



**KARAKTERISASI MAGNETIK GAYA DORONG DAN GAYA
COGGING PADA MOTOR LINEAR INDUKSI PRIMER GANDA
SEKUNDER TANGGA**

DISERTASI

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN
MINAT KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar doktor teknik



**Mochammad Rusli
NIM: 167060200111003**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**



DISERTASI

**KARAKTERISASI MAGNETIK GAYA DORONG DAN
GAYA COGGING PADA MOTOR LINEAR PRIMER
GANDA SEKUNDER TANGGA**

MOCHAMMAD RUSLI

167060200111003

Telah dipertahankan di depan komisi penguji
pada tanggal 18 Juli 2019
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

Komisi Pembimbing

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping 1

Prof.Ir.ING Wardana, M.Eng., Ph.D.

Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, S.T., M.T.

Pembimbing Pendamping 2

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

Malang.

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Ketera Program Doktor Teknik Mesin



Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D.

NIP. 19590703 198303 1 002



Identitas Tim Penguji Disertasi

JUDUL DISERTASI**Karakterisasi Magnetik Gaya Dorong dan Gaya Cogging Pada Motor Linear Induksi Primer Ganda Sekunder Tangga**

Nama Mahasiswa : Mochammad Rusli
NIM : 167060200111003
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D.
Anggota 1 : Dr. Eng. Moch. Agus Chiron, ST., MT.
Anggota 2 : Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Winarto, ST., MT., Ph.D

DOSEN PENGUJI TAMU : Prof. Dr. Eng. Abraham Lomi, MSEE

Seminar Proposal Disertasi :

Ujian Proposal Disertasi : 3 Mei 2019

Sidang Komisi Hasil : 25 Juni 2019

Ujian Tertutup : 18 Juli 2019



PERNYATAAN ORIGINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah DISERTASI ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah DISERTASI ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia DISERTASI dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 18 Juli 2019

Mahasiswa,

Mochammad Rusli
167060200111003



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM DOKTOR



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 968/UN10.F07.12.21/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

MOCHAMMAD RUSLI

Dengan Judul Disertasi :

**KARAKTERISASI MAGNETIK GAYA DORONG DAN GAYA COGGING PADA MOTOR
LINEAR PRIMER GANDA SEKUNDER TANGGA**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

24 Juli 2019

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.
NIP. 196705181994121001

Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin

Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D.
NIP. 19590703 198303 1 002



SUMMARY

Mochammad Rusli, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, August 2019, Magnetical Characterization of Thrust Forces and Cogging Forces in A Ladder-Secondary Double-Sided Linear Induction Motor, Academic Supervisors: I.N.G. Wardana, Moch. Agus Choiron, Muhammad Aziz Muslim

This Disertation is concerned with the static magnetikal characteristics of useful thrust and cogging forces and reducing of cogging forces in a Double-sided Linear Induction Motor with ladder secondary (DSLIM) to improve the precision of linear feed axes of machine tools. At first for recognizing of the cogging forces, it will be investigated the magnetik characteristic. The proposed magnetic reluctance equivalent approximation for derive magnetical characteristic of cogging forces and useful thrust will be offer based on the effects of the geometrical dimensions of the magnetik circuit in DSLIM. For process verification, the DSLIM optimal design and manufacturing will be done in mechanical workshop of Brawijaya University. The designed parameters have been obtained from the minimization process of cogging forces. The cogging forces reduction are involved: (a) the innovation of an DSLIM with one side of the moving part shifting in relative position to the other side; and (b) the optimal design of double-sided DSLIM with objectives of minimising cogging forces and maintaining useful thrust. The design was validated by manufacturing the DSLIM and measuring its performance when controlled by a commercial induction motor driver. The measurement results were compared with the benchmark of a double-sided Linear induction motor with open slots. The result of this study is the design of a physical double-sided linear induction motor with minimal cogging forces and maximum useful thrust. With three combination method, the cogging forces can be reduced until 1% compared than useful thrust of motor.



RINGKASAN

Mochammad Rusli, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2019, Karakteristik Magnetik Gaya Dorong Dan Gaya Cogging Pada Motor Linear Induksi Primer Ganda Sekunder Tangga, Pembimbing Akademik: I.N.G. Wardana, Moch. Agus Choiron, Muhammad Aziz Muslim.

Disertasi ini berkaitan dengan karakteristik magnetik untuk gaya dorong dan gaya cogging dan pengurangan gaya cogging pada Motor Linear Induksi primer ganda sekunder tangga (MLIPGST) untuk meningkatkan kepresisian gerak linear pada peralatan mesin. Pada tahap awal untuk mengenali karakteristik gaya cogging, akan diteliti tentang karakteristik magnetik. Metode yang ditawarkan pada disertasi ini adalah pendekatan rangkaian ekivalen reluktansi magnetik untuk mendapatkan karakteristik magnetik gaya cogging dan gaya dorong, yang akan menghasilkan bentuk persamaan yang menyatakan hubungan antara gaya cogging dan gaya dorong terhadap parameter fisik dari motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Dengan mendasarkan persamaan matematik yang mencerminkan karakteristik gaya dorong dan gaya cogging yang dijealskan sebelumnya, akan diperoleh gambaran cara-cara untuk menurunkan pengaruh gaya cogging dengan tetap mempertahankan nilai magnitudo gaya dorong. Di disertasi ini dilakukan kombinasi tiga cara penurunan gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong, yaitu peletakkan bagian primer yang tidak simetri; pengubahan bentuk batang sekunder ke bentuk trapezoidal dan penetapan rasio lebar gigi dan slot pada kedua bagian motor linear induksi. Verifikasi persamaan karakteristik gaya dorong dan gaya cogging meliputi dua proses yakni verifikasi software dan verifikasi eksperimen. Verifikasi software dikasudkan dengan melakukan pemodelan fisik motor ke dalam sketsa pada software magnetic Cedrat dan melakukan meshing dan menghasilkan solusi untuk variable keluaran yang diminta. Sedangkan verifikasi eksperimen merupakan validasi model (persamaan matematik) meimplementasikan secara fisik motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. dengan proses, desain optimal DSLIM akan dilakukan dan pembuatan akan dilakukan di bengkel mekanik Universitas Brawijaya. Parameter yang dirancang telah diperoleh dari proses minimalisasi gaya cogging. Proses optimal terlibat: (a) inovasi DSLIM dengan satu sisi bagian yang bergerak bergeser dalam posisi relatif ke sisi lain; dan (b) desain optimal DSLIM dua sisi dengan tujuan meminimalkan kekuatan cogging dan mempertahankan daya dorong yang berguna. Desain divalidasi dengan membuat DSLIM dan mengukur kinerjanya ketika dikontrol oleh driver motor induksi komersial. Hasil pengukuran dibandingkan dengan tolok ukur motor induksi Linear dua sisi dengan slot terbuka. Hasil dari penelitian ini adalah desain motor induksi linear dua sisi fisik dengan gaya cogging minimal dan daya dorong maksimum yang berguna. Hasil penelitian adalah model kekuatan cogging dan gaya dorong yang berguna dan pengembangan gaya cogging yang berkurang. Dengan tiga metode kombinasi, gaya cogging dapat dikurangi hingga 1% dibandingkan dengan gaya dorong maksimum dari motor linear induksi primer ganda sekunder tangga.



RIWAYAT HIDUP

Mochammad Rusli lahir di Pasuruan tahun 1963. Dia menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Elektro ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) Surabaya pada tahun 1986. Sejak tahun 1988, aktif bekerja sebagai dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Kemudian dia menyelesaikan studi program Magister di Technische Universitaet Braunschweig Germany di tahun 1996 di bidang teknik kendali. Sejak tahun 1988 bekerja sebagai peneliti dan pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Mata kuliah yang dibina adalah kendali sequential (PLC), kendali analog dan kendali Digital. Pada rentang tahun 1997 sampai dengan 2008, dia aktif melakukan penelitian dengan bantuan dana dari kementrian riset dan Teknologi Indonesia (RUT) dengan tema kendali di motor induksi dan kendali kelembaban dan temperature secara terpadu di budidaya tanaman Krisan. Sejak tahun 2016 dia melakukan studi program Doktor (S3) di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Riset yang ditekuni sekarang adalah pengurangan pengaruh cogging di linear induction motor (LIM) untuk manufaktur dan kendali posisi untuk peningkatan kepresisian mesin-mesin tool di industri.

Alamat e-mail : rusli@ub.ac.id

Istri : Dian Rachmawati

Anak : Nafya Windia Putri
Razzan Naufal Rianta
Nazeefa Alya Rianti

Malang, 29 Agustus 2019



UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji hanya milik Allah swt. Semata yang telah memberikan karuniaNYA sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul: Karakterisasi Gaya Dorong dan Gaya Cogging Pada Motor Linear Induksi Primer Ganda Sekunder Tangga. Selama proses penyusunan dan ujian disertasi ini, penulis telah banyak sekali memperoleh bantuan dan masukan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan yang baik ini, penulis menyampaikan ucapan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada Bapak/Ibu:

1. Prof. Dr. Ir. Nuhfil Hanani, MS, selaku Rektor Universitas Brawijaya Malang.
2. Dr. Ir. Pitojo Tri Juwono, MT., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
4. Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D selaku Ketua Program Studi Doktor Teknik Mesin dan pembimbing utama yang dengan sabar dan bosan untuk memberikan pengarahan dan saran untuk proses riset disertasi ini dan pengarahan untuk penulisan artikel untuk dipublis ke journal terakreditasi Internasional.
5. Dr.Eng. Moch Agus Choiron selaku pembimbing pendamping pertama yang senantiasa membantu dalam segala hal yang berkaitan dengan editing disertasi dan saran terhadap kandungan disertasi serta tidak segan-segan memberikan motivasi untuk secepatnya menyelesaikan disertasi dengan pengetahuan sebaik mungkin.
6. Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D selaku pembimbing kedua yang senantiasa memberikan arahan yang baik untuk segera menyelesaikan disertasi ini.
7. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, S.T., M.T., selaku dewan penguji yang selalu memberikan saran perbaikan disertasi ini.
8. Winarto, S.T., M.T., Ph.D, selaku dewan penguji yang selalu memberikan saran perbaikan disertasi ini.
9. Dosen beserta staf program studi Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang selalu membantu penulis menyelesaikan disertasi ini.
10. Istri tercinta dan anak-anak tersayang yang senantiasa memberikan dorongan agar secepatnya menyelesaikan disertasi ini.
11. Teman-teman PDTM semua, khususnya PDTM angkatan 2016 yang senantiasa membr warna segar selama penyelesaian disertasi ini.
12. Semua kolega dosen di jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang senantiasa memberikan lingkungan pergaulan yang baik guna penyelesaian disertasi ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa keterbatasan pengetahuan dan wawasan keilmuan yang penulis miliki, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis berharap sekali saran dan kritik terhadap kesempurnaan disertasi ini. Akhir kata, penulis ucapkan terimakasih atas segalanya dan berharap semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi pembaca untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi kususunya pada motor linear induksi.

Penulis,
Agustus 2019



PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya milik Allah SWT semata, yang telah senantiasa membimbing saya untuk dapat menyelesaikan studi S3 ini. Salam serta sholawat senantiasa saya sematkan untuk Rosululloh SAW. Ucapan terimakasih, saya sampaikan juga kepada alm. kedua orangtua, istri tersayang Dian Rachmawati yang senantiasa mendukung selama proses studi ini, serta anak-anak saya yang manis, Nafya Windia Putri, Razzan Naufal Rianta dan Nazeefa Alya Rianti yang banyak memberikan dorongan sehingga membuat saya terpacu untuk segera menyelesaikan tugas studi ini. Saya ucapkan juga terimakasih kepada pemerintah Republik Indonesia dan Universitas Brawijaya yang mendukung secara finansial studi ini dan menyediakan fasilitas eksperimen disertasi ini.

Secara akademik, terdapat banyak orang yang telah memberikan kontribusi yang luar biasa besarnya terhadap proses studi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada pembimbing utama saya Prof. ING. Wardana dan kedua pembimbing pendamping yakni Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST. MT. dan Muhammad Azizi Muslim, ST., MT., Ph.D. Terimakasih juga kepada Dr.Eng Mega Nur Sasongko, ST., MT. dan Winarto, ST., MT. Ph.D selaku penguji dengan berbagai masukan untuk perbaikan disertasi ini. Juga terimakasih kepada Dekan fakultas Teknik beserta WD1, WD2 dan WD3 Fakultas Teknik UB. Serta masih banyak lagi seperti kolega-kolega di Jurusan Teknik Mesin maupun Teknik Elektro UB yang memberikan sara-saran kreatif dalam memperbaiki disertasi ini.

Khusus untuk dukungan manufaktur motor linear induksi, saya mengucapkan terimakasih ke lembaga SMKN1 Singosari yang memberikan fasilitas bengkel dan supervisor selama proses pembuatan motor linear induksi hasil disain. Terimakasih juga saya sampaikan kepada Jurusan Teknik Elektro, yang telah memberikan fasilitas laboratorium untuk melakukan verifikasi teknik kontrol di laboratorium Mesin-mesin elektrik dan laboratorium Teknik Kontrol.

Akhirnya, saya mengucapkan banyak terimakasih kepada semua orang yang selalu membantu selama perjalanan proses penyelesaian studi S3 ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Penulis,
Agustus 2019



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

ii

IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI

iii

PERNYATAAN ORIGINALITAS DISERTASI

iv

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

v

SUMMARY

vi

RINGKASAN

vii

RIWAYAT HIDUP

viii

UCAPAN TERIMA KASIH

ix

PENGANTAR

x

DAFTAR ISI

xi

DAFTAR TABEL

xii

DAFTAR GAMBAR

xiii

DAFTAR SIMBOL

xvii

LEMBAR PERUNTUKAN

xviii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1

1.2 Perumusan Masalah

4

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

4

1.4 Manfaat Penelitian

5

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

6

2.2 Definisi Gaya Cogging

9

2.3 Prediksi Gaya Cogging

11

2.4 Pengurangan Gaya Cogging

12

2.4.1 Metode Segmentasi Pengurangan Gaya Cogging

13

2.4.2 Metode "Skew" pada bagian Sekunder Motor

13

2.5 Motor Linear Induksi

17

2.6 Disain Motor Linear Induksi

20

BAB III. KONSEP PENELITIAN

xi



3.1	Kerangka Konsep Pembangkitan Gaya Dorong dan Cogging	25
3.2	Kerangka Konsep Penetapan Lebar Ekuivalen Gap Udara (LEGU)	27
3.3	Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Cogging	28
3.4	Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Dorong	28
3.5	Kerangka Konsep Pengurangan Gaya Cogging	29
3.6	Hipotesis	30

BAB IV. METODE PENELITIAN

4.1	Prosedur Penelitian	31
4.2	Bahan dan Alat Penelitian	31

BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1	Metode Pendekatan ERM (Ekuivalensi Reluktansi Magnetik)	37
5.2	Karakterisasi Gaya Cogging Dengan Pendekatan ERM	41
5.3	Karakterisasi Gaya Dorong Pada Motor Linear Primer Ganda Sekunder Tangga (MLPGST)	49
5.4	Pengurangan Pengaruh Gaya Cogging	52
5.4.1	Pengurangan Gaya Cogging Dengan Offset Posisi Antara Sisi Primer Satu dengan yang Lainnya	52
5.4.2	Pengurangan Gaya Cogging Dengan Variasi Bentuk Batang Tangga	57
5.4.3	Pengurangan Gaya Cogging dengan Rasio Lebar Gigi dan Slot Motor	63
5.5	Pengukuran Gaya Cogging	66

BAB VI. KESIMPULAN

6.1	Kesimpulan	70
6.2	Manfaat dan Riset Lanjutan	71

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Linear Induksi yang dipakai sebagai Test-Bed.....23

Tabel 5.1 Dimensi Geometri Model Satu Gigi.....38

Tabel 5.2 Perbandingan fluks medan magnet Hasil perhitungan dan Hasil Simulasi untuk 10 mm slot.....40

Tabel 5.3 Dimensi Geometri Model Multi Gigi.....42

Tabel 5.4 Rasio Antara Gaya Cogging dan Gaya Dorong.....58

Tabel 5.5 Hubungan antara lebar Gigi dengan Maksimum Gaya.....60

Tabel 5.6 Rasio Antara Gaya Cogging dan Gaya Dorong.....61

Tabel 5.7 Jumlah Slot Pada bagian Primer dan Sekunder.....66



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gaya-gaya Pada Gap Udara Sempit	6
Gambar 2.2 Hasil simulasi Gaya Cogging Pada model sederhana.....	7
Gambar 2.3 Posisi Kedua Gigi Saling Berhadapan.....	9
Gambar 2.4 Posisi Gigi bawah sebagian Berhadapan dengan Slot bagian atas.....	10
Gambar 2.5 Posisi Gigi bawah tepat Berhadapan dengan Slot atas	10
Gambar 2.6 Kurva Green untu Koefisien Fringing.....	12
Gambar 2.7 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pergeseran Phase per Pole	13
Gambar 2.8 Metode Pembentukan slot pada Bagian Primer Motor Permanen Magnet.....	13
Gambar 2.9 Pengurangan Gaya Cogging dengan Pengaturan Beda sudut antar Pole....	14
Gambar 2.10 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Teknik Kompensator	15
Gambar 2.11 Pengurangan Gaya Cogging Pemanjangan Phase per pole magnet (Bianci)	16
Gambar 2.12 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pembentukan Magnet berbentuk Claw-Pole	16
Gambar 2.13 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pemepetan setiap pole yang Sama.....	17
Gambar 2.14 Contoh Motor Linear Induksi Satu Primer Dengan Sekunder Tangga.....	18
Gambar 2.15 Motor Linear Induksi Sisi Tunggga Yang diproduksi Oleh HW-Technology Co.....	19
Gambar 3.1 Skematik Motor Linear Induksi Primer Ganda Sekunder Tangga.....	23
Gambar 3.2 Susunan Kabel Tiga Fasa Sumber AC.....	24
Gambar 3.3 Konsep Kompensasi Gaya Cogging.....	24
Gambar 3.4 Gaya Cogging Pada Bagian Sekunder.....	25
Gambar 3.5 Dua Lintasan Fluks Magnet di Motor Linear induksi primer Ganda Sekunder Tangga.....	26
Gambar 3.6 Konsep Kemunculan Gaya Cogging	26
Gambar 3.7 Konsep Penentuan Konstata Fringing.....	27
Gambar 3.8 Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Cogging.....	28
Gambar 3.9 Karakterisasi Gaya Dorong	29
Gambar 3.10 Konsep Penurunan Gaya Cogging.....	29
Gambar 4.1 Digital Servo drive "BALdor"	32
Gambar 4.2 Sensor posisi Linear.....	33
Gambar 4.3 Letak posisi Sensor Linear	33



Gambar 4.4 Digital Interpolator	34
Gambar 4.5 Frame Test-Bed	34
Gambar 4.6 Fasilitas Untuk menggeser bagian primer motor.....	35
Gambar 5.1 Skema Model Satu Gigi	38
Gambar 5.2 Kerapatan Fluks Magnetik Pada Keseluruhan area di Model Satu Gigi ...	39
Gambar 5.3 Rangkaian Ekuivalen Reluktansi Magnetik Model Satu Gigi	39
Gambar 5.4 Kecenderungan data-data antara eksperimen dengan Analitik	41
Gambar 5.5 Penyusunan kumparan pada Model Multi Gigi.....	42
Gambar 5.7 Ekuivalensi Reluktansi Magnetik untuk Lintasan ZIG ZAG	43
Gambar 5.8 Parameter-parameter dari Model Multi Gigi.....	43
Gambar 5.9 Gigi di bagian primer tepat berhadapan dengan gigi di bagian Sekunder (Primer).....	44
Gambar 5.10 Gigi di bagian primer sebagian berhadapan dengan sebagian gigi di bagian Primer	44
Gambar 5.11 Konfigurasi Pengukuran Gaya Cogging	45
Gambar 5.12 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.55 mm dan arus 4 A	46
Gambar 5.13 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.65 mm dan arus 4A	47
Gambar 5.14 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.75 mm dan arus 4A	47
Gambar 5.15 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.85 mm dan arus 4A	48
Gambar 5.16 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.95 mm dan arus 4A	49
Gambar 5.17 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan variasi lebar Gap arus 3A	49
Gambar 5.18 Model Motor Linear Induksi Primer Ganda.....	50
Gambar 5.19 Hubungan Gaya dorong steady state dengan kecepatan linear motor	52
Gambar 5.20 Kerapatan Fluks magnet pada satu slot pitch.....	53
Gambar 5.21 Sistem Koordinat untuk Arah Gaya Cogging	53
Gambar 5.22 Prinsip Kanselisasi Gaya Cogging.....	54
Gambar 5.23 Sketsa Gaya Cogging Pada Motor Linear Induksi	54
Gambar 5.24 Pengurangan Gaya Cogging untuk Pergeseran Primer.....	55



Gambar 5.25 Perbandingan antara gaya dorong.....	56
Gambar 5.26 Perbandingan antara gaya dorong dan perbedaan posisi bagian primer dengan bagian sekunder	56
Gambar 5.27 Kurva Gaya Dorong dan Gaya Cogging untuk variasi Lebar Gigi	58
Gambar 5.28 Rasio Gaya Dorong dan Gaya Cogging.....	59
Gambar 5.29 Batang Bentuk Trapesoidal	59
Gambar 5.30 Bentuk Batang Trapesoidal pada Bagian Sekunder.....	60
Gambar 5.31 gaya Dorong dan Gaya Cogging pada Trapesoidal.....	62
Gambar 5.32 Gaya Dorong dan Gaya Cogging bentuk Trapesoidal dan Persegi Panjang	62
Gambar 5.33 Perbandingan antara Trapesoidal dan Persegi Panjang	63
Gambar 5.34 Diagram Kerapatan Fluks diantara Kumputan.....	64
Gambar 5.35 Sketsa $f(x)$ di Bagian Sekunder	64
Gambar 5.36 Contoh plotting untuk fungsi $f(x)$ tertentu	65
Gambar 5.37 Skema Pengukuran Gaya Cogging.....	66
Gambar 5.38 Kurva Hasil Pengukuran Gaya Cogging.....	67
Gambar 5.39 Gaya Cogging untuk gerak 4 mm/s	68
Gambar 5.40 Spektrum Frekuensi Sinyal Gaya Cogging gerak 4 mm/s.....	68
Gambar 5.41 Gaya Cogging untuk pergeseran 8 mm.....	69
Gambar 5.42 Spektrum Gaya Cogging untuk Pergeseran 8 mm.....	69



DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatan	Simbol
Arus elektrik rata-rata	Ampere per meter kuadrat (A /	J
Fluks Magnet	(m ²))	ϕ_q
Magnetik Reluktansi	Weber (Wb)	\mathfrak{R}_q
Magnetik Reaktansi	MA/Wb	x_m
Reaktansi bagian sekunder	Ohm	x, x_e
Reaktansi bagian primer	Ohm	x_p
Permeabilitas ruang hampa	H/m	μ_0
Lebar Gap udara	mm	g
Ekuivalen Gap udara	mm	g_e
Resistansi kumparan	Ohm	R
Induktansi	mH	L_R
Pole pitch	mm	p
Reluktansi Total	MA/Wb	\mathfrak{R}_l
Faktor konstanta elektrik	Tidak bersatuan	K_{el}
Faktor konstanta elektrik	Tidak bersatuan	K_{c2}
Reluktansi Metal	MA/Wb	\mathfrak{R}
Potensial Magnetik	Tesla/m	A_s
Induktansi Sekunder	mH	L_s
Jumlah Kumparan	Lilitan	N_s
Reluktansi Gap udara	MA/Wb	\mathfrak{R}_{GD}



Lembar Peruntukan

Teriring ucapan terimakasih kepada Istri tercinta

Dian Rachmawati dan anak-anak tersayang

Nafya Windia, Razzan Naufal dan Nazeefa

Alya



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi motor linear induksi adalah bukan hal baru. Konsep motor linear dikembangkan pertama kali sejak 150 tahun yang lalu (Gieras, 1984). Sedangkan paten pertama motor linear induksi adalah di tahun 1891 (Laithwaith, 1998). Dari tahun 1895 sampai dengan 1940, dikembangkan bentuk baru motor linear induksi yang ditujukan hanya untuk memperbaiki penggerak pendorong gerak benang di pabrik-pabrik tekstil. Aplikasi motor linear induksi dalam skala besar adalah pada pemanfaatan motor linear induksi untuk penggerak transportasi tempat jalan kaki (pedestrian) di jalan "time square" ke "Grand Central Station" di kota New York. Proyek dalam skala besar lagi dilakukan di tahun 1946, yaitu berupa pembangunan peluncur pesawat dengan menggunakan motor linear induksi yang dirancang oleh industry Westinghouse Co. (Gieras, 1998). Kesemua proyek itu menggunakan motor linear induksi dengan sekunder berbentuk flat aluminium.

Pemanfaatan motor linear induksi sekunder flat juga digunakan pada kereta api super cepat yang dimulai dari tahun 1970. Kecepatan yang dapat dicapai sampai dengan lebih dari 500 km/jam (Laithwaith, 1997). Pemanfaatan motor linear induksi sekunder flat pada sistem transportasi juga meluas sampai dengan penggunaan alat transportasi untuk penyuplai material pabrik mobil. (Eastham et.all.1994).

Sedangkan motor linear induksi sekunder tangga dimanfaatkan pada proses di industri-industri manufaktur, terutama dipakai pada pada perangkat permesinan kerja, alat penekan ataupun pembentuk benda kerja, pintu geser, dan masih banyak lagi. Umumnya kelebihan pemanfaatan motor linear induksi sekunder tangga adalah pada aplikasi kecepatan sangat lambat. Karena motor linear induksi sekunder tangga mampu menghasilkan gaya dorong yang cukup besar dengan merancang lebar gap sekecil mungkin dan memiliki power faktor besar. Salah satu kelemahan pada motor linear induksi sekunder tangga adalah munculnya gaya cogging. Eksistensi gaya cogging ini dapat mengurangi kepresisian gerak motor linear induksi di kecepatan lambat bahkan akan dapat mengakibatkan ketidakstabilan gerak motor linear itu sendiri.

Gaya Cogging pada motor linear induksi dapat didefinisikan sama dengan cogging torque pada motor rotari induksi. Cogging torque di motor rotary induksi adalah variasi



energy magnetik di ruang gap antara rotor dan stator. Oleh karena itu gaya cogging di motor linear induksi adalah variasi energi magnetik di daerah gap antara bagian yang primer dan bagian yang statis. Gaya cogging mendominasi ketika motor primer sangat lambat. Karena variasi energi magnetik yang tersimpan di gap antara bagian primer dan bagian statis bernilai lebih besar dibandingkan dengan flux magnetik normal pembangkit gara dorong (*Thrust*).

Usaha penurunan fenomena cogging pada motor elektrik telah dilakukan oleh banyak peneliti. Namun tidak dapat dipungkiri bahwa setiap pendekatan cara mereka mempunyai keterbatasan-keterbatasan, dan sebagian cara mereka terkadang sangat sulit untuk diimplementasikan secara nyata. Sebagai contohnya dengan melakukan “*skewing*” yaitu pemiringan pada bagian primer akan dapat menghilangkan cogging sampai nol tetapi melakukan pemiringan bagian primer dengan kumparan berada pada slot-slot adalah sangat sulit dilakukan. Alternatif lainnya adalah dengan “*skewing*” bagian sekundernya. Memang hal ini memiliki efek yang sama dengan pemlintiran bagian primer, namun tetap bahwa pemlintiran bagian sekunder tidak dapat sama persis ketika dilakukan pembuatan secara nyata. Apalagi, bahwa proses pemlintiran yang tidak presisi, akan mengakibatkan tegangan balik EMF pada motor yang akan menimbulkan gaya ripple, yakni sebagai pengembalian tegangan induksi akan menghasilkan frekuensi yang tidak sama dan cenderung memunculkan harmonisa yang dapat menimbulkan “*noise*” di motor elektrik. Itu kemudian diperbaiki dengan “*stepped Skewing*” yaitu bagian sekunder tidak diplintir semuanya tapi hanya beberapa bagian, yang dapat menekan cogging sekecil mungkin, namun akan berpengaruh pada gaya dorong motor elektrik (Jaewon Lim, Hyun-Kyo Jung, 2008), (Z. Q. Zhu, P. J. Hor, D. Howe, and J. Rees-Jones, 1997)

Fenomena cogging ini juga dapat dikurangi dengan melakukan optimasi kombinasi lebar slot dan pole motor elektrik (N. Bianchi, S. Bolognani and A.D.F. Cappello, 2005) dan optimasi pada lebar gigi dan jarak magnet (pada motor listrik magnet permanen) (Yong-Jae Kim and Hideo Dohmeki, 2007), (F. Aghili and M. Buehler, 1998). Juga telah dilakukan pengurangan cogging dengan cara “*teeth pairing*” yakni membuat bentuk tertentu gigi yang berpasangan sehingga cogging antara gigi yang berpasangan itu akan dapat saling menghilangkan cogging itu (Kenji Shiroshita et.al., 2008). Cara “*slot pairing*” dikembangkan yang memiliki ide yang sama dengan *teeth pairing* (J. Wang, M. Inoue, Y. Amara and D. Howe, 2005). Pada motor permanen magnet, terdapat beberapa cara untuk menekan cogging yakni dengan “*teeth notching*” (Ki-Chae Lim et. all., 2002), kemudian “*magnet pairing*”, cara “*magnet segmentation*”, serta cara “*magnet shifting*”



(Masaya Inoue, 20008). Namun kesemua cara itu sangat berpengaruh pada gaya dorong motor elektrik dan pada nilai ekonomi produksi. Oleh karena itu perlu dikembangkan cara yang dapat menekan cogging dan tetap mempeertahankan gaya dorong serta sangat mudah dilakukan manufaktur (produksi).

Pengurangan "*cogging action*" pada motor rotary induksi telah dilakukan oleh banyak peneliti terdahulu. Secara keseluruhan metode-metode pengurangangaya cogging dapat dikategorikan kedalam 3 cara: variasi rangkaian magnetik motor, variasi struktur kumparan yang dialiri arus elektrik, dan dengan dengan menggunakan umpan balik (*feedback control*). Salah satu yang umun dilakukan untuk mengurangi gaya cogging adalah meminimisasi bukaan slot pada bagian primer (B. Ackermann et. all). Berdasarkan kajian pustaka di atas, bahwa peneliti hanya memperhatikan penurunan gaya cogging, tanpa memperhatikan pengaruh penurunan itu terhadap gaya dorong motor linear. Oleh karena itu, disertasi ini menekankan pada penurunan gaya cogging sekecil mungkin dengan tetap mempertahankan gaya dorong pada aplikasi kecepatan rendah.

Disertasi ini menawarkan cara penurunan gaya cogging dengan mempertahankan gaya dorong pada motor linear induksi dengan sekunder tangga yang disebut Position Offset Primary for opposite pole magnetik (POPOPMP). Cara ini dimaksudkan untuk meletakkan kedua sisi primer dengan tergeser sejauh tertentu, sehingga gaya cogging antara sisi satu dengan sisi yang lain saling meniadakan, serta untuk menghindarkan motor dari ketidaksimetrian, maka susunan kumparan pada kedua sisi dibuat agar pole magnetik antara kedua sisi saling berlawanan serta rasio antara lebar gigi dan lebar slot pada bagian sekunder dibuat bernilai tertentu agar gaya cogging dapat ditekan lagi sampai bernilai zero.

Disertasi ini menekankan pada pembahasan pada dua aspek dari motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Lebih khusus aspek yang dikaji adalah pada pemodelan magnetik gaya dorong (thrust) dan gaya *cogging* serta pengurangan pengaruh gaya *cogging*. Aspek pemodelan ini merupakan investigasi karakteristik motor linear induksi primer ganda sekunder tangga dengan pendekatan ekivalensi Reluktansi magnetik (ERM), sehingga akan diperoleh persamaan analitik yang dapat memprediksi bentuk kerapatan fluks magnet di gap udara dan selanjutnya akan diperoleh persamaan gaya dorong motor yang merupakan fungsi parameter fisik dari motor. Gaya cogging diperoleh dengan menurunkan persamaan reluktansi ekivalen magnetik untuk lintasan magnetik ZIG-ZAG pada motor linear induksi. Sedangkan pengurangan gaya cogging didasarkan terhadap kedua karakteristik gaya dorong dan gaya cogging untuk mencari penyebab



terjadinya gaya cogging dengan menyusun persamaan analitik yang menyatakan hubungan antara gaya cogging dengan parameter fisik motor linear induksi dan melakukan langkah-langkah inovatif pada variasi rangkaian magnetik agar didapatkan gaya cogging sekecil mungkin.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan pemikiran pada latar belakang studi, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana penggunaan pendekatan ERM (Ekivalensi Reluktansi Magnetik) untuk memodelkan rangkaian magnetik dengan gap udara sempit untuk menghitung secara analitik kerapatan fluks magnetik di daerah gap udara sempit (*air gap*).
- Bagaimana pendekatan ERM untuk karakterisasi gaya dorong dan gaya cogging motor linear induksi primer ganda sekunder tangga.
- Bagaimana pengurangan gaya cogging dengan gabungan tiga cara: metode rasio lebar gigi dan slot pada bagian sekunder, pengubahan bentuk batang di sekunder menjadi trapezoidal dan metode peletakan bagian primer yang tidak simetri.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

- Mengetahui penggunaan pendekatan ERM (Ekivalensi Reluktansi Magnetik) untuk memodelkan rangkaian magnetik dengan gap udara sempit untuk menghitung secara analitik kerapatan fluks magnetik di daerah gap udara sempit (*air gap*).
- Mengetahui pendekatan ERM untuk karakterisasi gaya dorong dan gaya cogging motor linear induksi primer ganda sekunder tangga.
- Mengetahui pengurangan gaya cogging dengan gabungan tiga cara: metode rasio lebar gigi dan slot pada bagian sekunder, pengubahan bentuk batang di sekunder menjadi trapezoidal dan metode peletakan bagian primer yang tidak simetri.

1.4 Manfaat Penelitian

- Sebagai algoritma dasar penetapan dan perhitungan ERM (Ekivalensi Reluktansi Magnetik) pada rangkaian magnetik dengan gap udara sempit untuk menghitung secara analitik kerapatan fluks magnetik di daerah gap udara sempit (*air gap*).



b. Sebagai dasar elemen-elemen perancangan motor linear induksi primer ganda sekunder tangga dengan performansi gaya cogging sangat kecil dan gaya dorong yang sangat besar.

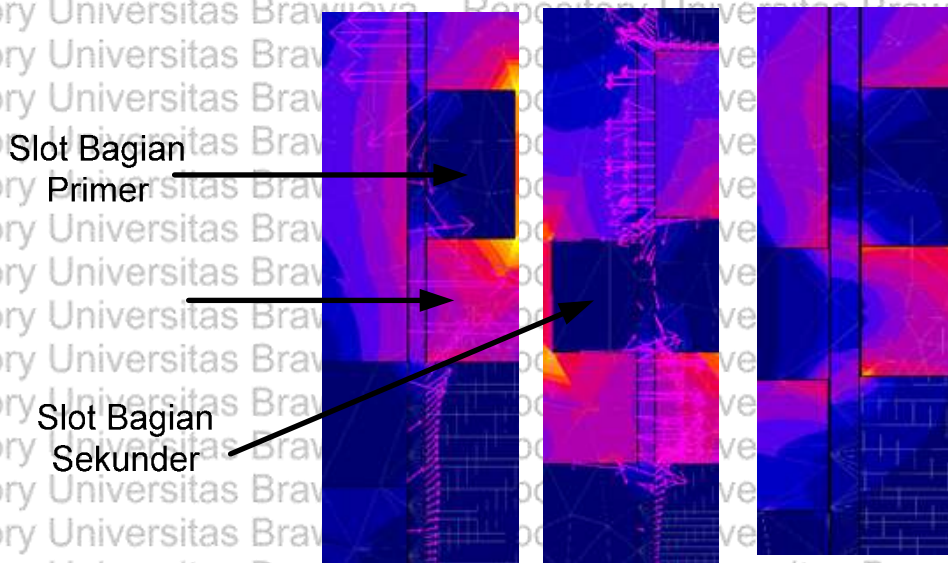
c. Sebagai metode inovatif untuk pengurangan gaya cogging dengan memperhatikan signifikansi gaya dorong motor linear induksi primer ganda sekunder tangga.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Gaya cogging pada motor linear induksi primer ganda sekunder tangga merupakan gaya tekan magnetik (*attractive forces*) yang berubah berdasarkan posisi gigi-gigi bagian primer terhadap gigi-gigi bagian sekunder. Eksistensi gaya cogging sangat besar dipengaruhi oleh adanya slot-slot pada motor linear. Pengertian secara fisik gaya cogging dapat dijelaskan dengan koil (kumparan) pada pada slot di bagian primer dialiri arus elektrik DC. Arus elektrik DC akan membangkitkan gaya magnet pada gigi-gigi di bagian primer. Interaksi antara gigi yang sudah termagnetisasi dengan gigi metal pada bagian sekunder, maka akan muncul gaya tarik magnetik yang dilakukan oleh gigi-gigi bagian primer. Apabila bagian primer digerakkan dari satu posisi ke posisi tertentu lainnya, maka akan mengakibatkan gaya cogging berubah arah. Fenomena ini dapat diterangkan dengan menggunakan satu model rangkaian magnetik sederhana yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



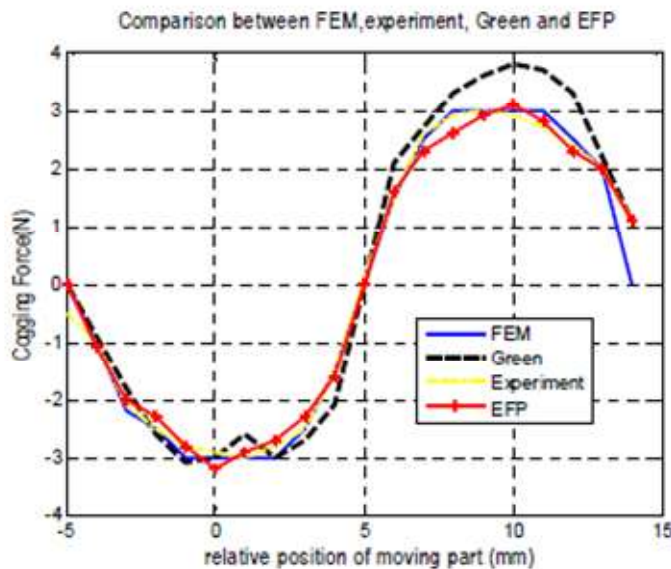
Gambar 2.1 Gaya-gaya Pada Gap Udara Sempit

Gaya cogging dapat diperkirakan nilainya dengan mengamati perubahan energi medan magnet pada gap udara sempit. Pada gambar 2.1 di bagian kiri, terlihat bahwa lebar gap tidak berubah, maka nilai kerapatan fluks magnet tidak berubah dengan



mengamati warna pada hasil simulasi model. Akibatnya tidak terjadi gaya cogging pada bagian ini. Sedangkan pada bagian kanan model, terlihat perubahan warna yang mencerminkan terjadi perubahan energi magnetik pada gap sempit. Oleh karena itu totalnya akan terjadi kenaikan nilai energi magnetik ketika model digerakkan dari kiri ke kanan (Rusli, 2011).

Gaya cogging memiliki sifat periodik. Nilai magnitudo gaya cogging akan berulang setiap satu pole (kutub) magnet. Kalau dilihat pada model sederhana yang ditunjukkan oleh gambar 2.1, bahwa ketika gigi primer tepat berhadapan dengan gigi sekunder, maka gaya cogging akan bernilai nol. Gaya cogging akan membesar jika bagian primer digerakkan dari kanan model ke kiri, maka gaya cogging akan naik terus sampai gigi primer tepat di slot sekunder, maka nilai gaya cogging akan nol lagi. Gambar 2.2 menunjukkan hasil simulasi gaya cogging pada model sederhana satu gigi. Sumbu absis kurva adalah posisi relative bagian primer terhadap sekunder dalam satuan mm, sedangkan sumbu ordinat merupakan gaya cogging dengan satuan Newton (N).



Gambar 2.2 Hasil simulasi Gaya Cogging Pada model sederhana

Pada driver untuk gerak translasi di mesin tool, telah dilakukan penggantian motor rotari dengan motor linear. Tujuannya untuk meningkatkan kepresisian gerak translasi mesin tool. Hal itu telah menunjukkan hasil yang memuaskan (Brueckl, 1999 dan Bradenburg, 2000). Telah dikembangkan motor linear permanent magnet untuk menggerakkan sumbu translasi mesin tool pada "high performance". Hal itu dikarenakan



motor linear memiliki kelebihan yang signifikan dibandingkan dengan motor rotari ketika digunakan untuk menggerakkan sumbu translasi mesin tool. Motor linear mengeliminasi secara keseluruhan faktor-faktor tak linear dari driver, yakni faktor-faktor pada transmisi mekanik dari gerak rotari ke gerak translasi, seperti misalnya efek backlash, gaya gesek dan beban inersia. Selain itu struktur motor linear lebih fleksibel dibandingkan motor rotari.

Berdasarkan perkembangan manufaktur motor-motor linear, di permulaan tahun sembilanpuluhan, terdapat hanya dua industri yang berhasil menggunakan motor linear sebagai penggerak di perangkat mesin-mesin tool yakni: Ingersoll Milling machine Company in USA dan EX-Cell O Company di Jerman (W. Fei, P, 2010). Setelah berselang selama satu decade yakni pada abad duapuluhan, di Jepang telah diadakan pameran mesin-mesin tool di tahun 2000, dan ketika itu terdapat 17 perusahaan yang menggunakan teknologi motor linear sebagai penggerak mesin-mesin tool (Brandenrug, 2000). Kelebihan motor linear dibandingkan dengan motor rotari adalah terletak pada ketiadaan mekanik transmisi yang mengubah gerak putar ke gerak linear. Keuntungan inilah yang telah menarik banyak peneliti untuk mengembangkan motor linear pada penggerak mesin-mesin tool (Hoong, 2000).

Selain motor linear permanent magnet, di industri banyak juga menggunakan motor linear induksi (MLI) (McLean, 1987). Banyak peneliti yang secara intensif melakukan penelitian pada motor linear induksi, namun sangat sedikit mereka menggunakan MLI pada mesin-mesin yang membutuhkan kepresisian yang tinggi. Dengan kelebihan MLI yang robust (tegar) tidak membutuhkan perawatan yang rumit dibandingkan dengan motor linear magnet permanent, maka sangatlah menarik apabila disertasi ini mengembangkan pemanfaatan MLI dengan sekunder tangga untuk peningkatan kepresisian. Kelebihan lain dari MLI dengan sekunder tangga adalah sangat bagus digunakan pada lintasan gerak yang pendek dan lintasan yang melengkung (Abdou, 2001). Dalam hal MLI, terdapat banyak area penelitian yang saampai sekarang ini masih menjadi perhatian yang intensif. Area penelitian itu diantaranya adalah:

1. Definisi Gaya Cogging
2. Prediksi Gaya Cogging
3. Koefisien Fringing
4. Pengurangan Gaya Cogging
5. Motor Linear Induksi
6. Disain Motor Linear Induksi

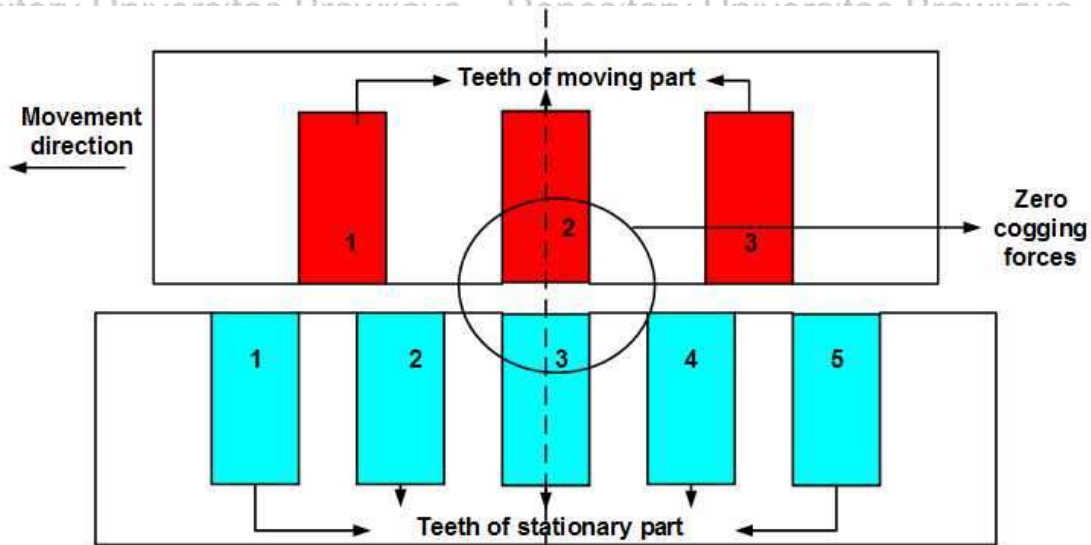


2.2 Definisi Gaya Cogging

Gaya cogging dapat diprediksi dengan mengamati perubahan energi magnet yang disimpan di area sempit udara (*air gap*). Perhitungan gaya cogging dengan cara ini mendasarkan pada perhitungan energi magnet di *air gap* ketika bagian primer digerakkan.

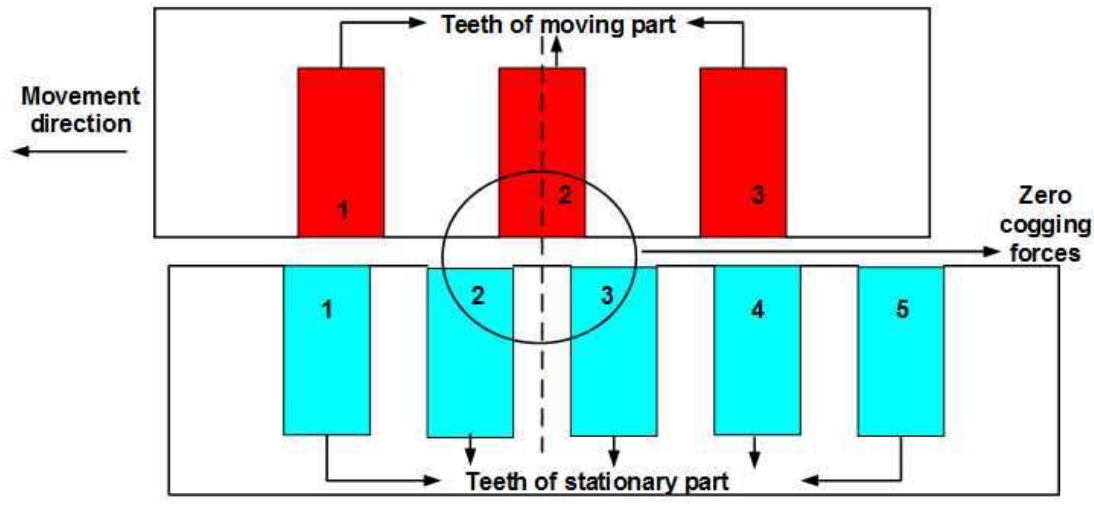
Ketika bagian primer primer, maka gigi-gigi di bagian primer akan melewati dengan gigi-gigi di bagian sekunder.

Perubahan posisi bagian primer terhadap bagian sekunder dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kondisi. Gambar 2.3, 2.4 dan 2.5 mencerminkan perubahan energi magnet yang tersimpan di daerah gap udara (*air gap*) pada tiga kondisi perubahan posisi gigi.



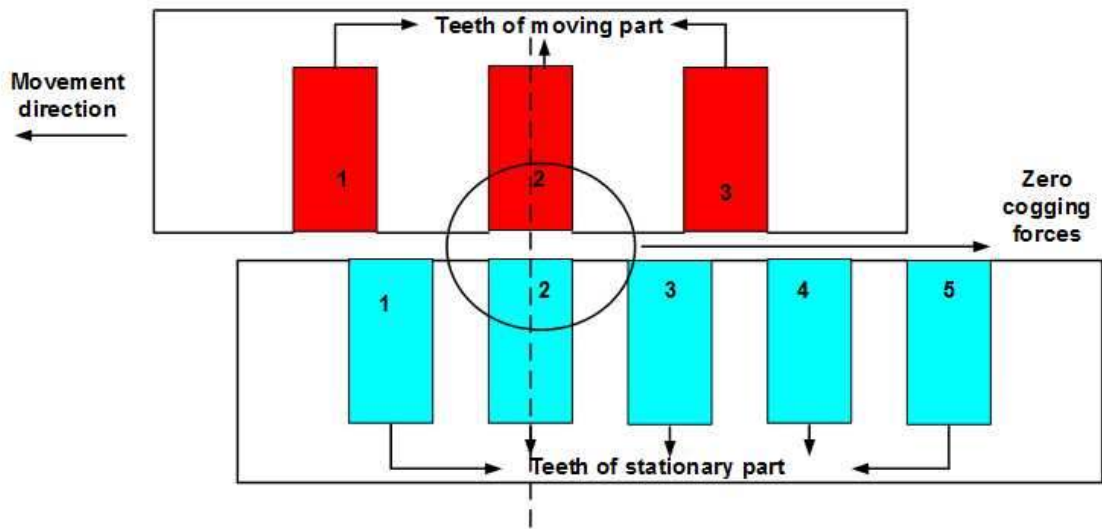
Gambar 2.3 Posisi Kedua Gigi Saling Berhadapan

Gambar 2.3 menunjukkan kondisi pertama (a) yaitu mulai dari titik tengah gigi di primer berimpit dengan titik tengah gigi sekunder sampai dengan ujung kanan gigi primer tepat persis dengan ujung kiri gigi sekunder. Misalnya diasumsikan bahwa bagian primer mulai primer lambat dan mulai tepat dari titik tengah gigi nomor 2 yang secara tepat berimpit dengan titik tengah gigi sekunder.



Gambar 2.4 Posisi Gigi bawah sebagian Berhadapan dengan Slot bagian atas

Gambar 2.4 menjelaskan nilai gaya cogging ketika gigi 2 bagian primer tepat berhadapan dengan slot di bagian sekunder. Kondisi kedua ini menjelaskan bahwa gaya tarik magnet yang arah kanan maupun kiri adalah sama besar sehingga gaya cogging bernilai nol.



Gambar 2.5 Posisi Gigi bawah tepat Berhadapan dengan Slot atas

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa gigi nomor 2 bagian primer maupun sekunder tepat berhadapan. Kondisi ketiga ini merupakan titik akhir dari pergerakan 1, 2 dan kondisi 3. Jadi dapat disimpulkan bahwa selama pergerakan itu, nilai gaya cogging akan bervariasi dari positif nol dan negative kemudian nol kembali. Oleh karena itu sifat gaya cogging adalah periodik dengan panjang gelombang satu pole pitch.



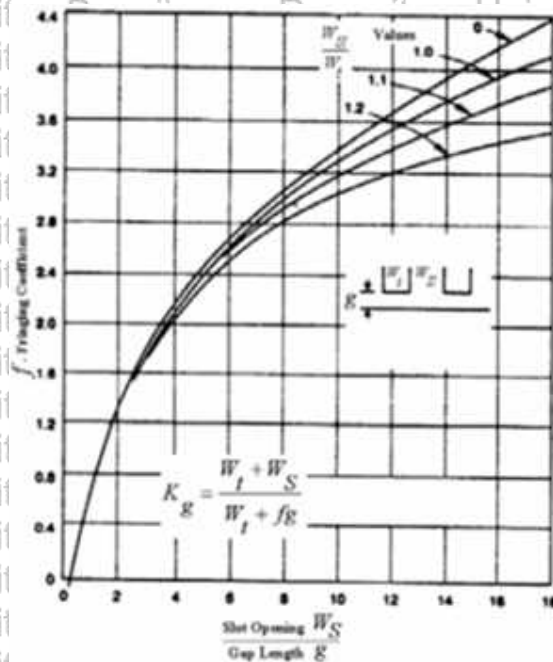
2.3 Prediksi Gaya Cogging

Estimasi gaya cogging dengan penurunan gaya cogging merupakan topik yang berkaitan erat. Tantangan proses disain motor MLI adalah untuk memenuhi spesifikasi disain, diantaranya untuk mengurangi gaya cogging sehingga pemodelan (estimasi analitik) dari motor MLI adalah penting sekali. Dengan model itu pula, semua performansi motor terhadap gaya cogging dapat diperkirakan. Pemodelan gaya cogging dapat memberikan kontribusi terhadap pengertian karakteristik motor MLI itu sendiri.

Selain itu, model itu dapat juga memberikan gambaran beberapa parameter yang seharusnya dioptimalkan pada proses disain fisik MLI pada konfigurasi tertentu. Pengurangan gaya cogging dalam hal ini memungkinkan aplikasi motor MLI pada gerak translasi yang lambat dengan kepresisian yang tinggi.

Selama proses disain motor linear induksi untuk gaya cogging sekecil mungkin diperlukan hubungan antara kerapatan fluks magnet di Gap udara (air Gap) motor dengan sumber arus elektrik. Karena pada motor linear induksi tipe tangga terdapat slot udara yang mengakibatkan penurunan kerapatan fluks magnet menjadi berbentuk mirip sinusoidal. Apabila motor primer linear, maka terdapat persamaan tak linear dengan dua variabel, yaitu waktu (t) dan posisi relatif bagian primer dengan sekunder. Untuk memudahkan analisis diasumsikan bahwa satu permukaan dibuat lurus tanpa slot udara. Pelemahan fluks magnet di daerah slot itu adalah fringing (penyebaran lintasan magnet pada perpindahan daerah inti besi dengan udara.

Di motor rotari induksi, Dr F. W. carter merupakan peneliti yang pertama mengembangkan koefisien fringing (tahun 1899). Pada penentuan koefisien itu dilakukan dengan menggunakan persamaan diferensial Pascal dengan mengasumsikan permukaan satu adalah tidak memiliki slot (Carter, 1915). Persamaan yang dikembangkan Carter hanya berlaku untuk motor dengan kedalaman slot dan gigi tak berhingga. Kemudian C. F. Green memperbaiki cara Carter dengan mengembangkan koefisien fringing untuk kedalaman slot dan gigi berhingga. Hasil persamaan Green ternyata hampir mirip dengan persamaan Carter. R. W. Wiesaman mengembangkan kurva yang menghubungkan antara koefisien fringing dengan rasio gak ekivalen dengan Gap reel (Wieseman, 1927). Sampai sekarang perancang motor lebih menyukai koefisien Carter dan kurva Green untuk keperluan disain motor elektrik induksi. Gambar 2.6 menunjukkan kurva-kurva hubungan antara rasio lebar slot dan lebar gigi dengan koefisien fringing.



Gambar 2.6 Kurva Green untuk Koefisien Fringing

Metode-metode yang dikembangkan kedua orang peneliti terdahulu Carter dan Green ternyata masih dipakai sampai sekarang ini. Hal itu sudah terbukti baik untuk perancangan motor rotari induksi. Akan tetapi pendekatan itu tidak dapat secara langsung dipakai pada perancangan motor linear induksi. Sebab perbedaan antara motor linear dengan motor rotari terletak pada bentuk rangkaian magnetiknya. Motor linear termasuk rangkain magnetik yang terbuka, sehingga memiliki karakteristik "*longitudinal end effect*". Oleh karena itu dibutuhkan suatu konstanta atau kurva yang menyatakan hubungan antara rasio lebar slot dan lebar gigi dengan koefisien fringing untuk motor linear induksi.

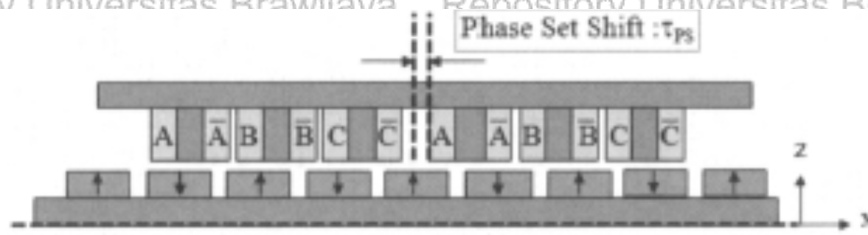
2.4 Pengurangan Gaya Cogging

Upaya ilmuwan untuk mengurangi pengaruh gaya cogging pada motor linear elektrik sudah berlangsung lama. Terdapat tiga cara utama untuk menanggulangi gaya cogging, yakni, pengaturan struktur kumparan pada motor linear, pengubahan struktur rangkaian magnetik motor dan penggunaan strategis control dengan gaya cogging dikompensasi dengan komponen controller. Riset ini hanya menekankan pada cara pengubahan struktur rangkaian magnetik dan penggunaan strategi teknik kontrol. Nilai arus sumber akan ditetapkan constant dan lebar gap udara sempit juga dianggap konstant.



2.4.1 Metode Segmentasi Pengurangan Gaya Cogging

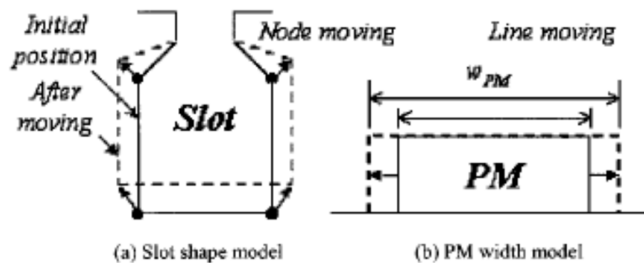
Pada motor rotari permanen magnet, beberapa metode yang telah dikembangkan untuk mengurangi gaya cogging. Salah satu teknik pengurangan cogging itu dengan melakukan segmentasi magnet permanen ke dalam blok-blok magnet permanen. Metode ini mampu menurunkan cogging sampai 6.5 %. Metode yang lebih efektif adalah dengan melakukan "skew" magnet permanen. Metode ini dapat menekan cogging sampai 16 %. Namun manufaktur magnet permanent dengan cara skew adalah rumit (Fei, 2010).



Gambar 2.7 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pergeseran Phase per Pole

2.4.2 Metode "Skew" pada bagian Sekunder Motor

Metode yang lain adalah dengan melakukan "skew" pada slot di bagian primer. Metode ini dapat menekan cogging sampai dengan ke kisaran 11,5 %. Hanya saja kalau slot berbentuk rumit, sehingga tidak memungkinkan untuk melakukan skew dari slot (Fei, 2010). Metode yang mungkin adalah dengan melebarkan daerah Gap (*air Gap*). namun metode ini kurang efektif, sebab metode ini juga menurunkan torque efektif secara signifikan.



Gambar 2.8 Metode Pembentukan slot pada Bagian Primer Motor Permanen Magnet

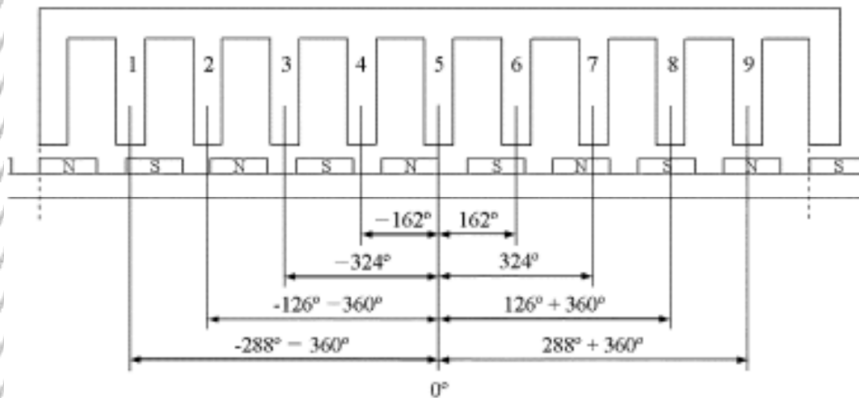
Sebagaimana pada motor rotari, pengurangan gaya cogging pada motor linear dapat dilakukan dengan cara-cara yang dapat dikelompokkan ke dalam 2 grup yaitu



pengubahan struktur rangkaian magnetik motor dan penggunaan konsep kontrol umpan balik (*feedback control strategies*). Pendekatan pengubahan struktur rangkaian magnetik adalah :

1. Pendekatan pergeseran pole magnetik
2. Pendekatan variasi bentuk magnet permanent
3. Pendekatan pelebaran slot motor
4. Skew (pemiringan) pada inti besi pada bagian primer maupun pada bagian sekunder motor,

Sedangkan metode dengan menggunakan kontrol umpan balik menggunakan teknik kompensasi. Pada cara ini, kontrol umpan balik dirancang dengan menghilangkan gaya cogging dengan menganggap gaya cogging sebagai gangguan.

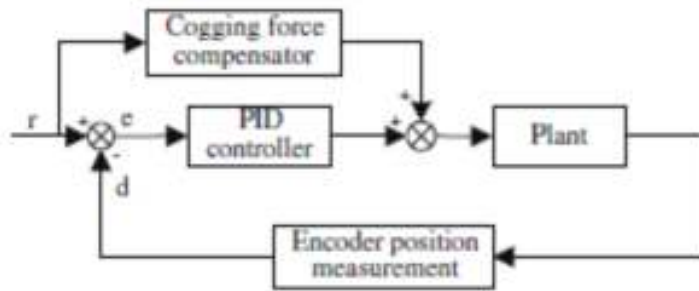


Gambar 2.9 Pengurangan Gaya Cogging dengan Pengaturan Beda sudut antar Pole

Penurunan gaya cogging dengan cara penggeseran kutub magnet di motor linear magnet permanent telah dilakukan (Bianchi, 2005). Cara ini telah dilakukan untuk penurunan aksi cogging (*torque cogging*) pada motor rotari magnet permanent (Li T, 1988). Caranya adalah jarak antara kutub magnet diubah-ubah atau kutub magnet digeser sehingga antara magnet kutub satu dengan yang lainnya menghasilkan gaya cogging yang saling menghilangkan. Metode penggeseran kutub magnet ini sangat berbeda dengan cara "skewing" atau pembengkokan magnet permanent. Pada cara "skewing" bentuk magnet permanent tidak diubah, hanya kemiringan dari kutub magnet diubah sehingga pembangkitan gaya cogging antara kutub magnet saling menghilangkan. Level pengurangan gaya cogging dengan cara ini adalah tergantung jumlah pole dari motor. Peneliti ini menyatakan bahwa untuk motor dengan 4 pole gaya cogging akan



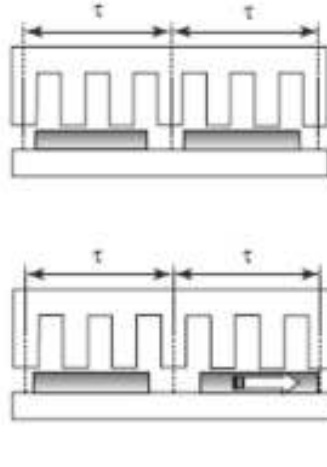
diturunkan 60-65 % terhadap nilai cogging sebelumnya. Sedangkan untuk motor dengan 6 kutup (pole) gaya cogging akan menurun 80 - 90 % terhadap gaya cogging sebelumnya.



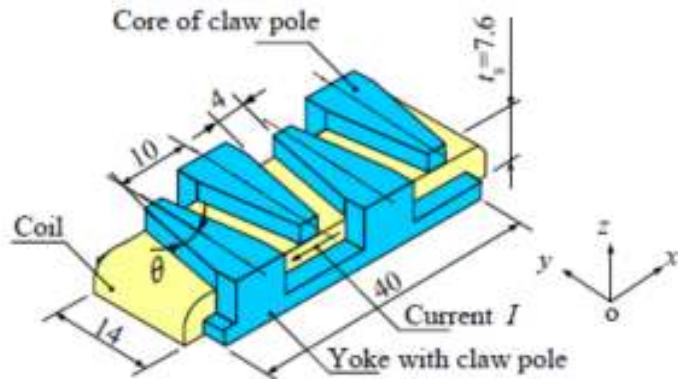
Gambar 2.10 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Teknik Kompensator

Pengurangan gaya cogging pada motor linear magnet permanen dengan cara perubahan phase arus elektrik yang dikenakan pada kumparan motor telah dilakukan (Lim, 2008). Peneliti ini hanya memperhatikan pengurangan gaya cogging per gigi. Gaya cogging sebetulnya dapat diklasifikasikan ke dalam gaya cogging per pole atau per gigi. Jika satu gigi primer maka akan terjadi gaya tarik magnet yang mengenai dua gigi pada sisi primer (*primary core*). Jika phase antara kedua gigi pada sisi primer berbeda dengan sudut tertentu, maka akan terjadi gaya tarik magnet antara kutub magnet dengan gigi di sisi primer akan saling menghilangkan. Metode ini ternyata menghasilkan penurunan gaya cogging sama dengan cara “*skewing*”. Kelemahan metode ini adalah terjadi juga penurunan gaya dorong (motor) ketika gaya cogging menurun. Oleh karena itu perbaikan metode ini dapat dilakukan dengan cara optimasi.

Penurunan gaya cogging pada motor linear magnet permanen dengan mengubah bentuk ujung magnet telah dikembangkan (Yong-Jae Kim, 2007). Diantara kutub magnet pada motor ini pada ujung magnet terbentuk gaya tarik magnet yang dapat menimbulkan gaya cogging. Metode ini melakukan perubahan bentuk ujung-ujung kutub magnet. Sebab dengan bentuk ujung magnet tertentu akan mengakibatkan gaya tarik magnet berubah arah. Perubahan arah itu kemudian dirancang, sehingga arah gaya tarik magnet itu antar gigi saling menghilangkan.

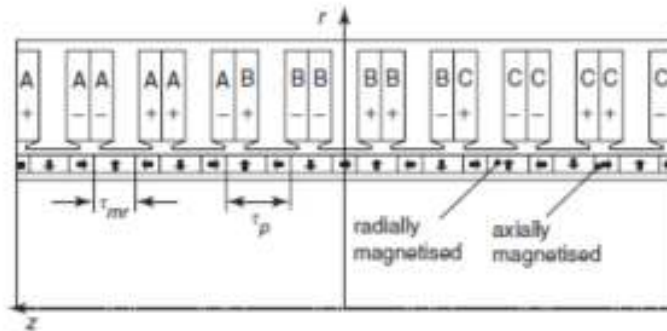


Gambar 2.11 Pengurangan Gaya Cogging Pemanjangan Phase per pole magnet (Bianci)



Gambar 2.12 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pembentukan Magnet berbentuk Claw-Pole

Penurunan gaya cogging dengan cara mengubah-ubah jumlah gigi pada bagian primer dan mengubah-ubah struktur kumparan di sisi primer telah dikembangkan (Youn, 2008). Peneliti melakukan investigasi pengaruh perbedaan phase pada setiap kumparan dapat mempengaruhi gaya cogging. Peneliti menggambarkan gaya cogging untuk per gigi. Gaya cogging setiap gigi akan dapat diubah apabila, phase elektrik antara pole-pole di bagian primer, akan menghasilkan gaya cogging yang minimal. Struktur baru motor linear permanen magnet dikembangkan dengan 9 pole 10 slots. Metode ini dapat menekan magnitud gaya cogging secara significant. Hanya saja kelemahan metode ini adalah gaya dorong (*thrust*) juga ikut menurun.



Gambar 2.13 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Pemepetan setiap pole yang Sama

Pada motor rotari induksi, metode "skewing" pada batang rotor ataupun batang stator merupakan cara yang paling efektif untuk menurunkan gaya cogging. Level keefektifan metode "skewing" pada batang-batang rotor telah diinvestigasi (El-Rahman, 1987). Pada motor rotari induksi, torsi cogging dapat disebabkan oleh penggunaan kontroler langsung torsi. Kaboli et. al. telah menyusun kebaruan yakni mengembangkan tabel switch baru (Kaboli, 2004). Tetapi metode ini membutuhkan perangkat luar sebagai pendukung proses metode. Penurunan torsi cogging di motor rotari dengan mengubah permukaan gigi dan slot untuk mengurangi variasi reluktansi dan menaikinya variasi fluks magnet di gap udara telah dipatenkan (Kolomeitsev, 2005). Torsi cogging dapat dikurangi dengan menggunakan bentuk stator tertentu. Akan tetapi bentuk stator dan rotor adalah sangat kompleks sehingga akan mengalami kesulitan ketika dilakukan manufaktur hasil disain.

Berdasarkan kajian pustaka tentang pengurangan cogging peneliti-peneliti sebelumnya senantiasa melakukan pengurangan cogging secara terpisah-pisah. Oleh karena itu metode pengurangan gaya cogging di desertasi ini adalah dengan melakukan metode koordinasi antara metode rasio lebar gigi, metode offset antara bagian primer dan metode perubahan bentuk batang sekunder. Performansi yang dihasilkan adalah rasio gaya cogging dengan gaya dorong (thrust), sebab terkadang terjadi konflik antara gaya cogging dengan gaya dorong (thrust).

2.5 Motor Linear Induksi

Motor linear elektrik dapat dikategorikan sebagai perangkat yang dapat mengkonversikan energi elektrik ke energi gerak. Energi gerak motor linear diakibatkan secara langsung oleh energi magnet, sehingga disebut sebagai "direct drive". Motor linear



diklasifikasikan berdasarkan struktur kumparan yaitu motor linear DC, motor linear sinkron, motor linear magnet permanen dan motor linear hibrid.

Sebetulnya konsep motor linear dikembangkan sejak 150 tahun yang lalu (Gieras, 1984). Paten pertama motor linear induksi adalah di tahun 1890 (Gieras, 1984). Dari tahun 1895 sampai dengan 1940, telah dikembangkan bentuk baru motor linear induksi yang ditujukan hanya untuk memperbaiki penggerak shuttle di pabrik-pabrik tekstil dan untuk penggunaan motor linear induksi untuk traksi. Aplikasi motor linear induksi yang agak besar adalah pemakaian motor linear induksi untuk penggerak transportasi tempat jalan kaki (pedestrian) di jalan no 42 dari *Time Square* ke *Grand Central Station* di New York. Pada tahun 1946 terdapat proyek besar yaitu pembangunan peluncur pesawat dengan menggunakan motor linear induksi yang dilakukan oleh Westinghouse Co. (McLean, 1988). Kesemua proyek itu menggunakan motor linear induksi dengan sekunder berbentuk flat aluminum.

Pemanfaatan motor linear induksi pada kereta api super cepat dimulai tahun 1970. Kecepatan yang dapat dicapai sampai dengan lebih dari 500 km/jam (Gieras, 1984). Penggunaan motor linear induksi pada sistem transportasi juga meluas sampai dengan penggunaan alat transportasi untuk penyuplai material pabrik mobil (Laithwaite, 1970). Sedangkan motor linear induksi dipakai pada proses manufaktur kebanyakan digunakan pada perangkat mesin-mesin tool, alat penekan ataupun pembentuk benda kerja, pintu geser, shuttle di tekstil dan masih banyak lagi (Gambar 2.14).



Gambar 2.14 Contoh Motor Linear Induksi Satu Primer Dengan Sekunder Tangga



Motor linear induksi sebenarnya tidak dapat diklasifikasikan secara tepat, sebab bentuk dan ukuran serta konstruksi rangkaian magnetik dimungkinkan dibentuk dengan banyak variasi (Laithwaite, 1974). Meskipun motor linear induksi tidak dapat diklasifikasikan Laithwaite membagi motor linear induksi berdasarkan struktur yang dilihat dari sisi penyebaran gelombang magnetiknya (Laithwaite, 1970). Bagian motor linear induksi yang membangkitkan fluks magnetik dikenal sebagai bagian primer, sedangkan bagian yang lain dikenal sebagai bagian sekunder. Kontruksi motor linear induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua: bagian primer yang pendek atau bagian primer yang panjang. Bagian motor linear induksi yang primer disebut sebagai bagian gerak (*moving part*). Kedua bagian primer maupun sekunder dapat difungsikan sebagai bagian yang primer. Oleh karena itu terkadang motor linear induksi dapat juga dikelompokkan menjadi dua yaitu primer yang gerak atau sekunder yang primer.

Menurut Laithwaite bahwa pemilihan jenis motor linear induksi didasarkan pada aplikasi yang akan memanfaatkannya yaitu (a) Aplikasi kecepatan tinggi, (b) Aplikasi untuk proses dengan biaya murah dan (c) Aplikasi untuk aktuator (Laithwaite, 1974). Berdasarkan jumlah bagian primer, motor linear induksi dengan satu primer dikenal sebagai Motor linear induksi satu sisi, sedangkan untuk dua sisi primer dikenal sebagai motor linear induksi dua sisi. Karena peneliti sebelumnya kebanyakan menggunakan motor linear induksi satu sisi untuk aplikasi kecepatan lambat, maka disertasi ini akan menekankan pada disain motor linear dua sisi dengan sekunder tangga.



Gambar 2.15 Motor linear induksi sisi tunggal yang diproduksi oleh HW-Technology Co.



2.6 Disain Motor Linear Induksi

Dibandingkan dengan analisis motor linear induksi, disain fisik motor linear induksi masih belum dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu dengan baik. Hal ini dikarenakan peneliti-peneliti masih kesulitan untuk menentukan beban magnetik dan beban elektrik pada motor linear induksi. Artinya bahwa karakteristik hubungan beban dengan power suplai sebagai masukan masih bersifat *trial and error* dan tergantung pada penggunaan motor tersebut. Oleh karena itu disain fisik motor linear induksi tergantung pada aplikasinya. Konsep pertama disain motor linear induksi dikembangkan oleh Laithwaite yang merumuskan kriteria faktor *goodness*.

Persamaan yang dikembangkan Laithwaith hanya sebagai alat ukur gaya dorong (*thrust*) per rms-arus elektrik suplai. Selain itu, lebar gap udara antara bagian primer dan sekunder sangat berpengaruh terhadap performansi motor linear induksi dan jumlah pole-pitch dapat memperbaiki performansi yang diakibatkan lebar dari gap udara itu. Laithwaite hanya menjabarkan tentang hubungan antara beberapa variabel dengan *goodness* dari motor linear induksi. Sedangkan konsep desain masih belum ada yang standard, semua algoritma disain motor linear induksi sangat tergantung pada aplikasinya.

Konsep disain motor linear induksi untuk satu sisi telah dikembangkan (Graham E. Dawson et. all., 1985). Analisis motor linear induksi dilakukan dengan pendekatan elektromagnetik dan pendekatan elemen hingga (*Finite element*) untuk menyusun rangkaian ekivalen motor linear induksi. Analisis elektromagnetik itu kemudian digunakan untuk menyusun rangkaian ekivalen motor linear induksi. Berdasarkan rangkaian ekivalen itu, algoritma disain disusun untuk motor linear induksi sisi satu.

Sedangkan Dawson et. All. telah mengembangkan analisis dan disain untuk motor linear induksi satu sisi dengan sekunder yang ganda. Pendekatan yang dipakai adalah pendekatan analisis gelombang elektromagnetik dua dimensi. Dengan mengembangkan model elektromagnetik, disusunlah model matematik yang dapat menggambarkan mekanik gelombang elektromagnetik. Hasil analisis dengan cara magnetik ini dapat digunakan sebagai dasar algoritma disain motor linear induksi satu sisi primer dengan dua sisi sekunder.

S. Nonaka and T Higuchi telah mengembangkan elemen-elemen disain motor linear induksi untuk transportasi di daerah urban pada tahun 1985. Prosedur disain fisik motor linear induksi satu sisi dibuat untuk keperluan transportasi di daerah urban dengan maksimum kecepatan 70 km/jam. Karakteristik motor dihitung dengan menggunakan



metode harmonisa ruang. Tujuan desain adalah menekan pengaruh *longitudinal end effect* dengan biaya seminimal mungkin. Penekanan biaya disain dengan merancang bagian sekunder (rail dari kereta) yang memiliki ketebalan yang tipis dan panjang serta sempit.

Disain fisik motor linear induksi dengan dua sisi primer dengan tujuan untuk membuat perangkat mesin tool dengan dasar lebih ekonomis telah dilakukan (George H Abdoe et. All, 1991). Dua sisi primer digunakan pada motor ini bertujuan untuk memperoleh gaya dorong yang lebih besar. Di tahun 1997, Sang Baek Soon telah melakukan disain motor linear induksi dengan sekunder aluminum flat untuk keperluan peralatan transportasi kecepatan tinggi. Sedangkan perancangan motor linear induksi untuk aplikasi kecepatan rendah dengan biaya yang minim telah dikembangkan oleh Fevli Kent et. all pada tahun 2003. Disain ini hanya dapat digunakan untuk motor linear induksi berukuran kecil.

Dal Ho Im et. all melkaupt disain motor linear induksi satu sisi dengan menggunakan finite element hingga (1993). Motor ini digunakan untuk kecepatan yang sangat rendah. Disain dengan keunggulan pada gaya dorong telah dilakukan oleh J. Atentia et, all (2001). Sedangkan disain motor linear induksi satu sisi primer dengan sekunder flat untuk kepentingan laboratorium telah dilakukan oleh A. Hassanpour Isfahani et.all pada tahun 2005. Berdasarkan tinjauan pustaka disain motor linear induksi ini, guna memperoleh gaya dorong lebih besar pada apliasi kecepatan lambat, disertasi ini akan menekankan pada pengembangan algoritma disain motor linear induksi dengan sisi primer ganda dan sekunder tangga serta mempertimbangkan magnitudo dari gaya ripple yang diakibatkan oleh gaya Cogging.

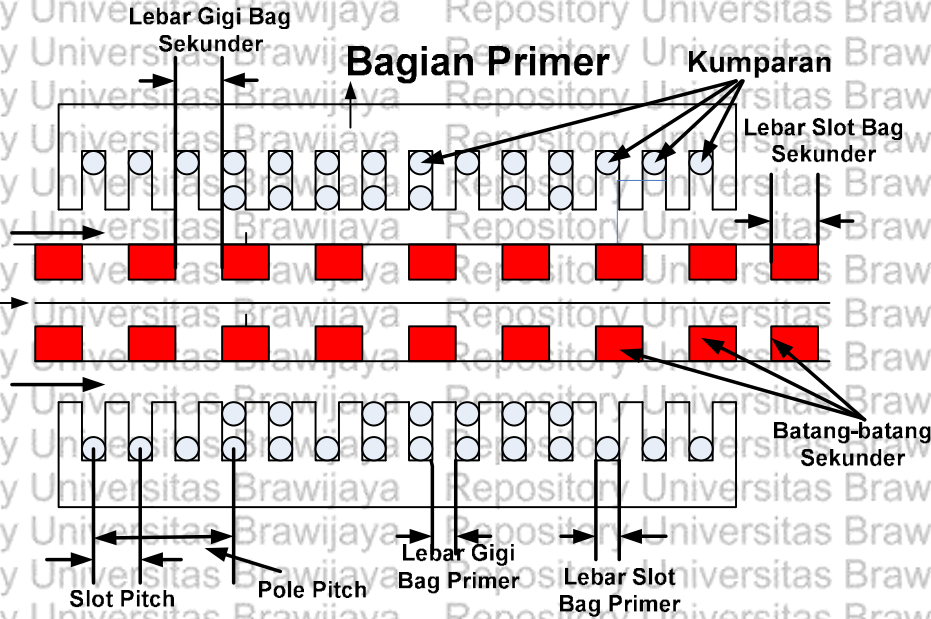
Peneliti-peneliti terdahulu telah melakukan penyederhanaan untuk analisis maupun disain motor rotary induksi, saah satu yang populer adalah menganggap bahwa permukaan yang berslot dimotor didekati dengan sebuah permukaan lurus. Kooefisien ekivalen untuk itu digunakan konstanta Carter. Hanya saja konstanta ini berlaku untuk motor rotary induksi, sehingga masih diperlukan kajian dan penelitian tentang pemanfaatan konstanta itu pada motor linear induksi. Penelitian terdahulu sudah instensif dilakukan pada motor rotary induksi dengan rotor sangkar. Pada motor linear induksi juga pengurangan gaya cogging dilakukan untuk sekunder tangga, Hanya saja, tidak diperhatikan pengaruh pengurangan gaya cogging terhadap gaya dorong motor.



BAB III KONSEP PENELITIAN

Permasalahan yang telah diulas pada bab sebelumnya dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok masalah yakni: masalah karakterisasi gaya cogging dan gaya dorong serta masalah pengurangan pengaruh gaya cogging. Disertasi ini fokus hanya pada gaya dorong dan gaya cogging, yang pertama memiliki peran penting untuk gerak motor linear sedangkan yang satunya adalah gaya pengganggu, sehingga gerak motor linear menjadi tidak mulus. Selain rumusan masalah yang sudah dijelaskan sebelumnya, perlu juga dipertanyakan: kenapa gaya cogging bersifat periodik serta memiliki frekuensi yang sama dengan pole pitch motor, serta kenapa gaya cogging ketika kecepatan motor rendah memiliki peran yang dominan terhadap gaya dorong. Dengan meninjau ke dinamika energi magnetik yang ada pada daerah gap udara sempit motor linear induksi, kesemua pertanyaan itu akan dapat dijawab, sebab aktor pertama dan penting pada motor elektrik adalah gelombang magnetik yang ada di gap udara sempit. Energi magnetik itu dibangkitkan oleh energi elektrik yang diperoleh dari lilitan kumparan yang diletakkan di slot-slot motor linear induksi.

Sebagai test-bed riset ini ditetapkan motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Kelebihan dan kekurangan motor linear induksi jenis ini telah dijelaskan pada bab tinjauan pustaka. Motor linear induksi primer ganda sekunder tangga memiliki dua buah core primer yang identik dan satu buah sekunder berbentuk tangga. Agar pembentukan motor linear ini menghasilkan gaya dorong yang besar, maka lebar gap udara sempit dibuat sekecil mungkin dengan volume yang relatif besar. Hal ini mengacu ke hukum Lorenz tentang gaya dorong yang sangat tergantung pada volume dan lebar gap udara sempit. Gambar 3.1 menunjukkan skematik motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Core sekunder terbuat dari material ferromagnetik dan batang-batang sekunder terbuat dari material non-ferromagnetik. Core pada sisi primer dibuat terlaminasi untuk memotong-motong arus eddy yang terjadi pada sisi primer sehingga tidak mengalami kenaikan temperatur.



Gambar 3.1 Skematik Motor Linear Induksi Primer Ganda Sekunder Tangga

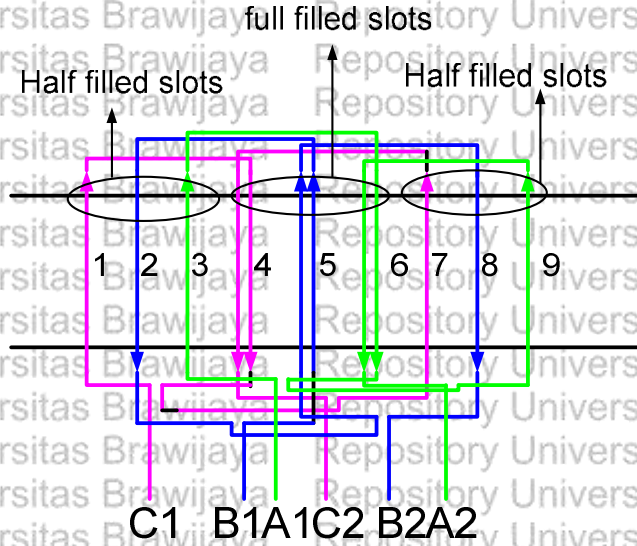
Motor linear induksi yang digunakan sebagai test-bed dapat dikategorikan sebagai motor linear berdaya kecil. Motor dipilih dengan input tiga fase arus elektrik AC dan kumparan disusun dengan yang tengah berupa double kumparan sedangkan pada setiap sisi hanya single kumparan. Hal ini bertujuan untuk memperoleh gaya dorong yang kuat dan menghilangkan pengatur longitudinal end effect. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi desain motor linear induksi tiga fase AC dengan 4 pole pitch dan arus maksimum 10 A.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Linear Induksi yang dipakai sebagai Test-Bed

No.	Double-sided linear induction motor			
	Specification	Symbol	Value	Unit
1	Number of Poles	P	4	-
2	Input phase Voltage	V_1	240	volt
3	Estimated power Load Factor	$\cos\eta$	0.8	-
4	Estimated Full Load efficiency	η	0.66	-
5	Full-load current	I_x	10	Amp.
6	Flux density in the air gap	B	0.8	Tesla
7	Specific Loading of stationary	q	-	-
8	Pitch factor	k_w	0.8	-

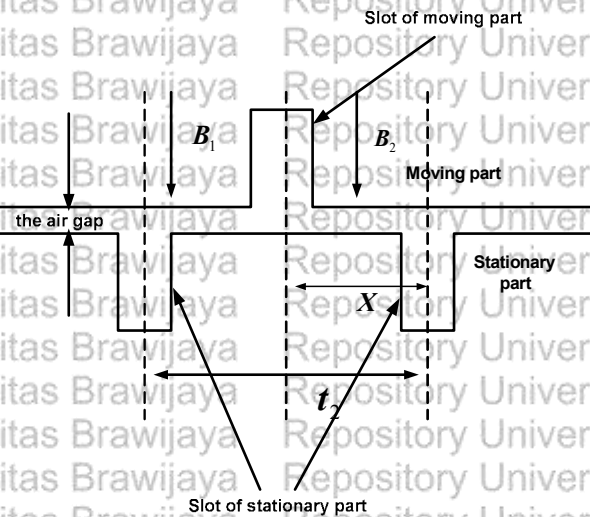


Agar gaya dorong maksimal sesuai dengan hukum ampere, maka setiap kumparan phasa dibuat dengan selisih sudut phasa sebesar 120° sehingga phase k2 dua dan ketiga bagian imajinernya akan saling menghilangkan (Gambar 3.2). Akibatnya faktor daya akan semakin kecil dengan hanya daya reel yang muncul.



Gambar 3.2 Susunan Kabel Tiga Phasa Sumber AC

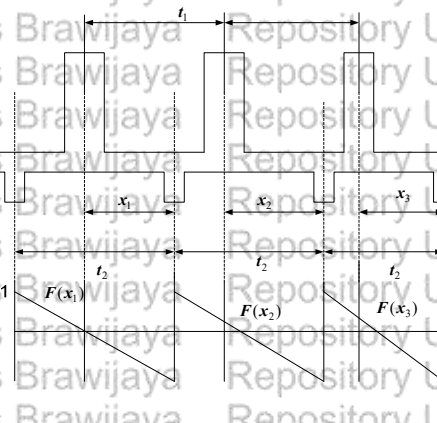
Jarak antar gigi pada motor dapat disusun dengan rasio tertentu sehingga gaya cogging antara gigi saling meniadakan (Gambar 3.3). Sehingga secara total gaya cogging akan mengalami penurunan.



Gambar 3.3 Konsep Kompensasi Gaya Cogging



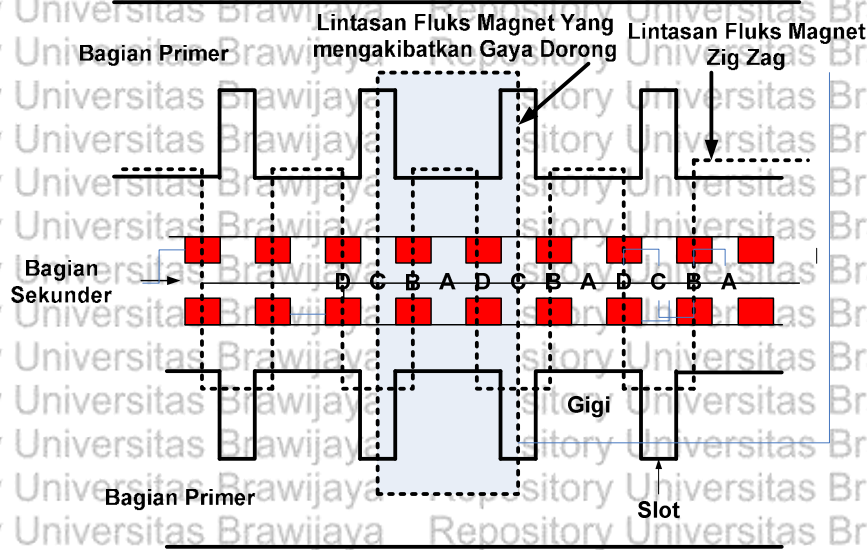
Berdasarkan hukum magnet Maxwell bahwa tekanan gaya magnet pada setiap gigi tergantung pada lintasan medan magnet yang melewati permukaan metal. Berdasarkan analisis 2D, bahwa kerapatan fluks magnetic pada kedua sisi gigi motor yang secara loop tertutup akan sama dengan nol. Berdasarkan aturan hukum Maxell setiap gigi akan mempunyai gaya cogging terbesar dan akan semakin mengecil apabila terlatak pada tengah-tengah antar gigi. Gambar 3.4 menunjukkan fluktuasi gaya cogging secara keseluruhan.



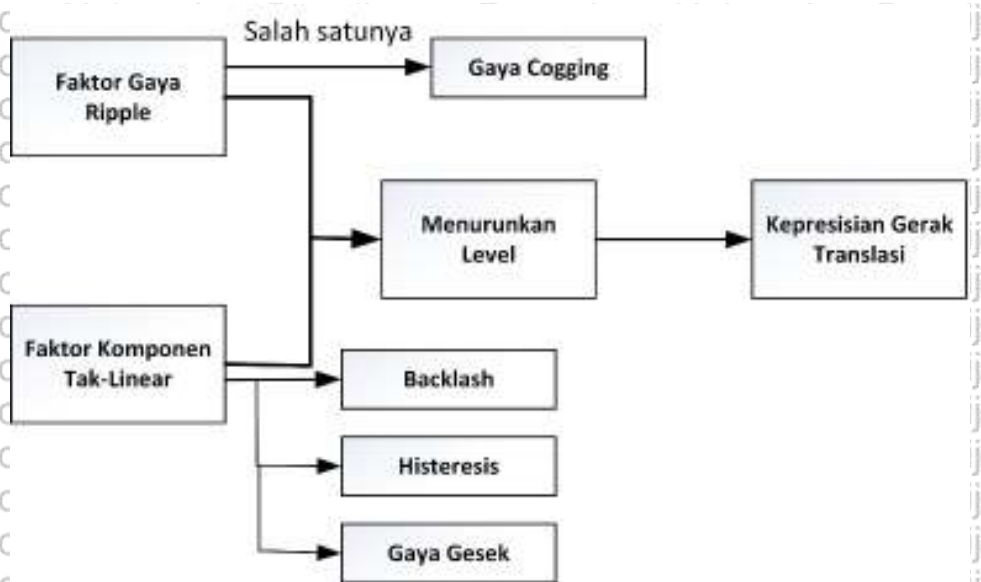
Gambar 3.4 Gaya Cogging Pada Bagian Sekunder

3.1 Kerangka Konsep Pembangkitan Gaya Dorong dan Cogging

Gerak motor linear induksi diakibatkan oleh hubungan orthogonal antara aliran medan magnet dan arus eddy yang diakibatkan oleh induksi medan magnet. Energi elektrik yang diproduksi oleh kumparan lilitan pada slot slot motor linear menimbulkan gelombang magnetik yang mempunyai 4 macam lintasan. Di disertasi ini, lintasan yang dikaji hanya dua jenis, yaitu lintasan fluks magnet yang melingkupi semua bagian motor linear dan lintasan yang berubah-ubah (ZIG ZAG) yang dapat dilihat pada Gambar 3.5. Lintasan gelombang medan magnet yang menyebabkan gaya dorong adalah lintasan yang melingkupi kesemua bagian primer dan sekunder, sedangkan lintasan fluks magnet ZIG ZAG membangkitkan gaya cogging.



Gambar 3.5 Dua Lintasan Fluks Magnet di Motor Linear induksi primer Ganda Sekunder Tangga.



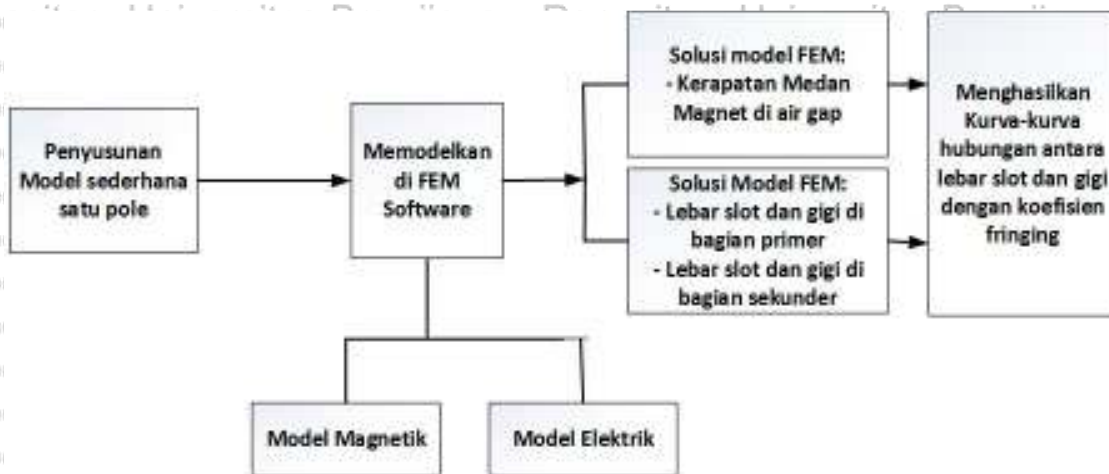
Gambar 3.6 Konsep Kemunculan Gaya Cogging

Gambar 3.6 menjelaskan faktor-faktor yang sangat berpengaruh pada kepresisian. Dengan mengetahui factor-faktor penyebab penurunan kepresisian, maka akan diperoleh gambaran riset untuk itu. Penyebab ketidakpresisian diantaranya adalah karakteristik inheren pada transmisi gerak putar ke gerak translasi: Backlash, Histeresis dan gaya gesek dimana dengan menggunakan motor linear, maka factor-faktor ini dapat diabaikan.

3.2 Kerangka Konsep Penetapan Lebar Ekivalen Gap Udara (LEGU)

Pada penggunaan ERM untuk menggambarkan karakteristik gaya dorong diasumsikan bahwa kedua permukaan pada bagian primer tidak memiliki slot, sehingga persamaan yang akan dihasilkan adalah persamaan diferensial linear. Sebab kalau diperhatikan slot-slot pada permukaan bagian primer, maka akan menghasilkan persamaan diferensial tak linear yang tentunya akan membutuhkan alat analisis yang kompleks dan panjang. Untuk mempermudah itulah, maka diasumsikan permukaan berslot sebagai permukaan datar. Untuk memperkecil kesalahan perhitungan analitik, maka diperlukan sebuah factor pengali apabila permukaan berslot diubah ke permukaan datar, yang dikenal sebagai ekivalensi lebar Gap udara (LEGU).

Peneliti-peneliti sebelumnya umumnya menggunakan konstanta CARTER untuk hal itu atau menggunakan grafik GREEN. Hanya saja, kedua cara itu dikembangkan untuk motor induksi rotary, yang tentunya belum tentu valid apabila digunakan pada motor linear induksi. Pada disertasi ini, dengan pendekatan ERM, akan disusun suatu persamaan LEGU untuk motor linear induksi seunder tangga.



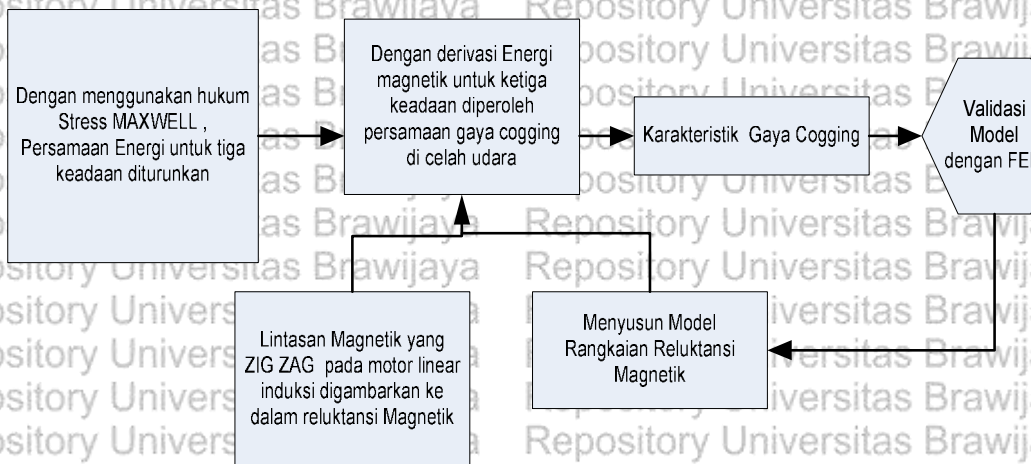
Gambar 3.7 Konsep Penentuan Konstata Fringing

Gambar 3.7 menunjukkan prosedur untuk memperoleh konstanta fringing pada motor linear induksi. Logika prosedur tetap mengacu ke Carter, sebab Carter telah memelopori prosedur singkat di penelitian ini.



3.3 Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Cogging

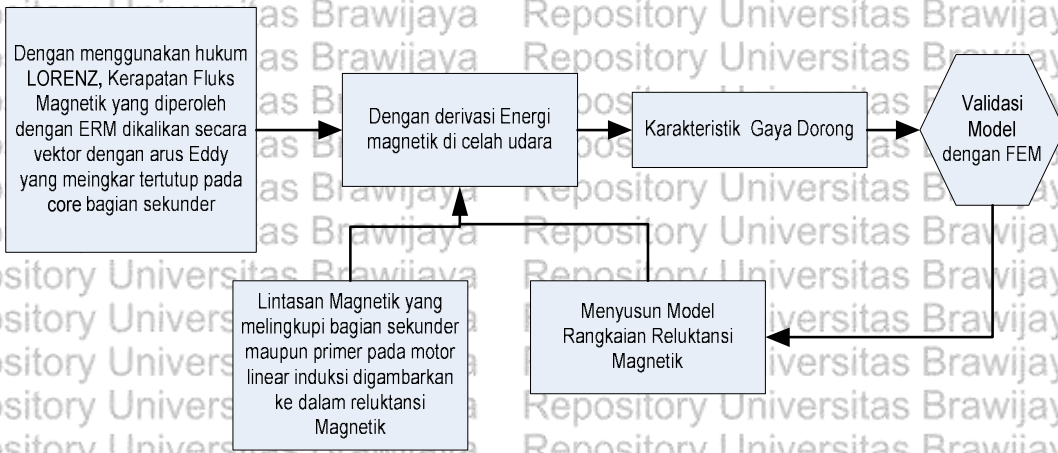
Karakterisasi gaya cogging mengacu ke lintasan ZIG-ZAG medan magnet. Lintasan medan magnet ini mengakibatkan arah gaya cogging berubah-ubah arah. Akibatnya gaya cogging ini berbentuk mirip gelombang sinusoidal yang frekuensinya adalah 1 pole pitch motor. Dengan menentukan ERM lintasan ZIG ZAG ini yang kemudian berdasarkan hukum Stress-Maxwell akan diperoleh persamaan energi magnet di gap udara sempit. Karena energi magnetic ini dipengaruhi langsung oleh reluktansi lintasan magnetic, maka pada analisis karakteristik ini pergerakan motor linear induksi dibagi kedalam 3 buah situasi. Setiap situasi dilakukan penurunan persamaan energi magnetiknya. Gambar 3.8 menunjukkan sketsa prosedur untuk karakterisasi gaya cogging.



Gambar 3.8 Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Cogging

3.4 Kerangka Konsep Karakterisasi Gaya Dorong

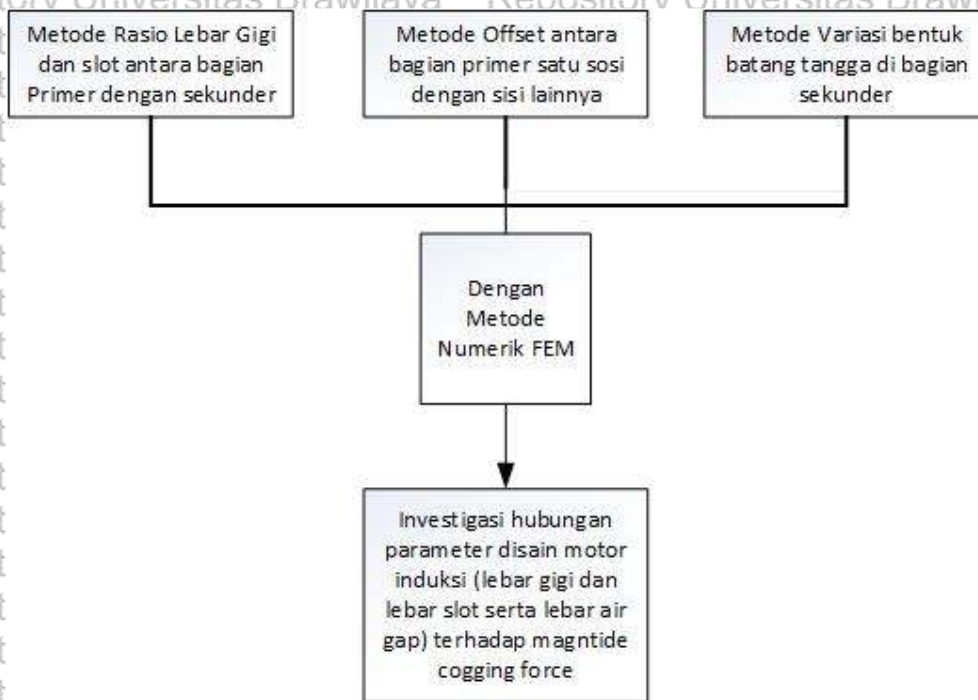
Karakterisasi gaya dorong mengacu ke lintasan fluks magnetik yang melingkupi semua bagian primer maupun sekunder motor linear induksi. Dengan pendekatan ERM akan diperoleh reluktansi total dari lintasan magnetic itu. Dengan memperhatikan lintasan fluks magnetic tertutup dapat disusun persamaan diferensial dengan variabel tergantung kerapatan fluks magnet dan variabel bebas adalah waktu. Gambar 3.9 menunjukkan kerangka konsep karakterisasi gaya dorong.



Gambar 3.9 Karakterisasi Gaya Dorong

3.5 Kerangka Konsep Pengurangan Gaya Cogging

Gambar 3.10 menjelaskan konsep riset penurunan gaya cogging. Proses ini diupayakan dilakukan secara bersama.



Gambar 3.10 Konsep Penurunan Gaya Cogging



3.6 Hipotesis

Berdasarkan kerangka konsep dapat disusun hipoteses berikut:

1. Dengan melakukan pendekatan Ekuivalen Reluktansi Magnetik, ekuivalen potensial magnetic dan kerapatan fluks magnetik di daerah gap motor linear induksi dapat dihitung dengan cara yang mudah berdasarkan hukum Kirchoff 1 maupun 2 dan menghasilkan fungsi karakteristik yang tertutup.
2. Dengan menggunakan pendekatan Ekuivalen Reluktansi Magnetik, akan diperoleh persamaan yang menghubungkan antara permukaan berslot di motor linear induksi dengan permukaan datar (Ekuivalensi Lebar Gap).
3. Dengan melakukan analisis perbandingan fungsi karakteristik kedua gaya cogging dan gaya dorong, akan mempermudah untuk menemukan cara untuk pengurangan gaya cogging dengan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap gaya dorong. Dengan validasi menggunakan software magnetic CEDRAT 2D, akan diperoleh gambaran kepresisian fungsi karakteristik yang dipeproleh sebelum melakukan eksperimen.
4. Dengan penempatan dua primer tidak simetri, akan mengakibatkan gaya cogging pada sisi kesatu dengan yang lain akan saling menghilangkan.
5. Dengan membuat rasio jarak gigi tertentu, maka gaya cogging antara gigi saling meniadakan. Oleh karenanya total gaya cogging menjadi lebih kecil.
6. Dengan membuat gigi sekunder berbentuk trapezoidal akan juga semakin memperkecil gaya cogging dengan tetap gaya dorong tidak menurun secara signifikan.
7. Dengan analisis ketiga cara yaitu penetapan rasio lebar gigi dan slot antara kedua bagian primer antara bagian sekunder, variasi bentuk batang sekunder berbentuk trapezoidal dan peletakkan bagian primer secara tidak simetri, akan diperoleh kombinasi ketiga cara itu untuk memperoleh pengurangan gaya cogging yang paling besar dan tidak mempengaruhi gaya dorong.
8. Dengan verifikasi eksperimen ketiga cara pengurangan gaya cogging dan pengaruh pada gaya dorong, akan diperoleh pengurangan gaya cogging secara reel di eksperimen dengan menggunakan motor linear primer ganda sekunder tangga.



BAB IV METODE PENELITIAN

Riset ini mengacu ke uji karakteristik dan penurunan gaya cogging pada motor linear induksi primer ganda sekunder tangga disain dan experimental. Prosedur disain meliputi penyusunan spesifikasi disain dengan mengacu kebutuhan penelitian dan experimental akan terus dilakukan untuk verifikasi hasil disain dan melihat pengaruh peletakkan sisi primer tak simetri, Cara uji karakteristik motor linear mengacu ke cara magnetik yang digunakan untuk motor linear sisi ganda dan sekunder tangga. Hasil uji akan ditampilkan secara simulasi terlebih dulu, untuk melakukan evaluasi hasil uji untuk dilihat performansi motor linear. Setelah secara simulasi telah terpenuhi, maka proses verifikasi dengan membuat desain akan dilakukan dengan memperhatikan hasil simulasi. Kemudian proses verifikasi gaya cogging dan gaya dorong dilakukan dengan pengukuran arus elektrik yang arah Quadrature dari motor linear induksi.

4.1 Prosedur Penelitian

1. Menyusun rangkaian ekuivalen reluktansi magnetik untuk menggambarkan karakteristik gaya cogging pada motor linear primer ganda sekunder tangga.
2. Menyusun rangkaian ekuivalen reluktansi magnetik untuk menggambarkan karakteristik gaya dorong motor linear induksi primer ganda sekunder tangga.
3. Melakukan analisis perbedaan antara karakteristik gaya dorong dan gaya cogging untuk menyusun metode pengurangan pengaruh gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong.
4. Melakukan verifikasi hasil karakteristik gaya dorong dan gaya cogging dan melakukan eksperimen verifikasi pengurangan gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong.

4.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan meliputi bahan habis pakai dan bahan pendukung dalam proses perancangan sebagai berikut:

- a) Penggulung kumparan otomatis yang dilengkapi dengan counter.
- b) Kawat email yang dipakai untuk kumparan motor dengan primereter 0,75 mm.

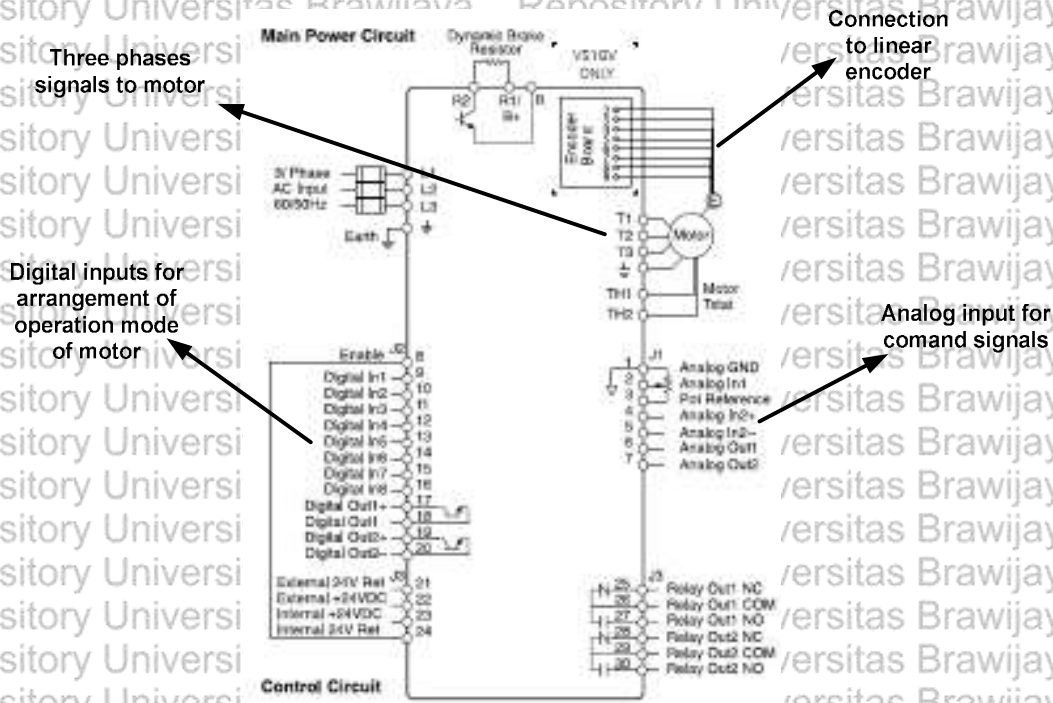


- c) Kabel-kabel penghantar yang dipakai untuk menghubungkan kumparan ke kotak keluaran kabel motor
- d) Timah soldier untuk melakukan sambungan antara kumparan satu phase ke phase lainnya atau sambungan dari kumparan ke keluaran kabel motor.

Alat penelitian meliputi perangkat pengukur gaya cogging dan gaya dorong serta alat pengukur arus elektrik AC dan sensor serta kartu interface antar *computer host* ke *computer target* serta ke motor elektrik.

1. Servo Drive Digital

Eksperimen membutuhkan perangkat inverter digital servo yang akan menggerakkan motor linear dengan konsep inverter. Frekuensi dan tegangan keluaran servo ini akan senantiasa berubah tergantung pada set-point kecepatan motor linear. Kapasitas perangkat ini adalah tegangan antar phase 240 volt dengan kemampuan suplai untuk gaya maksimum 270 N dan arus maksimum adalah 20A. Gambar 4.1 menunjukkan sketsa digital servo drive.

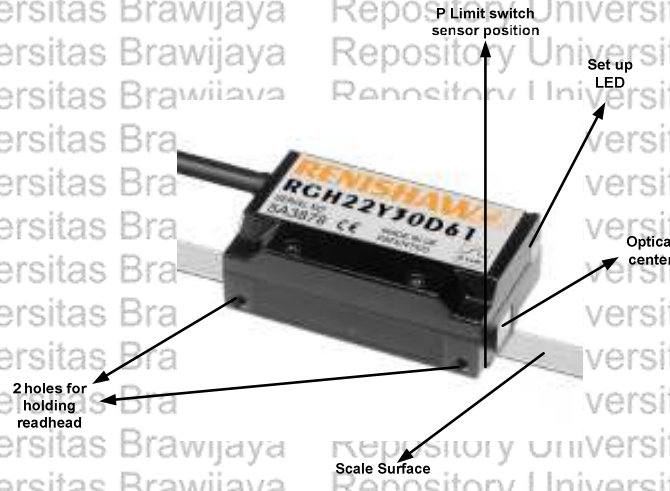


Gambar 4.1 Digital Servo drive "BALDOR"



2. Sensor gerak translasi

Komponen dengan tipe RGH22 merupakan solusi umpan balik yang ideal. Komponen ini memiliki kepresisian yang tinggi. Prinsip kerja komponen ini adalah berdasarkan optic. Gambar 4.2 menunjukkan komponen sensor itu. Komponen dilengkapi dengan LED yang digunakan untuk mendeteksi posisi-posi benda dengan berdasarkan lembar tembaga yang ditempelkan pada motor linear. Renishaw RG22 merupakan sistem encoder linear. Sistem ini digunakan untuk mengukur posisi linear. Komponen ini termasuk kategori encoder optic. Komponen ini dirancang untuk sensor tanpa sentuh. Pelketakan sensor ini harus diperhatikan dengan baik, lampu merah menunjukkan bahwa posisi tidak tepat, sedang warna hijau menunjukkan posisi tepat. Gambar 4.3 menunjukkan peletakan sensor pada motor linear.



Gambar 4.2 Sensor posisi Linear



Gambar 4.3 Letak posisi Sensor Linear



3. Interpolator Digital

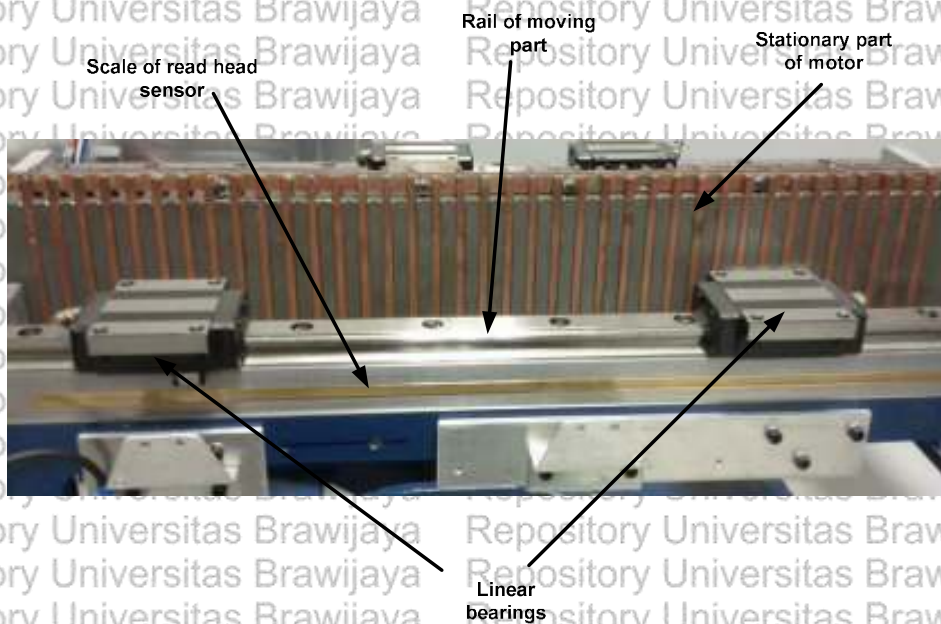
Perangkat digital interolar bertujuan mengubah sinyal sinusoidal dari sensor posisi ke perangkat komputer Host (Gambar 4.4). Keluaran komponen ini merupakan sinyal kotak yang maksimum 5 volt dan 0 volt.



Gambar 4.4 Digital Interpolator

4. Tempat test-Bed

Tempat motor linear sebagai test-bed adalah meja yang panjangnya 600 mm (Gambar 4.5). Bagian Sekunder diletakkan ditengah-tengah meja dengan harapan bahwa sisi primer bisa diletakkan tepat di sisi kiri dan kanan dengan posisi simetri. Pada rel dipasang 4 buah linear bearing untuk menyanggah dan membuat bagian primer dapat primer horizontal.



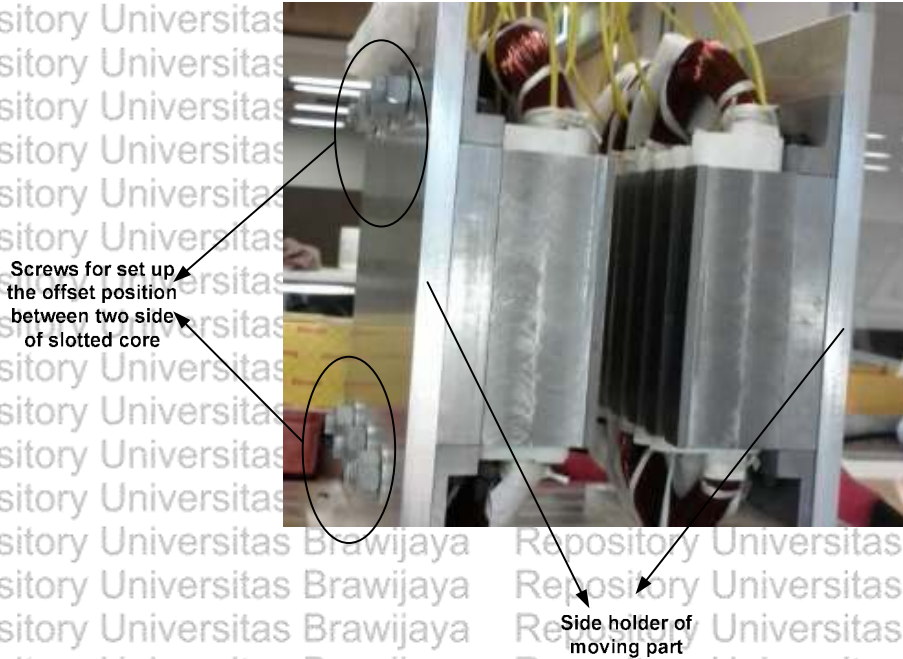
Gambar 4.5 Frame Test-Bed



5. Sekrup Penggeser Bagian Primer

Bagian ini diletakkan tepat disisi kanan dan kiri bagian stationer (Gambar 4.6).

Kumparan diletakkan di slot-sot bagian primer ini.



Gambar 4.6 Fasilitas untuk menggeser bagian primer motor



BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan materi yang meliputi hasil riset yang mengacu ke jawaban rumusan permasalahan. Sub bab 5.1 memaparkan penggunaan pendekatan ekivalen reluktansi magnetic (ERM) guna perhitungan analitik magnitudo rata-rata distribusi fluks magnet di gap udara (*air gap*) yang terjadi pada model sederhana. Kemudian pendekatan ERM di subbab berikutnya yakni 5.2, digunakan untuk menghitung secara analitik gaya cogging pada model multi gigi. Reluktansi total dari lintasan medan magnetic yang berubah ubah (ZIG ZAG) didasarkan pada pendekatan lintasan magnetik yang tidak lurus tapi berubah-ubah. Sebagaimana diketahui bahwa pada motor elektrik, energi elektrik yang dibangkitkan oleh lilitan pada bagian primer akan diubah oleh rangkaian magnetic ke energi magnetik. Perubahan energi magnetik yang tidak konsisten itulah yang menyebabkan timbulnya gaya cogging.

Model multi gigi ini merupakan model yang diserupakan dengan struktur magnetik suatu motor linear induksi “single-sided” sekunder tangga. Model cogging itu merupakan hubungan antara dimensi secara fisik motor linear induksi primer ganda dan sekunder tangga dengan gaya cogging. Model ini terdiri dua bagian juga bagian primer dan bagian sekunder. Bagian primer adalah yang dapat digerakkan sedangkan bagian sekunder disebut rail. Alasan penggunaan model sederhana ini adalah mengurangi kompleksitas perhitungan dan mengurangi jumlah persamaan matematik. Umumnya analisis motor-motor elektrik, dilakukan hanya untuk satu pole.

Secara khusus, terdapat dua buah pendekatan untuk memprediksi gaya cogging, yaitu cara analitik dan cara numerik. Cara analitik adalah cocok untuk model yang tidak kompleks. Hal itu dikarenakan ketidakteelitian perhitungan dan penyederhanaan yang berlebihan (*oversimplification*). Namun cara analitik akan menghasilkan bentuk tertutup, artinya menghasilkan suatu persamaan matematik yang menyatakan hubungan antara gaya cogging dengan parameter-parameter motor linear induksi. Sedangkan cara numerik adalah menggunakan metode elemen berhingga (FEM- *Finite Element Method*), yang tersedia suatu software electromagnetik analysis 2D (dua dimensi) atau 3D (3 dimensi).

Metode numerik biasanya didukung oleh finite element analysis (FEA) software. Metode ini dapat menampilkan perhitungan yang kompleks dan menghabiskan waktu terlalu lama. Durasi waktu yang terlalu lama untuk perhitungan FEA suatu model



dikarenakan terdapat pengulangan perhitungan yang berkali-kali (*repetitive*). Oleh karena itu, penggunaan gabungan dua cara itu pada disain motor linear induksi adalah sangat krusial. Metode analitik dimanfaatkan untuk menentukan lingkup parameter yang layak dipakai pada perancangan motor linear secara fisik. Dikarenakan secara reel bahwa motor linear induksi memiliki slot-slot pada corenya, yaitu sebagai tempat untuk meletakkan kumparan pada bagian primer motor, maka kerapatan fluks medan magnet pada daerah gap sempit tidak dapat dihitung secara analitik dengan level kepresisian yang tinggi. Sebagai penyederhanaannya, peneliti sebelumnya telah mengembangkan suatu cara dengan menganggap bahwa permukaan bagian primer maupun sekunder motor tidak memiliki slot-slot, tapi hanya merupakan permukaan datar. Kemudian parameter lebar gap sempit pada motor merupakan jarak permukaan antara kedua permukaan datar itu. Parameter Ekuivalen lebar gap udara (ELGU) adalah lebar gap yang dianggap sama dengan lebar gap sempit jika slot-slot itu diperhatikan selama perhitungan. Nilai yang sama adalah pada kerapatan rata-rata fluks medan magnet yang ada di Gap sempit itu.

Sub bab 5.3 menunjukkan hasil analisis hasil prediksi gaya cogging dengan kurva-kurva solusi menggunakan perangkat lunak FEM. Hasil prediksi akan divalidasi dengan melakukan eksperimen terhadap gaya cogging pada model gigi banyak. Sub bab 5.4 menguraikan penurunan model matematik gaya dorong (*gaya thrust*). Pendekatan ERM digunakan pada sub bagian ini adalah untuk menghitung reluktansi lintasan magnetic yang menghasilkan gaya Lorenz. Sedangkan sub bab 5.5 menguraikan cara-cara yang ditawarkan oleh disertasi ini untuk pengurangan gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong.

5.1 Metode Pendekatan ERM (Ekivalensi Reluktansi Magnetik)

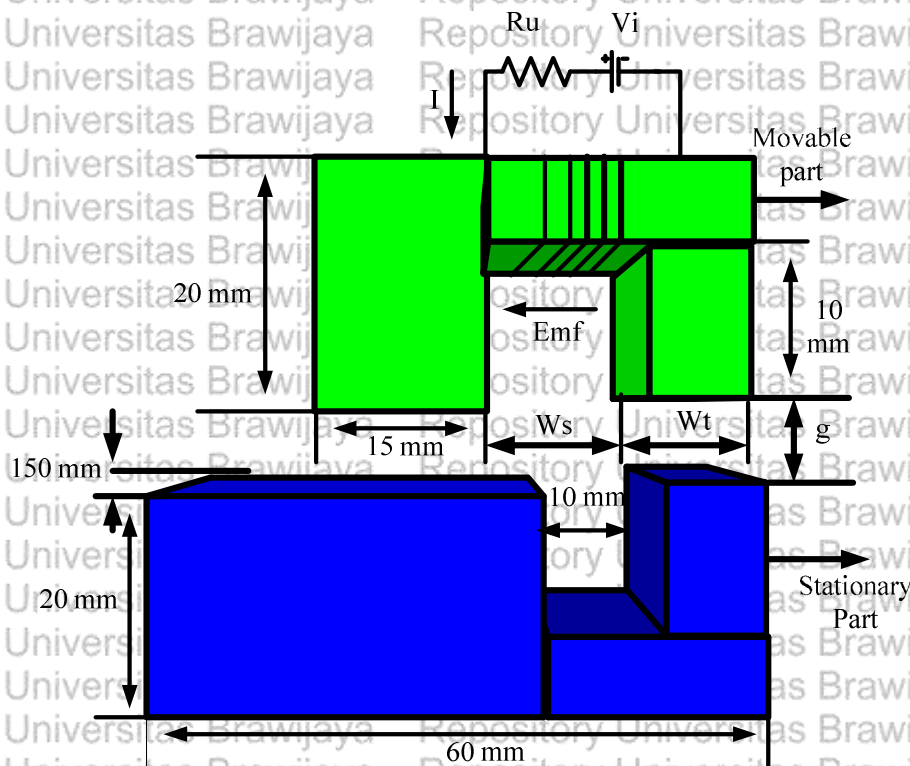
Pendekatan reluktansi dapat digunakan untuk menghitung kerapatan fluks magnetik pada rangkaian magnetik yang dilengkapi dengan gap udara dan kumparan yang dialiri arus elektrik. Dalam hal ini dibuat contoh model satu gigi. Model satu gigi memiliki dua bagian: bagian yang primer dan bagian sekunder. Kumparan yang dialiri arus elektrik dililitkan pada bagian yang primer. Daerah antara bagian yang primer dengan bagian yang primer dikenal sebagai gap udara (air Gap). Tabel 5.1 menunjukkan dimensi geometri model satu gigi itu. Gambar 5.1 menunjukkan skema model satu gigi. Bagian yang primer maupun yang primer hanya mempunyai satu slot. Bagian yang terbuat dari besi (*Iron Core*) dimagnetisasi oleh kumparan yang dialiri oleh arus elektrik



yang dililitkan di antara gigi di bagian yang primer. Jika diasumsikan bahwa besi selama magnetisasi tidak mengalami saturasi, maka besi itu akan memiliki permeabilitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan permeabilitas udara. Akibatnya fluks magnet yang mengalir pada bagian besi Φ secara material akan tersebar merata secara sama (homogen).

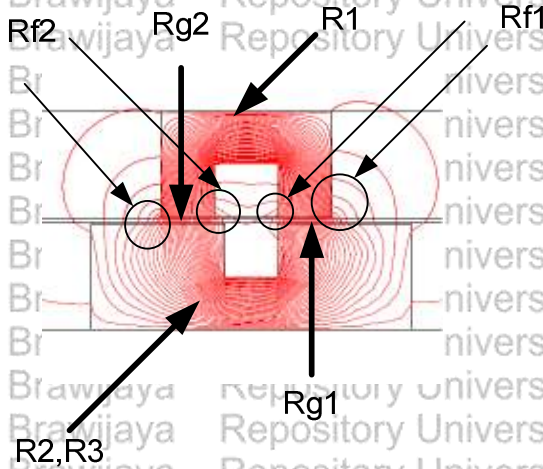
Tabel 5.1 Dimensi Geometri Model Satu Gigi

No.	Moving part (mm)		Stationary part (mm)		
	slot	tooth	Slot	left tooth	right tooth
1.	15	10	15	40	10



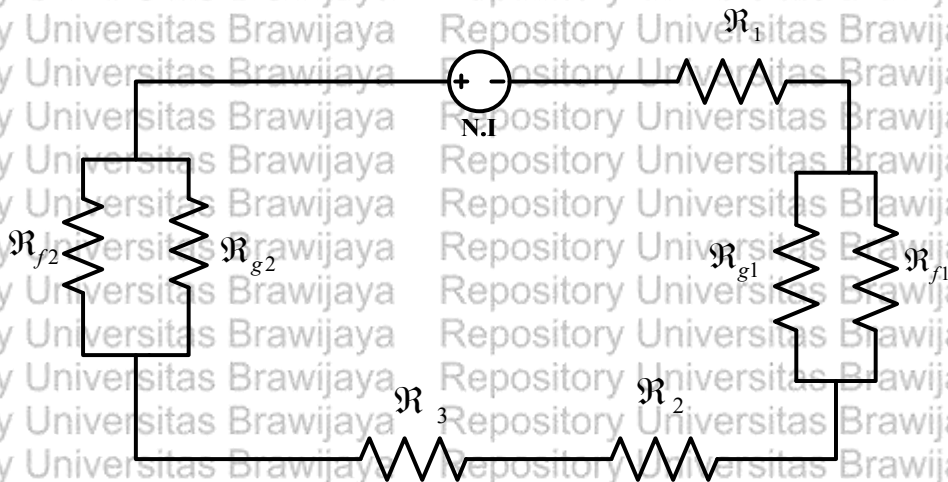
Gambar 5.1 Skema Model Satu Gigi

Pada analisis model satu gigi ini, hanya dua lintasan fluks magnet yang akan dipertimbangkan: (1) fluks magnetik yang tegak lurus pada daerah gap udara, yang tidak mengalami pembelokan pada daerah gap udara, (2) Fluks magnetik yang tersebar ke daerah udara sekitar yang mengalami pembelokan. Gambar 5.2 menunjukkan lintasan fluks medan magnet di semua area model satu gigi.



Gambar 5.2 Kerapatan Fluks Magnetik Pada Keseluruhan area di Model Satu Gigi

Gambar 5.3 menunjukkan ekivalensi reluktansi magnetik untuk setiap materi di model satu gigi. Setiap lintasan magnetik yang ditunjukkan oleh Gambar 5.2 dapat didekati dengan sebuah reluktansi magnetik yang ditunjukkan oleh Gambar 5.3. Model ekivalensi reluktansi magnetik ini disusun dengan tujuan untuk mempermudah analisis suatu model rangkaian magnetik. Pendekatan model reluktansi magnetik yang disusun berdasarkan asumsi bahwa permeabilitas material besi adalah tak berhingga, sehingga nilai reluktansi magnetiknya adalah sangat kecil ($\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3$).



Gambar 5.3 Rangkaian Ekivalen Reluktansi Magnetik Model Satu Gigi

Perhitungan reluktansi magnetik mendasarkan ke lebar slot pada bagian primer, jumlah kumparan yang dililitkan dan jumlah kumparan yang ditetapkan sebanyak 45



lilitan (N) dan arus maksimum adalah 8,5 A (I), sehingga MMF adalah perkalian antara jumlah lilitan dengan arus elektrik yang mengalir didalamnya $MMF = N \times I = 382.5$.

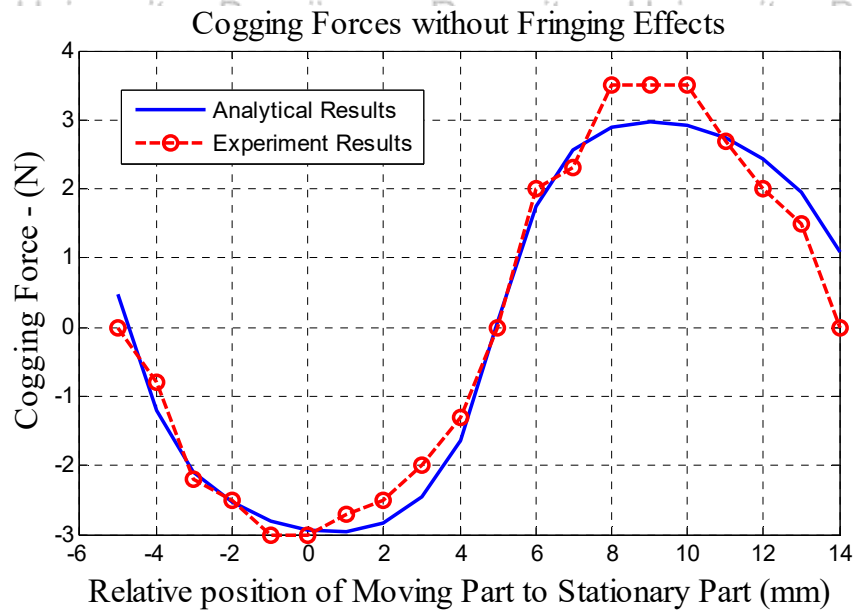
Reluktansi magnetik dihitung menggunakan persamaan 5.1.

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu_r \mu_0 A'} \quad (5.1)$$

Tabel 5.2 Perbandingan fluks medan magnet Hasil perhitungan dan Hasil Simulasi untuk 10 mm slot

G (mm)	Average flux density (Tesla)			Error (%)	
	FEM	Green	RNE	Green	RNE
1	0.47	0.58	0.47	23.56	0.12
1.1	0.43	0.54	0.44	25.32	1.01
1.2	0.4	0.5	0.4	23.36	0.41
1.3	0.38	0.47	0.37	25.61	1.87
1.4	0.35	0.42	0.35	19.42	1.33
1.5	0.33	0.39	0.32	15.46	2.28
1.6	0.31	0.37	0.3	15.37	3.1
1.7	0.3	0.35	0.29	15.16	3.82
1.8	0.28	0.34	0.27	15.95	5.48
1.9	0.27	0.33	0.26	19.73	5.05
2	0.26	0.32	0.25	22	5.36

Pada posisi relatif 5 mm, gaya cogging akan menjadi zero, yang ditunjukkan pada kurva energi adalah gradien nol. Ini disebabkan bahwa rugi-rugi energi magnetik pada bagian kiri gigi dan bagian kanan adalah sama, sehingga total gaya cogging bernilai nol. Jadi posisi relatif bagian primer terhadap bagian sekunder sangat mempengaruhi nilai gaya cogging. Sebaliknya pada posisi relatif antara 5-14 mm, memperlihatkan energi magnetik memiliki kecenderungan menaik, yang artinya bahwa gaya cogging bernilai positif.



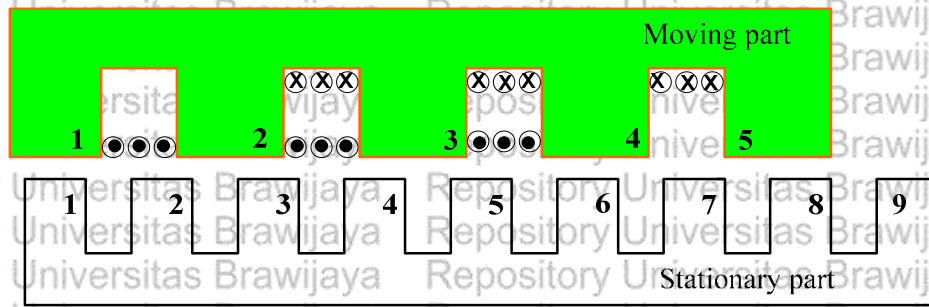
Gambar 5.4 Kecenderungan data-data antara eksperimen dengan Analitik

Gambar 5-4 menunjukkan kecenderungan data-data nilai gaya cogging dari hasil eksperimen dengan gaya cogging hasil analitik. Pada perhitungan unsur fringing effect tidak dipertimbangkan. Sehingga nilai gaya cogging pada daerah ekstrem mempunyai simpangan yang cukup besar. Hal ini disebabkan perubahan relutansi pada proses perhitungan tidak berubah, sehingga nilai gaya cogging akan senantiasa sama (berdasarkan hukum Faraday).

5.2 Karakterisasi Gaya Cogging Dengan Pendekatan ERM

Asumsi yang digunakan adalah ampere-kumparan yang konstan, ratio lebar gigi dan slot yang konstan. Variasi yang dilakukan adalah lebar gap udara antara I sampai dengan 2 mm dengan step sebesar 0,1 mm. Perhitungan estimasi gaya cogging ini menggunakan konsep bahwa perubahan energi magnetik yang berada pada gap udara adalah proporsional dengan gaya cogging.

Pengaturan peletakan lilitan dalam slot-slot model multi gigi ditunjukkan oleh Gambar 5.5. Arah arus elektrik yang keluar dari setiap lilitan ditunjukkan dengan simbol titik, yang berarti arah arus elektrik ke luar dari gambar. Sedangkan symbol (x) menandakan bahwa arah arus elektrik adalah ke dalam gambar.

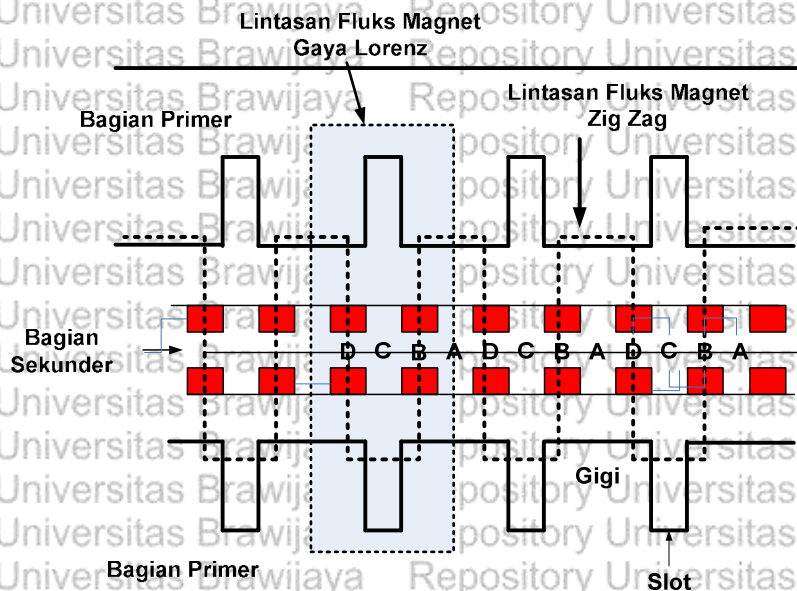


Gambar 5.5 Penyesunan kumparan pada Model Multi Gigi

Pengaturan besar arus ditetapkan berdasarkan urutan tiga phase arus elektrik AC yang setiap phase memiliki beda phase 120°. Tabel 5.3 menunjukkan dimensi geometri model multi gigi tersebut.

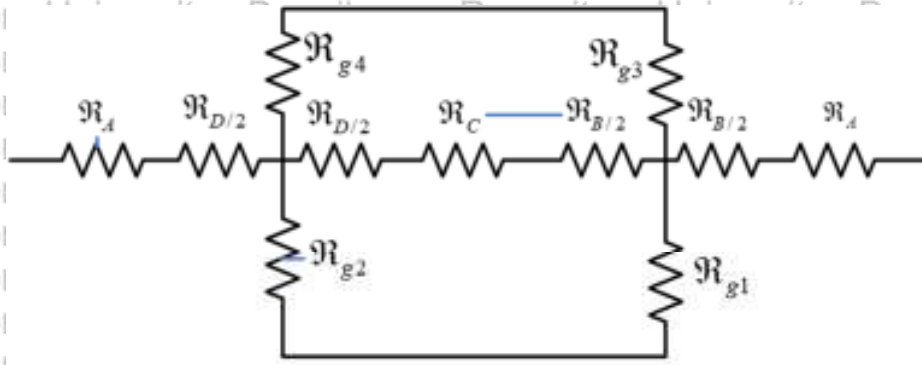
Tabel 5.3 Dimensi Geometri Model Multi Gigi

No.	Slot width		Tooth width	
	moving	Stationary	Moving	Stationary
Unit	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	15	10	10	10



Gambar 5.6 Lintasan Fluks Magnetik ZIG-ZAG dan Fluks Gaya Lorenz

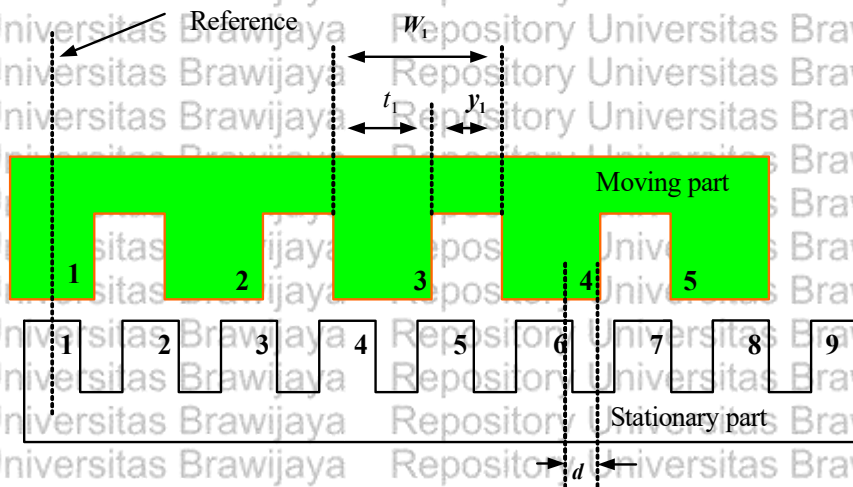
Gambar 5.6 menunjukkan lintasan fluks magnetik yang biasa dan yang ZIG ZAG. Lintasan ZIG-ZAG yang mengakibatkan munculnya gaya cogging, sedangkan lintasan normal yang melingkupi dari bagian primer maupun bagian primer sisi lain merupakan lintasan yang penting, sebab lintasan ini membangkitkan gaya gerak LORENZ.



$$R_T = (2R_A + R_{D/2} + R_{g2}) + (R_{D/2} + R_C + R_{g3}) // (R_{B/2} + R_{g1}) // (R_{B/2} + R_{g4})$$

Gambar 5.7 Ekvivalensi Reluktansi Magnetik untuk Lintasan ZIG ZAG

Gambar 5.7 menggambarkan rangkaian ekivalen reluktansi magnetic untuk satu pole pitch motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Dengan menggunakan hukum-hukum Kirchof 1 maupun 2, kerapatan fluks di daerah gap udara sempit dapat dihitung secara analitik dengan cara mudah dan cepat.

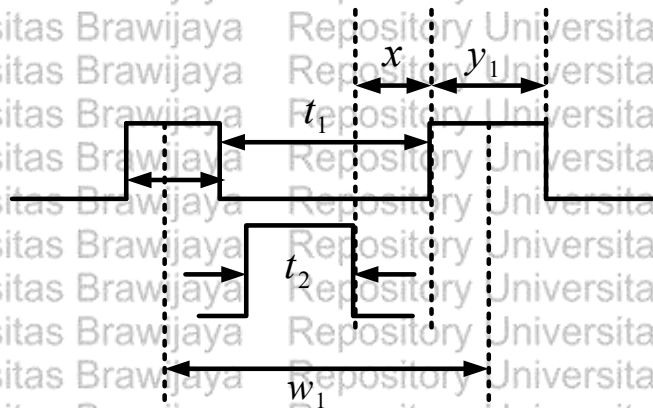


Gambar 5.8 Parameter-parameter dari Model Multi Gigi

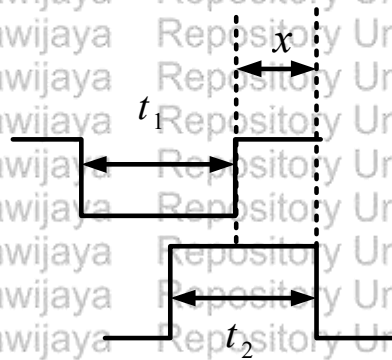
Dengan menggerakkan bagian primer secara perlahan dengan membuat arus elektrik konstan, maka kerapatan fluks magnetik di gap udara akan mengalami variasi nilai yang konsekuensinya akan menghasilkan gaya cogging. Bagian primer mulai digerakkan pada $x=0$ ketika titik tengah gigi pada bagian primer nomor 1 tepat berimpit dengan titik tengah gigi nomor 1 di bagian sekunder. Variasi posisi relatif antara gigi di bagian primer dengan slot di bagian sekunder dapat dibagi menjadi tiga kondisi: (a) Gigi



di bagian primer tepat berhadapan dengan gigi di bagian sekunder (gambar 5-7); (b) gigi di bagian primer sebagian berhadapan dengan sebagian gigi di bagian sekunder (Gambar 5-8). Sedangkan keadaan ketiga (c) jika gigi di bagian primer tepat berhadapan dengan slot di bagian sekunder.



Gambar 5.9 Gigi di bagian primer tepat berhadapan dengan gigi di bagian Sekunder (Primer)



Gambar 5.10 Gigi di bagian primer sebagian berhadapan dengan sebagian gigi di bagian Primer

Gaya cogging dapat diestimasi dengan pertama menurunkan persamaan matematik yang menggambarkan energi magnetik di area gap udara sebagai fungsi posisi relative gigi nomor 1 di bagian primer terhadap gigi nomor satu di bagian sekunder. Kemudian ekspresi matematik energi magnetik itu diturunkan terhadap posisi relative (x). Energi magnetik di area gap udara dapat diperoleh dengan perkalian antara potensial magnetik dengan magnetik konduktansi antara gigi di bagian primer dengan gigi di bagian sekunder. Persamaan standar energi magnetik ditunjukkan oleh persamaan 5.2.

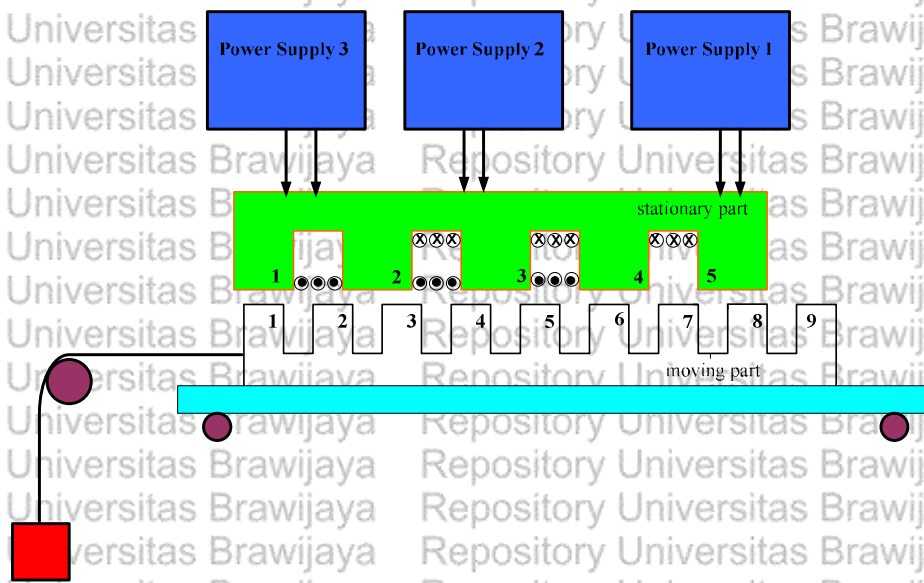


$$W = \frac{V_T^2 P}{8\pi}, \tag{5.2}$$

Dengan V_T merupakan beda potensial magnetik antara bagian primer dengan bagian sekunder; P konduktansi magnetik dari lintasan magnetik yang ada di area gap udara. Energi magnetik total merupakan jumlah energi magnetik per slot pitch. Karena ketika bagian primer digerakkan perlahan, maka akan terjadi variasi energi magnetik, maka ekspresi matematik energi ini juga dinyatakan dalam tiga kondisi. Hasil estimasi persamaan gaya cogging maksimum ditunjukkan oleh persamaan 5.3.

$$F_{cg} = 2 \cdot Q \cdot t_p \cdot x = \frac{1.264 \left(\frac{N^2 I_{rms}^2 \cdot D_p}{g \cdot w_p^2} \right) (x \cdot t_p)}{10^8} \tag{5.3}$$

Set-up eksperimen untuk model multi gigi yang ditunjukkan oleh gambar 5.11 ditujukan untuk verifikasi eksperimen perhitungan analitik gaya cogging. Gaya cogging diukur dengan sumber DC untuk setiap posisi bagian primer.



Gambar 5.11 Konfigurasi Pengukuran Gaya Cogging

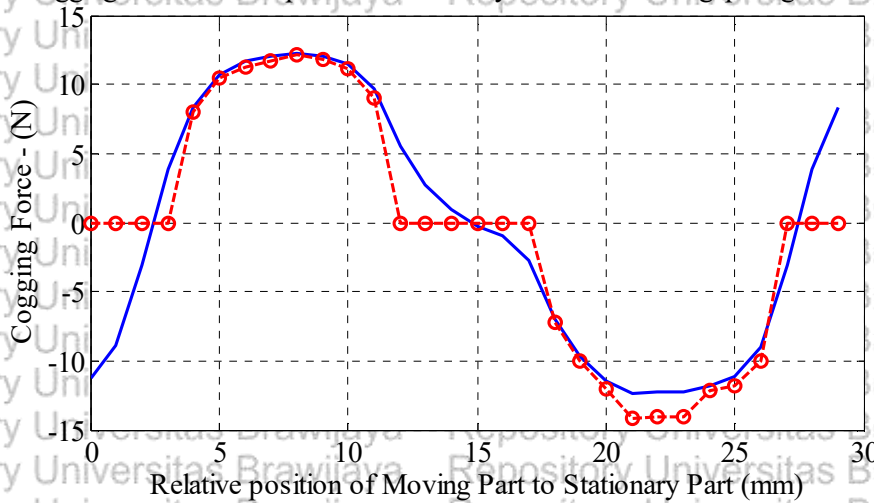
Perangkat uji eksperiment ini meliputi penahan bagian primer, bagian primer, kumparan dan bagian sekunder. Kumparan terhubung ke catu daya DC. Di sisi kiri, bagian yang primer terhubung ke beban. Gaya diukur dengan Digital Force Gauge dengan spesifikasi: kapasitas 0,5 hingga 500 lbf / 2,5 hingga 2,500 N; USB, RS-232 dan komunikasi analog; mode operasi normal dan puncak; load cell integral atau jarak jauh;



akurasi $\pm 0,1\%$ dari skala penuh. Untuk setiap posisi, pengukuran gaya telah dilakukan 10 kali untuk satu gerakan dan 10 kali untuk cara yang berlawanan. Dari pengukuran, penyimpangan pengukuran tidak lebih dari 1%.

Eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi panjang gap udara dan arus listrik yang mengalir ke koil terhadap gaya elektromagnetik di gap udara model. Panjang gap udara akan bervariasi antara 0,55 mm dan 1 mm. Kumparan dipasok oleh arus DC 3 ampere dan 4 ampere. Tren antara hasil eksperimen dan analitik diplot dalam satu grafik, sehingga perbedaan tren dapat diketahui dengan benar.

Cogging Forces for Experiment and Analytical Results Air gap length 0.55 mm

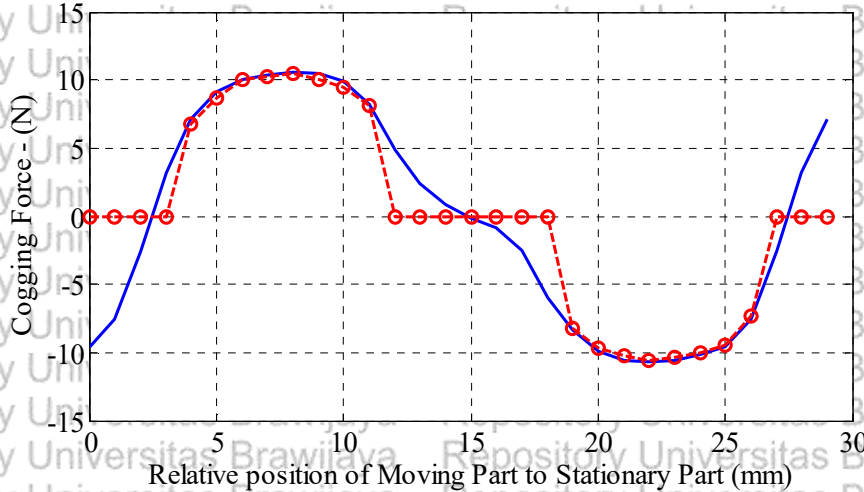


Gambar 5.12 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.55 mm dan arus 4 A

Gambar 5.12 menunjukkan kecenderungan grafik antara hasil analitik dan pengukuran eksperimental dengan udara Gap panjang 0,55 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model dalam pendekatan RNE memberikan tren yang sama dengan hasil eksperimen. Percobaan telah dilakukan hanya untuk satu gerakan slot slot karena gaya cogging periodik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa model analitik yang disimulasikan menggunakan program MATLAB memiliki kecenderungan yang mirip dengan hasil eksperimen. Jadi simulasi membenarkan hasil analisis. Seperti ditunjukkan di daerah tengah, fluktuasi hasil pengukuran lebih luas daripada di daerah lain, hal ini disebabkan bahwa di daerah ini, jalur magnetik kebocoran diklasifikasikan sebagai jalur ekstrim. Oleh karena itu, gaya elektromagnetik tidak dapat diukur secara tepat dan juga disebabkan oleh jalur magnetik pada area ini yang tidak dapat didekati oleh bentuk tertentu.



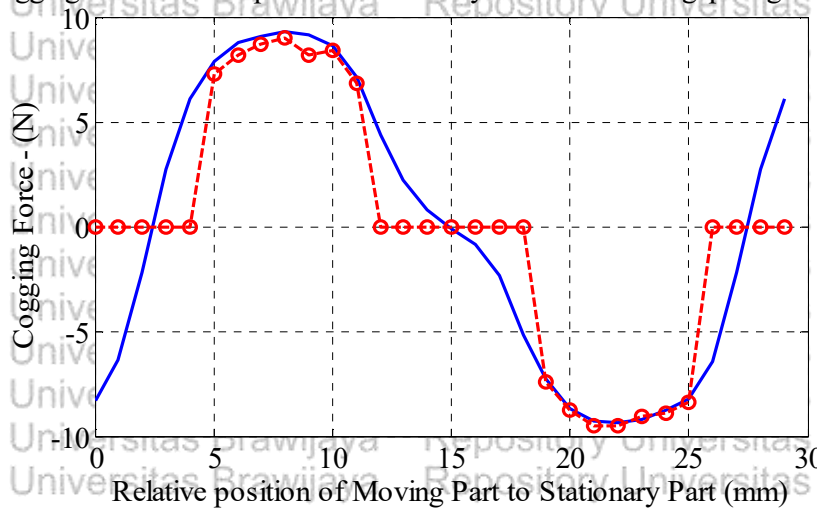
Cogging Forces for Experiment and Analytical Results Air gap length 0.65 mm



Gambar 5.13 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.65 mm dan arus 4 A

Gambar 5.13 menunjukkan bahwa gaya cogging di wilayah tengah di mana besarnya percobaan fluktuasi gaya cogging lebih besar daripada di wilayah lain. Hal ini disebabkan oleh adanya keengganan magnetik bocor yang dipengaruhi *area slotted* yang lebih lebar daripada saat gigi dalam bergerak dan pada stasioner bertemu persis pada posisi yang sama. Besarnya kekuatan cogging dengan udara yang lebih kecil panjang Gap lebih besar, hal ini dipengaruhi oleh gaya elektromagnetik yang sebanding dengan jarak antara gigi di bagian yang bergerak di dalam bagian yang diam.

Cogging Forces for Experiment and Analytical Results Air gap length 0.75 mm

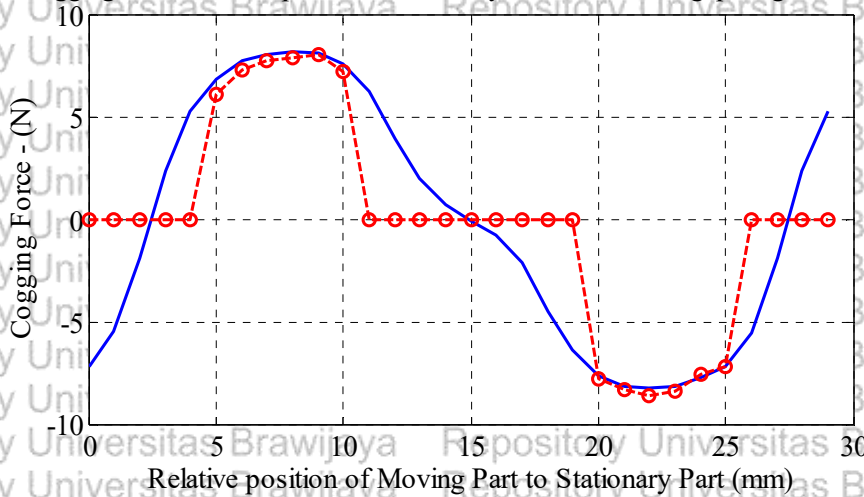


Gambar 5.14 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.75 mm dan arus 4A



Gambar 5.14 menunjukkan fenomena yang sama dengan gambar sebelumnya. Ini menunjukkan bahwa hasil analisis dapat mewakili kekuatan cogging di mana besarnya kekuatan cogging akan lebih besar jika udara Gap panjangnya lebih lebar. Besarnya kekuatan cogging untuk udara 0,75 mm panjang Gap adalah sekitar 22,5 N. Hal ini disebabkan menurut aturan stres Maxwell bahwa jarak yang lebih kecil antara gigi di bagian yang bergerak dan diam akan mempengaruhi kekuatan elektromagnetik yang lebih besar.

Cogging Forces for Experiment and Analytical Results Air gap length 0.85 mm



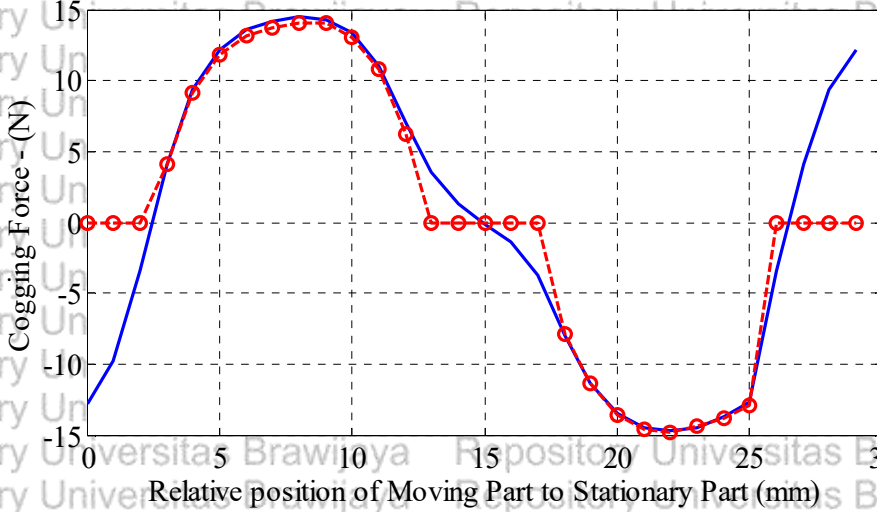
Gambar 5.15 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.85 mm dan arus 4A

Gambar 5.15 dan 5.16 memiliki hasil yang serupa di mana besarnya gaya cogging akan lebih kecil jika udara Gap lebih lebar dari pada model sebelumnya. Kesalahan pengukuran cogging di area ekstrem lebih besar daripada di wilayah lain, karena keberadaan medan magnet bocor di *area slotted* dapat mempengaruhi hasil analisis prediksi kekuatan cogging. Itu disebabkan oleh persamaan analitik yang telah ditolak di wilayah ekstrem ini. Sehingga kesalahan antara pengukuran dan hasil analisis tidak dapat diperkirakan dengan sangat baik untuk nilai kekuatan cogging yang ekstrem.

Gambar 5.17 menunjukkan hasil pengukuran dan analitik gaya cogging dengan variasi lebar Gap arus 3A. Kekuatan gaya cogging secara langsung tergantung pada besarnya sumber arus. Gaya elektromagnetik yang dapat menghasilkan gaya cogging, antara inti di bagian yang bergerak dan inti besi di bagian diam dipengaruhi langsung oleh besarnya sumber arus listrik yang mengalir ke kumparan di bagian yang bergerak.

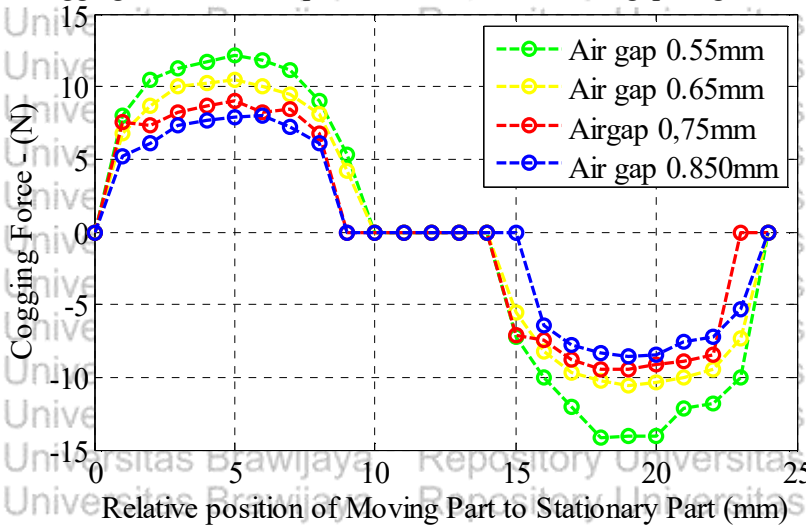


Cogging Forces for Experiment and Analytical Results Air gap length 0.95 mm



Gambar 5.16 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan lebar Gap 0.95 mm dan arus 4A

Cogging Forces for Experiment Results With Air gap length Variation



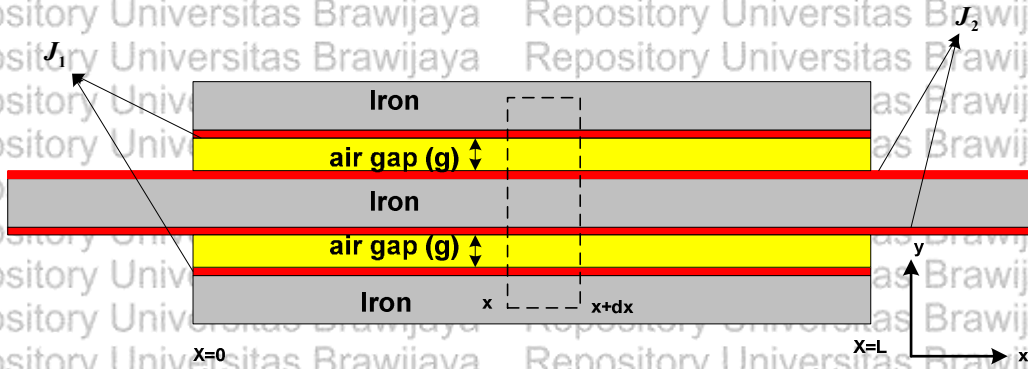
Gambar 5.17 Hasil Pengukuran dan analitik gaya Cogging dengan variasi lebar Gap arus 3A

5.3 Karakterisasi Gaya Dorong Pada Motor Linear Primer Ganda Sekunder Tangga (MLPGST)

Karakteristik gaya dorong motor (*thrust*) dikembangkan dengan menggunakan pendekatan medan magnet. Gambar 5.18 menunjukkan motor induksi linear dengan primer ganda dengan sekunder tangga yang diasumsikan sebagai permukaan datar.



Bagian primer sebagai bagian yang bergerak dan berukuran pendek. Gulungan pada bagian primer dianggap sebagai permukaan rata. Arus dalam kondisi ini, dapat diurai menjadi permukaan datar yang memiliki dua area Gap udara, dimana kedua panjang Gap udara harus sama.



Gambar 5.18 Model Motor Linear Induksi Primer Ganda

Bagian sekunder model yang merupakan bagian yang diam dan Gap udara yang arah tangential atau horizontal digambarkan sebagai kanal-q. Sedangkan arah normal Gap udara ini dikenal sebagai kanal d yang diasumsikan terhubung singkat sehingga pada rangkaian magnetik ini dapat diabaikan. Gigi dan slot pada bagian primer dianggap sebagai satu kestuan permukaan datar. Dengan asumsi ini persamaan matematik diferensial yang menggambarkan magnetik itu adalah persamaan diferensial linear.

Dimisalkan bahwa bagian primer disisipkan arus elektrik sinusoidal tiga phase pada kumparan slot mereka, maka fluks magnet mereka pada kanal q disimbolkan sebagai ϕ_q . Sebetulnya jarak lintasan magnet dapat dibentuk tiga lingkaran tertutup. Sedangkan loop tertutup hanyalah lintasan magnetik yang melingkupi dari atas motor linear sampai bagian bawah motor. Sebab lintasan yang lain dapat diabaikan untuk menurunkan persamaan matematik gaya dorong. Dengan mengikuti jalur di sekitar loop 1 pada arah yang ditunjukkan, maka persamaan yang dibentuk sesuai persamaan 5.4.

$$J_1(x) + J_2(x) = \frac{\mu_0}{g_e} [B_g(x) - B_g(x + dx)] + \Re_q \phi(x) dx \quad (5.4)$$

dengan:

$J_1(x)$: Kerapatan arus pada bagian primer sisi kesatu

$J_2(x)$: Kerapatan arus pada bagian primer yang lain

g_e : Lebar Gap udara

$B_g(x)$: Kerapatan fluks magnetik pada Gap udara

μ_0 : Permeabilitas pada ruang vakum



$\mathfrak{R}_g(x)$: Reluktansi total pada motor linear

$\phi(x)$: Kerapatan fluks magneti pada lintasan tertutup inensitas magnetik

Sehingga fungsi gaya dorong dapat dinyatakan sebagai perkalian dari fluks linkage pada bagian diam dan bagian primer berikut:

$$F_x(t) = \frac{2}{3} \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_F} \text{Im}[\overline{\psi}_m^1 (\overline{\psi}_{st}^1)^*] \quad (5.5)$$

Untuk keperluan disain motor linear induksi, hubungan kerapatan fluks magnetik di area Gap udara dengan dimensi motor linear adalah sebagai berikut:

$$B_g = \frac{2p\phi}{gSLW_t} \frac{Wb}{m^2} \quad (5.6)$$

Dengan:

p : Jumlah Pole pitch

ϕ : Fluks Magnetik pada celah udara

S : Jumlah slot motor

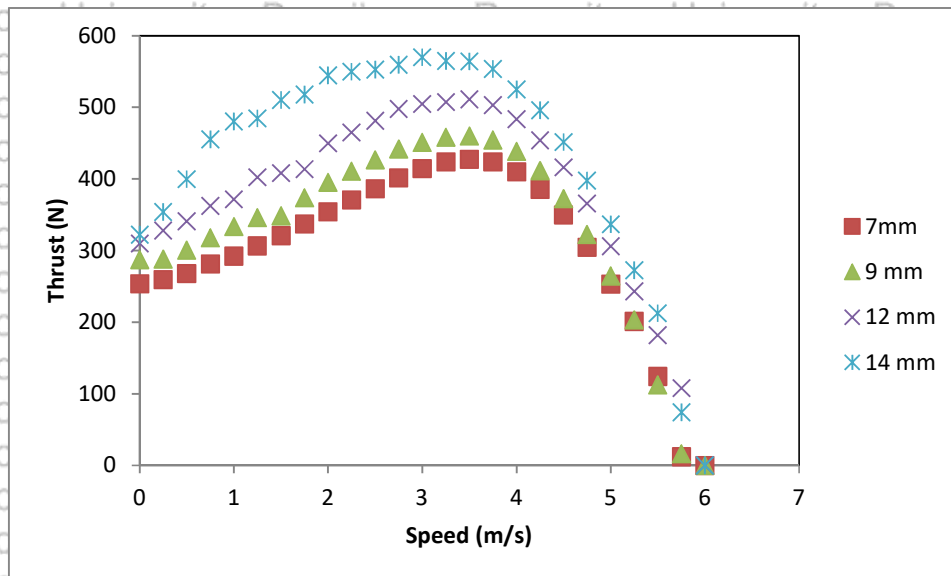
L : Panjang Core Motor

W_t ; Lebar gigi pada sisi sekunder

g : Lebar gap udara sempit

Apabila arus elektrik sumber AC 3 phase yang dialirkan ke kumparan di bagian primer dianggap konstan, maka gaya dorong hanya tergantung kepada kerapatan fluks magnet yang ditunjukkan oleh persamaan 5.6.

Dengan menggunakan persamaan karakteristik gaya dorong motor linear primer ganda sekunder tangga, yang dihitung dengan bantuan software Cedrat, maka diperoleh kurva yang ditunjukkan oleh gambar 5-19. Berdasarkan hasil analitik persamaan 5.5, menunjukkan bahwa persamaan analitik hasil pendekatan dengan cara ERM telah menyerupai dengan bentuk kurva-kurva yang dimiliki oleh motor linear induksi pada umumnya. Dengan perubahan lebar batang-batang di bagian sekunder tidak banyak mempengaruhi gaya dorong. Nilai maksimum gaya dorong dengan pengubahan lebar batang di bagian sekunder berkisar antara 420 N sampai dengan 520 Newton.



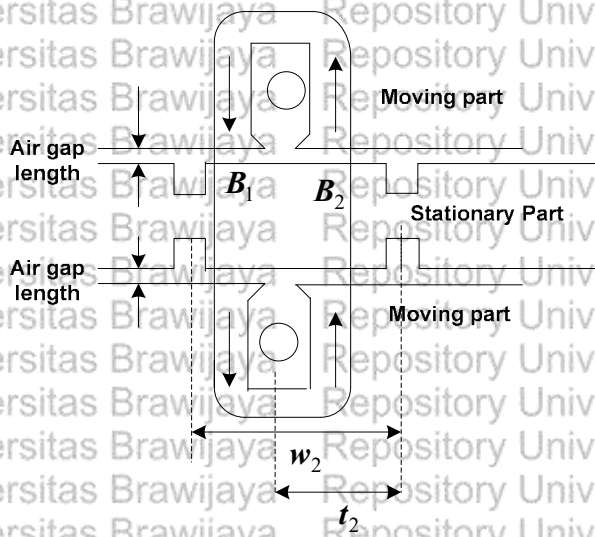
Gambar 5.19 Hubungan Gaya dorong steady state dengan kecepatan linear motor

5.4 Pengurangan Pengaruh Gaya Cogging

Pengurangan gaya cogging banyak dilakukan pada motor linear magnet permanen. Di kasus khusus untuk motor linear induksi, masih sangat jarang dilakukan untuk peningkatan kepresisian dengan menurunkan gaya cogging. Sedangkan pada motor induksi rotary, pengurangan torsi cogging dengan cara efektif yaitu dengan “skewing” peluntiran di bagian rotor motor, yang motor jenis ini dikenal motor induksi rotor sangkar. Riset torsi cogging di motor induksi sudah tidak mengalami kemajuan sama sekali. Usaha penurunan gaya cogging tidak disertai pengamatan terhadap penurunan gaya thrust (dorong). Oleh karena ini di bagian ini akan menguraikan kombinasi tiga cara sekaligus untuk menurunkan gaya cogging dan cara strategi Teknik control akan dibahas pada bab selanjutnya.

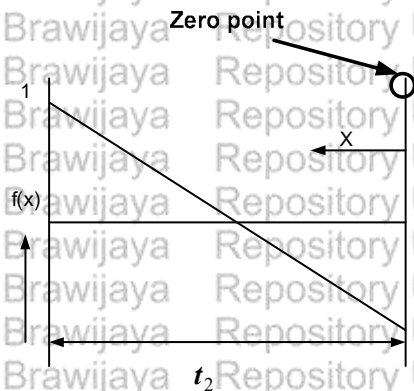
5.4.1 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Offset Posisi Antara Sisi Primer Satu dengan yang Lainnya

Penghalang terciptanya gerak presisi motor linear induksi di kecepatan lamban adalah gaya cogging. Oleh karena itu akan dibahas kombinasi tiga cara penurunan gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong (thrust). Pada penelitian pendahuluan diperoleh gambaran yang jelas kaitan antara ketiga kombinasi itu adalah cara yang sangat signifikan dapat menurunkan gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong.



Gambar 5.20 Kerapatan Fluks magnet pada satu slot pitch

Gaya cogging dapat direpresentasikan dengan menggunakan persamaan Maxwell pertama untuk distribusi induksi magnetik. Gambar 5.20 menunjukkan satu gigi sederhana dari motor linear induksi primer ganda sekunder tangga. Jika di slot bagian primer ditempatkan kumparan, fluks magnet melingkari di sekitar kumparan. Slot yang bernomor 1, misalnya, dapat diperkirakan bahwa gaya cogging dalam slot ini memiliki arah ke kiri. Sedangkan slot nomor 2 mendapatkan gaya cogging dengan arah yang ke kanan. Sistem koordinat untuk penentuan arah gaya cogging dapat dilihat pada gambar 5.21.

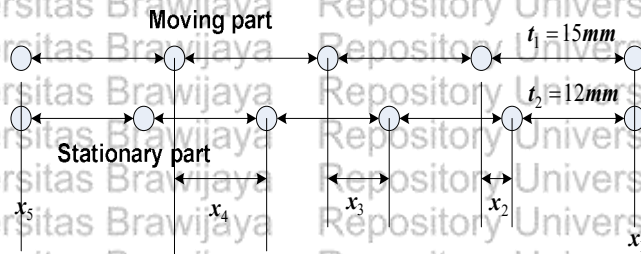


Gambar 5.21 Sistem Koordinat untuk Arah Gaya Cogging

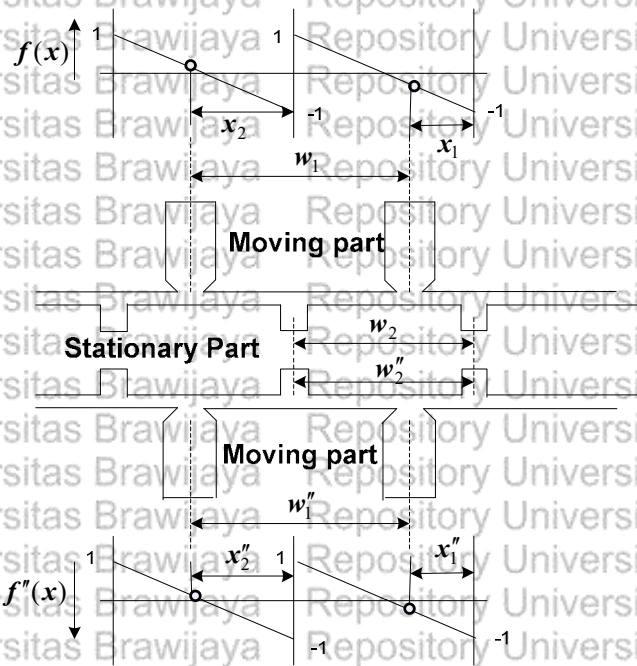
Gaya cogging dapat dikurangi sampai sekecil mungkin dengan cara satu sisi bagian primer digeser atau bagian primer motor dibuat tidak simetri. Pada motor linear primer ganda sekunder tangga dengan jumlah slot satu sisi sejumlah 9 buah, pergeseran bagian primer dibuat sebesar 8 mm. Jauh pergeseran itu dapat ditetapkan berdasarkan



selisih sot pitch bagian primer dan bagian sekunder. Sebagai contoh gambar 5.22 menunjukkan bahwa slot pitch bagian primer 15 mm dan bagian sekunder 12 mm. Variabel variabel x_1, x_2, x_3 dan x_4 adalah jarak diantara slot di bagian primer dengan slot di bagian sekunder.



Gambar 5.22 Prinsip Kancelisasi Gaya Cogging



Gambar 5.23 Sketsa Gaya Cogging Pada Motor Linear Induksi

Berdasarkan gambar 5.23, gaya cogging di satu sisi akan dikurangi oleh gaya cogging di sisi lain. Jika salah satu sisi digeser sejauh:

$$d = w_2 - x_2 \tag{5.7}$$

Dengan d adalah jarak pergeseran dari titik acuan (lihat gambar 5.21), maka jarak slot di bagian primer dan slot di bagian sekunder adalah:

$$x_2 = w_1 - w_2 \tag{5.8}$$

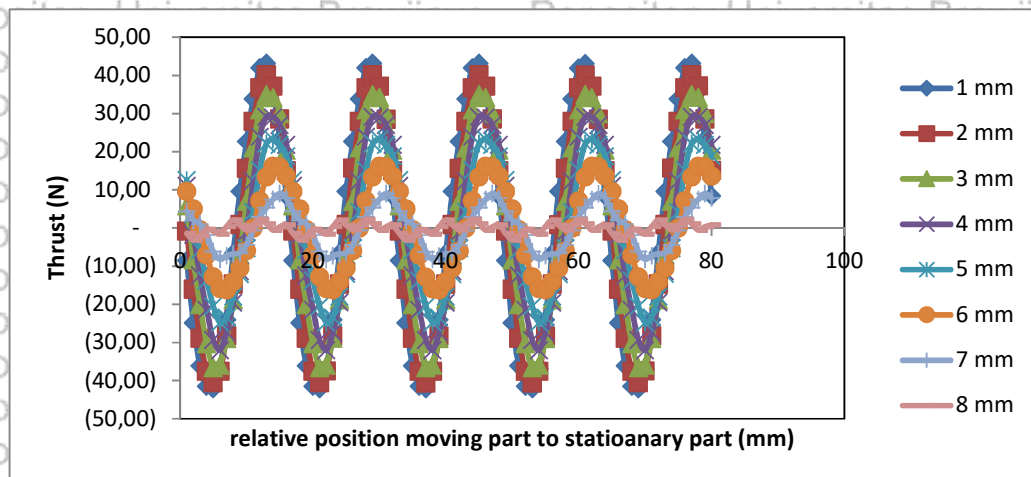


Oleh karena itu, gaya cogging akan bernilai sangat kecil apabila jarak pergeseran itu adalah:

$$d_{\max} = 2w_2 - w_1 \quad (5.9)$$

Motor linear induksi primer ganda sekunder tangga di disertai ini memiliki slot pitch sebesar 20 mm pada bagian primer dan 14 mm pada bagian sekunder, maka gaya cogging akan minimal jika pergeseran sejauh 8 mm.

Pengukuran gaya cogging dalam model ini dilakukan dengan menggunakan opsi multi-statis. Tangga stasioner dibuat dalam kondisi sirkuit terbuka, sehingga tidak ada arus listrik yang mengalir di dalamnya. Setelah kumparan disuplai oleh arus listrik, bagian yang bergerak digerakkan dalam langkah 1 mm ke arah positif. Karena tidak ada arus yang mengalir di tangga, di sekunder terjadi gaya-gaya elektromagnetik (gaya atraktif dan mengusir). Gaya elektromagnetik yang memiliki arah tangensial dalam model ini gaya magnet bervariasi naik dan turun yang disebut aksi cogging (Gambar 5.24).

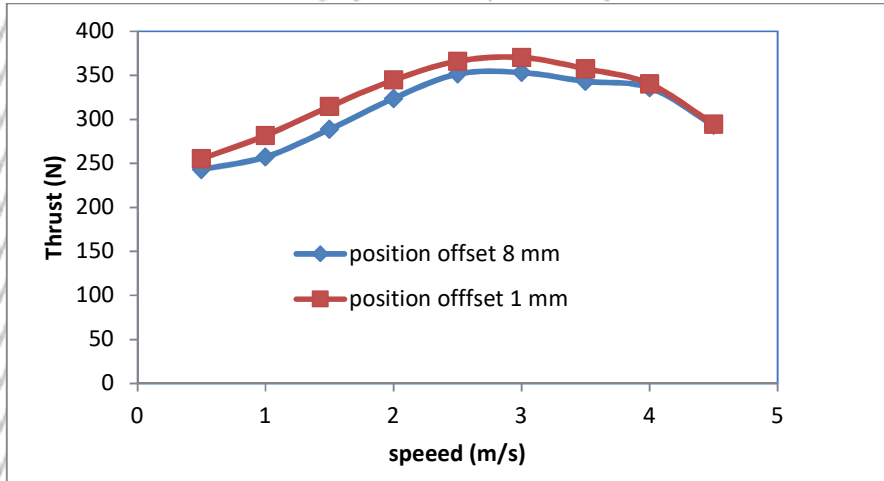


Gambar 5.24 Pengurangan Gaya Cogging untuk Pergeseran Primer

Gaya dorong di simulasi FEM dapat diperoleh dengan memberikan pada motor linear tegangan tiga phase. Setelah tegangan AC disubstitusikan ke model, maka arus elektrik pada simulasi akan mengalami kenaikan, karena gaya yang terbentuk belum mampu menangani beban internal motor. Arus elektrik akan menaik terus sampai gaya dapat melawan gaya-gaya lawan motor, maka motor akan menghasilkan kecepatan linear yang konstan. Sebelum kecepatan konstan gaya yang terukur dimodel merupakan gaya maksimal yang diperlukan (gaya dalam keadaan steady state). Dengan frekuensi sumber AC diubah-ubah, motor linear memiliki kecepatan gerak yang juga menyesuaikan dengan

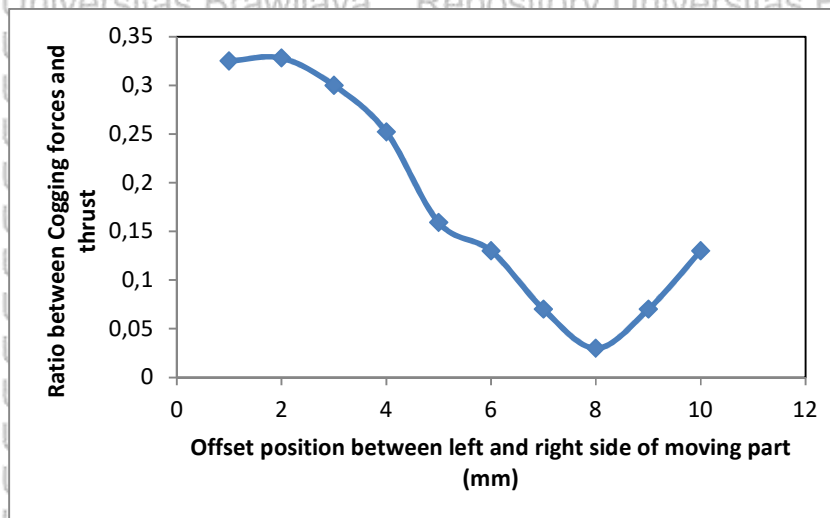


frekuensi sinyal AC. Data-data nilai pada keadaan steady state, gaya dorong dengan per-kecepatan motor linear diperoleh dan ditunjukkan pada Gambar 5.25. Berdasarkan kurva ini, dapat disimpulkan bahwa gaya dorong dalam keadaan steady state tidak berubah secara signifikan meskipun terdapat perbedaan posisi bagian primer.



Gambar 5.25 Perbandingan antara gaya dorong

Sedangkan gaya cogging dan perbedaan posisi bagian primer diukur pada software Flux Cedrat dan hasilnya ditampilkan pada gambar 5.26. Hal ini membuktikan bahwa pergeseran posisi bagian primer tidak banyak mengubah gaya dorong namun mengubah gaya cogging sangat besar. Perbedaan posisi pada bagian primer yang paling dapat menekan pengaruh gaya cogging sehingga bernilai sangat kecil adalah 8 mm.



Gambar 5.26 Perbandingan antara gaya dorong dan perbedaan posisi bagian primer dengan bagian sekunder



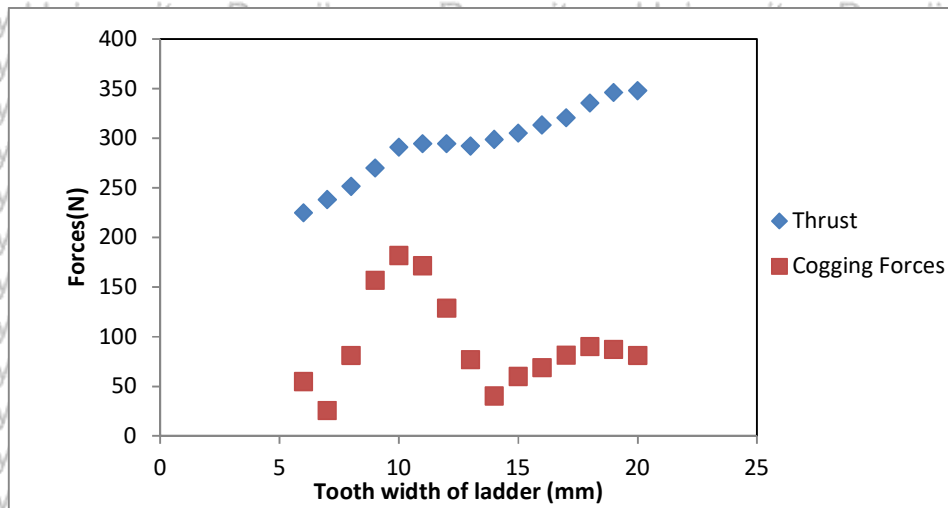
5.4.2 Pengurangan Gaya Cogging Dengan Variasi Bentuk Batang Tangga

Batang tangga trapesium diinvestigasi dengan membandingkan dengan batang tangga persegi panjang. Alasannya adalah bahwa bar tangga trapesium dapat mengurangi gaya tangensial (aksi cogging) yang dapat dijelaskan dengan konsep tegangan Maxwell. Jika medan magnet tegak lurus terhadap permukaan tubuh akan ada besarnya tegangan tarik juga tegak lurus terhadap permukaan ke medan. Jika medan sejajar dengan permukaan akan ada besarnya tekanan tekan yang mendorong permukaan keluar dari medan. Permukaan trapesium dapat mengurangi jumlah jalur medan magnet di mana tegak lurus dengan permukaan inti besi. Karena permukaan-sisi bentuk trapesium bukanlah garis lurus, tetapi garis miring.

1. Model Motor Linear Dengan Sekunder Batang Persegi Panjang

Bentuk persegi panjang tangga-model motor linear induksi primer ganda sekunder tangga diselidiki. Parameter geometrik bagian bergerak berdasarkan perkiraan MEC yang diprediksi pada bagian sebelumnya. Model ini adalah model gigi terbuka yang memiliki ladder bar persegi panjang. Ketinggian tangga adalah panjang 5 mm. Menggunakan perangkat lunak Flux, model disimulasikan. Volume tangga tidak diubah. Arus dan jumlah putaran kumparan adalah konstan. Dimensi geometris bagian yang bergerak juga konstan. Lebar gigi bagian stasioner bervariasi dalam kisaran antara 6 mm hingga 20 mm.

Gambar 5.27 menggambarkan hubungan antara variasi lebar gigi dan kekuatan cogging dan daya dorong yang berguna. Peningkatan daya dorong yang berguna berbanding lurus dengan peningkatan lebar gigi. Namun kekuatan cogging sebanding dengan rasio antara lebar gigi lapisan primer dan sekunder. Maksimum cogging akan terjadi karena rasio keduanya adalah satu atau keduanya memiliki lebar yang sama. Hal ini disebabkan oleh keengganan model Gap udara dalam ukuran ini dalam nilai yang sangat kecil ketika permukaan kedua gigi persis sepenuhnya berseberangan satu sama lain. Oleh karena itu gradien energi magnetik yang tersimpan (kekuatan cogging) di udara Gap mungkin jauh lebih besar.



Gambar 5.27 Kurva Gaya Dorong dan Gaya Cogging untuk variasi Lebar Gigi

Tabel 5.4 Rasio Antara Gaya Cogging dan Gaya Dorong

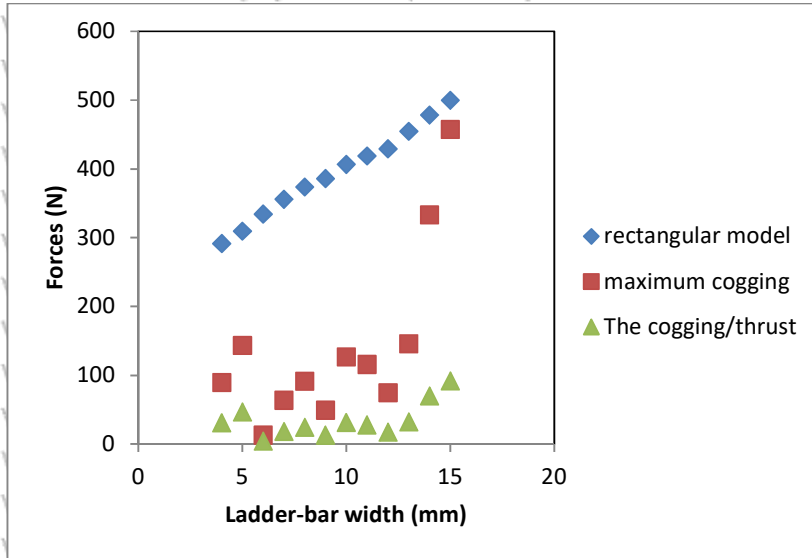
t-width (mm)	Cogging (N)	Thrust	procent. cogging (%)
4	89.4	291.36	30.6836903
5	143.28	309.28	46.3269529
6	12.92	335.12	3.86687418
7	63.68	355.76	15.8997077
8	90.92	373.72	25.3283742
9	49.2	386	12.746114
10	126.56	406.52	31.1325396
11	115.48	415.68	25.5819241
12	75.6	429	15.3892774
13	145.92	455.56	32.1013728
14	333.12	475.32	69.6437531
15	455.2	499.48	91.5351966

Tabel 5.4 dan Gambar 5.28 menunjukkan rasio gaya dorong dan gaya cogging.

Karakteristik steady state motor linear sekunder tangga dengan variasi lebar gigi dari batang di bagian sekunder menunjukkan bahwa dengan bertambahnya lebar batang, daya dorong maksimum meningkat secara signifikan. Namun dalam kondisi gaya cogging sangat kecil, daya dorong tidak berubah secara signifikan. Ini menunjukkan bahwa variasi lebar batang berkontribusi mengurangi gaya cogging dengan tetap mempertahankan gaya dorong.



Untuk model persegi panjang dengan variasi lebar ladder-bar, gaya cogging tidak dapat dikurangi hingga di bawah 10%. Nilai kekuatan cogging di bawah 10% terjadi hanya karena lebar gigi 6 mm.

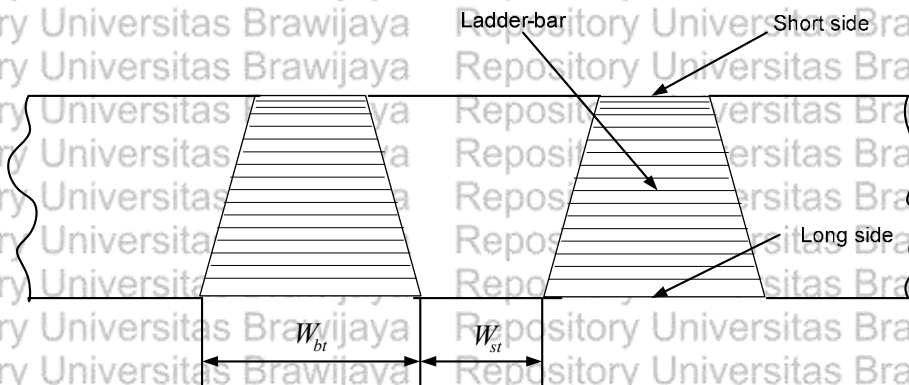


Gambar 5.28 Rasio Gaya Dorong dan Gaya Cogging

2. Trapezoidal ladder bar LIM-model

Model berikut adalah model LIM-trapesium bentuk-tangga. Bagian melintang dari tangga dibentuk dalam bentuk trapesium. Bentuk ini memiliki dua sisi dengan panjang berbeda, panjang dan pendek. Gambar 5.29 menunjukkan tangga-trapesium.

Dampak variasi sisi pendek terhadap besarnya kekuatan cogging pertama kali diselidiki.

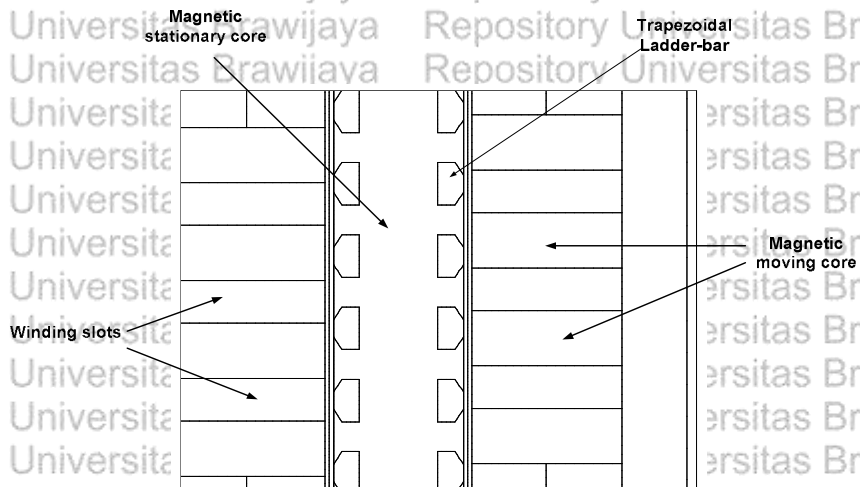


Gambar 5.29 Batang Bentuk Trapezoidal

Kemudian rasio antara sisi panjang trapesium batang di bagian sekunder dan lebar gigi di bagian sekunder bervariasi. Ketinggian batang sekunder dan slot pada bagian primer



dibuat tetap konstan. Dimensi geometris bagian yang bergerak tetap konstan. Giliran putaran Ampere juga tidak berubah. Usulan linear induksi dengan sekunder batang trapezoidal yang ditunjukkan oleh gambar 5.30. Perbedaan model ini dengan motor linear induksi dengan batang persegi panjang terletak pada bentuk batang sekundernya. Dalam model ini, batang material non-magnetik dibentuk dalam bentuk trapesium. Salah satu parameter yang memiliki dampak terhadap besarnya gaya cogging adalah sisi pendek dari batang sekunder. Dampak besar yang signifikan terhadap besarnya gaya cogging adalah rasio antara lebar ladder-bar dengan lebar inti stasioner magnetik.



Gambar 5.30 Bentuk Batang Trapezoidal pada Bagian Sekunder

Tabel 5.5 Hubungan antara lebar Gigi dengan Maksimum Gaya

tooth width (mm)	Max thrust (N)	critical slip
4	405.63598	0.45
5	422.07696	0.42
6	435.90008	0.45
7	466.78204	0.42
8	479.74556	0.42
9	492.66142	0.42
10	513.01224	0.45
11	526.30938	0.42
12	535.93584	0.42
13	565.43738	0.5
14	596.60788	0.5
15	625.39452	0.5

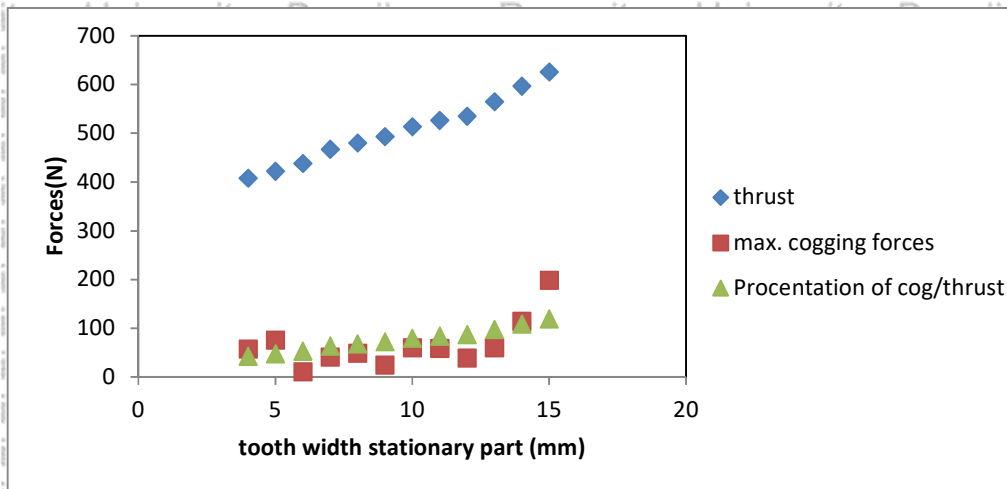


Tabel 5.5 menunjukkan daya dorong yang berguna dari model tangga-trapesium. Dibandingkan dengan model segi empat, kekuatan cogging maksimum cam mencapai persen 31,17%, namun ada tiga lebar gigi yang memiliki kekuatan cogging di bawah 10%: lebar gigi 6 mm, 7 mm, 9 mm, dan 12 mm. Ini berarti bahwa bentuk trapesium dapat mengurangi kekuatan cogging secara signifikan dan gaya dorong yang berguna tidak berubah secara signifikan.

Tabel 5.6 Rasio Antara Gaya Cogging dan Gaya Dorong

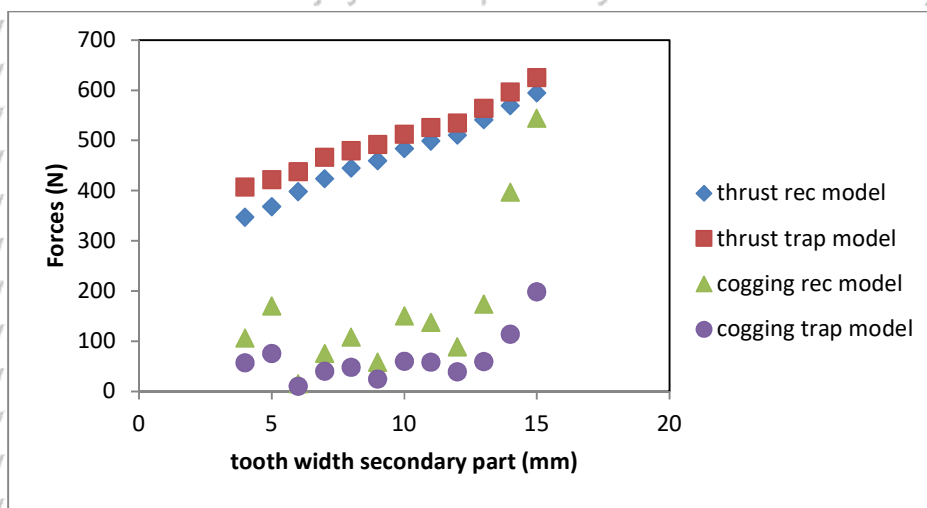
t-width (mm)	Cogging (N)	Thrust	procent. cogging (%)
4	55.192	405.636	15.0301648
5	75.731	422.077	15.9426377
6	10.389	435.900	2.37265999
7	40.701	466.782	5.71962426
8	45.374	479.745	10.08344924
9	12.296	492.661	2.49588855
10	59.908	513.012	11.67781494
11	55.621	526.309	11.13827764
12	39.033	535.935	5.29686386
13	59.479	565.437	10.53787047
14	113.955	596.607	19.10049529
15	195.694	625.394	31.77107148

Gambar 5.31 menunjukkan bahwa model ladder-bar trapesium dapat mempertahankan besarnya gaya dorong yang berguna dan mengurangi gaya cogging. Dorongan yang berguna meningkat ketika lebar gigi ladder-bar juga meningkat. Namun kekuatan cogging tidak selalu meningkat ketika lebar gigi meningkat. Hanya dalam kepastian lebar gigi rasio antara kekuatan cogging dan lebar gigi lebih kecil. Rasio terkecil antara kekuatan cogging dan daya dorong yang berguna adalah lebar gigi ladder-bar adalah panjang 6 mm.



Gambar 5.31 gaya Dorong dan Gaya Cogging pada Trapesoidal

Perbandingan gaya dorong yang berguna dan kekuatan cogging untuk kedua model, trapesium dan ladder-bar persegi panjang diselidiki. Pada setiap lebar gigi, kekuatan cogging dan daya dorong yang berguna diukur menggunakan Flux-Cedrat dan dibandingkan. Hasil perbandingan diplot ke dalam kurva yang ditunjukkan pada gambar 5.32. Semua gaya cogging yang dihasilkan di trapesium ladder-bar lebih kecil daripada di rectangular ladder-bar. Untuk setiap variasi lebar gigi, gaya dorong yang diukur menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan oleh model ladder-bar trapesium lebih besar daripada oleh ladder-bar persegi panjang.

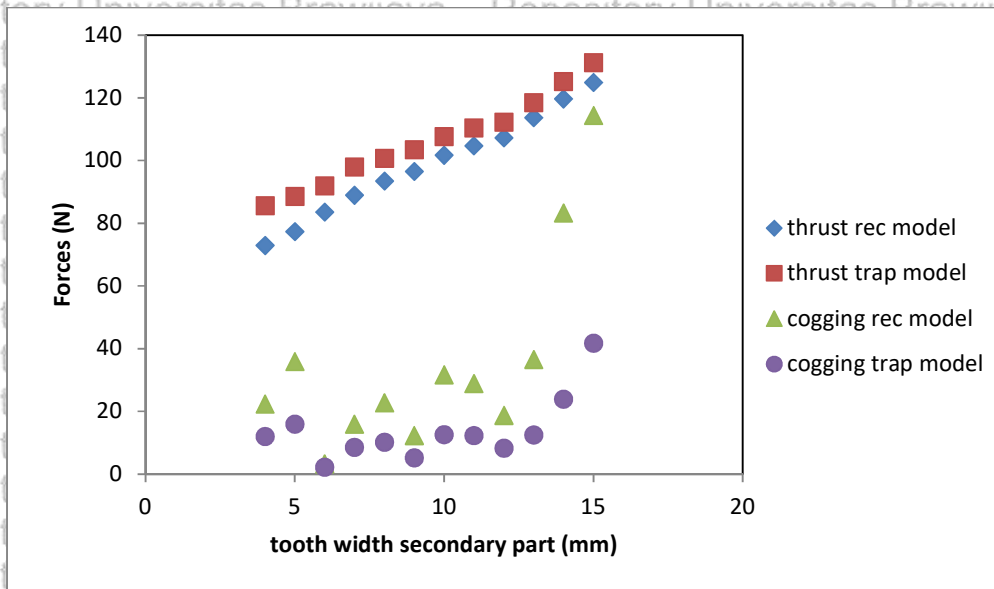


Gambar 5.32 Gaya Dorong dan Gaya Cogging bentuk Trapesoidal dan Persegi Panjang



3. Perbandingan Antara Batang Persegi dengan Trapesoidal

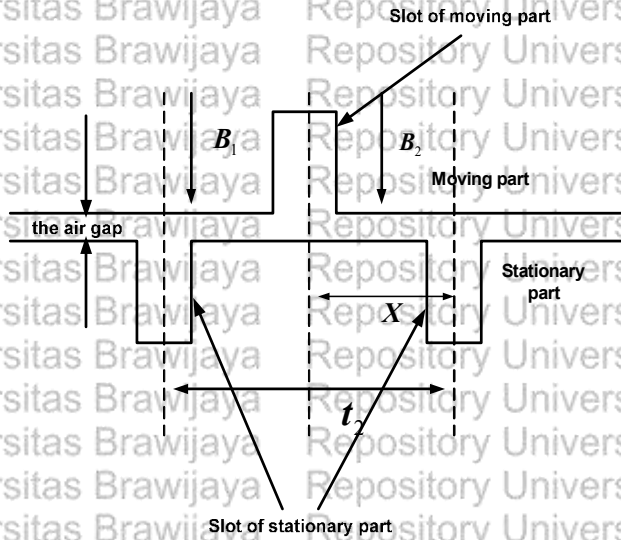
Gambar 5.33 menunjukkan perbandingan antara model Batang Persegi dan model Trapesoidal. Ini menggambarkan bahwa model Trapesoidal dapat menghasilkan gaya dorong yang berguna lebih besar dari model persegi panjang dan juga gaya cogging dapat dikurangi di bawah 10%.



Gambar 5.33 Perbandingan antara Trapesoidal dan Persegi Panjang

5.4.3 Pengurangan Gaya Cogging dengan Rasio Lebar Gigi dan Slot Motor

Alasan analitis dari keberadaan kekuatan cogging dalam motor induksi linear dijelaskan. Gaya cogging dapat direpresentasikan dengan menggunakan persamaan 1st Maxwell untuk distribusi induksi magnetik. Gambar 5.34 menunjukkan satu gigi sederhana motor induksi linier dengan tangga sekunder. Jika di slot bagian yang bergerak ditempatkan gelung, fluks magnet dilingkari di sekitar gelung.



Gambar 5.34 Diagram Kerapatan Fluks diantara Kumparan

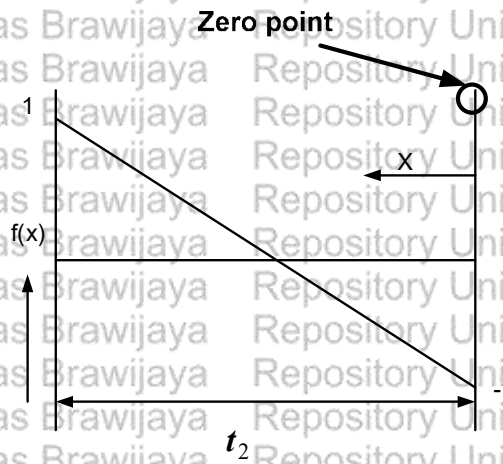
Menurut analisis 2-D, kepadatan fluks di sebelah kiri dan kanan slot ditunjukkan oleh gambar 5.35 memiliki hubungan yang menggambarkan kepadatan fluks di sebelah kiri koil dan di kanan koil.

$$B_1(t_2 - x) + B_2x = 0 \tag{5.10}$$

dengan:

B_1 : Kerapatan fluks magnet sisi slot sebelah kiri

B_2 : Kerapatan Fluks magnet sisi slot sebelah kanan



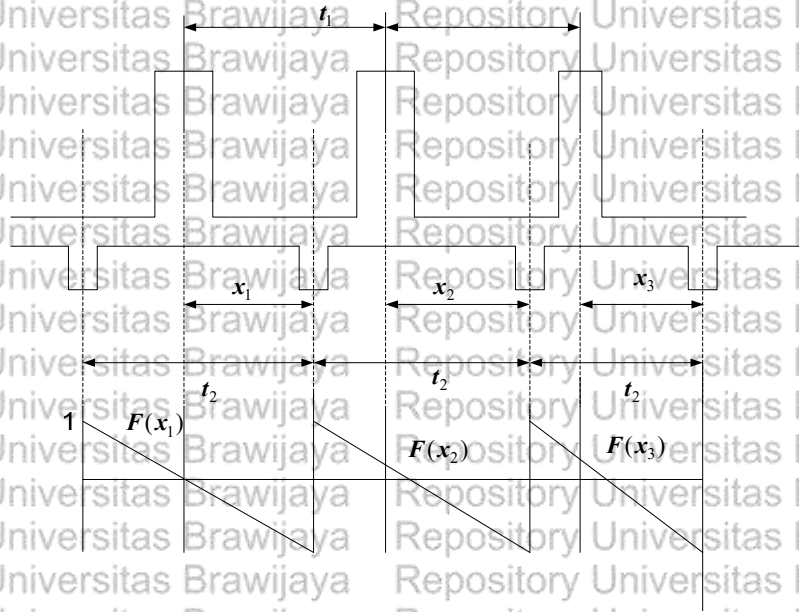
Gambar 5.35 Sketsa f(x) di Bagian Sekunder

Secara total gaya tangensial dapat diperoleh dengan menjumlahkan gaya tangensial untuk satu pitch bagian stasioner. Gambar 5.36 menunjukkan model hanya terdiri dari tiga slot pitch, oleh model ini bahwa gaya tangensial total positif, karena



pada pitch slot pertama adalah nol dan kedua slot pitch lainnya positif. Secara matematis, gaya tangensial yang dihasilkan per satuan panjang pada saat tertentu, disimpulkan atas semua slot bagian yang bergerak, memiliki amplitudo:

$$F_t = \sum_{v=1}^{z_2} \left(\frac{2x_v}{t_2} - 1 \right) \frac{\mu_0 V_f^2}{2g} \quad (5.11)$$



Gambar 5.36 Contoh plotting untuk fungsi f(x) tertentu

Penjumlahan gaya cogging akan berulang secara berkala, oleh karena itu jika menunjukkan pembagi umum Z_1 (jumlah slot bagian yang bergerak) dan (jumlah slot bagian stasioner), maka ia mengikuti:

$$\sum_{v=1}^{Z_2} \left(\frac{2x_v}{t_2} - 1 \right) = d_i \sum_{v=1}^{Z_1} \left(\frac{2x_v}{t_2} - 1 \right) \quad (5.12)$$

Menurut persamaan 5-12, karena persamaan dalam braket selalu antara -1 hingga +1, maka gaya cogging bergantung pada nilai pembagi. Gambar 5-36 menunjukkan garis-garis medan magnet pada motor induksi linear sangkar-sisi dua sisi. Jika dalam model ini arah-atas dianggap sebagai gaya tangensial positif, gigi nomor 1 di bagian atas model akan tertarik ke arah plus. Berdasarkan persamaan 5.11, jika jumlah slot adalah bilangan prima, maka pembagi akan menjadi 1, maka maksimum cogging terkecil dapat diprediksi oleh nilai pembagi. Tabel 5.7 menunjukkan bahwa pada lebar gigi 6 mm, maksimum cogging adalah minimum, karena pembagi adalah satu.



Tabel 5.7 Jumlah Slot Pada bagian Primer dan Sekunder

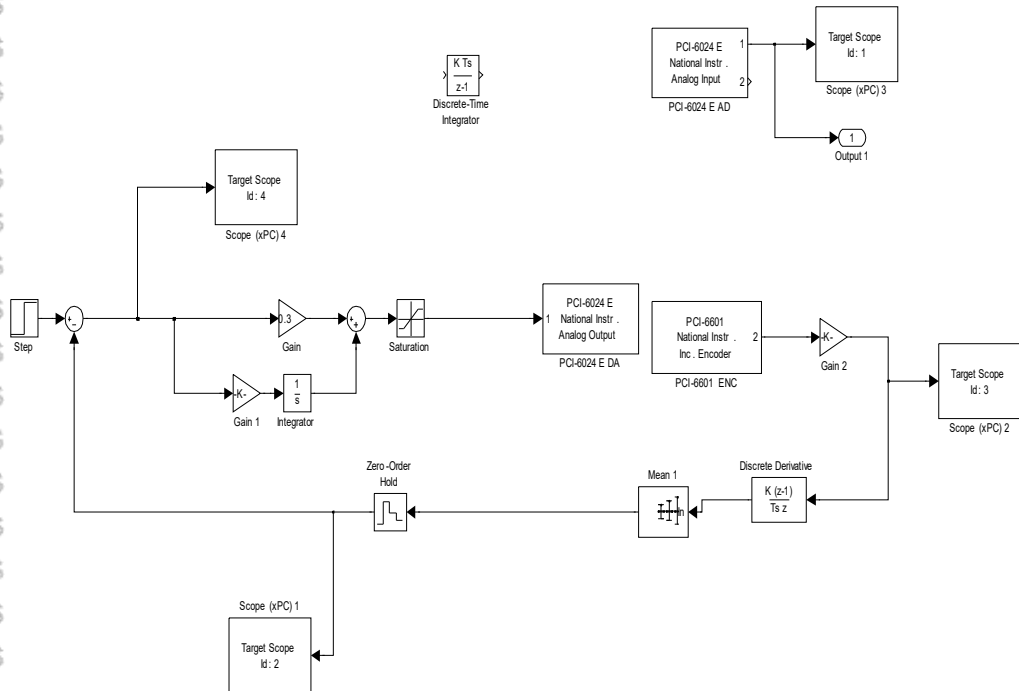
Lebar gigi (mm)	Gaya Cogging (N)	Z1	Z2
4	12	18	38
5	15.89	18	34
6	2.18	18	31
7	5.54	18	28
8	10.15	18	26
9	5.16	18	25
10	12.57	18	22
11	12.3	18	20
12	5.19	18	20
13	12.48	18	20
14	23.91	18	18
15	41.69	18	18

Z1 = Jumlah slot pada bagian primer

Z2 = Jumlah slot pada bagian sekunder

5.5 Pengukuran Gaya Cogging

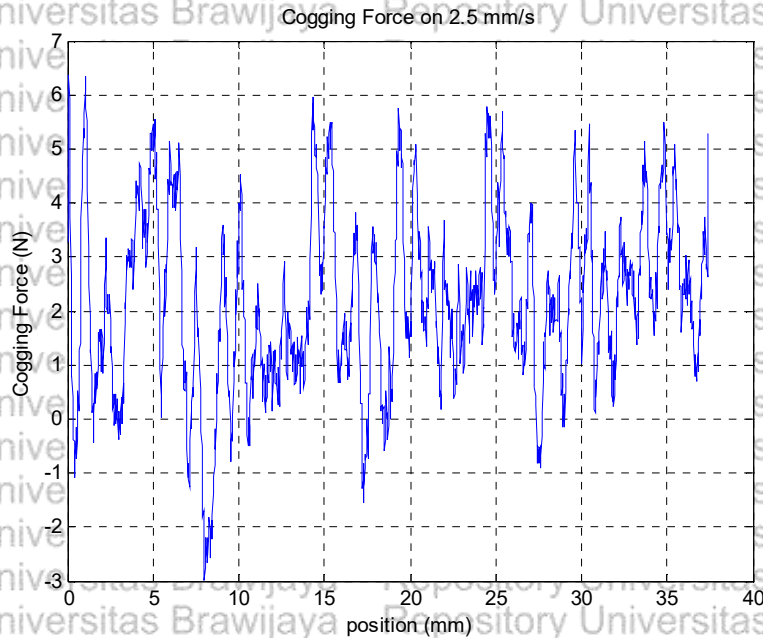
Gambar 5.37 menggambarkan skema pengukuran gaya cogging. Gaya cogging dapat diukur dengan menggerakkan motor pada kecepatan konstan dan merekam output saat ini dari penguat versus waktu.



Gambar 5.37 Skema Pengukuran Gaya Cogging

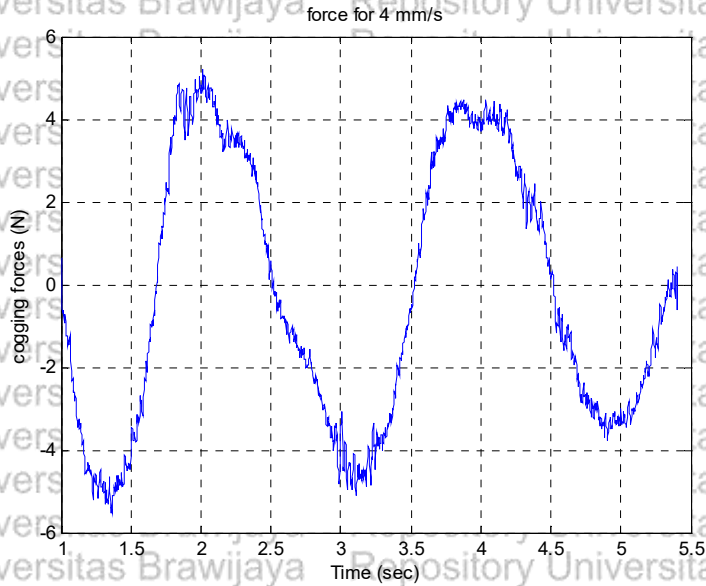


Apabila kecepatan dan gaya motor konstan diketahui maka gaya versus posisi dapat diplot. Gambar 5.38 menunjukkan plot tipikal. Plot ini dibuat menggunakan MATLAB-Simulink saat motor primer pada 2,5 mm/s, dimana gaya sekitar 35 N disebabkan oleh gesekan bantalan mekanis.



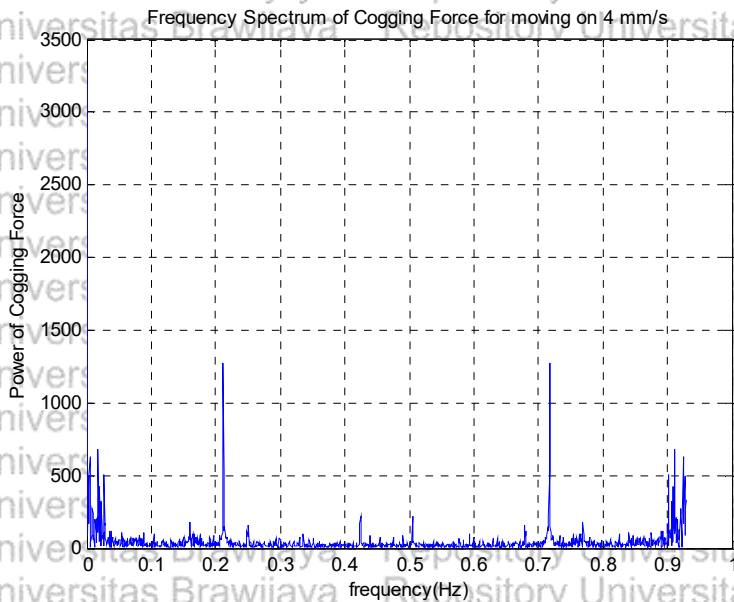
Gambar 5.38 Kurva Hasil Pengukuran Gaya Cogging

Kecepatan motor diukur dengan derivasi dari sinyal-sinyal encoder linier. Sinyal encoder disaring dan dimasukkan ke titik penjumlahan sistem kontrol. Kekuatan cogging motor dapat diperoleh dengan mengukur arus sumbu Q yang disediakan oleh pengontrol BALDOR. Keluaran pengontrol dikirim ke pengontrol Baldor melalui kartu antarmuka yang diproduksi oleh National Instruments Co. Gambar 5.39 menunjukkan kekuatan cogging yang diperoleh dari pengukuran ini ketika memindahkan bagian motor tidak bergeser. Kekuatan cogging maksimum motor adalah sekitar 7,5 N. Oleh karena itu rasio persentase antara kekuatan cogging dan dorong berguna adalah 7,0%

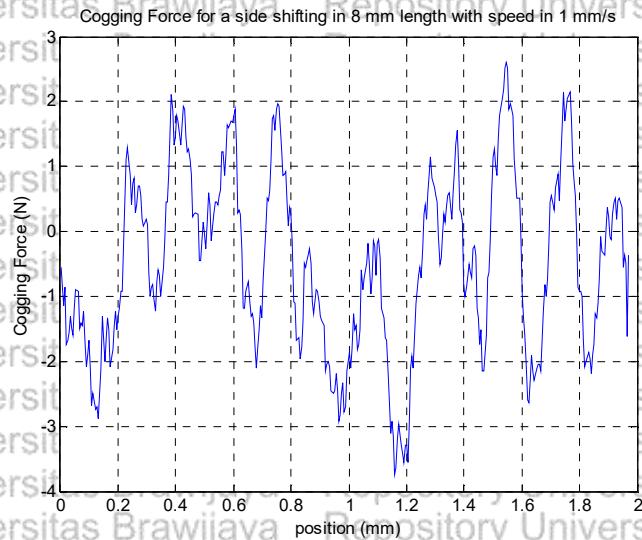


Gambar 5.39 gaya Cogging untuk gerak 4 mm/s

Gambar 5.40 menunjukkan spektrum frekuensi gaya cogging. Berdasarkan spektrum ini menggambarkan bahwa frekuensi fundamental sinyal adalah 0,2 Hz. Frekuensi ini menunjukkan bahwa periode gaya cogging adalah 20 mm yang sama dengan slot pitch motor.

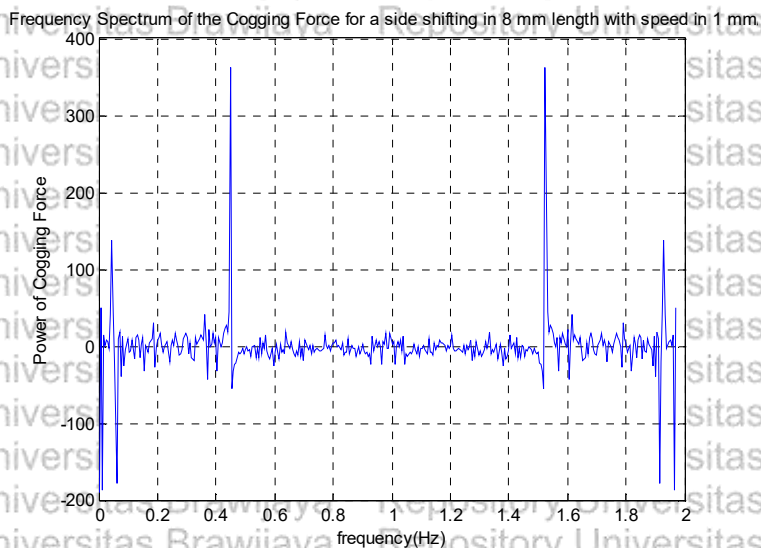


Gambar 5.40 Spektrum Frekuensi Sinyal Gaya Cogging gerak 4 mm/s



Gambar 5.41 Gaya Cogging untuk pergeseran 8 mm

Gambar 5.41 dan 5.42 menunjukkan gaya cogging dan spectrum gaya cogging yang diukur ketika memindahkan bagian motor dengan panjang selisif offset posisi bagian primer adalah 8 mm. Gaya cogging maksimum adalah 2,1 N. Jika dibandingkan dengan daya dorong yang berguna dari motor, rasio persentase daya cogging terhadap daya dorong yang berguna adalah 1%. Ini berarti pergeseran sisi bagian yang primer dapat mengurangi gaya cogging maksimum secara signifikan.



Gambar 5.42 Spektrum Gaya Cogging untuk Pergeseran 8 mm