

## M2-012 Pengembangan Awal Rancang Bangun Pegas Udara untuk Isolator Getaran

**Ignatius Pulung Nurprasetio dan Wishnu Purwadi**

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia  
E-mail: ipn@labsurya.ms.itb.ac.id

### ABSTRAK

*Pegas udara merupakan produk teknologi yang bernilai ekonomi tinggi. Makalah ini memaparkan proses rancang bangun pegas udara untuk isolator getaran. Sebagai studi kasus, diteliti fasilitas gas turbine test bench di PT. Turbindo Chikara Surya, Rancaekek, Bandung. Hasil penelitian menyatakan bahwa perangkat yang sesuai adalah pegas udara dengan pengatur ketinggian (air spring with height control). Bagian yang dikembangkan di penelitian ini hanyalah komponen pegas udara. Dari empat desain yang dihasilkan, dipilih alternatif desain dengan konstruksi up-side down tanpa penahan internal. Prototipe pegas udara dirancang dengan memerhitungkan kemampuan manufaktur industri lokal supaya bisa dikembangkan lebih lanjut pada masa mendatang. Setelah prototipe berhasil diproduksi, dilakukanlah pengujian. Untuk menguji pegas udara, dilaksanakan uji sederhana dengan membandingkan level getaran di landasan akibat pengoperasian kompresor torak berpenggerak motor listrik yang diletakkan di lantai dan yang diletakkan di atas pegas udara. Perbandingan sinyal getaran baik domain waktu maupun domain frekuensi dengan skala linier menunjukkan penurunan level getaran yang cukup signifikan dengan pemanfaatan pegas udara. Hasil yang menggembirakan ini mengindikasikan potensi desain pegas udara untuk dikembangkan lebih lanjut sampai menjadi produk komersial.*

*Kata kunci: pegas udara, isolasi getaran, desain*

### ABSTRACT

*Air spring is a relatively advanced device with high economic value. This paper presents the design and manufacturing of air spring as a vibration isolation device. As a case study, we studied the gas turbine test bench at PT. Turbindo Chikara Surya, Rancaekek, Bandung. Upon inspection and pre-analysis, it is revealed that the most appropriate vibration isolator is the air spring with height control. In this research, we merely concentrate on the air spring component of the device. After performing conceptual design stage, out of four alternatives, the up-side down construction without internal stopper is selected. As a continuation, a prototype was manufactured and tested. To check the prototype, we measure the vibration acceleration of the base as we operate an air compressor. In this case, we compare the vibration level at the base as we operate the compressor directly on the floor and as we put the compressor on top of the air spring. Measurement data showed that the vibration level in time and also frequency domain dropped off significantly upon the introduction of the air spring prototype as a vibration isolator. This promising result promotes further research to reach the goal of developing a commercial product.*

*Keywords: air spring, vibration isolation, mechanical design*

## 1. Pendahuluan

2.

Pegas udara (*air spring* atau *pneumatic isolator*) merupakan produk teknologi yang bernilai ekonomi tinggi. Jumlah kebutuhan akan pegas udara memang tidak tinggi, tetapi mengingat kepentingan, fungsi, kompleksitas desain dan manufakturnya, harga produk menjadi sangat tinggi. Dari sisi rancang bangun, pegas udara termasuk produk berteknologi tinggi. Di antara sekian banyak pemanfaatan pegas udara, salah satu yang spesifik di industri adalah di anjungan pengujian mesin (*engine test cell platform*) baik untuk motor bakar maupun turbin gas.

Kepentingan pegas udara di anjungan pengujian adalah untuk mengisolasi getaran supaya tidak diteruskan ke lingkungan dan orang yang ada di sekitar peralatan. Dari sisi kesehatan dan keselamatan kerja, lingkungan dekat anjungan uji turbin gas atau motor bakar adalah tempat yang panas, bergetar, sangat bising, dan berpotensi membahayakan barang atau orang di sekitarnya. Getaran yang dirambatkan ke lingkungan dapat menurunkan umur teknis peralatan uji dan juga struktur di sekitar anjungan uji [1]. Untuk menihilkan efek getaran, anjungan wajib ditumpu dengan isolator getaran [2, 3]. Meski demikian, masih diperlukan sistem yang lain (yang lebih kompleks) untuk mengisolasi kebisingan. Hal yang disebut terakhir merupakan kompetensi ahli akustik sehingga tidak dibahas di makalah ini.

Cara termurah untuk mengisolasi (mengurangi daya rambat) getaran adalah dengan meletakkan anjungan uji (turbin gas atau motor bakar) di atas landasan balok beton pra tekan yang dibenamkan di kolam pasir. Isolasi getaran diperoleh dengan memanfaatkan massa seismik yang besar di atas landasan yang (relatif) lunak, sehingga transmisibilitas mencapai harga minimum [4, 5]. Kekurangan cara di atas adalah bahwa pasir tempat bertumpu balok beton dan anjungan uji lama kelamaan akan memadat sehingga efektivitas isolasi berkurang.

Selain dengan massa seismik yang dibenamkan di kolam pasir, isolasi getaran dapat juga dihasilkan dengan menempatkan banyak pegas ulir (*bed of springs*) di bawah anjungan [3]. Solusi ini juga relatif murah, meski pemasangan dan penentuan k pegas perlu dilakukan dengan seksama agar frekuensi pribadi sistem masih lebih rendah dibanding frekuensi gaya dinamik. Kekurangan cara ini adalah kekakuan landasan pegas ulir tak dapat divariasikan sehingga jangkauan frekuensi operasi mesin menjadi terbatas.

Metode yang lebih baku di industri adalah dengan menempatkan isolator getaran berupa pegas udara (*air spring with height control* atau *pneumatic isolator*) di antara landasan dan anjungan uji [6, 7]. Hanya saja mengingat kecanggihan desain dan pembuatannya, pegas udara harganya mahal. Hal ini lah yang memicu penelitian di bidang rancang bangun pegas udara, khususnya yang bisa dimanfaatkan sebagai isolator getaran di anjungan uji untuk turbin gas.

Makalah ini memaparkan upaya penelitian yang dilakukan di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara (FTMD) – Institut Teknologi Bandung (ITB) dalam penguasaan rancang bangun pegas udara. Uraian dimulai dengan pendahuluan yang memuat latar belakang dan tujuan penelitian. Selanjutnya, bab 2 membahas tentang landasan teoretik perihal isolasi getaran dan telaah pustakan, bab 3 menguraikan proses desain dan sedikit ulasan tentang segi manufaktur, bab 4 membahas tentang pengujian prototipe yang sudah dihasilkan, dan akhirnya bab 5 menyajikan kesimpulan.

### 3. Landasan Teoretik dan Telaah Pustaka

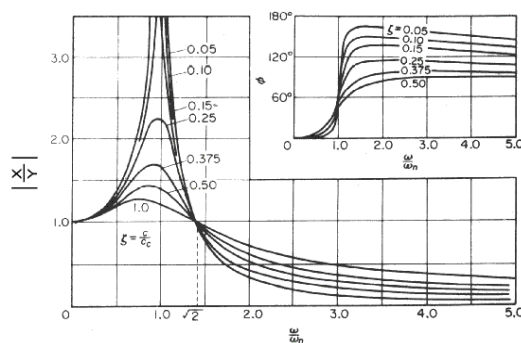
Seperti telah dikemukakan, isolator getaran bertujuan untuk mengurangi daya rambat getaran dari sumber ke sekeliling. Dengan perkataan lain, isolator getaran merupakan sejenis penapis mekanik (*mechanical filter*). Literatur [2 – 7] menyebutkan bahwa relasi antara gaya yang dirambatkan dengan gaya eksitasi dinamik dari sumber, lazim disebut sebagai faktor ‘transmisibilitas’ TR dapat dituliskan sebagai:

$$TR = \left| \frac{F_T}{F_D} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{[1 - r^2]^2 + (2\zeta r)^2}} = \left| \frac{X}{Y} \right| \quad (1)$$

dengan:

- TR: faktor transmisibilitas
- $F_T$ : amplitudo gaya yang dirambatkan atau ditransmisikan [N]
- $F_D$ : amplitudo gaya dinamik yang berasal dari anjungan uji [N]
- X: amplitudo perpindahan anjungan [m]
- Y: amplitudo perpindahan landasan [m]
- $\zeta$ : bilangan nisbah redaman (*damping ratio*)
- $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ : nisbah frekuensi eksitasi,  $\omega$ , terhadap frekuensi pribadi terendah sistem,  $\omega_n$ .

Dalam bentuk grafik, faktor transmisibilitas sebagai fungsi nisbah frekuensi dapat disajikan sebagai berikut:



Gambar 1. Kurva transmisibilitas sebagai fungsi nisbah frekuensi

Dari Gambar 1, dapat ditelaah bahwa gaya yang dirambatkan berubah sebagai fungsi frekuensi. Pada gambar, terlihat bahwa faktor transmisibilitas akan besar sekali untuk  $r = 1$  (kondisi resonansi) dan  $r < \sqrt{2}$ . Untuk harga  $r > \sqrt{2}$ , harga transmisibilitas akan turun seiring dengan naiknya harga  $r$ . Jadi, kalau sistem dioperasikan jauh di atas frekuensi pribadi, transmisibilitas dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu, grafik juga menyatakan bahwa makin besar nisbah redaman, yang menyatakan adanya efek peredaman (*damping*), transmisibilitas akan makin besar. Oleh sebab itu, konfigurasi isolator getaran yang baik adalah bahwa redaman harus sekecil mungkin dan frekuensi pribadi sistem harus sekecil mungkin. Karena umumnya anjungan uji dan peralatan yang ada di atasnya (motor bakar atau turbin gas) cukup besar massanya, frekuensi pribadi sistem relatif sudah rendah nilainya, sesuai

rumusan  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  [rad/s], dengan k: kekakuan isolator [N/m], m: massa efektif sistem di isolator [kg] [4, 5]. Dengan mengatur kekakuan, bisa diupayakan bahwa sistem akan bekerja di rentang frekuensi yang tinggi atau harga r jauh lebih besar dari  $\sqrt{2}$ .

Kekakuan pegas udara,  $k_{\text{air spring}}$  dalam N/m secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$k_{\text{air spring}} = \frac{pA^2}{V} \quad (2)$$

dimana p menyatakan tekanan udara [Pa], A luas penampang [ $\text{m}^2$ ], dan V volume udara [ $\text{m}^3$ ]. Bertolak dari Pers. (2), dimensi utama pegas udara dapat ditentukan.

Ada tiga jenis pegas udara yang diproduksi secara massal. Jenis pertama, *elastomeric bellows*, bentuknya seperti tabung dengan dinding membulat dari karet. *Elastomeric bellows* umumnya digunakan di bus ukuran besar. Tekanan dalam *bellows* konstan, sehingga kekakuannya tak dapat diubah-ubah. Jenis yang kedua adalah *pneumatic elastomer* atau *pneumatic mounts*. Bentuknya seperti balok karet sebagaimana lajimnya *engine mounting*, dengan rongga berisi udara tekan di bagian tengah. Dari bentuknya, bisa diperkirakan bahwa pemanfaatannya adalah sebagai penyangga mesin. Sama halnya dengan *bellows*, kekakuan *pneumatic mounts* tak dapat diubah-ubah. Jenis ketiga adalah yang paling kompleks, yakni *pneumatic spring with height control*. Pegas udara jenis ini memiliki sistem kendali jerat tertutup yang bisa menjaga tekanan udara supaya konstan. Selain itu, tekanan dapat disetel pada harga tertentu sehingga kekakuan pegas udara dapat diubah-ubah dengan mudah sesuai kebutuhan.



Gambar 2. Pegas udara yang diperlengkapi dengan katup servo-pneumatik [6].

Saat dipasang, pasokan udara tekan dari kompresor diatur dengan sistem kendali jerat tertutup, sehingga tinggi pegas dan kekakuan dapat diubah-ubah dengan leluasa. Jenis yang terakhir inilah yang akan dibuat prototipenya dalam penelitian ini.

## 4. Perancangan dan Pembuatan Pegas Udara

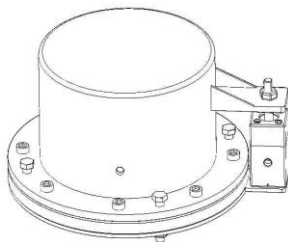
Berpedoman pada informasi baik berupa gambar maupun produk *pneumatic isolator* yang dapat ditemui, dibuatlah konsep awal pegas udara dengan metode stimulasi kreativitas yang disebut *brain sketching* [8]. Untuk menentukan dimensi pegas udara dan komponennya, digunakan *gas turbine test bench* di PT Turbindo Chikara Surya, Rancaekek, Bandung. Daya yang diperoleh menyebutkan bahwa massa total anjungan uji (alas, turbin gas, dan dinamometer) adalah 18,5 metric ton. Kecepatan putar turbin gas antara 10000 – 15000 rpm. Untuk menumpu anjungan, diperkirakan akan dibutuhkan sejumlah pegas udara.

Mengingat penelitian ini merupakan langkah awal pengembangan rancang bangun pegas udara dan juga berbagai keterbatasan baik dari segi pemahaman maupun ketersediaan bahan serta komponen, prototipe dirancang dengan mengacu pada *design requirements and objectives* (DR&O) sebagai berikut [1]:

Kriteria *must*: dapat menopang beban hingga  $\pm 5$  metric ton atau 5000 kg, ketinggian dapat diatur secara manual dengan katup sederhana, dapat mengisolasi getaran, komponen tahan hingga tekanan maksimum 10 bar, dapat diproduksi dengan memanfaatkan bahan dan komponen yang tersedia, serta memenuhi prinsip *fail-safe design*.

Kriteri *wish*: estetika produk baik, pembuatannya murah, dan perawatannya mudah.

Bertolak pada DR&O di atas dan hasil proses galang gagasan dengan *brainsketching*, dihasilkan empat alternatif desain. Dengan memerhitungkan segi fungsi yang meliputi: stabilitas, frekuensi pribadi, toleransi beban lebih, faktor keamanan, segi manufaktur yang meliputi: material, produksi, perakitan, segi konstruksi yang meliputi: keringkasan (*simplicity*), jumlah komponen, kompleksitas, kekuatan, dan segi perawatan, diputuskan dengan bantuan matriks seleksi Pugh [1] bahwa yang terbaik adalah alternatif desain ketiga (A3) seperti tersaji di Gambar 3.

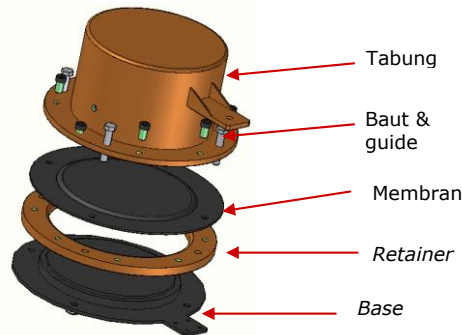


Gambar 3. Alternatif desain pegas udara, A3, dengan konstruksi *up-side down* tanpa *internal stopper* yang dipilih untuk direalisasikan.

Rincian komponen utama pegas udara disajikan di Gambar 4.

Untuk manufaktur, prototipe diproduksi di bengkel Laboratorium Mekanika dan Konstruksi Mesin, FTMD-ITB. Komponen tabung, *guide*, *retainer*, dan *base* dibuat dari baja karbon rendah St.37, komponen membran dan perapat (*seal*) dibuat dari karet, katup pengatur ketinggian dari dural, dan *bushing* dari kuningan. Proses manufaktur yang digunakan semuanya konvensional yang meliputi antara lain proses bubut, gurdi, freis, dan las. Tegangan di beberapa komponen utama seperti tabung diperiksa untuk memastikan bahwa tegangan yang terjadi masih jauh di bawah kekuatan material.

Bagian yang sulit dianalisis seperti kekuatan perapat dan membran karet akan diuji secara empiris saat pengujian prototipe.



Gambar 4. Bagian-bagian utama pegas udara

Setelah semua komponen selesai dibuat dan dicat, dilakukan proses perakitan yang hasil akhirnya adalah prototipe pegas udara seperti tersaji di Gambar 5.



Gambar 5. Prototipe pegas udara yang sudah dihasilkan

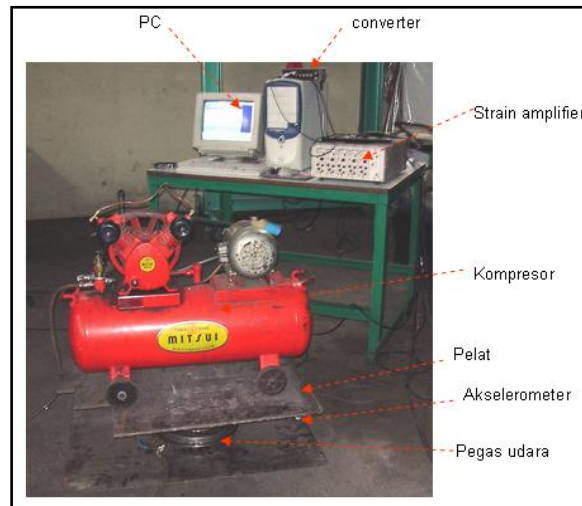
Dengan diameter dalam tabung utama sebesar 280 mm (tebal dinding 10 mm), pada tekanan 10 bar (atau  $10 \text{ kg/cm}^2$ ), pegas udara dapat menahan beban *pay load* sebesar 6,2 metrik ton. Diameter alas prototipe adalah 350 mm dan tinggi keseluruhan pegas udara adalah 220 mm. Dengan demikian, secara teoretik, prototipe sudah memenuhi DR&O yang telah ditetapkan sebelumnya.

## 5. Pengujian Prototipe

Mengingat prototipe yang dibuat hanya bisa tahan beban maksimal 6,2 ton dan jumlahnya hanya satu, skenario pengujian dibuat sebagai berikut:

- Sebagai sumber getaran, digunakan kompresor torak berpengerak motor listrik
- Untuk alas anjungan, dipakai baja pelat sisa pembuatan prototipe
- Tekanan di pegas udara divariasikan mulai dari 0,5 – 3 bar (meski rancangan diharapkan dapat menahan tekanan hingga 10 bar). Pada *range* tekanan di atas, *pay load* yang bisa ditanggung adalah 300 – 1800 kg.
- Efektivitas isolasi getaran dievaluasi dengan melihat keluaran sensor *accelerometer* untuk dua konfigurasi, yakni saat kompresor diletakkan di lantai begitu saja dan saat kompresor diletakkan di atas pegas udara. Untuk kedua konfigurasi, sensor getaran dipasang di lantai yang berdekatan dengan lokasi kompresor.

Dengan skenario seperti di atas, beban atau *pay load* yang harus ditanggung adalah 120 kg yang berasal dari kompresor dan alas pelat baja. *Set-up* pengujian disajikan di Gambar 6.

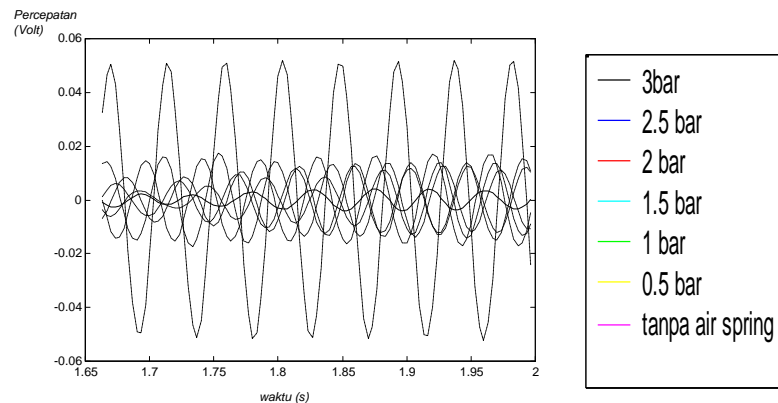


Gambar 6. Set-up pengujian prototipe pegas udara

Sensor yang digunakan adalah *piezoresistive type accelerometer* yang dilengkapi dengan *strain amplifier*. Tegangan DC yang proporsional dengan percepatan getaran direkam menggunakan kartu akuisisi data 12 bit internal yang dipasang di *desktop computer*. Proses akuisisi data dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak LABTECH®. Pengambilan data diatur pada *sampling frequency* 300 Hz dengan *cut-off frequency* yang di-set di *strain amplifier* pada 30 Hz. Pengolahan data dilakukan secara *off-line* dengan perangkat lunak FreeMat v3.6. Hasil pengolahan data yang menyatakan grafik amplitudo percepatan sebagai fungsi waktu untuk berbagai harga tekanan pegas udara disajikan di Gambar 7. Untuk pengujian, sinyal *accelerometer* tak dikalibrasi dan dikonversi dari volt menjadi  $m/s^2$  mengingat bahwa obyektif eksperimen adalah untuk melihat apakah level getaran akan turun dengan pemanfaatan pegas udara.

Dari data domain waktu, dapat dilihat bahwa secara umum, pegas udara berfungsi dengan baik karena level getaran menjadi jauh lebih rendah antara konfigurasi dengan pegas udara bila dibandingkan dengan tanpa pegas udara. Di Gambar 7, sinyal getaran untuk kasus tanpa pegas udara dinyatakan dengan garis *dash-dot* (—·—), untuk  $p = 0,5 - 2,5$  bar dengan garis terputus (—), dan untuk  $p = 3$  bar dinyatakan dengan garis tegas tak terputus.

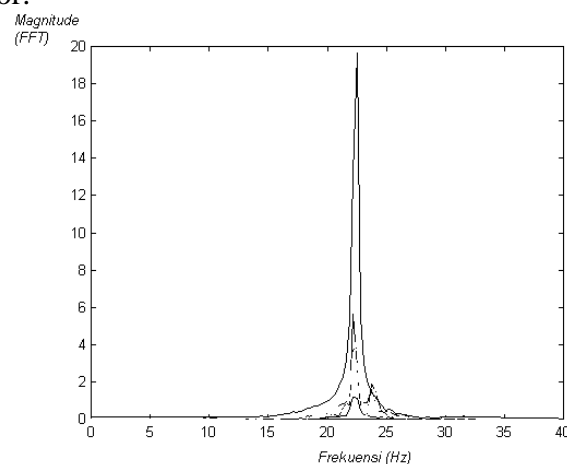
Selain itu, Gambar 7 juga menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan, efektivitas isolasi semakin baik. Hasil ini sejalan dengan landasan teoretis, Pers. (2), yang mengatakan bahwa kekakuan pegas akan meningkat secara proporsional dengan tekanan. Dengan demikian, untuk tekanan,  $p = 3$  bar, yang merupakan harga tekanan tertinggi yang diujikan, kekakuan pegas mempunyai harga tertinggi. Karena itu, harga rasio frekuensi,  $r$ , pun maksimal. Sebagai konsekuensi logis, sesuai Pers. (1) dan Gambar 1, transmisibilitas pegas udara untuk  $p = 3$  bar adalah yang terkecil.



Gambar 7.

Data domain waktu hasil pengukuran dengan sensor *accelerometer* yang diletakkan di lantai saat kompresor dioperasikan. Garis — menyatakan getaran tanpa pegas udara, garis — menyatakan getaran untuk  $p = 0,5 - 2,5$  bar, sedangkan garis tegas tak terputus adalah untuk  $p = 3$  bar.

Pengolahan lanjut dengan *fast fourier transform* atau FFT seperti tersaji di Gambar 8 menyatakan bahwa puncak amplitudo tertinggi di domain frekuensi terjadi pada frekuensi 23 Hz . Hal ini sesuai dengan teori fenomena getaran di mekanisme *slider crank* akibat gaya primer yang terjadi di 1 x rpm atau sesuai putaran kompresor.



Gambar 8.

Data domain frekuensi skala linier hasil pengukuran dengan sensor *accelerometer* yang diletakkan di lantai saat kompresor dioperasikan. Garis dengan amplitudo tertinggi menyatakan kondisi tanpa pegas udara.

## 6. Kesimpulan

Penelitian awal penguasaan rancang bangun pegas udara telah berhasil dilakukan. Upaya ini memang bukan yang pertama, meski untuk anjungan uji mesin atau *test bench*, di Indonesia belum pernah dicoba. Prototipe yang dihasilkan menunjukkan kinerja yang sangat menggembarakan dan berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Agenda penelitian selanjutnya perlu memasukkan segi uji ketahanan (*durability testing*) untuk melihat keandalan komponen terutama membran, pengembangan katup pneumatik dan sistem kendali pengatur tekanan/ketinggian, dan investigasi sekitar tinggi angkat pegas udara. Hal yang disebut terakhir memerlukan pencarian material membran



yang tepat, mengingat makin besar tinggi angkat, deformasi juga makin besar sehingga berpotensi merobek membran. Dalam hal ini, perlu dilakukan kolaborasi dengan peneliti dari bidang keahlian material karet atau polimer.

## **Ucapan Terima Kasih**

Penulis berterima kasih pada Ir. Nunang Hidayat MT dari PT. Turbindo Chikara Surya, Rancaekek, Bandung, yang sudah memberi kesempatan untuk meninjau dan mempelajari fasilitas *gas turbine test bench* yang tersedia.

## **Daftar Pustaka**

- [1.] Dieter, G., *Engineering Design – A Materials and Processing Approach*, McGraw-Hill, 1991
- [2.] Harris, C.M., and Crede, C.E. (editors), *Shock & Vibration Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, 1976
- [3.] Martyr, T, and Plint, M.J, *Engine Testing – Theory and Practice*, 3<sup>rd</sup> ed., SAE, 2007
- [4.] Thomson, W.T., *Theory of Vibration with Applications*, 2<sup>nd</sup> ed., Prentice-Hall, 1982
- [5.] Rao, S.S., *Mechanical Vibrations*, 4<sup>th</sup> ed., Prentice-Hall, 2004
- [6.] Andrews, F.J., “A Primer of Vibration Isolation”, Fabreeka International, [http://www.fabreeka.com/-tech/Primer\\_Vibr\\_Isol.pdf](http://www.fabreeka.com/-tech/Primer_Vibr_Isol.pdf), diakses Juli 2009
- [7.] Gordon, L., “Isolating unwanted vibration – isolation systems optimize manufacturing processes”, *American Machinist*, May 2005, pp. 40 – 44.
- [8.] Denny, Nuryaningsih, L., and Tandiono, *1001 Creativity in Action*, Creativity Class Term Project Report, Mech. Eng. Dept., ITB, 2003