

SISTEM BREK ELEKTROMAGNETIK BOLEH KAWAL MENGGUNAKAN  
ARUS PUSAR

MOHAMAD ZAIRI BIN BAHAROM

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH  
SARJANA SAINS

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA  
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA  
BANGI

2013

## **PENAKUAN**

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang setiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

21 Mei 2013

**MOHAMAD ZAIRI BIN BAHAROM**  
P 54863

## KANDUNGAN

		<b>Halaman</b>
<b>PENGAKUAN</b>		ii
<b>PENGHARGAAN</b>		iii
<b>ABSTRAK</b>		iv
<b>ABSTRACT</b>		v
<b>KANDUNGAN</b>		vi
<b>SENARAI JADUAL</b>		ix
<b>SENARAI RAJAH</b>		x
<b>SENARAI SIMBOL</b>		xiv
<b>BAB I</b>	<b>PENDAHULUAN</b>	
1.1	Pengenalan	1
1.2	Kepentingan Kajian dan Penyataan Masalah	2
1.3	Hipotesis Kajian	5
1.4	Objektif Kajian	6
1.5	Skop Kajian	6
1.6	Struktur Tesis	7
<b>BAB II</b>	<b>KAJIAN PERPUSTAKAAN</b>	
2.1	Pengenalan	8
2.2	Teori Asas Elektromagnet	8
2.3	Aplikasi Arus Pular	11
2.4	Sistem Brek Kenderaan	12
	2.4.1 Brek mekanikal	13
	2.4.2 Sistem brek arus pular	14
2.5	Kekurangan Kehausan Pad Brek	21
2.6	Basikal Senaman	21
2.7	Kesimpulan	23

### **BAB III      METODOLOGI KAJIAN**

3.1	Pengenalan	24
3.2	Rig Ujikaji Tindakbalas	26
	3.2.1 Cakera brek	28
	3.2.2 Sistem Pemerolehan Data (PULSE)	29
	3.2.3 Motor arus terus	30
	3.2.4 Elektromagnet	31
	3.2.5 Bekalan voltan arus terus untuk motor arus terus	32
	3.2.6 Bekalan kuasa arus terus untuk elektromagnet	33
	3.2.7 Meter pelbagai digit	34
	3.2.8 Takometer optik	35
3.3	Kaedah Kajian Ujikaji Tindakbalas	35
	3.3.1 Parameter-parameter berubah bagi ujikaji tindakbalas	38
3.4	Rig Ujikaji Pengesahan	41
	3.4.1 Pengukuran terikan (tolok terikan)	42
	3.4.2 Casis USB lubang alur dan peranti masukan analog	47
	3.4.3 Aksesori terminal-skru	48
	3.4.4 Blok modul DasyLab	49
3.5	Kaedah Ujikaji Pengesahan	51
	3.5.1 Ujian keelurusan untuk penskalaan	52
	3.5.2 Prosedur ujikaji pengesahan	54
3.6	Kesimpulan	56

### **BAB IV      KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN**

4.1	Pengenalan	57
4.2	Keputusan Ujikaji Tindakbalas	57
	4.2.1 Kesan bekalan arus dan jenis bahan cakera	58
	4.2.2 Kesan bilangan lilitan gegelung elektromagnet	61
	4.2.3 Kesan jarak sela udara	65
	4.2.4 Perbandingan A16061 dan A17075	72
	4.2.5 Kesan ketebalan cakera	75
	4.2.6 Ujian ANOVA tersarang penuh dan ujian ANOVA dua hala	77
4.3	Keputusan Ujikaji Pengesahan	83
	4.3.1 Data dituras	83
	4.3.2 Data punca-min-kuasa dua	86
	4.3.3 Data puncak ke puncak	89
	4.3.3 Antaramuka grafik pengguna	92

4.4	Kesimpulan	93
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN CADANGAN</b>	
5.1	Kesimpulan	94
5.2	Cadangan	95
<b>RUJUKAN</b>		97
<b>LAMPIRAN</b>		
A1	Senarai Penerbitan	102
B1	Spesifikasi Motor Arus Terus	103
B2	Spesifikasi Elektromagnet	104
C1	Langkah Konfigurasi MAX	106
C2	Langkah Konfigurasi DasyLab	109

**SENARAI JADUAL**

No. Jadual		Halaman
3.1	Spesifikasi motor arus terus	31
3.2	Ciri-ciri elektromagnet	32
3.3	Nilai-nilai masukan bekalan arus, $i$ bagi 250 lilitan	38
3.4	Nilai-nilai masukan bekalan arus, $i$ bagi 50 lilitan	39
3.5	Jarak sela udara (mm)	40
3.6	Kealiran elektrik untuk pelbagai bahan cakera pada suhu bilik $20^{\circ}$ C	40
3.7	Ketebalan cakera aloi aluminium, Al 6061	41
3.8	Spesifikasi tolok terikan	46
3.9	Spesifikasi peranti input analog	47
4.1	Keberkesanan 50 lilitan pada gegelung elektromagnetik bagi cakera kuprum dan sela udara 1mm	64
4.2	Keberkesanan 250 lilitan pada gegelung elektromagnetik bagi cakera kuprum dan sela udara 1mm	65
4.3	Keberkesanan jarak sela udara, $a$ terhadap prestasi sistem brek arus pusat (cakera kuprum)	67
4.4	Jumlah peratusan penurunan kelajuan pada berlainan halaju awal	69
4.5	Pelbagai saiz ketebalan aloi aluminium, Al 6061	76
4.6	Data ujian ANOVA tersarang penuh	79
4.7	Data ANOVA bagi ujian ANOVA tersarang penuh	79
4.8	Jadual ANOVA bagi ujian ANOVA dua hala	81

## SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
1.1	Statistik pembebasan kuprum daripada sumber haus brek dan sumber lain di eropah	3
1.2	Perangkaan kemalangan jalan raya bagi tahun 2000-2009	5
2.1	Skematik model peredam-spring arus pusar	12
2.2	Daya-daya yang terlibat dalam pembrekan geseran (2 dimensi)	14
2.3	Reka bentuk sistem brek utama (3 dimensi)	14
2.4	Skematik arus pusar teraruh dalam pengalir	15
2.5	Skematik bahan beraliran melalui medan magnet dan mengaruh arus pusar	16
2.6	Medan magnet dengan sela udara besar	18
2.7	Medan magnet dengan sela udara kecil	18
2.8 (a)	Tatarajah untuk sistem brek arus pusar (ECB)	19
2.8 (b)	Keratan rentas teras besi dan cakera	19
2.9	Model basikal senaman	22
3.1	Carta alir keseleruhan projek penyelidikan	26
3.2	Pandangan 3 dimensi untuk reka bentuk rig ujikaji 1	27
3.3	Pandangan atas, depan, sisi dan trimetrik bagi rig ujikaji 1	28
3.4	Tiga jenis cakera brek daripada bahan berbeza iaitu zink, aluminium dan kuprum	29
3.5	Dua jenis cakera brek daripada siri aluminium berbeza iaitu Al6061 dan Al7075	29
3.6	Gambarajah PULSE-jenis 3560D	30
3.7	Motor arus terus	30
3.8	Elektromagnet	32
3.9	Bekalan voltan arus terus	33
3.10	Bekalan kuasa arus terus	34
3.11	Meter pelbagai digit	34
3.12	Takometer optik	35
3.13	Carta alir ujikaji tindakbalas	36
3.14	Pandangan penuh rig ujikaji tindakbalas	37
3.15	Skematik rig ujikaji tindakbalas	37
3.16	Tolok terikan jenis wayar	43

3.17	Tolok terikan dipasang pada pedal basikal	46
3.18	NI-cDAQ 9178 Casis USB lubang alur dan NI-9237 peranti input analog	47
3.19	NI-9949 RJ50 aksesori terminal-skru	48
3.20	Rajah sambungan separuh-jambatan	49
3.21	Rajah blok modul DasyLab	51
3.22	Carta alir ujikaji pengesahan	52
3.23	Beban 10N diatas pedal basikal	53
3.24	Plot kekelurusan untuk penskalaan	54
3.25	Pandangan dekat rig ujikaji pengesahan (kawasan pembrekan elektromagnetik)	55
3.26	Pandangan penuh rig ujikaji pengesahan	55
3.27	Skematik rig ujikaji pengesahan	56
4.1	Graf halaju melawan arus bagi aluminium, kuprum dan zink pada $l_g$ (1mm), d (1mm) dan V (11V)	60
4.2	Graf halaju melawan arus bagi aluminium, kuprum dan zink pada $l_g$ (1mm), d (1mm) dan V (13V)	60
4.3	Graf halaju melawan arus bagi aluminium, kuprum dan zink pada $l_g$ (1mm), d (1mm) dan V (15V)	61
4.4	Graf halaju melawan arus bagi cakera aluminium pada $l_g$ (1mm), d (1mm) pada gegelung elektromagnet dengan 50 lilitan	62
4.5	Graf halaju melawan arus bagi cakera aluminium pada $l_g$ (1mm), d (1mm) pada gegelung elektromagnet dengan 250 lilitan	63
4.6	Graf halaju melawan arus bagi cakera kuprum pada $l_g$ (1mm), d (1mm) pada gegelung elektromagnet dengan 50 lilitan	63
4.7	Graf halaju melawan arus bagi cakera kuprum pada $l_g$ (1mm), d (1mm) pada gegelung elektromagnet dengan 250 lilitan	64
4.8	Graf halaju melawan arus bagi cakera kuprum pada d (1mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan V(11V) pada sela udara berbeza	68
4.9	Graf halaju melawan arus bagi cakera kuprum pada d (1mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan V(13V) pada sela udara berbeza	68



4.10	Graf halaju melawan arus bagi cakera kuprum pada d (1mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan V(15V) pada sela udara berbeza	69
4.11	Graf tork brek melawan arus bagi cakera Al6061 pada d (5mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) pada sela udara, $I_g$ (1mm)	70
4.12	Graf tork brek melawan arus bagi cakera Al6061 pada d (5mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) pada sela udara, $I_g$ (2mm)	71
4.13	Graf tork brek melawan arus bagi cakera Al6061 pada d (5mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) pada sela udara, $I_g$ (3mm)	71
4.14	Graf halaju melawan arus bagi cakera Al6061 dan Al7075 pada d (4mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan $I_g$ (1mm)	73
4.15	Graf halaju melawan arus bagi cakera Al6061 dan Al7075 pada d (4mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan $I_g$ (3mm)	74
4.16	Graf tork brek melawan arus bagi cakera Al6061 pada d (4mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan $I_g$ (1mm)	74
4.17	Graf tork brek melawan arus bagi cakera Al7075 pada d (4mm), gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan $I_g$ (1mm)	75
4.18	Graf halaju (PPM) melawan masa (s) bagi cakera Al6061 pada gegelung elektromagnet (250 lilitan) dan $I_g$ (1mm) bagi ketebalan cakera 4mm dan 5mm	77
4.19	Plot kesan utama untuk PPM bagi ujian ANOVA tersarang penuh	80
4.20	Plot interaksi untuk PPM bagi ujian ANOVA tersarang penuh	80
4.21	Plot kesan utama untuk PPM bagi ujian ANOVA dua hala	81
4.22	Plot interaksi untuk PPM bagi ujian ANOVA dua hala	82
4.23	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data dituras cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $I_g$ (1mm) dan ketebalan cakera 5mm bagi arus 1A	84
4.24	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data dituras cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $I_g$ (1mm) dan ketebalan cakera 5mm bagi arus 2A	85

4.25	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data dituras cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm) dan ketebalan cakera 5mm bagi arus 3A	85
4.26	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data dituras cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm) dan ketebalan cakera 5mm bagi arus 4A	86
4.27	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data punca-min-kuasa-dua cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm) , d (5mm) bagi arus 1A	87
4.28	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data punca-min-kuasa dua cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 2A	87
4.29	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data punca-min-kuasa dua cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 3A	88
4.30	Graf daya (N) melawan masa (s) bagi data punca-min-kuasa dua cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 4A	88
4.31	Graf terikan melawan masa (s) bagi data punca-ke-puncak cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 1A	90
4.32	Graf terikan melawan masa (s) bagi data punca-ke-puncak cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 2A.	90
4.33	Graf terikan melawan masa (s) bagi data punca-ke-puncak cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 3A	91
4.34	Graf terikan melawan masa (s) bagi data punca-ke-puncak cakera Al6061 pada n (250 lilitan), $l_g$ (1mm), d (5mm) bagi arus 3A	91
4.35	Paparan antaramuka grafik pengguna bagi ujikaji terhadap sistem brek elektromagnetik boleh kawal menggunakan arus pular	92

## SENARAI SIMBOL

$a$	lebar kutub teras besi
$b$	ketinggian kutub teras besi
$B$	ketumpatan fluks magnet
$C$	jarak antara pusat cakera dan kutub
$d$	ketebalan cakera
$E$	keamatan medan elektrik
$\Phi_E$	fluks elektrik
$f$	daya magnetomotif
$F$	daya elektromagnet (dalam dawai)
$i$	arus
$l_g$	jarak sela udara
$J_{\text{pusar}}$	arus pusar
$L$	jumlah panjang dawai
$n$	bilangan lilitan
$N$	daya tindak balas
$Q$	jumlah caj terkumpul
$r$	jejari cakera
$R$	daya geseran
$R$	enggan magnetik
PPM	putaran per minit
$S$	luas permukaan kutub
$T_b$	tork pembrekan
$\mu$	pekali geseran dinamik

$\mu_0$	kebolehtelapan udara
$v$	relatif kelajuan sumber
V	voltan
$\sigma$	keberaliran elektrik
$\emptyset$	jumlah fluks
$\epsilon_0$	pekali elektrik
$\nabla$	pembezaan
ANOVA	analisis varians
DF	darjah kebebasan
SS	jumlah kuasa dua
MS	purata kuasa dua

## ABSTRAK

Kajian ini membentangkan sebuah penyelidikan makmal berasaskan ujikaji bagi sistem brek elektromagnetik boleh kawal menggunakan arus pusing. Fokus utama adalah kajian mengenai parameter-parameter berkaitan dalam sistem brek elektromagnetik menggunakan arus pusing dan aplikasi sistem ini pada kajian kes yang dilakukan. Potensi yang hadir dalam melakukan kajian ini adalah berdasarkan permasalahan melibatkan sistem brek konvensional kini yang menggunakan pad brek termasuk pencemaran puing haus yang mengandungi elemen berbahaya seperti kuprum. Objektif kajian ini adalah untuk merekabentuk rig ujikaji yang mengkaji hubungan kait antara parameter berubah yang mempengaruhi tindakbalas sistem brek elektromagnetik ini untuk mengaplikasikan sistem ini sebagai sebuah sistem boleh kawal pada kajian kes yang dilaksanakan. Kaedahnya melibatkan pembentukan dua rig ujikaji bagi kajian hubungan kait parameter berubah dan aplikasi pada kajian kes. Ujikaji makmal sepenuhnya dijalankan bagi melihat hubungan kait antara parameter berubah seperti jumlah arus yang dialirkan, jarak sela udara, jenis bahan cakera, ketebalan cakera dan bilangan lilitan gegelung elektromagnet. Perbandingan dua jenis bahan daripada siri Al6061 dan Al7075 turut dijalankan dalam ujikaji tindakbalas ini. Ujikaji pengesahan pula melibatkan aplikasi tindakbalas dan hubungan kait parameter berubah dalam ujikaji tindakbalas yang mengaplikasikan sistem brek elektromagnetik menggunakan arus pusing ini sebagai sebuah sistem boleh kawal pada basikal senaman. Melalui ujikaji yang telah dijalankan, didapati bahawa parameter-parameter berubah memberikan kesan yang tertentu terhadap kelakuan sistem brek ini. Daya pembrekan akan meningkat apabila jumlah arus yang dialirkan kepada elektromagnet meningkat, dengan jarak sela udara yang kecil, bilangan lilitan gegelung elektromagnet yang besar, dan penggunaan cakera yang lebih tebal. Tiga jenis bahan cakera yang dibandingkan iaitu aluminium, kuprum dan zink, mendapati bahawa aluminium merupakan bahan terbaik untuk digunakan sebagai cakera dalam kajian ini. Ujikaji juga mendapati bahawa Al6061 memberi tindakbalas yang lebih baik daripada Al7075. Aplikasi sistem brek elektromagnetik ini pada basikal bagi tujuan senaman diuji dalam ujikaji pengesahan dan jumlah arus yang dialirkan dijadikan parameter boleh kawal. Peningkatan arus telah meningkatkan rintangan semasa kayuhan dilakukan dan sekaligus meningkatkan keamanan senaman yang dilakukan. Melalui kajian kes yang dilakukan, dibuktikan bahawa sistem brek elektromagnetik boleh kawal menggunakan arus pusing ini telah berjaya diaplikasikan sebagai sebuah sistem boleh kawal pada kajian kes yang dilakukan, dan sistem ini memiliki potensi besar untuk penerokaan baru dalam sistem brek konvensional kini.

## **CONTROLLABLE ELECTROMAGNETIC BRAKING SYSTEM USING EDDY CURRENT**

### **ABSTRACT**

This research presents a laboratory based experimental study of a controllable electromagnetic braking system utilising eddy current. The main focus was to study parameters related to the eddy current electromagnetic braking system and to apply the system on a test study application. This study explored potential benefits over conventional braking systems, including in the reduction of brake pad wear and wear debris contamination due to hazardous materials such as copper. The objective was to design and fabricate a test rig in order to investigate the relationship between variable parameters that affect the electromagnetic braking system response and to implement the controllable system on an undertaken test case. Two test rigs were constructed for the study on the interactions of variable parameters and on the test case application. Laboratory experiments were carried out to examine the correlation between parameters such as the coil current, air gap widths, types of disc brakes, disc thickness, and number of turns of the electromagnetic coil. Two different materials, Al6061 and Al7075 were also compared in this response experiment. In the validation part of the experiment, related optimum parameters found from the response part were used in implementing the eddy current electromagnetic braking system on a stationary exercise bicycle. From the experimental results, it was found that the parameters have some effect on certain braking behaviour. Braking force increased as the coil current increased, as also with the use of a smaller air gap, larger number of coil turns and thicker disc. Three types of disc material were tested: aluminium, zinc and copper; subsequently, aluminium was found to be the best among the three. It was also found that Al6061 performed better than Al7075. The eddy current electromagnetic brake was tested for exercise purposes, taking the coil current as the controllable parameter. Increasing the coil current caused the cycling resistance to increase, and hence the intensity of the exercise also increased. From this research, it was shown that the eddy current electromagnetic brake could be successfully implemented as a controllable braking system on a test static exercise bicycle. Thus, this system has great potential to be explored as an alternative to present-day conventional braking systems.

## RUJUKAN

- Abu-Allaban, M., Gillies, J. A., Gertler, A. W., Clayton, R. & Proffitt, D. 2003. Tailpipe, resuspended road dust and brake wear emission factors from on-road vehicles, *Atmos. Environ.* 37: 5283-5293.
- Ahmad Radzi Mat Isa. 2007. *Asas Instrumentasi dan Pengukuran*. Johor. Penerbit UTM.
- Anon. 2010. Kemalangan Simpang Pulai-Cameron Highlands (28 Terbunuh). *Berita Harian*, 21 Disember.
- Anon. 2010. Brek dipercayai jadi punca nahas. *Berita Harian*, 12 Oktober.
- Bae, Jae-Sung, Hwang Jai-Hyuk, Park Jung-Sam & Kwang Dong-Gi. 2009. Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23: 3024-3035.
- Bauer, H., Dietsche, K-H., Crepin, J., Dinkler, F. 2000. *Automotive Handbook*. Ed ke-5. Robert Bosch GmbH.
- Brake Pad Partnership. 2006. Copper released from brake lining wear in the San Francisco bay area. <http://www.suscon.org/brakepad/documentArchive.asp>.
- Boyd, T., Hull, M. L. & Wooten, D. 1996. An improved accuracy six load component pedal dynamometer for cycling. *Journal of Biomechanics* 29(8): 105-110.
- Choi, Jae-Seok & Yoo, Jeong Hoon. 2010. Optimal design method for magnetization directions of a permanent magnet array. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322: 2145-2151.
- Chua Yan Piaw. 2009. *Statistik penyelidikan lanjutan (ujian univariat dan multivariate)*. 978-983-3850-50-1. Kuala Lumpur. Mc-Graw Hill.
- Cohee, M. 2008. A gage for measuring pedal forces on a stationary bicycle. Science in Physics. College of William and Mary, Virginia, USA.
- Daly, D. J. & Cavanagh, P.R.. 1999. Assymetry in bicycle ergometer pedalling. *Medicine and Science in Sports* 8: 204-208.
- David Burton, Amanda Delaney, Stuart Newstead, David Logan & Brian Fildes. 2004. Evaluation of anti-lock braking systems effectiveness. Royal Automobile Club of Victoria (RACV) Ltd.
- Davis L. C. & Reitz J. R.. 1971. Eddy currents in finite conducting sheets. *Journal of Applied Physics* 42(11): 4119-4127.

- Ebrahimi, B., Khamesee, M.B. & Golnaraghib, M.F. 2008. Design and modelling of a magnetic shock absorber on eddy current damping effect. *Journal of Sound and Vibration* 315: 875-889.
- Elbuken, C. M.B. Khamesee, M. Yavuz. 2006. Eddy current damping for magnetic levitation: downscaling from macro to micro-levitation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 39: 3932–3938.
- Filip, P. 2002. Friction and wear of polymer matrix composite materials for automotive braking industry in: International conference braking 2002. *Professional Engineering Publishing, London*, hlm. 341–354.
- Fiorillo, F. 2004. *Measurement and characterisation of magnetic materials*. Elsevier Academic Press. 0-12-257251-3.
- Forkenbrock, G., Flick, Riley, M. & Garrott, W. 1999. A test track performance evaluation of current production track performance evaluation. *SAE-01-1287*.
- Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A. & Groblicki, P.J.. 2000. Brake wear particulate matter emissions. *Environ. Sci. Technol.* 34: 4463–4469.
- Georg, F. M., Gerard, F. G. & Yann C. 1994. Fuzzy logic continuous and quantizing control of an abs braking system. *SAE*. 940830: 1033-1042.
- Gonzalez, M. I. 2004. Experiments with eddy currents: the eddy current brake. *European Journal of Physics* 25: 463-468.
- Hoes, M. J. A. J. M, Binkhorst, R. A, Smeekes-Kuyl, A. E. M. C. & Vissers, A. C. A. 1968. Measurement of forces exerted on pedal and crank during work on a bicycle ergometer at different loads. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie* 26: 33-42.
- Howell, D.C. 1999. *Fundamental statistics for the behavioural sciences*. Ed ke-4. Brooks/Cole Publishing Co.
- Huang Chun-Kuei & Shih Ming-Chang. 2010. Design of a hydraulic anti-lock braking system (ABS) for a motorcycle. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24(5): 1141-1149.
- Hull, M. L. & Davis, R. R. 1981. Measurement of pedal loading in cycling: I. instrumentation. *Journal of Biomechanics* 14: 843-856.
- Hullskotte, J. H. J, Schaap, M. & Visschedijk, A. J. H. 2006. Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution. *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Specialised Conference on Diffuse Pollution and Sustainable Basin Management*.



- Karnopp, D. 1989. Permanent magnet linear motors used as variable mechanical dampers for vehicle suspensions. *Journal of Vehicle System Dynamics* 18: 187–200.
- Kato, M., Matsuto, T., Tanaka, K., Ishihara, H., Hayashi, T. & Hosoda, W. 1996. Combination of antilock brake system (ABS) and combined brake system (CBS) for motorcycles. *SAE*. 960960: 1284-1291.
- Kukutschová, J., Roubíček, V., Malachová, K., Pavlíčková, Z., Holusa, R., Kubačková, J., Mička, V., MacCrimmon, D. & Filip, P. 2009. Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact. *Journal Wear* 267: 807-817.
- Kunstlinger, U., Ludwig, H.G. & Stegmann, J. 1984. Computerized Force kinetics and oxygen consumption during bicycle ergometer work in racing cyclists and reference-group. *International Journal of Sports Medicine* 5: 118-119.
- Lee, Kapjin & Park Kyihwan. 1998. Optimal robust control of a contactless brake system using an eddy current. *Mechatronics* 9: 615-631.
- Li, W.H. & Du, H. 2003. Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21: 508-515.
- Lide, D. R. 2000. *Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds. CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press. 0849304814.
- Marshek, K., Cuderman II, J., Johnson, M. 2000. Performance of Anti-Lock Braking System Equipped Passenger Vehicles Part I: Braking as a Function of Brake Pedal Application Force. *Journal SAE* 01-0304.
- Min Jou, Shiau, J.K. & Sun, C.C. 2006. Design of a magnetic braking system. *Journal of Magnetism and Magnetic Material* 304: c234-c236.
- Mitsubishi, Mirage. 2002. Brake system article text. Copyright © 1998 Mitchell Repair Information Company, LLC.
- Miyasaki, N., Fukumoto, M., Sogo, Y. & Tsukinoki, H. 1990. Antilock brake system (M-ABS) based on the friction coefficient between the wheel and the road surface. *SAE Special Publications* 900207: 101-109.
- Nave, C. L. 2008. Magnetic properties of solids. *Hyper physics*. [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/magpr.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/magpr.html).
- Ostermeyer, G. P. 2001. Friction and wear of brake systems. *Forschung im Ingenieurwesen* 66: 267-272.
- Peters, R. A. 2008. Environmental effects of copper in brake pad wear debris. *Brake Pad Partnership, Brake Colloquium & Exhibition*.

- Reiser II, R.F, Peterson, M. L. & Broker, J. P. 2003. Eddy Instrumented bicycle pedals for dynamic measurement of propulsive cycling loads. *Sports Engineering Journal*.
- Sadiku, M.N.O. 2007. *Elements of Electromagnetics*. New York. Oxford University Press.
- Sanders, P.G., Xu, N., Dalka, T.M. & Maricq, M. 2003. Airborne brakewear debris: Size distributions, composition and a comparison of dynamometer and vehicle tests. *Environ. Sci. Technol.* 37: 4060–4069.
- Sargeant, A. J. & Davies, C.T.M. 1977. Force applied to cranks of a bicycle ergometer during one and two-leg cycling. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology* 42: 514-518.
- Schieber, D. 1975. Optimal dimensions of rectangular electromagnet for braking purposes. *IEEE Transactions on Magnetics* 11(3): 948-952.
- Serway, Raymond A. 1996. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Ed ke-4. Pearson.
- Sodano, H. A. & Bae Jae-Sung. 2004. Eddy current damping in structures. *The Shock and Vibration Digest* 36: 469-478.
- Song Jeonghoon. 2005. Inje University Technology Innovation Center for Automobile Parts. School of Mechanical-Automotive Engineering, Inje University. Gimhae, Gyeongnam, Korea. Performance evaluation of a hybrid electric brake system with a sliding mode controller.
- Stone, C. & Hull, M.L.. 1993. Rider bicycle interaction loads during standing treadmill cycling. *Journal of Applied Biomechanics* 9: 202-218.
- Strichland, A. & Dagg, K. 1998. ABS braking performance and steering input. *SAE Special Publications* 980240: 57-64.
- Sugai, M., Yamaguchi, H., Miyashita, M., Umeno, T. & Asano, K. 1999. New control technique for maximizing braking force on antilock braking system. *Vehicle System Dynamics* 32: 299-312.
- The strongest magnet in the world*. 2011. Video. Florida. Magnetic Field Laboratory. [http://www.youtube.com/watch?v=QGytW\\_C6hR8](http://www.youtube.com/watch?v=QGytW_C6hR8).
- Teshima, H., M. Tanaka, K. Miyamoto, K. Nohguchi, K. Hinata. 1997. Effect of eddy current dampers on the vibration properties in superconducting levitation using melt-processed YBaCuO bulk superconductors. *Physica* 274 :17–23.
- Tai L. Chow. 2006. *Electromagnetic Theory: A modern perspective*. Jones and Bartlett. 0-7637-3827-1.

- Uexkull, O., Skerfving, S., Doyle, R. & Braungart, M. 2005. Antimony in brake pads a Carcinogenic component. *J. Cleaner Prod.* 13: 19–31.
- Wiederick, H. D., Gauthier, N., Campbell, D. A. & Rochon, P. 1987. Magnetic braking: Simple theory and experiment. *American Journal of Physics.* 55(6): 500-503.
- Wouterse, J. H. 1991. Critical Torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles. *IEEE Proceedings. Part B. Electric Power Applications.* 138(4): 153-158.

**LAMPIRAN B**  
**SENARAI PENERBITAN**

Senarai kertas kerja yang telah disediakan sepanjang tempoh pengajian:

1. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, S. M. G. Priyandoko & S.M. Harris. Electromagnetic Braking System Using Eddy Current for Brake Disc of Al6061 and Al7075. 2012. *International Review of Mechanical Engineering Journal*, Vol. 6, Issue 3, March 2012, Pages 588-594, United States of America.
2. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, S. M. G. Priyandoko & S.M. Harris. Electromagnetic Braking Using Eddy Current Resistance for Exercise Cycling Bike. 2012. *Advanced Science Letters Journal*, Volume 19, Number 11, November 2013 , pp. 3143-3147(5), United States of America.
3. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, G. Priyandoko & S. M. Harris. 2011. Eddy Current Braking Experiment Using Brake Disc of Aluminium Series of Al6061 and Al7075. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 36 (2012) 012005.
4. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, S. M. Harris & G. Priyandoko. 2011. Braking Torque Analysis on Electromagnetic Braking Study Using Eddy Current for Brake Disc of Al6061 and Al7075. *Proc. Of Regional Conference on Automotive Research (ReCAR) 2011*, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-15 Disember 2011.
5. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, S. M. G. Priyandoko & S.M. Harris. Electromagnetic Braking Using Eddy Current Resistance for Exercise Cycling Bike. 2012. *International Workshop on Nanotechnology and Its Applications (IWNIA 2012)*, Guangzhou, China, 11-13 Mei 2012.
6. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, G. Priyandoko & S. M. Harris. 2011. Eddy Current Braking Experiment Using Brake Disc of Aluminium Series of Al6061 and Al7075. *Proc. Of International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER) 2011*, Kuantan, Malaysia, 5-7 Disember 2011.
7. **M. Z. Baharom**, M. Z. Nuawi, G. Priyandoko, S. M. Harris & L. M. Siow. 2011. Eddy Current Braking Study for Brake Disc of Aluminium, Copper and Zinc. *Proc. Of Regional Engineering Postgraduate Conference (EPC) 2011*, UKM Bangi, Malaysia, 4-5 Oktober 2011.