# PERANCANGAN MATERIAL GESEK KOMPOSIT MENGGUNAKAN METODOLOGI PERANCANGAN BERBASIS DATA

## Rachman Setiawan

Fakultas Teknik Mesin & Dirgantara ITB, Gd. Labtek II, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

Phone: +62-22-2500979, e-mail: rachmans@edc.ms.itb.ac.id

## **ABSTRACT**

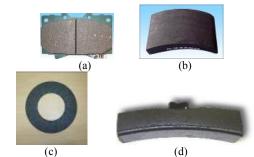
Penggunaan material gesek untuk berbagai aplikasi termasuk untuk material gesek memiliki kelebihan utama, yaitu sifat-sifat yang bisa dirancang berdasarkan komposisi material penyusunannya. Material gesek, termasuk rem dan kopling memiliki sifat-sifat yang perlu dipilih sesuai dengan aplikasi masing-masing, antara lain koefisien gesek, ketahanan terhadap temperatur tinggi, kekuatan, ketahanan aus. Untuk memilih material penyusun berikut komposisinya, pendekatan perancangan berbasis data (knowledge-based design) coba diterapkan. Basis data diperoleh dengan serangakaian pengujian material berbagai komposisi. Dari basis data tersebut, metamodelling dibuat untuk memperoleh pengetahuan mengenai pengaruh masing-masing komponen terhadap berbagai sifat material penting. Makalah ini melaporkan studi literatur dan riset material gesek dan kegiatan tahap awal penelitian yang menekankan pada penyusunan metodologi perancangan berbasis data dan perancangan alat uji gesek. Penelitian difokuskan untuk material rem.

Keywords: Material gesek, Metodologi perancangan, Perancangan berbasis data

## 1. Introduction

Material gesek (friction materials), memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi sistem mekanik untuk mekanisme penghentian gerakan (dalam hal rem), maupun transmisi (kopling gesek). Aplikasi material gesek ini meliputi berbagai alat transportasi, seperti mobil, sepeda motor, truk, bus, kereta api. Juga, dalam berbagai peralatan angkat, angkut, seperti elevator, crane, haul truck, conveyor. Rancangan dan produksi yang memenuhi kebutuhan penting untuk memastikan komponen bekerja seperti yang diinginkan [1]. Sifat utama dari material gesek adalah koefisien gesek dan laju keausan. Namun, sejalan dengan perkembangan aplikasi material gesek, studi dan kontrol terhadap berbagai sifat lainnya menjadi semakin penting, yaitu:

- Koefisen gesek
- Laju keausan
- Suara dan getaran
- Berat
- Kekuatan: tarik, tekuk, geser, tekan, dll.
- Harga spesifik
- Stabilitas sifat & kehandalan
- Isu-isu lingkungan
- Sifat thermal: disipasi panas, konduktifitas termal, dll.



**Gambar 1** Aplikasi material gesek: a) *brake pad*, b) *brake lining*, c) kopling, d) rem kereta api

Secara umum, perancangan material gesek dalam perkembangan terbaru haruslah menghasilkan material gesek yang memenuhi persyaratan spesifik dalam sistem mekanik, relatif murah, ramah lingkungan, memiliki sifat yang stabil terutama pada rentang operasi yang lebar, memiliki laju keausan yang rendah, dan cocok dengan pasangan geseknya. Penelitian hingga pengembangan produk sudah banyak dilakukan manusia, baik berupa material homogen maupun inhomogen, seperti komposit. Studi literatur lebih komprehensif akan disampaikan di bab berikut ini.

Untuk riset pemilihan komposisi material gesek, diusulkan serangkaian kegiatan yang menitikberatkan



pada metodologi perancangan, yaitu pengembangan metodologi pemilihan komposisi material penyusun dan parameter proses produksi yang paling sesuai untuk berbagai aplikasi material gesek. Dengan adanya metodologi ini diharapkan perancangan material gesek untuk berbagai aplikasi dapat dilakukan dengan lebih sistematis, cepat dan murah. Metodologi perancangan yang dikembangkan akan mengambil dasar metodologi knowledge-based design, atau perancangan berdasarkan basis data yang diperoleh secara empirik dari serangkaian pengujian. Metodologi knowledge-based design juga telah dikembangkan oleh peneliti untuk berbagai aplikasi [2-4]. Selain itu, metodologi serupa juga dikembangkan oleh peneliti lain, seperti Wang dengan nama Metamodel-based Design Optimization (MBDO) [5,6]. Untuk penelitian material gesek, metodologi serupa juga mulai dikembangkan di CAFS

# 2 Rem Komposit

# 2.1 Material Penyusun [7]

Komposit yang dipakai untuk aplikasi rem termasuk dalam jenis partikulat. Material penyusun dapat diklasifikasikan sbb.

- Abrasif
- Friction Modifier
- Matriks
- Penguat
- Pengisi

#### Abrasif

Komponen ini menyediakan fungsi utama dari rem, yaitu koefisien gesek. Dengan terjadinya kontak rem dengan pasangannya (cakram/drum) pada kecepatan relatif, gesekan terjadi dan partikel ini yang menahan kecepatan relatif sehingga menyebabkan efek pengereman.

Tabel 1 Alternatif bahan abrasif untuk rem komposit

Material	Keterangan						
Oksida aluminium	Dalam bentuk hindratnya ditambahkan sebagai pelapis, untuk ketahanan aus.						
Oksida besi	Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) dan magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) dapat berfungsi sebagai mild abrasif.						
Quartz	Partikel mineral (SiO <sub>2</sub> ).						
Silica	Ditambahkan dalam bentuk alami maupun sintetis.						

Rentang presentase bahan abrasif ini dalam komposisi rem komposit adalah kisaran 10% sampai 20%.

# Friction Modifier

Fungsi dari komponen ini adalah mengatur besarnya

koefisien gesek rem komposit. Contohnya adalah material berbasis besi, Fe, cenderung memiliki koefisien gesek lebih rendah dibandingkan material yang berbasis, Cu. Tabel 2 berikut ini adalah alternatif material yang digunakan sebagai bahan *friction modifier*.

Rentang presentase bahan *friction modifier* dalam komposisi rem komposit ini adalah kisaran 0-5%.

Tabel 2 Alternatif bahan friction modifier

Material	Keterangan		
"Friction dust"	Pada umumnya terdiri dari resin yang telah diproses, dan berfungsi untuk membantu proses dispersi partikel[Nicholson].		
Karbon (grafit)	Murah dan banyak digunakan; tingkat gesekan dipengaruhi oleh kelembaban dan strukturnya; dapat terbakar pada suhu di atas 700°C; [Nicholson].		
Oksida logam	Magnetit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> dapat meningkatkan koefisien gesek pada keadaan dingin,; ZnO untuk fungsi lubrikasi; Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> berfungsi untuk meningkatkan koefisien gesek[Nicholson].		
Mineral filler	mullite, kyanite, sillimanite digunakan untuk mengontrol koefisien gesek dan berfungsi juga untuk mengotrol keausan yang terjadi[Hooton].		
Molybdenum disulfida	Pelumas layer-lattice-type yang umum digunakan[Spurr].		

# Matriks

Bahan ini ditambahakan sebagai pengikat yang efektif untuk komponen penyusun lainnya. Bahan ini sanagt berpengaruh terhadap performansi rem seperti koefisien gesek, ketahanan terhadap keausan, ketahanan panas dan lain-lain. Rentang presentase bahan matriks ini dalam komposisi rem komposit adalah kisaran 5% sampai 15%. Alternatif material yang berfungsi sebagai *matrix* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Alternatif bahan untuk matriks

Material	Keterangan			
Paduan logam Cu, Fe, Ni	Serbuk logam dengan titik leleh sedang kadang digunakan untuk pengaturan koefisien gesek dan mengurangi inklusi logam.			
Resin Phenol	Phenol memiliki ketahanan panas yang baik.			
Resin yang dimodifikasi	Cresol, epoxy, cashew, PVB dan lain-lain.			

## Penguat

Bahan ini berfungsi untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan maupun kekakuan dari material komposit secara keseluruhan. Alternatif material yang bisa digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. Rentang presentase bahan penguat dalam komposisi rem



komposit adalah kisaran 35% sampai 45%.

Tabel 4 Alternatif bahan untuk penguat

Material	Keterangan				
Glass fibre	Serat gelas biasa, baik dalam bentuk <i>chopped</i> maupun <i>flakes</i> dan disebarkan untuk menaikkan kekuatan tarik/bending dari rem. Relatif murah dan tersedia				
Kevlar	Lebih kuat dan ulet dibanding serat gelas, dengan ketahanan terhadap temperatur tinggi yang lebih baik. Material ini tergolong mahal.				

#### Pengisi

Pengisi ditambahkan untuk menjaga komposisi keseluruhan material. Material pengisi dapat berupa logam dan paduannya, keramik dan matrial organik. Alternatif material yang bisa digunakan adalah sebagai berikut. Rentang presentase bahan pengisi ini dalam komposisi rem komposit adalah kisaran 5% sampai 15%.

Tabel 5 Alternatif bahan untuk pengisi

Material	Keterangan				
Antioksidan	berfungsi untuk menjaga ketebalan lapisan oksida pada blok rem pesawat.				
Asbestos	Filler yang umum digunakan pada rem kompostit tetapi bersifat racun sehingga akhir-akhir ini dilarang penggunaannya.				
Barium sulfat	Dapat meningkatkan kerapatan massa rem komposit serta dapat meningkatkan ketahanan aus rem komposit.				
Cashew nut shell oil	Mengurangi suara yang dihasilkan pada saat pengereman.				
Cotton	Fiber yang diperkuat untuk matriks.				
Karet, nitrile	Karet berfungsi untuk mengurangi kekerasan rem komposit serta untuk meningkatkan kualitas kontak rem.				

## 2.2 Pengujian Material

Pengujian rem komposit bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dari bahan yang penting untuk mengetahui performa dari material komposit diantaranya pengukuran dimensi utama, pengujian koefisien gesek, pengukuran berat jenis, pengujian kekerasan, pengujian kekuatan tekan (crush strength) dan modulus elastisitas, pengujian kekuatan lentur (cross breaking strength), pengujian kekuatan geser (shear strength), pengujian konduktivitas termal dan ketahanan panas. Pengujian yang dilakukan mengacu pada standar yang berlaku, berikut ini adalah standar yang digunakan untuk setiap pengujian.

**Tabel 6** Jenis pengujian dan standar acuan [7]

No.	Jenis Pengujian & Pengukuran	Standar acuan
1	Pengukuran densitas	ASTM D792
2	Pengujian koefisien gesek	ASTM D3702,
		SAE J661
3	Pengujian kekerasan	ASTM D785
4	Pengujian Ketahanan geser	ASTM D732
5	Pengujian Tekan	ASTM D695
6	Pengujian bending	ASTM D790
7	Pengujian konduktivitas termal	ASTM D177

# 2.3 Pengembangan Alat Uji Gesek

Dalam penelitian oleh Puja dan tim [7], sudah dilakukan dibuat alat uji gesek untuk mengukur koefisien gesek rem komposit. Alat uji gesek ini mengacu pada standar ASTM D3702 sesuai dengan acuan standar yang digunakan. Gambar 2 menunjukkan alat uji gesek yang telah dibuat dan dipakai untuk pengujian koefisien gesek pada penelitian sebelumnya [7].



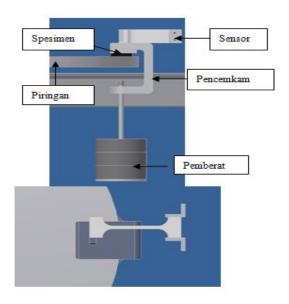
Gambar 2 Alat uji gesek yang dibuat [7]

Selama dioperasikan, tercatat beberapa hal yang perlu diperbaiki, antara lain: Getaran pada lengan beban dan counterweight mengganggu pengukuran; penumpu kurang kokoh dan memiliki kelonggaran; Posisi lengan ukur yang kurang tegak lurus mengakibatkan ketidakakuratan pengukuran; Piringan telah mengalami keausan, sehingga mengalami ketidakrataan permukaan akibat bantalan yang tidak mapan mencapai 0,24 mm.

Untuk itu diperlukan modifikasi, antara lain yang telah dikerjakan adalah pada mekanisme pembebanan dan sensor gaya geser. Sebelumnya mekanisme pembebanan menggunakan lengan beban dengan tumpuan yang kurang kokoh. Terlihat selama pengujian, sering terjadi getaran yang menyebabkan fluktuasi yang signifikan pada pengukuran gayanya. Maka, telah dirancang mekanisme pembebanan



langsung dengan struktur yang lebih kokoh serta kontak antara spesimen dengan piringan yang lebih pasti. Selain itu, rancangan sensor yang tadinya menggunakan pelat C diganti dengan rancangan berbentuk pelat bending.Mekanisme pembebanan yang langsung memiliki konsekuensi beban yang lebih besar. Namun dengan ruang yang ada, dengan sedikit modifikasi pada struktur utama, hal ini dapat diatasi.



Gambar 3 Konsep modifikasi pada mekanisme pembebanan dan sensor



Gambar 4 Hasil modifikasi mekanisme pembeban

# 3. Metodologi Perancangan Rem

## 3.1 Optimasi Perancangan

Saat ini, pemilihan komposisi material penyusun rem secara konvensional dilakukan by trial berdasarkan

pengalaman pribadi seorang ahli. Dengan bertambahnya pengalaman, biasanya pemilihan akan lebih tajam. Namun, penelitian dan pengembangan semacam itu, biasanya sangat tergantung kepada ahli tersebut. Terlebih lagi, untuk pengembangan produk baru, kegiatan penelitian dan pengembangan akan memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit, karena kurang sistematisnya kegiatan tersebut. Untuk itu, diusulkan pemanfaatan metodologi perancangan yang lebih sistematis. Secara garis besar, proses perancangan yang sistematis yang dimaksud diawali dengan pemahaman yang baik mengenai aplikasi material gesek, sehingga dapat digunakan untuk menyusun kriteria perancangan (Design Needs atau Design Requirement & Objectives). Kriteria tersebut selanjutnya akan diubah menjadi sekumpulan persamaan matematis yang merupakan hubungan eksplisit/implisit antara peubah perancangan dan output. Peubah (variable) perancangan didefinsikan dari pemahamaan sistem sebelumnya, berikut batasbatas kelayakan peubah tersebut. Boleh jadi, pemahaman persoalan juga dapat menghasilkan batasan perancangan (constraint).

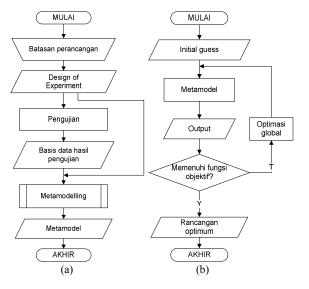
Proses perancangan mencari sekelompok parameter rancangan yang dapat memberikan solusi optimum berdasarkan kriteria perancangan yang telah ditentukan di atas. Dengan formulasi persoalan perancangan secara numerik, maka proses optimasi ini dapat diselesaikan secara numerik juga. Proses optimasi ini memerlukan iterasi yang melibatkan penentuan parameter output sebagai fungsi dari parameter input guna mengevaluasi kriteria perancangan. Dalam perancangan geometri, hubungan antara input dan output dapat disusun secara matematis, atau melalui analisis numerik lanjut seperti analisis elemen hingga. Dalam kasus lain, seperti perancangan rem ini, hubungan antara input dan output perancangan diperoleh dengan pendekatan empirik melalui pengujian yang memakan waktu lama. Sehingga, untuk proses optimasi iteratif yang melibatkan evaluasi hubungan input-output yang memakan waktu yang lama, diperlukan metodologi optimasi global yang lebih efisien.

## 3.2 Perancangan Berbasis Data

Untuk mengatasi permasalah optimasi di atas, maka diusulkan metodologi optimasi dengan melibatkan basis data (knowledge based design) [2]. Metodologi ini mencoba mengatasi lamanya proses evaluasi dengan metamodelling berdasarkan basis data perancangan. Metamodel adalah model dari model, yang merupakan model penyederhanaan dari hubungan antara input dan output perancangan. Dengan model yang jauh lebih sederhana ini, proses optimasi numerik akan berlangsung lebih cepat. Metodologi perancangan berbasis data terdiri dari dua tahap besar, yaitu tahap penyusunan basis data dan tahap aplikasi dalam perancangan, seperti dapat dilihat pada Gambar 5.



Dalam penelitian ini, tahap pertama dari metodologi ini dilakukan dengan penyusunan basis data, yang terdisi dari pasangan parameter input dan output perancangan, yang diperoleh dari serangkaian pengujian. Parameter input berupa komposisi masing-masing material penyusun seperti dijelaskan pada sub bab 2.1, sementara itu, parameter output berupa sifat-sifat material, antara lain koefisien gesek, kekuatan tekuk dll, seperti dijelaskan pada sub bab 2.2.



Gambar 5 Metodologi perancangan berbasis data: a) tahap penyusunan basis data, b) aplikasi dalam perancangan

**Tabel 7** Hasil pengujian rem komposit dari penelitian sebelumnya [7]

Prototipe	Koefisien Gesek	Kekuatan Tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)
A	0,147	34,67	24,32
В	0,191	30,26	22,48
С	0,222	29,45	16,77
K	0,189	58,71	24,14
L	0,248	44,89	20,17
M	0,218	58,65	26,27
N	0,144	58,71	32,56

Sebelumnya, beberapa spesimen telah dibuat dan diuji oleh peneliti dan peneliti lain di ITB [7], dengan hasil seperti ditampilkan pada Tabel 7. Karena penelitian tersebut dibiayai oleh perusahaan dan akan dikembangkan dalam prototipe, maka komposisi material tidak dapat dipublikasikan. Data ini akan dipakai sebagai basis data awal.

Pada penelitian ini, kegiatan sejenis akan

dilanjutkan. Untuk teknik sampling akan digunakan metode yang lebih sistematis, yaitu *Latin-Hypercube Sampling* (LHS) [8]. Metode ini dapat mendefinisikan distribusi titik sampel yang akan menghasilkan titik sampel secara acak. Metode ini dipilih karena mampu menjamin distribusi titik sampel yang seragam untuk setiap variabel perancangan. Jika *n* adalah jumlah sampel yang diinginkan, dan *k* adalah jumlah variabel acak. Ruang sampel menjadi *k* dimensi. Matriks *P*, *n* x *k*, dimana tiap kolom *k*, adalah permutasi acak dari 1,....,*n* dan ditentukan matriks *R*, *n* x *k*, yaitu jumlah acak *independent* dari distribusi seragam. Maka elemen matriks sampel *V* adalah[5],

$$\overline{V}_{ij} = F^{-1} \left( \frac{P_{ij} - \overline{R}_{ij}}{n} \right) \tag{1}$$

dimana  $F^{-1}$  adalah invers dari fungsi distribusi kumulatif target. Tiap baris pada matriks V akan berisi *input* untuk satu komputasi deterministik. Karena tiap *interval* hanya diisi oleh satu titik sampel, metode ini mencegah terjadinya pengelompokan titik sampel.

Pada tahap awal penelitian ini, sampling parameter input dilakukan menggunakan metode LHS yang menghasilkan komposisi beberapa material penyusun terpilih seperti pada Tabel 8.

## 4. Tahap Selanjutnya

Untuk tahap awal, berdasarkan 20 sampel parameter input basis data hasil sampling menggunakan metode LHS seperti pada tabel Tabel 8 di atas, selanjutnya akan dibuat spesimen uji dengan parameter produksi yang sementara dibuat identik. Prosedur pembuatan spesimen adalah secara garis besar adalah sbb.

- 1. Pencampuran material penyusun secara merata sesuai komposisi yang diatur dengan metode LHS
- 2. Untuk setiap komposisi material rem, campuran yang masih berupa serbuk diberi penekanan awal pada temperatur kamar hingga terbentuk padatan. Pada tahap ini, material belum terikat kuat.
- 3. Selanjutnya, penekanan dilakukan kembali kali ini dengan aplikasi temperatur tinggi, sesuai temperatur *curing* resin serbuk.
- Aplikasi penekanan pada temperatur tinggi dilakukan pada waktu tertentu untuk memastikan seluruh titik pada spesimen mencapai temperatur curing.
- 5. Setelah beberapa lama, spesimen telah mencapai kondisi yang stabil.

Tabel 8 Komposisi masing-masing material penyusun rem komposit hasil sampling menggunakan LHS (dalam %)



	Phenolic						
No.	Resin	CaCO3	Aluminium Oxide	Graphite	Glass Fibre	Ferrum	Barrium Sulfat
1	9,15	27,05	16,16	0,99	36,78	4,08	5,78
2	6,86	23,96	17,34	1,49	37,31	1,11	11,92
3	10,69	24,09	11,63	1,93	44,59	0,33	6,75
4	6,64	25,30	12,83	1,11	42,58	2,02	9,52
5	5,80	23,14	18,01	3,69	36,02	1,31	12,04
6	10,92	22,82	13,88	2,10	38,27	3,65	8,36
7	7,67	19,42	16,85	3,61	38,09	1,92	12,44
8	10,54	21,98	16,83	3,73	37,39	0,04	9,50
9	6,71	22,53	11,98	2,88	47,02	0,78	8,11
10	14,58	21,52	16,91	0,06	37,37	3,19	6,37
11	12,39	20,78	11,04	4,29	40,96	1,58	8,96
12	9,15	28,24	15,48	0,57	38,84	2,80	4,92
13	9,49	24,34	14,31	3,07	34,42	0,73	13,64
14	12,87	19,94	11,46	2,57	41,59	4,53	7,04
15	11,48	20,84	17,65	3,64	31,81	2,13	12,43
16	13,09	26,21	12,46	2,29	35,75	2,53	7,68
17	9,54	24,79	14,60	2,73	33,89	3,94	10,51
18	5,15	26,20	13,70	1,42	36,69	3,10	13,74
19	6,72	24,39	12,31	4,31	39,03	3,22	10,02
20	8,77	29,49	10,03	0,44	36,66	4,48	10,13

Setelah keduapuluh spesimen dibuat, serangkaian pengujian material dilakukan, dimulai dengan uni koefisien gesek, kekuatan tarik melalui uji tekuk, dan kekuatan tekan melalui uji tekan. Hasil pengujian ini berikut input parameter berupa komposisi material penyusun akan membentuk basis data perancangan, sebagai modal perancangan berbasis data. Untuk menghubungkan kedua pasangan parameter tersebut, metamodelling dilakukan dengan hasil parameter penghubung yang mewakili basis data dari hasil pengujian tersebut. Prosedur validasi perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi metamodel sebelum diterapkan pada tahap perancangan.

Setelah mencapai tingkat akurasi tertentu, tahap berikutnya adalah tahap perancangan. Kriteria perancangan ditentukan dan diterjemahkan ke dalam formulasi optimasi. Dengan memanfaatkan basis data perancangan melalui metamodel yang telah dibuat, optimasi global dilakukan. Metodologi ini akan diterapkan untuk penyelesaian beberapa studi kasus rem komposit misalnya rem untuk kereta api, rem untuk kendaraan bermotor jenis rem cakram maupun rem tromol, untuk motor maupun mobil.

## 5. Rangkuman

Material gesek termasuk rem saat ini umumnya telah memakai material komposit, yaitu material yang terdiri dari 2 atau lebih material penyusun untuk mendapatkan kombinasi sifat-sifat material yang diinginkan. Dengan pengetahuan mengenai pengaruh masing-masing material secara ekasak yang tidak tersedia, perancangan material gesek sebelumnya dilakukan secara coba-coba berdasarkan pengetahuan kualitatif terbatas. Metodologi perancangan yang menggabungkan antara numerikal dan eksperimental diusulkan, berdasarkan metodologi perancangan berbasis

data (knowledge-based design). Pada makalah ini, tahap awal penelitian telah dilakukan dalam hal-hal:

- Studi literatur mengenai material penyusun rem komposit
- Modifkasi alat uji koefisien gesek, berupa mekanisme pembebanan dan sensor gaya gesek
- 3. Penyusunan sampel parameter input menggunakan teknik *Latin-Hypercube Sampling* (LHS)

Selanjutnya, penelitian akan dilanjutkan ke tahap pengujian untuk memperoleh sifat-sifat material sebagai parameter output untuk selanjutnya digabungkan dengan parameter input menjadi basis data perancangan. Jika basis data telah memadai, maka penelitian akan dilanjutkan untuk tahap kedua dari metodologi perancangan berbasis data, yaitu aplikasi perancangan, dengan melibatkan algoritme optimasi global.

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh ITB dalam skema Riset KK, dengan kontrak No. 0180/K01.20/PL/2010. Untuk itu segenap peneliti mengucapkan penghargaan sebesarbesarnya.

# **Daftar Pustaka**

- [1] CENTER FOR ADVANCED FRICTION STUDIES Research Areas, Southern Illinois University, http://frictioncenter.siu.edu/rArea2. html, 2005
- [2] Setiawan, R., S Syngellakis, M Hill, A Metamodeling Approach to Mechanical Characterization of Anisotropic Plates, Journal of Composite Materials, Vol. 43, No. 21, 2009
- [3] Idris, M., R Setiawan, D Lim, YS Ong, Geometry Selection of Orthodontic Retraction Spring Using Global Optimization Method, Proc. Regional Conf. on Mechanical and Aerospace Tech., Bali, February



- 9 10, 2010.
- [4] Setiawan R, D.Y. Sari, Knowledge-based design of impact energy absorbing modules: Finite element modelling, Proc. The 5th International conference on Numerical Analysis in Engineering 2007, Padang, May 2007.
- [5] Wang, G.G., Adaptive Response Surface Method Using Inherited Latin Hypercube Design Points, Journal of Mechanical Design, Vol. 125, 2003.
- [6] Wang, G.G. and S. Shan, Review of Metamodelling Techniques in Support of Engineering Design Optimization Journal of Mechanical Design, 2006.
- [7] LAPI ITB, PT Kereta Api Indonesia, Studi, Penelitian, Pengembangan dan Implementasi Material Komposit untuk Blok Rem Kereta Api. 2005.
- [8] Kleijnen, J., Statistical Tools for Simulation Practitioners. 1987, New York: Marcel Dekker.

