316.215	35.1350	26.76	0.001
Linear	3	175.318	58.4392	44.51	0.000
Kuadratik	3	97.420	32.4733	24.73	0.002
Interaksi	3	43.477	14.4923	11.04	0.012
Residual	5	6.565	1.3131		
Lack of Fit	3	5.692	1.8972	4.34	0.193
Pure Error	2	0.874	0.4368		
Total	14	322.780			

Tabel 6 menunjukkan nilai FLOF sebesar $4.34 < F_{0.05(3,2)} = 19.16$ sehingga diperoleh keputusan terima H_0 . Hal ini berarti pada taraf signifikan 5%, tidak terdapat lack of fit, sehingga model orde dua untuk respon detonasi sudah sesuai.

b. Pengujian parameter secara serentak dilakukan pada model yang telah sesuai dengan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_9 = 0$

H_1 : paling tidak ada satu $\beta_i \neq 0$ dengan $i = 1, 2, \dots, 9$

$\alpha = 0.05$

Statistik Uji :

$$F_{hitung} = \frac{MS_R}{MS_E}$$

Daerah penolakan: Tolak H_0 jika $F_{hitung} > F_{0.05(9,5)}$

Tabel 6 menunjukkan nilai Fhitung regresi sebesar $26.76 > F_{0.05(9,5)} = 4.77$ sehingga tolak H_0 dan dapat dikatakan bahwa pada taraf signifikan 5 %, minimal ada satu variabel

prediktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon detonasi.

c. Pengujian Secara Parsial

Pengujian parameter secara parsial dilakukan untuk mengetahui variabel prediktor mana saja yang berpengaruh secara signifikan terhadap variabel respon. Hipotesis untuk uji parsial adalah sebagai berikut.

$H_0 : \beta_i = 0$

$H_1 : \beta_i \neq 0$ dengan $i = 1, 2, \dots, 9$

$\alpha = 0.05$

Statistik Uji :

$$t \text{ hitung} = \frac{\hat{\beta}_i}{\sqrt{\text{var}(\hat{\beta}_i)}}$$

Daerah penolakan: tolak H_0 jika $|t_{hitung}| > t(0,025;5)$.

Tabel 7. Uji Parsial untuk Model Orde Kedua untuk y_2

Variabel Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P
x_1	-1.920	0.4051	-4.739	0.005
x_2	-2.323	0.4051	-5.733	0.002
x_3	3.583	0.4051	8.843	0.000
x_1^2	-2.913	0.5963	-4.884	0.005
x_2^2	3.078	0.5963	5.161	0.004
x_3^2	-2.608	0.5963	-4.373	0.007
x_1x_2	-2.240	0.5729	-3.910	0.011
x_1x_3	-1.445	0.5729	-2.522	0.053
x_2x_3	1.940	0.5729	3.386	0.020

Tabel 7 menunjukkan bahwa untuk semua variabel prediktor selain variabel interaksi x_1x_3 mempunyai nilai $|t_{hitung}| > t(0,025;5) = 2,571$ jadi H_0 ditolak sehingga setiap variabel prediktor kecuali interaksi antara x_1x_3 mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap respon detonasi. Untuk interaksi antara x_1x_3 yang tidak signifikan tidak dapat dibuang dari model, hal ini karena semua variabel prediktor ingin dicari kondisi optimumnya, maka variabel yang tidak signifikan tidak bisa dihilangkan dalam model.

Pemeriksaan dan Pengujian Residual

a. Pengujian keidentikan residual dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kehomogenan varians residual. Pengujian ini dapat dilakukan melalui uji Glejser . Tabel 8. menunjukkan bahwa semua variabel prediktor $x_1, x_2,$ dan x_3 memiliki nilai $|t_{hitung}| < t(0,025;11) = 2.201$, jadi terima H_0 sehingga sehingga dapat dikatakan bahwa semua variabel prediktornya

tidak signifikan. Karena semua variabel prediktor tidak signifikan, maka varians residual sudah homogen.

Tabel 8. Uji Glejser Residual untuk y_2

Variabel Prediktor	Koefisien	SE Koefisien	T	P
x_1	0.00	0.1687	0.00	1
x_2	0.00	0.1687	0.00	1
x_3	-0.00	0.1687	-0.00	1

b. Pemeriksaan independen bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya korelasi antara residual pada pengamatan ke-i dengan residual pada pengamatan ke-(i+k). Pemeriksaan keindepedenan dapat dilakukan dengan Run Test, dengan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : residual independen

H_1 : residual dependen

Statistik Uji : Run hitung = 7

Daerah kritis : Run hitung \leq run Tabel

Kesimpulan : Nilai run Tabel dilihat pada Table runs test , dengan $n_1 = 8$ dan $n_2 = 7$, diperoleh run Tabel sebesar 4. Karena run hitung = 11 lebih dari run Tabel = 7, maka terima H_0 yang berarti bahwa residual independen.

c. Pengujian residual berdistribusi normal melalui uji Kolmogorov-Smirnov dengan hipotesis sebagai berikut.

H_0 : residual berdistribusi normal

H_1 : residual tidak berdistribusi normal

$\alpha = 0.05$

Statistik Uji : $D = \sup|S(x) - F_0(x)| = 0.109$

Daerah penolakan : tolak H_0 jika $D > 0.338$

Kesimpulan : Nilai $D = 0.157 < 0.338$, sehingga terima H_0 yang berarti bahwa pada taraf signifikan 0.05, residual berdistribusi normal.

Optimasi melalui Modifikasi Fungsi Desirability dengan Metode Generalized Reduced Gradient (GRG)

Setelah diperoleh pendugaan model orde dua baik untuk respon sensitivitas maupun detonasi, maka langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi secara simultan melalui modifikasi fungsi desirability dengan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) sebagai berikut.

Modifikasi Fungsi Desirability

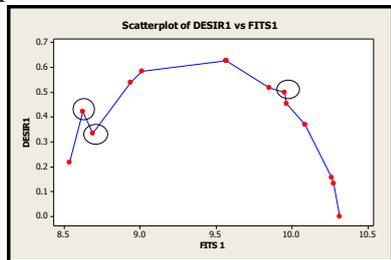
Langkah dalam modifikasi fungsi desirability adalah

a. Menentukan jumlah breakpoint dengan melihat plot antara nilai desirability tiap observasi terhadap nilai taksiran y . Nilai desirability tiap observasi dapat diketahui dengan menentukan batasan-batasan dari respon sensitivitas dan detonasi. Batasan-batasan untuk kedua respon dapat dilihat pada Tabel 9 sebagai berikut.

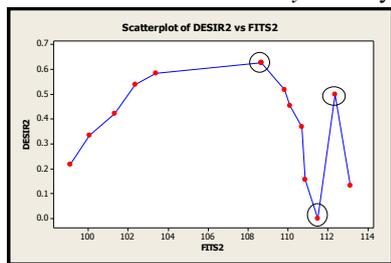
Tabel 9. Batasan untuk Respon Sensitivitas dan Detonasi

Respon	Goal	y_{max}	y_{min}	Target
y_1	Nominal the best	10.3 cm	7.5 cm	8.9 cm
y_2	Larger the better	112.12 dB	98.22 dB	112.12 dB

Batasan nilai untuk respon sensitivitas (y_1) yaitu pada nilai maksimum sebesar 10.3 cm dan nilai minimum sebesar 7.5 cm (Olsen dalam Astika, 2003). Nilai tengah antara nilai maksimum dan minimum yaitu sebesar 8.9 cm dijadikan sebagai nilai target. Sedangkan pada respon detonasi (y_2) nilai maksimum dan minimum diperoleh dari hasil eksperimen, masing-masing sebesar 112.12 dB dan 98.22 dB dengan nilai target sebesar 112.12 dB merupakan nilai detonasi terbesar.



Gambar 1. Plot Desirability untuk y_1



Gambar 2. Plot Desirability untuk y_2

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa plot desirability untuk y_1 dan y_2 terputus pada tiga titik, sehingga dapat dikatakan jumlah breakpoint untuk respon sensitivitas (y_1) adalah sebanyak tiga. Koordinat breakpoint untuk kedua respon terjadi pada titik-titik dengan nilai dari $\hat{y}_{j(i)}$ dan $d_{j(i)}$ sebagai berikut.

Tabel 10. Koordinat Breakpoint

Variabel Respon	$\hat{y}_{j(i)}$	$d_{j(i)}$
Sensitivitas(y_1)	$\hat{y}_{1(1)} = 8.6250$	$d_{1(1)} = 0.422311$
	$\hat{y}_{1(2)} = 8.6875$	$d_{1(2)} = 0.334401$
	$\hat{y}_{1(3)} = 9.9500$	$d_{1(3)} = 0.5$
Detonasi (y_2)	$\hat{y}_{2(1)} = 108.680$	$d_{2(1)} = 0.627834$
	$\hat{y}_{2(2)} = 111.488$	$d_{2(2)} = 0.0$
	$\hat{y}_{2(3)} = 112.350$	$d_{2(3)} = 0.5$

b. Menentukan Fungsi Desirability Differentiable dengan Tiga Breakpoint. Fungsi desirability yang differentiable untuk respon y_j dengan tiga breakpoint adalah sebagai berikut.

$$d_j(\hat{y}_j(x)) = \begin{cases} d_j^{(1)} & \hat{y}_j \leq y_j(1) \\ a_j(1) + b_j(1)\hat{y}_j & y_j(1) < \hat{y}_j \leq y_j(2m) \\ A_j(2) + B_j(2)\hat{y}_j + C_j(2)\hat{y}_j^2 + D_j(2)\hat{y}_j^3 + E_j(2)\hat{y}_j^4 & y_j(2m) < \hat{y}_j \leq y_j(2p) \\ a_j(2) + b_j(2)\hat{y}_j & y_j(2p) < \hat{y}_j \leq y_j(3) \\ d_j^{(3)} & \hat{y}_j \geq y_j(3) \end{cases}$$

Nilai y_{2m} , y_{2p} serta parameter a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , A_2 , B_2 , C_2 , D_2 , E_2 pada setiap respon diperoleh dari perhitungan melalui persamaan pada bagian 8 Modifikasi Fungsi Desirability. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 11 sebagai berikut.

Tabel 11. Nilai Batasan dan Parameter Fungsi Desirability

Nilai	Variabel Respon	
	y_1	y_2
y_{2m}	8.661	111.4146
y_{2p}	8.714	111.5614
A_1	12.55389	24.92734
B_1	-1.40656	-0.223588
A	10.654	770.1158
B	-1.506896	-13.545
C	0.041279	0.058955
D	0.006178	5.94E-06
E	-0.000772	-6.61E-09
a_2	-0.805117	-64.66821
b_2	0.131168	0.580046

Nilai batasan dan parameter pada Tabel 11 disubsitusikan ke persamaan (15) sehingga diperoleh fungsi desirability individu yang differentiable untuk y_1 dan y_2 sebagai berikut.

$$d_1(\hat{y}_1(x)) = \begin{cases} 0.4223 & , \hat{y}_1 \leq 8.6250 \\ 12.5539 - 1.4066\hat{y}_1 & , 8.6250 \leq \hat{y}_1 \leq 8.66 \\ 10.65 - 1.51\hat{y}_1 + 0.04\hat{y}_1^2 + 0.006\hat{y}_1^3 - 0.0008\hat{y}_1^4 & , 8.6610 \leq \hat{y}_1 \leq 8.71 \\ -0.8051 + 0.1312\hat{y}_1 & , 8.7140 \leq \hat{y}_1 \leq 9.950 \\ 0.5 & , \hat{y}_1 \geq 9.950 \end{cases}$$

$$d_2(\hat{y}_2(x)) = \begin{cases} 0.6278 & , \hat{y}_2 \leq 108.68 \\ 24.9373 - 0.2236\hat{y}_2 & , 108.68 \leq \hat{y}_2 \leq 111.41 \\ 770.12 - 13.55\hat{y}_2 + 0.06\hat{y}_2^2 + 5.9 \times 10^{-6}\hat{y}_2^3 - 6.6 \times 10^{-9}\hat{y}_2^4 & , 111.41 \leq \hat{y}_2 \leq 111.56 \\ -64.67 + 0.58\hat{y}_2 & , 111.56 \leq \hat{y}_2 \leq 112.35 \\ 0.5 & , \hat{y}_2 \geq 112.35 \end{cases}$$

Fungsi desirability individu yang telah diperoleh untuk setiap respon yaitu $d_1(\hat{y}_1(x))$ dan $d_2(\hat{y}_2(x))$ selanjutnya dibentuk suatu fungsi desirability bersama D(x) sebagai berikut.
 $D(x) = (d_1(\hat{y}_1(x)) d_2(\hat{y}_2(x)))^{1/2}$

Optimasi dengan Metode Generalized Reduced Gradient (GRG).

Optimasi secara simultan melalui modifikasi fungsi desirability diselesaikan dengan menggunakan metode GRG dengan bantuan solver pada program paket Excell 2003, dengan langkah-langkah optimasi adalah sebagai berikut.

Memaksimumkan :
 $D(x) = (d_1(\hat{y}_1(x)) d_2(\hat{y}_2(x)))^{1/2}$

dengan kendala :
 $-1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1$
 $8.625 \leq y_1 \leq 9.95$
 $108.68 \leq y_2 \leq 112.35$

$d_1(\hat{y}_1(x)) \geq 0, d_2(\hat{y}_2(x)) \geq 0$

Prosedur optimasi secara lengkap bisa dilihat pada Lampiran D, dengan metode GRG diperoleh kondisi optimum secara simultan untuk kedua respon yaitu pada respon sensitivitas diperoleh nilai sebesar 9.93 cm, sedangkan untuk respon detonasi diperoleh nilai sebesar 108.68 dB. Kondisi optimum untuk respon sensitivitas dan detonasi diperoleh saat titik stasioner untuk $x_1^* = 1, x_2^* = -0.9998, \text{ dan } x_3^* = -1$. Titik stasioner yang diperoleh masih dalam bentuk koding, sehingga perlu dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan (2.1) untuk memperoleh titik stasioner yang sebenarnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk kedua respon terjadi pada saat komposisi senyawa kimia AB3 (x_1) sebanyak 48.8 gram, senyawa kimia DF3 (x_2) sebanyak 21.0025 gram, dan senyawa kimia GI2 (x_3) sebanyak 17 gram. Nilai fungsi desirability bersama pada kondisi optimum adalah sebesar 0.5587, hal ini menunjukkan bahwa secara

rata-rata 55.87% dari target respon sensitivitas dan respon detonasi telah tercapai.

KESIMPULAN

Pendugaan model orde dua untuk respon sensitivitas adalah sebagai berikut :

$$\hat{y}_1(x) = 9.5667 - 0.275 x_1 - 0.3875 x_2 + 0.4375 x_3 - 0.1458 x_1^2 +$$

$$0.4792 x_2^2 - 0.3708 x_3^3 - 0.3 x_1 x_2 - 0.2 x_1 x_3 + 0.225 x_2 x_3$$

Sedangkan model dugaan untuk respon detonasi adalah

$$\hat{y}_2(x) = 108.680 - 1.920 x_1 - 2.323 x_2 + 3.583 x_3 - 2.913 x_1^2 +$$

$$3.078 x_2^2 - 2.608 x_3^3 - 2.240 x_1 x_2 - 1.445 x_1 x_3 + 1.940 x_2 x_3$$

Optimasi dengan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) diperoleh kondisi optimum untuk respon sensitivitas (y_1) sebesar 9.93 cm dan respon detonasi (y_2) sebesar 108.68 dB. Kondisi optimum dicapai pada saat komposisi senyawa kimia AB3 (x_1) sebanyak 48.8 gram, senyawa kimia DF3 (x_2) sebanyak 21.0025 gram, dan senyawa kimia GI2 (x_3) sebanyak 17 gram.

Adanya outlier pada data hasil percobaan, menyebabkan penggunaan metode OLS dalam estimasi parameter kurang tepat. Selain itu, penentuan jumlah breakpoint yang kurang efektif karena dilakukan dengan trial error. Maka untuk peneliti selanjutnya dilakukan dengan metode yang sifatnya robust untuk estimasi parameter dan menggunakan metode lain dalam menentukan jumlah breakpoint.

DAFTAR PUSTAKA

Astika IMJ. 2003. *Optimasi Sensitivitas Campuran Isian Primer Amunisi Kaliber 57 mm C-60 Het untuk tingkat Detonasi tertentu dengan Dual Response Surface*. Tesis Program Pasca Sarjana (tidak dipublikasikan). Magister Manajemen Teknologi Program Studi Manajemen Industri. ITS. Surabaya.

Belegundu AD. & Chandrupatla TR. 1999. *Optimization Concepts and Applications in Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

Box GEP & Behnken DW. 1960. "Some New Tree Level Design for Study of Quantitative Variables". *Technometrics*, 2:455-475.

Bricker DL. 1999. *Generalized Reduced Gradient Algorithm*. Dept. of Industrial Engineering, University of Iowa, Iowa.

Castillo ED, Montgomery DC, McCarville DR. 1996. "Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization". *Journal of Quality Technology*. 28:3.

- Derringer G. & Suich R. 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*. **12**:214-219.
- Draper NR & Herzberg AM. 1992. On Lack of Fit. *Technometrics* **13**:231-241.
- Harrington EC Jr. 1965. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*. **21**:494-494
- Jimidar M, Bourguignon B, Massart DL. 1996. Application of Derringer's desirability function for the selection of optimum separation conditions in capillary zone electrophoresis. *Journal of Chromatography* **1**:109-117.
- Kros JF & Mastrangelo CM. 2001. *Comparing methods for multi-response design problem Quality and Reliability Engineering International*. **17**:323-331
- Khuri AI & Cornell JA. 1996. *Response Surfaces Designs and Analyses*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Montgomery DC. 2001. *Design and Analysis of Experiments*. Fifth Edition. New York: John Wiley&Sons, Inc.
- Myers RH. 1976. *Response Surface Methodology. United States of America*: Library of Congress.
- Myers RH. & Carter WH. 1973. Response Surface Techniques for Dual Response Systems. *Technometrics* **15**.:301-317
- Park SH. 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. London : Chapman&Hall.
- Tang LC & Xu K. 2002. A Unified Approach for Dual Response Surface Optimization. *Journal of Quality Technology*. **34**:437-447.
- Tong L & Hsieh K. 2000. A Novel Means of Applying Neural Networks to Optimize The Multiresponse Problem. *Quality Engineering*. **13**. Issue **1**:11-18.
- Zaidar E. 2002. *Kecepatan Rambat Reaksi Ledakan*. Jurusan Kimia FMIPA. Universitas Sumatera Utara. Sumatera.
- _____. 2007. Jenis Senjata dan Amunisi. <http://www.freewebs.com/gunshot_wound/lukatembak.htm>.
- _____. 2007. Box-Behnken Design. <http://en.wikipedia.org/wiki/Box-Behnken_Design>.
- _____. 2007. Box-Behnken Designs. <http://www.Caspr.it/risorse/softappl/doc/matlab_help/toolbox/stats/doe6.html>.