

KINERJA *ECONOMIZER* PADA *BOILER*

Muhammad Sjahid Akbar¹, Fredi Suryadi², Dedy Dwi Prastyo³

^{1,3}Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Jurusan Statistika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus Keputih Sukolilo, Surabaya 60111
Email: m_syahid_a@statistika.its.ac.id, dedydp@statistika.its.ac.id

²Staff Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236
Email: fsuryadi@peter.petra.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan *dual response* terhadap kasus *Multivariate Robust Parameter Design* (MRPD) yang dikembangkan oleh Del Castillo dan Miro Quesada. Metode MRPD tidak mensyaratkan jenis rancangan percobaan yang dapat digunakan dalam proses optimasi, yang dilakukan dengan meminimalkan fungsi varians terhadap kendala fungsi rerata. Pada penelitian ini, metode MRPD diterapkan untuk kasus pencarian nilai optimal respon yaitu efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi pada *economizer*. Optimasi kedua respon dilakukan dengan cara mengoptimalkan level faktor kontrol diameter luar *tubing*, *transversal spacing*, dan kerapatan *fin*. Temperatur *feedwater* berlaku sebagai faktor *noise*. Optimasi dilakukan dengan bantuan *fmincon* pada MATLAB 7.0 yang menghasilkan kondisi optimum untuk efektifitas perpindahan panas sebesar 77,17% dan biaya operasi sebesar 30,58 kW. Kondisi tersebut dicapai pada saat level diameter luar *tubing* sebesar 1,5 inci, *transversal spacing* sebesar 3,5 inci, dan kerapatan *fin* sebesar 3 *fin*/inci.

Kata kunci: *Economizer, dual response, Multivariate Robust Parameter Design*

ABSTRACT

This paper employed the dual response approach for case of Multivariate Robust Parameter Design (MRPD) which is developed by Del Castillo and Miro Quesada. MRPD method can be applied for any design of experiment. The optimization in this method uses minimizing variance function with restriction on mean function. In this paper, MRPD is applied to the case of optimization of heat transfer efectivity and operational cost at economizer. Those two responses are optimized by setting the level of control factors; diametre of tube hole, transversal spacing, and fin nearness. Temperature of feedwater is hold as a noise factor. Optimization is calculated by fmincon in MATLAB 7.0. The optimal condition for heat transfer efectivity is 77.17% and operational cost is 30.58 kW. The optimal condition is attained at diametre of tube hole 1.5 inch, transversal spacing 3.5 inch, and fin density 3 fin/inch.

Keywords: *Economizer, dual response, Multivariate Robust Parameter Design*

1. PENDAHULUAN

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas (*steam*) yang bersuhu sekitar 2500-3000⁰F. *Steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses untuk membangkitkan energi. Volume *steam* akan meningkat sekitar 1600 kali dari volume air. *Steam* menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak. *Boiler* tersusun dari beberapa komponen seperti cerobong, *superheater*, *steam drum*, *economizer*, dan komponen penting lainnya. Salah satu komponen terpenting pada sistem *boiler* adalah *economizer* yang berperan membantu memanaskan *feedwater* yang akan digunakan dalam *boiler* (UNEP, 2004).

Romdiyah (2007) melakukan penelitian mengenai *economizer* dengan faktor kontrol diameter luar *tubing*, *transversal spacing*, kerapatan *fin*, dan temperatur *feedwater*. Respon yang diukur adalah efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi. Optimasi perpindahan panas dan biaya operasi minimum menggunakan metode fungsi *desirability*. Hasil optimum menunjukkan pengaturan untuk diameter luar *tubing* sebesar 2 inci, *transversal spacing* sebesar 3,5 inci, kerapatan *fin* sebesar 3 *fin*/inci dan temperatur *feedwater* sebesar 260⁰F. Nilai taksiran rasio S/N (*signal to noise*) efektifitas perpindahan panas sebesar 86,17% dan biaya operasi sebesar 68,43 kW.

Jika efektifitas perpindahan panas tidak optimal, maka dibutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan efektifitas perpindahan panas yang diinginkan. Konsumsi bahan bakar pada *economizer* akan berpengaruh pada biaya operasi. Hubungan antara kedua respon dibuktikan dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,67. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Romdiyah (2007) mempunyai dua kelemahan. Pertama, penyelesaian optimasi kedua respon menggunakan pendekatan *univariate* padahal terdapat hubungan antara kedua respon tersebut. Kedua, nilai kedua respon yang dihasilkan berada di luar batas spesifikasi yang ditentukan perusahaan. Batas nilai efektifitas perpindahan panas berkisar antara 0,55% sampai 0,85% sedangkan batas nilai biaya operasi berkisar antara 30 kW sampai 60 kW.

Penelitian ini mengatasi kelemahan kedua penelitian di atas dengan menganggap respon efektifitas perpindahan panas dan respon biaya operasi berhubungan erat, sehingga bersifat *multivariate*. Oleh karena itu digunakan pendekatan *dual response* untuk kasus *Multivariate Robust Parameter Design* (MRPD) (Del Castillo dan Miro Quesada, 2004). Hal terpenting di dalam proses industri adalah menjaga kestabilan rerata dan varians.

2. METODOLOGI

2.1 Dual Response Surface

Metode optimasi dengan respon ganda yang sering digunakan adalah *Dual Response Surface* (DRS). DRS terdiri dari respon primer (Y_p) dan respon sekunder (Y_s). DRS digunakan untuk mengoptimasi Y_p dengan syarat Y_s mempunyai nilai tertentu. Dengan kata lain, Y_s menjadi kendala (*constraint*) pada optimasi Y_p (Khuri dan Cornell, 1996).

Fungsi respon primer dan respon sekunder orde kedua yang terdiri dari k faktor kontrol $\mathbf{x}' = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\hat{Y}_p = b_{01} + \mathbf{x}'\mathbf{b}_p + \mathbf{x}'\mathbf{B}_1\mathbf{x} \quad (1)$$

$$\hat{Y}_s = b_{02} + \mathbf{x}'\mathbf{b}_s + \mathbf{x}'\mathbf{B}_2\mathbf{x} \quad (2)$$

dengan

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \cdots & b_{1k}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & \cdots & b_{2k}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1}/2 & b_{k2}/2 & \cdots & b_{kk} \end{bmatrix}$$

b_{01} dan b_{02} adalah konstanta model respon primer dan respon sekunder. Vektor \mathbf{b} adalah vektor koefisien model orde pertama, sedangkan \mathbf{b}_p dan \mathbf{b}_s adalah vektor koefisien model orde pertama dari \hat{Y}_p dan \hat{Y}_s . Matriks \mathbf{B} adalah matriks koefisien model orde kedua. Matriks koefisien model

orde kedua dari \hat{Y}_p dan \hat{Y}_s adalah B_1 dan B_2 . Optimasi serentak dilakukan dengan membentuk fungsi Lagrange sebagai berikut

$$L = b_{01} + \mathbf{x}'\mathbf{b}_1 + \mathbf{x}'\mathbf{B}_1\mathbf{x} - \lambda(b_{02} + \mathbf{x}'\mathbf{b}_2 + \mathbf{x}'\mathbf{B}_2\mathbf{x} - \tau) \quad (3)$$

Dengan λ adalah pengali Lagrange (*Lagrange multiplier*) dan τ adalah nilai \hat{Y}_s yang diinginkan (Myers dan Carter, 1973).

2.2 Multivariate Robust Parameter Design

Robust design adalah metode untuk mengoptimalkan keadaan produk dan proses yang *robust* terhadap beberapa penyebab yang menimbulkan variasi. Selain itu *robust design* dapat menghasilkan produk yang berkualitas tinggi dengan biaya manufaktur dan pengembangan yang rendah (Park, 1995). Semakin dekat rerata proses dengan target dan semakin kecil variansi proses, maka semakin bagus suatu proses industri. Pada beberapa proses, respon yang akan dioptimalkan lebih dari satu dan tidak bisa dioptimalkan secara individu, tetapi harus dioptimalkan secara bersama-sama. Kasus ini diistilahkan sebagai kasus MRPD. Hubungan antara beberapa respon dan beberapa prediktor serta faktor *noise* dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Del Castillo dan Miro Quesada, 2004)

$$\mathbf{y} = \Theta' \mathbf{x}^{(m)} + \Delta' \mathbf{z}^{(m)} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

Taksiran model permukaan respon di atas adalah sebagai berikut:

$$\hat{\mathbf{y}} = \hat{\Theta}' \mathbf{x}^{(m)} + \hat{\Delta}' \mathbf{z}^{(m)} \quad (5)$$

dengan:

- Θ matriks koefisien dari faktor kontrol
- $\hat{\Theta}$ matriks taksiran koefisien faktor kontrol
- Δ matriks yang berisi koefisien orde pertama faktor *noise* dan interaksinya dengan faktor kontrol
- $\hat{\Delta}$ matriks taksiran koefisien orde pertama faktor *noise* dan interaksinya dengan faktor kontrol
- $\mathbf{z}^{(m)}$ vektor yang berisi faktor *noise* dan interaksi dengan faktor kontrol
- $\mathbf{x}^{(m)}$ vektor yang berisi *regresor* untuk faktor kontrol
- $\boldsymbol{\varepsilon}$ matriks residual yang berdistribusi normal dengan *mean* 0 dan *covariance* matriks $\Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ (matriks *variance covariance* faktor *noise*)

Taksiran *mean* kasus MRPD berdasarkan persamaan (5) adalah sebagai berikut:

$$\hat{E}(\mathbf{y}) = \hat{\Theta}' \mathbf{x}' \quad (6)$$

dengan $\hat{E}(\mathbf{y})$ taksiran matriks *mean* MRPD.

Taksiran *variance* kasus MRPD berdasar persamaan (5) sebagai berikut:

$$\hat{\text{var}}(\mathbf{y}) = \hat{\Delta}' \Sigma_z^{\ominus} \hat{\Delta} + (1 - \text{trace}(\Sigma_z^{\ominus} (\mathbf{X}'_{\Delta} \mathbf{X}_{\Delta})^{-1})) \hat{\Sigma}_z \quad (7)$$

dengan:

- $\hat{\text{var}}(\mathbf{y})$ taksiran matriks *variance* MRPD
- Σ_z^{\ominus} matriks *covariance* faktor *noise*
- $\hat{\Sigma}_z$ taksiran matriks *variance* faktor *noise*

\mathbf{X}_Δ matriks yang dibentuk dari rancangan percobaan faktor *noise* dan interaksinya
 $(1 - \text{trace}(\Sigma_z^\theta (\mathbf{X}'_\Delta \mathbf{X}_\Delta)^{-1})) \hat{\Sigma}_z$ *bias-correction factor*

2.3 *Economizer*

Economizer adalah alat pemindah panas berbentuk *tubular* yang digunakan untuk memanaskan air umpan *boiler* sebelum masuk ke *steam drum*. Istilah *economizer* diambil dari kegunaan alat tersebut, yaitu untuk menghemat (*to economize*) penggunaan bahan bakar dengan mengambil panas (*recovery*) gas buang sebelum dibuang ke atmosfer.

Biro Efisiensi Energi (2004) menyatakan bahwa sebuah *economizer* dapat dipakai untuk memanfaatkan panas gas buang untuk pemanasan awal air umpan *boiler*. Setiap penurunan 220⁰C suhu gas buang melalui *economizer* atau pemanas awal terdapat 1% penghematan bahan bakar dalam *boiler*. Setiap kenaikan 60⁰C suhu air umpan melalui *economizer* atau kenaikan 200⁰C suhu udara pembakaran melalui pemanas awal udara, terdapat 1% penghematan bahan bakar dalam *boiler*.

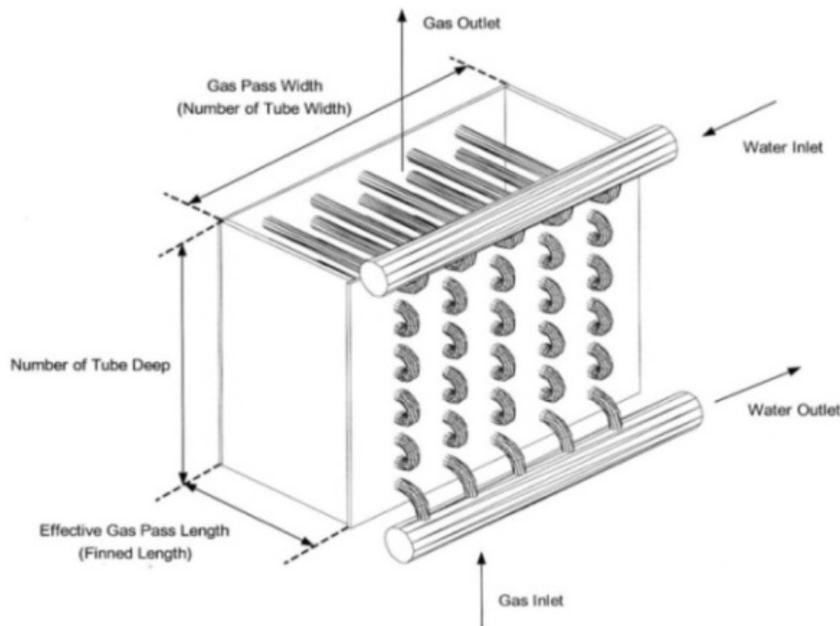
Kinerja *economizer* ditentukan oleh fluida yang mempunyai koefisien perpindahan panas yang rendah yaitu gas. Kecepatan perpindahan panas dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan koefisien perpindahan panas total dengan cara mengatur susunan *tubing*/properti *fin* dan meningkatkan luas kontak perpindahan panas. Respon yang dihasilkan oleh *economizer* adalah efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi.

Efektifitas perpindahan panas adalah besarnya energi yang dapat terambil dari total jumlah energi yang dapat diserap. Semakin besar efisiensi perpindahan panas pada *economizer*, maka panas gas sisa yang terambil akan semakin banyak. Semakin besar efektifitas perpindahan panas yang terjadi, maka alat tersebut semakin efisien.

Biaya operasi *economizer* ditentukan oleh tenaga *fan* dan tenaga pompa. *Fan* digunakan untuk mengalirkan udara pembakaran ke *boiler* melalui *economizer*. Semakin banyak *loop* dan semakin rumit susunan *tubing* pada *economizer* maka tenaga *fan* yang dibutuhkan semakin besar. Pompa digunakan untuk mengalirkan air umpan *boiler* ke *steam drum* melalui *economizer*. Semakin panjang dan semakin banyak *loop* pada *economizer*, maka tenaga pompa yang dibutuhkan semakin besar.

Respon yang optimum diperoleh menggunakan perancangan faktor yang mempengaruhi kinerja *economizer* sebagai berikut:

- a. Diameter luar *tubing*, yaitu besarnya diameter *tube* yang digunakan dalam menyusun *economizer*. Semakin besar diameter *tube* akan mengakibatkan efektifitas perpindahan panas semakin berkurang.
- b. *Transversal spacing*, yaitu menyatakan jarak antar *tube* sejajar ke arah lebar *economizer*. Semakin lebar jarak antar *tube* mengakibatkan proses induksi panas dalam *economizer* semakin berkurang, sehingga efektifitas perpindahan panas menurun.
- c. Kerapatan *fin*, yaitu banyaknya *fin* tiap inci yang dapat disusun untuk menggabungkan beberapa *tube* dalam *economizer*. Semakin banyak *fin* yang tersusun akan mengakibatkan perpindahan panas tidak efektif karena jarak antar *tube* yang semakin jauh.



Gambar 1. Penampang *Economizer*

Kinerja *economizer* sangat sensitif terhadap faktor *noise* temperatur *feedwater*. Hal ini dikarenakan bila temperatur *feedwater* tidak baik maka akan mengakibatkan biaya operasi meningkat.

3. ANALISIS DAN HASIL

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari hasil penelitian Romdiyah (2007) dengan menganggap temperatur *feedwater* sebagai faktor *noise*. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terinci dalam Tabel 1.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah *Orthogonal Array* (OA) yang terdiri dari tiga faktor kontrol, masing-masing prediktor mempunyai tiga level. Faktor *noise* mempunyai tiga level. Perhitungan derajat bebas (db) dapat dihitung sebagai berikut (Belavendram, 1995 dan Park, 1995)

$$db \text{ total} = db \text{ prediktor} + db \text{ noise} = 8$$

Tabel 1. Variabel penelitian

Respon	Variabel				
	Prediktor	Level	Noise	Level	
Y_1 : efektifitas perpindahan panas (%)	X_1 : diameter luar <i>tubing</i> (inci)	-1 = 1,5 0 = 1,75 1 = 2	Z_1 : temperatur <i>feedwater</i> ($^{\circ}$ F)	-1 = 260 0 = 280 1 = 290	
	Y_2 : biaya operasi (kW)	X_2 : <i>transversal spacing</i> (inci)			-1 = 3,5 0 = 4 1 = 4,5
		X_3 : kerapatan <i>fin</i> (<i>fin</i> /inci)			-1 = 3 0 = 4 1 = 5

Jumlah db digunakan untuk menentukan banyaknya jumlah percobaan yang harus dilakukan. Percobaan terdiri dari tiga faktor kontrol dan satu faktor *noise* dengan db sebanyak delapan, sehingga digunakan rancangan OA $L_{27}(3^4)$. Angka 27 menyatakan percobaan yang harus dilakukan sebanyak 27 kali dan angka empat menyatakan banyaknya faktor kontrol dan faktor *noise*.

3.1 Analisis

Nilai koefisien korelasi antara respon efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi sebesar 0,66558 sehingga terdapat hubungan antara kedua respon yang mengharuskan kedua respon diolah menggunakan pendekatan *multivariate*. Model permukaan multirespon orde dua dengan regresi *multivariate* adalah sebagai berikut:

$$\hat{Y} = \hat{b}'X$$

dengan:

$$\hat{Y}' = [\hat{Y}_1 \quad \hat{Y}_2]$$

$$X' = [1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad z_1 \quad x_1^2 \quad x_2^2 \quad x_3^2 \quad z_1^2 \quad x_1x_2 \quad x_1x_3 \quad x_1z_1 \quad x_2x_3 \quad x_2z_1 \quad x_3z_1]$$

\hat{b} adalah matriks 2x15 dengan elemen-elemen pada baris pertama adalah sebagai berikut: 0,19366; 0,00937; -0,00652; 0,01168; 0,00014; -0,00078; 0,00036; -0,00221; 0,00011; 0,00003; -0,0014; -0,00003; 0,00114; -0,00006; -0,00011 dan elemen-elemen pada baris kedua adalah sebagai berikut: 0,1372; 0,050262; -0,091538; 0,01784; -0,000578; 0,012217; 0,037204; 0,002128; -0,005045; -0,038833; 0,008544; 0,000084; -0,014367; 0,000977; -0,000736.

Tabel 2. Pengujian model

Statistik	Nilai	F	Num db	Den db	Pr>F
Wilks' Lambda	0,000002	627,97	28	22	<0,0001
Pillai's trace	1,975067	67,9	28	24	<0,0001
Hotelling - Lawley trace	15964,68	5893,12	28	15,48	<0,0001
Roy's greatest root	15925,47	13650,4	14	12	<0,0001

Tabel 3. Uji Box's M

Box's M	4,23
F	0,62
df1	6
df2	14355,69
Sig.	0,72

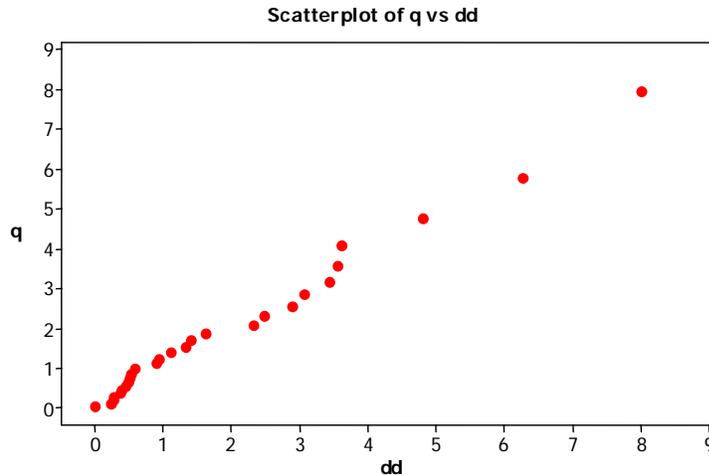
Nilai Wilk's Lambda pada Tabel 2 digunakan untuk melakukan pengujian hipotesis sebagai berikut.

$$H_0 : B_1 = 0$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } B_1 \neq 0$$

Nilai *p-value* dari Wilk's Lambda lebih kecil dari $\alpha = 0,05$ sehingga tolak H_0 , artinya paling tidak ada satu faktor kontrol yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi.

Gambar 2 menunjukkan pola residual menyerupai garis lurus yang menunjukkan residual berdistribusi normal *multivariate*. Tabel 3 menunjukkan *p-value* untuk uji homogenitas *variance* dari residual sebesar 0,72. Hal ini berarti *variance* dari residual sudah homogen.



Gambar 2. Uji distribusi normal *multivariate*

3.2 Optimasi MRPD

Faktor *noise* yaitu temperatur *feedwater* dianggap mempengaruhi respon efektifitas perpindahan panas dan biaya operasi, sehingga persamaan (5) menjadi persamaan (8). Angka nol pada elemen matriks $\hat{\Delta}$ dan $\hat{\Theta}$ berarti nilai taksiran parameter tidak signifikan pada penaksiran parameter secara individu. Teori penaksiran parameter secara individu dapat dilihat pada Johnson dan Wichern (2002) atau Rencher (2002);

$$\hat{Y} = \hat{\Theta}'\mathbf{x}^{(1)} + \hat{\Delta}'\mathbf{z}^{(1)} \quad (8)$$

dengan :

$\hat{\Theta}$ adalah matriks 2x10 dengan nilai elemen pada baris pertama adalah sebagai berikut 0,193659; 0,009365; -0,006516; 0,011684; 0; -0,001396; 0,001144; -0,000777; 0,000356; -0,002206 dan nilai elemen pada baris kedua adalah 0,137202; 0,050262; -0,091538; 0,017840; -0,038833; 0; -0,014367; 0; 0,037204; 0.

$$\mathbf{x}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_2x_3 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\Delta}' = \begin{bmatrix} 0,000135 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{z}^{(1)} = \begin{bmatrix} z_1 & z_1^2 & x_1z_1 & x_2z_1 & x_3z_1 \end{bmatrix}$$

Optimasi dilakukan dengan mencari fungsi $\text{trace}(\hat{\text{var}}(\mathbf{y}))$ dengan menggunakan rumus di bawah ini:

$$\text{trace}(\hat{\text{var}}(\mathbf{y})) = \text{trace}(\hat{\Delta}'[\mathbf{x}^{(1)}\mathbf{x}'^{(1)} \otimes \sigma_z^2]\hat{\Delta}) + (1 - \text{trace}([\mathbf{x}^{(1)}\mathbf{x}^{(1)} \otimes \sigma_z^2](\mathbf{X}'_{\Delta}\mathbf{X}_{\Delta})^{-1}))\text{trace}(\hat{\Sigma}_{\varepsilon})$$

dengan nilai $\sigma_z^2 = 0,692$ (cara penghitungan dapat dilihat pada Del Castillo dan Miro Quesada, 2004) dan \mathbf{X}_{Δ} adalah rancangan percobaan yang berisikan nilai faktor *noise* dan interaksi faktor *noise* dengan faktor kontrol. Nilai $\text{trace}(\hat{\text{var}}(Y))$ diperoleh seperti di bawah ini.

$$\begin{aligned} \text{trace}(\hat{\text{var}}(\mathbf{y})) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + 0,96155 - 0,05767 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \times \text{trace} \begin{bmatrix} 0,0000000 & -0,0000023 \\ -0,0000023 & 0,0002495 \end{bmatrix} \\ &= 0,0002399 - 0,0000144 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \end{aligned}$$

Selanjutnya penentuan batas bawah (\mathbf{l}) dan batas atas (\mathbf{u}), ditentukan peneliti berdasarkan nilai spesifikasi respon yang sering digunakan oleh para praktisi di lapangan yaitu $\mathbf{l} = \begin{bmatrix} 0,85 \\ 60 \end{bmatrix}$

dan $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0,55 \\ 30 \end{bmatrix}$, batas spesifikasi respon harus distandarkan untuk menyamakan satuan dengan

persamaan $\sqrt{\sum_{i=1}^k y_{ij}^2}$, $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, g$ sehingga diperoleh:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} 0,193359121 \\ 0,283757709 \end{bmatrix} \text{ dan } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0,125108902 \\ 0,141878854 \end{bmatrix}$$

Fungsi *dual response* dapat disusun sebagai berikut:

$$\text{Min trace}(\hat{\text{var}}(\mathbf{y})) = 0,0002399 - 0,0000144 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$$

dengan kendala:

$$\begin{bmatrix} 0,12510 \\ 0,14187 \end{bmatrix} \leq \hat{\Theta}' \mathbf{x}^{(m)} \leq \begin{bmatrix} 0,19335 \\ 0,28375 \end{bmatrix}$$

\mathbf{A}' adalah matriks dengan ukuran 2×10 dengan elemen baris pertama sebagai berikut: 0,193659; 0,009365; -0,006516; 0,011684; 0; -0,001396; 0,001144; -0,000777; 0,000356; -0,002206 dan elemen baris kedua sebagai berikut: 0,137202; 0,050262; -0,091538; 0,017840; -0,038833; 0; -0,014367; 0; 0,037204; 0; dan $-1 \leq x_1 \leq 1$, $-1 \leq x_2 \leq 1$, $-1 \leq x_3 \leq 1$

Fmincon pada MATLAB dapat mencari nilai prediktor yang optimum, sehingga diperoleh level optimum prediktor yang meminimalkan $\text{trace}(\hat{\text{var}}(\mathbf{y}))$ sebagai berikut:

$$\mathbf{X}' = [-1 \quad -1 \quad -1]$$

Vektor \mathbf{x} di atas dikembalikan ke nilai awal sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{1,5 + 2}{2} + (-1) \frac{2 - 1,5}{2} = 1,5 \text{ inci,}$$

$$X_2 = \frac{3,5 + 4,5}{2} + (-1) \frac{4,5 - 3,5}{2} = 3,5 \text{ inci, dan}$$

$$X_3 = \frac{3 + 5}{2} + (-1) \frac{5 - 3}{2} = 3 \text{ fin/inci}$$

Langkah selanjutnya melakukan penggantian nilai \mathbf{X} pada persamaan (6) dan (7) sehingga diperoleh vektor respon $E(\mathbf{y})$ dan matriks *variance covariance* yang sudah dikembalikan ke dalam nilai awal sebagai berikut:

$$E(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 0,771682 \\ 30,58426 \end{bmatrix}; \quad \hat{\text{var}}(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} 0 & -0,0016 \\ -0,0016 & 0,04 \end{bmatrix}$$

Vektor $E(y)$ menginformasikan bahwa dengan menggunakan pendekatan *dual response* pada kasus MRPD diperoleh nilai respon efektifitas perpindahan panas sebesar 0,7717 atau sekitar 77,17% dan nilai respon biaya operasi sebesar 30,58 kW. *Variance* respon efektifitas perpindahan panas adalah 0 dan *variance* biaya operasi 0,04.

Hasil optimasi MRPD lebih baik daripada optimasi Romdiyah (2007) karena kedua respon yang dihasilkan sudah masuk ke dalam batas spesifikasi yang ditentukan peneliti. Selain itu hasil optimasi MRPD lebih mendekati nilai target yang ditentukan yaitu efektifitas perpindahan panas berkisar antara 55% sampai 85% dan untuk biaya operasi berkisar antara 30 kW sampai 60 kW.

Tabel 4. Perbandingan hasil optimasi

Respon	Hasil optimasi		Selisih
	Romdiyah (2007)	Metode MRPD	
Efektifitas perpindahan panas (y_1)	86,17%	77,17%	9%
Biaya operasi (y_2)	68,17 kW	30,58 kW	37,85 kW

Tabel 4 menunjukkan penurunan nilai respon efektifitas perpindahan panas sebesar 9% dari 86,17% menjadi 77,17%, tetapi nilai respon biaya operasi lebih baik karena terdapat penghematan sebesar 37,85 kW dari nilai 68,43 kW menjadi 30,58 kW. Kenyataan di lapangan banyak yang akan menggunakan hasil optimasi MRPD meskipun efektifitas perpindahan panas tidak terlalu tinggi namun perusahaan akan mendapatkan keuntungan karena biaya operasi hasil optimasi MRPD cukup baik dan patut dipertimbangkan.

4. KESIMPULAN

Optimasi MRPD menghasilkan respon yang lebih baik daripada penelitian yang menggunakan fungsi *desirability*. Optimasi MRPD menghasilkan nilai efektifitas perpindahan panas berada dalam batas spesifikasi perusahaan dan biaya operasi yang lebih kecil. Aplikasi optimasi MRPD pada perancangan *economizer* menghasilkan kondisi optimum untuk efektifitas perpindahan panas sebesar 77,17% dan biaya operasi sebesar 30,58 kW. Kondisi optimum dicapai pada saat level diameter luar *tubing* sebesar 1,5 inci, *transversal spacing* sebesar 3,5 inci, dan kerapatan *fin* sebesar 3 *fin*/inci.

DAFTAR PUSTAKA

- Belavendram, N., 1995. *Quality by Design Taguchi Techniques for Industrial Experimentation*, Prentice Hall International, London.
- Biro Effisiensi Energi, 2004. *Pemanfaatan Kembali Limbah Panas*. Retrieved from <http://www.energyefficiencyasia.org>, on 30th March 2008.
- Del Castillo, E., and Miro Quesada G., 2004. "Dual Response Approach to the Multivariate Robust Parameter Design Problem." *Journal Technometrics*, Vol. 46, pp. 176–187.
- Johnson, R. A., and Wichern, D. W., 2002. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey.
- Khuri, A. I., and Cornell, J. A., 1996. *Response Surfaces Designs and Analyses*. New York: Marcel Dekker, Inc.

- Myers, and Carter, 1973. "Response Surface Techniques for Dual Response Systems." *Journal Technometrics*, Vol. 15, pp. 301–317.
- Park, S. H., 1995. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. Chapman & Hall, Madras.
- Rencher, A. C., 2002. *Methods of Multivariate Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Romdiyah, S., 2007. *Optimasi Multirespon Kinerja Economizer menggunakan Fungsi Desirability*. Skripsi Jurusan Statistika FMIPA-ITS. Surabaya.
- UNEP, 2004. *Peralatan Energi Panas: Boiler dan Pemanas Fluida Termis*, Retrieved from <http://www.energyefficiencyasia.org>, on 5th July 2008.