

# PERANCANGAN BERBASIS KOMPUTER UNTUK REKAYASA PRODUK DAN PROSES KOMPLEKS

**Liem Ferryanto**

Research In Motion Ltd., Waterloo, Canada

Email: lferryan@ford.com

## ABSTRAK

Di artikel ini kita memperkaya fase-fase *Characterize and Optimize* dari *design for six sigma* (DFSS) methodology untuk bisa menyelesaikan rekayasa produk dan proses kompleks yang mengandung banyak respons fungsional. Pemerayaan dimulai dengan pembangunan meta-model fungsional dari keluaran *computer aided engineering* (CAE) yang diperoleh lewat rancangan eksperimental. Kemudian, dilanjutkan dengan pembangunan sebuah algoritma untuk mengidentifikasi tingkat pengaruh dari variabel-variabel rancangan ke respons fungsional secara visual maupun analitis. Akhirnya, optimasi multi obyektif diterapkan untuk mencari nilai-nilai variabel design yang mampu memberikan respons fungsional secara optimal dan tangguh.

**Kata-kunci:** perancangan berbasis komputer, response fungsional.

## ABSTRACT

*We enhanced DFSS Characterize and Optimize Phases to deal with multiple and functional response optimization. The enhancement basically starts with a development of functional meta-models of CAE outputs that are fast-to-compute and accurate enough within a certain design space. Having developed the multiple and functional meta-models, the influence of design variables to the functional responses are then obtained via visualization and sensitivity analysis based on Sobol's index. Multi-objective optimization is finally applied to search for design variable settings that give optimal functional responses.*

**Key-words:** *Computer aided engineering, functional response.*

## 1. PENDAHULUAN

Dalam rekayasa produk atau proses kita kebanyakan berhadapan dengan tantangan untuk bekerja dengan variabel-variabel rancangan yang bertanggung jawab untuk memenuhi keluaran multi obyektif suatu produk atau proses. Dalam situasi demikian, aktivitas maupun keputusan yang diperlukan adalah bagaimana menemukan nilai-nilai variabel yang bisa memberi keluaran yang optimal dan konsisten. Persoalan multi obyektif dalam rekayasa praktis dapat dikelompokkan dalam dua kasus: (1) *multiple target responses* dan (2) *functional responses* (Nair et al., 2002 dan Joseph dan Wu, 2002).

Kelompok pertama berhadapan dengan sekumpulan target yang berbeda seperti penampilan mesin mobil dalam bentuk tenaga, keiritan bahan bakar, emisi dan stabilitas waktu mobil tidak jalan. Di sisi lain, *functional response* berhadapan dengan sekumpulan keluaran sejenis yang dievaluasi pada waktu, lokasi atau kondisi yang berbeda. Ketenangan mesin mobil

sepanjang rentang kecepatan mesin operasional, katakan dari 1000 rpm ke 6000 rpm adalah contoh *functional responses*. A *functional response* adalah situasi untuk suatu obyektif yang diwujudkan dalam bentuk kurva dan itu menjadi a *multiple target response* bila kurva tersebut didiskritkan dalam selang waktu, tempat atau operasi, misalnya *engine rpm, frequency* dan lain-lain.

Obyektif-obyektif suatu sistem sering konflik satu dengan yang lain. Karena itu diperlukan penyelesaian *trade-off*. Semakin banyak obyektifnya semakin kompleks keputusan *trade-off* yang dibutuhkan. Karena itu suatu sistem yang mengandung *multiple and functional responses* adalah suatu sistem kompleks. Sistem kompleks semacam ini mungkin tidak dapat diatasi oleh pengetahuan rekayasa konvensional atau pendekatan-pendekatan matematis analitis – setidaknya dalam dunia nyata atau praktek rekayasa produk atau proses.

*Design For Six Sigma* (DFSS) adalah metode yang cocok untuk mengatasi persoalan semacam ini karena metode ini menfokuskan pada pencegahan *defects* lewat optimasi suatu transformasi apa yang diinginkan dan diterima pelanggan ke apa yang dapat diproduksi manufaktur atau operasi. DFSS dasarnya menggunakan the *Define, Characterize, Optimize and Verify* (DCOV) model. DFSS mulai dengan mendefinisikan persoalan di *customer domain* untuk mengerti suara pelanggan dan penggunaan produk oleh pelanggan. Fase ini dinamakan *Define phase*. Kemudian, kita membangun model-model sistem dari suatu persoalan dalam *engineering domain* lewat perancangan eksperimen, bila diperlukan. Model tersebut adalah terjemahan dari suara pelanggan dan penggunaan produk oleh pelanggan ke suatu sistem yang bias direkayasa. Fase ini disebut *Characterize phase*. Langkah DFSS berikutnya adalah menemukan penyelesaian optimal dan tangguh (*robust*) berdasarkan model yang dibangun di *Characterize phase*. Fase ini disebut *Optimize*. Akhirnya, kita memverifikasi penyelesaian-penyelesaian optimal dalam kondisi produksi dan pelanggan. Fase ini disebut *Verify*.

Berhadapan dengan suatu sistem yang mempunyai *multiple and functional responses*, kita perlu metode khusus di *Characterize and Optimize phases*. Simulasi komputer berdasarkan proses iteratif dapat diterapkan untuk memodelkan suatu sistem kompleks yang tidak dapat dilakukan oleh *closed-loop engineering knowledge*. Sebagai contoh, *Computer Aided Engineering* (CAE) berdasarkan *iterative finite element methods* dapat diterapkan memodelkan aliran energi suatu sistem dan *discrete-event simulation* berdasarkan pemrograman berbasis obyek dapat diterapkan untuk memodelkan sistem aliran material skala besar. Ford Motor Company baru saja berhasil merancang mesin mobil baru lewat ratusan proyek DFSS berbasis *computer*. Artikel ini memaparkan secara garis besar teknik yang mereka gunakan, yang lebih lengkapnya ada di (Ferryanto et al., 2004).

Artikel ini di susun sebagai berikut. Di Bagian 2 dijabarkan contoh merancang blok mesin mobil secara generik. Di Bagian 3 dijabarkan langkah-langkah untuk menset perancangan eksperimen berbasis *computer* untuk *DFSS Characterize Phase*. Di Bagian 4 dijabarkan langkah-langkah untuk analisis dan interpretasi keluaran eksperimen. Di Bagian 5 dijabarkan arah untuk memperoleh respons yang optimal dan tangguh. Di bagian akhir diberikan ringkasan.

## 2. PERANCANGAN BLOK MESIN MOBIL

Kehalusan suara mesin mobil dapat diukur dari *sound power level* (SWL) pada permukaan mesin dan *flange acceleration* dari baut-baut di mesin. Satu tujuan dalam perancangan mesin adalah untuk mencapai level SWL tertentu dengan minimal *flange acceleration* tanpa perlu

merubah kapabilitas *manufakturing*. Gagal mencapai tujuan ini akan menghasilkan kebisingan dan getaran (*noise, vibration and harshness* atau NVH). Studi kasus ini menggunakan proses perhitungan memakai CAE. Simulasi komputer tersebut mempunyai kemampuan menirukan alur pembangkitan derau (*noise*) mulai dari *combustion* dan berakhir pada *radiated noise*.

Sebagaimana ditunjukkan di Gambar 1, keluaran blok mesin terdiri dari 4 repons, yaitu *sound power level* pada permukaan mesin dan *flange acceleration* pada *oil pan, front bolts and rear bolts* dalam kecepatan operasional dari 1000 rpm ke 6000 rpm. Karena setiap respons ada dalam bentuk fungsional dari kecepatan mesin, kehalusan suara mesin dapat dilihat sebagai persoalan *multiple and functional responses*. Dalam banyak kasus 4 respons berbeda ini saling bertabrakan satu dengan yang lain. Satu variabel rancangan mungkin memperbaiki satu respons, katakan, SWL pada kecepatan 3000 rpm, tetapi itu mungkin memperburuk respons lainnya pada atau beda rpm. Ini adalah persoalan kompleks yang sangat tergantung pada keterbatasan *manufakturing*, pengetahuan rekayasa dan simulasi komputer.

Kecepatan mesin adalah sinyal yang mendorong keluaran: *intended functions*, yaitu SWL dan *flange accelerations*, dan *error states*, yaitu derau dan getaran. Variabel kontrol adalah variabel rancangan yang nilai-nilainya dapat kita pilih. Variabel tak-terkontrol adalah variabel yang nilai-nilainya tidak dapat kita dikendalikan dan menghasilkan variabilitas dalam keluaran.

### 3. EKPERIMEN BERBASIS KOMPUTER (EBK)

Langkah pertama dalam EKB adalah mendefinisikan variabel-variabel yang diliput dalam eksperimen berdasarkan data mutu masa lalu dan pengetahuan teknik. Gambar 2 menunjukkan variabel kontrol yang dipertimbangkan dalam studi ini, yaitu *bulkhead thickness (BHTh)*, *oil pan rail thickness (OPRTh)*, *main cap thickness (MCTh)*, *liner thickness (LinerTh)*, *valley wall thickness (VWTh)*, *bore wall thickness (BWTh)*, *valley plate thickness (VPTTh)*, *skirt ribbing (SkirtRi)*, *side wall ribbing (SWRi)*, *RFOB ribbing (RFOBRi)*, *FFOB ribbing (FFOBRi)*, *valley wall ribbing (VWRi)* and *bearing beam*. Variabel tak-terkontrol adalah *material density (Den)*, *damping variable (Dam)* dan *Young modulus (modY)*.

Langkah kedua adalah menset rentang nilai variabel kontrol dan level dari setiap variabel. Rentang nilai merupakan hal penting dan ditentukan untuk mencerminkan kemampuan nyata *manufakturing*, nilai-nilai *baseline* (nilai-nilai nominal dari rancangan yang ada sekarang) dan *benchmark* (nilai-nilai nominal dari rancangan dari *the best in class*) data. Eksperimen komputer memungkinkan eksplorasi fungsi-fungsi *nonlinear* yang kompleks dengan lebih dari tipikal 2 or 3 level yang ditemukan di banyak eksperimen perangkat keras. Karena itu, kalau kita memperkirakan pengaruh yang sangat tidak linier dari suatu variabel, maka kita perlu memilih banyak level. Variasi disekitar level suatu variabel harus diestimasi dari data manufakturing atau data pengganti yang setara (*surrogate data*).

Langkah ketiga dalam EKB adalah membangkitkan titik-titik rancangan di ruang rancangan. Ruang rancangan adalah daerah yg dibatasi oleh rentang rancangan variabel. Setiap titik rancangan merupakan titik untuk mendapatkan satu hasil eksperimen. Diharapkan titik-titik rancangan tersebut tersebar secara merata di ruang rancangan tersebut. Ini disebut *optimal space filling*. Titik-titik rancangan harus dipilih untuk bisa menangkap informasi lebih banyak bagi variabel penting, tetapi jumlah titik tersebut harus sedikit mungkin karena menyangkut biaya eksperimen. Jadi ini adalah masalah imbal balik (*trade off*). Suatu ruang rancangan disebut optimal jika titik-titik rancangannya dapat menangkap permukaan response suatu sistem dalam seluruh ruang rancangan (*uniformity*) dan bisa secara akurat dan presisi menaksir koefisien-koefisien parameter-parameter yang dipilih dari permukaan respons sistem tersebut (*orthogonality*).

*D-optimal design, orthogonal array, Latin hypercube sampling (LHS) dan uniform design* adalah sebagian teknik yang ada untuk membangkitkan titik-titik rancangan. Karena kita memiliki 17 variabel rancangan dan setiap variabel mempunyai 2 sampai 5 level, rancangan factorial jelas tidak layak. Ini akan membangkitkan jumlah eksperimen yang sangat besar. Mengatasi hal ini kita membangkitkan 30 eksperimen menggunakan *Uniform Design*. Tiga puluh eksperimen ini hanyalah perwakilan. Kita harus menemukan nilai-nilai optimal dari variabel rancangan yang mungkin tidak masuk di 30 rancangan eksperimen tersebut. Karena itu kemudian kita membangun model matematis dari *SWL* dan *flange accelerations* sedemikian sehingga kita masih bisa menemukan semua kemungkinan kombinasi nilai yang tidak kita temukan dalam eksperimen.

Langkah terakhir dalam EKB adalah membangkitkan keluaran (*sound power levels, flange accelerations at pan rail, front bolts dan rear bolts*) menggunakan CAE. Dalam studi ini kita membangkitkan keluaran pada 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 and 6000 rpm.

#### 4. ANALISIS EKSPERIMEN BERBASIS COMPUTER (AEB)

Karena perhatian kita di kehalusan suara mesin mobil sepanjang rentang kecepatan mesin dari 1000 rpm ke 6000 rpm, langkah pertama di AEB adalah membangun model-model fungsional matematis dari keluaran CAE. Model-model tersebut harus dapat mengekspresikan perilaku sistem sesungguhnya.

Kita dapat menurunkan *transfer function* SWL dari fisika sebagai berikut (Honda et al., 2000):

$$SWL = 10 * \log(\rho * c * H(freq) * F(freq)) \quad (1)$$

untuk  $\rho$  adalah kepadatan udara,  $c$  adalah kecepatan udara,  $H$  adalah *the structure-borne noise transfer functions* dan  $F$  adalah tenaga yang merupakan sinyal dalam rpm pada titik-titik eksitasi.

Satu model fungsional yang paling mendekati SWL (1) adalah fungsi logaritmik:

$$SWL = y_0 + r * \ln(rpm) \quad (2)$$

untuk  $y_0$  adalah titik perpotongan yang mewakili pergeseran vertikal atau nilai awal dari SWL dan  $r$  adalah kecuraman yang mewakili pembesaran atau pengecilan SWL. Model (2) hanyalah simplifikasi dari ekspresi fisis (1). Ini menunjukkan bahwa meminimasi SWL adalah setara dengan meminimasi  $y_0$  dan  $r$ .

*Flange acceleration* bisa diperoleh dari fisika sebagai berikut (Honda et al., 2000).

$$Acc = \frac{1}{g} * \sqrt{\sum_i \frac{Acc_i^2}{N}} \quad (3)$$

untuk  $g$  adalah gravitasi,  $Acc$  adalah *flange acceleration* dalam rpm dan  $N$  adalah jumlah frekuensi. Satu model fungsional yang paling mendekati *flange acceleration* adalah fungsi pertumbuhan eksponensial:

$$\ln Acc = \ln y_0 + r * rpm \quad (4)$$

untuk  $y_0$  adalah titik perpotongan yang mewakili percepatan awal dan  $r$  adalah kecuraman yang mewakili laju kenaikan *flange acceleration*. Model (4) hanyalah simplifikasi dari ekspresi fisis (3). Ini menunjukkan bahwa meminimasi SWL adalah setara dengan meminimasi  $\ln y_0$  and  $r$ . Di sini, model-model (2) and (4) disebut first step meta-models.

Jadi, satu keluaran pada dasarnya berbentuk fungsi logaritmik (2) dan tiga keluaran lainnya berbentuk fungsi eksponensial (4). Idealnya, suatu blok mesin mobil tidak ada NVH-nya. Ini artinya fungsi keluarannya terletak di sumbu  $x$ . Meminimasi NVH setara dengan menekan rata fungsi keluaran (2) and (4). Ini dapat dilakukan lewat pengurangan kecuraman dan titik perpotongan kurva-kurvanya. Sampai di sini, sisa kerjaan kita adalah membangun algoritma untuk mewujudkan proses minimasi tersebut.

Setelah membangun model fungsional dari keluaran blok, langkah kedua di AEB adalah menaksir parameter-parameter fungsional (titik potong, yaitu  $y_0$  atau  $\ln y_0$  dan kecuraman, yaitu  $r$ ) menggunakan, misalnya, analisis regresi linier dan kemudian memeriksa *goodness of fits* dari model-model fungsional menggunakan, misalnya, *adjusted R<sup>2</sup>*.

Untuk menganalisis kepekaan variabel-variabel kontrol relatif terhadap SWL and *flange acceleration* kita harus memodelkan parameter-parameter dari model-model (2) and (4). Jadi, langkah ketiga dalam AEB adalah mencari hubungan antara parameter-parameter fungsional dan semua variabel kontrol dan tak-terkontrol. Hubungan ini dapat digunakan untuk menentukan pengaruh (kepekaan dan interaksi) dari variabel-variabel pada SWL dan *flange acceleration*.

Karena kita ingin menangkap perilaku local dari keluaran, kita menerapkan *Gaussian kriging regression with penalized least squares* (Lophaven et al., 2001). Di sini, model kriging dari parameter-parameter fungsional disebut *second step meta-models*.

Langkah keempat di AEB adalah menguji model-model Gaussian kriging. Satu cara untuk menguji model-model kita adalah memeriksa perilaku perbedaan atau residu antara keluaran-keluaran yang diramalkan dari model-model Gaussian kriging models dan keluaran-keluaran dari CAE. Perbedaan dari mereka harusnya tidak mempunyai pola. Residu tersebut harus terdistribusi secara acak.

Langkah kelima di AEB adalah menghitung pengaruh keseluruhan dari setiap variabel pada parameter-parameter fungsional (2) and (4). Disini, kita menerapkan *Sobol' functional ANOVA* untuk menyelidiki efek-efek keseluruhan dari setiap variabel rancangan pada keluaran (Sobol', 2001). Pada dasarnya, ANOVA fungsional adalah generalisasi dari ANOVA untuk data diskret. Prinsipnya adalah mendekomposisi *second step meta-model* dalam bentuk penjumlahan dari fungsi-fungsi independent yang meningkat dimensinya. Kepekaan total dari suatu variabel dihitung sebagai perbandingan antara varians parsial dari variabel yang bersangkutan dan varians keluaran. Tentu saja, beberapa langkah perhitungan aljabar diperlukan untuk memperoleh kepekaan keseluruhan ini.

**Table 1. Pengaruh Persentase dari Setiap Variabel pada Setiap Parameter fungsional**

TSA (%)	BWt	OPRt	SWt	BCt	Linear	VWt	BWt	VPR	Sider	SWR	RFOR	FFOR	VWR	BB	Dam	Dee	ModY	Total > 5%	Total > 10%	Pac > 5%	Pac > 10%
r SWL	4.01	0	12.09	12.2	6.93	7.47	12.93	9.98	4.86	0	0	1.23	3.87	10.7	0	7.73	5.47	86.24	46.67	9	4
Yo SWL	0.4	0	32.8	12.65	1.94	15.47	11.75	7.87	0	0	0	7.26	1.31	3.4	0	5.96	99.56	73.67	7	4	4
r FFOR	1.36	0	17.16	9.52	8.22	8.36	5.91	9.12	0	0	5.1	5.44	13	0	16.2	1.36	97.28	46.32	19	3	3
LnYo FFOR	0	41.27	0	8.38	0	3.89	0	2.8	6.71	0	0	8.49	0	18	0.57	9.84	0	99.84	99.74	6	2
r RFOR	10.57	0	8.48	20.87	16.86	22.26	0	8.12	0	8.42	0	3.72	0	0	4.1	5.78	0	99.77	69.38	7	4
LnYo RFOR	16.65	10.46	8.71	0	1.73	5.76	3.36	2.85	12.44	0	8.35	8.48	2.51	0	26.7	0	8.37	98.97	66.25	7	4
r DRPan	0.64	1.68	0	11.57	13.91	13.28	8.49	0.38	12.07	0	0	8.06	0.32	10.1	0	0	21.54	96.88	82.43	8	8
LnYo DRPan	2.05	36.37	0	9.28	3.73	4.62	18.66	0	5.66	0	0.98	0	0	13.6	8.82	8.71	2.25	86.27	62.91	6	3

Table 1 menunjukkan pengaruh persentase dari setiap variabel pada setiap parameter fungsional diperoleh dari 10 ribu simulasi. Sebagai contoh, baris kedua menunjukkan bahwa *bulkhead thickness (BHTh)* mempunyai pengaruh 4.8% ke kecuraman SWL ( $r_{SWL}$ ) sementara *bore wall thickness (BWTh)* mempunyai pengaruh 12.93 % ke  $r_{SWL}$ . Baris ini juga menunjukkan bahwa variabel-variabel yang pengaruhnya lebih besar dari 5% ada 9 buah, lihat nilai pada sel dalam baris kedua dan kolom “Par > 5%”. Kesembilan variabel tersebut adalah SWTh, MCTh, LinerTh, VWTh, BWTh, VPTh, BB, Den and ModY. Variabel-variabel ini menyumbang 86.24% ke  $r_{SWL}$  (lihat angka pada sel dalam baris kedua dan kolom “Total > 5%”).

**Table 2. Variabel-variabel berpengaruh.**

Factors	Weighted average Influence (%)*	Rank
MCTh	11.50	1
OPRTh	10.77	2
VWTh	10.21	3
SWTh	8.80	4
BB	8.16	5
BWTh	7.06	6
LinerTh	6.67	7
Dam	6.09	8
SkirtRi	6.08	9
Den	4.89	10
VPTh	4.79	11
ModY	4.68	12
BHTh	4.39	13
VWRI	2.63	14
FFOBRi	2.27	15
RFOBRi	1.12	16
SWRI	0.05	17

\*) weight for sound pwer level = 30% and for acceleration = 70%

Kalau kita lebih tertarik pada propagasi NVH, kita dapat memberi pembobotan lebih pada variabel rancangan yang mempengaruhi *flange accelerations* ( $r_{FFOB}$ ,  $r_{RFOB}$ ,  $r_{Oilpan}$ ,  $LnY_o_{FFOB}$ ,  $LnY_o_{RFOB}$  and  $LnY_o_{Oilpan}$ ) daripada variabel rancangan yang mempengaruhi SWL. Pengetahuan rekayasa dan keterbatasan *manufakturing* dapat digunakan untuk memilih pembobotan tersebut. Table 2 menunjukkan urutan variabel-variabel berpengaruh yang diperoleh dari pembobotan rata-rata untuk SWL adalah 0.3 dan untuk *flange acceleration* adalah 0.7. *Main Cap* ada dipuncak daftar tersebut diikuti oleh *Oil pan rail*, *valley wall* dan seterusnya. Ranking ini dapat digunakan untuk memprioritaskan tindakan-tindakan yang diambil berkenaan dengan variabel-variabel rancangan di proses manufakturing.

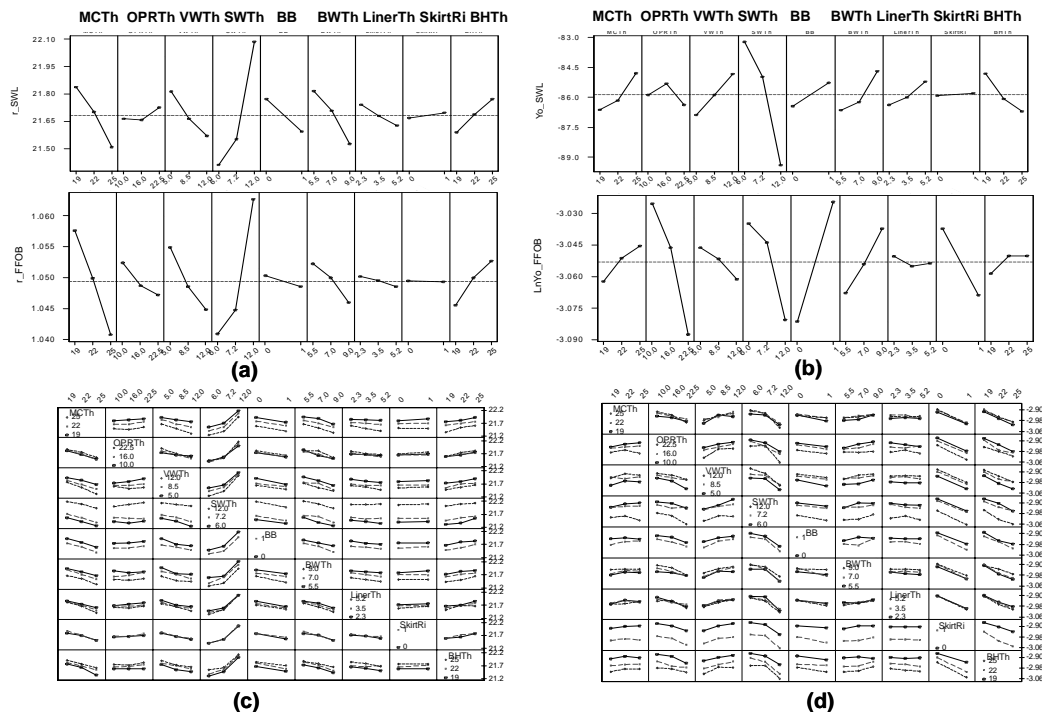
Langkah terakhir di AEB adalah menafsirkan hasil analisis di atas. Ketebalan *Bulkhead* sangat mempengaruhi *thickness flange acceleration* pada *rear bolt* ( $r_{RFOB}$  and  $LnY_{RFOB}$ ). Hasil *benchmark* dari *best in class engine block* menunjukkan *bulkhead*-nya lebih tebal pada blok mesin bagian depan dan belakang. Ketebalan *oil pan rail* hanya mempengaruhi nilai awal dari *flange acceleration* ( $Ln(y_0)$ ), tetapi tidak pada SWL. *Oil pan rail* dari blok mesin hasil *benchmarking* lebih tipis. Ketebalan *liner* mempengaruhi laju kenaikan SWL dan *flange acceleration* ( $r$ ). *Liner* dari blok mesin hasil *benchmarking* lebih tebal. Ketebalan *main caps*, *valley wall*, *bore wall* dan *valley plate* mempengaruhi semua. Semua karakteristik *main caps*, *valley wall*, *bore wall* dan *valley plate* dari blok mesin hasil *benchmarking* lebih tebal. Berkenaan dengan *ribbings*: *bearing beam* mempengaruhi semua keluaran, *skirt* hanya mempengaruhi *flange acceleration* dan lainnya kurang mempengaruhi keluaran. Variabel tak-terkontrol (yaitu *damping*, *density* dan *Young modulus*) mempunyai pengaruh campuran dari

kecil sampai moderat. Pengaruh variabel tak-terkontrol dan variabilitas variabel kontrol ke variabilitas keluaran relative terhadap eksitasi mesin dapat diabaikan. Kita akan lihat dari gambar efek utama dan interaksi bahwa model-model SWL dan *flange acceleration* didominasi oleh efek-efek linear dan interaksi.

### 5. FASE OPTIMASI

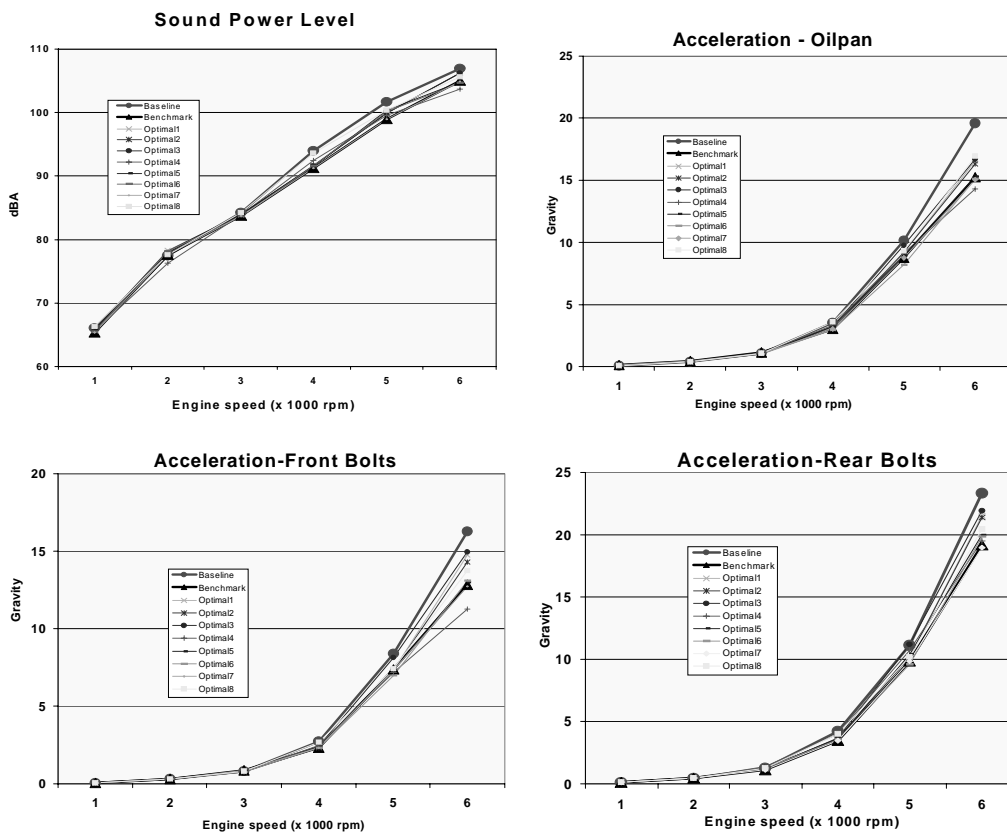
Tahap berikutnya adalah mencari nilai-nilai variabel rancangan yang memberikan penyelesaian optimal. Gambar 3 menunjukkan grafik efek utama dan interaksi dari 9 variabel rancangan terpilih. Gambar tersebut menunjukkan bahwa minimasi titik perpotongan (*initial SWL and acceleration*) dan kecuraman (laju SWL dan percepatan) adalah persoalan *trade off*. Sebagai contoh, *main caps* yang lebih tebal akan menurunkan kecuraman tetapi menaikkan titik perpotongan. Di sisi lain, *sidewall* yang lebih tebal akan menaikkan kecuraman tetapi menurunkan titik perpotongan. Grafik-grafik tersebut jelas memberikan arahan untuk mengambil keputusan. Jika efek interaksi sangat dominant, grafik efek utama kurang bermakna.

Studi kasus kita mempunyai 4 keluaran fungsional. Setiap keluaran fungsional mempunyai 2 parameter. Karena itu kita mempunyai 8 parameter fungsional untuk dioptimalkan. Dengan begitu banyak parameter pendekatan grafis seperti di atas tidak efektif lagi. *Multi-objective genetic algorithm*, misalnya, dapat diterapkan untuk mengatasi persoalan semacam ini. Langkah rinci untuk mengatasi kasus ini menggunakan teknik klasik dikenal sebagai *desirability function method* (Ehrgott, 2000). Delapan penyelesaian optimal dan hasil eksperimen dari *baseline* (garis dengan titik lingkaran) serta *benchmark* (garis dengan titik segitiga) diberikan di Gambar 4. Hasil-hasil optimal tersebut selalu tangguh (*robust*) sepanjang kecepatan mesin operasional (lihat kurva-kruva di bawa kurva *baseline*).



Gambar 3. Grafik khas dari efek-efek utama dari kecuraman (a) dan titik perpotongan (b) dan efek-efek interaksi dari SWL (c) dan *flange acceleration* pada rear bolts (d).

Algoritma yang dibangun disini adalah generik untuk optimasi *multiple and functional response*. Karena itu, ini dapat juga diterapkan untuk analisis rekayasa produk atau proses lainnya. Jika variabel-variabel tak-terkontrol dan variabilitas dari variabel-variabel kontrol sangat mempengaruhi variabilitas keluaran, persoalan multi obyektif kita menjadi semakin kompleks. Untuk itu kita tidak lagi berhadapan dengan 8 nilai nominal dari parameter fungsional. Kita harus memasukan variabilitas dari 8 parameter fungsional. Jadi, keluaran kita menjadi 16. Semakin banyak keluaran yang dianalisis semakin kompleks keputusan *trade-off* yang dihadapi. Penggunaan *Pareto optimality*, *weighting variables*, atau *utility functions* (Chen et al., 1999) sering malahan meningkatkan kompleksitas, karena mereka tidak mudah diformulasikan. Salah satu mengurangi kompleksitas dari persoalan *trade-off* adalah melakukan praproses lewat pengelompokan multi obyektif keluaran ke dalam jumlah subkelompok yang dapat dianalisis (lihat Ferryanto et al., 2003).

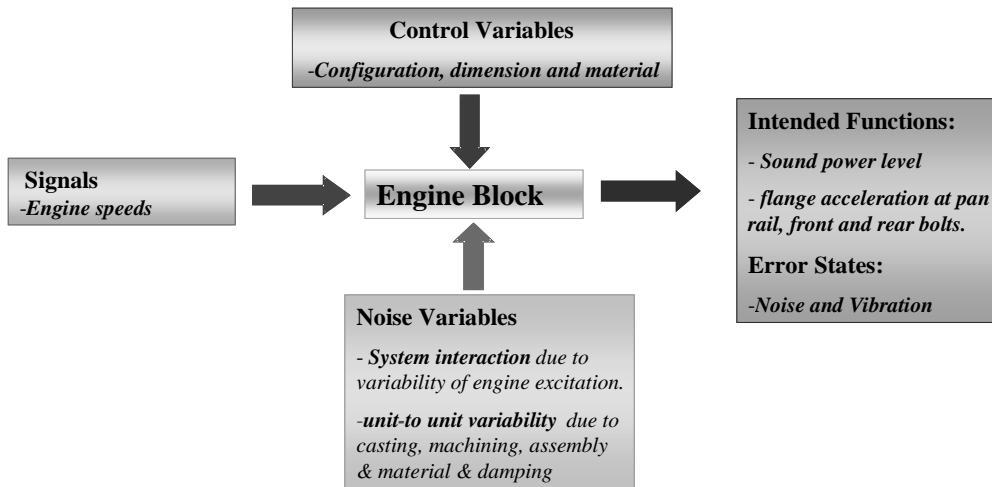


**Gambar 4. Delapan penyelesaian optimal, hasil *baseline* (garis dengan titik lingkaran) dan hasil *benchmark* (kurva dengan titik segi tiga)**

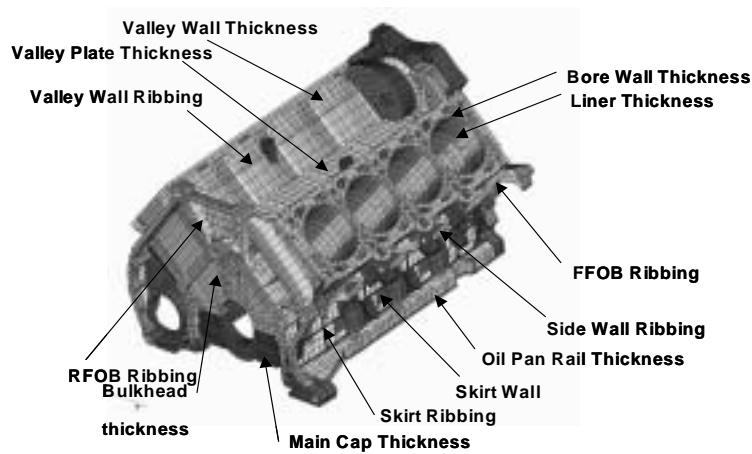


## DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W., M. Wiecek and J. Zhang, 1999. "Quality Utility: A Compromise Programming Approach to Robust Design," *ASME Journal of Mechanical Design*, 121, pp.179-187.
- Ehrgott, M., 2000. "Multicriteria Optimization", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 491*, Springer, Berlin.
- Ferryanto, L., A. Sudjianto and M. Vora, 2003. "Quantitative Exploratory Techniques to Simplify Multiple Objectives In Product Design Optimization", *Proceeding International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference Chicago, Illinois, American Society of Mechanical Engineers*, September 2-6, DETC2003/DAC-48731.
- Ferryanto, L., A. Sudjianto, and A. Felice, "Multiple and Functional Response Optimization to Improve Engine Block NVH", *SAE*, M11-04M-091.
- Honda, Y., K. Wakabayashi, T. Kodama and R. Kihara, 2000. "A Basic Study on Reduction of Cylinder Block Vibrations for Small Diesel Cars", *SAE*: 2000-01-0527.
- Joseph, L.R. and C.F.J Wu, 2002. "Robust Parameter Design of Multiple-Target Systems," *Technometrics*, 44, pp. 338-346.
- Lophaven, S.N., H.B. Nielsen and J. Sondergaard, 2002. "DACE: A Matlab Kriging Toolbox", *Informatics and Mathematical Modelling (IMM)*, Technical University of Denmark, Denmark.
- Nair, V.N., W. Taam and K.Q Ye, 2002. "Analysis of Functional Responses from Robust Design Studies with Location and Dispersion Effects," *Journal of Quality Technology*, 34, pp. 355-370.
- Sobol' I.M., 2001. "Global Sensitivity Indices for Nonlinear Mathematical Models and Their Monte Carlo Estimates", *Mathematics and Computers in Simulations*, 55, pp. 271-280.



Gambar 1. Blok mesin sebagai suatu sistem kompleks



Gambar 2. Variabel-variabel kontrol yang dipilih dalam eksperimen