

REKABENTUK DAN CIRI-CIRI TORK UNTUK MOTOR MAGNET KEKAL  
TANPA BERUS YANG MEMPUNYAI KESAMAAN NISBAH LUBANG ALUR  
DAN KUTUB BERPERINGKAT

MOHD SAUFI BIN AHMAD

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2010

REKABENTUK DAN CIRI-CIRI TORK UNTUK MOTOR MAGNET KEKAL  
TANPA BERUS YANG MEMPUNYAI KESAMAAN NISBAH LUBANG ALUR  
DAN KUTUB BERPERINGKAT

oleh

MOHD SAUFI BIN AHMAD

Tesis yang diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi  
Ijazah Sarjana Sains

JULAI 2010

## **PENGHARGAAN**

Segala puji bagi Allah s.w.t yang Maha Pemurah lagi Maha Mengasihani kerana dengan izin-NYA, penyelidikan ini dapat disempurnakan dengan jayanya.

Pertama sekali, jutaan terima kasih ditujukan kepada penyelia saya iaitu Dr Dahaman Ishak di atas dorongan, sokongan, cetusan idea dan tunjuk ajar yang telah diberikan. Selain menjadi mentor akademik, pendekatan ‘turun padang’ bagi melihat permasalahan yang dihadapi sepanjang penyelidikan ini yang telah diamalkan beliau membuatkan perjalanan penyelidikan ini menjadi lebih mudah. Beliau juga kerap memberi motivasi bagi membakar semangat menjadikan penyelidikan ini sebagai suatu pengalaman yang sangat bermakna dan menyeronokkan.

Penghargaan turut diberikan kepada staf-staf makmal kuasa iaitu En. Mohamad Nazir Abdullah, En Ahmad Shaukhi Noor, En. Jamaludin Che Amat dan En. Hairul Nizzam Abd Rahman yang telah banyak membantu menyediakan peralatan-peralatan makmal yang sentiasa digunakan dalam penyelidikan ini.

Tidak dilupakan, ucapan terima kasih kepada rakan penyelidikan Nurul Anwar Abd Manap yang sentiasa memberi komitmen bersama semasa proses penyelidikan ini dijalankan, rakan-rakan di pejabat, sahabat-sahabat sejawat, ahli-ahli rumah sewa yang sentiasa memberi sokongan moral menjadikan perjalanan Master ini menjadi lebih indah.

Penghargaan terakhir ditujukan khas buat insan tersayang yang menetap di Kg Paya Mak Insun dan buat seluruh ahli keluarga iaitu arwah bapa, Ahmad Man. Ibu, Nasna Che Ahmad. Abang, Mohd Saiful dan adik, Nur Syazana. Dengan restu, doa dan sokongan daripada mereka, penyelidikan ini dapat disempurnakan dengan jayanya.

## ISI KANDUNGAN

	Muka Surat
PENGHARGAAN	ii
ISI KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vi
SENARAI RAJAH	vii
TERJEMAHAN ISTILAH	xi
SINGKATAN ISTILAH	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
<b>BAB 1 PENGENALAN</b>	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Skop dan matlamat kajian	4
1.2.1 Skop kajian	4
1.2.2 Matlamat kajian	5
1.3 Kaedah pelaksanaan kajian	5
1.3.1 Rekabentuk	7
1.3.2 Analisis pemodelan unsur terhingga	7
1.3.3 Fabrikasi	7
1.3.4 Pengujian	8
1.3.5 Rekabentuk semula dan pengoptimuman	8
1.3.6 Integrasi sistem	9
1.4 Struktur tesis	9

## **BAB 2 TOPOLOGI MOTOR ELEKTRIK TANPA BERUS**

2.1	Definisi dan konsep asas motor tanpa berus	11
2.2	Jenis-jenis motor tanpa berus	11
2.2.1	Motor aruhan	11
2.2.2	Motor pelangkah	13
2.2.3	Motor magnet kekal tanpa berus	14
2.3	Rupa bentuk motor magnet kekal tanpa berus	15
2.3.1	Pemutar dalaman	16
2.3.2	Pemutar luaran	19
2.4	Rangkaian fluks, daya gerak elektrik songsang dan tork	20
2.5	Gelombang tork	23
2.6	Tork penugalan	23
2.7	Belitan dalam motor magnet kekal tanpa berus	25
2.8	Ringkasan	28

## **BAB 3 MODEL DAN SIMULASI MOTOR MAGNET KEKAL TANPA BERUS**

3.1	Pengenalan	29
3.2	Faktor jarak, faktor agihan dan faktor belitan dalam MMKTB	32
3.3	Belitan dalam motor	39
3.4	Analisis unsur terhingga	42
3.4.1	Membina gambarajah model lengkap	43
3.4.2	Analisis statik	44
3.4.3	Pautan fluks, d.g.e songsang dan tork penugalan	53
3.4.4	Analisis dinamik	60
3.5	Ringkasan	62

<b>BAB 4 PROTOTAIP, UJIKAJI DAN PERBANDINGAN PRESTASI MOTOR</b>	
4.1 Pengenalan	64
4.2 Rekabentuk motor dan fabrikasi	65
4.3 Prototaip motor dan pengujian	71
4.3.1 Ujikaji motor 12-lubang alur/10-kutub	74
4.3.2 Ujikaji motor 9-lubang alur/10-kutub	77
4.4 Perbandingan prestasi motor	79
4.5 Ringkasan	82
<b>BAB 5 KESIMPULAN</b>	84
<b>SENARAI RUJUKAN</b>	88
<b>SENARAI LAMPIRAN</b>	
Lampiran A Pengiraan analitikal dalam anggaran penentuan dimensi-dimensi motor	92
Lampiran B Helaian data kepingan besi 35JN250	99
Lampiran C Helaian data magnet N38SH	102
Lampiran D Lukisan autocad motor bagi proses potongan dawai	103
<b>SENARAI PENERBITAN</b>	104

## SENARAI JADUAL

		Muka Surat
Jadual 3.1	Parameter masukan	30
Jadual 3.2	Penganggaran beranalisis dimensi-dimensi motor	30
Jadual 3.3	Parameter keluaran	32
Jadual 3.4	Nilai faktor belitan	38
Jadual 4.1	Pengukuran rintangan dan kearuhan motor 12-lubang alur/10-kutub	69
Jadual 4.2	Pengukuran rintangan dan kearuhan motor 9-lubang alur/10-kutub	70
Jadual 4.3	Nilai-nilai pengukuran prestasi motor 12-lubang alur/10-kutub	80
Jadual 4.4	Nilai-nilai pengukuran prestasi motor 9-lubang alur/10-kutub	80

## SENARAI RAJAH

		Muka Surat
Rajah 1.1	Carta alir bagi rekabentuk motor magnet kekal tanpa berus	6
Rajah 2.1	Motor aruhan	12
Rajah 2.2	Motor pelangkah	13
Rajah 2.3	Motor magnet kekal tanpa berus	14
Rajah 2.4	Jenis-jenis rupa bentuk pemutar dalaman	17
Rajah 2.5	Pemegun	18
Rajah 2.6	Motor dengan pemutar luaran	20
Rajah 2.7	Hubungan antara gelombang rangkaian fluks, d.g.e songsang, arus dan tork dalam keadaan ideal sesebuah MMKTB	22
Rajah 2.8	Belitan tak bertindih selapis pada motor 12-lubang alur/10-kutub	26
Rajah 2.9	Belitan tak bertindih dua lapis pada motor 12-lubang alur/10-kutub	26
Rajah 2.10	Belitan pertindihan terpumpun pada motor 24-lubang alur/10-kutub	27
Rajah 2.11	Belitan pertindihan terpumpun pada motor 24-lubang alur/10-kutub	27
Rajah 3.1	Demensi bagi keratan rentas motor 12-lubang alur/10-kutub	31
Rajah 3.2	Demensi bagi keratan rentas motor 9-lubang alur/10-kutub	31
Rajah 3.3	Formula bagi menentukan faktor jarak dalam motor 12-lubang alur/10-kutub.	33
Rajah 3.4	Vektor d.g.e setiap lilitan dan pemilihan lilitan setiap fasa dalam motor 12-lubang alur/10-kutub.	35
Rajah 3.5	Vektor d.g.e setiap lilitan dan pemilihan lilitan setiap fasa dalam motor 9-lubang alur/10-kutub.	37



Rajah 3.6	Kedudukan lilitan dalam setiap lubang alur pada pemegun dalam motor 12-lubang alur/10-kutub	40
Rajah 3.7	Sambungan setiap lilitan untuk membentuk belitan tiga fasa dalam motor 12-lubang alur/10-kutub	40
Rajah 3.8	Kedudukan lilitan dalam setiap lubang alur pada pemegun dalam motor 9-lubang alur/10-kutub	41
Rajah 3.9	Sambungan setiap lilitan untuk membentuk belitan tiga fasa dalam motor 9-lubang alur/10-kutub	41
Rajah 3.10	Lukisan autocad motor 12-lubang alur/10-kutub	43
Rajah 3.11	Lukisan autocad motor 9-lubang alur/10-kutub	43
Rajah 3.12	Model motor 12-lubang alur/10-kutub	44
Rajah 3.13	Model motor 9-lubang alur/10-kutub	44
Rajah 3.14	Analisis statik	45
Rajah 3.15	Perintah taburan medan magnet	45
Rajah 3.16	Taburan medan magnet motor 12-lubang alur/10-kutub	46
Rajah 3.17	Taburan medan magnet motor 9-lubang alur/10-kutub	46
Rajah 3.18	Perintah ketumpatan fluks	47
Rajah 3.19	Ketumpatan fluks motor 12-lubang alur/10-kutub	47
Rajah 3.20	Ketumpatan fluks motor 9-lubang alur/10-kutub	48
Rajah 3.21	Perintah vektor magnet	49
Rajah 3.22	Vektor magnet motor 12-lubang alur/10-kutub	49
Rajah 3.23	Vektor magnet motor 9-lubang alur/10-kutub	50
Rajah 3.24	Perintah ketumpatan fluks pada sela udara	51
Rajah 3.25	Ketumpatan fluks sela udara motor 12-lubang alur/10-kutub	51
Rajah 3.26	Ketumpatan fluks sela udara motor 9-lubang alur/10-kutub	52
Rajah 3.27	Pentakrifan wayar pengalir	53
Rajah 3.28	Pentakrifan pemutar	54

Rajah 3.29	Perintah 'fail comi'	55
Rajah 3.30	Gelombang pautan fluks	56
Rajah 3.31	Gelombang d.g.e songsang per fasa	57
Rajah 3.32	Gelombang d.g.e songsang per talian	58
Rajah 3.33	Gelombang tork penugalan	59
Rajah 3.34	Analisis putaran motor	60
Rajah 3.35	Kelajuan putaran motor	61
Rajah 3.36	Parameter keluaran gelombang tork	61
Rajah 3.37	Gelombang tork simulasi	62
Rajah 4.1	Rupa bentuk lapisan pemegun dan pemutar daripada kepingan besi	65
Rajah 4.2	Bongkah pemegun dan pemutar	66
Rajah 4.3	Pemegun dan pemutar	67
Rajah 4.4	Bekas pelindung motor	68
Rajah 4.5	Kedudukan pemegun di dalam bekas pelindung	68
Rajah 4.6	Kedudukan pemutar di dalam pemegun	69
Rajah 4.7	d.g.e songsang setiap talian bagi motor 12-lubang alur/10-kutub pada 486 rpm	70
Rajah 4.8	d.g.e songsang setiap talian bagi motor 9-lubang alur/10-kutub pada 432 rpm	71
Rajah 4.9	Penyambungan keseluruhan sistem terhadap beban	72
Rajah 4.10	Motor dan papan kawalan yang menggunakan cip dsPic	73
Rajah 4.11	Gambarajah keseluruhan sistem ujikaji	73
Rajah 4.12	Voltan terminal setiap talian (motor 12-lubang alur/10-kutub)	74
Rajah 4.13	Arus setiap talian (motor 12-lubang alur/10-kutub)	75

Rajah 4.14	Voltan terminal talian, arus talian dan penderia kesan hall (motor 12-lubang alur/10-kutub)	76
Rajah 4.15	Tork bagi motor 12-lubang alur/10-kutub pada beban $1.8\Omega$	76
Rajah 4.16	Voltan terminal setiap talian (motor 9-lubang alur/10-kutub)	77
Rajah 4.17	Arus setiap talian (motor 9-lubang alur/10-kutub)	78
Rajah 4.18	Voltan talian, arus talian dan penderia kesan hall (motor 9-lubang alur/10-kutub)	78
Rajah 4.19	Tork bagi motor 9-lubang alur/10-kutub pada beban $1.8\Omega$	79
Rajah 4.20	Perbezaan gelombang tork antara motor 12-lubang alur/10-kutub dan motor 9-lubang alur/10-kutub	82

## TERJEMAHAN ISTILAH

<i>Bahasa Melayu</i>	<i>Bahasa Inggeris</i>
Alniko	Alnico
Armatur	Armature
Aruhan	Induction
Arus pusar	Eddy current
Belitan	Winding
Belitan hujung	End winding
Berperingkat	Fractional
Berus	Brush
Besi	Iron
Dalaman	Interior
Dinamometer	Dynamometer
Dua lapis	Double layer
Eka arah	Unidirectional
Elektromagnet	Electromagnetic
Faktor jarak	Pitch factor
Gegelung	Coils
Gelincir	Slip
Histeresis	Hysteresis
Kawalan gerakan	Motion control
Kehilangan tembaga	Copper loss
Kehilangan teras	Core loss
Kekutuban	Polarity

Keluli	Steel
Kerintangan	Resistivity
Ketaklinearan	Non-linearity
Ketepuan	Saturation
Ketongjolan	Saliency
Kuprum	Copper
Kuk	yoke
Lingkaran	Turn
Lubang alur	Slot
Magnet kekal	Permanent magnet
Magnet	Magnetic
Medan	Field
Medan magnet berputar	Rotating magnetic field
Neodimium	Neodymium
Padat	Concentrated
Paksi	Axial
Pelangkah	Stepper
Pemegun	Stator
Pemutar	Rotor
Pencong	Skew
Penderia kesan hall	Hall effect sensor
Pensuisan	Switching
Penugalan	Cogging
Penukar tertib	Commutator
Penyahmagnetan	Demagnetization

Penyelakuan	Simulation
Penyongsang	Inverter
Perintah	Command
Pertindihan	Overlapping
Polifasa	Polyphase
Rintangan	Resistance
Saling tindak	Interaction
Segerak	Synchronous
Selaku	Simulate
Selang-seli	Alternate
Selapis	Single-layer
Siri fourier	Fourier series
Suap balik	Feedback
Tak berbalik	Irreversible
Tak bertindih	Non-overlapping
Tak seimbang	Unbalanced
Tanpa Berus	Brushless
Teragih	Distributed
Terpumpun	Concentrated
Telapan	Permeance
Terjarak pintas	Short-pitched
Ujaan	Excitation
Unsur terhingga	Finite element

## SINGKATAN ISTILAH

a.t	-	arus terus
a.u	-	arus ulang alik
d.g.e	-	daya gerak elektrik
d.g.m	-	daya gerak magnet
MMKTB	-	Motor Magnet Kekal Tanpa Berus

**REKABENTUK DAN CIRI-CIRI TORK UNTUK MOTOR MAGNET  
KEKAL TANPA BERUS YANG MEMPUNYAI KESAMAAN NISBAH  
LUBANG ALUR DAN KUTUB BERPERINGKAT**

**ABSTRAK**

Penyelidikan ini berkisar mengenai rekabentuk, permodelan simulasi dan pembinaan prototaip bagi mendapatkan gelombang keluaran seperti gelombang pautan fluks, daya gerak elektrik songsang, tork penugalan dan tork motor magnet kekal tanpa berus tiga fasa. Motor yang direkabentuk ini adalah jenis jejarian yang mempunyai kesamaan nisbah lubang alur terhadap kutub yang berperingkat. Motor magnet kekal tanpa berus menjadi tarikan kerana peningkatan dalam penghasilan bahan bermagnet yang dapat menghasilkan rekabentuk motor yang lebih kecil dengan kuasa yang lebih tinggi. Dalam kajian ini, perbezaan antara lubang alur dan kutub dengan kombinasi  $\pm 2$  dan  $\pm 1$  dipertimbangkan. Perbezaan yang kecil antara lubang alur dan kutub ini berpotensi meningkatkan prestasi motor yang direkabentuk. Kombinasi motor jenis berperingkat ini juga membolehkan belitan tak bertindih dua lapis digunakan di dalam motor di mana proses penghasilan belitan jenis ini lebih mudah. Analisis unsur terhingga digunakan dalam anggaran penentuan gelombang seperti rangkaian fluks, daya gerak elektrik songsang, tork penugalan dan tork yang mana setiap gelombang ini dibuktikan kesahihannya dalam pengukuran daripada prototaip. Dua buah prototaip motor telah dibina dalam penyelidikan bagi tujuan pengujian dan pengesahan. Motor yang pertama adalah motor 12-lubang alur/10-kutub dan motor kedua pula adalah motor 9-lubang alur/10-kutub.



# **DESIGN AND TORQUE CHARACTERISTICS FOR PM BRUSHLESS MOTORS HAVING SIMILAR FRACTIONAL SLOT AND POLE NUMBERS**

## **ABSTRACT**

This research proposes designing, modelling and prototyping in order to obtain output wave such as flux linkage, back-emf, cogging torque and torque of three-phase permanent-magnet brushless machines having a fractional slot to poles ratio. Brushless PM motors have gained a lot of attention because of the improvement in magnet materials. The growth of this motor has also been assisted with advancement in manufacturing of magnet material in such a way that one can create smaller motor with higher torque density and efficiency. In particular, permanent-magnet brushless machines which exhibits slot number and pole number differ by either  $\pm 2$  or  $\pm 1$  will be considered. Such small difference in slot and pole numbers will potentially improve motor characteristics and subsequently result in better motor performance. Such fractional slot-pole number motors are employing double-layer winding in order to simplify the manufacturing process. Finite-element methods are first used to predict the flux-linkage, back-emf, cogging torque and torque waveforms, and they are shown to be in good agreement with the measured results. Two prototypes are built for this research for test and validation. The first motor has 12-slot/10-pole and the other has 9-slot/10-pole.

# **BAB 1**

## **Pengenalan**

### **1.1 Pengenalan**

Motor Magnet Kekal Tanpa Berus (MMKTB) dan teknologi kawalan gerakan adalah sangat meluas digunakan dalam pelbagai penggunaan harian seperti automasi perkilangan, kenderaan di jalan raya, perkapalan, pesawat udara, alatan ketenteraan, perkakas rumah, alatan perubatan dan banyak lagi.

Kemajuan dalam bidang semikonduktor telah membolehkan sistem kawalan servo elektrik mengatasi teknologi yang lain seperti mekanik, hidraulik, dan sistem penggunaan udara untuk menjadikan ianya lebih sesuai dan menawarkan pelbagai kaedah dalam merekabentuk motor magnet kekal tanpa berus untuk kegunaan pelbagai penggunaan. Dengan aliran dunia sekarang yang mementingkan pemeliharaan dan penjimatan tenaga menyebabkan mesin elektrik yang direka cipta perlu mementingkan ciri-ciri seperti kecekapan, faktor kuasa dan ketumpatan kuasa yang tinggi. Dan setiap ciri-ciri ini ada pada motor magnet kekal tanpa berus yang juga dapat direkabentuk dengan saiz yang lebih kecil dan berat yang lebih rendah (Hanselman, 2003).

Motor magnet kekal tanpa berus menjadi tarikan kerana peningkatan dalam penghasilan bahan bermagnet pada masa sekarang di mana peningkatan ini juga sejajar dengan peningkatan kemajuan dalam bidang peranti elektronik kuasa dan dalam menghasilkan reka bentuk motor yang lebih kecil, murah dan dapat menghasilkan kuasa yang lebih tinggi (Gieras & Wing, 2002). Kelebihan yang ketara dalam motor magnet kekal tanpa berus adalah keadaan berat dan isipadunya yang lebih kecil dalam penghasilan kuasa keluaran, bermula dengan medan ujaannya dihasilkan oleh magnet kekal, kecekapan motor ini menjadi tinggi disebabkan tiada

kehilangan kuasa pada pemutar dimana tiada lilitan kuprum di bahagian pemutar. Selain itu, haba yang dihasilkan oleh motor pada bahagian pemegun juga lebih mudah untuk dibebaskan. Kelajuan motor ini juga dapat dikawal dengan baik dan malar disebabkan medan magnet yang dihasilkan oleh pemegun dan pemutar adalah segerak.

Kemajuan dalam penghasilan bahan bermagnet telah menggalakkan kepelbagaian dalam rekabentuk motor magnet kekal tanpa berus ini. Pelbagai jenis bahan magnet kekal yang terdapat di pasaran pada hari ini seperti alnico, ferit, samarium-kobalt dan neodimium-besi-boron (NdFeB). Samarium-kobalt dan NdFeB merupakan magnet yang dapat menghasilkan prestasi yang tertinggi tetapi NdFeB lebih popular dan menjadi pilihan disebabkan harganya yang lebih murah berbanding Samarium-kobalt (Hanselman, 2003). NdFeB ini telah berjaya menggantikan magnet seperti ferait dan alnico dalam semua penggunaan yang melibatkan ketumpatan kuasa yang tinggi, prestasi dinamik yang baik dan kecekapan kuasa yang tinggi. Disebabkan faktor-faktor ini, pelbagai jenis motor magnet kekal dapat direkabentuk bagi meningkatkan prestasi dan mengurangkan kos sesuatu motor.

Beberapa konsep perlu dipelajari dan difahami terlebih dahulu sebelum merekabentuk motor. Banyak daripada konsep-konsep ini biasanya dapat dipakai untuk hampir semua jenis motor elektrik. Bagi motor yang jenis berputar gerakannya, keluarannya adalah tork, manakala bagi motor yang jenis linear gerakannya, keluarannya adalah tujahan. Pemilihan bahan yang sesuai juga merupakan perkara penting dalam merekabentuk motor. Spesifikasi bahan yang perlu dititikberatkan adalah berkaitan dengan ketahanan dari segi elektrik, magnet, dan mekanik. Ketahanan dari segi elektrik adalah seperti kehilangan teras yang terdiri daripada kehilangan arus pusar dan kehilangan histeresis, kehilangan tembaga,

ketaklinearan besi keluli, peningkatan nilai kearuhan dan rintangan dalam operasi suhu yang tinggi. Ketahanan dari segi magnet adalah seperti tindak balas armatur, ketepuan dalam besi, tork penugalan dan penyahmagnetan yang tak berbalik. Ketahanan dari segi mekanik pula adalah seperti had minimum dan maksimum suhu yang dapat ditahan oleh komponen-komponen yang digunakan dalam sesebuah motor, sistem penyejukan, bunyi getaran, had kelajuan maksimum dan ketakseimbangan tarikan magnet daripada kesipian pemutar (Wildi, 2006).

Dalam operasi motor elektrik, dua medan magnet diperlukan bagi menghasilkan tork atau daya sebagai keluaran iaitu medan magnet yang dihasilkan pada pemegun dan medan magnet yang dihasilkan pada pemutar. Bagi motor magnet kekal tanpa berus, medan magnetnya terhasil daripada arus yang melalui belitan di pemegun dan medan magnet yang wujud pada pemutar terhasil disebabkan magnet kekal. Motor tanpa berus bermaksud motor yang beroperasi tanpa berus, cincin gelincir atau menggunakan penukar tertib mekanik sebagai penyambung ke belitan pada bahagian pemutar seperti yang diperlukan oleh motor a.t lazim atau motor a.u segerak (Hendershot & Miller, 1994).

MMKTB yang mempunyai kombinasi nisbah lubang alur terhadap kutub yang berperingkat dan menggunakan belitan tak bertindih adalah popular disebabkan ianya dapat menghasilkan tork penugalan yang rendah, belitan hujung pendek, faktor belitan dasar yang tinggi, kecekapan tinggi dan ketumpatan kuasa yang tinggi (Salminen et al., 2004). Kombinasi nisbah lubang alur terhadap kutub berperingkat bagi MMKTB tiga fasa yang mempunyai lubang alur  $N_s$  dan kutub  $2p$  yang dibezakan oleh  $\pm 2$  adalah seperti 6/4, 6/8; 12/10, 12/14; 18/16, 18/20; 24/22, 24/26;, dll, manakala dibezakan  $\pm 1$  adalah seperti 3/2, 3/4; 9/8, 9/10; 15/14, 15/16; 21/20, 21/22;, dll. (Ishak et al., 2006; El-Refaie and Jahns, 2005). MMKTB ini juga sangat

meluas digunakan dalam industri dan pelbagai penggunaan harian seperti pengangkat, lif dan tangga berjalan (Cros dan Viarouge, 2002 ; Ishak et al., 2005).

Magnet kekal yang ada pada motor menyebabkan pemagnetan dapat dihasilkan dalam motor tanpa pengujaan luaran. MMKTB tiga fasa yang akan dibincangkan dalam kajian ini menggunakan belitan tidak bertindih dan jenis dua lapis. Analisis unsur terhingga digunakan dalam penyelidikan ini untuk meramal gelombang keluaran seperti pautan fluks, d.g.e songsang, tork penugalan dan tork bagi motor.

## **1.2 Skop dan matlamat kajian**

Seperti yang telah diterangkan di atas, motor magnet kekal tanpa berus adalah sangat meluas digunakan dalam pelbagai penggunaan disebabkan kelebihan-kelebihan yang ada padanya.

### **1.2.1 Skop kajian**

Skop kajian adalah merangkumi rekabentuk, pengiraan analitikal, penyelakuan dan juga ujikaji MMKTB tiga fasa jenis jejarian yang mempunyai nisbah lubang alur terhadap kutub berperingkat  $2p=N_s\pm 2$  iaitu motor 12-lubang alur/10-kutub dan berperingkat  $2p=N_s\pm 1$  iaitu motor 9-lubang alur/10-kutub. Pengiraan analitikal digunakan untuk mendapatkan dimensi-dimensi MMKTB. Seterusnya kaedah unsur terhingga digunakan untuk penyelakuan motor dan mengoptimumkan prestasi motor tersebut. Selepas proses penyelakuan, dua prototaip motor dihasilkan untuk tujuan eksperimen dan pengesahan.

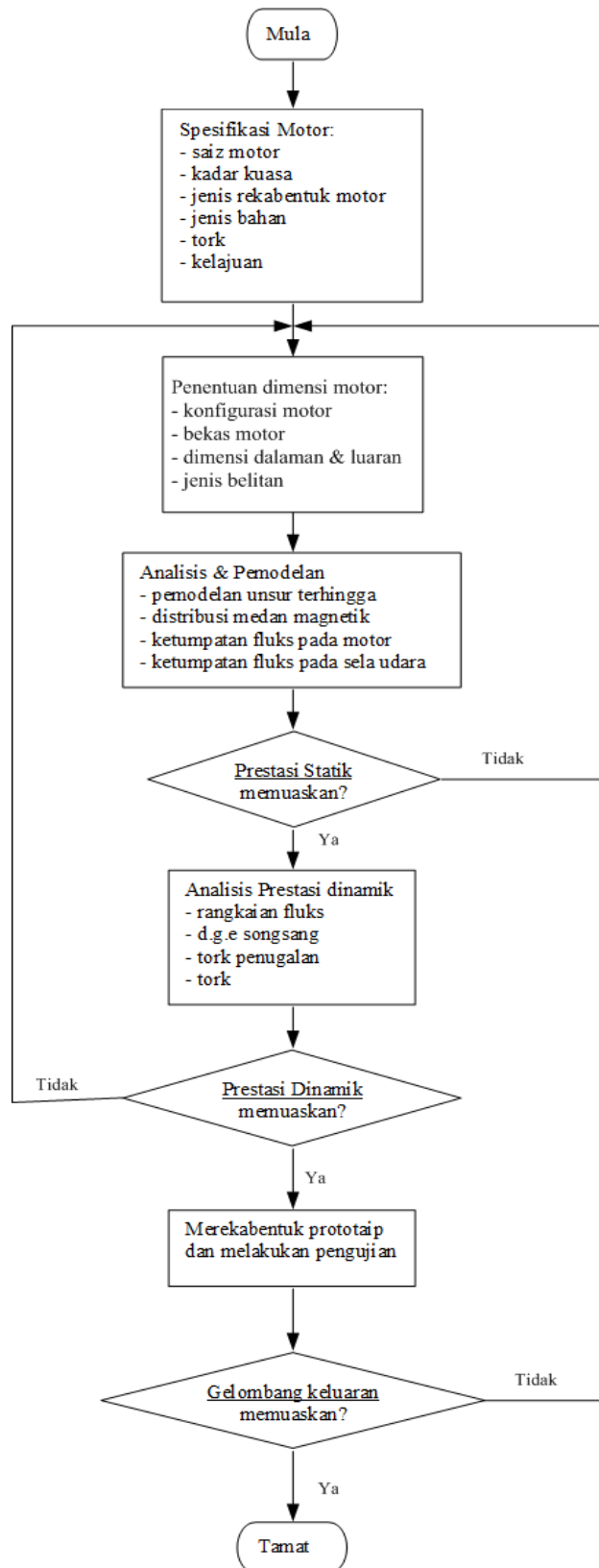
### **1.2.2 Matlamat kajian**

Motor magnet kekal tanpa berus yang digunakan secara meluas di Malaysia adalah diimport dari luar negara secara keseluruhannya. Oleh itu, kaedah membuat dan menghasilkan sendiri motor ini adalah sangat kurang di negara kita. Matlamat kajian ini adalah untuk:

- Mengkaji dan merekabentuk MMKTB berperingkat dengan kombinasi 12-lubang alur/10-kutub mengikut persamaan  $2p=N_s\pm 2$  dan 9-lubang alur/10-kutub mengikut persamaan  $2p=N_s\pm 1$
- Menghasilkan motor yang boleh beroperasi dalam keadaan kelajuan yang rendah dan tork yang tinggi
- Membina prototaip, membuat ujikaji dan seterusnya perbandingan keputusan ujian ke atas kedua-dua motor MMKTB

### **1.3 Kaedah pelaksanaan kajian**

Dalam penghasilan MMKTB tiga fasa, terdapat beberapa langkah yang perlu diambil sebelum sesebuah prototaip dibina dan diuji. Rajah 1.1 adalah ringkasan kepada kitaran proses rekabentuk MMKTB.



Rajah 1.1 Carta alir bagi reka bentuk motor magnet kekal tanpa berus

### **1.3.1 Rekabentuk**

Setelah kajian latar belakang mengenai keseluruhan projek dilaksanakan, nilai-nilai dimensi setiap bahagian motor ditentukan berdasarkan teori-teori yang berkaitan dan grafik bagi rekabentuk motor dilukis menggunakan perisian autocad.

### **1.3.2 Analisis unsur terhingga**

Bahagian-bahagian yang telah direka bentuk di atas dianalisis menggunakan perisian yang dinamakan Opera2d<sup>Tm</sup> iaitu penyelakuan pemodelan jenis unsur terhingga. Keputusan yang diperolehi daripada proses penyelakuan ini dikaji, sekiranya terdapat apa-apa masalah pada gelombang keluaran atau gelombang keluaran tidak menepati sepertimana yang dikehendaki, proses reka bentuk diulang semula sehinggalah keputusan penyelakuan menepati sepertimana yang dikehendaki.

### **1.3.3 Fabrikasi**

Setelah diyakini rekabentuk adalah betul berdasarkan keputusan penyelakuan, proses menghasilkan bahagian pemegun dan pemutar akan dijalankan iaitu dengan melakukan kaedah yang dipanggil potongan dawai. Proses ini dilakukan ke atas kepingan-kepingan besi nipis mengikut dimensi dan bentuk yang dikehendaki. Kepingan-kepingan besi ini kemudian akan dipateri menjadi panjang mengikut panjang paksi yang direka bentuk. Bongkah pemegun dan pemutar yang terhasil daripada proses pematerian ini seterusnya akan dimasukkan kombinasi belitan ke dalam lubang alur pemegun dan magnet akan dilekatkan pada pemutar. Pemegun dan pemutar yang telah siap dipasang ini akan dimasukkan ke dalam bekas sebagai pelindung dan proses pemasangan penerima kesan hall akan dilakukan sebelum bekas ditutup sepenuhnya dan siap untuk diuji.



#### **1.3.4 Pengujian**

Selepas setiap bahagian motor lengkap dipasang, pengujian akan dilakukan untuk mengenalpasti gelombang keluaran sama ada mengikut gelombang yang dikehendaki atau tidak. Alat pengukur seperti osiloskop dan meter fluk digunakan untuk mendapatkan gelombang seperti arus, voltan, d.g.e songsang pada motor. Bagi mendapatkan keluaran seperti tork dan kuasa bagi motor, motor hendaklah disambung kepada beban terlebih dahulu dan alat pengukur yang digunakan adalah dinamometer. Keputusan-keputusan yang diperolehi daripada alat-alat pengukur ini akan dibandingkan dengan keputusan yang diperolehi di peringkat penyelakuan. Sekiranya tidak menepati sebagaimana yang dikehendaki, masalah tersebut diselidiki secara mendalam untuk mengenalpasti puncanya.

#### **1.3.5 Rekabentuk semula dan pengoptimuman**

Proses rekabentuk semula atau pembaikan perlu dilakukan ke atas motor yang telah diuji apabila terdapat masalah pada gelombang keluaran. Banyak kemungkinan yang boleh berlaku apabila masalah-masalah ini wujud contohnya seperti gelombang d.g.e songsang yang herot mungkin disebabkan oleh proses belitan yang salah atau berlaku litar pintas terhadap belitan-belitan ini. Bunyi motor yang bising, disebabkan nilai tork penunggalan yang tinggi. Motor tidak berpusing disebabkan penderia yang rosak atau tidak kena kedudukannya semasa proses pemasangan dilakukan. Motor-motor ini juga akan menjadi cepat panas jika bahan yang digunakan dalam proses pembuatannya tidak sesuai. Selain itu, dimensi-dimensi mekanik juga perlu dititikberatkan dalam rekabentuk motor kerana kesilapan yang berlaku dalam bahagian mekanik akan memberi masalah pada proses pemasangan. Jika masih berlaku masalah setelah pembaikan dilakukan pada bahagian-bahagian ini, proses

rekabentuk semula dilakukan, dibuat fabrikasi dan diuji lagi. Proses ini akan diulang sehinggalah tahap operasi yang optimum dicapai.

### **1.3.6 Integrasi sistem**

Motor yang telah siap diuji dan dioptimumkan akan disambung kepada sistem kawalan yang terdiri daripada papan kawalan yang menggunakan cip dsPIC dan papan kawalan ini disambung ke penyongsang dan sumber masukan. Sistem yang lengkap diuji dan keputusan yang diperolehi diselidiki sama ada sistem beroperasi sebagaimana yang dikehendaki atau tidak. Sekiranya beroperasi, setiap bentuk gelombang dan nilai masukan serta keluaran akan direkodkan dan diuji dengan pelbagai keadaan beban. Jika keadaan sebaliknya berlaku, bahagian yang masih bermasalah diselidiki dan jika perlu, diubahsuai sehinggalah masalah berkaitan dapat diatasi. Masalah yang tidak dijangka mungkin berlaku setelah sistem diintegrasikan walaupun kesemua bahagian telah diuji dan beroperasi dengan baik. Setiap masalah ini akan dikenalpasti dan sesuatu penyelesaian perlu diambil untuk mengatasinya.

## **1.4 Struktur tesis**

Secara keseluruhannya, tesis ini mengandungi lima bab. Bab 1 memberi penerangan ringkas mengenai penyelidikan yang dilakukan, penerangan ini merangkumi latar belakang, pengenalan, objektif, skop dan kaedah pelaksanaan projek.

Bab 2 akan memfokuskan tentang kajian ilmiah berkenaan konsep asas motor tanpa berus, selain itu jenis-jenis motor tanpa berus turut dinyatakan dan rupa bentuk motor magnet kekal tanpa berus (MMKTB) yang dapat direka bentuk juga diuraikan. Bentuk-bentuk gelombang asas MMKTB seperti pautan fluks, d.g.e songsang dan tork bagi motor ditunjukkan berdasarkan persamaan asas motor.

Sedikit penerangan berkenaan belitan dalam MMKTB dinyatakan dalam bab ini sebelum dihuraikan dengan lebih jelas dalam bab 3 di mana sambungan belitan yang wujud bagi kedua-dua motor dalam kajian ini digambarkan dengan lebih jelas.

Bab 3 menghuraikan tentang bagaimana MMKTB dalam kajian ini direka bentuk bermula dengan nilai-nilai dimensi motor yang digunakan dan nilai-nilai seperti faktor jarak, faktor agihan dan faktor belitan dalam motor. Kemudian huraian seterusnya berkenaan dengan pemilihan lilitan dalam menentukan belitan dalam motor. Setiap sambungan lilitan digambarkan secara jelas dengan disertakan gambarajah. Bahagian seterusnya dalam bab ini adalah berkenaan kaedah pemodelan unsur terhingga yang digunakan sebagai penyelaku untuk menentukan gelombang-gelombang keluaran.

Fokus perbincangan dalam bab 4 pula adalah berkaitan tentang bagaimana proses-proses menghasilkan prototaip dilakukan setelah keputusan daripada penyelakuan memuaskan. Bermula dengan penerangan berkaitan proses penghasilan bahagian-bahagian seperti pemegun dan pemutar daripada kepingan besi yang dibentuk menggunakan proses potongan wayar, seterusnya proses memasukkan sambungan wayar kuprum ke dalam pemegun bagi membentuk belitan dalam motor. Motor yang telah siap dipasang kemudian diuji bagi mendapatkan bentuk gelombang keluaran untuk membezakan dengan gelombang yang dihasilkan dalam penyelakuan. Bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan prototaip ini juga dapat menggambarkan prestasi sesebuah motor.

Bab 5 merupakan bab terakhir dalam tesis ini. Semua keputusan dan ulasan yang diperoleh di dalam penyelidikan ini akan disimpulkan di dalam bab 5.

## **BAB 2**

### **TOPOLOGI MOTOR ELEKTRIK TANPA BERUS**

#### **2.1 Dfinasi dan konsep asas motor tanpa berus**

Motor tanpa berus bermaksud motor yang beroperasi tanpa berus, cincin gelincir atau menggunakan penukar tertib mekanik sebagai penyambung ke belitan di bahagian pemutar seperti yang diperlukan oleh motor a.t atau motor a.u segerak (Hendershot & Miller, 1994).

Terdapat dua medan magnet yang menyebabkan motor berputar dalam operasi motor elektrik iaitu medan magnet yang terhasil pada bahagian pemutar dan medan magnet yang terhasil adalah disebabkan adanya arus yang melalui belitan atau magnet kekal di bahagian pemegun. Saling tindak antara kedua-dua medan magnet inilah yang menyebabkan motor beroperasi. Proses penukartertiban yang berlaku dalam operasi motor merupakan konsep asas bagi motor tanpa berus dan kawalannya.

#### **2.2 Jenis-jenis motor tanpa berus**

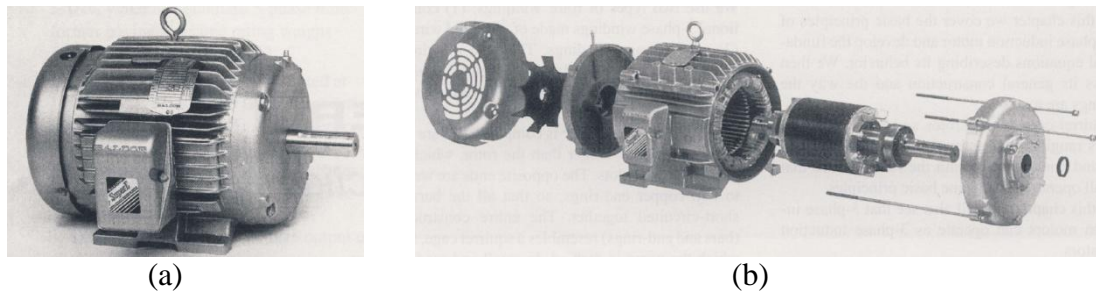
Jenis-jenis motor tanpa berus yang biasa adalah seperti motor aruhan, motor pelangkah, motor magnet kekal tanpa berus a.t dan motor magnet kekal tanpa berus a.u.

##### **2.2.1 Motor aruhan**

Motor aruhan merupakan motor asas bagi motor tanpa berus di mana arus yang wujud dalam bar pemutar dihasilkan oleh aruhan electromagnet. Sebagai motor a.u, motor aruhan menggunakan medan magnet berputar pada kelajuan segerak yang dihasilkan oleh frekuensi bekalan. Walaubagaimanapun, kelajuan putaran pemutar bagi motor ini adalah sedikit rendah berbanding medan magnet berputar disebabkan

aruhan elektromagnet memerlukan gerakan relatif, atau gelincir (slip) antara pemutar dan medan berputar.

Gelincir ini menyebabkan motor aruhan beroperasi secara tak segerak, bermakna kelajuan pemutar tidak lagi sama seperti frekuensi sumber. Arus teraruh pada pemutar juga menyebabkan kehilangan kuasa yang menyebabkan peningkatan haba dan menurunkan kecekapan. Gambarajah motor aruhan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.1(a) dan Rajah 2.1(b).



Rajah 2.1 Motor aruhan. (a) Motor dengan bekas pelindung (b) Bahagian-bahagian dalaman motor (Wildi, 2006)

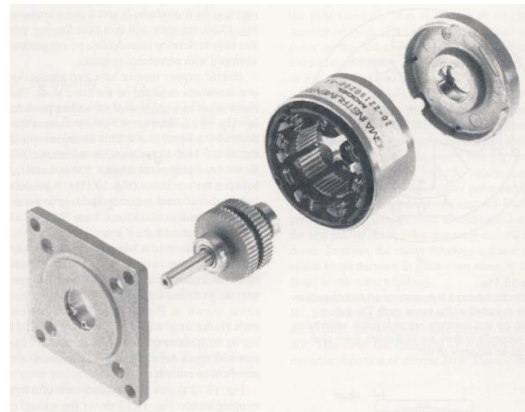
Perubahan rintangan pemutar yang disebabkan oleh pembebasan haba juga penyebab kesan perubahan tork dan keadaan ini menyebabkan motor lebih sukar untuk dikawal, khususnya dalam penggunaan kawalan gerakan kerpersediaan tinggi. Setiap kelemahan yang wujud dalam motor aruhan ini dapat diatasi oleh motor magnet kekal tanpa berus (Hendershot & Miller, 1994).

### 2.2.2 Motor pelangkah

Motor pelangkah merupakan satu lagi contoh motor tanpa berus. Motor ini merupakan motor yang khusus untuk kegunaan yang memerlukan kawalan kejitian dalam pergerakan dan kedudukan. Seperti namanya, motor pelangkah berputar dalam langkah berasingan, setiap langkah putaran berdasarkan denyut frekuensi yang diberikan terhadap belitan di pemegun. Gambarajah motor pelangkah adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.2(a) dan Rajah 2.2(b).



(a)



(b)

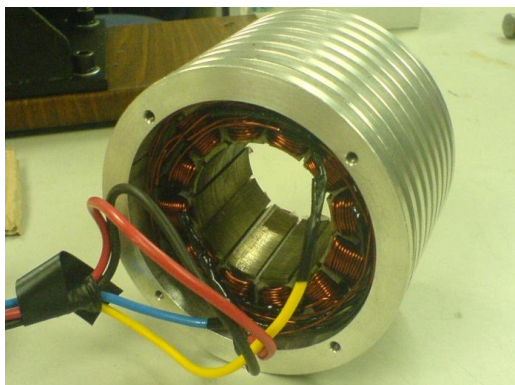
Rajah 2.2 Motor pelangkah. (a) Motor dengan bekas pelindung (b) Bahagian-bahagian dalaman motor (Wildi, 2006)

Bergantung kepada sesuatu reka bentuk, motor pelangkah dapat berputar dalam  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $18^\circ$  atau sekecil pecahan sudut terhadap denyut. Kelebihan motor ini adalah operasi gelung terbukanya yang menyebabkan kawalan kedudukan dapat dicapai tanpa suap balik kedudukan gandar. Walaubagaimanapun, untuk mencapai operasi tork yang stabil, motor pelangkah direka bentuk dengan jarak sudut langkah yang kecil, geometri gigi-gigi yang baik dan jarak sela udara yang kecil. Masalah yang wujud dalam motor jenis ini adalah tidak tahan terhadap gema yang wujud apabila berlakunya gandaan kelajuan (Wildi, 2006).

### 2.2.3 Motor magnet kekal tanpa berus a.t dan motor magnet kekal tanpa berus a.u

Rekabentuk motor magnet kekal tanpa berus (MMKTB) a.t dan a.u adalah hampir sama, di mana lapisan pemegunnya membawa belitan yang mewakili fasa sesuatu motor dan magnet kekal pada pemutar pula membawa maksud bilangan kutub yang ada pada sesebuah motor tersebut. Perbezaan antara kedua-dua motor ini adalah kawalannya dan gelombang d.g.e songsang yang dihasilkan.

Biasanya motor magnet kekal tanpa berus a.t mempunyai d.g.e. songsang berbentuk trapezium dan gelombang arus yang berbentuk segiempat di mana penderia kedudukan diskrit diperlukan untuk menentukan kedudukan pemutar dan kawalan yang digunakan adalah jenis kawalan gelombang segiempat. Bagi motor magnet kekal tanpa berus a.u pula mempunyai d.g.e. songsang yang sinusoidal dan bentuk arus yang juga sinusoidal di mana memaksa motor jenis ini memerlukan penderia kedudukan yang tinggi kepersisannya manakala kawalan yang digunakan adalah jenis kawalan vektor.



(a)



(b)

Rajah 2.3 Motor magnet kekal tanpa berus (a) Pemegun (b) Pemutar dengan magnet pada permukaan

Terdapat pelbagai jenis rekabentuk untuk kedua-dua motor ini termasuklah rekabentuk pelbagai fasa dan juga operasi motor yang tidak menggunakan penderia. Motor ini beroperasi dengan medan magnet yang dihasilkan magnet kekal di bahagian pemutar berputar mengikut medan magnet yang dihasilkan oleh konduktor wayar kuprum yang membawa arus di bahagian pemegun.

Berlainan dengan motor magnet kekal dengan berus di mana motor jenis ini magnetnya yang bertindak sebagai pemegun dan pemutarnya mengandungi belitan yang menghasilkan medan magnet yang dibekalkan oleh bekalan voltan a.t melalui berus atau komutator. Pembinaan MMKTB a.t/a.u yang tidak memerlukan berus merupakan kelebihan motor jenis ini di mana ianya tidak memerlukan kerja-kerja penyelenggaraan dan penukaran berus. Kedudukan belitan di bahagian pemegun yang berada di luar juga menyebabkan pengaliran dan pembebasan haba motor jenis ini lebih baik. Disebabkan kelebihan ini, ketumpatan kuasa motor ini lebih tinggi di mana saiz motor magnet kekal tanpa berus yang lebih kecil boleh menghasilkan kuasa keluaran yg sama dengan kuasa keluaran motor dengan berus. Kajian yang dijalankan dalam penyelidikan ini juga berkisar tentang bagaimana MMKTB a.t ini direkabentuk, diselaku, dibina dan diuji.

### **2.3 Rupa bentuk motor magnet kekal tanpa berus**

Terdapat beberapa perbezaan rupa bentuk dalam MMKTB kerana sesuatu rupa bentuk itu bergantung kepada jenis penggunaan, kualiti sesuatu magnet dan penggunaan sesebuah motor tersebut. Sebagai contoh, jika penggunaan yang memerlukan pecutan dan nyah pecutan yang pantas terhadap beban, tork per inersia sesebuah motor itu mestilah direkabentuk setinggi yang boleh. Rupa bentuk operasi



motor seperti ini biasanya adalah jenis pemutar dalaman dan menggunakan magnet berkuasa tinggi (Hanselman, 2003).

Berlainan dengan penggunaan yang hanya memerlukan kelajuan sederhana dan malar, rupa bentuk yang sesuai adalah jenis pemutar luaran di mana pemutar akan berputar di bahagian luar pemegun. Rupa bentuk motor jenis ini biasanya digunakan dalam penggunaan kipas, penghembus dan basikal elektrik. Motor jenis ini juga sangat popular dalam penggunaan kawalan cakera keras dalam komputer di mana penggunaan ini memerlukan kelajuan yang malar dan pemutar di bahagian luar dalam reka bentuk ini juga merupakan kelebihan dalam menghasilkan tork per inersia yang tinggi.

Pemilihan rupa bentuk motor merupakan pekara yang paling asas dalam reka bentuk motor kerana ianya berkaitan dengan kos sesuatu magnet, isu-isu berkaitan pembungkusan, ketahanan magnet dan juga jenis belitan yang digunakan. Perbincangan seterusnya akan berkisar tentang jenis-jenis rupa bentuk motor yang biasa direka bentuk.

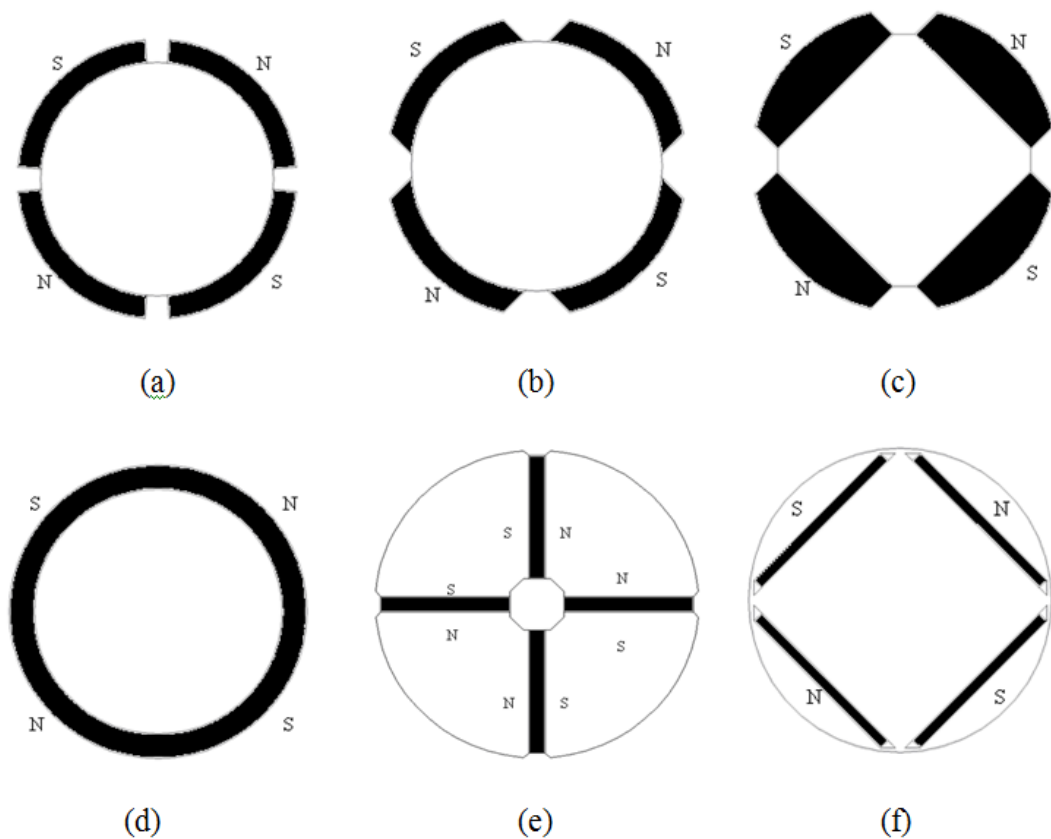
### **2.3.1 Pemutar dalaman**

Dalam kebanyakan motor elektrik, fluks akan merentasi dari pemutar ke pemegun dalam keadaan arah jejarian. Majoriti rekabentuk motor jenis ini adalah bahagian pemutarnya berada di dalam dan bahagian pemegun berada di luar. Rekabentuk pemutar dalaman juga mempunyai beberapa jenis rupa bentuk yang berlainan. Rajah 2.4 menunjukkan pelbagai jenis rupa bentuk pemutar dalaman.

Empat gambarajah awal iaitu Rajah 2.4 (a) hingga Rajah 2.4(d), menunjukkan jenis-jenis magnet di permukaan pemutar yang mana bentuk asalnya adalah seperti Rajah 2.4(a). Rajah 2.4(b) adalah sama, kecuali bahagian tepi magnet adalah selari,

bukan jejarian. Alternatif bentuk yang lain adalah seperti Rajah 2.4(c), dimana bahagian tepi magnet adalah selari dan bahagian bawah adalah sama. Rekabentuk magnet seperti Rajah 2.4(b) dan Rajah 2.4(c) terhasil adalah disebabkan oleh proses pembuatannya yang lebih mudah bermula dengan blok magnet yang berbentuk segiempat.

Rajah 2.4(d) menunjukkan kutub magnet dibina melalui proses pemagnetan selepas magnet dipasang pada kok pemutar di mana magnet pemutar dibentuk daripada lingkaran pepejal bahan bermagnet. Pemutar jenis magnet di permukaan ini adalah sangat meluas digunakan dalam pelbagai penggunaan.



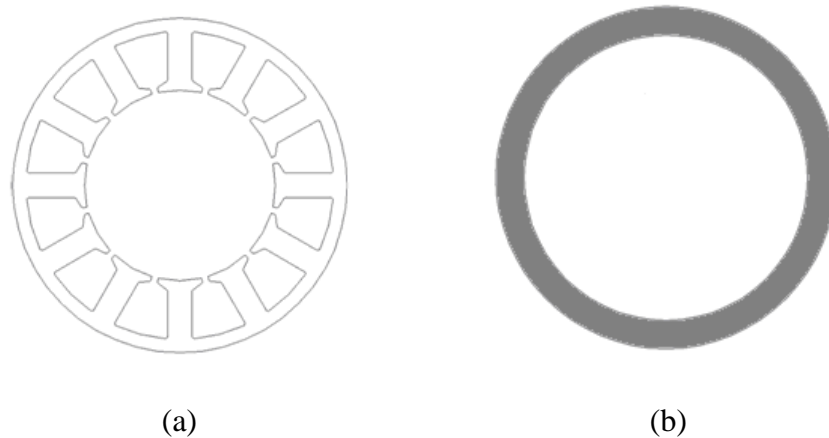
Rajah 2.4 Jenis-jenis rupa bentuk pemutar dalaman

Dua lagi pemutar yang berada dalam Rajah 2.4 ini adalah jenis magnet yang berada di dalam rangka pemutar. Rajah 2.4(e) menunjukkan pemasangan magnet

yang dinamakan kombinasi magnet jejarian. Susunatur magnet seperti ini dapat menghasilkan ketumpatan fluks yang lebih tinggi disebabkan kawasan permukaan magnet adalah lebih lebar berbanding kawasan permukaan luaran pemutar. Rupa bentuk pemutar seperti ini juga hanya menggunakan blok magnet yang hanya berbentuk segiempat untuk dipasang pada ruang dalaman pemutar.

Rajah terakhir iaitu Rajah 2.4(f) menunjukkan magnetnya ditanam di dalam pemutar. Binaan pemutar seperti ini adalah berguna kepada operasi motor yang berkelajuan tinggi disebabkan magnet segiempatnya dilindungi sepenuhnya oleh kerangka pemutar.

Pemegun bagi motor pemutar dalaman kebiasaannya wujud dalam dua bentuk, iaitu pemegun yang mempunyai lubang alur dan pemegun yang tidak mempunyai lubang alur seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.5(a) dan Rajah 2.5(b).



Rajah 2.5 Pemegun (a) Mempunyai lubang alur (b) Tidak mempunyai lubang alur

Pemegun yang mempunyai lubang alur biasanya direka bentuk supaya sela udara antara pemutar dan pemegun yang kecil menyebabkan fluks pada sela udara ini berketumpatan tinggi. Selain itu, kawasan gigi pemegun yang menggunakan bahan ferromagnet menyebabkan pengaliran haba yang baik ke bahagian luar permukaan pemegun dan dapat membantu proses penyejukan, walaupun reka bentuk motor jenis

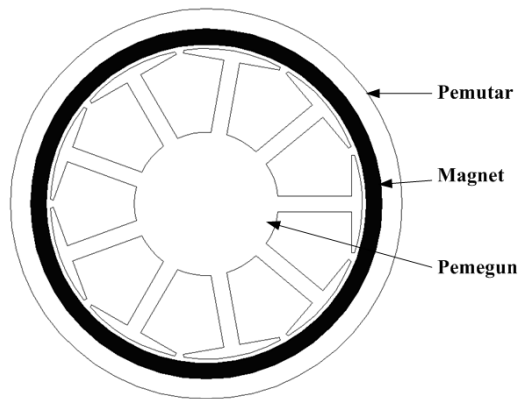
ini banyak kelebihan tetapi ianya juga ada kekurangan seperti wujudnya tork gerigi dan proses pemasangan lilitan yang memaksa wayar dimasukkan ke bukaan kecil lubang alur antara gigi-gigi lubang alur.

Pemegun yang tidak mempunyai lubang alur mengandungi lilitan yang dibentuk ke dalam gegelang pemegun di dalam kok pemegun di mana hanya mewujudkan sela udara yang kecil antara lilitan dengan pemutar. Keadaan pemegun yang tak mempunyai gigi menyebabkan tiada tork gerigi pada pemegun jenis ini, ianya juga memberi ruang yang lebih besar dalam melakukan lilitan, walaubagaimanapun pengaliran haba ke bahagian luar pemegun yang tidak mempunyai lubang alur ini kurang baik kerana ruang luar pemegun yang agak terhad. Selain itu ketumpatan fluks pada sela udara juga rendah menyebabkan kualiti operasi sesebuah motor jenis juga menurun. Bagi memperbaiki fluks pada sela udara ini menjadi tinggi, kualiti dan kuatiti magnet terpaksa ditingkatkan dalam motor pemegun jenis ini.

Keadaan-keadaan yang wujud ini telah menyebabkan pemegun yang mempunyai lubang alur lebih meluas digunakan berbanding pemegun yang tak mempunyai lubang alur.

### **2.3.2 Pemutar luaran**

Terdapat banyak kelebihan dalam motor yang pemutarnya berada di dalam seperti proses pembebasan haba yang baik disebabkan kedudukan belitan yang berada di luar dan keadaan pemutar yang berputar adalah lebih sesuai dan selamat berada di dalam, tetapi dalam sesetengah penggunaan, reka bentuk seperti ini tidak diperlukan di mana reka bentuk pemutar di luar dan pemegun di dalam digunakan seperti ditunjukkan dalam Rajah2.6.



Rajah 2.6 Motor dengan pemutar luaran

Motor pemutar luaran ini biasanya digunakan dalam penggunaan cakera keras dan juga penggunaan penyejukan menggunakan kipas-kipas seperti penyejuk cip pemprosesan komputer, penyejuk peranti-peranti yang berada di dalam sesuatu bekas dan basikal elektrik. Penggunaan motor jenis ini biasanya digunakan sebagai komponen dalaman dalam sesebuah binaan yang mempunyai struktur besar. Walaupun magnet berasingan boleh digunakan dalam reka bentuk motor ini, tetapi biasanya motor ini akan menggunakan satu gegelung magnet di mana gegelung ini akan dilekatkan pada bahagian pemutar seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.6. Kedudukan gigi-gigi pemegun yang menghala ke luar dan diliputi oleh ruang lingkup pemutar membolehkan motor jenis ini agak efisien dalam penghasilan angin.

Kelebihan yang ada pada motor jenis ini adalah dapat menghasilkan tork yang tinggi kerana kedudukan pemutar luaran ini berada lebih jauh berbanding kedudukan pemutar dalaman.

#### **2.4 Hubungan pautan fluks, daya gerak elektrik songsang dan tork**

Unsur asas yang dititikberatkan dalam operasi motor adalah bagaimana hubungan antara arus, pautan fluks dan d.g.e songsang yang berinteraksi untuk menghasilkan tork dan kuasa keluaran. Andaikan gelombang pautan fluks per fasa dalam sesuatu

operasi motor yang ideal adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7(a) di mana pautan fluks ini berubah mengikut perubahan kedudukan pemutar.

Berpandukan gelombang pautan fluks ini, gelombang d.g.e songsang boleh diterbitkan dengan menggunakan hukum Faraday, di mana hukum ini mengatakan d.g.e songsang adalah sama dengan kadar perubahan yang berlaku pada pautan fluks. Oleh kerana itu, nilai seketika bagi d.g.e songsang yang diwakilkan dengan simbol  $e$  boleh ditulis seperti persamaan berikut:

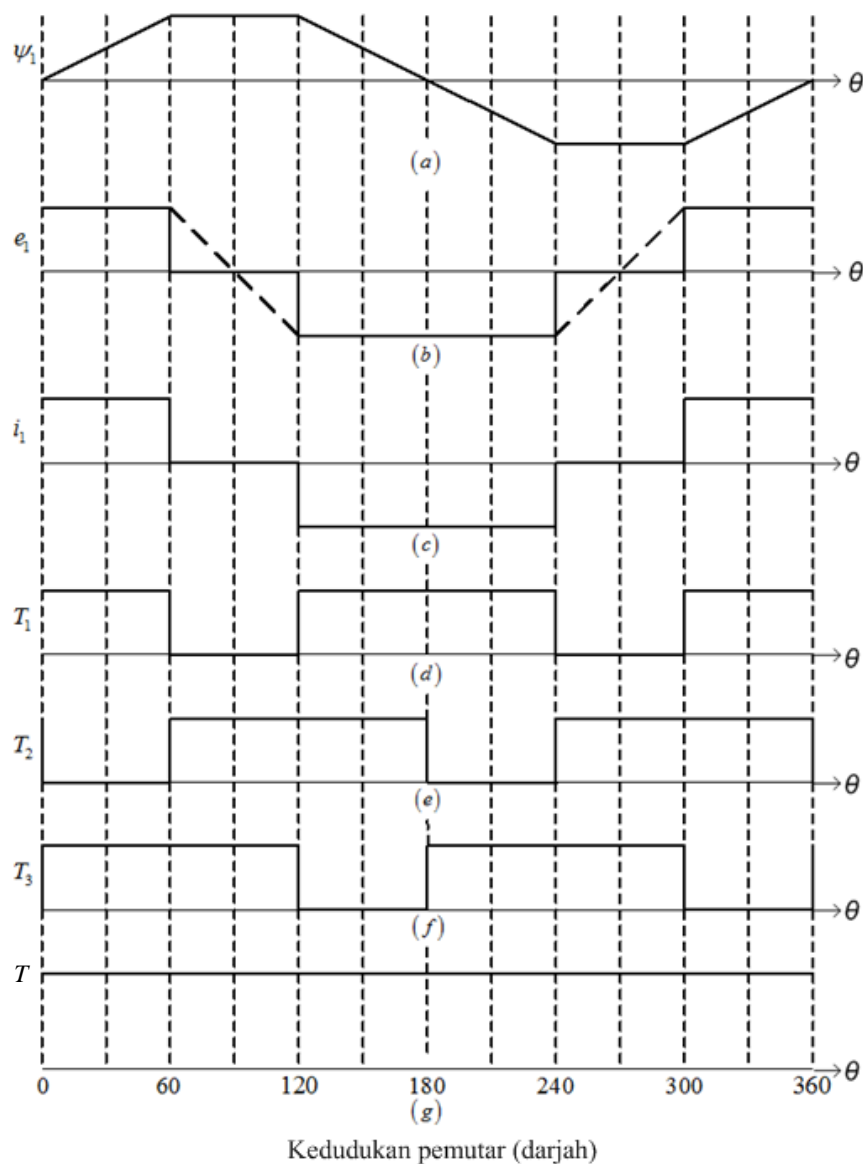
$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial t} = -\omega_m \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad (2.1)$$

di mana  $\omega_m$  adalah halaju sudut,  $\theta$  adalah posisi pemutar dan  $\psi$  adalah pautan fluks. Jika  $N$  adalah kelajuan dalam putaran/minit, maka  $\omega_m = 2\pi \times N/60$  rad/s. Kadar perubahan pautan fluks dengan kedudukan pemutar  $d\psi/d\theta$ , diperolehi daripada bentuk gelombang dalam Rajah 2.7(a) yang memberikan bentuk gelombang d.g.e per fasa seperti dalam Rajah 2.7(b).

Setiap gelombang dalam Rajah 2.7 adalah gelombang motor dalam keadaan ideal tetapi bentuk gelombang ini akan berbeza mengikut rekabentuk sesebuah motor. Kekutuban pensuisan penukartertib bekalan arus a.t  $i_1$  terhadap gegelung adalah sama dengan kekutuban d.g.e, maka bekalan kuasa yang dibekalkan adalah  $e_1 i_1$ . Gelombang arus  $i_1$  ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7(c). Jika halaju sudut adalah tetap dan semua bentuk kehilangan kuasa diabaikan, kuasa masukan dalam bentuk elektrik akan bertukar sepenuhnya ke kuasa keluaran mekanik iaitu  $T_1 \omega_m$ , di mana  $T_1$  adalah tork yang dihasilkan oleh satu gegelung.

Gelombang  $T_1$  ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7(d) dan jelas menunjukkan tork terhasil apabila berlakunya pembalikan kekutuban arus yang segerak dengan gelombang d.g.e songsang. Gelombang tork yang dihasilkan oleh

gegelung ke dua dan ke tiga juga adalah sama seperti  $T_1$ , tetapi masing-masing dibedakan dengan sudut  $120^\circ$  dan  $240^\circ$  elektrikal seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.7(e) dan Rajah 2.7(f). Jumlah tork bagi operasi motor ini adalah hasil tambah  $T_1, T_2$  dan  $T_3$  dan bentuk gelombang jumlah tork ini seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.7(g) dan tork ini adalah malar. Semua bentuk gelombang dalam Rajah 2.7 ini adalah operasi motor dalam keadaan ideal.



Rajah 2.7 Hubungan antara gelombang pautan fluks, d.g.e songsang, arus dan tork dalam keadaan ideal sesebuah MMKTB

## 2.5 Gelombang tork

Tork yang boleh dihasilkan sesebuah motor setelah direkabentuk merupakan kuantiti yang paling penting untuk dicari dan ditentukan. Tork diukur dengan daya yang dapat dihasilkan motor dan menggambarkan jenis spesifikasi sesebuah motor terhadap sesuatu aplikasi yang bersesuaian. Tork seketika bagi motor tanpa berus operasi a.t boleh ditulis seperti persamaan berikut (Ishak et al., 2005):

$$T_{inst} = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2.2)$$

di mana  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$ ,  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  masing-masing adalah d.g.e songsang dan arus seketika bagi setiap fasa. Gelombang tork hasil simulasi ke atas rekabentuk motor 12-lubang alur/10-kutub dan motor 9-lubang alur/10-kutub dalam kajian ini ditunjukkan dalam bab 3 manakala gelombang tork hasil pengukuran daripada prototaip motor ditunjukkan dalam bab 4.

## 2.6 Tork penugalan

Tork penugalan dalam MMKTB terjadi apabila berlakunya saling tindak magnet daripada permukaan pemutar terhadap gigi-gigi pada bahagian pemegun di mana tindakan ini tidak dipengaruhi arus elektrik. Tork penugalan biasanya berlaku dalam keadaan tersekat-sekat dan ianya dianggap satu masalah kepada sesebuah motor magnet kekal. Semakin rendah tork penugalan ini dalam sesebuah motor magnet kekal, semakin baik prestasi sesebuah motor tersebut.

Tork penugalan ini juga boleh dirasai apabila sesebuah motor magnet kekal diputar gandarnya di mana setiap denyutan yang terhasil dalam proses ini adalah disebabkan tork penugalan. Dalam lain perkataan, tork penugalan ini boleh digambarkan sebagai daya yang terhasil apabila magnet kekal pada pemutar



mencuba untuk menjajarkan dirinya dengan jumlah maksimum bahan ferromagnet pada pemegun. Secara persamaan tork penugalan boleh ditulis seperti berikut (Hanselman, 2003):

$$T_{cog} = -\frac{1}{2}\phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (2.3)$$

di mana  $\phi$  adalah fluks magnet yang melalui sela udara,  $\theta$  adalah sudut putaran pemutar dan  $R$  adalah jumlah enggan yang dilalui fluks apabila pemutar berputar. Secara jelas dapat dilihat tiada perubahan nilai  $R$  apabila tiada putaran pada pemutar, yang mana keadaan yang pegun ini menyebabkan persamaan perbezaan dalam persamaan 2.3 ini bernilai sifar seterusnya menyebabkan nilai tork penugalan juga sifar. Persamaan ini jelas menunjukkan tork penugalan akan wujud apabila berlakunya perubahan pada laluan fluks yang dihasilkan magnet.

Bukaan yang wujud pada setiap gigi-gigi lubang alur menyebabkan kerintangan yang dilalui fluks akan berubah seterusnya mewujudkan tork penugalan. Bagi motor yang tidak mempunyai bukaan lubang alur, nilai tork penugalan ini adalah sifar kerana tiada perubahan kerintangan pada laluan yang dilalui fluks. Walaubagaimanapun motor jenis ini jarang dihasilkan kerana proses belitannya akan menjadi sukar menyebabkan motor yang mempunyai bukaan lubang alur lebih praktikal. Oleh itu, bukaan lubang alur pada pemutar terpaksa diwujudkan bagi memudahkan proses belitan di mana lebar bukaan lubang alur ini hendaklah bersesuaian bagi membolehkan wayar dimasukkan melaluinya. Secara logiknya, kelebaran bukaan lubang alur ini hendaklah dua atau tiga kali ganda diameter wayar yang hendak disusun di dalam lubang alur.

Getaran dan bunyi yang terhasil disebabkan tork penugalan ini memberi kesan yang serius terhadap prestasi sesebuah motor terutamanya dalam aplikasi kelajuan

rendah dan pemacu terus (Li Zhu et al., 2009). Salah satu kelebihan motor yang mempunyai nisbah lubang alur terhadap kutub yang berperingkat seperti direkabentuk dalam kajian ini adalah dapat menghasilkan tork penugalan yang rendah disebabkan kombinasi lubang alur  $N_s$  dan kutub  $p$  mengikut persamaan  $2p=N_s\pm 2$  dan  $2p=N_s\pm 1$ . Gandaan sepunya terkecil  $N_{scm}$  bagi kombinasi ini adalah kebiasaannya tinggi seterusnya dapat menghasilkan tork penugalan yang rendah (Zhu et al.,1993 ; Zhu dan Howe,2000).

## **2.7 Belitan dalam motor magnet kekal tanpa berus**

MMKTB boleh mempunyai sebarang nombor bagi lubang alur  $N_s$  dan sebarang nombor genab bagi kutub magnet  $N_m$ . Daripada nilai tidak terhingga ini, hanya sebilangan kombinasi lubang alur dan kutub yang sesuai direka bentuk bagi mendapatkan gelombang keluaran yang memuaskan selain reka bentuk motor yang dibuat bagi memudahkan proses belitan juga merupakan faktor yang perlu diambilkira.

Terdapat beberapa perkara yang perlu dititik beratkan dalam pemilihan jenis belitan sesebuah motor. Bilangan bagi lubang alur haruslah gandaan bagi nombor fasa sesebuah motor, contohnya bagi motor tiga fasa, bilangan lubang alur akan sentiasa bernilai dengan gandaan tiga. Jika dalam satu lubang alur sesebuah motor diisi oleh dua bahagian lilitan, belitan ini dipanggil belitan dua lapis manakala jika hanya satu bahagian lilitan sahaja dalam satu lubang alur ianya dipanggil belitan satu lapis. Hanya belitan yang seimbang yang akan diambil kira dalam rekabentuk sesebuah motor tiga fasa iaitu kombinasi lubang alur dan kutub yang dapat menghasilkan d.g.e songsang yang mempunyai beza sudut  $120^\circ$  elektrik antara setiap fasa.