

## STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK RESPON DINAMIK DARI MODEL *HYDRAULIC MOTOR - REGENERATIVE SHOCK ABSORBER*

Kaspul Anuar<sup>1\*</sup>, Harus Laksana Guntur<sup>2</sup>

Mahasiswa Program Magister, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember, Surabaya, Indonesia<sup>1\*</sup>  
Kaspul\_anuar\_2@yahoo.com  
Lab. Sistem Dinamis dan Vibrasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya,  
Indonesia<sup>2</sup>

### Abstrak

Menyadari besarnya energi terbuang pada gerak translasi dari suspensi kendaraan, tentunya dibutuhkan suatu alat yang mampu memanen energi terbuang tersebut. Pada penelitian ini didesainlah model alat yang disebut *Hydraulic Motor - Regenerative Shock Absorber* (HM RSA). Hasil dari desain akan disimulasikan untuk mendapatkan besaran daya yang dihasilkan dan percepatan massa sprung kendaraan terkait dalam hal kenyamanan berkendara. Karakteristik respon dinamik berupa daya bangkitan dan percepatan massa sprung didapatkan dengan mensimulasikan model dari *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* dan model seperempat kendaraan pada software Simulink Matlab. Simulasi dilakukan dengan memberikan eksitasi berbentuk periodik dan impuls. Eksitasi periodik yang diberikan bervariasi pada frekuensi 1 Hz sampai frekuensi 3.5 Hz. Sedangkan eksitasi impuls diberikan hanya pada perioda 0,71 detik. Selain variasi frekuensi pada eksitasi periodik, beban tahanan listrik pada generator juga divariasikan dengan nilai tahanan masing – masing sebesar 6 ohm, 12 ohm dan 18 ohm. Dari hasil simulasi didapatkan nilai respon percepatan massa sprung dibawah  $0.8 \text{ m/s}^2$  terjadi hanya pada frekuensi 1.4 Hz. Daya maksimum yang dihasilkan HM RSA ini terjadi pada frekuensi 3 Hz sebesar 5.93 watt. Dari simulasi dengan variasi tahanan listrik, terlihat dengan meningkatnya tahanan listrik maka akan meningkatkan nilai percepatan massa sprung dan menurunkan daya yang dihasilkan oleh suspensi HM RSA.

Kata kunci: *Hydraulic Motor - Regenerative Shock Absorber*, karakteristik respon dinamis, Percepatan massa sprung.

### 1. Pendahuluan

Pertumbuhan konsumsi energi dunia diprediksi meningkat sebesar 70 persen antara tahun 2000 sampai 2030. Sementara itu sumber energi yang berasal dari bahan bakar fosil, yang saat ini menyumbang 87,7 persen dari total kebutuhan energi dunia diperkirakan akan mengalami penurunan disebabkan tidak sebandingnya pertumbuhan penemuan cadangan energi fosil dengan pertumbuhan konsumsi energi.

Hal yang sama terjadi di Indonesia, pertumbuhan ekonomi Indonesia yang terus berkembang dari waktu ke waktu dibarengi dengan meningkatnya pertumbuhan konsumsi energi. Berdasarkan data dari Kementerian ESDM, konsumsi energi Indonesia dari tahun 2005 – 2011 meningkat

sebanyak 52,5 persen. Sebaliknya pertumbuhan cadangan sumber energi fosil bernilai negatif yaitu sebesar -13,02 persen.

Sektor transportasi dan industri merupakan dua sektor pengguna energi terbesar yang pertumbuhannya terus meningkat dari waktu ke waktu. Bila dilihat menurut sektor pengguna, telah terjadi pergeseran pangsa konsumsi energi final pada beberapa sektor seperti sektor rumah tangga, industri dan transportasi. Pangsa sektor rumah tangga yang pada tahun 2000 mencapai 38%, turun menjadi 30% pada tahun 2010 (dengan biomasa). Sebaliknya sektor industri dan transportasi naik menjadi 33% dan 23% pada tahun yang sama dari 32% dan 18% pada tahun 2000. Peningkatan konsumsi energi pada sektor transportasi yang cukup signifikan ini salah satunya disebabkan oleh kegiatan ekonomi yang

semakin meningkat khususnya industri manufaktur dan jasa yang berimbas pada mobilitas barang, jasa dan individu.

Menyadari besarnya energi terbuang yang terjadi pada kendaraan, tentunya dibutuhkan suatu alat yang mampu memanen energi terbuang tersebut sehingga konsumsi bahan bakar pada kendaraan bisa dihemat sedemikian rupa. Salah satu mekanisme alat yang bisa mengurangi loss energi yang terjadi pada kendaraan khususnya pada suspensi adalah mekanisme *regenerative shock absorber*. *Regenerative shock absorber* adalah suatu alat (suspensi) yang mampu mengubah getaran yang terjadi pada kendaraan oleh gangguan kountur permukaan jalan menjadi energi listrik (Arziti, 2010).

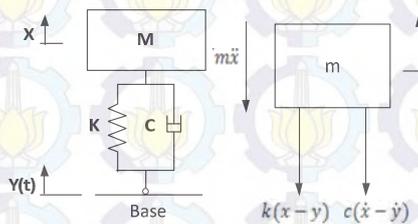
Pengembangan *regenerative shock absorber* yang dilakukan di ITS diawali dengan mekanisme yang mengubah gerak translasi pada suspensi menjadi gerak rotasi untuk memutar generator (Laksana Guntur, 2013). Setelah itu dikembangkan *regenerative shock absorber* tipe hidrolis yang memanfaatkan tekanan silinder hidrolis untuk memutar turbin, akan tetapi hasilnya belum memuaskan (Kadaryono, 2013).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka didesainlah *hydraulic motor - regenerative shock absorber*. Hasil dari desain *hydraulic motor - regenerative shock absorber* ini selanjutnya disimulasikan karakteristiknya respon getarannya terkait percepatan massa sprung dan energi bangkitan.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Motion of Base

Getaran yang terjadi pada suspensi kendaraan dapat dimodelkan seperti Gambar 1. dibawah ini.



Gambar 1. Base excitation (a) Sistem fisik base excitation (b) Free body diagram untuk sistem base excitation (Rao, 2011)

Suatu waktu sistem pegas-massa-peredam mengalami gerak harmonik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1(a). Eksitasi input  $y(t)$  menyatakan perpindahan dari base, dan  $x(t)$  menyatakan perpindahan massa dari posisi kesetimbangan statis pada waktu  $t$ . Maka perpanjangan dari pegas adalah  $(x - y)$  dan kecepatan relatif antara kedua ujung damper

adalah  $(\dot{x} - \dot{y})$ . Dari *free body diagram* yang ditunjukkan pada gambar 1 (b), didapatkan persamaan gerak:

$$k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x} \quad 1)$$

Keterangan:

- K : konstanta pegas (N/m)
- m : massa kendaraan (kg)
- x : displacement massa sprung (m)
- y : Displacement eksitasi (m)

Gaya yang diterima oleh massa sprung akibat eksitasi *base exciter* dapat di rumuskan sebagai berikut :

$$F = m\omega^2 X \sin(\omega t - \phi) = F_t \sin(\omega t - \phi) \quad 2)$$

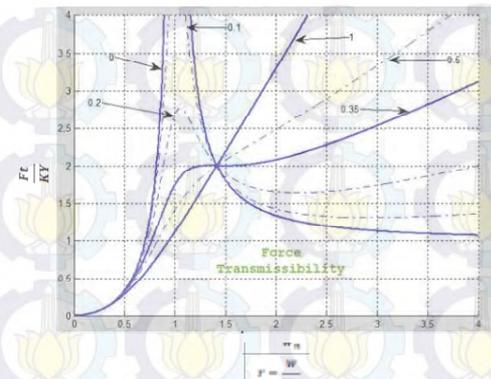
$F_t$  merupakan nilai gaya maksimum yang dieksitasi oleh *base exciter*, dimana :

$$\frac{F_t}{KY} = r^2 \left[ \frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad 3)$$

Keterangan:

- X : amplitudo kendaraan (m)
- Y : Amplitudo displacement Eksitasi (m)
- $\omega$  : Frekuensi eksitasi (rad/s)
- $\zeta$  : damping rasio
- r : rasio frekuensi
- $F_t$  : force transmissibility (N)

Berikut ini adalah grafik *force transmissibility* yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Force Transmissibility dengan Frequency Ratio (Rao, 2011)

### 2.2 Persamaan pada Mekanisme Hidrolik

#### 2.2.1. Persamaan Bernoulli

Jika di dalam sebuah pipa berdiameter dan panjang tertentu mengalir cairan dengan kecepatan tertentu maka tekanan cairan yang keluar dari pipa dan debit serta laju aliran massanya bisa dihitung. Adanya aliran di dalam

sebuah pipa menyebabkan penurunan tekanan di sisi keluar pipa. Adanya perbedaan tekanan masuk pipa dan keluar pipa dapat disebabkan oleh hambatan aliran, misalnya kekasaran permukaan dalam pipa, gesekan cairan dengan permukaan pipa, panjang pipa, diameter pipa dan kecepatan aliran. Untuk menghitung perbedaan tekanan antara sisi masuk pipa dan sisi keluar pipa sering kali menggunakan rumus Bernoulli seperti berikut ini.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + h_t \quad (4)$$

Keterangan :

- $P_1$  : Tekanan fluida di kondisi 1 (N/m<sup>2</sup>)
- $V_1$  : Kecepatan aliran fluida di kondisi 1 (m/s)
- $g$  : gravitasi bumi (9,8 m/s<sup>2</sup>)
- $\Delta Z$  : Perbedaan ketinggian antara sisi masuk dan keluar pipa (m)
- $h_t$  : Head loss total

### 2.2.2. Head Loss

Head loss adalah suatu nilai untuk mengetahui seberapa besarnya reduksi tekanan total (*total head*) yang diakibatkan oleh fluida saat melewati sistem pengaliran. *Total head*, seperti diketahui merupakan kombinasi dari *elevation head* (tekanan karena ketinggian suatu fluida), *velocity head* (tekanan karena kecepatan alir suatu fluida) dan *pressure head* (tekanan normal dari fluida itu sendiri). *Headloss* tidak dapat dihindarkan pada penerapan sistem pengaliran fluida di lapangan. *Head loss* dapat terjadi karena gesekan antara fluida dan dinding pipa. Friksi antara sesama partikel pembentuk fluida tersebut dan turbulensi yang diakibatkan saat aliran di belokkan arahnya atau hal lain seperti misalnya perubahan akibat komponen perpipaan pada bagian pemasangan antar saluran, *valve* maupun *flow reducer*. Kehilangan karena friksi/gesekan adalah bagian dari *total headloss* yang terjadi saat aliran fluida melewati suatu pipa lurus. *Headloss* pada suatu fluida pada umumnya berbanding lurus dengan panjang pipa, nilai kuadrat dari kecepatan fluida dan nilai friksi fluida yang disebut faktor friksi, dan juga nilai *headloss* berbanding terbalik dengan diameter pipa.

$$h_f = 32v \frac{L v_p}{D_p^3} + k \frac{v_p^2}{2} \quad (5)$$

Keterangan :

- $v$  : Fluid kinematic viscosity (m<sup>2</sup>/s)
- $k$  : Konstanta berdasarkan tabel

- $L$  : Panjang pipa (m)
- $v_p$  : Kecepatana aliran fluida pada pipa (m/s)
- $D_p$  : Diameter Pipa (m)

### 2.3 Prinsip Motor Hidrolik

Fungsi motor hidrolik adalah untuk merubah tekanan hidrolik menjadi torsi dan *angular displacement*.



Gambar 3 Motor Hidrolik (Bsp, 2013)

Motor hidrolik yang dipakai pada penelitian ini adalah motor hidrolik jenis *gerotor*. Motor ini terdiri atas dua rotor di dalam casing nya. Dimana satu roda gigi berputar pada roda gigi lainnya dengan sumbu putar yang tidak sama, fluida bertekanan masuk pada *inlet* motor hidrolik, kemudian memutar roda gigi sehingga tercipta perbedaan tekanan dan menciptakan putaran pada sumbu gigi driven.

Torsi yang dihasilkan motor hidrolik adalah:

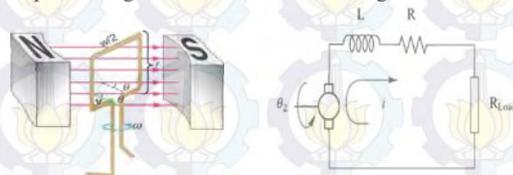
$$\tau_{mh} = \frac{P \cdot d}{2 \cdot \pi} \quad (6)$$

Keterangan :

- $T_{mh}$  : Torsi Motor Hidrolik (N.m)
- $P$  : Pressure (N/m<sup>2</sup>)
- $d$  : Displacement motor (m<sup>3</sup>/Rev)

### 2.4 Generator Listrik

Generator adalah sebuah alat yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator listrik menginduksi gaya gerak listrik (GGL) atau EMF dengan memutar kumparan dalam medan magnet. Energi mekanik yang bekerja pada generator bisa berasal dari putaran mesin, turbin uap, turbin gas, turbin air atau turbin gas.



Gambar 4. Generator (a) Skema elektromagnetik dan (b) skema generator listrik (close, 2002)

## 2.5 Pengaruh Percepatan Kendaraan Terhadap kenyamanan

Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Untuk kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepatan menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada tabel berikut:

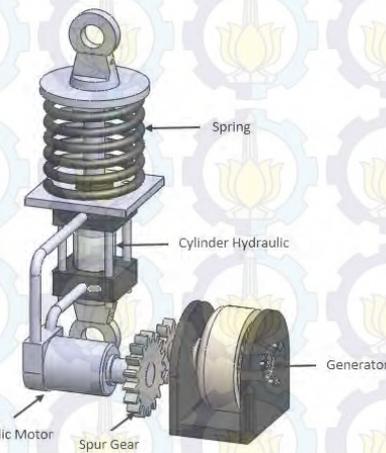
Tabel 2. 1 Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631

No.	Percepatan (RMS)	Keterangan
1.	$a < 0,315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2.	$0,315 \text{ m/s}^2$ to $0,63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3.	$0,5 \text{ m/s}^2$ to $1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4.	$0,8 \text{ m/s}^2$ to $1,6 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5.	$1,25 \text{ m/s}^2$ to $2,5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6.	$a > 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman

## 3. Metodologi Penelitian

### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan mensimulasikan model dari *Hydraulic motor – regenerative shock absorber* pada software Simulink matlab. Diawali dengan studi literatur untuk mendapatkan informasi terkait permasalahan yang ada. Selanjutnya di desainlah model dari *hydraulic motor – regenerative shock absorber*. Berikut ditampilkan gambar 5 desain konstruksi dari *hydraulic motor – regenerative shock absorber* (HMRSA).



Gambar 5. Desain Konstruksi hm-rsa

Hasil dari desain konstruksi *hydraulic motor – regenerative shock absorber* dilanjutkan dengan memodelkan dinamikanya bersama dengan *quarter car model*. Selanjutnya dari model dinamika akan menghasilkan persamaan matematis yang akan di terjemahkan ke program Simulink matlab dalam bentuk blok diagram.

### 3.2 Simulasi dengan Time Respon

Proses simulasi berdasarkan *time respon* dilakukan dengan eksitasi impuls dan periodik. Eksitasi impuls dilakukan pada amplitudo 0.015 m dan variasi tahanan listrik pada generator sebesar 6 ohm, 12 ohm dan 18 ohm. Hal ini dilakukan untuk melihat tren respon *transient* dari percepatan massa sprung akibat variasi tahanan listrik. Sementara eksitasi periodik dilakukan pada variasi frekuensi dari 1 Hz sampai 3.5 Hz dan variasi nilai tahanan listrik pada generator sebesar 6 ohm, 12 ohm dan 18 ohm. Eksitasi periodik dilakukan untuk melihat respon percepatan massa sprung dan besar daya yang dihasilkan *hydraulic motor – regenerative shock absorber* akibat variasi frekuensi dan tahanan listrik. Seluruh respon percepatan massa sprung akan dianalisa terkait dengan kenyamanan berkendara yang dihasilkan oleh sistem suspensi HMRSA

### 3.3 Simulasi dengan frequency respon

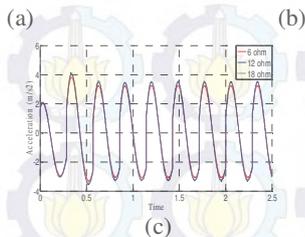
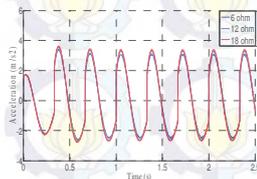
*Bode diagram* adalah salah satu cara untuk menggambarkan respon frekuensi sistem berupa grafik *magnitude* dari nilai gain (output/input)



(c) (d)

Gambar 9. Percepatan massa sprung akibat eksitasi periodik (a) frekuensi 1 Hz, (b) frekuensi 1.4 Hz, (c) frekuensi 1.75 Hz dan (d) frekuensi 2 Hz.

Dari gambar 9. Terlihat pengaruh nilai variasi tahanan listrik yang diberikan terhadap percepatan massa sprung tidak begitu berbeda signifikan. Namun, terjadi tren peningkatan nilai rms percepatan massa sprung seiring penambahan nilai tahanan listrik pada generator. Selanjutnya ditampilkan gambar 10. Respon percepatan massa sprung akibat eksitasi periodik pada fekuensi 2..5 Hz, 3 Hz dan 3.5 Hz.



Gambar 10. Percepatan massa sprung akibat eksitasi periodik (a) frekuensi 2.5 Hz, (b) frekuensi 3 Hz dan (c) frekuensi 3.5 Hz.

Dari gambar 10 terlihat pengaruh nilai variasi tahanan listrik yang diberikan terhadap percepatan massa sprung juga tidak begitu berbeda signifikan. Namun, terjadi tren peningkatan nilai rms percepatan massa sprung seiring penambahan nilai tahanan listrik pada generator. Hal ini disebabkan penambahan nilai tahanan listrik mengakibatkan berkurangnya nilai torsi elektrik. Dengan berkurangnya nilai torsi elektrik maka nilai redaman suspensi HM RSA juga berkurang sehingga respon rms percepatan massa sprungnya meningkat. Berikut ditampilkan table 2. Terkait nilai rms percepatan massa sprung pada semua frekuensi eksitasi dan hubungannya terhadap nilai kenyamanan berkendara.

Tabel 2. Rms percepatan massa sprung

Frekuensi	rms percepatan simulasi			batas kenyamanan	keterangan
	6 ohm	12 ohm	18 ohm		
1 Hz	0.3229	0.329	0.33	0.8	nyaman
1.4 Hz	0.52	0.538	0.544	0.8	nyaman
1.75 Hz	0.869	0.8749	0.876	0.8	tidak nyaman
2 Hz	1.169	1.175	1.176	0.8	tidak nyaman
2.5 Hz	1.918	1.968	1.982	0.8	tidak nyaman
3 Hz	2.37	2.5	2.54	0.8	tidak nyaman
3.5 Hz	2.427	2.565	2.613	0.8	tidak nyaman

Dari table 2 diatas terlihat sistem suspensi HM RSA hanya mampu menjaga kenyamanan berkendara sampai frekuensi 1.4 Hz.

#### 4.4. Respon Dinamik Berupa Daya Yang Dibangkitkan.

Daya yang dihasilkan suspensi HM RSA pada setiap frekuensi dan variasi tahanan listrik ditampilkan pada gambar 11 berikut.

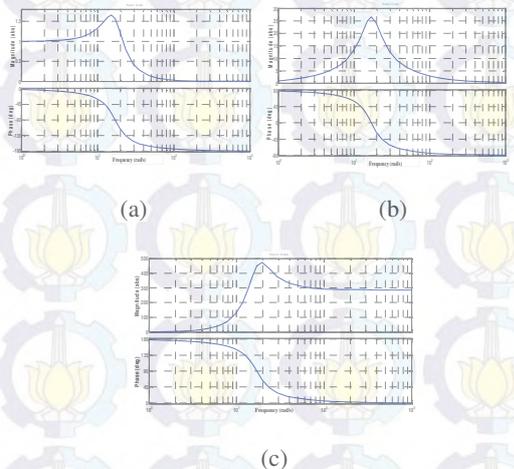


Gambar 11. Daya yang dihasilkan suspensi HM RSA.

Daya maksimum yang dihasilkan suspensi HM RSA terjadi pada frekuensi 3 Hz yaitu sebesar 5.93 watt. Terlihat terjadi penurunan nilai daya yang dihasilkan setiap penambahan nilai tahanan listrik.

#### 4.5 Simulasi dengan frekuensi respon

Persamaan gerak yang dijelaskan sebelumnya bersifat non linier sehingga perlu dilinierkan terlebih dahulu agar bisa diubah kedalam bentuk transfer function. Dengan menggunakan fasilitas control design pada Simulink matlab, proses linierisasi bisa dilakukan dengan mudah. Berikut ditampilkan gambar 12 frekuensi respon dari *displacement*, *velocity* dan *acceleration*.



Gambar 12. Grafik frekuensi respon (a) *displacement*, (b) *velocity* dan (c) *acceleration*.

Dari grafik diatas, terlihat nilai magnitude *displacement*, *velocity* dan *acceleration* meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi eksitasi. Setelah melewati frekuensi natural 13.3 rad/s, nilai magnitude nya menunjukkan tren yang terus menurun. Pada *displacement*, sudut fase nya menunjukkan tren menurun kearah negative seiring penambahan frekuensi eksitasi. Hal ini menandakan bahwa terjadi peningkatan keterlambatan respon *displacement* massa sprung seiring penambahan frekuensi eksitasi. Hal sebaliknya terjadi pada *acceleration*, dimana semakin meningkat nilai frekuensi eksitasi, sudut fase nya semakin menuju ke sudut 0°. pada grafik *velocity* terlihat respon keterlambatan *velocity* akibat frekuensi eksitasi semakin berkurang jika frekuensi eksitasinya mendekati frekuensi natural.

### 5. Kesimpulan

Pada bab ini akan disimpulkan hasil dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut.

6. Berdasarkan hasil simulasi, nilai rms percepatan massa sprung semakin bertambah jika nilai tahanan listrik pada generator bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai tahanan listrik pada generator mengakibatkan menurunnya nilai redaman dari suspensi HMRSA.
7. Peningkatan tahanan listrik mengakibatkan daya yang dihasilkan suspensi HMRSA berkurang.
8. Berdasarkan hasil simulasi, HMRSA mampu menjaga kenyamanan berkendara hingga frekuensi 1.4 Hz.
9. Pada frekuensi respon, nilai magnitude dari *displacement*, *velocity* dan *acceleration* semakin meningkat sampai beberapa titik setelah frekuensi natural.

### 6. Daftar Pustaka

- Arziti, Marcos. 2010. *Harvesting Energy From Vehicle Suspension*. Tempere University of Technology: Spanyol.
- De Silva, Clarence W. 1999. *Vibration Fundamentals and Practice*. CRC Press : New York.
- ESDM (2012) Indonesia Energy Statistics <http://www.esdm.go.id/publikasi/indonesia-energy-statistics-leaflet.html>
- Fox, Robert W. 2004. *Introduction to Fluid Mechanics Sixth Edition*. John Wiley & Sons, Ltd:United States of America
- Frederick, Close. 1995. *Modeling and Analysis of Dynamic System*. John Wiley & Sons : USA.
- Kadaryono. 2013. *Pengembangan dan Studi Karakteristik Prototipe Regenerative Shock Absorber Sistem Hidrolik*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Kelly, S Graham 2000. *Fundamental of Mechanical Vibrations*. McGraw-Hill International Editions.: Ohio, USA
- Laksana Guntur, Harus. 2013. *Development and Analysis of a Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension*. JSME Journal of System Design and Dynamics.
- Pritchard, Philip J. 2011. Fox and McDonald's Introduction To Fluid Mechanics (8th edition). N.J.: John Wiley & Sons, Inc.
- Rao, Singiresu S. 2011. *Mechanical Vibration*. Prentice Hall PTR: Singapore.