

# ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก

ELECTRICAL MACHINE SET FOR REPLACEMENT  
OF PNEUMATIC SYSTEM



ใช้เป็นส่วหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-028-4

ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก

ELECTRICAL MACHINE SET FOR REPLACEMENT  
OF PNEUMATIC SYSTEM



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 44055  
วัน, เดือน, ปี..... 25 ต.ค. 2545

b..... 5911  
i..... 19226415

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
พ.ศ.2545

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ISBN 974-324-028-4

**ELECTRICAL MACHINE SET FOR REPLACEMENT  
OF PNEUMATIC SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น  
หากมีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย  
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974-324-028-4**



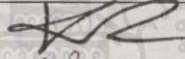
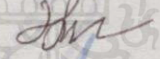

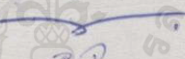
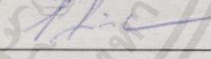
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
COPYRIGHT 2002 ห้ามทำมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก  
ELECTRICAL MACHINE SET FOR REPLACEMENT OF  
PNEUMATIC SYSTEM  
ชื่อนักศึกษา นายสาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์  
รหัสประจำตัว 42061124  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิตติเรศ	
ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	
ผศ.นิตินันท์	กฤษณจินดา	
ผศ.ประภาส	ไพรสุวรรณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 1 สิงหาคม 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)



วันที่.....๒.....เดือน.....กรกฎาคม.....พ.ศ. ๒๕๔๕.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก
นักศึกษา	นายสาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
รหัสประจำตัว	42061124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

### บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอถึงการออกแบบสร้างชุดมอเตอร์ที่เพลสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งลักษณะเชิงเส้นและลักษณะหมุนรอบตัวเอง โดยในส่วนของที่ทำให้เพลเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นนั้นจะเป็น โครงสร้างของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส แบบแกนกระบอก ซึ่งควบคุมให้เพลส่วนที่ใช้งานเคลื่อนที่ตามแนวเชิงเส้น เช่น ซ้าย-ขวา หรือ ขึ้น-ลง ขึ้นอยู่กับการใช้งาน และในส่วนที่ทำให้เพลหมุนรอบตัวเองจะเป็น โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมให้เพลส่วนที่ใช้งานหมุนรอบตัวเอง โดยกำหนดมุมหรือตำแหน่งในการหมุนได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ทั้งนี้เงื่อนไขในการทำงานคือควรให้เพลที่ใช้งานนั้นเคลื่อนที่ได้ครั้งละลักษณะ เช่น เคลื่อนที่ตามแนวเชิงเส้นเสร็จแล้วจึงจะหมุนรอบตัวเองได้ ประโยชน์ของชุดมอเตอร์ชนิดนี้คือใช้ทดแทนแขนกลซึ่งทำงานด้วยระบบนิวแมติก รวมทั้งงานในลักษณะอื่นๆตามแต่การนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Electrical Machine Set for Replacement of Pneumatic System
<b>Student</b>	Mr. Sakhon Woothipatanapan
<b>Student ID.</b>	42061124
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof. Prapas Prisuwana

### ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of the motor-set which its shaft can move both linear axis and rotary. The linear movement part is the structure of 3-phase tubular linear induction motor. It controls the shaft in linear movement such as left-right or up-down depending on the work. The rotary part is the structure of stepping motor which controls the shaft in rotating movement. Depending up on the design, the angle or the position of rotating can be determined. The condition of operating is the shaft may be moved each type of movement in each time. Such as the shaft have to finish its linear movement, then the shaft can start its rotary movment. The use of this motor-set is compensated of the robot-arm which works in pneumatic systems. Furthermore it can be applied to use in other types of work.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาในด้านต่างๆทุกหัวข้อ  
เนื่องจาก ผศ. ประภาส ไพรสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใน  
ความอนุเคราะห์จากท่าน และขอแสดงความขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ในแผนกไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระ  
นครเหนือ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ , อุปกรณ์ในการทำวิจัย และช่วยตรวจเทียบเพื่อ  
แก้ไขข้อบกพร่องในส่วนต่างๆจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณ ชิติ พลอยทองดี , คุณ สมศักดิ์ แก้ววรรณ และ คุณ สุเมธ กงสุทธิ์ ที่ให้ความ  
ช่วยเหลือในด้านการจัดทำภาพประกอบ และ การสืบหาวัสดุในการจัดทำชิ้นงาน

ขอขอบคุณ บริษัท FESTO (THAILAND) ที่อนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับระบบนิวแมติก

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัยพัฒน์พันธุ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญภาพ .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 มอเตอร์เชิงเส้น .....	4
2.1.1 ข้อแตกต่างของมอเตอร์เชิงเส้นและมอเตอร์แบบหมุน .....	4
2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น .....	6
2.1.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น .....	9
2.1.4 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น .....	12
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	15
2.2.1 โครงสร้างส่วนปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	15
2.2.2 โครงสร้างส่วนทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	17
2.2.3 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	19
2.3 สเต็ปป์มอเตอร์ .....	21
2.3.1 หลักการของสเต็ปป์มอเตอร์ .....	21
2.3.2 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ .....	22
2.3.3 การควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ .....	27

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การต่อวงจรเรียงลำดับเฟสกับวงจรกำลัง .....	30
2.3.5 ปัญหาของวงจรขับเคลื่อน .....	31
2.3.6 การลดแรงดันเพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์ที่ขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์ .....	31
2.3.7 วงจรที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์ .....	33
2.4 ระบบนิวแมติก .....	35
2.1.1 อุปกรณ์ทั่วไปในระบบนิวแมติก .....	36
2.4.2 อุปกรณ์ทำงานของระบบนิวแมติก .....	38
2.4.3 การเลือกขนาดกระบอกสูบ .....	45
2.4.4 การหาแรงของกระบอกสูบลมด้วยการคำนวณ .....	45
2.4.5 การหาแรงของกระบอกสูบลมจากตาราง .....	47
บทที่ 3 การออกแบบสร้าง .....	49
3.1 แนวคิดในการออกแบบ .....	49
3.2 การออกแบบสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	50
3.2.1 โครงสร้างของส่วนอยู่กับที่(Stator) .....	55
3.2.2 โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่(Rotor) .....	57
3.2.3 วงจรควบคุมและวงจรกำลัง .....	57
3.3 โครงสร้างในส่วนของสแตเตอร์ .....	60
3.4 โครงสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก .....	62
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	63
4.1 การทดลองในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	63
4.1.1 การวัดระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น แบบแกนกระบอก .....	64
4.1.2 การวัดกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	65
4.1.3 การวัดมุมระหว่างแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิง เส้นแบบแกนกระบอก .....	66
4.1.4 การหาค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น แบบแกนกระบอก .....	67

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.5 ผลทั้งหมดที่ได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	70
4.2 การทดลองในส่วนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ .....	76
4.2.1 ค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรงของสเต็ปิ่งมอเตอร์ .....	77
4.2.2 การหาค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณของสเต็ปิ่งมอเตอร์ .....	78
4.2.3 ผลทั้งหมดที่ได้ของสเต็ปิ่งมอเตอร์ .....	79
บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับระบบนิวแมติก .....	81
5.1 การเปรียบเทียบผลทางด้านแรงที่ได้เพื่อนำไปใช้งาน .....	81
5.2 การเปรียบเทียบผลทางด้านสมรรถนะทั่วไป .....	83
5.3 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นและในระยะยาว .....	85
5.3.1 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้น .....	85
5.3.2 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในระยะยาว .....	88
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	93
6.1 สรุปผลทางด้านอินพุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	93
6.2 สรุปผลทางด้านเอาต์พุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	93
6.3 สรุปผลทางด้านสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	94
6.4 สรุปผลในส่วนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ .....	95
6.5 ข้อเสนอแนะ .....	95
เอกสารอ้างอิง .....	97
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบนิวแมติกที่นำมาเปรียบเทียบ .....	98
ภาคผนวก ข. ข้อมูลอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง .....	109
ประวัติผู้เขียน .....	114

ประวัติผู้เขียน ที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงแก่กรณีเฉพาะนั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์อื่น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบระบบที่ทำงานด้วยไฟฟ้าและนิวแมติก .....	2
2.1 แสดงความสามารถของเครื่องอัดลมขนาดต่างๆ .....	37
2.2 ความสัมพันธ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของกระบอกสูบลม.....	45
2.3 ตารางสำหรับการหาค่าแรงสุทธิสำหรับกระบอกสูบลม .....	47
2.4 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบตามมาตรฐาน JIS (mm.) .....	48
2.5 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบตามมาตรฐาน DIN (mm.) .....	48
4.1 แสดงค่ากระแสและเพาเวอร์แฟคเตอร์แต่ละเฟสในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น แบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	70
4.2 แสดงค่ากำลังงานด้านเข้าในแต่ละเฟสและกำลังงานรวมด้านเข้าทั้งหมดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	71
4.3 แสดงค่า ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ , อัตราเร็วในการเคลื่อนที่; สลิป , แรงที่ได้จากการ เคลื่อนที่ และ กำลังงานด้านออก ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่ สร้างขึ้น .....	72
4.4 แสดงค่า ประสิทธิภาพด้านกำลังงาน , อัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วน ที่เคลื่อนที่ และ อัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อกำลังงานด้านเข้า ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	74
4.5 แสดงค่า กระแส , ระยะเวลาในการดูดไหลค ,แรง และ แรงบิด ของสตีปิ้งมอเตอร์ เมื่อดูดไหลคที่มวลต่างๆกัน .....	79
5.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และระบบนิวแมติก .....	83
5.2 แสดงรายการวัสดุอุปกรณ์และราคา ของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้าง .....	85
5.3 แสดงรายการวัสดุอุปกรณ์และราคาของระบบนิวแมติก .....	87
5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก กับระบบนิวแมติก เมื่อใช้งานในลักษณะเดียวกัน .....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์แบบหมุนเมื่อผ่าออกตามแนวเส้นประ .....	5
2.2 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบราบสองด้าน .....	5
2.3 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบราบด้านเดียว .....	5
2.4 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	5
2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศของมอเตอร์เชิงเส้น .....	7
2.6 แสดงทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำของมอเตอร์เชิงเส้น .....	7
2.7 แสดงทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อมองจากด้านบนของมอเตอร์เชิงเส้น .....	8
2.8 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อเกิดผลกระทบจากส่วนปลาย .....	9
2.9 แสดงทางเดินของกระแสที่เกิดขึ้นบนตัวนำทุติยภูมิเมื่อเกิดผลกระทบจากส่วนปลาย .....	9
2.10 ลักษณะเส้นทางของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อเกิดผลกระทบจากขอบด้านข้าง .....	10
2.11 ผลลัพธ์ของการกระจายสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศในแนวขวาง .....	10
2.12 การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิเมื่อช่องอากาศมีค่ามาก .....	11
2.13 ผลกระทบเชิงผิวที่เพลาทางด้านทุติยภูมิซึ่งมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ่อนอยู่ด้านหลัง .....	11
2.14 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น .....	13
2.15 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่พิจารณาตามเงื่อนไขแล้ว.....	13
2.16 ชุดขดลวดด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแบนราบ .....	16
2.17 โครงสร้างด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	16
2.18 ส่วนทุติยภูมิชนิดอยู่ภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	17
2.19 ส่วนทุติยภูมิชนิดอยู่ภายนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	17
2.20 ส่วนทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดที่มีวงแหวนทองแดงสลับกับแผ่นเหล็ก วงแหวนตามขวาง .....	18
2.21 โครงสร้างของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอกเมื่อมองจากทางด้านหน้าและด้านข้าง .....	18
2.22 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก .....	19
2.23 ส่วนของการควบคุมสำหรับการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ .....	21
2.24 แสดงแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดทอร์กเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล .....	22
2.25 โครงสร้างของสแต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร 4 เฟส .....	23
2.26 ภาพตัด โครงสร้างและการพันขดลวดของ VRSM ชนิด 3 เฟส .....	23
2.27 ตำแหน่งการเหนี่ยวนำที่สมดุลเมื่อกระตุ้นที่เฟส 1 .....	24
2.28 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด .....	24

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.29 ตำแหน่งการหมุนเมื่อกระตุ้นจากเฟส 1 ไปยัง เฟส 2 .....	24
2.30 ลำดับการเคลื่อนที่ของ VRSM เมื่อกระตุ้นครบทั้ง 3 เฟส .....	25
2.31 โครงสร้างภายในของ HSM และการวางขดลวด .....	26
2.32 โครงสร้างโรเตอร์ของ HSM .....	26
2.33 ลักษณะซีฟีนของ HSM บางชนิด .....	26
2.34 แสดงไดอะแกรมทั่วไปในการควบคุมสตีปีงมอเตอร์(กรณีเป็นชนิด3เฟส) .....	27
2.35 รูปแบบสัญญาณแบบ One-Excitation (กรณีเป็นสตีปีงมอเตอร์แบบ3เฟส) .....	28
2.36 รูปแบบสัญญาณแบบ Two Excitation (กรณีเป็นสตีปีงมอเตอร์แบบ3เฟส) .....	28
2.37 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อส่งสัญญาณควบคุมแบบ Two Excitation .....	29
2.38 แสดงความแตกต่างในช่วงทรานเซียนท์ของการส่งสัญญาณควบคุมทั้ง 2 แบบ .....	29
(a) คือ การส่งสัญญาณควบคุม แบบ One Excitation	
(b) คือ การส่งสัญญาณควบคุม แบบ Two Excitation	
2.39 รูปแบบสัญญาณชนิด One-Two Excitation (กรณีเป็นสตีปีงมอเตอร์แบบ3เฟส) .....	29
2.40 ตัวอย่างของการเชื่อมต่อระหว่างจอร์เรียมลำดับเฟสกับวงจรกำลัง .....	30
2.41 แสดงวงจรเทียบเคียงของขดลวดภายในสตีปีงมอเตอร์ .....	31
2.42 แสดงการใช้ Diode Suppressor .....	32
2.43 แสดงการใช้ Diode-Resistor Suppressor .....	32
2.44 แสดงการใช้ Zener Diode Suppressor .....	33
2.45 เปรียบเทียบการ Suppressor ด้วยวิธีต่างๆ .....	33
2.46 ตัวอย่างวงจรขับแบบขั้วเดียวที่ใช้กับสตีปีงมอเตอร์ชนิด 4 เฟส ซึ่งมีการต่อ Zener Diode Suppressor .....	34
2.47 ตัวอย่างวงจรขับแบบสองขั้วที่ใช้กับสตีปีงมอเตอร์ชนิด 4 เฟส .....	35
2.48 อุปกรณ์ในแต่ละขั้นตอนของระบบนิวแมติก .....	36
2.49 ลักษณะโครงสร้างของกระบอกสูบลม .....	38
2.50 ลักษณะของกระบอกสูบแบบทำงานทางเดียว .....	39
2.51 ลักษณะของกระบอกสูบแบบทำงานสองทาง .....	39
2.52 ลักษณะของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทางแบบมีก้านสูบสองข้าง .....	39
2.53 ลักษณะของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทางแบบสองคอน .....	40

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.54 ลักษณะและการนำไปใช้งานของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทางแบบมีเบรกก้านสูบ .....	40
2.55 ลักษณะของกระบอกสูบชนิดช่วงชักหลายตำแหน่ง .....	41
2.56 ลักษณะของกระบอกสูบแบบกระแทก .....	41
2.57 ลักษณะและการนำไปใช้งานของกระบอกสูบแบบก้านสูบอยู่กับที่ .....	41
2.58 กระบอกสูบลักษณะพิเศษเฉพาะงาน .....	42
2.59 ลักษณะงานที่ใช้มอเตอร์ลมในการทำงาน .....	42
2.60 เส้นโค้งแสดงสมรรถนะของมอเตอร์ลม .....	43
2.61 ลักษณะมอเตอร์ลมแบบลูกสูบ .....	44
2.62 โครงสร้างมอเตอร์ลมลักษณะแผ่นวน .....	44
2.63 แผนภูมิการหาแรงดันสุทธิของกระบอกสูบลม .....	47
2.64 แผนภูมิการหาขนาดกระบอกสูบลมตามอัตราการทำงาน .....	48
3.1 การเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัวเองเป็นแบบเชิงเส้น .....	49
3.2 ขั้นตอนต่างๆของระบบนิวแมติกตั้งแต่อินพุตจนถึงเอาต์พุต .....	50
3.3 โครงร่างในการออกแบบชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก .....	50
3.4 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่ใช้ในการออกแบบ .....	52
3.5 การประกอบแผนเหล็กلامิเนทเพื่อให้เกิดเป็นร่องสลีต .....	55
3.6 การประกอบโครงสร้างของส่วนที่อยู่กับที่ .....	55
3.7 ชุดลิเนียร์เบร้งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	56
3.8 ลักษณะการต่อขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	56
3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่ใส่ขดลวดแล้วมองจากด้านข้าง .....	57
3.10 แสดงส่วนเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	57
3.11 วงจรกำลังที่ใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	58
3.12 วงจรควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	58
3.13 อุปกรณ์ในกล่องควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	59
3.14 แสดงชุด Holder ที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น .....	59
3.15 โครงสร้างของไฮบริดสเต็ปปีงมอเตอร์ 4 เฟส แบบหลายสเตค .....	60
3.16 วงจรควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้งาน .....	60
3.17 แสดงอุปกรณ์ในกล่องควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ .....	61

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.18 แสดงโครงสร้างชุดรอบรับสแต็ปปีงมอเตอร์ .....	61
3.19 โครงสร้างทั้งหมดของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกที่สร้างขึ้น .....	62
3.20 ภาพถ่ายมุมมองของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกที่สร้างขึ้น .....	62
4.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ ของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น .....	63
4.2 วิธีการวัดคาบเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น .....	64
4.3 ตัวอย่างที่ได้จากการวัดคาบเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น .....	64
4.4 แสดงการวัดค่ากระแสด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป .....	65
4.5 แสดงค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานเพื่อนำไปหาค่ากระแส(เฟสA ที่ 110 V.) .....	65
4.6 แสดงค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานเพื่อนำไปหาค่ากระแส(เฟสA ที่ 220 V.) .....	66
4.7 แสดงการวัดมุมระหว่างแรงดันและกระแสด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป .....	66
4.8 ตัวอย่างการแสดงผลเพื่อหาค่ามุมระหว่างสัญญาณกระแสและแรงดัน .....	67
4.9 แสดงระยะทางในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนระบอที่สร้างขึ้น .....	68
4.10 แสดงโครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ทั้งหมดซึ่งมีมวลรวม 6.3 Kg .....	69
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตในแต่ละเฟสกับแรงดันอินพุต.....	70
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพาเวอร์แฟคเตอร์ในแต่ละเฟส กับ แรงดันอินพุต .....	71
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานรวมอินพุตกับแรงดันอินพุต .....	72
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต .....	73
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสลิปกับแรงดันอินพุต .....	73
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ได้จากการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต .....	73
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาท์พุตกับแรงดันอินพุต .....	74
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพด้านกำลังงานกับแรงดันอินพุต .....	75
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต .....	75
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของแรงต่อกำลังงานอินพุต กับแรงดันอินพุต .....	76
4.21 การทดลองสแต็ปปีงมอเตอร์ในลักษณะหมุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้จุดโหลด .....	76
4.22 วิธีการวัดระยะเวลาในการจุดโหลดของสแต็ปปีงมอเตอร์โดยใช้ออสซิลโลสโคป .....	77
4.23 ตัวอย่างค่าคาบเวลาของสแต็ปปีงมอเตอร์ที่วัดได้เมื่อจุดโหลดหนัก 2.4 kg. ....	77

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.24 การตรวจวัดกระแสของสตีปิ้งมอเตอร์ .....	78
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของสตีปิ้งมอเตอร์กับมวลของโหลด .....	80
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของสตีปิ้งมอเตอร์กับมวลของโหลด .....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการทำงานของระบบนิวแมติก เราจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่จากการหมุนของมอเตอร์แบบหมุน(Rotary) ให้เป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้น โดยต้องผ่านกระบวนการมาหลายขั้นตอน ซึ่งทำให้ต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่ง รวมทั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ต่างๆ และการซ่อมบำรุงในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ หากทำให้พลังงานไฟฟ้าแปลงเป็นพลังงานกลซึ่งเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นได้โดยตรง จะทำให้ลดปัญหาดังกล่าวได้ระดับหนึ่ง และถ้าทำให้ชุดเครื่องกลไฟฟ้าชุดหนึ่งมีเพลาส่วนที่ใช้งานสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งลักษณะเชิงเส้นและหมุนได้ โดยสามารถควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ได้อิสระ ก็จะทำให้เกิดความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอแนวทางในการสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้า ที่ทำให้เพลาส่วนที่ใช้งานสามารถเคลื่อนที่ได้ในลักษณะเชิงเส้นและหมุน โดยควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ได้อิสระ ซึ่งจะประยุกต์ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก เพื่อให้เพลาส่วนที่ใช้งานเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้น และใช้สเต็ปป์มอเตอร์เพื่อให้เพลาส่วนที่ใช้งานเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนรอบตัวเอง โดยกำหนดตำแหน่งการหมุนได้จากชุดควบคุมและโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์เอง และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาชุดเครื่องกลไฟฟ้าลักษณะอื่นๆ เพื่อให้สามารถใช้ทดแทนระบบนิวแมติกในบางชนิดที่มีค่าใช้จ่ายสูง

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการทำงานทั่วไปที่ต้องใช้ระบบนิวแมติกนั้น กว่าจะได้กำลังงานเอาต์พุตในรูปของแรงลมเพื่อไปขับเคลื่อนงานต่างานั้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์และกระบวนการมากมาย โดยทุกขั้นตอนจะทำงานต่อเนื่องกันในลักษณะอนุกรม คือถ้าขั้นตอนใดเกิดความผิดพลาด ก็จะส่งผลต่อระบบโดยรวม และจากข้อมูลในตารางที่ 1.1 ซึ่งเปรียบเทียบระบบที่ทำงานด้วยนิวแมติกกับระบบที่ทำงานด้วยไฟฟ้า โดยรวมแล้ว จะเห็นว่าการใช้ระบบที่ทำงานด้วยไฟฟ้าโดยตรงนั้นมีข้อดีในหลายๆด้าน จึงอาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้งานทดแทนระบบนิวแมติกได้

ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าถ้าต้องการลดกระบวนการที่ยุงยากของระบบนิวแมติก แต่ได้แรงที่เอาต์พุตเท่าๆกันเพื่อไปขับเคลื่อนในลักษณะเดียวกัน โดยมีความเชื่อถือได้ของระบบที่ดีกว่า จึงเลือกที่จะสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าขึ้นมา โดยเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของมอเตอร์เชิงเส้น และสเต็ปป์

มอเตอร์มารวมเป็นชุดเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่เหมาะสมจะใช้กับงานเฉพาะด้านเท่านั้น และขึ้นอยู่กับผลการทดลองเปรียบเทียบหาข้อดี-ข้อเสียเพื่อพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบระบบที่ทำงานด้วยไฟฟ้าและนิวแมติก

รายละเอียดระบบขับเคลื่อน	ระบบ	
	ไฟฟ้า	นิวแมติก
โครงสร้าง	ค่อนข้างซับซ้อน	ง่าย
ความสามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง	ดีมาก	ดี แต่ต้องระวัง
เคลื่อนที่แบบหมุน	ง่าย	ง่าย
กำลังขับ	น้อย→มาก	ค่อนข้างยาก
การปรับกำลังขับ	ยาก	ง่าย
การบำรุงรักษา	ต้องใช้เทคโนโลยี	ง่าย(แต่มีหลายจุด)
ความเร็วคงที่	ดี	ไม่คงที่(ความดันต่ำ)
รายละเอียดระบบควบคุม	ระบบ	
	ไฟฟ้า	นิวแมติก
การส่งสัญญาณ	ง่ายมาก	ง่าย
การป้องกันการติดไฟ	ต้องใช้อุปกรณ์ช่วย	ดีมาก
ความรู้สึกไวต่อความชื้น	มาก	ต้องระบายออก
ความรู้สึกไวต่ออุณหภูมิ	มาก	น้อย
การเลือกวิธีการบังคับ	มากกว่า	มาก
การคำนวณในระบบ	มาก	ปานกลาง
การคำนวณความเร็ว	สูงมาก	ปานกลาง
การคำนวณการบังคับ	ดิจิทัลและอนาล็อก	ดิจิทัลและอนาล็อก

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีโดยทั่วไปอาศัยหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก [1 , 2 , 3] และหลักการของสเต็ปมอเตอร์[4] โดยในส่วนของแนวคิดนั้นได้มาจากปริญญาานิพนธ์เรื่อง มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง[5] ซึ่งมีความน่าสนใจ แต่ก็ยังมีจุดที่ต้องปรับปรุงอยู่หลายๆด้านเช่น ในด้านวัสดุที่ใช้ ,โครงสร้างบางส่วน และชุดควบคุม และแนวคิดจาก

เครื่องจักรกลที่เพลลาในส่วนที่ใช้งานนั้นเคลื่อนที่ได้ในลักษณะเชิงเส้นก่อน หลังจากนั้นสามารถหมุนปรับมุมได้ ดังเช่นแกนกลตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงเป็นที่มาในการออกแบบสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์เชิงเส้นและสตีปิ้งมอเตอร์ในชุดเดียวกัน

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติกกับงานเฉพาะด้าน เช่นงานที่ต้องการแรงกระแทก, มีการเคลื่อนที่ในระยะสั้น และเทียบกว่าระบบนิวแมติก แต่ไม่เน้นด้านกำลังงาน ซึ่งเพลลาส่วนที่ใช้งานจะเคลื่อนที่แนวเชิงเส้นในลักษณะกระแทกก่อน จากนั้นจึงควบคุมให้เพลลาหมุนรอบตัวเองแบบปรับมุมได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนดในชุดควบคุมสตีปิ้งมอเตอร์ รวมถึงเปรียบเทียบชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับระบบนิวแมติก ในด้าน ผลของแรงที่นำไปใช้งาน, สมรรถนะโดยรวม, ค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นและการใช้งานระยะยาว

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

รายละเอียดการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งออกเป็น 6 บท

บทที่1 บทนำ

บทที่2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีของมอเตอร์เชิงเส้น, สตีปิ้งมอเตอร์ และ หลักการของระบบนิวแมติก

บทที่3 การออกแบบสร้าง ได้แก่ มอเตอร์ส่วนที่ทำให้เพลลาเคลื่อนที่ตามแนวเชิงเส้น, มอเตอร์ส่วนที่ทำให้เพลลาหมุนรอบตัวเอง และ ชุด โครงสร้างเมื่อนำมอเตอร์ทั้งสองส่วนมารวมกัน

บทที่4 ผลการทดลอง

บทที่5 การเปรียบเทียบผลระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับระบบนิวแมติก

-ผลทางด้านแรงที่ได้เพื่อนำไปใช้งาน

-ผลทางด้านสมรรถนะทั่วไป

-ด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นและในระยะยาว

บทที่6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์เชิงเส้น

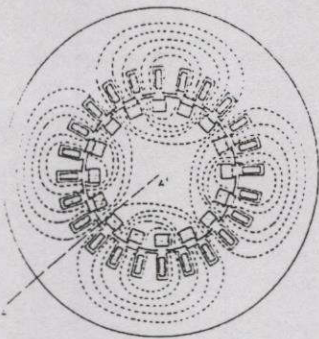
มอเตอร์เชิงเส้น [5] คือ เครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาเพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่ของมันมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง หลักการทำงานทางแม่เหล็กไฟฟ้าคล้ายคลึงกับมอเตอร์แบบหมุน แต่มีโครงสร้างและทิศทางที่ต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติของมอเตอร์เชิงเส้นนั้นค่อนข้างจะยุ่งยากกว่า เนื่องจากมอเตอร์เชิงเส้นจะเกิดผลกระทบชั่วขณะขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องตามทิศทาง การเคลื่อนที่, ผลกระทบจากส่วนปลาย(End effect), ผลกระทบจากขอบด้านข้าง(Edge effect) และผลกระทบที่ผิว(Skin effect) ซึ่งผลกระทบเหล่านี้ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมภายในช่องอากาศ(Air gap flux) มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำลง จากคุณสมบัติของมอเตอร์เชิงเส้นที่มีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ดังนั้นแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ จึงอยู่ในรูปของแรงผลักดัน(Thrust or traction force) และลักษณะเด่นประการหนึ่งของมอเตอร์เชิงเส้นคือจะมีแรงอีกชุดหนึ่งเกิดขึ้นในแนวตั้งฉาก(Normal force) ซึ่งจะไม่พบในมอเตอร์แบบหมุนเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นวงกลมสมมาตร โดยแรงในแนวตั้งฉากนี้สามารถทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่ยกตัวขึ้นซึ่งอาศัยหลักการนี้ในการทำงานของรถไฟฟ้ายกตัวเหนือรางเพื่อลดแรงเสียดทาน ทำให้ลดไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

#### 2.1.1 ข้อแตกต่างของมอเตอร์เชิงเส้นและมอเตอร์แบบหมุน

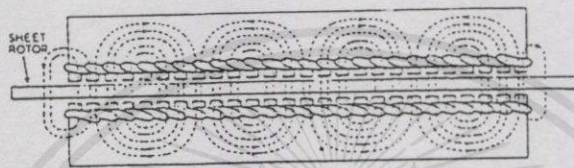
1. ส่วนที่อยู่กับที่(ด้านปฐมภูมิ) [1] เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์และข้อแตกต่าง โดยจะพิจารณาส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นเสมือนว่าเกิดจากการผ่าส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์แบบหมุน ดังภาพที่ 2.1 จากนั้นก็ทำการคลี่ออกไปตามแนวพื้นราบโดยผ่าออกมาเป็นสองส่วนแล้วคลี่ออกก็จะได้มอเตอร์เชิงเส้นแบบราบสองด้าน(Double Side flat Linear Electrical Motor : DSLEM) ดังภาพที่ 2.2 แต่ถ้าเอาส่วนที่อยู่กับที่ด้านหนึ่งออกไป ก็จะได้มอเตอร์เชิงเส้นแบบราบด้านเดียว(Single Side flat Linear Electrical Motor : SSLEM) ดังภาพที่ 2.3

นอกจากนี้เมื่อทำการผ่าและคลี่ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์แบบหมุนออกมาแล้ว ยังสามารถคิดแปลงลักษณะการต่อวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก โดยการม้วนส่วนที่อยู่กับที่นี้กลับในอีกทิศทางหนึ่ง ก็จะได้เป็นโครงสร้างของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอก(Tubular Linear Electrical Motor : TLEM) [6] ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งเป็นมอเตอร์เชิงเส้นชนิดที่จะใช้ในงานวิจัยนี้

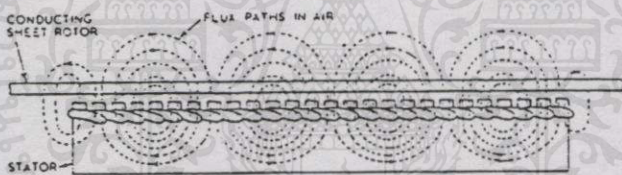
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



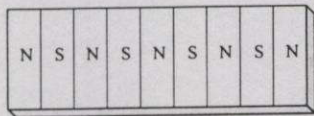
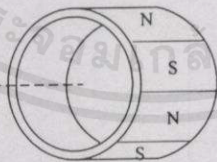
ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์แบบหมุนเมื่อผ่าออกตามแนวเส้นประ



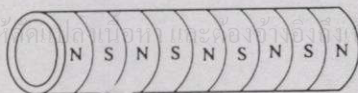
ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบราบสองด้าน



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบราบด้านเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่และต้องทำเองทั้งนี้ทางของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอก

2. ส่วนที่เคลื่อนที่(ด้านทุติยภูมิ) [1] ส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้นแตกต่างจากมอเตอร์แบบหมุนโดยสิ้นเชิง เพราะส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์แบบหมุนนั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีความกว้างมากกว่าแกนเหล็กของส่วนที่อยู่กับที่ได้ แต่มอเตอร์เชิงเส้นสามารถทำได้ และจากคุณสมบัติข้อนี้เองทำให้มอเตอร์เชิงเส้นเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ผลกระทบจากขอบแนวขวาง (Transverse edge effect) ซึ่งเป็นผลกระทบที่สำคัญและมีผลต่อพฤติกรรมของมอเตอร์เชิงเส้น

3. ช่องว่างอากาศ(Air gap) [1] มอเตอร์เชิงเส้นจะมีช่องว่างอากาศระหว่างแกนเหล็ก ของส่วนที่อยู่กับที่กับส่วนที่เคลื่อนที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบหมุน ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวที่เกิดจากโครงสร้างของมันนั่นเอง และถ้าช่องว่างอากาศยิ่งมากก็ยิ่งทำให้เกิดผลเสียต่างๆมากมาย เช่น ทำให้กระแสตอนเริ่มสตาร์ทมีค่าสูง, ทำให้แรงที่เกิดจากมอเตอร์ลดลง, เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล(Leakage flux)มากขึ้น และ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำลง

4. แรงในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่(Normal force) [1] แรงนี้จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์เชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งแรงในแนวตั้งฉากนี้อาจจะเป็นได้ทั้งแรงดูด หรือ แรงผลัก ขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ ส่วนมอเตอร์แบบหมุนนั้นแรงในแนวตั้งฉากจะหักล้างกันหมดไปตลอดเวลา เนื่องจากเกิดความสมดุลของแรงซึ่งมีผลมาจาก โครงสร้างที่เป็นวงกลมสมมาตร

### 2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

1. หลักการเคลื่อนที่ [5] การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้น สามารถอธิบายได้โดย ใช้หลักทฤษฎีเดียวกับมอเตอร์แบบหมุน คือเมื่อจ่ายไฟให้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magnetomotive force)ขึ้น ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโรนัส มีค่าดังสมการ

$$U_s = 2\tau f \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $U_s$  = ความเร็วเชิงโรนัส (m/sec)  
 $\tau$  = ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (m)  
 $f$  = ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์ (Hz)

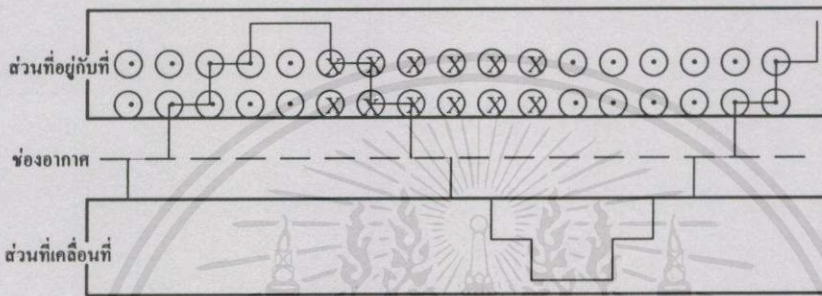
แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงโรนัสนี้ จะเคลื่อนที่ตัดตัวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induce electromotive force) ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นที่ด้านทุติยภูมิ เมื่อรวมแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิและแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านทุติยภูมิก็จะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ [5] ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$R = F1 + F2$$

(2.2)

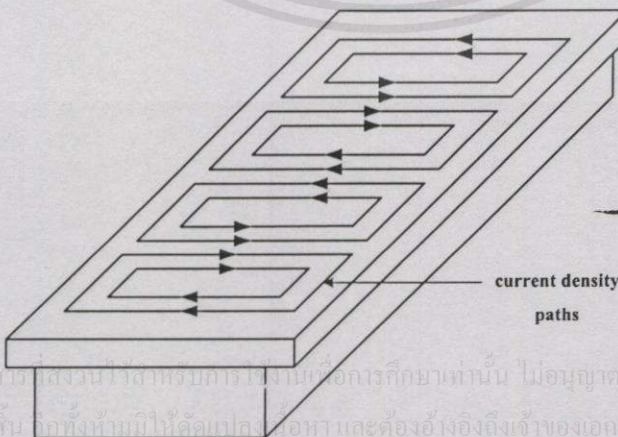
- เมื่อ  $R$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (At)  
 $F1$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ (At)  
 $F2$  = แรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ (At)

โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์นี้จะก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศดังภาพที่ 2.5



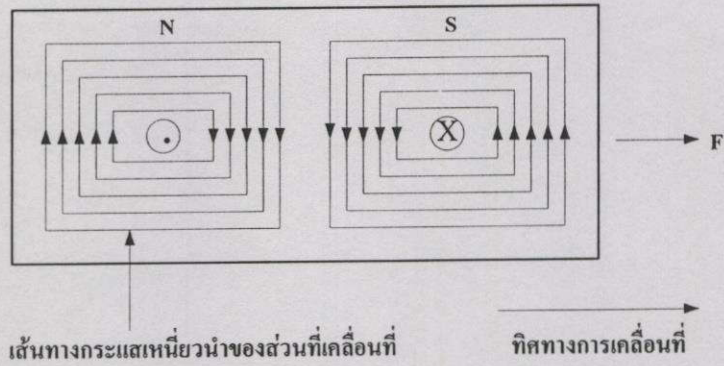
ภาพที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศของมอเตอร์เชิงเส้น

ส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้นสามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น เกิดจากการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กจากด้านปฐมภูมิตัดผ่านแผ่นทุติยภูมิทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ด้านทุติยภูมิและทำให้เกิดกระแสไหลวนตามกฎของเลนซ์ซึ่งกล่าวว่า “เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลเป็นวงปิดอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำ” [5] โดยทิศทางกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งตัดกับแผ่นโลหะตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.6 แสดงทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำของมอเตอร์เชิงเส้น



ภาพที่ 2.7 แสดงทางเดินของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อมองจากด้านบนของมอเตอร์เชิงเส้น

เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านปฐมภูมิให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวา เมื่อมองจากรูปด้านข้างจะเห็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้า-ออกจาด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนอยู่บนแผ่นทุติยภูมิซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไหลวนมีลักษณะตามเข็มนาฬิกาและตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ โดยอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็กเหนือที่มีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ และเกิดแรงกระทำต่อด้านทุติยภูมิซึ่งมีขนาดคงสมการ

$$F = BLI \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $F$  = แรงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (N)
  - $B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\text{Wb/m}^2$ )
  - $L$  = ความยาวของตัวนำ (m)
  - $I$  = กระแสเหนี่ยวนำ (A)

แรงตามสมการที่ 2.3 นี้ มีทิศทางไปตามกฎมือขวา ซึ่งเป็นทิศทางของแรงที่ทำให้แผ่นทุติยภูมิเคลื่อนที่ไปทางขวามือ ถ้าพิจารณากระแสไหลวนชุดถัดไปซึ่งมีลักษณะทวนเข็มนาฬิกา พบว่าอยู่ภายใต้อิทธิพลของแม่เหล็กขั้วใต้ที่มีทิศพุ่งเข้ากระดาษ จะเกิดขนาดของแรงที่กระทำต่อด้านทุติยภูมิเป็นไปตามสมการที่ 2.3 เช่นกัน ส่วนทิศทางก็เป็นไปตามกฎมือขวาซึ่งพบว่าเกิดแรงกระทำในทิศทางจากซ้ายไปขวาเช่นกัน ซึ่งเสริมกับทิศทางเคลื่อนที่ที่เกิดจากกระแสไหลวนชุดแรก และเป็นทิศทางเดียวกับเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนส่วนที่อยู่กับที่ [5]

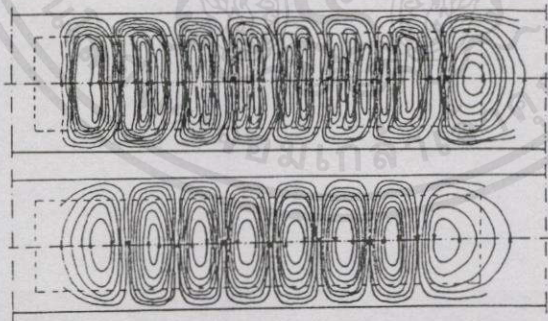
### 2.1.3 ผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

แบ่งออกเป็นผลกระทบที่สำคัญ 4 ลักษณะคือ

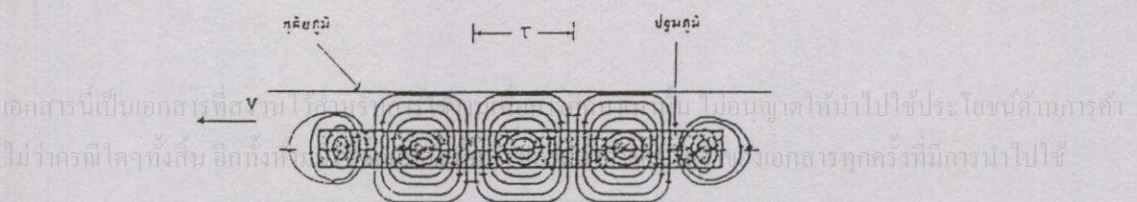
1. ผลกระทบจากส่วนปลาย [1] ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นจะเกิดผลกระทบจากส่วนปลายเป็นสองประเภทคือ

1.1 ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดอยู่กับที่(Static end effect) [1] ผลกระทบชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติการเปิดวงจรทางแม่เหล็กของมอเตอร์เชิงเส้น ซึ่งจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองต่อเฟส(self inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วมต่อเฟส(mutual inductance)ทางด้านปฐมภูมิเกิดความไม่สมมาตรขึ้น

1.2 ผลกระทบจากส่วนปลายชนิดเคลื่อนที่(Dynamic end effect) [1] ผลกระทบชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง จากกฎของเลนซ์ เมื่อตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกจากช่องอากาศทางด้านออกนั้น กระแสของตัวนำทุติยภูมิทางด้านเข้าจะพยายามต้านการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ จึงส่งผลให้เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ จะทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยในช่องอากาศของคู่ขั้วแรกที่อยู่ใกล้ทางด้านเข้ามีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคู่ขั้วถัดไป และหลังจากที่ตัวนำทุติยภูมิเคลื่อนที่ออกไปทางด้านออก ตัวนำทุติยภูมิจะมีกระแสเพิ่มขึ้นเพื่อพยายามรักษาให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ซึ่งกระแสนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อนโดยไม่มีผลในการสร้างแรง เหมือนกับทำให้เกิดค่าความต้านทานประสิทธิผลมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพและแรงสูงสุดที่มอเตอร์สร้างได้มีค่าลดลง เนื่องจากเป็นผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ดังนั้นผลกระทบชนิดนี้จะเกิดขึ้นมากกับมอเตอร์เชิงเส้นที่มีอัตราเร็วสูง

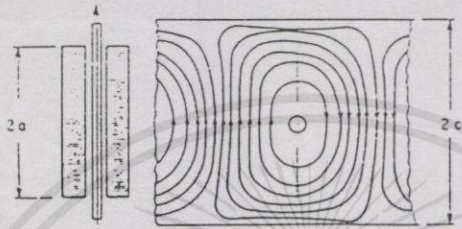


ภาพที่ 2.8 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อเกิดผลกระทบจากส่วนปลาย

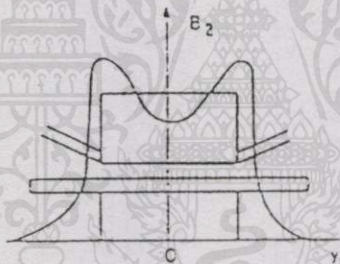


ภาพที่ 2.9 แสดงทางเดินของกระแสที่เกิดขึ้นบนตัวนำทุติยภูมิเมื่อเกิดผลกระทบจากส่วนปลาย

2. ผลกระทบจากขอบด้านข้าง [1] เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางแนวขวาง อันเนื่องมาจากตัวนำทุติยภูมิที่มีความกว้างมากกว่าด้านปฐมภูมิ ซึ่งจะพบว่าส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่ยื่นเกินออกไปจากด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไหลวนอยู่เช่นเดียวกับส่วนของตัวนำทุติยภูมิที่อยู่ภายในของปฐมภูมิ ซึ่งกระแสในส่วนที่เกินออกมานี้จะไม่มีผลต่อการสร้างแรงให้กับตัวนำทุติยภูมิ แต่กลับจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กออกมาครอบคลุมเส้นแรงแม่เหล็กภายในช่องอากาศ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.10 ลักษณะเส้นทางของกระแสเหนี่ยวนำเมื่อเกิดผลกระทบจากขอบด้านข้าง



ภาพที่ 2.11 ผลลัพธ์ของการกระจายสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศในแนวขวาง

3. ผลกระทบจาก การรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากช่องอากาศมีค่ามาก [1]

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นส่วนใหญ่จะมีข้อมูลอยู่ในช่วงนี้คือ

ช่องอากาศทางกล ( $g_m$ )	ประมาณ 2 – 5 mm.	- -
$g_m$ / pole pitch	ประมาณ 0.04 mm.	
ความหนาของด้านทุติยภูมิ ( $d$ )	ประมาณ 9 - 6 mm.	

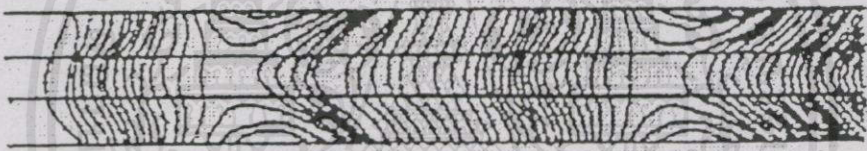
ช่องอากาศทางแม่เหล็ก ( $g'_m$ ) มีค่าเท่ากับ  $g_m$  รวมกับค่า  $d$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณไว้คร่าวๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องอากาศทางด้านทุติยภูมิจะมีลักษณะรูปร่างดัง ภาพที่ 2.12 เมื่อทางเดินของฟลักซ์ผ่านช่องอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ ภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการรั่วไหล บางส่วนขึ้นที่ช่องอากาศ ในกรณีเช่นนี้จึงต้องมีสมการสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็น ค่าคงที่เรียกว่า ค่าปรับปรุงความถูกต้อง(Correction factor:  $K_1$ ) โดยที่

$$K_1 = \frac{\sinh \left[ \frac{\pi}{\tau} g_o \right]}{\left[ \frac{\pi}{\tau} g_o \right]} \tag{2.4}$$

ดังนั้นค่าช่องอากาศที่ใช้งาน  $g_c$  จะมีค่า

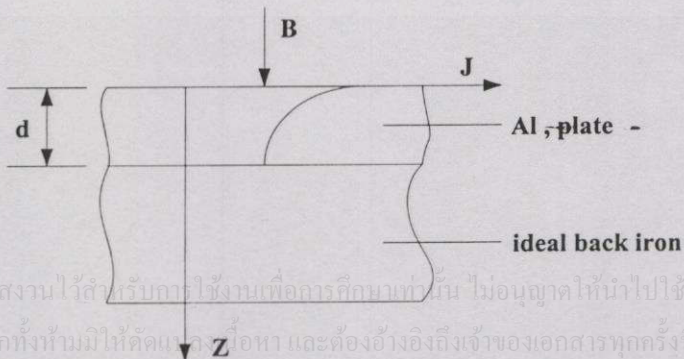
$$g_c = K_1 g_o \tag{2.5}$$



ภาพที่ 2.12 การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิเมื่อช่องอากาศมีค่ามาก

4. ผลกระทบที่ผิวเนื่องมาจากความหนาของแผ่นเพลททางด้านทุติยภูมิ [1]

การกระจายความเข้มของกระแสเหนี่ยวนำในกรณีของผลกระทบที่ผิว เมื่อแผ่นเพลททางด้าน ทุติยภูมิมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง(Solid back iron) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ผลกระทบเชิงผิวที่เพลทด้านทุติยภูมิซึ่งมีแกนเหล็กตามอุดมคติซ้อนอยู่ด้านหลัง

ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าความนำจริงของแผ่นเพลทมีค่า

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{k_{sk}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\sigma_e$  = ค่าความนำจริงของแผ่นเพลท ( mho/m)

$\sigma$  = ค่าความนำตามอุดมคติ ( mho/m)

และ  $k_{sk}$  = ค่าตัวประกอบความถูกต้องซึ่งหาได้จาก

$$k_{sk} = \frac{2d}{ds} \left[ \frac{\sinh\left(\frac{2d}{ds}\right) + \sin\left(\frac{2d}{ds}\right)}{\cosh\left(\frac{2d}{ds}\right) - \cos\left(\frac{2d}{ds}\right)} \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ  $d$  = ความหนาของแผ่นเพลท (m)

และ  $ds$  = ความลึกหยั่งเห็น (m)

$$ds = \frac{1}{\sqrt{\left(\pi\sigma_1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2\right)}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_1$  = ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์ (Hz)

$\tau$  = ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (m)

ส่วนในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบสองด้าน ในสมการที่(2.7) จะเปลี่ยนจาก  $d$  เป็น  $d/2$

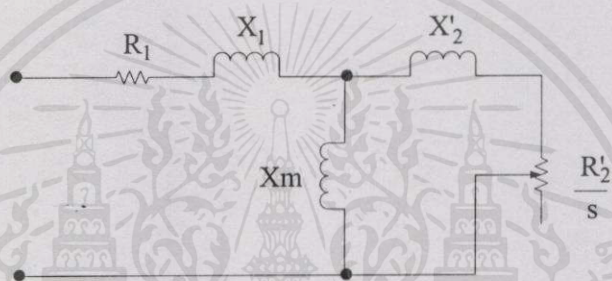
#### 2.1.4 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

ในวงจรเสมือนของมอเตอร์เชิงเส้น [2] ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากด้านข้างด้วย โดยผลกระทบจากด้านข้างจะรวมได้โดยตรงกับอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ ส่วนผลกระทบจากส่วนปลายนั้นจะรวมอยู่ในวงจรโดยเป็นอิมพีแดนซ์ที่แปรผันตามสลิป ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต หรือในทางอื่นที่มีลิขสิทธิ์สงวนไว้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ความเร็วต่ำจะมีผลกระทบจากส่วนปลายน้อยมาก จึงสามารถตัดทิ้งได้

เนื่องจากโครงสร้างด้านทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นทำมาจากแผ่นตัวนำบางๆ จึงต้องพิจารณาถึงสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\rho_r = \frac{\rho}{d} \quad (2.9)$$

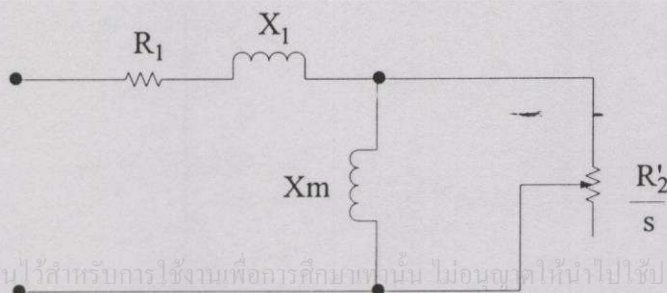
- เมื่อ
- $\rho_r$  = สภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว ( $\Omega \cdot m^2$ )
  - $\rho$  = สภาพความต้านทานเชิงปริมาตร ( $\Omega \cdot m^3$ )
  - $d$  = ความหนาของแผ่น โลหะบางที่ใช้ทำทฤษฎี (m)



ภาพที่ 2.14 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น

เงื่อนไขของการใช้วงจรเสมือนในการวิเคราะห์

1. วงจรเสมือนนี้ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์
2. ตัวแปรต่างๆภายในวงจรเสมือนจะพิจารณาเป็นค่าต่อเฟสเท่านั้น
3. เนื่องจากพิจารณาว่าค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านทฤษฎี ( $X'_2$ ) นั้น มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านปฐมภูมิ ( $X_1$ ) ดังนั้นจึงประมาณว่า  $X'_2 = 0$  [3] ดังวงจรเสมือนในภาพที่ 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.15 แสดงวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่พิจารณาตามเงื่อนไขแล้ว

การหาค่าตัวแปรต่างๆในวงจรเสมือนสามารถหาได้ดังนี้

ความต้านทานด้านปฐมภูมิ

$$R_1 = \frac{\rho_c K_p^2 q m^2 l N^2 \left(1 + \frac{\tau K_1}{l}\right)}{K_f K_d p \tau^2} \quad (\Omega) \quad (2.10)$$

รีแอกแตนซ์ด้านปฐมภูมิ

$$X_1 = \frac{2\mu_0 \omega}{p} \left[ \frac{(\lambda_c + \lambda_d)l}{q} + \lambda_e \frac{\tau}{\pi} K_2^2 m \right] \quad (\Omega) \quad (2.11)$$

ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

$$R_2 = \frac{6l}{\tau p} \rho_r (K_w N)^2 \quad (\Omega) \quad (2.12)$$

รีแอกแตนซ์ด้านทุติยภูมิ

$$X_2 = 0 \quad (\Omega) \quad (2.13)$$

แมกนิตไจซ์รีแอกแตนซ์

$$X_m = \frac{6\mu_0 \omega \pi}{\pi^2 pg} (K_w N)^2 \quad (\Omega) \quad (2.14)$$

ค่าตัวประกอบการออกแบบที่ดี (Goodness factor)

$$G = \frac{X_m}{R_2} \quad (2.15)$$

เมื่อ S = สลิป

$K_1$  = Mean length of coil end connection / Pole pitch = 1.2 – 1.8

$K_2$  = Winding breadth factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_f$  = Slot filling factor = 0.5 – 0.6

$K_d$  = Slot depth / Slot width = 3 – 5

$K_w$  = Primary winding distribution factor = 0.9

$N$  = จำนวนรอบขดลวดต่อเฟส (รอบ)

$U_s$  = ความเร็วเชิงโคโรนัส (m/sec)

$f$  = ความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (Hz)

$p$  = คู่ขั้วแม่เหล็ก

$m$  = จำนวนเฟส

$l$  = Stack width (m)

$q$  = Slot / Pole / Phase

$g$  = ช่องอากาศทางแม่เหล็ก = ช่องอากาศทางกล+ความหนาแผ่นตัวนำทุติยภูมิ (m)

$\omega$  =  $2\pi f$  (rad/sec)

$\tau$  = Pole pitch (m)

$\mu_0$  =  $4\pi * 10^{-7}$  (H/m)

$\beta$  = Cording factor = Coil pitch / Pole pitch

$\rho_c$  = ค่าความต้านทานเชิงปริมาตรของทองแดง ( $\Omega \cdot m^3$ )

$\rho_r$  = ค่าความต้านทานประสิทธิผลของแผ่นตัวนำด้านทุติยภูมิ ( $\Omega \cdot m^2$ )

$\lambda_s$  = Slot specific permeances =  $\frac{1}{12} K_d (1 + 3\beta)$

$\lambda_d$  = Differential specific permeances =  $\frac{(5g / \text{slotwidth})}{((5 + 4g) / \text{slotwidth})}$

$\lambda_c$  =  $\lambda_s + \lambda_d$

$\lambda_e$  = End connection specific permeances =  $0.3(3\beta + 1)$

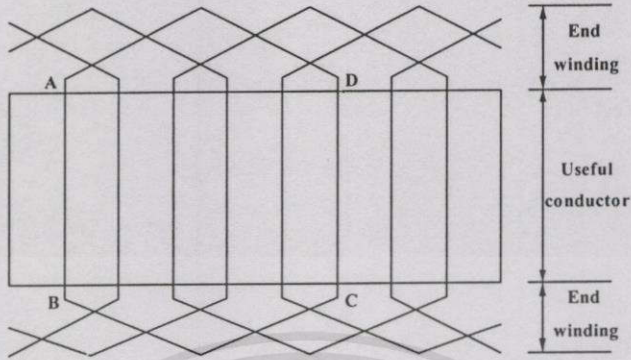
## 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก (Tubular Linear Inductin Motor) หรือเรียกสั้นๆ ว่า TLIM นั้น แบ่งโครงสร้างออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนปฐมภูมิ (ส่วนที่อยู่กับที่) และส่วนทุติยภูมิ (ส่วนที่เคลื่อนที่) เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบทั่วไป แต่ว่าลักษณะของโครงสร้างนั้นจะแตกต่างกันในรายละเอียด

### 2.2.1 โครงสร้างส่วนปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

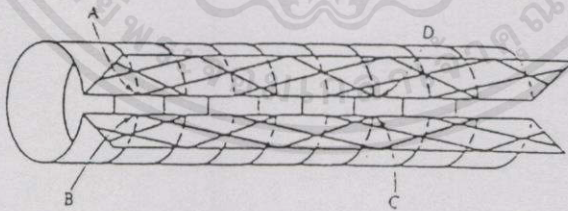
มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ไม่มีผลของจุดเชื่อมต่อปลายในขดลวดด้านปฐมภูมิ โดยข้อดีสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 2.16 ซึ่งแสดงชุดขดลวดด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบ โดยมีตัวนำที่ใช้ประโยชน์คือ AB และ CD ชุดขดลวดที่เชื่อมต่อปลายคือ

BC และ DA ซึ่งในส่วนขดลวดที่เชื่อมต่อปลายนี้ทำให้สิ้นเปลืองขดลวด และเกิดความสูญเสีย เนื่องจากความต้านทานโดยไม่มีผลต่อการสร้างแรงของมอเตอร์ [6]



ภาพที่ 2.16 ชุดขดลวดด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแบนราบ

ถ้าทำการม้วนชุดขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแบนราบให้เป็นทรงกระบอก ตามภาพที่ 2.17 ก็จะกลายเป็น โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ซึ่งจะเห็นว่าส่วนที่ใช้ประโยชน์ของขดลวดจะวนครบเป็นวงรอบ ไม่มีส่วนเกินยื่นออกมาและสามารถใช้ประโยชน์จากวัสดุตัวนำได้ดีกว่ามอเตอร์เชิงเส้นแบบแบนราบ เพราะขดลวดด้านปฐมภูมิแบบทรงกระบอก และวงจรทุติยภูมิแบบทรงกระบอกไม่มีตัวนำเชื่อมต่อปลาย ดังนั้นความต้านทานและรีแอกแตนซ์รั่วไหลของตัวนำเชื่อมต่อปลายจะเป็นศูนย์ ทำให้ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในแต่ละชุดมีส่วนในการสร้างแรงทั้งหมด



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างด้านปฐมภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

นอกจากนั้นยังพบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั้น แรงในแนวตั้งฉากมีค่ารวมเป็นศูนย์เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกที่สมมาตร และยังทำให้ง่ายต่อการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นบนลิเนียร์แบร์ริง แต่ก็มีข้อจำกัดที่ความยาวของระยะการเคลื่อนที่ไม่ควรเกิน 1-1.5 m. เพราะอาจเกิดปัญหาทางกลได้เนื่องจากแกนของทุติยภูมิต้องอยู่ตรงศูนย์กลางของปฐมภูมิพอดี เพื่อให้ระยะห่างทางกลมีความสม่ำเสมอ และข้อดีของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอกอีกข้อคือ ส่วนปฐมภูมิสามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งอาจจะใช้หรือไม่ใช้แกนเหล็กก็ได้

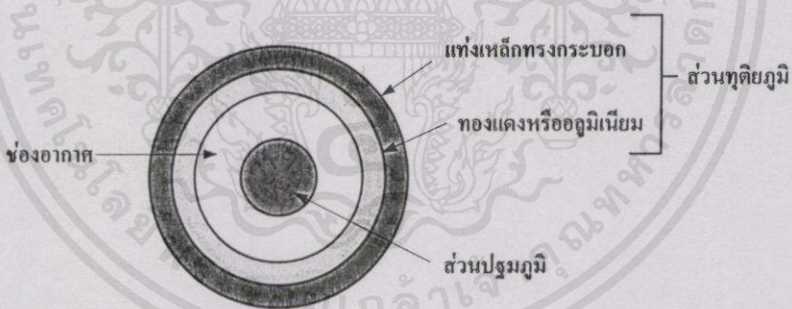
## 2.2.2 โครงสร้างส่วนทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก [2] นั้น จะต้องเป็นแกนกระบอก ซึ่งทำด้วยเหล็กที่มีความนำแม่เหล็กที่ดี ส่วนผิวนอกนั้นจะเคลือบด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำ ซึ่งทำได้โดยอัดทองแดงหรืออลูมิเนียมให้ติดแน่นอยู่กับแกนเหล็ก สามารถแบ่งรูปแบบของด้านทุติยภูมินี้ออกได้เป็น

1. ชนิดอยู่ภายใน
2. ชนิดอยู่ภายนอก

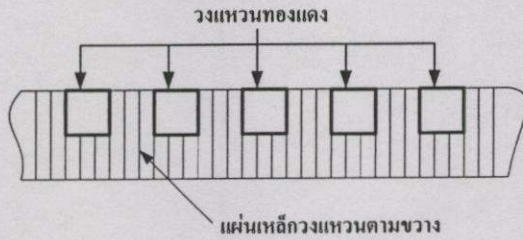


ภาพที่ 2.18 ส่วนทุติยภูมิชนิดอยู่ภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

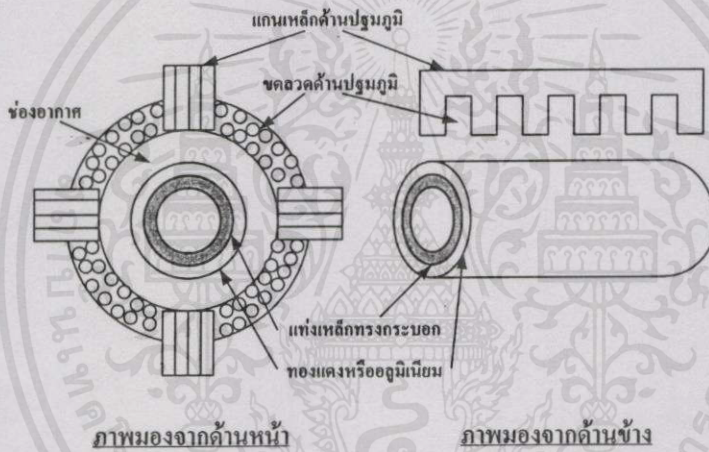


ภาพที่ 2.19 ส่วนทุติยภูมิชนิดอยู่ภายนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ส่วนทุติยภูมิจะอยู่ภายใน หรือภายนอกนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ แล้วจึงออกแบบให้เหมาะสมกับงาน และยังมีส่วนทุติยภูมิอีกแบบหนึ่งที่ทำมาจากวงแหวนทองแดงหรือวงแหวนอลูมิเนียมเรียงต่อกันอนุกรมไปตามความยาวของแกนเหล็ก โดยค้นไว้ด้วยแผ่นเหล็กวงแหวนตามขวาง (Secondary transverse laminations) [2] เรียงสลับกันไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 2.20 แผ่นเหล็กวงแหวนตามขวางนี้อาจจะใช้วงแหวนเหล็ก (Solid iron ring) แทนก็ได้ แต่จะมีข้อเสียเนื่องจากผลกระทบที่ผิวเกิดขึ้นมาก และสุดท้ายควรจะมีการเคลือบผิวของด้านทุติยภูมิเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่บนลิเนียร์แบร์ริงได้อย่างสะดวก



ภาพที่ 2.20 ส่วนทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นชนิดที่มีวงแหวนทองแดงสลักกับแผ่นเหล็กวงแหวนตามขวาง

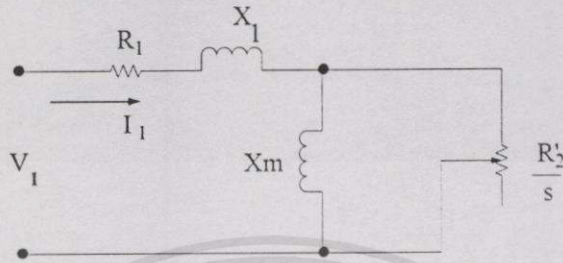


ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของมอเตอร์เชิงเส้นแบบแกนกระบอกเมื่อมองจากทางด้านหน้าและด้านข้าง

เมื่อมองโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ทั้งแบบด้านหน้าและด้านข้าง ในกรณีที่ส่วนทุติยภูมิอยู่ภายในของปรูมภูมิ ดูได้จากภาพที่ 2.21 ส่วนหลักการในการเคลื่อนที่นั้นสามารถอธิบายด้วยหลักการเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบเบนราบ คือเริ่มด้วยการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดค้ำปรูมภูมิ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำด้านทุติยภูมิ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นตัวสร้างแรงผลักดันให้ส่วนทุติยภูมิสามารถเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงได้ ด้วยเหตุที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกมีโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอกที่สมมาตร จึงไม่มีผลกระทบจากขอบด้านข้าง และด้วยเหตุผลที่เลือกใช้งานในลักษณะทดแทนระบบนิวแมติกซึ่งใช้งานที่ความเร็วต่ำ จึงสามารถตัดผลกระทบจากส่วนปลายทิ้งไปได้

### 2.2.3 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก เงื่อนไขการพิจารณา

1. ไม่คิดเรื่องผลกระทบที่ผิวค้ำทุติยภูมิ
2. เป็นการใช้งานที่ความเร็วต่ำ
3. แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 2.22 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

การหาค่าต่าง ๆ [1, 3, 7] สามารถหาได้ดังนี้

ความต้านทานด้านปฐมภูมิ

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q K_p^2 m^2 D_{avp} N^2}{K_f K_d p \tau^2} \quad (\Omega) \quad (2.16)$$

รีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านปฐมภูมิ

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 \omega D_{avp} \lambda_c N^2}{pq} \quad (\Omega) \quad (2.17)$$

ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

$$R_2 = \frac{6\pi D_{avs} \rho_r}{\tau p} (K_w N)^2 \quad (\Omega) \quad (2.18)$$

รีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านทุติยภูมิ

$$X_2 = 0 \quad (\Omega) \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีไทซ์รีแอกแตนซ์

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega\tau}{\pi^2} (K_w N)^2 \left( \frac{\pi D_0}{pg} \right) \quad (\Omega) \quad (2.20)$$

แรงผลัก

$$F_x = \frac{I_1^2 R_2'}{SU_s \left[ \frac{1}{(SG)^2} + 1 \right]} \quad (\text{N}) \quad (2.21)$$

กระแสต้านปฐมภูมิ

$$I_1 = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + (R_2' // jX_m)} \quad (\text{A}) \quad (2.22)$$

ตัวประกอบกรอกแบบที่ดี (Goodness factor)

$$G = \frac{X_m}{R_2'} \quad (2.23)$$

กระแสต้านทุติยภูมิ

$$I_2 = \frac{I_1 X_m}{\sqrt{(R_2'/S)^2 + X_m^2}} \quad (\text{A}) \quad (2.24)$$

กำลังไฟฟ้าด้านเข้า

$$P_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 \left[ \frac{R_2'}{S} \right] \quad (\text{W}) \quad (2.25)$$

ความเร็วซิงโครนัส

$$U_s = 2\tau f \quad (\text{m/sec}) \quad (2.26)$$

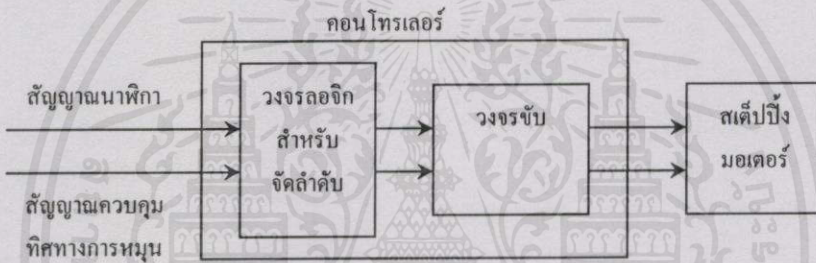
**หมายเหตุ** ความหมายของตัวแปรบางตัวที่ไม่ได้อธิบาย สามารถดูได้จากในหัวข้อ 2.1.4 เรื่อง วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์คือมอเตอร์ที่สามารถให้เพลหมุนในลักษณะเป็นขั้นๆหรือเป็นสเต็ป สเต็ปละ กี่องศาขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการออกแบบชุดควบคุม โดยการป้อนอินพุตพัลส์ที่มีความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนไปหนึ่งสเต็ปในแต่ละพัลส์ [4] ซึ่งชุดควบคุมนั้นสามารถออกแบบให้หมุน เป็นสเต็ปหรือหมุนอย่างต่อเนื่อง และ สามารถกลับทางหมุนได้

### 2.3.1 หลักการของสเต็ปป์มอเตอร์

การทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์[4] ขึ้นอยู่กับพัลส์ที่ป้อนให้กับขดลวดเฟสของมันในลักษณะที่ ถูกต้อง ด้วยวงจรถอดจิกสำหรับจัดลำดับ(Sequencer logic) และสามารถจ่ายกระแสให้กับกับสเต็ป ป์มอเตอร์ได้อย่างเพียงพอโดยวงจรถับ (Driver)



ภาพที่ 2.23 ส่วนของการควบคุมสำหรับการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์

ส่วนของการควบคุมของสเต็ปป์มอเตอร์นั้นจะสามารถต่อเชื่อม(Interface) ได้โดยตรงได้กับ ไมโครโพรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ โดยสเต็ปป์มอเตอร์จะสามารถกำหนดตำแหน่งของ โหลดได้อย่างเที่ยงตรงมาก เนื่องจากแต่ละอินพุตพัลส์จะทำให้สเต็ปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ไป หนึ่งสเต็ปพอดี

จากภาพที่ 2.24 แท่งแม่เหล็กถาวรติดอยู่บนเพลลา และหมุนได้อิสระเหมือนอาร์เมเจอร์มี ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ โครงโลหะที่สเตเตอร์ ตำแหน่งแกนอาร์เมเจอร์แม่เหล็ก คือ  $a-a'$  ซึ่งต่างไปจากตำแหน่งแกนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยเป็นมุม  $\theta$  แรงแม่เหล็กที่เกิดจากแรง ดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน ทำให้เกิดแรงปกติซึ่งตั้งฉากกับแกน  $a-a'$  จะเป็นไปตามสมการ

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.27)}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

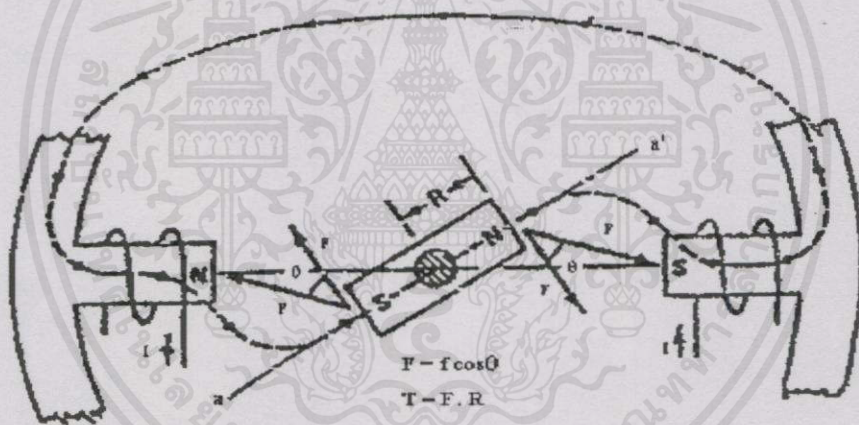
$$\text{เมื่อ } F = \text{แรงปกติซึ่งตั้งฉากกับแกน } a-a' \quad (N)$$

- $f$  = แรงดึงดูดจากขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน (N)
- $\theta$  = มุมระหว่างแกนอาร์เมเจอร์และแกนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า (องศา)

ค่าแรงบิดรวมที่ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา(Clock Wise :CW) จนกว่าแกนของอาร์เมเจอร์  $a - a'$  จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนตั้งของสเตเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$T = F \cdot R \tag{2.28}$$

- เมื่อ  $T$  = แรงบิดรวมที่ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (N.m)
- $F$  = แรงปกติซึ่งตั้งฉากกับแกน  $a - a'$  (N)
- $R$  = รัศมีของแกนอาร์เมเจอร์ (m)

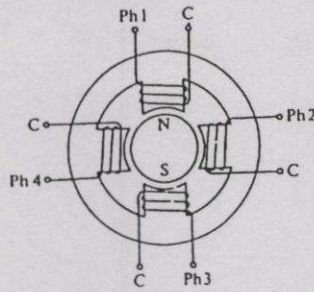


ภาพที่ 2.24 แสดงแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดทอร์กเพื่อหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล

### 2.3.2 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์

แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ดังนี้

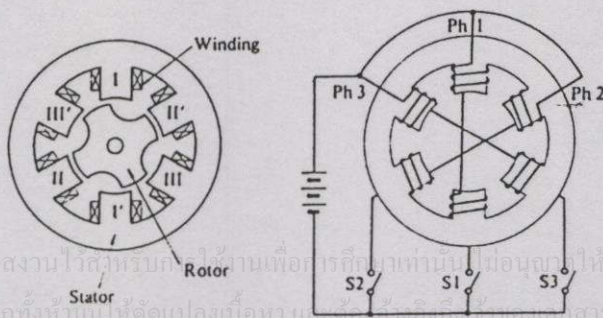
1. ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor : PMSM) [4] โครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ แบบแม่เหล็กถาวรแสดงได้ ดังภาพที่ 2.25 สามารถสังเกตสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้ได้โดยการทดลองหมุนด้วยมือเปล่าจะรู้สึกว่าการสะกดเป็นขั้นๆ เพราะการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กถาวร โดยในภาพที่ 2.25 เป็นสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส โดยแต่ละเฟสมีการพันขดลวดอยู่บน 1 ขั้วของสเตเตอร์ ดังนั้นในการออกแบบมอเตอร์ชนิดนี้ สเตเตอร์จะต้องมี 4 ขั้ว



ภาพที่ 2.25 โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร 4 เฟส

จากตัวอย่างของสเต็ปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรดังในภาพที่ 2.25 ส่วนของโรเตอร์นั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ(N) และขั้วใต้(S) โดยมีขดลวดพันอยู่บนสเตเตอร์ 4 ชุด ให้ขั้ว C ต่อรวมกันไปที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ และขั้ว Ph1, Ph2, Ph3, Ph4 จะต่อผ่านสวิตช์ของแต่ละเฟสก่อนที่จะไปรวมกันที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งตามโครงสร้างนี้จะทำให้โรเตอร์หมุนได้สเต็ปละ 90 องศา เช่นถ้าต้องการให้หมุนตามเข็มนาฬิกา ก็จ่ายไฟให้ทำงานในลักษณะ Ph1 → Ph2 → Ph3 → Ph4 ตามลำดับ ซึ่งสเต็ปมอเตอร์ชนิดนี้จะให้แรงบิดน้อย

2. ชนิดคาร์ลิกแตนซ์แปรค่าได้ (Variable Reluctance Stepping Motor : VRSM) [4] ลักษณะภายในของ VRSM จะมีลักษณะเป็นฟันยื่นออกมาโดยรอบของโรเตอร์ และสเตเตอร์ก็มีฟันที่ยื่นออกมาเป็นซี่ฟันคล้ายกับโรเตอร์เช่นกัน ในภาพที่ 2.26 จะแสดงภาพตัดของสเต็ปมอเตอร์ ชนิด 3 เฟส โดยสเตเตอร์จะมีฟัน 6 ซี่ ดังนั้นขั้วแม่เหล็กในแต่ละเฟสจะเกิดจากซี่สเตเตอร์ 2 ซี่ที่อยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งจะพันขดลวดให้เกิดเป็นขั้วเหนือซี่และขั้วใต้ซี่ ส่วนของโรเตอร์จะมีฟันยื่นออกมา 4 ซี่ โดยรอบของโรเตอร์เช่นกัน โครงสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์ของ VRSM โดยทั่วไปทำมาจาก Laminated silicon steel ส่วนที่เป็นลักษณะคล้ายซี่ฟันยื่นออกมาจากโรเตอร์ และสเตเตอร์จะช่วยให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าส่วนที่ไม่เป็นฟันยื่นออกมา ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมดุลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซี่ฟันของโรเตอร์เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ควรจะโค้งรับพอดีกับซี่ฟันของสเตเตอร์ดังในภาพที่ 2.26



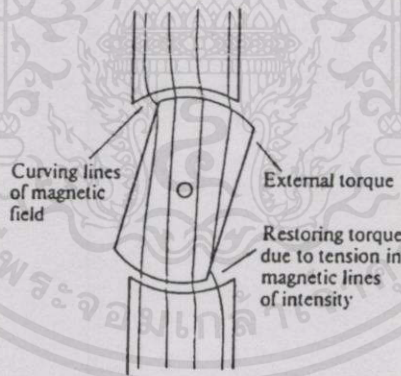
ภาพที่ 2.26 ภาพตัดโครงสร้างและการพันขดลวดของ VRSM ชนิด 3 เฟส

ในภาพที่ 2.26 จะแบ่งซี่ฟันของสเตเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน คือซี่ฟันในส่วนของขั้วเหนือ(N) และซี่ฟันของขั้วใต้(S) โดยซี่ I, II, III จะเป็นขั้วเหนือ และซี่ I', II', III' จะเป็นขั้วใต้

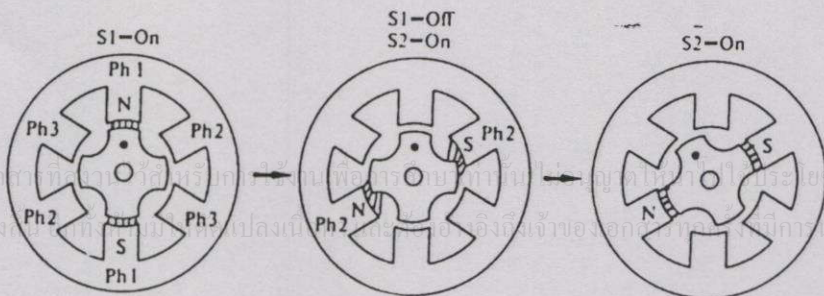
หลักการทำงานคือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในเฟสที่ 1 ของ VRSM โดยการให้ S1 "on" จะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดของเฟสที่ 1 ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในสเตเตอร์ ที่ขั้วเหนือไปขั้วใต้ ผ่านซี่ฟันของสเตเตอร์ที่ยื่นออกมา คือขั้ว I จะเป็นขั้วเหนือและ I' จะเป็นขั้วใต้ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะไปเหนี่ยวนำกับซี่ฟันของโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ขั้ว I และ I' มากที่สุด ทำให้โรเตอร์หมุนและเมื่อถึงจุดที่โรเตอร์และสเตเตอร์เหนี่ยวนำมากที่สุด ที่ขั้ว I และ I' จะทำให้โรเตอร์หยุดหมุน ดังแสดงในภาพที่ 2.27



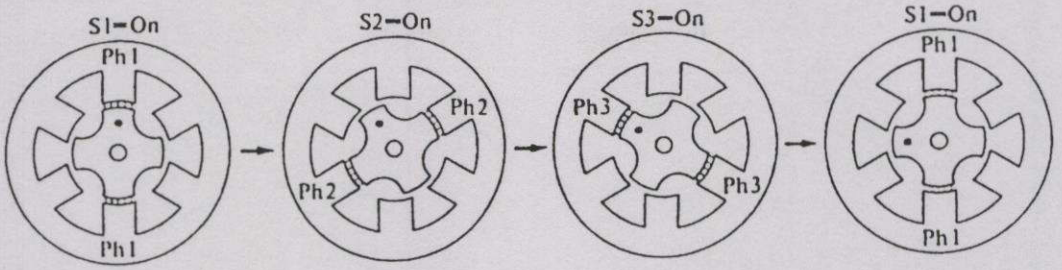
ภาพที่ 2.27 ตำแหน่งการเหนี่ยวนำที่สมดุลเมื่อกระตุ้นที่เฟส 1



ภาพที่ 2.28 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด



ภาพที่ 2.29 ตำแหน่งการหมุนเมื่อกระตุ้นจากเฟส 1 ไปยังเฟส 2



ภาพที่ 2.30 ลำดับการเคลื่อนที่ของ VRSM เมื่อกระตุ้นครบทั้ง 3 เฟส

พารามิเตอร์ต่างๆใน VRSM คือ

มุมสเต็ป :  $\theta_s$  (องศา)

จำนวนเฟส :  $N_p$  (เฟส)

จำนวนขั้วแม่เหล็กต่อเฟส :  $P$  (ขั้ว)

อัตราการสเต็ป :  $f_s$  (Hz)

จำนวนการสเต็ป

$$S = \frac{360}{\theta} \quad (\text{สเต็ป}) \tag{2.29}$$

จำนวนซี่ของสเตเตอร์

$$N_s = N_p \cdot P \quad (\text{ซี่}) \tag{2.30}$$

จำนวนซี่ของโรเตอร์

$$N_r = \frac{S}{N_p} \quad (\text{ซี่}) \tag{2.31}$$

ความห่างระหว่างซี่ของสเตเตอร์

$$P_s = \frac{360}{N_s} \quad (\text{องศา}) \tag{2.32}$$

ความห่างระหว่างซี่ของโรเตอร์

$$P_r = \frac{360}{N_r} \quad (\text{องศา}) \tag{2.33}$$

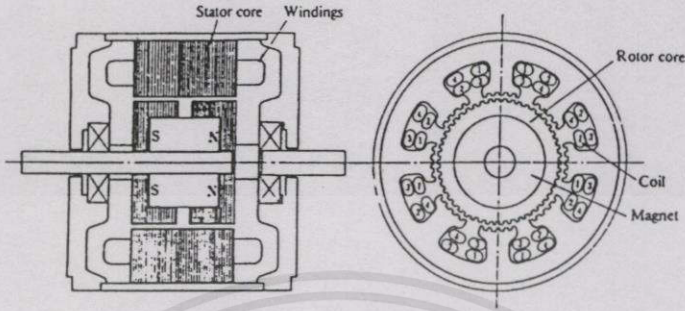
ความเร็วของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

$$n = \frac{60 \cdot f}{n} \quad (\text{r.p.m.}) \tag{2.34}$$

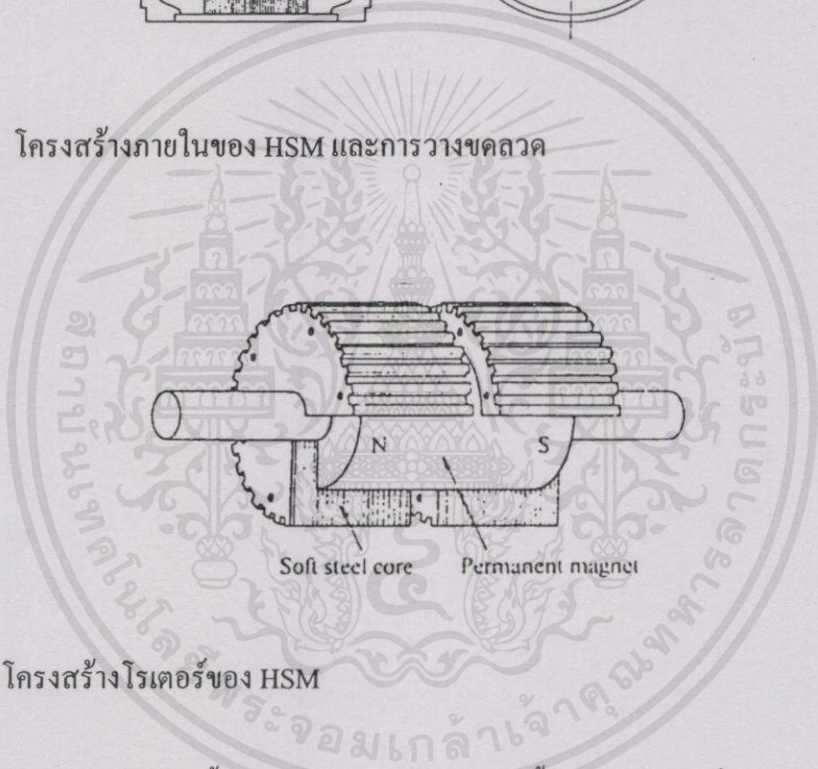
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $S$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชนิดไฮบริด (Hybrid Stepping Moter : HSM) [4] โครงสร้างของ HSM จะมีแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ในโรเตอร์ ในการทำงานของ HSM จะทำงานผสมระหว่างสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบ PMSM

และแบบVRSM ลักษณะโครงสร้างของแกนสเตเตอร์จะเหมือนVRSM แต่จำนวนขดลวดและการต่อจะแตกต่างจาก VRSM คือใน VRSMจะมีจำนวนขดลวดอยู่ 2 ขด ต่อ 2 ขั้ว ใน 1 เฟส แต่สำหรับ HSM จะมีจำนวนขดลวดอยู่ 4 ขด ต่อ 2 ขั้ว ใน 1 เฟส

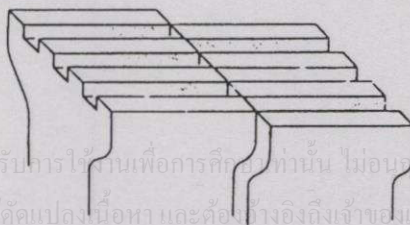


ภาพที่ 2.31 โครงสร้างภายในของ HSM และการวางขดลวด



ภาพที่ 2.32 โครงสร้างโรเตอร์ของ HSM

ซี่ฟันโรเตอร์ของ HSM ทั้ง 2 ส่วน จะมีระยะความเอียงต่างกัน 1/2 ซี่(Half tooth pitch) แต่ HSM บางชนิดซี่ฟันของสเตเตอร์จะเอียงกันแทนส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ โดยจะเรียงในแนวเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.33 ลักษณะซี่ฟันของ HSM บางชนิด

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ HSM ชนิดหนึ่งซึ่งอาศัยหลักการทำงานระหว่าง PMSM และ VRSM ชนิดหลายสเตจ โดยเป็นมอเตอร์แบบความเร็วต่ำ สามารถปรับมุมมองศาได้ละเอียดมากๆ คือได้ สเต็ปละ 1.8 องศา และสามารถหมุนได้ด้วยความเร็ว 60 r.p.m. ที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งเป็นมอเตอร์ 4 เฟส และมีการทำงาน 200 สเต็ป ใน 1 รอบการทำงาน

HSM จะทำงานด้วยกระแสเฟสที่มีการไหลได้สองทิศทาง ดังนั้นเราจำเป็นต้องใช้ชุดขับกระแส 2 ชุด (Bipolar Drive) การแก้ปัญหาเพื่อขับ HSM ให้ทำงานด้วยชุดขับเพียงชุดเดียวนั้นสามารถทำได้ โดยแปลงโครงสร้างการพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์

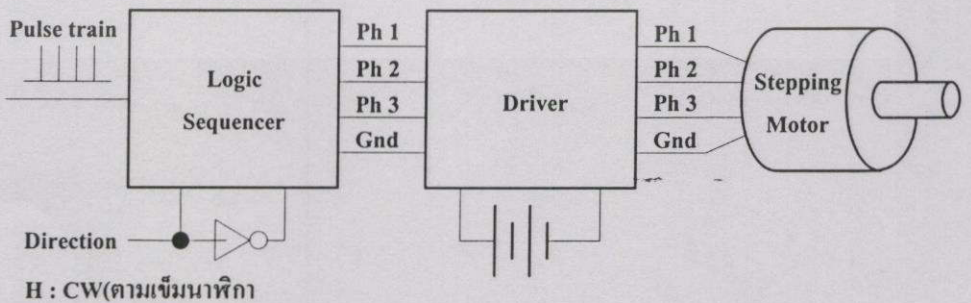
นอกจากสเต็ปป์มอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว ในปัจจุบันได้มีการออกแบบสเต็ปป์มอเตอร์ สำหรับการใช้งานอื่นๆอีกหลายรูปแบบ แต่จะใช้กับงานเฉพาะด้านเท่านั้น จึงไม่ค่อยได้พบเห็น

### 2.3.3 การควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์

การควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ [4] จะมีอยู่ 2 วิธีการใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

1. การใช้คอมพิวเตอรฺ์หรือซิงเกิลบอร์ดควบคุม
2. การใช้วงจรถติจิตอลควบคุม

ไม่ว่าจะควบคุมด้วยวิธีใดก็ตาม การที่จะทำให้สเต็ปป์มอเตอร์หมุนได้จะต้องส่งสัญญาณพัลส์ให้กับขดลวดเฟสของมอเตอร์ในลักษณะเรียงลำดับ(sequence) ซึ่งการควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอรฺ์ในวิธีที่ 1. นั้น ผู้ควบคุมสามารถออกแบบโปรแกรมเพื่อให้สเต็ปป์มอเตอร์ได้รับสัญญาณพัลส์ได้หลายรูปแบบ โดยการเปลี่ยนแปลงส่วนของโปรแกรม แต่ถ้าใช้วิธีที่ 2. คือใช้วงจรถติจิตอลควบคุม ผู้ควบคุมจะต้องออกแบบวงจรโดยสร้าง Hardware ให้ผลิตสัญญาณพัลส์ที่เรียงลำดับออกมา ซึ่งรูปแบบของสัญญาณจะถูกจำกัดด้วยวงจรที่สร้างขึ้นมา วิธีนี้เหมาะกับการควบคุมที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ แต่ไม่คล่องตัวเท่ากับวิธีที่ 1.



เอกสารนี้เป็นเอกสาร L : CCW(ทวนเข็มนาฬิกา) ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.34 แสดงโคดะแกรมทั่วไปในการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์(กรณีเป็นชนิด 3 เฟส)

สำหรับรูปแบบของวงจรพัลส์ (Mode Of Excitation) [4] ที่ส่งไปควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ มีอยู่ 3 แบบดังนี้ คือ

1. One Excitation

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	█			█			█		
Phase 2		█			█			█	
Phase 3			█			█			█

ภาพที่ 2.35 รูปแบบสัญญาณแบบ One-Excitation (กรณีเป็นสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ3เฟส)

จากภาพที่ 2.35 ได้แสดงถึงรูปแบบวงจรพัลส์ในแบบ One Excitation โดยในส่วนที่แรเงาจะเป็นส่วนที่มีสัญญาณป้อนไปยังสเต็ปปีงมอเตอร์ ถ้าต้องการให้หมุนแบบตามเข็มนาฬิกา(CW) จะต้องส่งลำดับสัญญาณควบคุมดังนี้คือ  $Ph1 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph3$  หากต้องการให้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา(CCW) จะต้องส่งลำดับสัญญาณในลักษณะ  $Ph3 \rightarrow Ph2 \rightarrow Ph1$

ซึ่ง One Excitation นี้จะให้แรงบิดออกมาน้อย เนื่องจากในแต่ละช่วงเวลา(Clock state) จะมีการป้อนสัญญาณเพียง 1 เฟสเท่านั้น

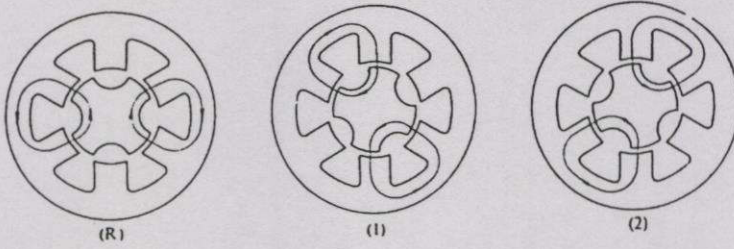
2. Two Excitation

โดยลำดับสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่สเต็ปปีงมอเตอร์จะเป็นไปดังในภาพที่ 2.36 การทำงานอาจดูได้จากในช่วงClock stateที่2 ไปยัง Clock stateที่3 จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งนั้น Ph2 จะหยุดนำกระแส และ Ph1 จะมานำกระแสแทน ซึ่งในช่วงนี้ Ph3 ก็ยังคงนำกระแสอยู่ด้วย จึงทำให้ในแต่ละClock state มีการป้อนสัญญาณเข้าสู่สเต็ปปีงมอเตอร์ถึงสองเฟสซึ่งมีผลให้การควบคุมลักษณะนี้มีแรงบิดมากขึ้น

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	█	█		█	█		█	█	
Phase 2		█	█		█	█		█	█
Phase 3			█	█		█	█		█

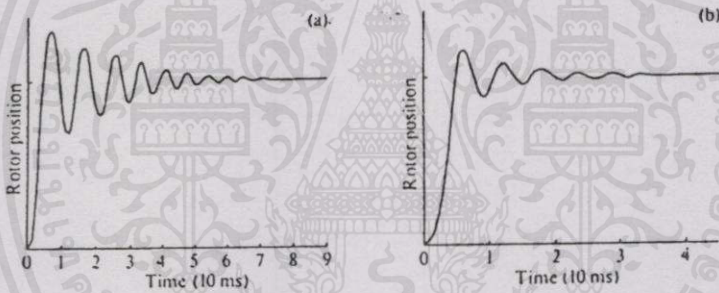
ภาพที่ 2.36 รูปแบบสัญญาณแบบ Two Excitation (กรณีเป็นสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ3เฟส)

สำหรับการเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อส่งสัญญาณควบคุมแบบ Two-Excitation ได้แสดงใน ภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อส่งสัญญาณควบคุมแบบ Two Excitation

คุณลักษณะที่แตกต่างกันระหว่าง One-Excitation กับ Two-Excitation ที่เห็นได้ชัดเจนมากคือ ผลตอบสนองในสภาวะทรานเซียนท์ (Transient response) โดยการควบคุมแบบ Two Excitation จะเกิดการเข้าสู่เสถียรภาพ(Oscillation damp) ได้เร็วกว่า และมีแรงบิดมากกว่าแบบ One Excitation โดยจะดูได้จากในภาพที่ 2.38



ภาพที่ 2.38 แสดงความแตกต่างในช่วงทรานเซียนท์ของการส่งสัญญาณควบคุมทั้ง 2 แบบ  
 (a) คือ การส่งสัญญาณควบคุม แบบ One Excitation  
 (b) คือ การส่งสัญญาณควบคุม แบบ Two Excitation

3. One-Two Excitation

Clock state (A)	R	1	2	3	4	5				
Clock state (B)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Phase 1										
Phase 2										
Phase 3										

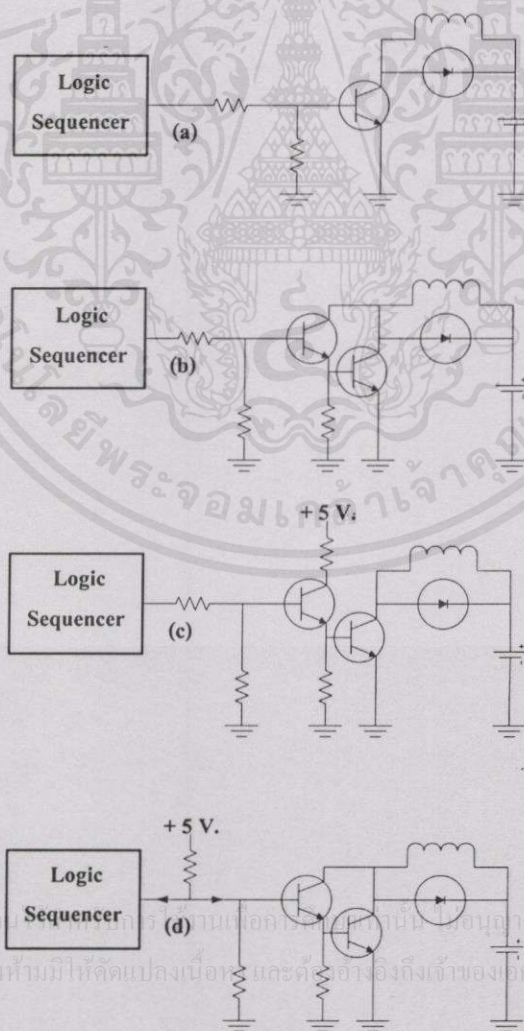
ภาพที่ 2.39 รูปแบบสัญญาณชนิด One-Two Excitation (กรณีเป็นสเต็ปมอเตอร์แบบ 3 เฟส)

รูปแบบสัญญาณชนิดนี้ก็คือ การรวมแบบ One Excitation เข้ากับแบบ Two Excitation เข้าไว้ด้วยกันหรือเรียกว่า Half-Step โดยภาพที่ 2.39 เป็นรูปแบบสัญญาณชนิด One-Two Excitation ที่ควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์แบบ 3 เฟส จำนวนของ Clock state จะมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม A จะส่งแบบ One-Excitation กลุ่ม B จะส่งแบบ Two-Excitation การส่งสัญญาณแบบนี้จะทำให้จำนวนสแต็ปเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของ One-Excitation แต่แรงบิดเฉลี่ยจะน้อยกว่า Two-Excitation

### 2.3.4 การต่อวงจรเรียงลำดับเฟสกับวงจรกำลัง

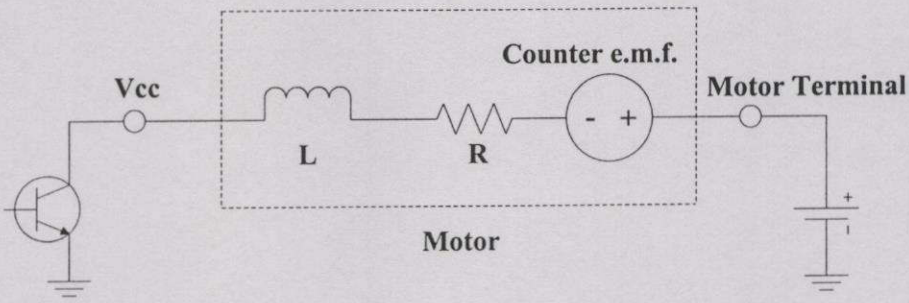
สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจากวงจรเรียงลำดับเฟสจะส่งผ่านเข้ามาที่อินพุตของวงจรกำลัง เพื่อทำหน้าที่ขับกระแสให้ขดลวดเฟสของสแต็ปปีงมอเตอร์ สำหรับวิธีการต่างๆซึ่งจะต่อวงจรเรียงลำดับเฟสเข้ากับวงจรกำลัง [4] ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2.40

โดยส่วน (a) จะใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวในการขับ ส่วน (b) , (c) และ (d) จะใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อคาบลิ้งกันมาใช้ขับ แต่ต่างกันตรงวิธีการต่อวงจรเพื่อนำไปใช้งาน



ภาพที่ 2.40 ตัวอย่างของการเชื่อมต่อระหว่างวงจรเรียงลำดับเฟสกับวงจรกำลัง

### 2.3.5 ปัญหาของวงจรขับเคลื่อน



ภาพที่ 2.41 แสดงวงจรเทียบเคียงของขดลวดภายในสเต็ปิ่งมอเตอร์

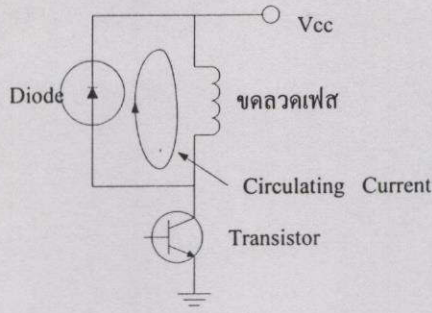
จากภาพที่ 2.41 ซึ่งเป็นวงจรเทียบเคียงของขดลวดภายในสเต็ปิ่งมอเตอร์ เนื่องจากสเต็ปิ่งมอเตอร์ มีขดลวดเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก จึงปรากฏค่าของความเหนี่ยวนำและความต้านทานต่ออนุกรมกันอยู่ เมื่ออยู่ในสถานะที่สเต็ปิ่งมอเตอร์หมุน จะเปรียบเสมือนทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาที่ขั้วของขดลวดซึ่งเรียกว่า Counter e.m.f โดยแรงดันไฟฟ้าชุดนี้จะมีทิศทางสวนกับแรงดันจากเพาเวอร์ซัพพลาย ดังนั้นในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนจะต้องคำนึงถึงค่าแรงดันที่จ่ายให้ทรานซิสเตอร์ ( $V_{cc}$ ) ต้องสัมพันธ์กับแรงดันจากเพาเวอร์ซัพพลาย ตลอดจนค่ากระแสคอลเลกเตอร์สูงสุด ( $I_{c(max)}$ ) ด้วย [4]

### 2.3.6 การลดแรงดันเพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์ที่ขับสเต็ปิ่งมอเตอร์

จากภาพที่ 2.41 เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกทำให้ Turned Off จะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นหรือเรียกว่าแรงดัน spike ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กตามสมการ  $L \frac{di}{dt}$  ซึ่งแรงดันนี้จะสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์เกิดความเสียหายได้ วิธีการแก้ไขโดยการ Suppressing โดยจะจำกัดค่าแรงดัน Spike นี้ เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีคือ [8]

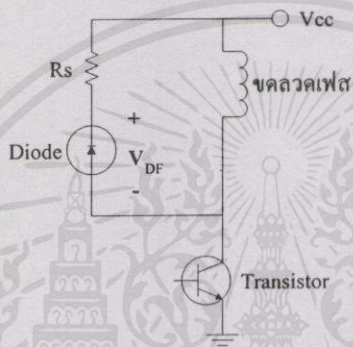
#### 1. Diode Suppressor

ถ้านำไดโอดมาต่อขนานเข้ากับขดลวดโดยมีขั้วปรากฏตามภาพที่ 2.42 จะทำให้กระแสไหลวนอยู่เป็นวงรอบขดลวดและไดโอด หลังจากที่ทรานซิสเตอร์ turn off กระแสนี้จะลดค่าลงตามเวลาและแรงดันที่ขา Collector จะมีค่าเท่ากับแรงดันของเพาเวอร์ซัพพลาย วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ซึ่งกว่าจะทำให้กระแสไหลวนหมดไปต้องใช้เวลาอันยาวนาน ผลเสียอีกข้อหนึ่งก็คือจะเป็นการสร้าง Breaking Torque ขึ้นด้วย อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.42 แสดงการใช้ Diode Suppressor

## 2. Diode-Resistor Suppressor



ภาพที่ 2.43 แสดงการใช้ Diode-Resistor Suppressor

การต่อความต้านทานอนุกรมกับไดโอดดังในภาพที่ 2.43 จะเป็นการหน่วงเวลาของกระแสไหลวนและแรงดันที่ขา Collector ( $V_{CE}$ ) ของทรานซิสเตอร์เมื่อ turn off คือ

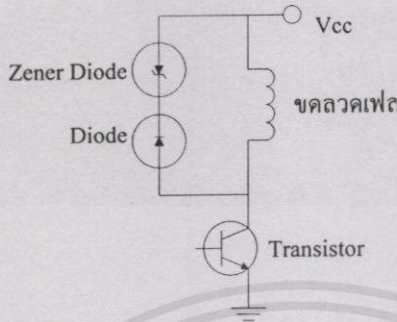
$$V_{CE} = E + I.R_S + V_{DF} \quad (2.35)$$

- เมื่อ
- $V_{CE}$  = แรงดันที่ขา Collector (V)
  - $E$  = แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ (V)
  - $I$  = กระแสไฟฟ้าก่อนที่ทรานซิสเตอร์จะ turn-off (A)
  - $R_S$  = ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับไดโอด ( $\Omega$ )
  - $V_{DF}$  = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด (V)

เอกสาร ถ้าค่าของความต้านทาน  $R_S$  สูงขึ้น จะทำให้กระแสไหลวนลดค่าลงเร็วขึ้น แต่ถ้าแรงดันที่ขา Collector สูงขึ้น จำเป็นต้องทำให้อัตราแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้น เพื่อให้กระแสไหลวนลดลงเร็วขึ้น

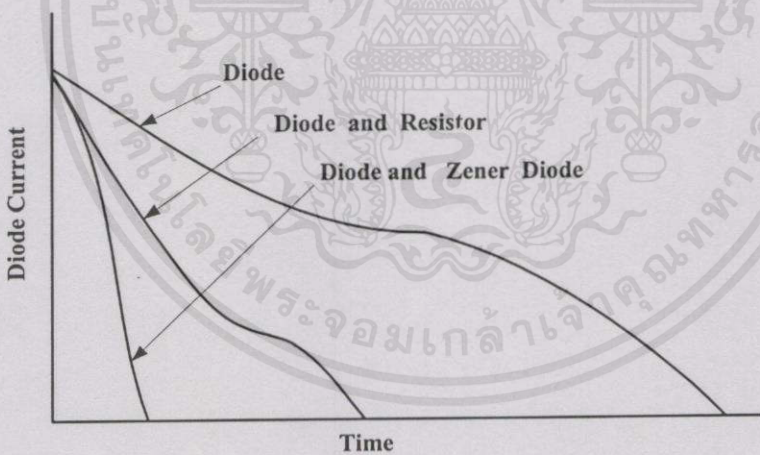
### 3. Zener Diode Suppressor

บ่อยครั้งที่พบว่ามีการต่อซีเนอร์ไดโอดอนุกรมกับไดโอดตั้งในภาพที่ 2.44 ถ้าเปรียบเทียบกับใน 2 กรณีแรก กระแสไหลวนจะลดลงได้เร็วกว่า หลังจากที่ทรานซิสเตอร์ turn off ไปแล้ว



ภาพที่ 2.44 แสดงการใช้ Zener Diode Suppressor

ด้วยวิธีนี้จะพบว่าข้อดีคือแรงดันไฟฟ้าที่ขาCollectorจะมีค่าเป็นบวกและมีค่าเท่ากับแรงดัน Zener โดยไม่ขึ้นอยู่กับกระแส ซึ่งจะทำให้หาค่าแรงดัน Vcc สูงสุดได้ง่าย และการเปรียบเทียบวิธีการ Suppressor แบบต่างๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.45



ภาพที่ 2.45 เปรียบเทียบการ Suppressor ด้วยวิธีต่างๆ

#### 2.3.7 วงจรที่ใช้ขั้วสเต็ปป์มอเตอร์

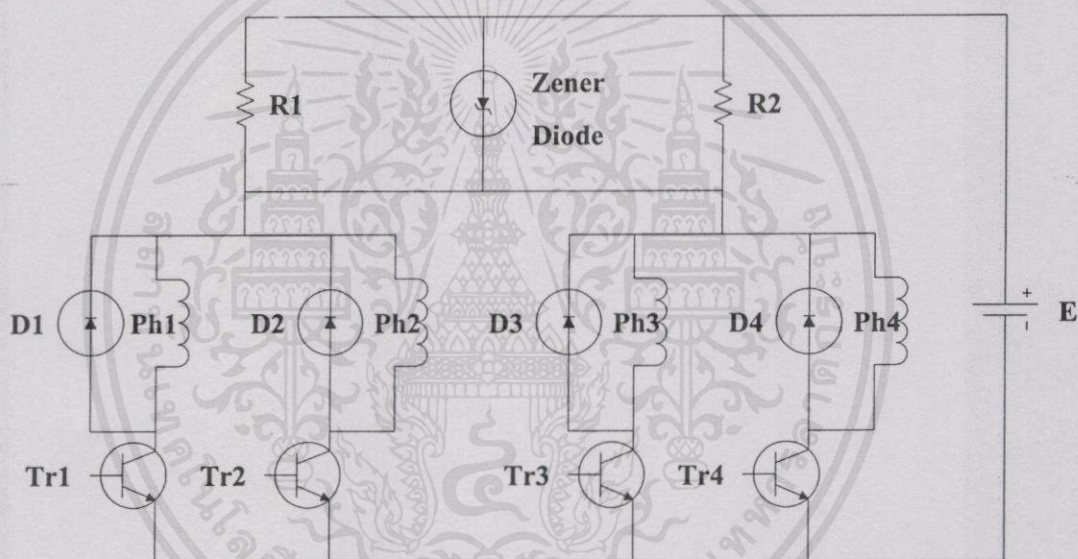
ถึงแม้ว่าสเต็ปป์มอเตอร์ ที่ใช้งานกันอยู่แพร่หลายในขณะนี้นั้นจะสามารถควบคุมตำแหน่งและทิศทางในการหมุนได้ตามต้องการก็ตาม แต่ปัญหาในการขั้วสเต็ปป์มอเตอร์ก็มีเช่นกัน

ในปัจจุบันสิ่งที่จะนำมาใช้ในการขั้วสเต็ปป์มอเตอร์พัฒนาขึ้นมาก เพื่อความสะดวกในการใช้งานและลดปัญหาหลง ซึ่งจากเดิมนั้นจะใช้อุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์กำลัง และได้ถูกพัฒนา

มาเป็น IC เพียงตัวเดียวเพื่อรองรับสัญญาณพิก้าที่ใช้ร่วมกับ I/O พอร์ต ของไมโครโพรเซสเซอร์ แต่อย่างไรก็ตามในบางครั้งวงจรถูกจำกัดต้องจ่ายกระแสสูงๆ ซึ่ง IC ไม่สามารถใช้ได้ ดังนั้นในบางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเช่นเดิม โดยวงจรในส่วนที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

### 1. วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive Circuit) [4]

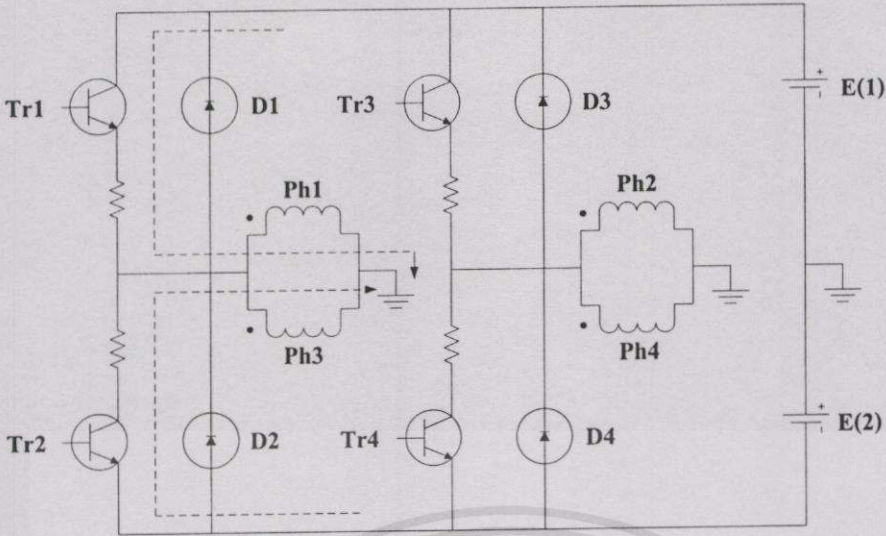
มีลักษณะแควงจรขับเป็นอิสระในแต่ละเฟส นั่นคือจะใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง 1 ตัว ต่อ 1 เฟส ในการขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์ โดยในภาพที่ 2.46 จะแสดงตัวอย่างของวงจรขับแบบขั้วเดียวที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์ชนิด 4 เฟส ซึ่งมีการต่อ Zener Diode Suppressor อยู่ด้วย เพื่อให้กระแสไหลวนในแต่ละลูปของชุดขับแต่ละชุด มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2.46 ตัวอย่างวงจรขับแบบขั้วเดียวที่ใช้กับสแต็ปปั๊มมอเตอร์ชนิด 4 เฟส ซึ่งมีการต่อ Zener Diode Suppressor

### 2. วงจรขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive Circuit) [4]

การต่อในลักษณะนี้ จะทำให้ควบคุมทิศทางการหมุนของสแต็ปปั๊มมอเตอร์ให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น กล่าวคือใน 1 เฟส จะใช้ทรานซิสเตอร์ถึง 4 ตัว คือทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในชุดที่หนึ่ง ควบคุมให้หมุนแบบตามเข็มนาฬิกา และทรานซิสเตอร์อีก 2 ตัวในชุดที่สอง ควบคุมให้หมุนแบบทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการส่งสัญญาณขับจำเป็นต้องส่งสัญญาณเป็นแบบคู่ ซึ่งตัวอย่างของวงจรขับแบบสองขั้ว ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.47



ภาพที่ 2.47 ตัวอย่างวงจรขับแบบสองขั้วที่ใช้กับสเต็ปิ่งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

เนื่องจากการหมุนในทิศทางใดทิศทางหนึ่งต้องใช้ทรานซิสเตอร์ถึง 2 ตัว จึงทำให้เหมาะจะใช้กับสเต็ปิ่งมอเตอร์ขนาดแรงดันสูงๆมากกว่าแบบขั้วเดียว เนื่องจากแรงดันขณะหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ของแต่ละเฟสนั้นถูกจำกัดด้วยค่า  $V_{cc}$  ดังนั้นเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ก็จะสามารถทนแรงดันได้สูงขึ้นเป็น 2 เท่า นั่นเอง

## 2.4 ระบบนิวแมติก

สาเหตุสำคัญที่มีการนำเอาระบบนิวแมติกมาใช้ในงานอุตสาหกรรม [8] เนื่องจาก

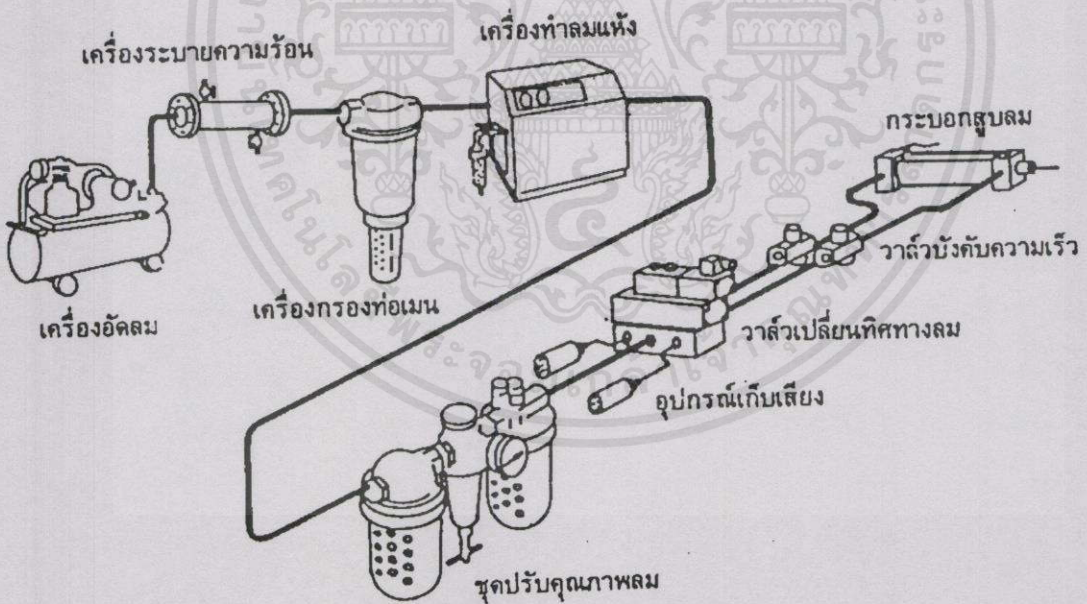
- ระบบนิวแมติกที่ใช้งานทั่วไปไม่มีการระเบิด หรือ ลูกไหม้เป็นเปลวไฟ
- ระบบนิวแมติกเมื่อใช้งานแล้วจะปล่อยลมทิ้งออกไป จึงไม่จำเป็นต้องเดินท่อลมกลับมาใช้อีก
- ระบบนิวแมติกสามารถนำลมที่อัดตัวแล้วไปไว้ในถังและนำไปใช้งานได้เลย
- อุปกรณ์ใช้งานในระบบนิวแมติกมีความปลอดภัยถ้าใช้งานเกินกำลัง
- ระบบนิวแมติกสามารถปรับความเร็วในการทำงานได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว
- สามารถปรับความดันลมอัดให้มีค่ามากขึ้นได้ตามต้องการ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความดัน
- ความสะอาดของระบบนิวแมติกดีมาก เพราะมีชุดปรับคุณภาพลมก่อนนำไปใช้งาน
- ระยะเวลาของก้านสูบสามารถปรับให้สั้นหรือยาวได้ตามความต้องการ

สามารถทำงานได้ที่ระดับความแตกต่างของอุณหภูมิสูง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าระบบนิวแมติกมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อเสียอยู่ดังนี้

- ในโรงงานอุตสาหกรรมบางครั้ง มีการเพิ่มอุปกรณ์นิวแมติกเข้ามาในวงจร โดยไม่คำนึงถึงความสามารถของเครื่องอัดลม ซึ่งอาจจะทำให้เครื่องจักรทำงานคลาดเคลื่อนได้ และในบางครั้งถ้ากระบอกสูบอยู่ห่างจากอุปกรณ์ควบคุมเกินกว่า 5 m จะทำให้เกิดปัญหาในการทำงานของกระบอกสูบ
- ลมที่ได้จากการอัดตัวในระบบนิวแมติกจะมีความชื้นปนอยู่ และเมื่อความดันลดลงจะทำให้เกิดหยดน้ำขึ้นได้
- การทำงานของระบบนิวแมติกมักจะมีเสียงดัง เพราะจะต้องมีการระบายลมทิ้งออกสู่บรรยากาศ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เก็บเสียง
- ความดันของลมอัดในระบบนิวแมติกจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงความดันก็จะสูง และถ้าอุณหภูมิต่ำความดันก็จะต่ำลงด้วย
- ถ้าต้องการแรงในการใช้งานมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบจำเป็นต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตขึ้น เพื่อที่จะให้ได้แรงตามความต้องการ ซึ่งกระบอกสูบในระบบนิวแมติกมีขีดจำกัด

#### 2.4.1 อุปกรณ์ทั่วไปในระบบนิวแมติก



ภาพที่ 2.48 อุปกรณ์ในแต่ละขั้นตอนของระบบนิวแมติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ขออนุญาต  
 - เครื่องอัดลม (Air Compressor) คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นลมอัดที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ แบ่งขนาดความสามารถของเครื่องอัดลมออกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดเล็ก, ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถของเครื่องอัดลมขนาดต่างๆ

ขนาด	ระบบระบายความร้อน	กำลังเครื่องอัดลม
เล็ก	อากาศ	0.2 – 7.5 kW
กลาง	อากาศและน้ำ	7.5 – 75 kW
ใหญ่	น้ำ	75 kW ขึ้นไป

- เครื่องระบายความร้อนลมอัด(Heat Exchanger) เนื่องจากเครื่องอัดลมจะดูดเอาอากาศที่ความดันบรรยากาศด้วยปริมาตรประมาณ 8 ลูกบาศก์เมตร ไปอัดให้มีความดันสูงขึ้น 7- 10 บาร์ ให้เหลือปริมาตรอากาศเพียง 1 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นอากาศที่มีความดันสูงนี้จะมีอุณหภูมิสูง ถ้าใช้ลมอัดนี้ไปใช้งานโดยตรงจะสร้างความเสียหายให้แก่ซีลต่างๆของอุปกรณ์ จึงจำเป็นจะต้องลดอุณหภูมิของลมอัดด้วยเครื่องระบายความร้อน

- เครื่องกรองท่อเมน(Main Air Filter) จะเป็นตัวกรองฝุ่นละออง สนิม และน้ำที่มีปะปนมากับลมอัดให้สะอาดก่อนนำไปใช้งานและก่อนที่จะไปใช้กับเครื่องจักรในระบบนิวแมติก

- เครื่องทำลมให้แห้ง(Air Drier) ลมอัดที่ออกจากเครื่องอัดจะมีความชื้นปนอยู่มาก ดังนั้นจำเป็นจะต้องทำลมอัดให้เย็นลงเพื่อจะดูดเอาความชื้นออกจากลมอัด หรืออาจใช้สารเคมีในการจับความชื้นออกจากลมอัดก็ได้ ความชื้นที่ถูกดูดออกมาจะกลั่นตัวเป็นน้ำ และถูกทิ้งออกมานอกระบบด้วยกับดักน้ำ(Trap)

- กรองลม(Air Filter) จะทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องกรองลมในท่อเมน เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ลม ในกรณีที่ไม่มีเครื่องทำลมให้แห้ง ตัวกรองลมนี้จะทำหน้าที่ดักน้ำที่ปนมากับลมด้วย

- วาล์วลดความดัน(Pressure Reducing Valve) เครื่องอัดลมจะทำหน้าที่อัดลมไว้ในถังพักให้มีความดันอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าความดันนี้จะมีค่ามากกว่าความดันใช้งานเล็กน้อย ดังนั้นในการใช้งานจึงจำเป็นจะต้องลดค่าความดันลงมาโดยใช้วาล์วลดความดันทำหน้าที่ดังกล่าว

- อุปกรณ์ผสมน้ำมันหล่อลื่น(Oil Lubricator) เนื่องจากในอุปกรณ์ระบบนิวแมติกส่วนใหญ่จะต้องมีการหล่อลื่นชิ้นส่วนภายใน จึงจำเป็นที่จะต้องให้น้ำมันหล่อลื่นปนไปกับลมอัดเพื่อทำการหล่อลื่น แต่ในงานบางประเภทของระบบนิวแมติกห้ามมีน้ำมันหล่อลื่นปนไปกับลมอัด เช่นงานด้านผลิตอาหาร หรืออุปกรณ์นิวแมติกบางประเภทก็ห้ามมีน้ำมันหล่อลื่นปนไปกับลมอัด

โดยปกติแล้ว กรองลม , วาล์วลดความดัน และอุปกรณ์ผสมน้ำมันหล่อลื่นมักจะรวมอยู่ในชุดเดียวกัน เรียกว่า ชุดปรับคุณภาพลม (Service Unit)

- อุปกรณ์เก็บเสียง(Air Silencer) ลมอัดเมื่อถูกใช้งานแล้วจะระบายทิ้งออกสู่บรรยากาศ โดยออกมาทางรูระบาย ถ้าไม่มีตัวเก็บเสียงมาติดตั้งที่รูระบายแล้ว เมื่อลมอัดถูกระบายทิ้งออกสู่บรรยากาศจะมีเสียงดังรบกวน

- วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล(Air Flow Change Valve) จะทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในระบบนิวแมติก เช่น ให้กระบอกสูบนิวแมติกเลื่อนออกหรือเลื่อนเข้า และ ให้ มอเตอร์นิวแมติกหมุนทางซ้ายหรือหมุนทางขวา วิธีการบังคับเปลี่ยนทิศทางนั้นอาจจะใช้การป้อนสัญญาณไฟฟ้าหรือการป้อนลมอัด บังคับให้เคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของลม

- วาล์วบังคับความเร็ว(Speed Control Valve) จะทำหน้าที่บังคับลมอัดให้เคลื่อนที่เร็วหรือช้า โดยการปรับปริมาตรลมอัดให้ได้มากน้อยตามความต้องการ ซึ่งมีผลทำให้ก้านสูบเคลื่อนที่ออกเร็วหรือช้า รวมทั้งการหมุนของมอเตอร์นิวแมติกด้วย บางครั้งเรียกวาล์วประเภทนี้ว่า วาล์วควบคุมการไหล(Flow Control Valve)

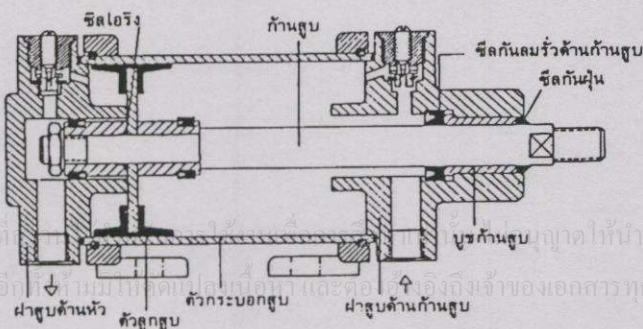
- กระบอกสูบลม(Air Cylinder) เป็นอุปกรณ์สำคัญของระบบนิวแมติก ตัวกระบอกสูบลม จะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปของพลังงานลมอัดให้อยู่ในรูปของพลังงานกล โดยทั่วไปกระบอกสูบลมอัดมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมจะเป็นกระบอกสูบทำงานแบบ 2 ทาง เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

#### 2.4.2 อุปกรณ์ทำงานของระบบนิวแมติก

อุปกรณ์ของระบบนิวแมติกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป และทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมอัดให้เป็นพลังงานกลจะถูกเรียกว่า “อุปกรณ์ทำงาน” [8] ซึ่งการเปลี่ยนรูปของพลังงานลมอัด อาจจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลในแนวเส้นตรงหรือในทิศทางการหมุนก็ได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ กระบอกสูบลมชนิดต่างๆ และอุปกรณ์ทำงานในลักษณะการหมุน

##### 1. กระบอกสูบลม

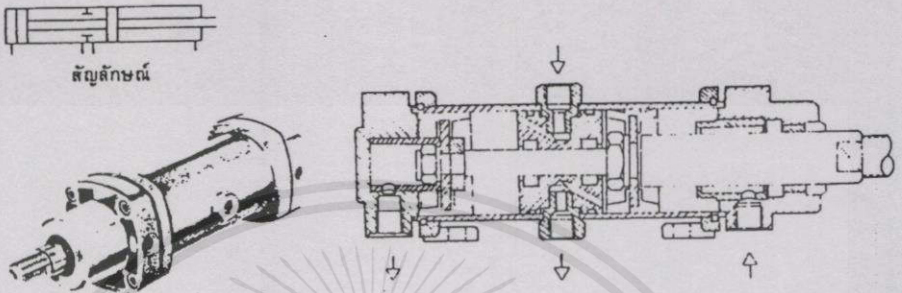
ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมอัดให้เป็นพลังงานกล ลักษณะในการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง ในสมัยก่อน งานทางอุตสาหกรรมยังใช้กลไกทางกลและทางไฟฟ้า มีความยุ่งยากในการควบคุมและปัญหาของช่วงชักที่จำกัด ดังนั้นในอุตสาหกรรมสมัยใหม่จึงพัฒนาลูกสูบลมมาใช้งาน การทำงานของกระบอกสูบลมตามภาพที่ 2.49 เป็นกระบอกสูบแบบมีระบบลมกันกระแทกเพื่อช่วยลดความเร็วหรือลดอัตราเร่งของลูกสูบเมื่อสุดระยะชัก เป็นการป้องกันการกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างลูกสูบกับฝากระบอกสูบลม สามารถทำได้โดยการปรับวาล์วเข็มที่อยู่ตรงปลายของกระบอกสูบลม



ภาพที่ 2.49 ลักษณะโครงสร้างของกระบอกสูบลม

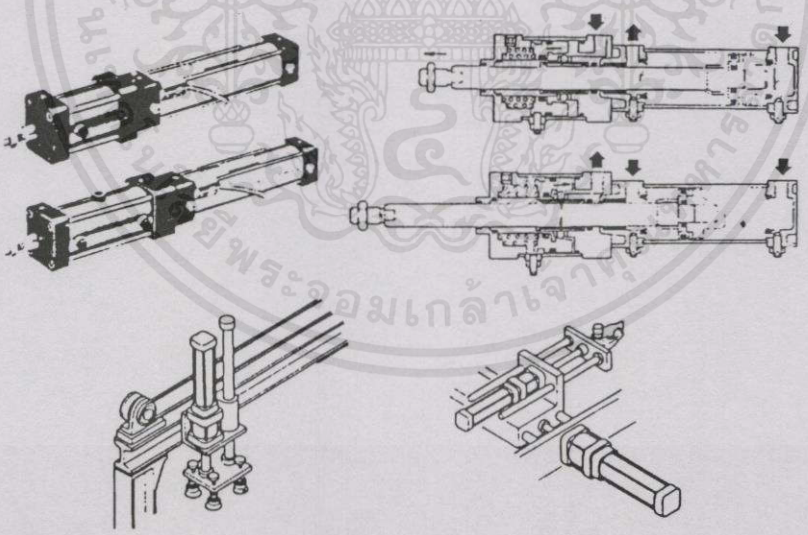


- ระบายออกสูบลมชนิดทำงานสองทางแบบสองตอน ระบายออกสูบลมชนิดนี้ถูกออกแบบมาเนื่องจากปัญหาเนื่องที่การติดตั้งระบายออกสูบลมมีจำกัด แต่แรงที่ระบายออกสูบลมจะต้องทำนั้นมีมากกว่าที่ระบายออกสูบลมชนิดสองทิศทางจะกระทำได้อีกเนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเกินไป และถ้าจะเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางให้ระบายออกสูบลมชนิดสองทิศทางให้มีขนาดโตขึ้น ก็จะมีปัญหาเรื่องเนื่องที่ในการติดตั้ง จึงจำเป็นต้องใช้ระบายออกสูบลมชนิดสองทิศทางแบบสองตอนมาใช้แทน



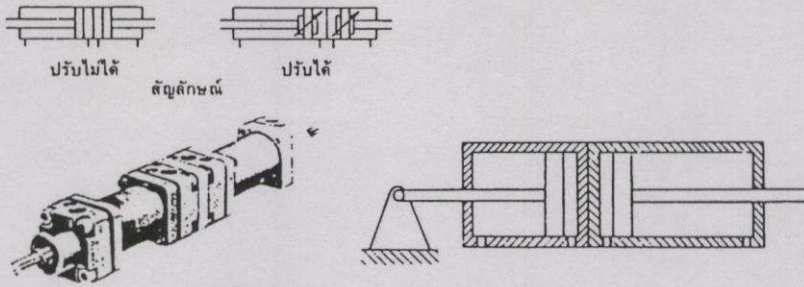
ภาพที่ 2.53 ลักษณะของระบายออกสูบลมชนิดทำงานสองทางแบบสองตอน

- ระบายออกสูบลมชนิดทำงานสองทางแบบมีเบรกก้านสูบ ระบายออกสูบลมแบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับงานที่ต้องการการหยุดของก้านสูบที่ตำแหน่งแน่นอน โดยติดตั้งชุดเบรกไว้ที่ด้านหัวของระบายออกสูบลม



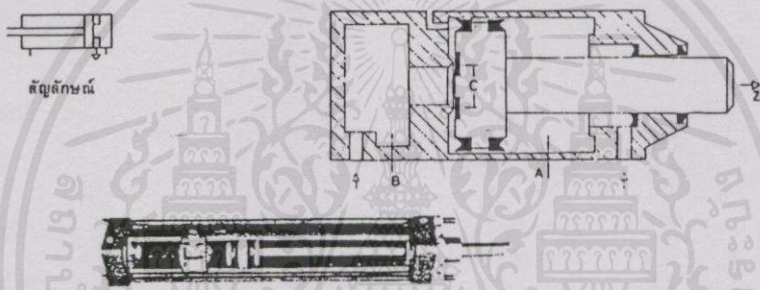
ภาพที่ 2.54 ลักษณะและการนำไปใช้งานของระบายออกสูบลมชนิดทำงานสองทางแบบมีเบรกก้านสูบ

- ระบายออกสูบลมชนิดช่วงชักหลายตำแหน่ง การออกแบบระบายออกสูบลมชนิดช่วงชักหลายตำแหน่งก็เพื่อนำไปใช้งานที่ต้องการให้ระบายออกสูบลมระบายออกเดียวกันหยุดได้หลายตำแหน่ง โดยนำเอาระบายออกสูบลมชนิดสองทางสองกระบอกมารวมกันเป็นระบายออกเดียวกัน



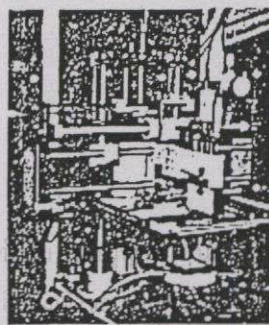
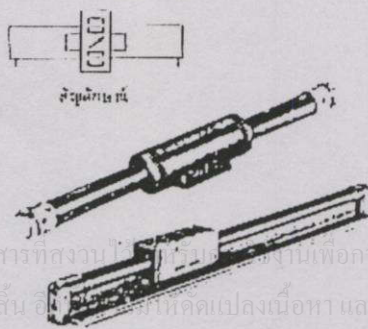
ภาพที่ 2.55 ลักษณะของกระบอกสูบชนิดช่วงชักหลายตำแหน่ง

- กระบอกสูบลมแบบกระแทก กระบอกสูบแบบนี้เหมาะกับงานประเภทตัดชิ้นงาน งานขึ้นรูปแบบชิ้นงานและงานย้ำมุม ซึ่งงานเหล่านี้ต้องการแรงกระแทกในการทำงาน ความเร็วของก้านสูบแบบนี้อยู่ระหว่าง 7.5 - 10 m/sec ซึ่งความเร็วของกระบอกสูบลมทั่วไปมีความเร็วประมาณ 1 - 2 m/sec และแรงที่กระบอกสูบแบบกระแทกทำได้อยู่ระหว่าง 25 - 500 N



ภาพที่ 2.56 ลักษณะของกระบอกสูบแบบกระแทก

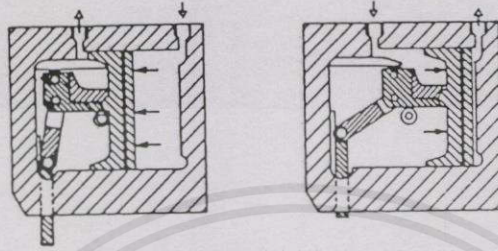
- กระบอกสูบลมแบบก้านสูบอยู่กับที่ลูกสูบเคลื่อนที่ กระบอกสูบแบบนี้ตัวก้านสูบจะอยู่กับที่ ส่วนตัวลูกสูบนั่นจะเคลื่อนที่ เหมาะกับลักษณะงานที่ต้องการช่วงชักยาวและฉี้นำกระบอกลมชนิดทำงานสองทางมาใช้จะเกิดปัญหาก้านสูบเล็กเกินไปอาจเกิดการโก่งงอขึ้นได้ ระยะชักของกระบอกสูบแบบนี้สูงสุดถึง 5 m และความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด 0.4 m/sec ซึ่ง การทำงานของกระบอกสูบแบบนี้จะใช้ลมอัดดันให้แม่เหล็กเคลื่อนตัว โดยแม่เหล็กนี้จะดึงให้ลูกสูบเคลื่อนที่ตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปทำกำไรโดยไม่ผ่านการอนุญาตจากทางต้นฉบับ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ภาพที่ 2.57 ลักษณะและการนำไปใช้งานของกระบอกสูบแบบก้านสูบอยู่กับที่

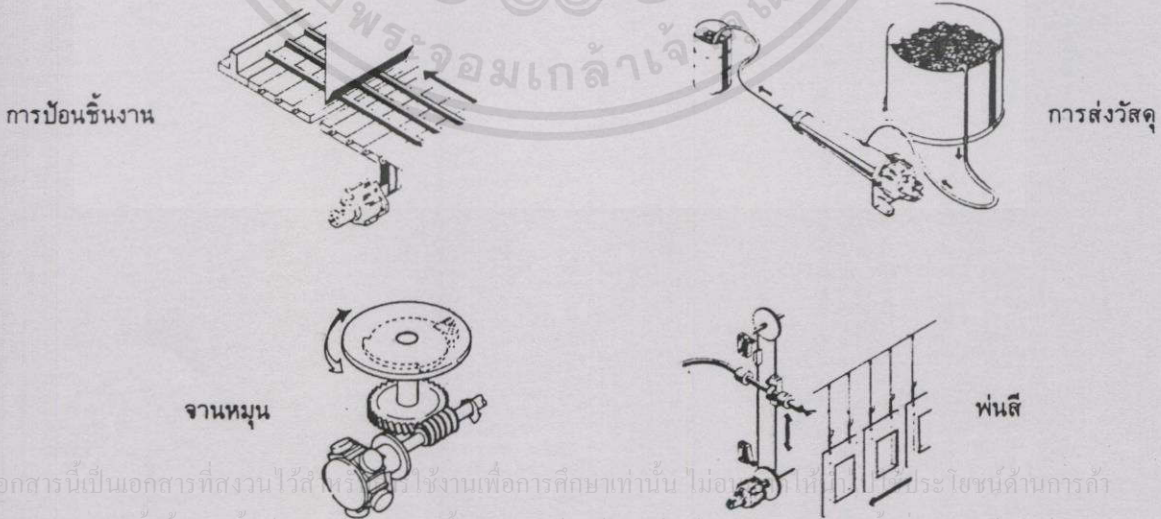
- ระเบิดอกสูบลมชนิดพิเศษที่ใช้กับลักษณะเฉพาะ ระเบิดอกสูบบแบบนี้ได้แก่ระเบิดอกสูบที่ใช้ในการจับยึดชิ้นงาน เช่น จับจิ๊กเพื่อประสานชิ้นงานเข้าด้วยกัน ตัวอย่างงานได้แก่ การประสานชิ้นงานของโครงสร้างรถยนต์ การทำงานคล้ายกับระเบิดอกสูบบแบบสองทิศทางทั่วไป แต่ลักษณะดังกล่าวไม่ต้องการช่วงชักในการทำงานยาวมากนัก แต่จำเป็นจะต้องใช้แรงในการจับยึดสูง นอกจากลักษณะที่ได้ยกตัวอย่างไว้แล้ว ยังสามารถนำไปใช้กับงานประเภทคัด ปั่น ขึ้นรูป ย้ำหมุดทำเครื่องหมายและงานเลื่อน



ภาพที่ 2.58 ระเบิดอกสูบลมลักษณะพิเศษเฉพาะงาน

2. อุปกรณ์การทำงานในลักษณะการหมุน

เราใช้ระเบิดอกสูบลมเปลี่ยนพลังงานลมอัดเป็นพลังงานกลในลักษณะเส้นตรง แต่ถ้าเราต้องการเปลี่ยนพลังงานลมอัดให้เป็นพลังงานกลในลักษณะหมุน จะต้องใช้อุปกรณ์เพื่อเปลี่ยนทิศทางของลมอัดให้เป็นการหมุน อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า มอเตอร์ลม ถ้าคุณลักษณะการใช้งานของมอเตอร์ลมก็คล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์ลมจะมีข้อดีในด้าน การทนความร้อน และ อุณหภูมิสูง โดยไม่เป็นปัญหากับการทำงาน และมีความปลอดภัยในการทำงานคือ ไม่เกิดประกายไฟฟ้าขึ้นในระหว่างการทำงาน



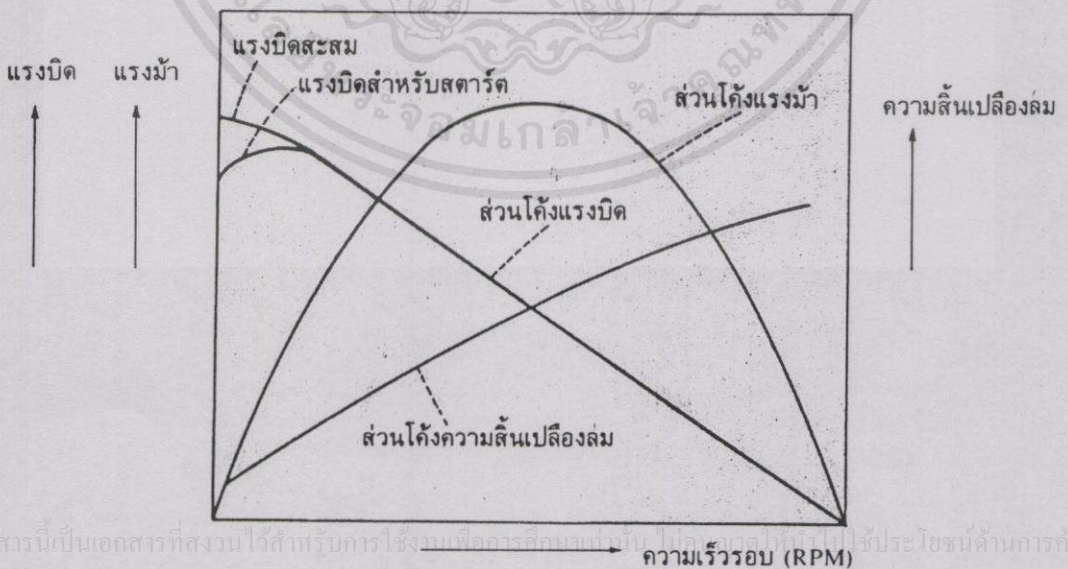
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สงวนลิขสิทธิ์ในประการใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.59 ลักษณะงานที่ใช้มอเตอร์ลมในการทำงาน

การปรับความเร็วทำได้โดยการปรับปริมาณลมให้ไหลมากหรือน้อย ตัวอย่างที่นำมาเตอร์ลมมาใช้งานได้แก่ สายพานลำเลียงเครื่องนับ เครื่องเจาะหิน เครื่องล้างรด

สมรรถนะของมอเตอร์ลม [8] ขึ้นอยู่กับการเลือกขนาดมอเตอร์ลมให้เหมาะสมกับงานโดยดูจากเส้นโค้งแสดงสมรรถนะ(performance curve) ซึ่งประกอบด้วยเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับการหมุน กำลังงานกับการหมุน และความสิ้นเปลืองอากาศกับการหมุน สมรรถนะของมอเตอร์ลมนั้นจะอยู่ระหว่าง 70 % ถึง 80 % และสามารถใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -10 °C ถึง 70 °C โดยความดันใช้งานไม่เกิน 7 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการทำงานของมอเตอร์ลมคือ

- ความดันของลมอัดที่ใช้งาน เพราะความดันนี้มีผลต่อแรงบิด กำลังงาน การหมุนอย่างสม่ำเสมอและ ความสิ้นเปลืองลม
- อัตราการไหลของลมอัดที่เข้ามอเตอร์ลม เพราะถ้าปรับให้ปริมาณลมเข้ามอเตอร์น้อยการหมุนก็ไม่ราบเรียบ
- ความดันกลับที่เกิดขึ้นในระบบ มีผลกับการทำงานของมอเตอร์ลมด้วย ในวงจรที่ออกแบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ลมควรพยายามหลีกเลี่ยงความดันกลับที่จะเกิดขึ้นกับระบบ
- เสี่ยงจากการระบายลมทิ้ง มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ลม เพราะถ้ามีการเก็บเสียงมาก ก็จะทำให้เกิดความดันกลับมากด้วย แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำการเก็บเสียง
- ความเร็วรอบต่ำ ในกรณีที่เป็นมอเตอร์ลมแบบลูกสูบ ถ้าความเร็วรอบในการทำงานต่ำกว่า 100 r.p.m. จะทำให้เกิดการกระตุกและกำลังงานจะลดลง 15 % ของกำลังที่ออกไปสูงสุด แต่แรงบิดจะสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.60 เส้นโค้งแสดงสมรรถนะของมอเตอร์ลม

- โครงสร้างมอเตอร์ลมน

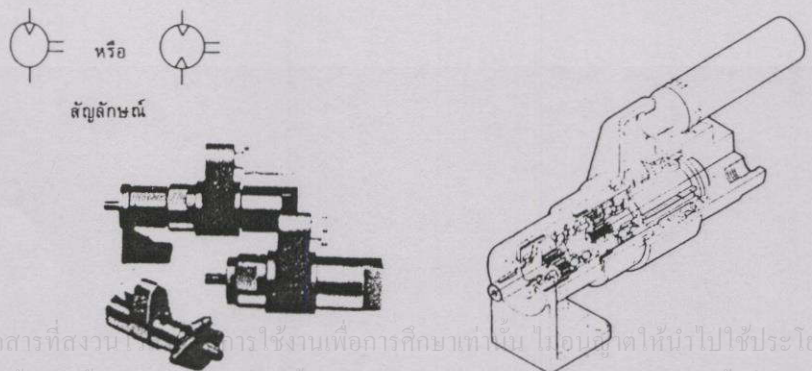
การนำมอเตอร์ลมนไปใช้งานทางด้านนิวแมติก บางครั้งจำเป็นจะต้องใช้ความเร็วรอบช้า หรือเร็ว แล้วแต่ลักษณะของงาน นอกจากนั้นถ้าพิจารณาถึงแรงบิดของงานก็อาจมีความต้องการไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบ โครงสร้างภายในของมอเตอร์ลมนให้มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้น โครงสร้างของมอเตอร์ลมน [8] จึงมีอยู่ 2 แบบคือ

1. โครงสร้างมอเตอร์ลมนที่เป็นลักษณะลูกสูบ ประกอบด้วยลูกสูบซึ่งจะรับลมอัดมาเปลี่ยนเป็นลักษณะการหมุน จำนวนลูกสูบโดยทั่วไปมีตั้งแต่ 3 ลูกสูบขึ้นไป ขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ต้องการสามารถหมุนได้ 2 ทิศทาง คือทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาก็ได้ ลักษณะงานที่สามารถนำไปใช้งานได้แก่การนำไปกวนสารเคมีที่ไวไฟ



ภาพที่ 2.61 ลักษณะมอเตอร์ลมนแบบลูกสูบ

2. โครงสร้างมอเตอร์ลมนที่เป็นลักษณะแผ่นวน จะประกอบด้วยแผ่นวนโดยรอบ การหมุนมีทั้งแบบหมุนทางเดียว และ สองทิศทาง ลักษณะที่นำไปใช้งานได้แก่ ส่วนลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.62 โครงสร้างมอเตอร์ลมนลักษณะแผ่นวน



$$F_n = 10(A.P) - F_R \quad (2.37)$$

เมื่อ  $F_n$  = แรงที่ได้สุทธิในการทำงาน (N)  
 $F_R$  = แรงที่เกิดจากความเสียดทาน (N)

เนื่องจากกระบอกลูกสูบที่ใช้งานมีอยู่หลายแบบดังที่กล่าวไว้ตอนต้น แต่ในการคำนวณนี้จะขอกกล่าวเฉพาะกระบอกลูกสูบแบบพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไป คือ กระบอกลูกสูบแบบทำงานทางเดียว กับ กระบอกลูกสูบแบบทำงานสองทาง

- สำหรับกระบอกลูกสูบชนิดทำงานทางเดียว

$$F_n = 10 \left( \frac{\pi}{4} D^2 . P \right) - (F_R + F_{sp}) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ (m)  
 $F_{sp}$  = แรงดันของสปริง (N)

- สำหรับกระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทาง(ในขณะที่ลูกสูบวิ่งออก)

$$F_n = 10 \left( \frac{\pi}{4} D^2 . P \right) - F_R \quad (2.39)$$

- สำหรับกระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทาง(ในขณะที่ลูกสูบวิ่งเข้า)

$$F_n = 10 \left( \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) . P \right) - F_R \quad (2.40)$$

เมื่อ  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (m)

ค่าความเสียดทานจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้งาน , ความเร็วของลูกสูบ , คุณภาพการหล่อลิ้น , คุณภาพของผิวภายในกระบอกลูกสูบ , ชนิดของซีลที่ใช้ทำกระบอกลูกสูบ รวมทั้งก้านสูบด้วย

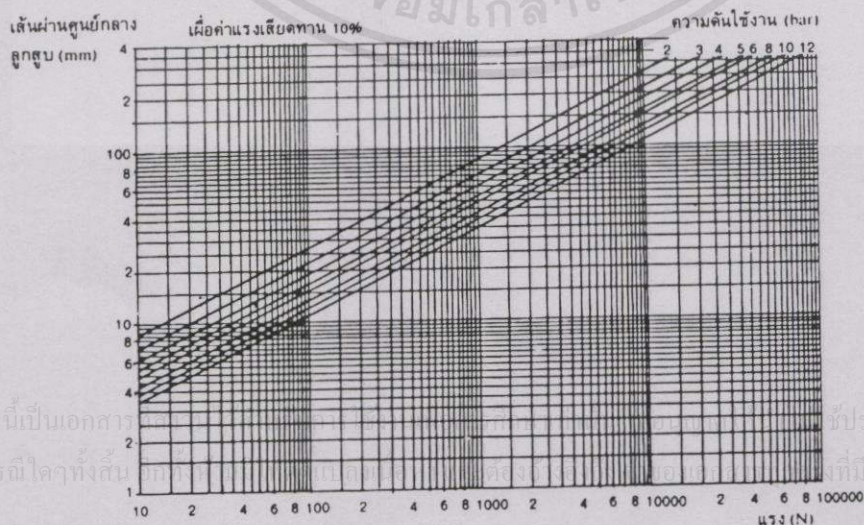
### 2.4.5 การหาแรงของกระบอกสูบลมจากตาราง

นอกจากการคำนวณแล้ว ยังมีตารางสำหรับการเปิดหาค่าแรงดันสุทธิสำหรับกระบอกสูบลม ซึ่งค่าแรงดันสุทธิที่ได้เป็นค่าที่คิดจากแรงเสียดทานที่ 10 % ของแรงดันทางทฤษฎี [8] ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางสำหรับการหาค่าแรงสุทธิสำหรับกระบอกสูบลม

เส้นผ่านศูนย์กลาง กระบอกสูบ ลม (mm)	แรงดันของกระบอกสูบลม (bar)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
25	4	9	13	17	21	24	30	34	38	42	46	50	55	60	63
35	8	17	26	35	43	52	61	70	78	86	95	104	113	122	129
40	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180
50	17	35	53	71	88	106	124	142	159	176	194	212	230	248	264
70	34	69	104	139	173	208	243	278	312	346	381	416	451	486	519
100	70	141	212	283	353	424	495	566	636	706	777	848	919	990	1059
140	138	277	416	555	693	832	971	1110	1248	1386	1525	1664	1803	1942	2079
200	283	566	850	1133	1416	1700	1983	2266	2550	2832	3116	3400	3683	3966	4248
250	433	866	1300	1733	2166	2600	3033	3466	3800	4332	4766	5200	5633	6066	6498

ถ้าไม่ใช้ตารางที่ 2.3 ในการหาค่าแรงสุทธิ อาจใช้ภาพที่ 2.63 หาแทนได้ แต่การใช้ควรต้องทราบเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบมาตรฐานที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไปก่อน โดยดูจากในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นมาตรฐานJIS และ ในตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นมาตรฐานDIN



ภาพที่ 2.63 แผนภูมิการหาแรงดันสุทธิของกระบอกสูบลม

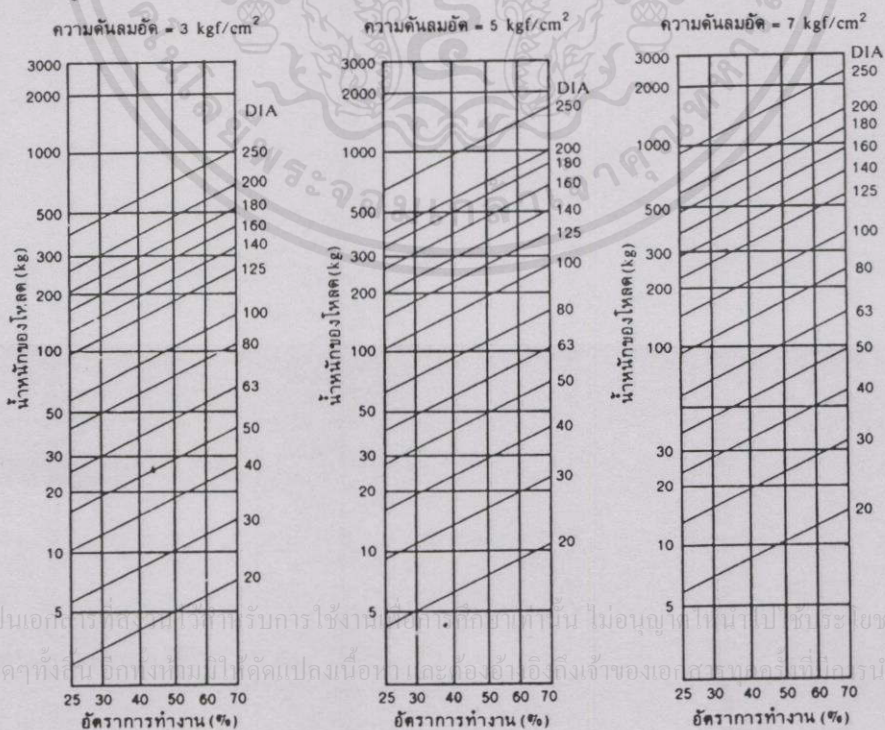
ตารางที่ 2.4 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบตามมาตรฐาน JIS (mm.)

6	10	15	20
25	30	32	40
50	63	75	80
100	125	140	150
160	180	200	230
250	300	350	400

ตารางที่ 2.5 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบตามมาตรฐาน DIN (mm.)

6	8	10	12
16	20	25	32
40	50	63	70
80	100	125	160
200	250	320	-

นอกจากนี้ ยังมีวิธีการหาขนาดของกระบอกสูบตามอัตราการทำงานของกระบอกสูบนั้นๆ เช่น อัตราการทำงาน(Load Rate) เช่น 25% , 30% , 40% , 50% , 60% และ 70% ของความสามารถของกระบอกสูบที่คำนวณออกมาได้ [8] ซึ่งดูได้จากในภาพที่ 2.64



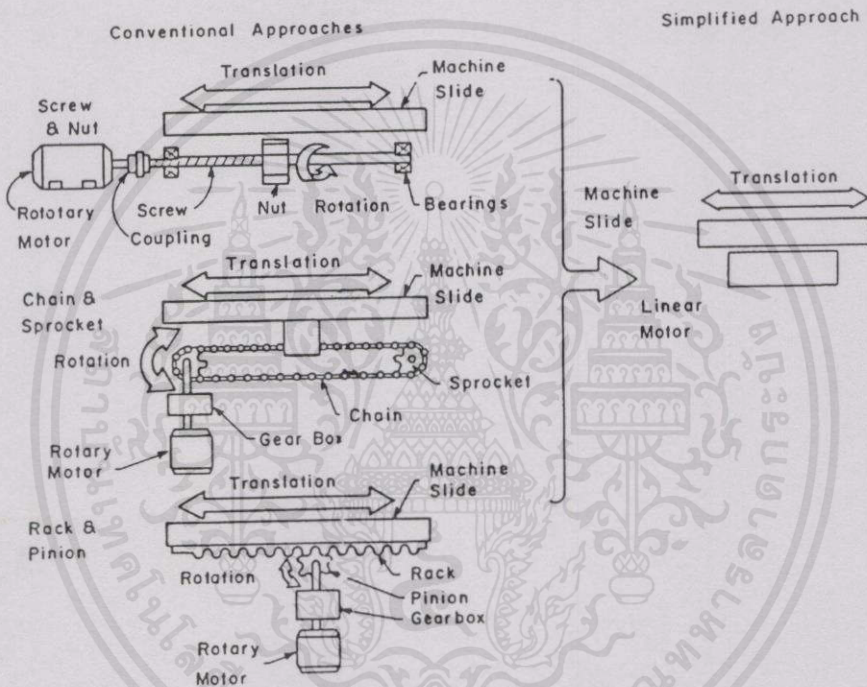
ภาพที่ 2.64 แผนภูมิการหาขนาดกระบอกสูบตามอัตราการทำงาน

# บทที่ 3

## การออกแบบสร้าง

### 3.1 แนวคิดในการออกแบบ

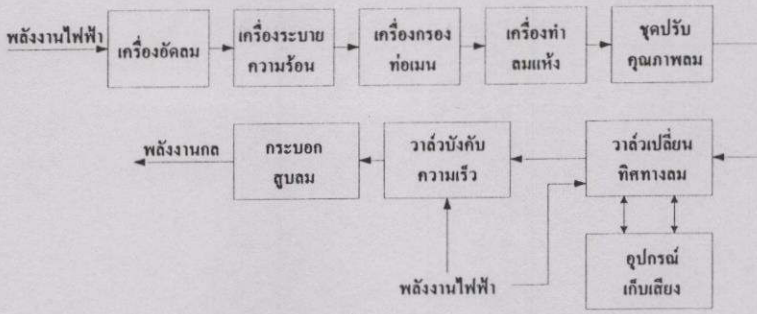
งานที่เคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นส่วนใหญ่นั้น อาศัยการหมุนของมอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดเฟลาหมุนทั่วไปแล้วแปลงการเคลื่อนที่ให้อยู่ในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ได้หลายชนิด [1] ดังในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัวเองเป็นแบบเชิงเส้น

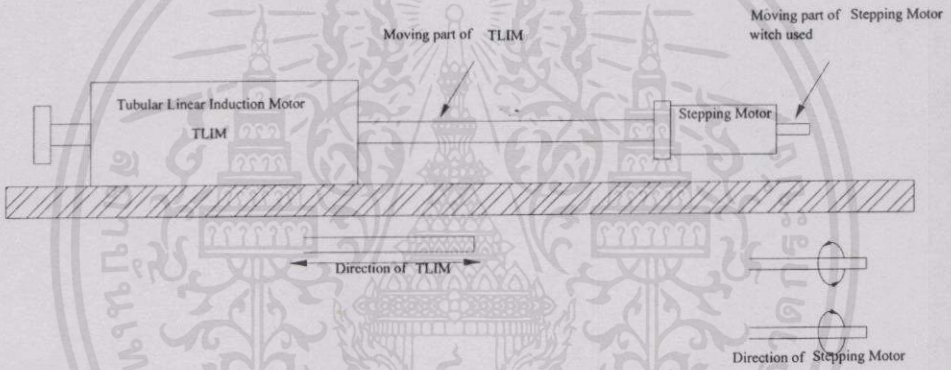
โดยเฉพาะระบบนิวแมติกนั้น จำเป็นต้องมีขั้นตอนมากมายในการแปลงจากพลังงานไฟฟ้าที่ด้านเข้า ออกมาเป็นพลังงานกลที่เคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นที่ด้านออก ดังในภาพที่ 3.2 ซึ่งทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและพลังงานที่สูญเสียไปในแต่ละขั้นตอน หากสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นได้ด้วยอุปกรณ์เพียงชุดเดียว คาดว่าจะเป็นแนวทางในการลดปัญหาดังกล่าวได้

โดยหากในชุดมอเตอร์นั้น หากทำให้เฟลาส่วนที่ใช้งานสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในลักษณะเชิงเส้นและหมุนรอบตัวเองได้ ก็จะทำให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น รวมทั้งไม่ต้องเสียค่าบำรุงรักษาในส่วนของอุปกรณ์ช่วยแปลงการเคลื่อนที่ของระบบนิวแมติกที่ต้องเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ในหลายๆด้าน



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนต่างๆของระบบนิวเมติกตั้งแต่อินพุตจนถึงเอาต์พุต

แนวทางในการออกแบบ จะใช้เพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้น และปลายเพลลาด้านหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นตัวนี้ ก็จะติดสตัปปี้งมอเตอร์ไว้เพื่อใช้เพลลาของสตัปปี้งมอเตอร์ไปจับงานในลักษณะหมุนรอบตัวเองตามตำแหน่งที่ได้กำหนด ดังโครงสร้างคร่าวๆที่เป็นแนวทางการออกแบบในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 โครงร่างในการออกแบบชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวเมติก

ขั้นตอนการออกแบบสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวเมติกนี้มี 2 ส่วน คือ ส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และส่วนของสตัปปี้งมอเตอร์โดยมีรายละเอียดดังจะได้กล่าวต่อไป

### 3.2 การออกแบบสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

โดยอาศัยทฤษฎีของมอเตอร์เชิงเส้นในบทที่ 2. โดยเฉพาะข้อมูลจากหัวข้อ 2.1.4 เรื่องวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น และ หัวข้อ 2.2.3 เรื่องวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก รวมทั้งข้อมูลที่เป็นในการออกแบบสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

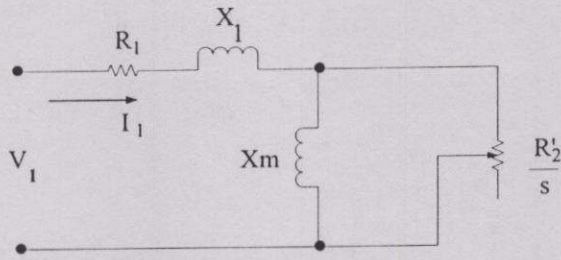
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเฟส ( $V_1$ ) 220 V.

ความถี่ไฟฟ้า ( $f$ ) 50 Hz

ความเร็วเชิงมุม ( $\omega = 2\pi f$ )	314.16 rad/sec
จำนวนเฟส (m)	3 เฟส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนปฐมภูมิ ( $D_o$ )	0.031 m
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดปฐมภูมิ ( $D_{avp}$ )	0.00163 m
จำนวนรอบ/ขั้ว ( $n$ )	80 รอบ
จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก ( $p$ )	2 คู่ขั้ว
Pole Pitch ( $\tau$ )	0.115 m
Slot Pitch ( $t_c$ )	0.038 m
Coil Pitch ( $C_c$ )	0.0383 m
Slot Width ( $w$ )	0.0127 m
Slot Depth ( $t$ )	0.0382 m
สล็อต/โพล/เฟส ( $q$ )	1
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของส่วนทุติยภูมิ ( $D_{avs}$ )	0.025 m
ความยาวของส่วนทุติยภูมิ (Secondary Length)	1.2 m
ความหนาของส่วนทุติยภูมิ ( $d$ )	0.001 m
ช่องอากาศทางกล ( $g_m$ )	0.003 m
ช่องว่างอากาศทางแม่เหล็ก ( $g = g_m + d$ )	0.004 m
จำนวนรอบขดลวดต่อเฟส ( $N$ )	320 รอบ
Copper Volume Resistance ( $\rho_c$ )	$2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m^3$
Aluminium Volume Resistance ( $\rho_{Al}$ )	$3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m^3$
Secondary Part Surface Resistance ( $\rho_r = \rho_{Al} / d$ )	$3 \times 10^{-5} \Omega \cdot m^2$
Primary Winding Distribution factor ( $K_w$ )	0.9
Slot Filling Factor ( $K_f$ )	0.5
$K_p$ ( $K_p = t_c / w$ )	2.99
$K_d$ ( $K_d = t / w$ )	3
$\beta$ ( $\beta = C_c / \tau$ )	0.33
$\lambda_s$ ( $\lambda_s = \frac{K_d}{12} (1 + 3\beta)$ )	0.5
$\lambda_d$ ( $\lambda_d = \frac{5g/w}{(5 + 4g)/w}$ )	0.004
$\lambda_c$ ( $\lambda_c = \lambda_s + \lambda_d$ )	0.504

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นำไปใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง (5+4g)/w ให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 วงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่ใช้ในการออกแบบ

จากข้อมูลที่มี และวงจรเสมือนในภาพที่ 3.4 ซึ่งนำมาจากหัวข้อ 2.2.3 นั้น ในการพิจารณาจะไม่คิดเรื่องผลกระทบที่ผิวคานทุติยภูมิ, ใช้งานที่ความเร็วต่ำ และ ให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว ซึ่งจะหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

- ความต้านทานด้านปฐมภูมิ หาได้จากสมการที่ 2.16 คือ 
$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q K_p^2 m^2 D_{avp} N^2}{K_f K_d p \tau^2}$$

ดังนั้น 
$$R_1 = \frac{\pi(2 \times 10^{-8})(1)(2.99^2)(3^2)(0.00163)(320^2)}{(0.5)(3)(2)(0.115^2)}$$
  

$$= 0.021 \Omega$$

- รีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านปฐมภูมิ หาได้จากสมการที่ 2.17 คือ 
$$X_1 = \frac{2\pi\mu_0 \omega D_{avp} \lambda_c N^2}{pq}$$

ดังนั้น 
$$X_1 = \frac{2\pi(4\pi \times 10^{-7})(31416)(0.00163)(0.504)(320^2)}{(2)(1)}$$

$$= 0.104 \Omega$$

- ความต้านทานด้านทุติยภูมิ หาได้จากสมการที่ 2.18 คือ 
$$R_2' = \frac{6\pi D_{avs} \rho_{r'}}{\tau p} (K_w N)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ดังนั้น 
$$R_2 = \frac{6\pi(0.025)(3 \times 10^{-5})}{(0.115)(2)} \times (0.9 \times 320)^2$$

$$= 5.098 \Omega$$

- ดีเทอร์มิแนนต์ด้านทุติยภูมิ หาได้จากสมการที่ 2.19 คือ  $X_2' = 0$

- แมกนีไทซ์รีแอคแตนซ์ หาได้จากสมการที่ 2.20 คือ  $X_m = \frac{6\mu_0\omega\tau}{\pi^2} (K_w N)^2 \left( \frac{\pi D_0}{pg} \right)$

$$\text{ดังนั้น} \quad X_m = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(31416)(0.115)}{\pi^2} \times (0.9 \times 320)^2 \left( \frac{\pi \times 0.031}{2(0.004)} \right)$$

$$= 27.877 \Omega$$

- Goodness Factor หาได้จาก สมการที่ 2.25 คือ  $G = X_m / R_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad G = \frac{27.877}{5.098} = 5.468$$

เงื่อนไขการออกแบบที่เหมาะสมกำหนดให้

$$S \cdot G = 1 \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad S &= 1/G \\ &= 1 / 5.468 \\ &= 0.183 \end{aligned}$$

- กระแสเฟสด้านปฐมภูมิหาได้จากสมการที่ 2.22 คือ  $I_1 = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + (R_2' // jX_m)}$

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{220}{(0.021 + j0.104) + \left( \frac{5.098 \times j27.877}{5.098 + j27.877} \right)} \\ &= 220 / 5.055 \end{aligned}$$

$$= 43.521 \text{ A.}$$

**หมายเหตุ** ค่าอิมพีแดนซ์ในการคำนวณจะใช้แต่ขนาด โดยไม่นำค่ามุมมาใช้

- แรงเฉลี่ยรวมทั้ง 3 เฟส หาได้จากสมการที่ 2.21 คือ  $F_x = \frac{3 I_1^2 R_2'}{S U_s \left( \frac{1}{(S.G)^2} + 1 \right)}$

และความเร็วเชิงโครนัส ( $U_s$ ) หาได้จากสมการที่ 2.1 คือ  $U_s = 2\pi f$

ดังนั้น

$$F_x = \frac{3(43.521)^2 (5.098)}{0.183(2 \times 0.115 \times 50) \left( \frac{1}{1^2} + 1 \right)}$$

$$= 6882.4 \text{ N}$$

- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของส่วนทุติยภูมิ ( $U$ ) คำนวณได้จาก

$$U = (1 - S) U_s \tag{3.2}$$

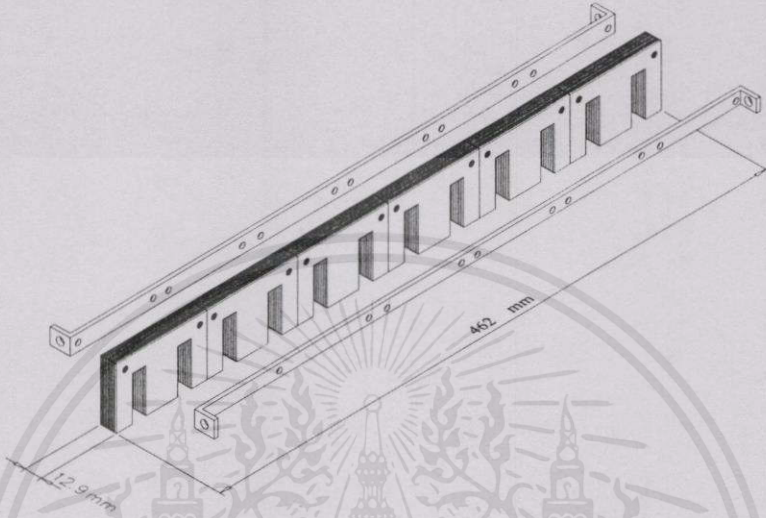
$$= (1 - 0.183)(2 \times 0.115 \times 50)$$

$$= 9.4 \text{ m/sec}$$

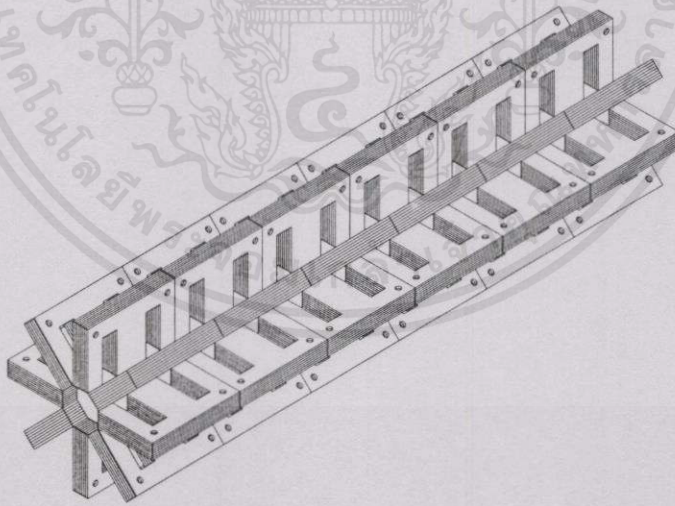
การออกแบบนี้ จะไม่นำผลกระทบจากส่วนปลายและผลกระทบจากขอบด้านข้างมาเกี่ยวข้อง เพื่อทำให้ง่ายและสะดวกในการคำนวณ โดยค่าแรงผลักและความเร็วของส่วนทุติยภูมิที่ได้จากการออกแบบนี้เมื่อสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าขึ้นมา จะได้ค่าที่น้อยกว่าที่ออกแบบ เนื่องจากการสูญเสียในส่วนต่างๆ, คุณภาพของวัสดุที่ใช้ และความคลาดเคลื่อนทางกลในส่วนต่างๆ ซึ่งการสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนี้จะมีข้อจำกัดในหลายส่วนด้วยกัน คือ ความยาวของขั้วแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของแกนเหล็กรูปตัว E ที่ต้องมีพื้นที่ให้ใส่ขดลวดได้เพียงพอ ทำให้ต้องใช้แกนเหล็กตัว E ขนาดนี้ ความยาวของขั้วแม่เหล็กจึงต้องมากตาม ขนาดของท่ออะลูมิเนียมที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำซึ่งเคลือบผิวของท่อเหล็กทุติยภูมิจะมีผลต่อช่องว่างอากาศ และความหนาของท่อเหล็กทุติยภูมิซึ่งหนาพอสมควรทำให้มีน้ำหนักมาก จึงมีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่

### 3.2.1 โครงสร้างของส่วนอยู่กับที่(Stator)

เนื่องจากข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำโครงสร้างให้เป็นแผ่นเหล็กที่มีลักษณะโค้งเป็นวงกลมได้เอง ดังนั้นจึงใช้แกนเหล็กลามิเนต รูปตัว E ที่ใช้ในหม้อแปลงมาประกอบกันตามภาพที่ 3.5 และนำมาประกอบเป็นลักษณะแกนกระบอกกลม ซึ่งมีทั้งหมด 8 ชิ้น ดังภาพที่ 3.6

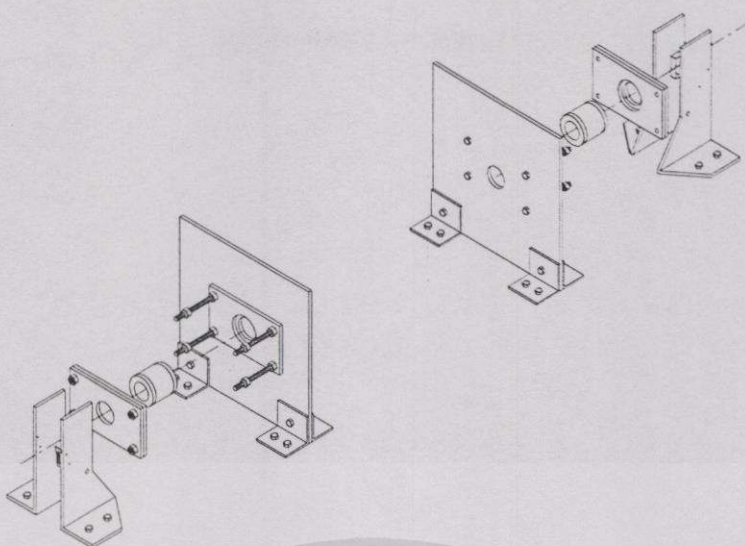


ภาพที่ 3.5 การประกอบแผ่นเหล็กลามิเนตเพื่อให้เกิดเป็นร่องสลีต



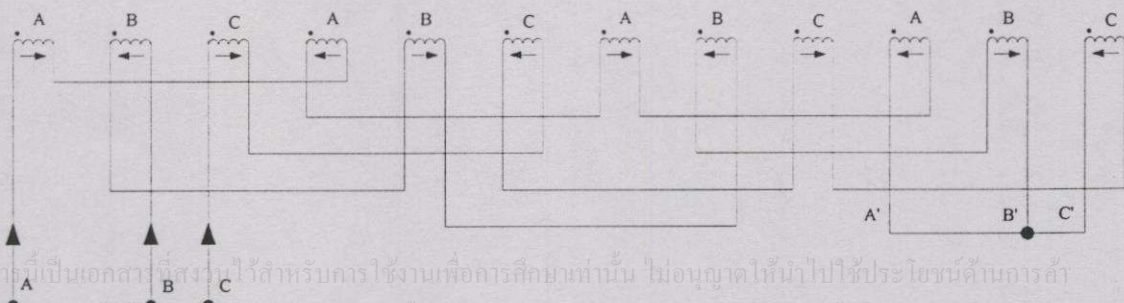
ภาพที่ 3.6 การประกอบโครงสร้างของส่วนที่อยู่กับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
จากนั้นนำชุดลิเนียร์แบริงสองชุดมาประกบเข้าด้วยกันดังภาพที่ 3.7 โดยพื้นที่ว่างตรงกลาง  
ระหว่างลิเนียร์แบริงทั้งสองชุด จะนำชุดแกนเหล็กรูปตัว E ที่ประกอบเสร็จแล้วมาใส่



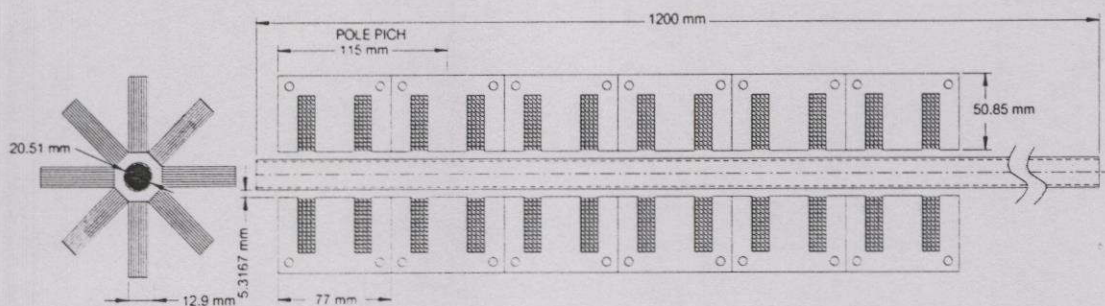
ภาพที่ 3.7 ชุดลิเนียร์แบร์ริงของมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

จากโครงสร้างของ Stator ที่ออกแบบเป็น 4 ขั้วแม่เหล็ก ทำให้ได้จำนวนร่อง Slot 12 ร่อง จึงมีขดลวด stator อยู่ 12 ชุด ซึ่งใช้ลวดทองแดง # 16 SWG พันจำนวน 80 รอบ (จำนวนรอบที่ไม่ทำให้แกนเหล็กที่นำมาใช้เกิดการอิ่มตัว) เมื่อนำขดลวดใส่ใน Slot แล้ว จะทำการต่อขดลวดในลักษณะเดียวกับมอเตอร์เหนียวนำ ชนิด 3 เฟส 4 ขั้ว ในรูปแบบคั่นต่อคั่น และ ปลายต่อปลาย โดยจ่ายไฟเข้าที่ ขั้ว A, B และ C ซึ่งเป็นขั้วต้นของแต่ละเฟส และ นำขั้ว A', B' และ C' ซึ่งเป็นขั้วปลายของแต่ละเฟสมาต่อรวมกันแล้วต่อสายออกมาเป็นสายนิวทรัล ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.8 ซึ่งเป็นการต่อขดลวด 3 เฟส ในแบบสตาร์ ทำให้กระแสเฟสมีค่าเท่ากับกระแสไลน์ และแรงดันเฟส มีค่าเท่ากับแรงดันไลน์/ $\sqrt{3}$  เนื่องจากมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้นนี้มีการเคลื่อนที่ในระยะสั้นๆ แล้วหยุด จึงเปรียบเสมือนมอเตอร์ที่เพิ่งเริ่มสตาร์ทเสมอในแต่ละครั้งที่มันทำงาน ดังนั้นการต่อขดลวดแบบสตาร์จึงมีความเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

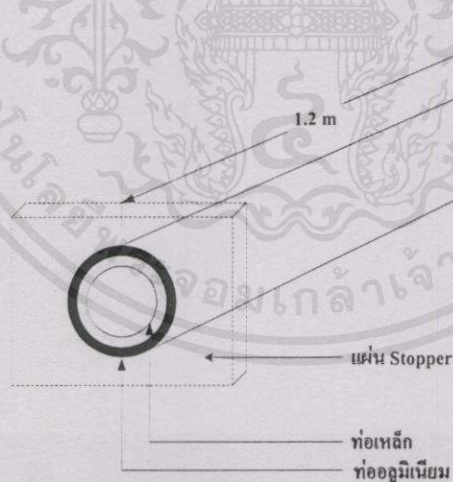
ภาพที่ 3.8 ลักษณะการต่อขดลวดของมอเตอร์เหนียวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่ใส่ขดลวดแล้วมองจากด้านข้าง

### 3.2.2 โครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่(Rotor)

โครงสร้างของRotor นั้นเป็นแท่งโลหะ 2 ชั้น คือ แกนกลางเป็นท่อเหล็ก(เป็น back iron) และถูกสวมทับด้วยท่ออลูมิเนียมที่ชั้นนอก(เป็นตัวนำ) ซึ่งการสวมทับนั้นต้องแน่นพอดี โดยความยาวของชุด Rotor มีความยาว 1.2 m นอกจากนั้นที่ปลายแกนของ Rotor จะมีแผ่น Stopper ไว้เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของ Rotor โดยเป็นตัวที่ไปชนกับลิมิตสวิทช์ เพื่อตัดไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์เมื่อเคลื่อนที่จนสุดที่ด้านใดด้านหนึ่งแล้ว และยังช่วยลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นอีกด้วย

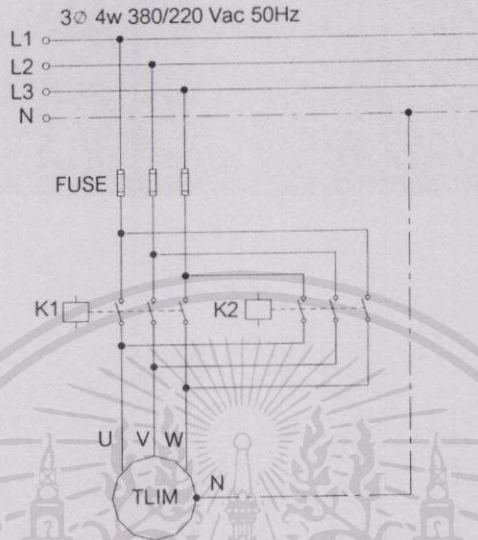


ภาพที่ 3.10 แสดงส่วนเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

### 3.2.3 วงจรควบคุมและวงจรกำลัง

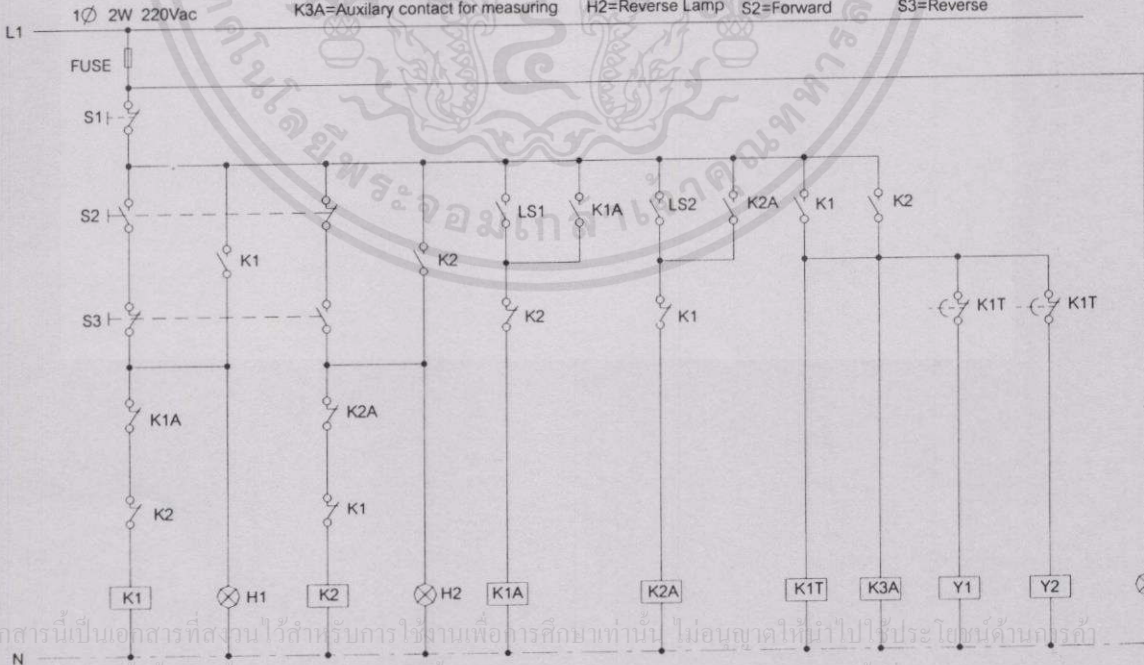
นอกจากนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้นนี้ ไม่อนุ เนื่องจากRotorมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นคือเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือขวาในระยะสั้นๆ แล้วหยุดที่ตัวกันกระแทกด้านใดด้านหนึ่ง เหมือนกับการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบในระบบนิวแมติก ซึ่งเงื่อนไขในการทำงานไม่

จับซ้อนและไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขบ่อย จึงเลือกใช้วงจรกำลังและวงจรควบคุมที่ใช้แมคเนติก คอนแทคเตอร์เหมือนกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทั่วไป ซึ่งมีความทนทานในการใช้งาน และไม่เกิดความยุ่งยากในการซ่อมบำรุง



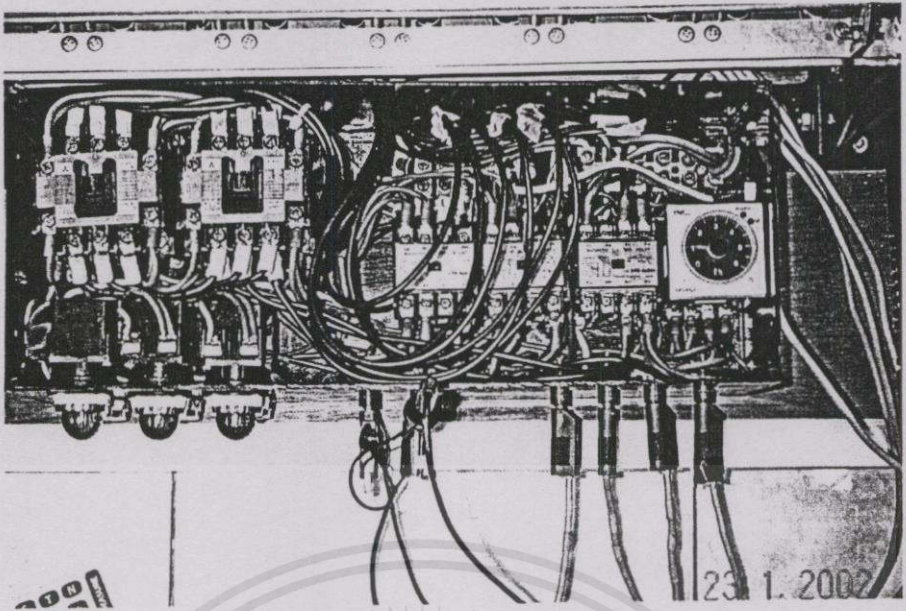
ภาพที่ 3.11 วงจรกำลังที่ใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

- K1=Forward Contactor
- K2=Reverse Contactor
- K1A=Locked Limit switch
- K2A=Locked Limit switch
- K3A=Auxiliary contact for measuring
- K1T=Timer
- Y1=Solenoid 1
- Y2=Solenoid 2
- H1=Forward Lamp
- H2=Reverse Lamp
- H3=Power on
- LS1=Limit Switch 1
- LS2=Limit Switch 2
- S1=Reset
- S2=Forward
- S3=Reverse



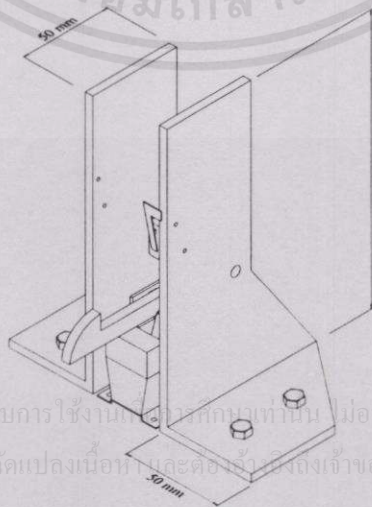
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรรมสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.12 วงจรควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ในกล่องควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

นอกจากนั้นยังมีโครงสร้างส่วนอื่นๆอีก ได้แก่ ชุด Holder ซึ่งทำหน้าที่จับยึด Rotor ไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับเมื่อวิ่งมาชนกับมัน โดยการทำงานของชุด Holder จะมีตัวเกี้ยวที่มีสปริงดึงอยู่ส่วนหลังทำให้ดันขึ้นไปยึดกับแผ่น Stopper ที่ติดกับ Rotor จึงทำให้ Rotor ไม่เกิดการสะท้อนกลับ และในขณะที่สตาร์ทมอเตอร์ ชุด Holder จะได้รับไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กดูดแกนเหล็กที่ต่ออยู่กับกระดิ่งตัวเกี้ยว เพื่อปลดล็อกให้ Rotor สามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยชุด Holder ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.14 และหลังจากนั้นจึงนำส่วนประกอบทั้งหมดของชุดมอเตอร์เชิงเส้นมาประกอบกับฐานที่เตรียมไว้



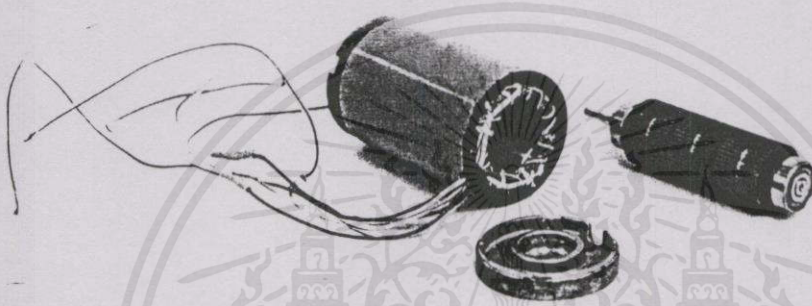
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งผู้ส่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.14 แสดงชุด Holder ที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

### 3.3 โครงสร้างในส่วนของสเต็ปปีงมอเตอร์

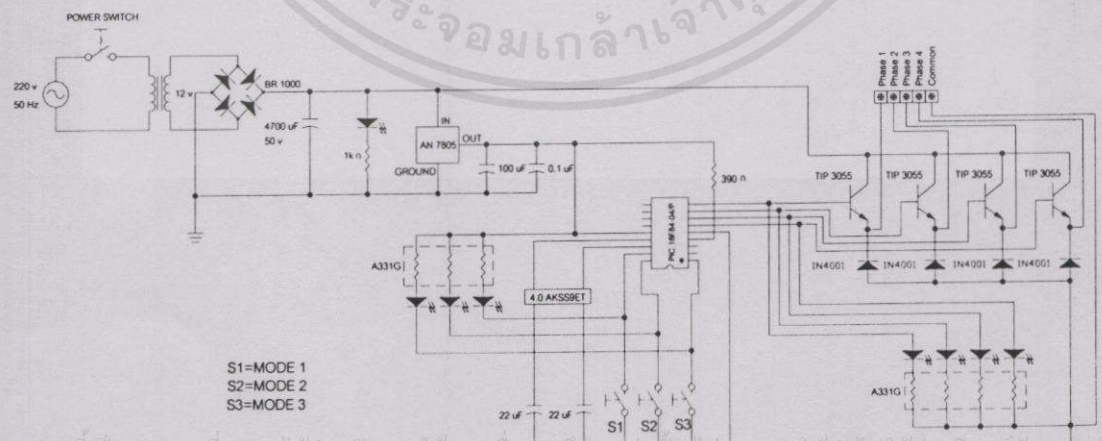
ในส่วนของสเต็ปปีงมอเตอร์นั้นได้เลือกใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งเป็นไฮบริดสเต็ปปีงมอเตอร์ 4 เฟส แบบหลายสแตค เนื่องจากโครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์มีความละเอียดอ่อนมาก ถ้าสร้างเอง อาจเกิดความคลาดเคลื่อน และ ไม่สามารถควบคุมให้ทำงานตามเงื่อนไขที่ต้องการได้ ซึ่งสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้นี้ เลือกให้มีการทำงานเป็น 3 mode เพื่อให้เกิดความชัดเจน คือ

- mode 1 ให้หมุนตามเข็มนาฬิกาไป  $180^\circ$  จากจุดเริ่มต้น
- mode 2 ให้หมุนตามเข็มนาฬิกาไป  $90^\circ$  จากจุดเริ่มต้น
- mode 3 ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาไป  $90^\circ$  จากจุดเริ่มต้น



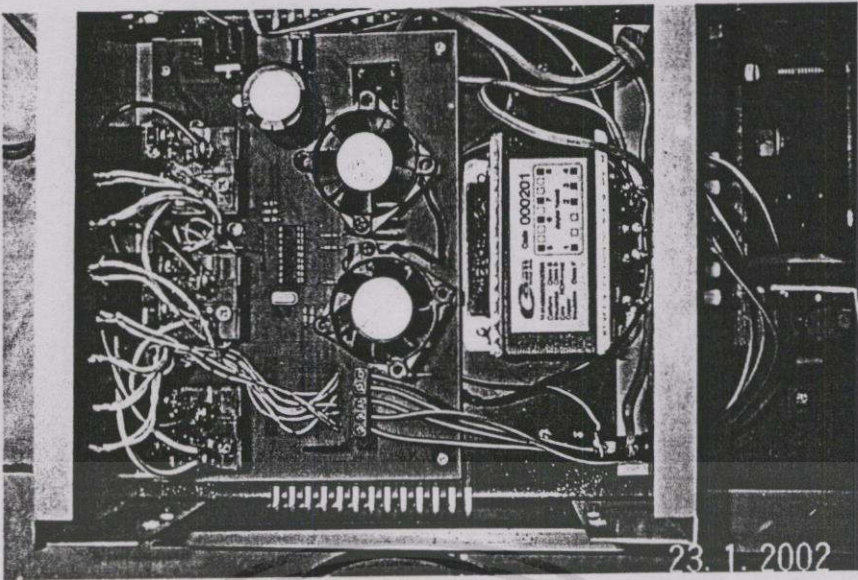
ภาพที่ 3.15 โครงสร้างของไฮบริดสเต็ปปีงมอเตอร์ 4 เฟส แบบหลายสแตค

วงจรที่ใช้ในการควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์นั้นได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.16 ซึ่งในส่วนที่เป็นตัวประมวลผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปเบอร์ PIC 16F84-04/P โดยสามารถเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการควบคุมด้วยการเขียนโปรแกรมลงไปในส่วนที่ขับเคลื่อนให้มอเตอร์จะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เบอร์ TIP 3055 ซึ่งสามารถขับสเต็ปปีงมอเตอร์ตัวนี้ได้



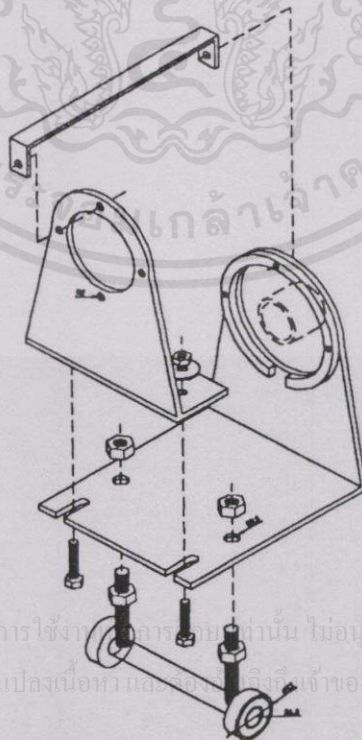
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.16 วงจรควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้งาน



ภาพที่ 3.17 แสดงอุปกรณ์ในกล่องควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์

นอกจากนั้นแล้วยังมีการสร้างชุดรองรับสแต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อให้สามารถนำไปยึดติดกับส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ซึ่งในส่วนนี้จะต้องมีล้อเพื่อรองรับน้ำหนักของตัวสแต็ปปีงมอเตอร์ด้วยเพื่อไม่ให้น้ำหนักตกลงที่ส่วนของมอเตอร์เชิงเส้น และเป็นการช่วยลดความผิด ซึ่งลักษณะของชุดรองรับสแต็ปปีงมอเตอร์ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.18

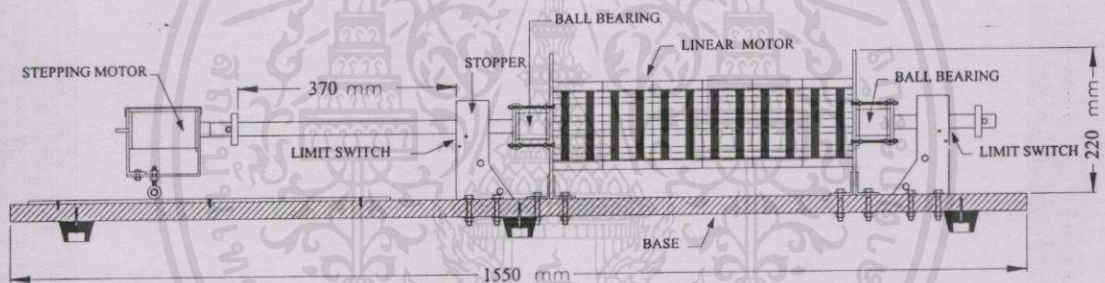


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และถือลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

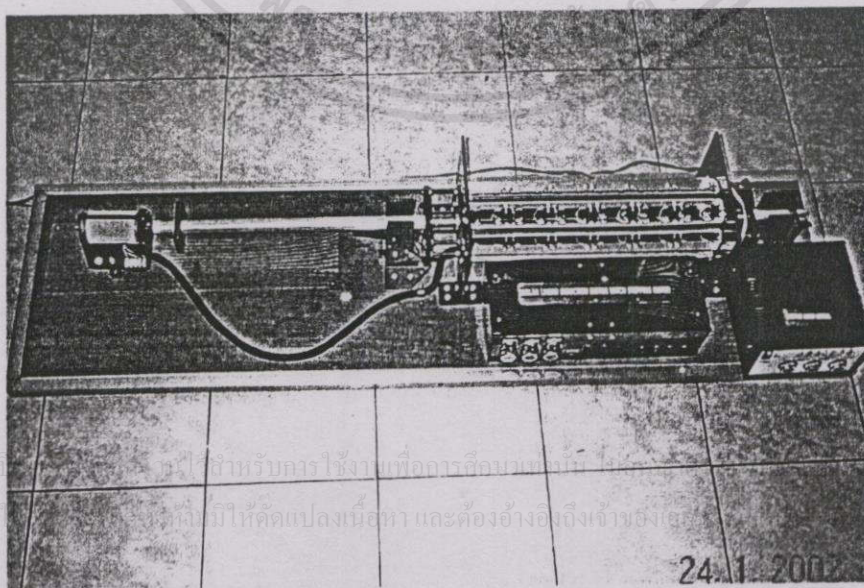
ภาพที่ 3.18 แสดงโครงสร้างชุดรองรับสแต็ปปีงมอเตอร์

### 3.4 โครงสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก

เมื่อได้ส่วนประกอบของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และ สเต็ปป์มอเตอร์ แล้ว นำทั้ง 2 ส่วนเข้ามาประกอบด้วยกัน ดังภาพที่ 3.19 และภาพที่ 3.20 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของจริง [9] ได้เป็นชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่แกนเพลานในส่วนที่ใช้งาน(เพลาของสเต็ปป์มอเตอร์) สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในลักษณะเชิงเส้น โดยอาศัยการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และสามารถเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนรอบตัวเองแบบกำหนดตำแหน่งได้ โดยอาศัยการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ และในการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นสามารถที่จะให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ทั้งสองลักษณะพร้อมกัน หรือจะให้เคลื่อนที่ครั้งละลักษณะก็ได้ แต่วัตถุประสงค์ของการสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้านี้ คือควบคุมให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นจนเสร็จสิ้นก่อน แล้วจึงควบคุมให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนรอบตัวเองแบบกำหนดตำแหน่งได้ ซึ่งคล้ายๆกับแกนกล ดังนั้นจึงควรควบคุมให้ทำงานครั้งละลักษณะ โดยคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ทำให้เราสามารถนำชุดเครื่องกลไฟฟ้านี้มาใช้ทดแทนการทำงานของระบบนิวแมติกในงานเฉพาะด้านได้ แต่จะมีข้อดีข้อเสียอย่างไรในการใช้งาน ขึ้นอยู่กับการเปรียบเทียบข้อมูลในด้านต่างๆต่อไป



ภาพที่ 3.19 โครงสร้างทั้งหมดของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.20 ภาพถ่ายมุมมองของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกที่สร้างขึ้น

24.1.2002

## บทที่ 4

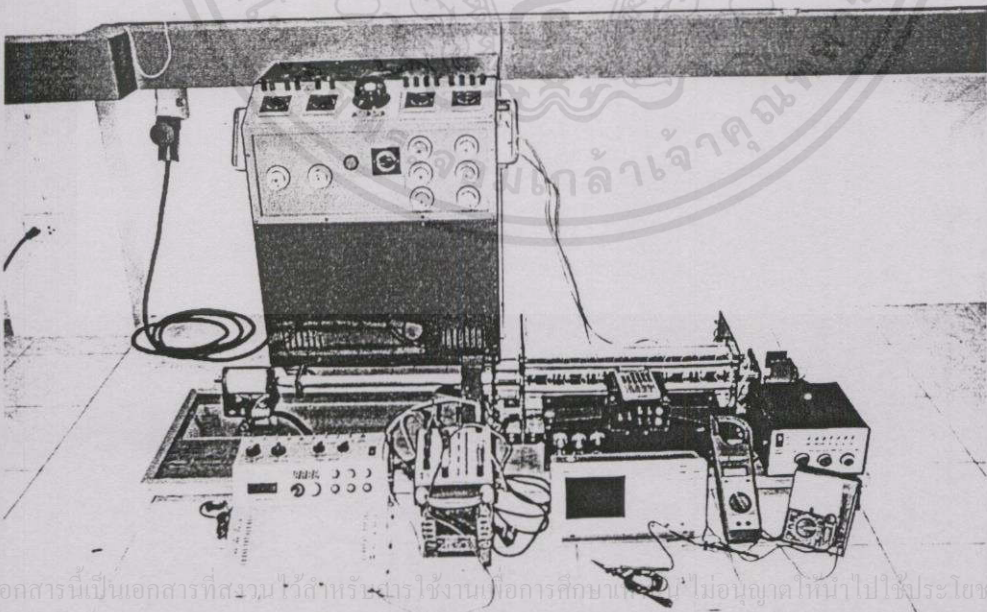
### ผลการทดลอง

เมื่อได้สร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกตามบทที่ 3 แล้วทำการทดลอง โดยการทดลองจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และ ส่วนของสแต็ปป์มอเตอร์

#### 4.1 การทดลองในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ในการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก จะทำการทดลองโดยการต่อเข้ากับชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 380/220 V. 50 Hz เนื่องจากขดลวดของมอเตอร์ต่อแบบสตาร์ จึงเลือกพิจารณาที่แรงดันเฟส ดังนั้นการทดลองในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก จะเริ่มต้นจ่ายแรงดันเฟสที่ 110 V. ไปจนถึง 220 V. โดยปรับเพิ่มขึ้นละ 10 V.

ในการทดลองจะทำการวัดค่า ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ , กระแสแต่ละเฟส และ มุมระหว่างแรงดันกับกระแสในแต่ละเฟส ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆ คือ มัลติมิเตอร์ , ดิจิตอลคลิป์แอมป์ , ดิจิตอลออสซิลโลสโคป , ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และ ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับระบบ 3 เฟส 380/220 V. 50 Hz ดังในภาพที่ 4.1

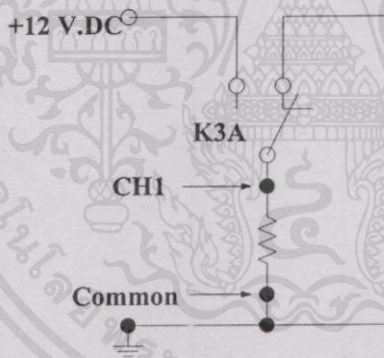


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของ 23.11.2002 นำไปใช้

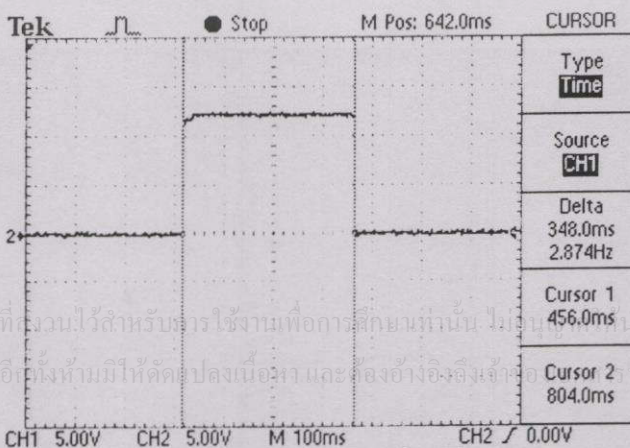
ภาพที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ ของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

#### 4.1.1 การจับเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ในการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั้น จะใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจวัดคาบเวลาทั้งหมดที่มอเตอร์เริ่มต้นเคลื่อนที่ จนกระทั่งมอเตอร์หยุดการเคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการคือ เมื่อจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ซึ่งใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 และ K2 ในการขับเพื่อให้เคลื่อนที่ไปทางซ้าย และขวา ตามลำดับ แต่ในการทดลองนี้เลือกพิจารณาที่ K2 ซึ่งตามภาพที่ 3.12 ในบทที่ 3 นั้น เมื่อเลือกกดสวิตช์ S3 เพื่อจ่ายไฟให้ K2 ทำงาน ก็จะมีไฟไปเลี้ยงคอยล์ของ K3A ด้วย จากนั้นมาพิจารณาตามภาพที่ 4.2 เมื่อหน้าสัมผัสของ K3A ทำงาน จะมีกระแสไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 12 V. จะไหลผ่านตัวต้านทานขนาด  $100\ \text{k}\Omega$  ทำให้เกิดแรงดันกระแสตรงตกคร่อมตัวต้านทาน ซึ่งได้ต่อดิจิตอลออสซิลโลสโคปเอาไว้เพื่อวัดค่าคาบเวลาที่เกิดแรงดันนั่นเอง และเมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ไปจนสุดที่ปลายอีกด้านหนึ่งแล้วไปชนกับก้านของลิมิตสวิตช์ ซึ่งทำหน้าที่ตัดไฟที่ไปเลี้ยง K2 จึงทำให้ K3A เลิกทำงาน ก็จะไม่มีการไหลผ่านตัวต้านทาน จึงทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานหมดไป เนื่องจากตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบที่ไม่สะสมพลังงาน จึงทำให้รูปสัญญาณของแรงดันที่วัดได้นั้นอยู่ในลักษณะของสัญญาณสี่เหลี่ยมดังในภาพที่ 4.3 ซึ่งทำให้อ่านค่าคาบเวลาได้ชัดเจน



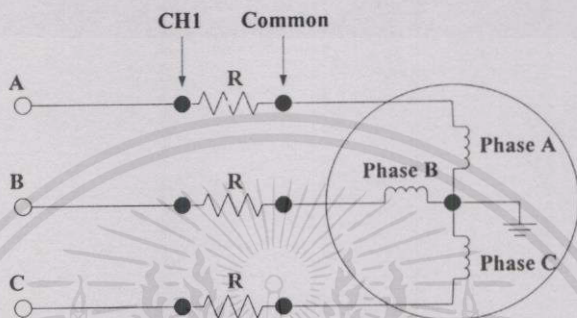
ภาพที่ 4.2 วิธีการวัดคาบเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างที่ได้จากการวัดคาบเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างขึ้น

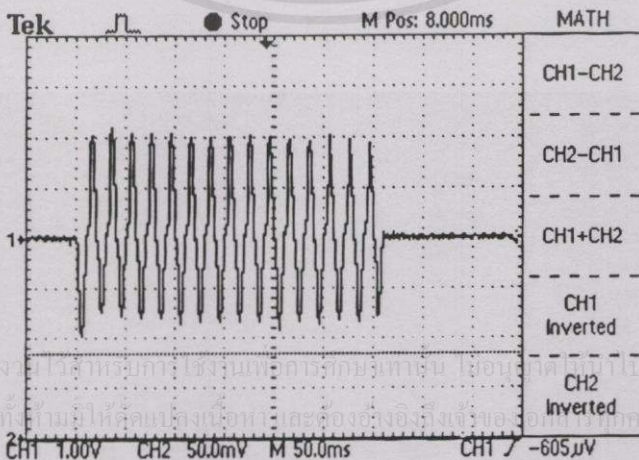
### 4.1.2 การกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ในการวัดเพื่อหาค่ากระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั้น จะไม่สามารถใช้คลิปแอมป์วัดได้โดยตรงเนื่องจากมันจะอ่านค่าสูงสุดออกมา และมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ด้วยเวลาสั้นๆ ดังนั้นจึงอาศัยตัวต้านทานค่าน้อยๆ(ค่าที่ใช้คือ  $0.05 \Omega$ ) มาต่ออนุกรมกับขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ จากนั้นก็วัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานนั้นด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป ในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงานจนกระทั่งหยุดทำงานดังภาพที่ 4.4

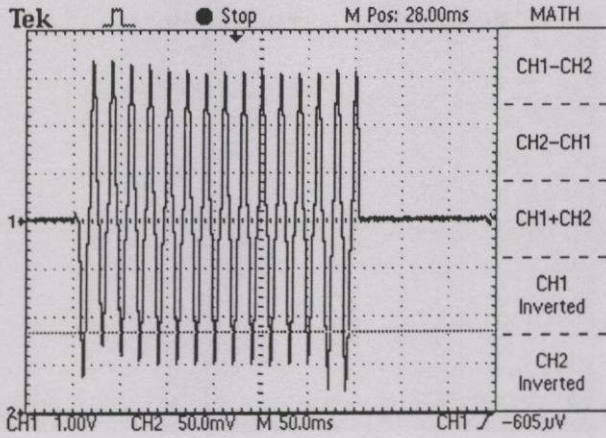


ภาพที่ 4.4 แสดงการวัดค่ากระแสด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป

ซึ่งตามภาพที่ 4.4 เป็นตัวอย่างการวัดกระแสที่เฟสA โดยที่จอของดิจิตอลออสซิลโลสโคปจะแสดงมาเป็นรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานดังในภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นการวัดที่แรงดันเฟสA ขณะที่จ่าย 110 V. และภาพที่ 4.6 เป็นการวัดที่แรงดันเฟสA ขณะที่จ่าย 220 V. โดยจะได้ค่าแรงดันสูงสุด( $V_{max}$ ) หลายรูปคลื่นตั้งแต่มอเตอร์เริ่มทำงานจนหยุดการทำงาน จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดทั้งหมดนำมาหารค่าความต้านทานเพื่อให้ได้ค่ากระแสสูงสุด( $I_{max}$ ) และนำค่ากระแสสูงสุดที่ได้นี้มาหาค่ากระแสยังผล( $I_{rms}$ ) เพื่อนำไปหาค่ากำลังงานอินพุตต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงดันเฟสจากแหล่งจ่ายไฟนั้นวัดด้วยอนาล็อกมิเตอร์ซึ่งเป็นค่าแรงดันยังผล( $V_{rms}$ )



ภาพที่ 4.5 แสดงค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานเพื่อนำไปหาค่ากระแส(เฟสA ที่ 110 V.)



ภาพที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานเพื่อนำไปหาค่ากระแส(เฟส A ที่ 220 V.)

เมื่อค่าความต้านทานที่ใช้คือ  $0.05 \Omega$  จะหาค่ากระแสสูงสุดจาก

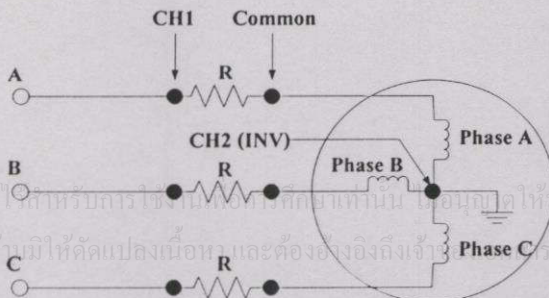
$$I_{max} = V_{max} (\text{เฉลี่ยทุกรูปคลื่น}) / 0.05 \quad (A) \quad (4.1)$$

และหาค่ากระแสยังผลจาก

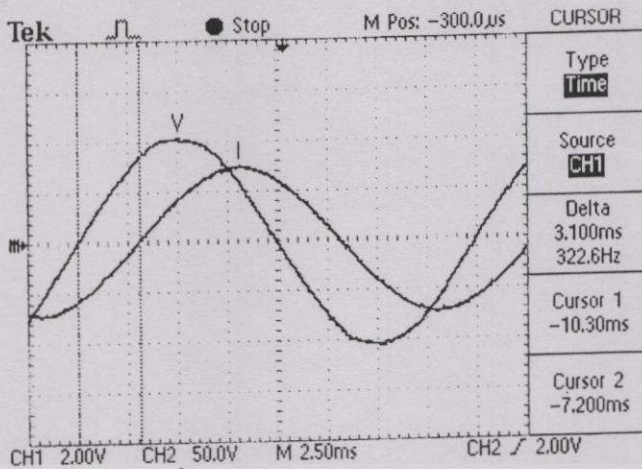
$$I_{rms} = I_{max} / \sqrt{2} \quad (A) \quad (4.2)$$

#### 4.1.3 การวัดมุมระหว่างแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

ในการวัดเพื่อหาค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันในแต่ละเฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั้นเพื่อจะนำไปใช้หาค่าเพนเวอร์แฟคเตอร์ โดยอาศัยตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ และใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปมาวัดรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันในแต่ละเฟส ดังในภาพที่ 4.7 โดย CH 1 และ Common จะทำหน้าที่วัดสัญญาณของกระแส ส่วน CH2(INV) และ Common ทำหน้าที่วัดสัญญาณแรงดัน จากนั้นก็แสดงสัญญาณพร้อมกันในจอของออสซิลโลสโคปดังภาพที่ 4.8 จะสามารถหาค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันได้



ภาพที่ 4.7 แสดงการวัดมุมระหว่างแรงดันและกระแสด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 4.8 ตัวอย่างการแสดงผลเพื่อหาค่ามุมระหว่างสัญญาณกระแสและแรงดัน

#### 4.1.4 การหาค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

หลังจากที่ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก โดยป้อนแรงดันเฟสขึ้นละ 10 V. เริ่มตั้งแต่ 110 V. ไปจนถึง 220 V. (ซึ่งเป็นค่า  $V_{rms}$ ) เมื่อได้ ค่าระยะเวลาในเวลาเคลื่อนที่, ค่ากระแสในแต่ละเฟส (ซึ่งเป็นค่า  $I_{rms}$ ) และ มุมระหว่างแรงดันกับกระแสในแต่ละเฟส จากนั้นจะนำค่าที่ได้ข้างต้นเพื่อไปคำนวณหา ค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่, สลิป, แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่, กำลังงานด้านออก, กำลังงานด้านเข้า, ค่าประสิทธิภาพด้านกำลังงาน, สมรรถนะในด้านของแรงที่ได้ต่อมวลของชุดเครื่องกลไฟฟ้า และ สมรรถนะในด้านของแรงที่ได้ต่อกำลังงานด้านเข้า ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จาก

$$P_A = V_A \cdot I_A \cdot \cos \phi_A \quad (4.3)$$

เมื่อ  $P_A$  = กำลังงานด้านเข้าของเฟส A (W)  
 $V_A$  = แรงดันของเฟส A (V)  
 $I_A$  = กระแสของเฟส A (A)  
 $\phi_A$  = มุมระหว่างกระแสและแรงดันของเฟส A (องศา)

$$P_B = V_B \cdot I_B \cdot \cos \phi_B \quad (4.4)$$

เมื่อ  $P_B$  = กำลังงานด้านเข้าของเฟส B (W)  
 $V_B$  = แรงดันของเฟส B (V)  
 $I_B$  = กระแสของเฟส B (A)  
 $\phi_B$  = มุมระหว่างกระแสและแรงดันของเฟส B (องศา)

$$P_C = V_C \cdot I_C \cdot \cos \phi_C \quad (4.5)$$

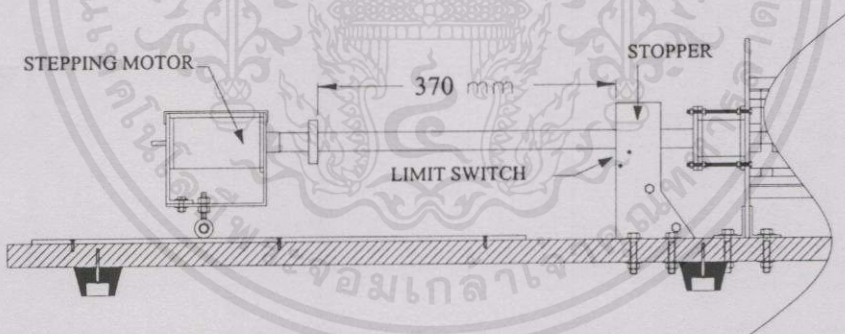
- เมื่อ  $P_C$  = กำลังงานด้านเข้าของเฟส C (W)  
 $V_C$  = แรงดันของเฟส C (V)  
 $I_C$  = กระแสของเฟส C (A)  
 $\phi_C$  = มุมระหว่างกระแสและแรงดันของเฟส C (องศา)

$$P_{in} = P_A + P_B + P_C \quad (4.6)$$

- เมื่อ  $P_{in}$  = กำลังงานรวมด้านเข้าทั้งหมด (W)

$$U = l/t \quad (4.7)$$

- เมื่อ  $U$  = อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ (m/sec)  
 $l$  = ระยะทางในการเคลื่อนที่ (คงที่ 0.37 m)  
 $t$  = ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ (sec)



ภาพที่ 4.9 แสดงระยะทางในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนระบอบอกที่สร้างขึ้น

$$S = (U_s - U) / U_s \quad (4.8)$$

- เมื่อ  $S$  = สลิป  
 $U_s$  = อัตราเร็วเชิงโคโรนัส (m/sec) =  $2\tau f$   
 $\tau$  = Pole pitch (คงที่ 0.115 m)  
 $f$  = ความถี่ (คงที่ 50 Hz)

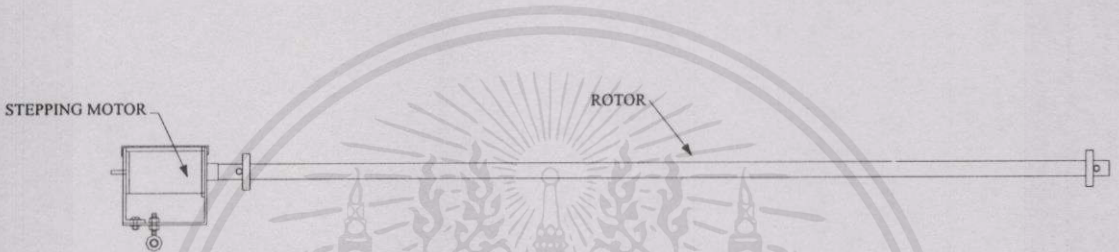
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลไปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = m.l/t^2 \tag{4.9}$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (N)  
 $m$  = มวลของส่วนที่เคลื่อนที่ทั้งหมดรวมทั้งสตั๊ปมอเตอร์ (คงที่ 6.3 kg)

$$P_{out} = m.l^2/t^3 \tag{4.10}$$

เมื่อ  $P_{out}$  = กำลังงานด้านเอาต์พุต (W)



ภาพที่ 4.10 แสดงโครงสร้างของส่วนเคลื่อนที่ทั้งหมดซึ่งมีมวลรวม 6.3 Kg

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{4.11}$$

เมื่อ  $\eta$  = ประสิทธิภาพด้านกำลังงาน

$$P_{fm} = \frac{F}{m} \tag{4.12}$$

เมื่อ  $P_{fm}$  = ค่าอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่

$$P_{fp} = \frac{F}{P_{in}} \tag{4.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อ  $P_{fp}$  = ค่าอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อกำลังงานด้านเข้า

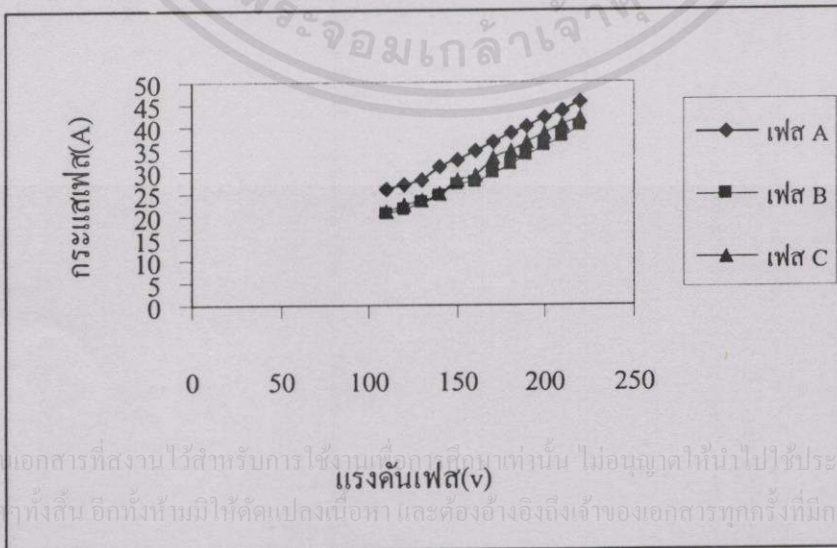
#### 4.1.5 ผลทั้งหมดที่ได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

เมื่อได้ค่าต่างๆจากการตรวจวัดและจากการคำนวณแล้ว จึงนำค่าเหล่านั้นมาบันทึกลงในตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสและเพาเวอร์แฟคเตอร์แต่ละเฟสในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

แรงดันเฟส (V)	กระแสเฟส(A) <sub>rms</sub>			เพาเวอร์แฟคเตอร์(ลำหลัง)		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$\cos \phi_A$	$\cos \phi_B$	$\cos \phi_C$
110	26.02	20.46	21.12	0.562	0.535	0.509
120	27.24	21.54	22.28	0.562	0.535	0.509
130	28.22	22.84	23.62	0.562	0.509	0.509
140	30.86	24.32	25.02	0.562	0.509	0.509
150	32.44	26.78	27.98	0.562	0.509	0.509
160	34.28	27.56	29.14	0.556	0.498	0.500
170	36.54	29.42	32.76	0.554	0.491	0.496
180	38.62	31.48	34.62	0.553	0.485	0.491
190	40.04	33.64	36.38	0.551	0.478	0.487
200	41.94	35.32	38.74	0.550	0.471	0.483
210	43.38	37.46	40.26	0.548	0.464	0.479
220	45.26	39.88	42.14	0.547	0.458	0.475

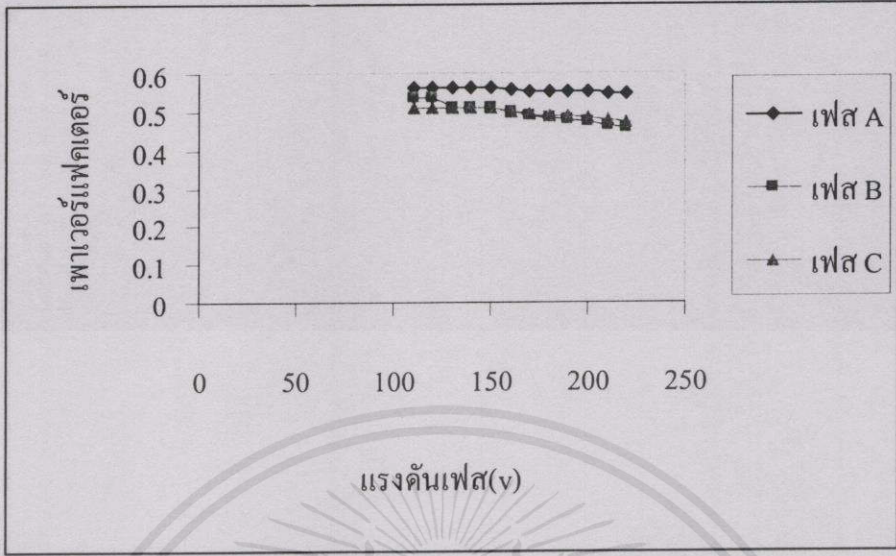
- ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันอินพุต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตในแต่ละเฟสกับแรงดันอินพุต

- ความสัมพันธ์ระหว่างเพาเวอร์แฟคเตอร์กับแรงดันอินพุต

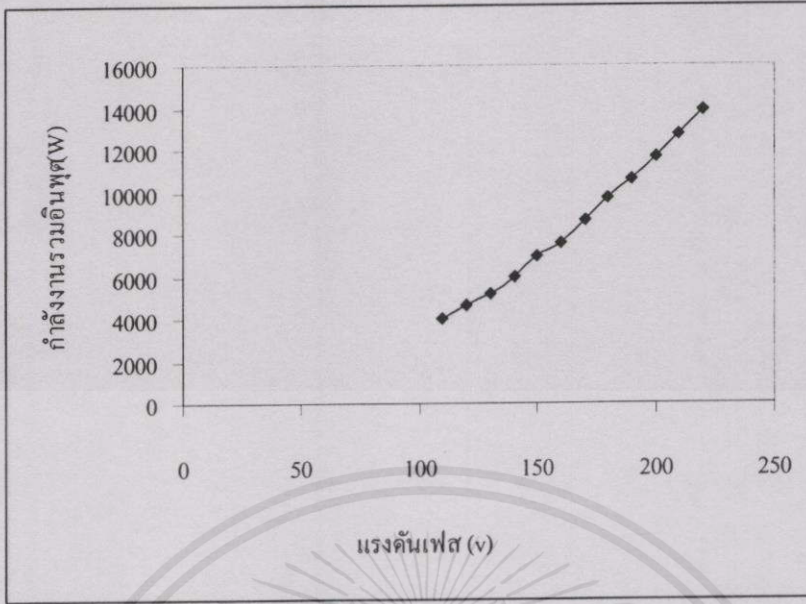


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพาเวอร์แฟคเตอร์ในแต่ละเฟส กับ แรงดันอินพุต

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังงานด้านเข้าในแต่ละเฟสและกำลังงานรวมด้านเข้าทั้งหมดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

แรงดันเฟส (V)	กำลังงานด้านเข้าแต่ละเฟส (W)			กำลังงานรวมด้านเข้า :
	$P_A$ (W)	$P_B$ (W)	$P_C$ (W)	$P_{in}$ (W)
110	1608.55	1204.07	1182.50	3995.12
120	1837.06	1382.86	1360.86	4580.78
130	2061.75	1511.32	1562.93	5136.00
140	2428.06	1733.04	1782.92	5944.02
150	2734.69	2044.65	2136.27	6915.61
160	3049.54	2195.98	2331.20	7576.72
170	3441.33	2455.68	2762.32	8659.33
180	3844.23	2748.20	3059.71	9652.14
190	4191.78	3055.18	3366.24	10613.20
200	4613.40	3327.14	3742.28	11682.82
210	4992.17	3650.10	4049.75	12692.02
220	5446.58	4018.30	4403.63	13868.51

- ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานรวมด้านอินพุตกับแรงดันอินพุต

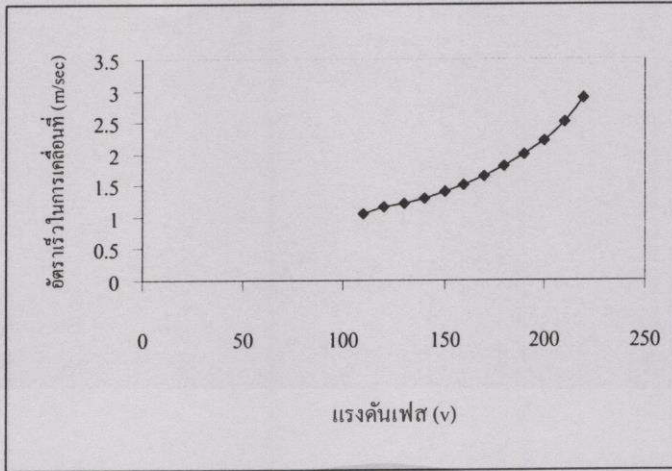


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานรวมอินพุตกับแรงดันอินพุต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ , อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ , สลิป , แรงที่ได้จากการเคลื่อนที่ และ กำลังงานด้านออก ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนบอกรที่สร้างขึ้น

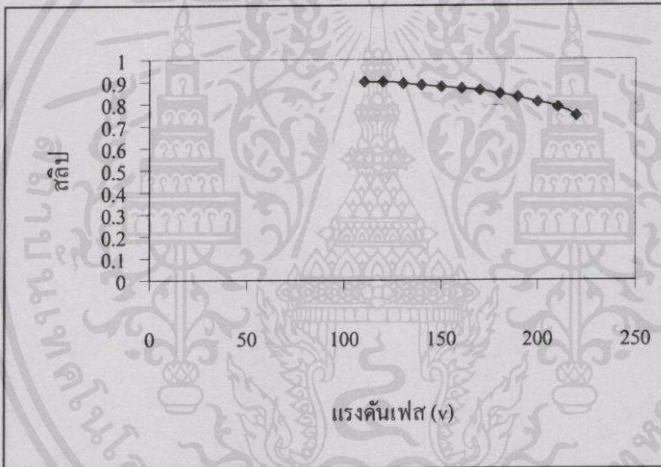
แรงดันเฟส (V)	ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ (sec)	อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ (m./sec)	สลิป	แรงที่ได้จากการเคลื่อนที่ (N)	กำลังงานด้านออก (W)
110	0.348	1.063	0.901	19.248	20.465
120	0.320	1.156	0.899	22.76	26.320
130	0.304	1.217	0.894	25.223	30.696
140	0.288	1.285	0.888	28.103	36.112
150	0.262	1.412	0.877	33.958	47.956
160	0.245	1.510	0.869	38.834	58.639
170	0.226	1.637	0.858	45.638	74.709
180	0.206	1.796	0.844	54.930	98.654
190	0.186	1.989	0.827	67.378	134.015
200	0.167	2.216	0.807	83.581	185.215
210	0.147	2.517	0.781	107.872	271.510
220	0.128	2.891	0.749	142.273	411.311

- ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต



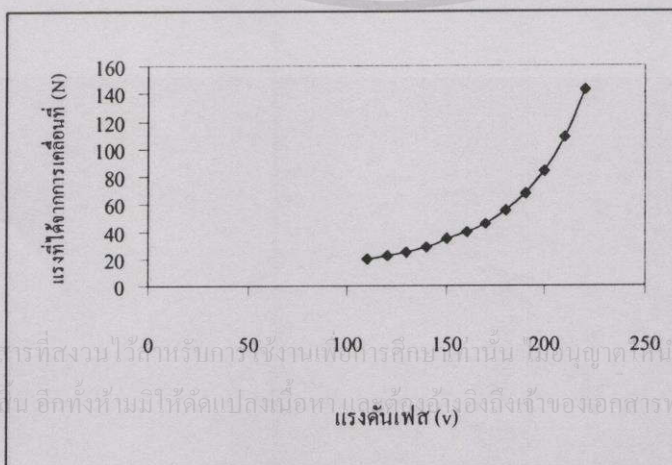
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต

- ความสัมพันธ์ระหว่างสลีปกับแรงดันอินพุต



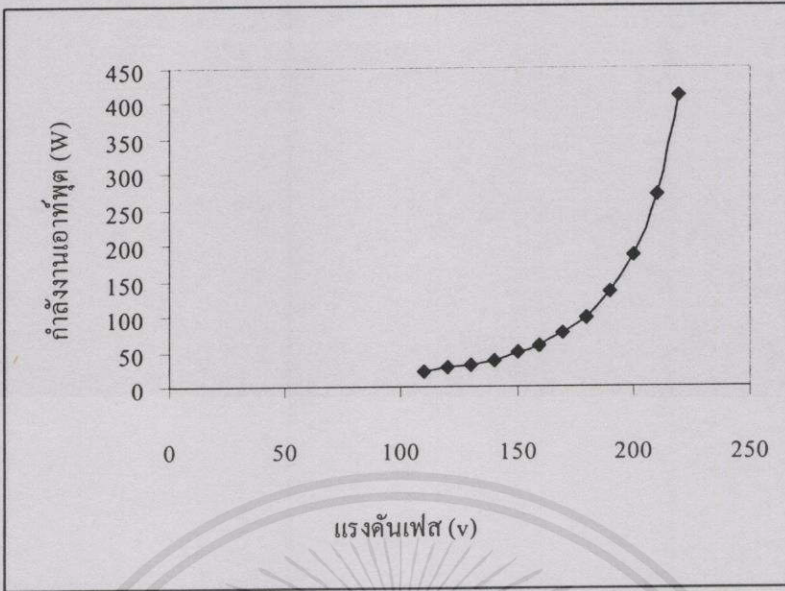
ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสลีปกับแรงดันอินพุต

- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ได้จากการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ได้จากการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต

- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ได้จากการเคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต

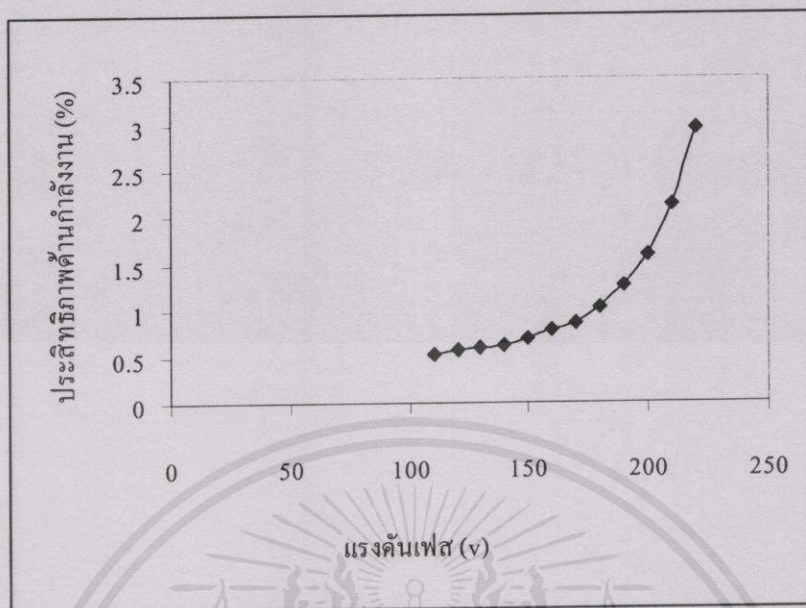


ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า ประสิทธิภาพด้านกำลังงาน , อัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่ และ อัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อกำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้น

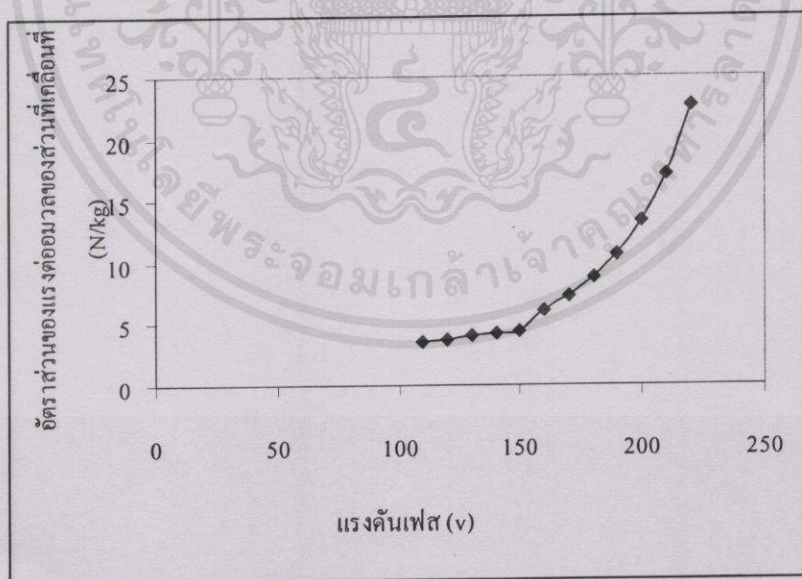
แรงดันเฟส (V)	ประสิทธิภาพด้าน กำลังงาน : $\eta$ (%)	อัตราส่วนของแรงที่ได้ ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่ (N/kg)	อัตราส่วนของแรงที่ได้ ต่อกำลังงานด้านเข้า (N/W)
110	0.512	3.525	0.0048
120	0.575	3.705	0.0049
130	0.598	4.004	0.0049
140	0.608	4.223	0.0047
150	0.693	4.461	0.0049
160	0.774	6.164	0.0051
170	0.863	7.244	0.0052
180	1.022	8.719	0.0056
190	1.263	10.695	0.0063
200	1.585	13.267	0.0071
210	2.139	17.123	0.0084
220	2.966	22.583	0.0102

- ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพด้านกำลังงานกับแรงดันอินพุต



ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพด้านกำลังงานกับแรงดันอินพุต

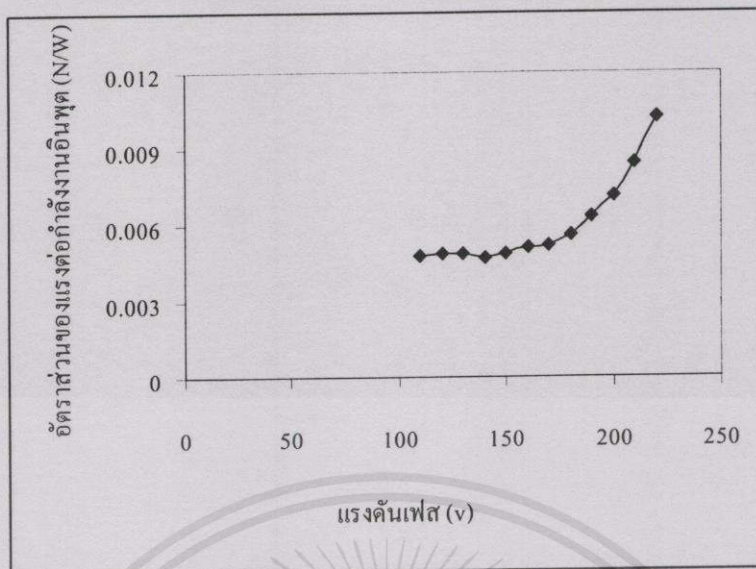
- ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่กับแรงดันอินพุต



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่ที่กับ

แรงดันอินพุต สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

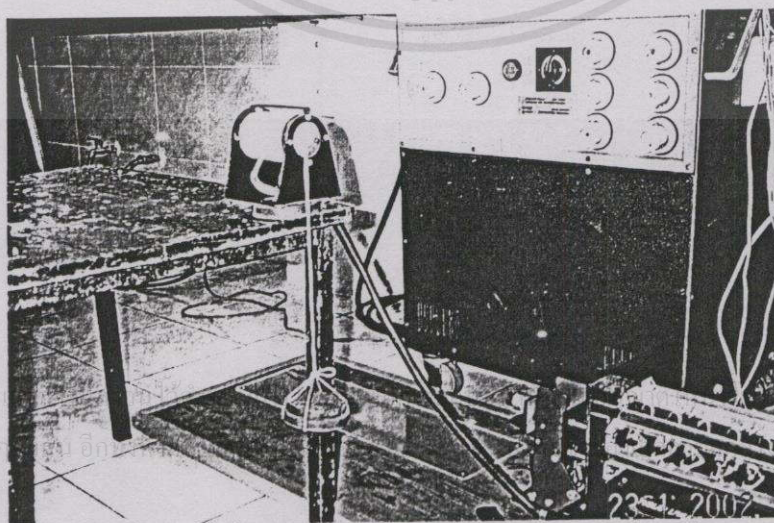
- ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงที่ได้ต่อกำลังงานอินพุต กับแรงดันอินพุต



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของแรงต่อกำลังงานอินพุต กับแรงดันอินพุต

#### 4.2 การทดลองในส่วนของสเต็ปป์มอเตอร์

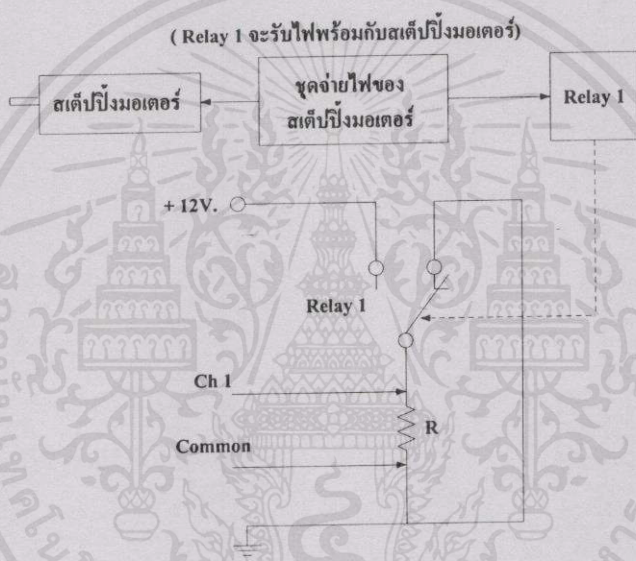
ในการทดลองสเต็ปป์มอเตอร์ จะเลือกกำหนดให้สเต็ปป์มอเตอร์ทำงานในลักษณะหมุนอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาวัดค่า กระแส และ ระยะเวลาในการจุดโหลด โดยจะทำการทดลองให้สเต็ปป์มอเตอร์จุดโหลดขั้นละ 0.4 kg โดยเริ่มจาก 0.4 kg ไปจนถึง 2.4 kg ซึ่งเป็นพิกัดสูงสุดที่สเต็ปป์มอเตอร์ชุดนี้สามารถทำงานได้อย่างไม่เกิดปัญหา ในการทดลองจะทำการวัดค่ากระแส และ ตรวจวัดระยะเวลาในขณะที่สเต็ปป์มอเตอร์จุดโหลด ด้วยระยะทาง 0.3 m คงที่ทุกครั้ง ซึ่งการทดลองสเต็ปป์มอเตอร์เพื่อจุดโหลดในลักษณะต่อเนื่อง ดูได้จากในภาพที่ 4.21



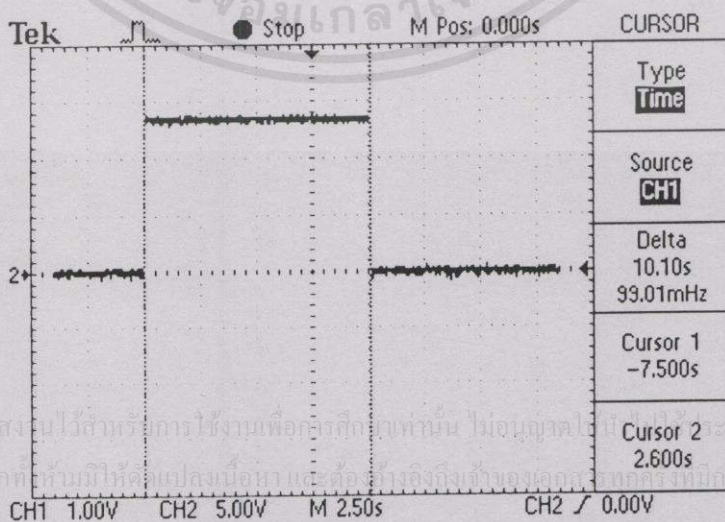
ภาพที่ 4.21 การทดลองสเต็ปป์มอเตอร์ในลักษณะหมุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้จุดโหลด

### 4.2.1 ค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรงของสตีปิ้งมอเตอร์

ค่าที่สามารถตรวจวัดได้โดยตรงสำหรับการทดลองสตีปิ้งมอเตอร์มีอยู่ 2 ค่าคือ ระยะเวลาในการหยุดไหล และ ค่ากระแสของสตีปิ้งมอเตอร์ โดยการหาระยะเวลาในการหยุดไหลนั้นจะใช้หลักการเดียวกับที่ทดลองในมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกคือ อาศัยรีเลย์ตัวหนึ่งต่อคร่อมกับชุดจ่ายไฟให้สตีปิ้งมอเตอร์ เมื่อจ่ายไฟให้สตีปิ้งมอเตอร์ทำงาน รีเลย์ก็จะได้รับไฟไปเลี้ยงคอยล์ของมันพร้อมๆกับสตีปิ้งมอเตอร์ ทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ทำงาน และกระแสไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 12 V. สามารถไหลผ่านตัวต้านทาน และเกิดแรงดันกระแสตรงตกคร่อมตัวต้านทานนั้น ซึ่งได้ต่อคิิจิตอลออสซิลโลสโคปเอาไว้เพื่อวัดค่าคาบเวลาในช่วงที่เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานนั่นเอง ดังวงจรในภาพที่ 4.22

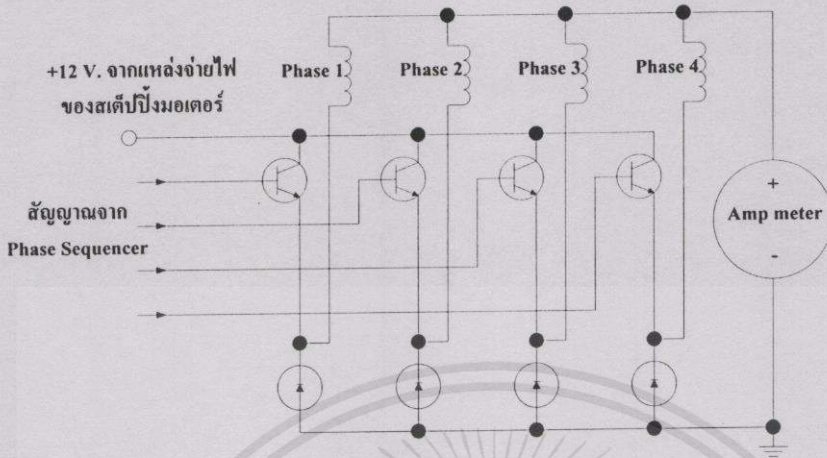


ภาพที่ 4.22 วิธีการวัดระยะเวลาในการหยุดไหลของสตีปิ้งมอเตอร์โดยใช้ออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 4.23 ตัวอย่างค่าคาบเวลาของสตีปิ้งมอเตอร์ที่วัดได้เมื่อหยุดไหลหนัก 2.4 kg

ส่วนกระแสของสเต็ปปีงมอเตอร์จะตรวจวัดโดยใช้แอมป์มิเตอร์มาต่อที่จุดรวมในส่วนของชุดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ดังในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 การตรวจวัดกระแสของสเต็ปปีงมอเตอร์

#### 4.2.2 การหาค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณของสเต็ปปีงมอเตอร์

หลังจากที่ได้ค่าจากการทดลองสเต็ปปีงมอเตอร์แล้ว ก็จะนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าแรงจากโหลด , แรงบิดจากโหลด , อัตราเร็วในการหมุนโหลด และความเร็วรอบในขณะที่โหลดของสเต็ปปีงมอเตอร์

โดย

$$F_L = M_l \cdot g \quad (4.14)$$

เมื่อ  $F_L$  = แรงจากโหลด (N)

$M_l$  = มวลของโหลดที่ใช้ ( 0.4 , 0.8 , 1.2 , 1.6 , 2.0 และ 2.4 Kg)

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก(คงที่ 9.81 m./sec<sup>2</sup>)

$$T_l = F_l \cdot R \quad (4.15)$$

เมื่อ  $T_l$  = แรงบิดจากโหลด (N.m)

$R$  = รัศมีโรเตอร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์ ( คงที่ 0.015 m )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = l/t \quad (4.16)$$

เมื่อ  $U$  = อัตราเร็วในการหมุนโหลด (m/sec)

$l$  = ระยะทางในการเคลื่อนที่ของโหลด (คงที่ 0.3 m)

$t$  = ระยะเวลาในการรูดโหลด (sec)

$$\begin{aligned} \text{เนื่องจาก 1 รอบของโรเตอร์} &= 2\pi R \\ &= (2)(3.14)(0.015) \\ &= 0.094 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad 0.094 \text{ m/sec} = 1 \text{ r.p.s.}$$

หาความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อวินาทีโดย

$$N_r = U / 0.094 \quad (4.17)$$

เมื่อ  $N_r$  = ความเร็วรอบ(r.p.s.)

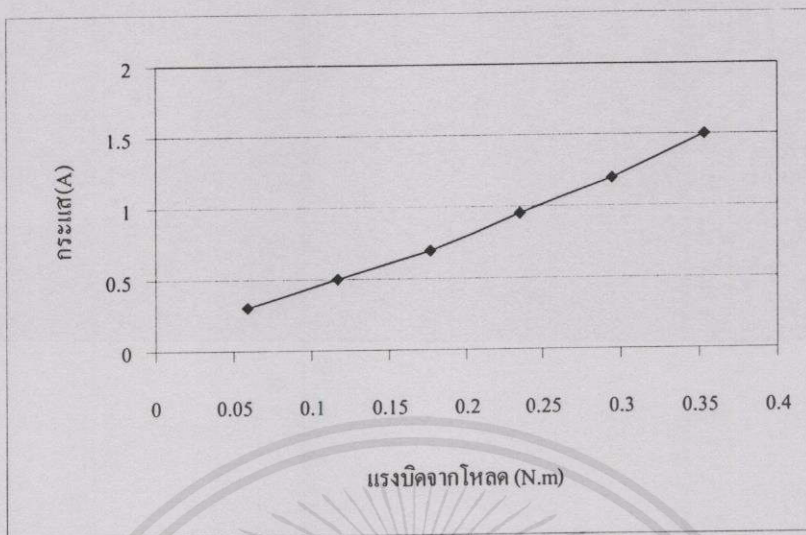
#### 4.2.3 ผลทั้งหมดที่ได้ของสแต็ปปีงมอเตอร์

เมื่อได้ค่าต่างๆจากการตรวจวัดในหัวข้อที่ 4.2.1 และจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.2 แล้ว จึงนำค่าเหล่านั้นมาบันทึกลงในตารางที่ 4.5

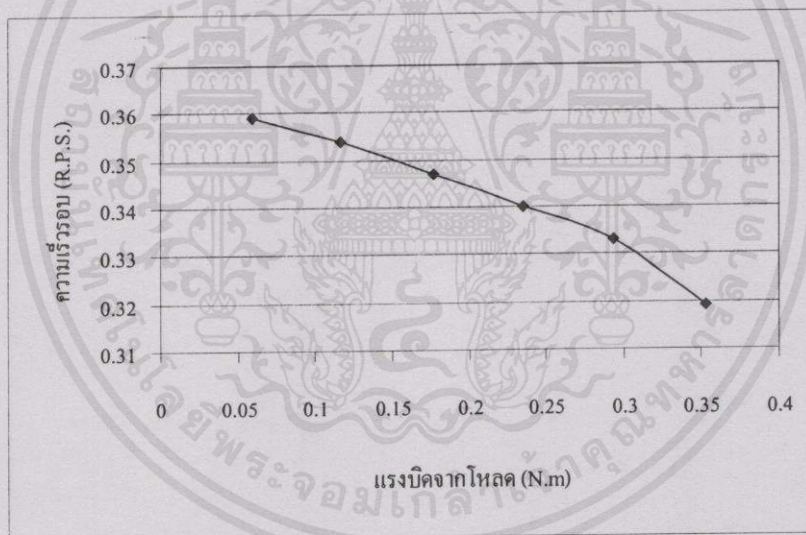
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า กระแส , แรงจากโหลด , แรงบิดจากโหลด , อัตราเร็วในการรูดโหลด และ ความเร็วรอบในขณะที่จุดโหลดที่มีมวลต่างกัน

มวลโหลด (kg)	กระแส (A)	แรง จากโหลด (N)	แรงบิด จากโหลด (N.m)	ระยะเวลา (sec)	อัตราเร็ว (m/sec)	ความเร็วรอบ (r.p.s.)
0.4	0.30	3.924	0.059	8.9	0.0337	0.359
0.8	0.50	7.848	0.117	9.0	0.0333	0.354
1.2	0.70	11.772	0.177	9.2	0.0326	0.347
1.6	0.95	15.696	0.235	9.4	0.0320	0.340
2.0	1.20	19.620	0.294	9.6	0.0313	0.333
2.4	1.50	23.544	0.353	10.0	0.0300	0.319

- ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงบิดของสเต็ปปีงมอเตอร์



ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของสเต็ปปีงมอเตอร์กับมวลของโหลด



ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของสเต็ปปีงมอเตอร์กับมวลของโหลด

โดยหลังจากที่ได้ผลการทดลองทั้งหมดของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาแล้ว จะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับระบบนิวแมติกที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ ซึ่งจะได้อ่านถึงในบทที่ 5. ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การเปรียบเทียบผลระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับระบบนิวแมติก

ในการเปรียบเทียบผลระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับระบบนิวแมติกนั้นจะพิจารณาในด้านของงานที่เคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นเป็นสำคัญ ซึ่งก็คือในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั่นเอง โดยอาศัยแรงทางด้านเอาต์พุตเป็นตัวอ้างอิง คือให้ขนาดของแรงทางด้านเอาต์พุตใกล้เคียงกันที่สุด แล้วเปรียบเทียบผลในด้านอื่นๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อคือ

- ผลทางด้านแรงที่ได้เพื่อนำไปใช้งาน
- ผลทางด้านสมรรถนะทั่วไป
- ด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นและในระยะยาว

**หมายเหตุ** ในส่วนของสแต็ปปีงมอเตอร์นั้นใช้กำลังงานต่ำ และมีข้อได้เปรียบกว่ามอเตอร์ลมของระบบนิวแมติกอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความสิ้นเปลืองพลังงานและความสามารถในการควบคุมตำแหน่ง ดังนั้นจึงไม่นำมาเปรียบเทียบกันในการทดลองนี้

### 5.1 การเปรียบเทียบผลทางด้านแรงที่ได้เพื่อนำไปใช้งาน

จากการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกในบทที่ 4. โดยใช้อ้อมูลจากตารางที่ 4.3 ในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่แรงดันเฟส 220 V. จะเกิดแรงที่ได้ออกมา 142.273 N (เป็นแรงในการผลักและชักกลับ) ที่ระยะทางการเคลื่อนที่ 0.37 m ซึ่งเป็นตัวกำหนดเพื่อหาขนาดของกระบอกสูบ , รูนของกระบอกสูบ , ขนาดของมอเตอร์บี้มลม และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆในระบบนิวแมติกที่สามารถสร้างแรงออกมาได้ใกล้เคียงกับ 142.273 N นี้ ซึ่งถือเป็นขนาดของแรงที่จะนำใช้งาน

เมื่อนำไปเทียบเพื่อหาข้อมูลของกระบอกสูบที่มีการผลิตออกมาจำหน่ายจากผู้ผลิตอุปกรณ์ในระบบนิวแมติก โดยพิจารณาจากระยะช่วงชักและแรงที่ได้ เพื่อให้ใกล้เคียงกับชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นที่สุด คือเบอร์ DSN-20-300-PPV ของเฟสโต มีระยะช่วงชัก 0.3 m มีแรงในการผลักออกมา 188.5 N และแรงในการชักกลับ 158.3 N ซึ่งถือว่าเป็นรุ่นที่มีความใกล้เคียงกับชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมา ทั้งในด้านของแรงในการผลัก และระยะช่วงชัก โดยมีข้อมูลจำเพาะและรายละเอียดดังนี้ [ลิงก์](#) ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

Criterion	Feature
Mode of operation	Double acting
Shape piston	Round
Shape of piston rod	Round
In accordance with standard ISO	ISO 6432
Sensing type	None
Type of cushioning	Adjustable pneumatic cushioning
Cushioning length	17 mm.
Protection against torsion	None
Piston, nominal size	no. 20
Stroke	0.3 m
Piston rod diameter	8 mm.
End of piston rod	I
KK Piston rod thread	M 8
Operating pressure min.	1 Kg/cm <sup>2</sup>
Operating pressure max	10 Kg/cm <sup>2</sup>
Minimum ambient temperature	-20 <sup>0</sup> C
Maximum ambient temperature	80 <sup>0</sup> C
EE Connecting thread for bearing cap	G 1/8
EE Connecting thread for end cap	G 1/8
Effective force (theor.) at 6 bar, adv.	188.5 N
Effect. force (theor.) at 6 bar, return	158.3 N
Air consumption at 6 bar advance / 10 mm	0.02031 litre
Air consumption at 6 bar ret stroke / 10 mm	0.0171 litre

จากข้อมูลที่มี โดยถ้าเลือกใช้กระบอบสูบเบอร์ DSN-20-300-PPV ของเฟสโต กับระบบนิวแมติก จะได้แรงที่นำไปใช้งานขณะที่ผลิต 188.5 N ซึ่งสูงกว่าแรงผลัดของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น(142.273 N) อยู่ 46.227 N แต่ระยะช่วงชักในการทำงานคือ 0.3 m ซึ่งสั้นกว่าช่วงชักในการทำงานของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น(0.37 m) อยู่ 0.07 m เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว ชุด

เครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานทดแทนกับระบบนิวแมติกได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่ใช้ และเงื่อนไขในการทำงาน ต้องไม่เกินขีดความสามารถของมัน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถ้าพิจารณาที่ขนาดของแรงที่ได้เพื่อนำออกมาใช้งานนั้น ถ้าวาระบบนิวแมติกได้เปรียบกว่าพอสมควร ถึงแม้ช่วงชักจะสั้นกว่าเล็กน้อยก็ตาม

## 5.2 การเปรียบเทียบผลทางด้านสมรรถนะทั่วไป

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น และ ข้อมูลของระบบนิวแมติกที่ใช้กระบอกสูบเบอร์ DSN-20-300-PPV ของ เฟสโต สามารถนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวม ได้แจกแจงรายละเอียดในด้านต่างๆลงในตารางเพื่อความสะดวกในการอ่านข้อมูล ซึ่งพิจารณาได้จากในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก และระบบนิวแมติก

รายละเอียดของระบบ	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	ระบบนิวแมติก
1. โครงสร้าง	- โครงสร้างรวมทั้งระบบมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก จึงใช้พื้นที่ไม่มากในการติดตั้ง	- โครงสร้างรวมทั้งระบบมีขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งพอสมควร
2. จำนวนอุปกรณ์	- มีอุปกรณ์เฉพาะในส่วนที่เป็นโครงสร้างของมอเตอร์เท่านั้น จึงมีไม่มาก	- มีขั้นตอนการทำงานมาก จึงต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมอีกมาก นอกเหนือไปจากส่วนโครงสร้างของมอเตอร์ปั๊มลมซึ่งเป็นอุปกรณ์ - ต้นก้าง
3. ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่	- เคลื่อนที่ได้ดีในระยะทางสั้นๆ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดเรื่องความยาว ของส่วนที่เคลื่อนที่ เพราะอาศัยลูกปืนแบบเชิงเส้นเป็นตัวรองรับที่ปลายทั้งสองด้านของส่วนอยู่กับที่	- เคลื่อนที่ได้ดี ตามแต่โครงสร้างของระบบ และการหล่อลื่น ในส่วนของกระบอกสูบ
4. กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้	- เมื่อจ่ายแรงดันเฟส 220 V. จะใช้กำลังงาน 13868.51 W. แต่ใช้เวลาเพียง 0.128 sec ในการเคลื่อนที่	- มอเตอร์ปั๊มลมที่ใช้เปรียบเทียบกับขนาด 1/2 HP. หรือ 373 W. แต่จะทำงานตลอดจนลมเต็มถึงจึงหยุด และทำใหม่เมื่อลมลดลง

## ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

รายละเอียดของระบบ	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	ระบบนิวแมติก
5. การปรับกำลังขับเคลื่อน	- สามารถปรับได้โดยการควบคุมที่ระบบไฟฟ้า ซึ่งเลือกได้หลายวิธีตามแต่ความเหมาะสม	- สามารถปรับได้จากวาล์วควบคุมความดันลมเท่านั้น จึงไม่มีความหลากหลายในการควบคุม
6. ความคงที่ ของอัตราเร็วในการเคลื่อนที่	- ขึ้นอยู่กับระบบควบคุมทางไฟฟ้า	- ขึ้นอยู่กับการรักษาปริมาตรของลม เมื่อปริมาตรเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วก็จะเปลี่ยนตาม
7. การรับภาระเกินกำหนด(over load)	- สามารถรับภาระเกินได้เล็กน้อย ในระยะเวลาสั้นๆ โดยปรับที่ระบบควบคุมทางไฟฟ้า	- สามารถรับภาระเกินได้เล็กน้อย ในระยะเวลาสั้นๆ โดยต้องเพิ่มกำลังลมอัด
8. การทำงานต่อ เมื่อขาดกระแสไฟฟ้า	- ไม่สามารถทำได้ นอกจากจะมีระบบจ่ายไฟสำรอง	- สามารถทำได้ ถ้ายังมีปริมาณลมเหลืออยู่ในถังเก็บลม
9. ผลของความชื้น	- ความชื้นมีผลต่อระบบ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า และส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ เช่น ลูกปืนอาจเกิดสนิม ทำให้เคลื่อนที่ไม่สะดวก จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันความชื้น	- เนื่องจากใช้ลมในการทำงาน เมื่อเกิดการกลั่นตัวจะเกิดความชื้นในระบบได้ง่าย ทำให้อุปกรณ์ที่ทำจากโลหะเกิดสนิม จึงจำเป็นต้องมีชุดกรองความชื้น และระบายความชื้น
10. ผลของอุณหภูมิ	- อุณหภูมิมีผลต่อระบบ ในส่วนของวงจรไฟฟ้าที่ใช้สารกึ่งตัวนำ และในส่วนของขดลวด ซึ่งค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ	- อุณหภูมิมีผลต่อ แรงดัน และ ปริมาตรของลม ตามทฤษฎีของอุณหพลศาสตร์
11. การป้องกันการติดไฟ	- ไม่สามารถป้องกันได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากใช้ไฟฟ้า	- สามารถป้องกันการติดไฟได้ดีพอสมควร เนื่องจากใช้ลมในการทำงาน
12. การบำรุงรักษา	- บำรุงรักษาง่าย และ ใช้เวลาน้อย เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีน้อย และไม่มีชิ้นคอน หรือกระบวนการในการทำงานมาก	- การบำรุงรักษา ค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลามากเนื่องจากอุปกรณ์มีมากและกระบวนการในการทำงานมีหลายขั้นตอน

## ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

รายละเอียดของระบบ	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	ระบบนิวแมติก
13. ความเชื่อถือได้ของระบบ	- มีความเชื่อถือได้มากกว่า เพราะควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าเท่านั้น	- มีความเชื่อถือได้น้อยกว่า เพราะควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและระบบทางกล
14. ความยุ่งยากในการติดตั้งระบบ	- ไม่ยุ่งยาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างเดี่ยวๆ สามารถทำงานได้เลย โดยไม่ต้องต่อพ่วงอุปกรณ์เพิ่มเติม	- ยุ่งยาก เนื่องจากมีโครงสร้างหลายชุดที่ประกอบกันเป็นระบบเพื่อให้ทำงานได้
15. ประสิทธิภาพ	- ถ้าพิจารณาในด้านกำลังงานถือว่าน้อย แต่ถ้าในด้านแรงที่ได้ต่อมวลในการเคลื่อนที่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้	- ถ้าพิจารณาในด้านกำลังงานอยู่ในขั้นปานกลาง เพราะต้นกำลังเป็นมอเตอร์บีบที่ใช้กำลังงานไม่มาก แต่ในด้านแรงที่ได้อยู่ในเกณฑ์ดี

จากการเปรียบเทียบที่ได้จะเห็นถึงข้อดีข้อเสียของทั้งสองระบบ ซึ่งเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกระบบใดมาใช้ เพื่อให้ตรงกับลักษณะงานที่ต้องการ และเกิดประโยชน์มากที่สุด

## 5.3 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นและในระยะยาว

## 5.3.1 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้น

เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ระบบที่ใช้ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก

โดยมีรายการของวัสดุ, ราคาของวัสดุ และ ค่าติดตั้ง(ประเมิน) ดังในตารางที่ 5.2

## ตารางที่ 5.2 แสดงรายการวัสดุอุปกรณ์และราคา ของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้าง

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคาสุทธิ	หมายเหตุ
1	อลูมิเนียมฉากขนาด 1 นิ้ว ยาว 6 m	1 เส้น	100	100	ราคาปลีก ทั้งหมด
2	อลูมิเนียมแบนขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 6 m	1 เส้น	80	80	

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคาสุทธิ	หมายเหตุ
3	ท่ออลูมิเนียมขนาด 1 นิ้ว ยาว 1.2 m	1 ท่อน	50	50	เป็นราคา ปลีก ทั้งหมด
4	ท่อเหล็กขนาด 7/8 นิ้ว ยาว 1.2 m	1 ท่อน	120	120	
5	แผ่นเหล็ก สำหรับทำชุดกัน กระแทก และ ทำโครงรองรับ สแต็ปปิ้งมอเตอร์	1 แผ่น	100	100	และบาง รายการ เป็นการ ประมาณ
6	ลูกปืนแนวเชิงเส้น	2 ชุด	500	1,000	
7	ตลับลูกปืนขนาด 22 mm.	2 ตลับ	80	160	
8	แกนเหล็กรูปตัว E ขนาด 1 นิ้ว	1500 แผ่น	500	500	
9	ขดลวดทองแดง #16 SWG	½ ม้วน	500	500	
10	ลิมิตสวิตช์	2 ตัว	10	20	
11	สวิตช์กดติดปล่อยดับ	3 ตัว	120	360	
12	หลอดไฟแสดงสถานะ	3 หลอด	220	660	
13	แมกเนติกคอนแทคเตอร์ 30 A.	2 ตัว	700	1,400	
14	แมกเนติกคอนแทคเตอร์ 20 A.	3 ตัว	500	1,500	
15	ไทมเมอร์ พร้อม ซ็อกเก็ต	1 ชุด	1,050	1,050	
16	ขั้วต่อไฟฟ้า(Banana Jack)	10 ตัว	4	40	
17	สแต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริด แบบหลายสแตค (ของใช้แล้ว)	1 ตัว	300	300	
18	ชุดควบคุมสแต็ปปิ้งมอเตอร์	1 ชุด	700	700	
19	วัสดุอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถคิดราคา ได้อย่างละเอียด เช่น นัท, โบลท์ สายไฟ, ท่ออ่อน , แผ่นเบ็ก กาไลท์ ฯลฯ		500	500	
20	ค่าประกอบและติดตั้ง (ประกอบ และติดตั้งเอง แต่ประมาณการ เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์)		1,500	1,500	
รวมค่าใช้จ่ายขั้นต้นของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ประมาณ 10,640 บาท					

จากข้อมูลในตารางที่ 5.2 ทำให้สามารถประเมินค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นในการจัดสร้างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกได้ แต่ต้นทุนอาจจะเปลี่ยนแปลงได้บ้าง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ, เกรดของวัสดุ และ จำนวนในการสั่งซื้อ เนื่องจากการสร้างเพื่อใช้ในการทดลองเพียง 1 ชุด จึงมีราคาที่สูงกว่าเมื่อสร้างในเชิงพาณิชย์ที่มีปริมาณมาก

- ระบบที่ใช้นิวแมติก

งานที่เคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้น(แบบกระแทก)โดยใช้ระบบนิวแมติก มีรายการของวัสดุ, ราคาของวัสดุ และ ค่าติดตั้ง(ประเมิน) สามารถดูได้จากในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงรายการวัสดุอุปกรณ์และราคาของระบบนิวแมติก

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคาสุทธิ	หมายเหตุ
1	กระบอกสูบลูกสูบ DSN-20-300-PPV	1 ตัว	2,317	2,317	เป็นราคา
2	Main valve รุ่น JDH-5-1/8	1 ตัว	2,069	2,069	ปลีก
3	Silencer รุ่น U-1/8	2 ตัว	100	200	ทั้งหมด
4	One-way flow control valve รุ่น GRLA-1/8-QS-6-RS-B	2 ตัว	381	762	และบาง
5	Push button valve 3/2 NC รุ่น SV-3-M5	2 ตัว	1,288	2,576	รายการ
6	Push button รุ่น T-30-RT	2 ตัว	374	748	เป็นการ
7	Push-in/threaded fitting รุ่น QSM-M5-6	6 ตัว	102	612	ประมาณ
8	Silencer รุ่น U-M5	2 ตัว	114	228	
9	Service unit รุ่น LFR-1/8-S-B	1 ตัว	2,529	2,529	
10	Push-in/threaded fitting รุ่น QS-1/8-6	7 ตัว	75	525	
11	Plastic tubing รุ่น PU-1/8-SW	10 m.	53	530	
12	มอเตอร์ลิ่ม รุ่น DSMI-40-270	1 ตัว	1,150	1,150	
13	เครื่องอัดลม รุ่น VA-51A	1 ตัว	6,500	6,500	
14	ค่าประกอบและติดตั้ง		2,000	2,000	
รวมค่าใช้จ่ายขั้นต้นของระบบนิวแมติก ประมาณ 22,746 บาท					

จากข้อมูลในตารางที่ 5.3 ทำให้สามารถประเมินค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้นในการประกอบและติดตั้งระบบนิวแมติกได้ แต่ต้นทุนอาจจะเปลี่ยนแปลงได้บ้าง ตามราคาตลาด

### 5.3.2 การเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายในระยะยาว

ค่าใช้จ่ายในระยะยาวของทั้งชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น และระบบนิวแมติกนั้นจำเป็นจะต้องพิจารณาให้มึการทำงานลักษณะเดียวกันทั้งสองระบบ แต่จะคิดเฉพาะในตอนทำงานลักษณะเชิงเส้นซึ่งเป็นการทำงานหลักเท่านั้น(การทำงานแบบหมุนเสมือนว่าเป็นคุณสมบัติพิเศษที่เพิ่มเข้ามา)

- ระบบที่ใช้ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก  
แบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วนหลักๆคือ

#### 1. ค่าใช้ไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.2 เมื่อจ่ายแรงดันเฟสที่ 220 V. ค่ากำลังไฟฟ้ารวมด้านเข้าคือ 13868.51 W. กำหนดให้มอเตอร์จะทำงาน 30 ครั้ง/นาที, 8 ชั่วโมง/วัน และ 28 วัน/เดือน เนื่องจากในการทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 0.128 sec แต่ต้องใช้ไฟทั้งตอนผลักออกและดึงกลับจึงต้องคูณด้วยสอง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าไฟฟ้าได้โดย

$$\begin{aligned} \text{เวลาที่ทำงานจริง/ครั้ง} &= 0.128 \times 2 \\ &= 0.256 \text{ sec.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เวลาที่ทำงานจริง/นาที} &= (\text{เวลาที่ทำงานจริง/ครั้ง}) \times (\text{จำนวนครั้งที่ทำงาน/นาที}) \\ &= 0.256 \times 30 \\ &= 7.68 \text{ sec.} \end{aligned}$$

$$\text{เนื่องจากเวลา 1 ชั่วโมง} = 3,600 \text{ sec.}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั่วโมงที่ทำงานต่อวัน} &= (\text{เวลาที่ทำงานจริง/นาที}) \times 60 \times (\text{ชั่วโมงที่ทำงาน/วัน}) / 3,600 \\ &= (7.68 \times 60 \times 8) / 3,600 \\ &= 1.024 \text{ ชั่วโมง/วัน} \end{aligned}$$

$$\text{หน่วยไฟฟ้าต่อเดือน} = (\text{กำลังไฟฟ้า/1,000}) \times (\text{ชั่วโมงที่ทำงาน/วัน}) \times (\text{วันทำงาน/เดือน})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (13,868.51 / 1,000)  $\times$  1.024  $\times$  28 เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามคัดลอก 397.64 หน่วย / ต่อเดือน ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ลักษณะงานที่ใช้เป็นประเภทกิจการขนาดเล็กและใช้ไฟ 151- 400 หน่วย ดังนั้นจากตารางอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง(ภาคผนวก ข.) จะได้

อัตราค่าไฟฟ้า	=	2.7781 บาท/หน่วย
ค่า FT (ช่วง กพ. – พค. 2545)	=	21.95 สตางค์/หน่วย
ค่าไฟฟ้ารวมกับค่า FT	=	$(2.7781 \times 397.64) + (0.2195 \times 397.64)$
	=	1,191.96 บาท/เดือน
ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 %	=	$(1,191.96 \times 0.07)$
	=	83.44 บาท/เดือน
ค่าบริการ	=	40.90 บาท/เดือน
รวมเป็น	=	$1,191.96 + 83.44 + 40.90$
	=	1,316.30 บาท/เดือน

## 2. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ

ค่าการจัดการ	=	2,000 บาท/เดือน
ค่าวัสดุอุปกรณ์ในการผลิต	=	50,000 บาท/เดือน
ค่าแรงงานในการควบคุมเครื่อง	=	200 บาท/วัน
คิดเป็นรายเดือน	=	$200 \times 28$
	=	5,600 บาท/เดือน
ค่าบำรุงรักษา		
- ระบบหล่อลื่น(ลูกปืน)		
- สายไฟหรือฉนวนที่ชำรุด		
เฉลี่ยรวม	=	200 บาท/เดือน
ค่าใช้จ่ายอื่นๆจึงมีค่า	=	$2,000 + 50,000 + 5,600 + 200$
	=	57,800 บาท/เดือน

รวมค่าใช้จ่ายระยะยาวต่อเดือน = ค่าใช้ไฟฟ้า + ค่าใช้จ่ายอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงงานไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค้า

=  $13,16.30 + 57,800$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้งองตั้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 59,116.30 บาท/เดือน

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้จ่ายระยะยาวต่อปี} &= 59,116.30 \times 12 \\ &= 709,395.60 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

- ระบบที่ใช้นิวแมติก

แบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วนหลักๆคือ

### 1. ค่าใช้ไฟฟ้า

เมื่อเลือกใช้กระบอสูบ รุ่น DSN-20-300-PPV โดยมีอัตราความสิ้นเปลืองลมขณะชักออกที่ 0.02031 ลิตร/10 mm. และ ขณะชักเข้าที่ 0.0171 ลิตร/10 mm. โดยระยะชักของกระบอสูบเท่ากับ 300 mm. ทำงานที่ความดัน 6 Kg/cm<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} \text{ความสิ้นเปลืองลม/ครั้ง} &= \text{ความสิ้นเปลืองลมขณะชักออก} + \text{ความสิ้นเปลืองลมขณะชักเข้า} \\ &= (0.02031 \times (300/10)) + (0.0171 \times (300/10)) \\ &= 1.1223 \text{ ลิตร/ครั้ง} \end{aligned}$$

โดยให้กระบอสูบทำงานที่จำนวน 30 ครั้ง/นาที เราจะได้ความสิ้นเปลืองลมของกระบอสูบ ในระยะเวลา 1 นาทีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความสิ้นเปลืองลมต่อนาที} &= (\text{ความสิ้นเปลืองลม/ครั้ง}) \times (\text{จำนวนวนครั้ง/นาที}) \\ &= 1.1223 \times 30 \\ &= 33.67 \text{ (ลิตร/นาที)} \end{aligned}$$

จากข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบนิวแมติก ส่วนที่เป็นตารางข้อมูลแสดงขนาดของเครื่องอัดลม (ภาคผนวก ก.) จะเลือกใช้ชุดเครื่องอัดลม (Air Compressors) ของยี่ห้อ CENTRAL รุ่น VA-51A ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 1/2 HP. ซึ่งข้อมูลในตารางเมื่อใช้งานที่แรงดัน 5 kg/cm<sup>2</sup> ได้ปริมาณลม 66.8 litre/min และที่แรงดัน 7 kg/cm<sup>2</sup> จะได้ปริมาณลม 59.4 litre/min แต่ที่แรงดัน 6 kg/cm<sup>2</sup> นั้นไม่มีข้อมูล จึงหาปริมาณลมโดยการเฉลี่ย จาก 66.8 litre/min และ 59.4 litre/min จะได้ 63.1 litre/min (กำหนดให้การทำงานคือ 8 ชั่วโมง/วัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นอัตราความสิ้นเปลืองลมได้} &= (\text{ความสิ้นเปลืองลม/นาที}) \times 60 \times (\text{ชั่วโมงที่ทำงาน/วัน}) \\ &= 33.67 \times 60 \times 8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 16,161.6 \text{ (ลิตร/วัน)} \\
 \text{ชั่วโมงการทำงาน} &= (\text{ความสิ้นเปลืองลม/วัน}) / (\text{อัตราการผลิตลมของปั๊ม/ชั่วโมง}) \\
 &= 16,161.6 / (63.1 \times 60) \\
 &= 4.27 \text{ (ชั่วโมง/วัน)}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ในหนึ่งเดือนมีการทำงาน 28 วัน สามารถคำนวณหาค่าใช้ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า 1/2 HP.} &= 746 / 2 \\
 &= 373 \text{ W.} \\
 \text{หน่วยไฟฟ้า/เดือน} &= (\text{กำลังไฟฟ้า/1,000}) \times (\text{ชั่วโมงที่ทำงาน/วัน}) \times (\text{วันทำงาน/เดือน}) \\
 &= (373/1,000) \times 4.27 \times 28 \\
 &= 44.60 \text{ หน่วย/เดือน}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ลักษณะงานที่ใช้เป็นประเภทกิจการขนาดเล็กและใช้ไฟในช่วง 1 - 150 หน่วย ดังนั้นจากตารางอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง(ภาคผนวก ข.) จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราค่าไฟฟ้า} &= 1.8047 \text{ บาท/หน่วย} \\
 \text{ค่า FT (ช่วง กท. - พค. 2545)} &= 21.95 \text{ สตางค์/หน่วย} \\
 \text{ค่าไฟฟ้ารวมกับค่า FT} &= (1.8027 \times 44.60) + (0.2195 \times 44.60) \\
 &= 90.19 \text{ บาท/เดือน} \\
 \text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 \%} &= (90.19 \times 0.07) \\
 &= 6.31 \text{ บาท/เดือน} \\
 \text{ค่าบริการ} &= 40.90 \text{ บาท/เดือน} \\
 \text{รวมเป็น} &= 90.19 + 6.31 + 40.90 \\
 &= 137.40 \text{ บาท/เดือน}
 \end{aligned}$$

## 2. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการจัดการ} &= 2,000 \text{ บาท/เดือน} \\
 \text{ค่าวัสดุอุปกรณ์ในการผลิต} &= 50,000 \text{ บาท/เดือน} \\
 \text{ค่าแรงงานในการควบคุมเครื่อง} &= 200 \text{ บาท/วัน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นรายเดือน} &= 200 \times 28 \\ &= 5,600 \text{ บาท/เดือน} \end{aligned}$$

ค่านำรุงรักษา

- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับระบบท่อลม
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับระบบवाल
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องอัดลม

$$\text{เฉลี่ยรวม} = 800 \text{ บาท/เดือน}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้จ่ายอื่นๆจึงมีค่า} &= 2,000 + 50,000 + 5,600 + 800 \\ &= 58,400 \text{ บาท/เดือน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมค่าใช้จ่ายระยะยาวต่อเดือน} &= \text{ค่าใช้ไฟฟ้า} + \text{ค่าใช้จ่ายอื่นๆ} \\ &= 137.40 + 58,400 \\ &= 58,537.40 \text{ บาท/เดือน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้จ่ายระยะยาวต่อปี} &= 58,537.40 \times 12 \\ &= \underline{702,448.80} \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

เมื่อได้ทราบค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้น และ ระยะยาว ของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก และ ของระบบนิวแมติกมาแล้ว จะนำข้อมูลมาบันทึกลงในตารางที่ 5.4 เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการพิจารณาเปรียบเทียบ

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกกับระบบนิวแมติก เมื่อใช้งานในลักษณะเดียวกัน

ระบบ	ค่าใช้จ่ายในช่วงเริ่มต้น (บาท)	ค่าใช้จ่ายในระยะยาว (บาท/ปี)
1. ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติก	10,640.00	709,395.60
2. ระบบนิวแมติก	22,746.00	702,448.80
ผลต่างของค่าใช้จ่าย	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกมีค่าใช้จ่ายถูกกว่าระบบนิวแมติกอยู่ 12,106.00 บาท	ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกมีค่าใช้จ่ายแพงกว่าระบบนิวแมติกอยู่ 6,946.80 บาท/ปี

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองในบทที่ 4. สามารถนำข้อมูลเพื่อนำมาสรุปผลในด้านต่างๆดังนี้

### 6.1 สรุปผลทางด้านอินพุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.11 จะเห็นว่ากระแสเฟสแปรผันตามแรงดันอินพุต และเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่สร้างมีการเปิดวงจรทางแม่เหล็กที่ปลายทั้งสองด้าน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสไม่สมดุลกัน จึงทำให้กระแสในแต่ละเฟสจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยในแต่ละช่วงของแรงดันอินพุต

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.12 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะแปรผกผันกับแรงดันอินพุต และเนื่องจากกระแสเฟสแปรผันตามแรงดันอินพุต จึงทำให้กระแสเฟสก็จะแปรผกผันกับเพาเวอร์แฟคเตอร์ด้วย ดังนั้นเมื่อกระแสยิ่งสูง ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ก็จะลดลง ถ้าเป็นกิจการขนาดใหญ่จะทำให้ต้องจ่ายค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์มากขึ้น ดังนั้นในการเลือกใช้ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ จำเป็นต้องพิจารณาในส่วนนี้ด้วย

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าค่ากำลังงานอินพุตแปรผันตามแรงดันอินพุต เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟในภาพที่ 4.11 และ 4.12 ทำให้ทราบว่า ค่ากำลังงานอินพุตจะแปรผันตามกระแส และ แปรผกผันกับเพาเวอร์แฟคเตอร์ ดังนั้น ถ้าต้องการให้ค่าไฟฟ้าลดลงจึงต้องทำให้กำลังงานอินพุตมีค่าลดลงด้วยการลดกระแสอินพุตให้ได้มากที่สุด โดยไม่ทำให้แรงที่ได้ทางด้านเอาท์พุตลดลง ซึ่งเมื่อกระแสลดลงก็จะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงขึ้น ในกรณีที่จะนำเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ไปใช้กับกิจการขนาดใหญ่ที่ต้องเสียค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์ จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์ลงไปได้อีก

### 6.2 สรุปผลทางด้านเอาท์พุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.14 จะเห็นว่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แปรผันตามแรงดันอินพุต แต่ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ถือว่ามียัตราเร็วที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับเครื่องกลไฟฟ้าเชิงเส้นชนิดอื่น คือ 2.891 m/sec ที่แรงดันอินพุต 220 V. เนื่องจากโครงสร้างเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่มีขนาดเล็กและมีการเคลื่อนที่ในระยะสั้น จึงเสมือนว่าไม่มีผลกระทบจากส่วนปลาย (แต่ถ้าเป็นมอเตอร์เชิงเส้นทั่วไปที่มีอัตราเร็วสูงๆ จะเกิดผลกระทบมาก)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าสลิปจะแปรผกผันกับแรงดันอินพุต จึงทำให้สลิปแปรผกผันกับอัตราเร็วด้วย ซึ่งเป็นไปตามหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยค่าสลิปที่

ได้จากชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้มีค่า 0.749 ที่แรงดันอินพุต 220 V. ซึ่งเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามอเตอร์ตัวนี้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเหมือนเพิ่งเริ่มสตาร์ท และเคลื่อนที่ได้เพียงระยะสั้นๆ ก็หยุดการเคลื่อนที่เสียก่อน ซึ่งกระแสในช่วงสตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปมักจะสูงกว่ากระแสในการทำงานประมาณ 5-7 เท่า จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ก็กินกระแสสูงมากในการทำงานแต่ละครั้ง(แต่ก็เป็นช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.16 จะเห็นว่าแรงจากการเคลื่อนที่แปรผันตามแรงดันอินพุต และเมื่อเทียบกับกราฟในภาพที่ 4.14 และ 4.15 จะได้ความสัมพันธ์คือ แรงจากการเคลื่อนที่ จะแปรผันตามอัตราเร็ว และ แปรผกผันกับสลิป ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้าเชิงเส้น และชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้เป็นเครื่องกลไฟฟ้าเชิงเส้นที่เน้นด้านแรง (Force Machine) เอาท์พุตที่ต้องการก็คือแรงจากการเคลื่อนที่โดยมีอัตราเร็วและสลิปเป็นตัวแปร ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึงสอดคล้องตามทฤษฎีของเครื่องกลไฟฟ้าเชิงเส้น ซึ่งต่างจากเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดหมุนรอบตัวเองทั่วไปที่ต้องการเอาท์พุตในรูปของแรงบิดหรือความเร็วรอบ โดยแรงบิดจะแปรผกผันกับความเร็วรอบ และ แปรผันตามสลิป (ในช่วงพิกัดทำงานปกติ)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.17 จะเห็นว่ากำลังงานเอาท์พุตแปรผันตามแรงดันอินพุต และเมื่อเทียบกับกราฟในภาพที่ 4.16 ทำให้ทราบว่ากำลังงานเอาท์พุตแปรผันตามแรงจากการเคลื่อนที่ แต่ค่ากำลังงานเอาท์พุตที่ได้ ถือว่าน้อยมาก เช่น ที่แรงดันอินพุต 220 V. จะได้เพียง 411.311 W เมื่อเทียบกับกำลังงานอินพุตที่ต้องใช้คือ 13868.51 W แต่จะได้แรงจากการเคลื่อนที่ 142.273 N ซึ่งเป็นแรงที่สามารถนำไปใช้งานเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกที่พิกัดใกล้เคียงกันได้

### 6.3 สรุปผลทางด้านสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 จะเห็นว่าประสิทธิภาพด้านกำลังงาน , อัตราส่วนของแรงต่อมวลของส่วนที่เคลื่อน และ อัตราส่วนของแรงต่อกำลังงานอินพุตจะแปรผันตามแรงดันอินพุต ตามลำดับ

ดังนั้นหากต้องการประสิทธิภาพด้านกำลังงานมากขึ้น ก็จำเป็นต้องทำให้เครื่องกลไฟฟ้าชุดนี้สร้างแรงที่เอาท์พุตมากขึ้น ซึ่งไม่คุ้มต่อการลงทุน เนื่องจากโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกนั้นมีประสิทธิภาพด้านกำลังงานน้อยมาก เช่นที่แรงดันเฟส 220 V. จะได้เพียง 2.966 % เท่านั้น แต่หากพิจารณาที่อัตราส่วนของแรงต่อมวลของส่วนที่เคลื่อนที่ จะได้แรงเป็นที่น่าพอใจคือ 22.583 N/kg ซึ่งสามารถนำไปใช้งานจริงได้

สรุปได้ว่า ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทดแทนระบบนิวแมติกในส่วนที่ให้การเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นที่สร้างเพื่อการวิจัยนี้ ใช้โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ซึ่งเป็นมอเตอร์เชิงเส้นชนิดที่ทำงานด้วยความเร็วต่ำ มีช่วงในการทำงานสั้นๆ และมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับมอเตอร์เชิงเส้นชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเครื่องกลไฟฟ้าชนิดที่เน้นด้านของแรง (Force Machine)

เนื่องจากเครื่องกลไฟฟ้าชนิดนี้ไม่ได้พิจารณาเรื่องประสิทธิภาพทางด้านกำลังงานเป็นสำคัญ แต่จะพิจารณาในเรื่องของแรงที่เอาต์พุตเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถใช้ทดแทนระบบนิวแมติกได้ในงานที่ต้องการแรงในการกระแทก, มีเสียงรบกวนน้อย และความเร็วต้นไม่สูงมากนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาวะการใช้งานจริง แต่ยังมีข้อที่ควรพิจารณาปรับปรุงอีกพอสมควรดังจะได้อธิบายในหัวข้อการเสนอแนะต่อไป

### หมายเหตุ

มอเตอร์เชิงเส้นนั้นเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่แบ่งชนิดตามลักษณะการทำงานได้เป็น 3 ชนิด [1] คือ

1. เครื่องกลไฟฟ้าชนิดที่เน้นด้านของแรง (Force Machine)
2. เครื่องกลไฟฟ้าชนิดที่เน้นด้านของกำลังงาน (Power Machine)
3. เครื่องกลไฟฟ้าที่เน้นด้านของพลังงาน (Energy Machine)

### 6.4 สรุปผลในส่วนของสแต็ปปีงมอเตอร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.25 จะเห็นว่ากระแสของสแต็ปปีงมอเตอร์จะมีการเพิ่มขึ้นตามแรงบิดเพื่อให้สามารถดูดโหลดที่มีมวลมากขึ้นได้ แสดงว่ากระแสแปรผันตามแรงบิดในกรณีเมื่อสแต็ปปีงมอเตอร์ต้องดูดโหลดอย่างต่อเนื่อง

และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 4.26 จะเห็นว่าความเร็วรอบของสแต็ปปีงมอเตอร์จะลดลงเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น แสดงว่าความเร็วรอบแปรผกผันกับแรงบิด

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กระแสแปรผกผันกับความเร็วรอบ เมื่อสแต็ปปีงทำงานในลักษณะหมุนอย่างต่อเนื่อง ส่วนเมื่อให้สแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในลักษณะที่หมุนแล้วกำหนดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติพิเศษของสแต็ปปีงมอเตอร์ซึ่งช่วยให้มีความหลากหลายในการใช้งาน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

### 6.5 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้ จะไม่กล่าวถึงสแต็ปปีงมอเตอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่คืออยู่แล้ว และไม่ได้เป็นส่วนทำงานหลักของชุดเครื่องกลไฟฟ้านี้ แต่จะกล่าวถึงข้อควรปรับปรุงในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก ซึ่งเป็นส่วนทำงานหลักของชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติกนี้ โดยวิเคราะห์จากบทสรุปที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอกที่สร้างขึ้นนี้กินกระแสสูงในช่วงเวลาสั้นๆ แต่เมื่อคิดเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมจะสูงกว่าระบบนิวแมติกเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าสามารถลดกระแสอินพุตลงโดยให้ได้แรงเอาต์พุตเท่าเดิม ก็จะช่วยลดค่าไฟฟ้า รวมทั้งค่ากำลังงานรีแอกทีฟ (ในกรณีที่เป็นกิจการขนาดใหญ่) ซึ่งถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายสำคัญของชุดเครื่องกลไฟฟ้าที่สร้างขึ้น โดยมีแนวทางดังนี้

1. ลดช่องว่างระหว่างส่วนที่เคลื่อนที่และส่วนที่อยู่กับที่ให้น้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยลดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลให้น้อยลง ทำให้กระแสขณะสตาร์ทลดลง โดยในการวิจัยนี้ โครงสร้างของส่วนที่อยู่กับที่ทำมาจากแกนเหล็กรูปตัว E ประกะกันแล้วเรียงเป็น 8 แฉก(ดังในบทที่3) ทำให้ช่องว่างมีความห่างและไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นหากเป็นไปได้ ควรออกแบบให้โครงสร้างของส่วนที่เคลื่อนที่ผลิตมาจากแผ่นเหล็กลามิเนตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูง นำมาประกบให้เป็นชิ้นเดียวกัน จะทำให้รองรับส่วนโค้งของส่วนที่เคลื่อนที่ได้พอดี และช่วยลดช่องว่างทางกลลงได้มาก

2. วัสดุที่ใช้ทำส่วนที่เคลื่อนที่ ควรเลือกใช้ท่อโลหะที่มีน้ำหนักเบาแต่ทนทานและมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี แล้วนำมาเคลือบผิวด้วยทองแดงหรือลูมิเนียมด้วยวิธีการชุบเพื่อทำให้ผิวของส่วนที่เคลื่อนที่บางลง ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างทางแม่เหล็กได้อีก

3. เนื่องจากมอเตอร์ชุดนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่มีการเคลื่อนที่ในช่วงสั้นๆ จึงขับด้วยวิธีจ่ายไฟโดยตรงด้วยแมกเนติกคอนแทคเตอร์ แต่หากพัฒนาให้มีการขับเคลื่อนด้วยวงจรถิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งสามารถควบคุมพารามิเตอร์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตได้ คาดว่าจะทำให้มีประสิทธิภาพด้านกำลังงานดียิ่งขึ้น

4. ปรับปรุงระบบหล่อลื่นทางกลของส่วนที่เคลื่อนที่ เพื่อลดแรงเสียดทานทางกล และ ควรประกอบติดตั้งโครงสร้างทางกลต่างๆ ให้มีความเที่ยงตรงที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรกลและกระบวนการประกอบที่ทันสมัยมาช่วย

ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และผลผลิตออกมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเกิดประโยชน์อย่างมากในงานทางอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. A. Nasar and I. Boldea . **Linear Electric Motor : Theory , Design and Practical Application.** New Jersey : Prentice-Hall . 1987.
- [2] S. A. Nasar and I. Boldea . **Linear Motion Electromagnetic Systems .** A Wiley-Interscience Publication (John Wiley & Sons). 1985.
- [3] S. A. Nasar and I. Boldea . **Linear Motion Electric Machines .** John Wiley & Sons , Inc . 1976.
- [4] Takashi Kenjo . **Stepping Motors and Their Microprocessor controls .** Oxford . Clarendon Press. 1984.
- [5] พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง, พรชัย เงามฉาย, สุวิทย์ ป้องคำสิงห์. “มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นแบบแกนกระบอก.” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [6] E.R. Laithwaite . **Induction Machines for Special Purpose.** George Newnes Limited. London . W.C.2 . 1966.
- [7] Syed A. Nasar . **Hand Book of Electric Machines .** New York : Mc Graw-Hill, Inc. 1987.
- [8] ปานเพชร ชินินทร และ ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์. นวัตกรรมอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีอีดูเคชั่น จำกัด(มหาชน). 2541.
- [9] ประภาส ไพรสวรรณา, สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์. “ชุดเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนระบบนิวแมติก.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ข้อมูลของระบบนิเวศที่นำมาเปรียบเทียบ

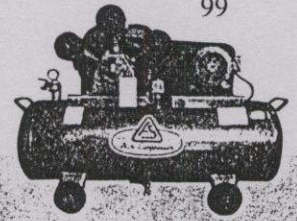


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# AIR COMPRESSORS

VERNMENT APPROVED GRADE "A" QUALITY

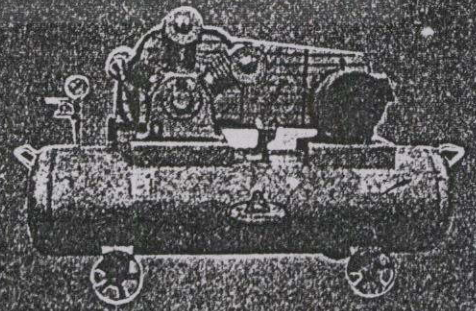
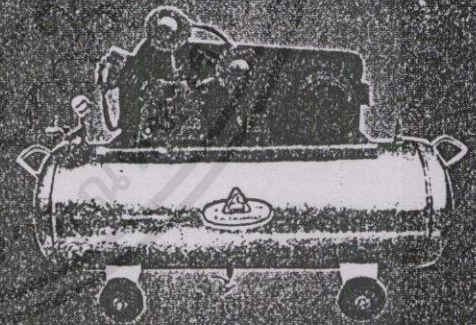


## SINGLE STAGE AIR COMPRESSORS

Model	Motor Required		Cylinder			Comp. R.P.M	Piston Displacement		Actual Delivery at Working Pressure				Working Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Maximum Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Air Tank	
	HP	KW	Bore (m/m)	Stroke (m/m)	Number		liters/min	CFM	5kg/cm <sup>2</sup>		7kg/cm <sup>2</sup>				Capacity (liters)	Size (m/m)
									liters/min	CFM	liters/min	CFM				
1/4	0.2	51	42	1	640	55	1.94	34.7	1.22	30.8	1.08	7	10	36	255 x 700	
1/4	0.2	51	42	1	640	55	1.94	34.7	1.22	30.8	1.08	7	10	36	255 x 700	
1/2	0.4	65	44	1	700	102	3.60	64.2	2.26	57.1	2.01	7	10	64	325 x 790	
1/2	0.4	65	44	1	700	102	3.60	64.2	2.26	57.1	2.01	7	10	80	325 x 970	
1/2	0.4	51	42	2	620	106	3.74	66.8	2.35	59.4	2.09	7	10	80	325 x 970	
1	0.75	65	44	2	635	185	6.54	125.8	4.44	116.5	4.12	7	10	90	350 x 1000	
1	0.75	65	44	2	635	185	6.54	125.8	4.44	116.5	4.12	7	10	117	390 x 1000	
2	1.5	65	48	3	635	303	10.70	206.0	7.27	190.9	6.74	7	10	90	350 x 1000	
2	1.5	65	48	3	635	303	10.70	206.0	7.27	190.9	6.74	7	10	117	390 x 1000	
2	1.5	65	48	3	635	303	10.70	206.0	7.27	190.9	6.74	7	10	148	390 x 1240	
3	2.2	80	60	2	770	462	16.32	314.2	11.10	291.0	10.28	7	10	148	390 x 1240	
3	2.2	80	60	2	770	462	16.32	314.2	11.10	291.0	10.28	7	10	148	390 x 1240	
3	2.2	80	60	2	770	462	16.32	314.2	11.10	291.0	10.28	7	10	260	490 x 1440	
5	3.7	80	60	3	850	767	27.10	512.6	18.42	483.2	17.10	7	10	148	390 x 1240	
5	3.7	80	60	3	850	767	27.10	512.6	18.42	483.2	17.10	7	10	260	490 x 1440	
5	3.7	80	60	3	850	767	27.10	512.6	18.42	483.2	17.10	7	10	260	490 x 1440	
5	3.7	80	60	3	850	767	27.10	512.6	18.42	483.2	17.10	7	10	304	490 x 1770	
7 1/2	5.5	100	70	2	960	1045	36.93	710.6	25.10	658.4	23.30	7	10	260	490 x 1440	
10	7.5	100	70	3	900	1484	52.43	1009.0	35.70	934.9	33.00	7	10	304	490 x 1770	
15	11.0	120	80	3	860	2340	82.70	1591.0	56.20	1474.0	52.10	7	10	304	490 x 1770	
15	11.0	120	80	3	860	2340	82.70	1591.0	56.20	1474.0	52.10	7	10	520	600 x 1850	
15	11.0	120	80	3	860	2340	82.70	1591.0	56.20	1474.0	52.10	7	10	850	760 x 1870	

## TWO STAGES AIR COMPRESSORS

Model	Motor Required		Cylinder			Comp. R.P.M	Piston Displacement		Actual Delivery at 12 kg/cm <sup>2</sup> (170 psi)		Maximum Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Air Tank	
	HP	KW	Bore (m/m)	Stroke (m/m)	Number		liters/min	CFM	liters/min	CFM		Capacity (liters)	Size (m/m)
1	0.75	65 x 1	42 x 1	44	750	110	3.9	84	3.0	15-18	90	350 x 1000	
2	1.5	65 x 2	51 x 1	48	800	255	9.0	196	6.9	15-18	90	350 x 1000	
3	2.2	65 x 2	51 x 1	48	950	303	10.7	233	8.2	15-18	148	390 x 1240	
5	3.7	80 x 2	65 x 1	60	950	572	20.2	457	16.1	15-18	260	490 x 1440	
5	3.7	80 x 2	65 x 1	60	950	572	20.2	457	16.1	15-18	304	490 x 1770	
7 1/2	5.5	100 x 2	80 x 1	70	750	825	29.2	668	23.6	15-18	260	490 x 1440	
10	7.5	100 x 2	80 x 1	70	990	1088	38.5	849	30.0	15-18	304	490 x 1770	
15	11.0	120 x 2	100 x 1	80	860	1556	55.0	1230	43.5	15-18	304	490 x 1770	
15	11.0	120 x 2	100 x 1	80	860	1556	55.0	1230	43.5	15-18	520	600 x 1850	



ตั้งป็นคนไทย  
**ทิว.เอ.เอส.**



**TIEW A. S. MACHINERY CO., LTD.**  
 23-27 AND 282-284 NAKORN KASEM SOI 1, CHAROENKRUNG RD.  
 SAMPANTHAWONG, BANGKOK 10100 THAILAND.  
 TEL : 222-9880, 222-2284, 222-1432, 222-7093, 221-2200. FAX : 225-3724

## The Pneumatic Catalog

Welcome to the Festo Pneumatic Catalog on the Internet.

You can search for products and product information in three ways.

### Features search

Use this method if you know what the product is required to achieve.

### Image search

Use this method if you know what the product looks like.

### Direct search

Use this method if you know the product as part number, type code, name or a keyword in its description.

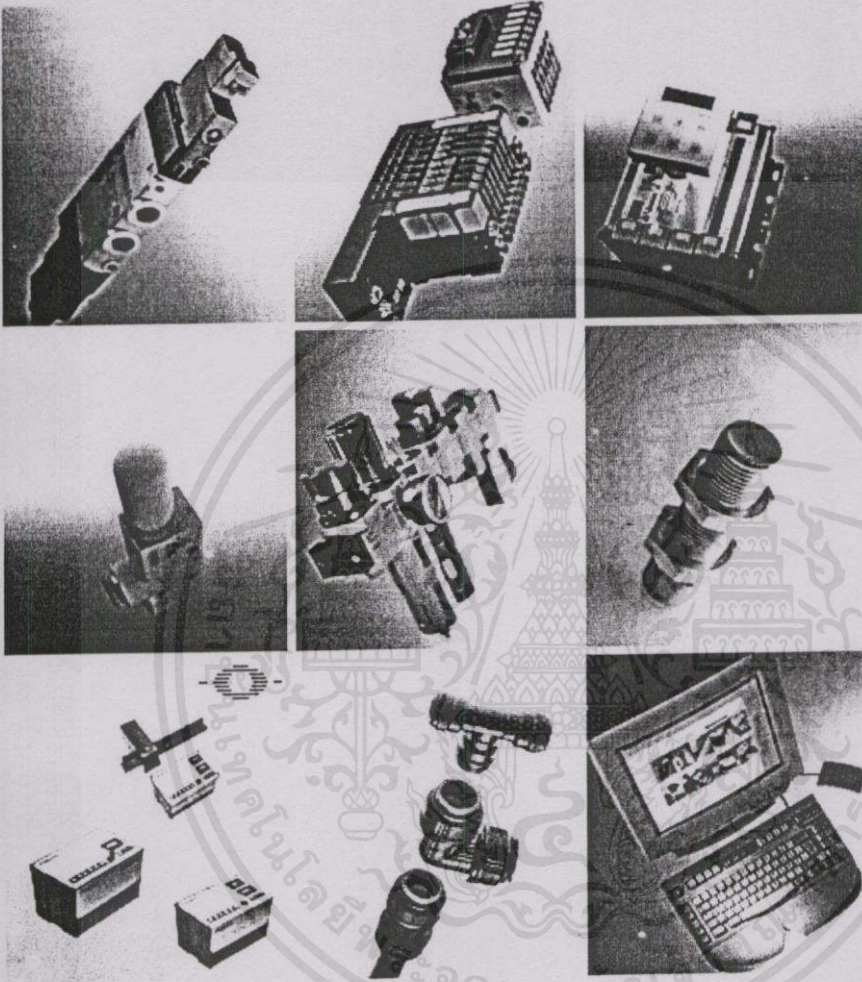
**Log in** as registered user

This application is best viewed at 1024 X 768 with Microsoft Internet Explorer 4 and higher or Netscape Navigator 4 and higher. Javascript has to be enabled.

© 2002 Festo AG & Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Image search



© 2002 Festo AG & Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Detail view

Double acting cylinder  
8751  
DSN-20-300-PPV



### Criterion

### Feature

Mode of operation	Double acting
Shape piston	Round
Shape of piston rod	Round
In accordance with standard ISO	ISO 6432
Sensing type	None
Type of cushioning	Adjustable pneumatic cushioning
Cushioning length	17 mm
Protection against torsion	None
Piston, nominal size	20 ---
Stroke	300 mm
Piston rod diameter	8 mm
End of piston rod	I
KK Piston rod thread	M 8
Operating pressure min.	1 bar
Operating pressure max.	10 bar
Minimum ambient temperature	-20 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

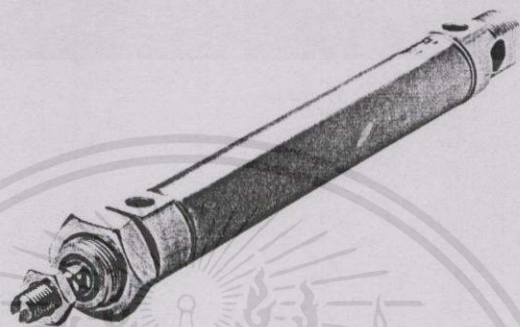
Maximum ambient temperature	80 °C
Anschlussart Lagerdeckel	Female thread
EE Connecting thread for bearing cap	G 1/8
Material of cap	Kneaded aluminium alloy
Material of seals	NBR, TPE-U(PU)
Material of piston rod	Stainless high-alloy steel
Material of barrel/housing	Stainless high-alloy steel
Coating of cover	Colourless anodised
Air connection type cover cap	Female thread
EE Connecting thread for end cap	G 1/8
Effective force (theor.) at 6 bar, adv.	188.5 N
Effect. force (theor.) at 6 bar, return	158.3 N
Air consumption at 6 bar advance /10mm	0.0203 l
Air consumption at 6 bar ret stroke/10mm	0.017 l
Medium	Dried air, lubricated or unlubricated
Constant slow speed	Standard

© 2002 Festo AG & Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

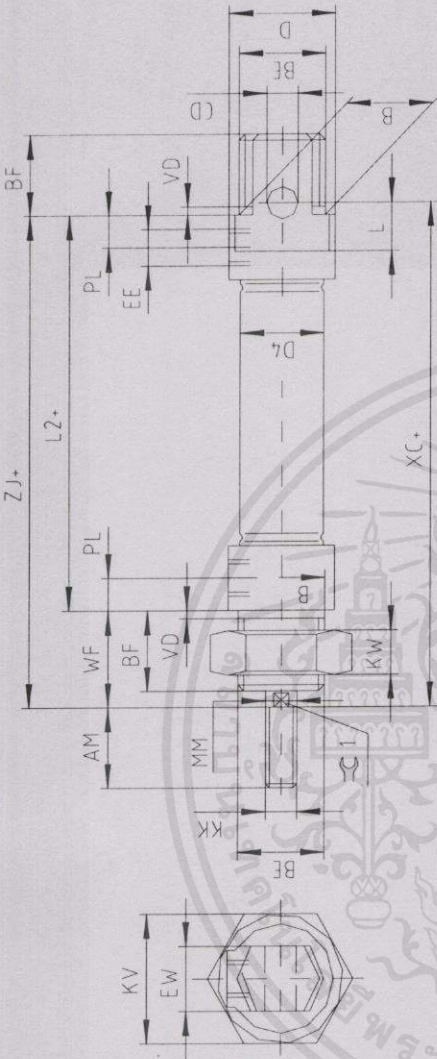
## Product picture

Double acting cylinder  
DSN-20-300-PPV  
8751



© 2002 Festo AG & Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



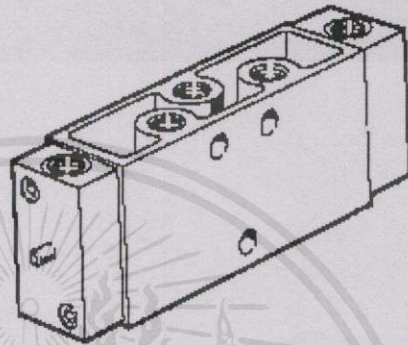
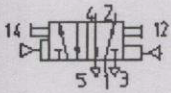
Position	AM	B	BE	BF	CD	DI	D4	EE	EW	KK	KV	KW	MM	L	L2	PL	VD	WF	XC	ZJ
φ	φ				φ	φ	φ													
mm		h9												h8						
8	12	12	M12x1.25	12	L	15	13	M5	8	M 4	19	6	L	4.6	6	2	16	64	62	5
11	12	12	M12x1.25	12	L	15	13	M5	8	M 4	19	6	L	6.6	6	2	16	64	62	5
12	16	16	M16x1.5	17	6	21	13	M5	12	M 6	24	8	6	9.5	6	2	22	75	72	5
16	16	16	M16x1.5	17	6	20	17	M5	12	M 6	24	8	6	9.5	6	2	22	82	78	5
21	22	22	M22x1.5	21	8	27	21	G1/8	16	M 8	32	11	8	12.6	8	2	24	95	92	7
25	22	22	M22x1.5	22	8	27	26	G1/8	16	M11x1.25	32	11	11	12.6	8	2	28	104	97	5

\* = Plus stroke length

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Detail view

Double pilot valve, dominant function  
8824  
JDH-5-1/8

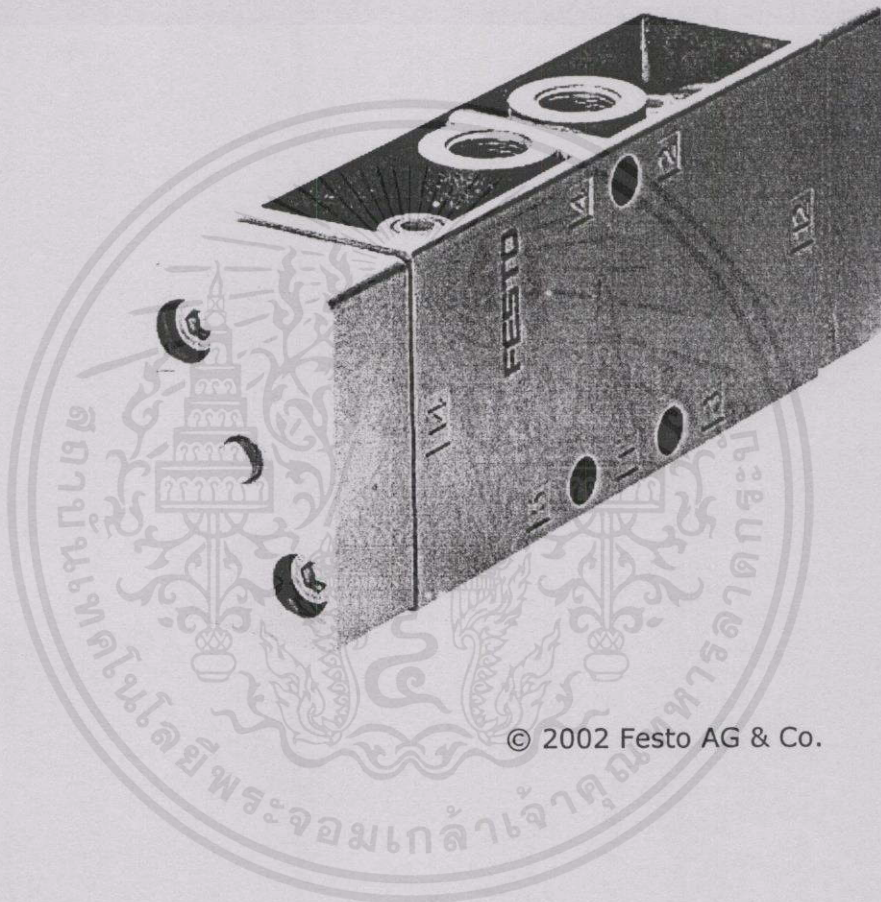


Criterion	Feature
Symbol	00991012
Switching function short code	5/2
Control type	Bistable, dominant
Nominal size	5 mm
Operating pressure min.	bar
Operating pressure max.	10 bar
Minimum ambient temperature	-10 °C
Maximum ambient temperature	60 °C
Steuerdruck min.	2.3 bar
Pilot pressure max.	10 bar
Connection type main connections	Thread
Connector thread	G 1/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่ควรใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอื่นใดที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

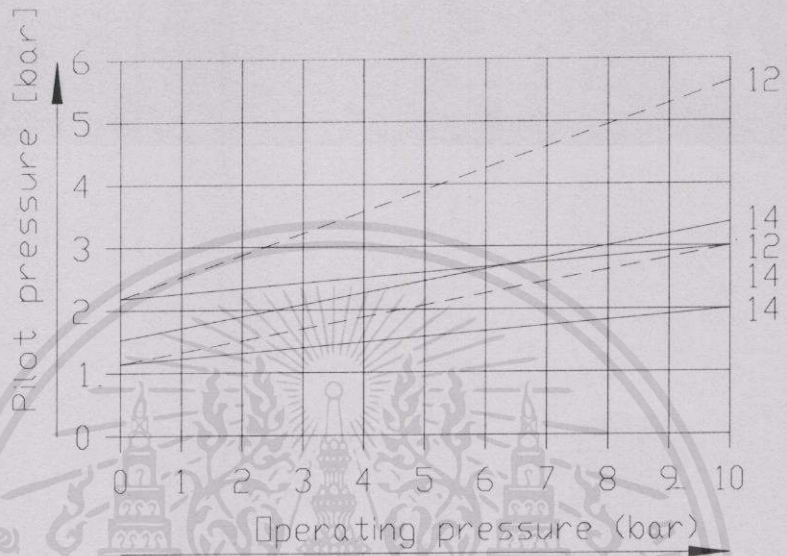
## Product picture

Double pilot valve, dominant  
function  
JDH-5-1/8  
8824



© 2002 Festo AG & Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**FESTO** 012163 -03 / DG / JHM-5-1/8  
KV-VJ / KI / 26.08.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### ข้อมูลอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อัตราค่าไฟฟ้าจำแนกตามกิจการไฟฟ้า

คณะรัฐมนตรีได้ลงมติเห็นชอบเรื่องการปรับโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า ในการประชุมเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม 2543 และการไฟฟ้านครหลวงได้ประกาศใช้อัตราค่าไฟฟ้าใหม่ โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2543 นั้น

โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าใหม่นี้ ได้จำแนกรายละเอียดอัตราค่าไฟฟ้าของแต่ละกิจการไฟฟ้า คือ กิจการผลิต กิจการระบบส่ง กิจการระบบจำหน่าย และกิจการค้าปลีก รวมทั้งการอุดหนุนค่าไฟฟ้า ระหว่างกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความชัดเจน โปร่งใส และสะท้อนถึงต้นทุนของแต่ละกิจการไฟฟ้า

### อัตรารูปกติ

#### ประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย

ลักษณะการใช้ สำหรับการใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือนที่อยู่อาศัย วัดและโบสถ์ของศาสนาต่างๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว

#### 1.1 อัตรารูปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน

การใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟฟ้าจริง				การอุดหนุนค่าไฟฟ้า		อัตราค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บ	
	อัตราค่าผลิตไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	อัตราค่าบริการระบบส่ง (บาท/หน่วย)	อัตราค่าบริการระบบจำหน่าย (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	อัตราค่าบริการระบบจำหน่าย (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
ค่าบริการรายเดือน				40.90		32.71		8.19
หน่วยที่ 1-5	1.5518	0.2818	0.4849		2.3185		0.0000	
หน่วยที่ 6-15	1.5518	0.2818	0.4849		0.9609		1.3576	
หน่วยที่ 16-25	1.5518	0.2818	0.4849		0.7740		1.5445	
หน่วยที่ 26-35	1.5518	0.2818	0.4849		0.5217		1.7968	
หน่วยที่ 36-100	1.5518	0.2818	0.4849		0.1385		2.1800	
หน่วยที่ 101-150	1.5518	0.2818	0.4849		0.0451		2.2734	
หน่วยที่ 151-400	1.5518	0.2818	0.4849		-0.4596		2.7781	
ตั้งแต่ 400 หน่วยขึ้นไป	1.5518	0.2818	0.4849		-0.6595		2.9780	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ควรพิมพ์แจกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 อัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

การใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟฟ้าจริง				การอุดหนุนค่าไฟฟ้า		อัตราค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บ	
	อัตราค่า ผลิตไฟฟ้า	อัตราค่า บริการ ระบบส่ง	อัตราค่า บริการ ระบบจำหน่าย	ค่าบริการ	อัตราค่า บริการ ระบบจำหน่าย	ค่าบริการ	ค่าพลังงาน ไฟฟ้า	ค่าบริการ
	(บาท/หน่วย)	(บาท/หน่วย)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)
ค่าบริการรายเดือน หน่วยที่ 1-150	1.5518	0.2818	0.4849	40.90	0.5138	-	1.8047	40.90
หน่วยที่ 151-400	1.5518	0.2818	0.4849		-0.4595	-	2.7781	
ตั้งแต่ 400 หน่วยขึ้นไป	1.5518	0.2818	0.4849		-0.6810	-	2.9780	

## ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัยอุตสาหกรรมและหน่วยงาน  
รัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ใน 15 นาที  
ที่สูงสุด และต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว

## 2.1 อัตราปกติ

การใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟฟ้าจริง				การอุดหนุนค่าไฟฟ้า		อัตราค่าไฟฟ้าที่เรียกเก็บ	
	อัตราค่า ผลิตไฟฟ้า	อัตราค่า บริการ ระบบส่ง	อัตราค่า บริการ ระบบจำหน่าย	ค่าบริการ	อัตราค่า บริการ ระบบจำหน่าย	ค่าบริการ	ค่าพลังงาน ไฟฟ้า	ค่าบริการ
	(บาท/หน่วย)	(บาท/หน่วย)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)	(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)
2.1.1 12-24 กิโลวัตต์ ค่าบริการรายเดือน ค่าพลังงานไฟฟ้า	1.5765	0.3419	0.3009	228.17	-0.2456	-	2.4649	-
2.1.2 ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ค่าบริการรายเดือน				57.95		17.05	-	<u>40.90</u>
หน่วยที่ 1-150	1.6437	0.3624	0.6187	-	0.8201	-	1.8047	-
หน่วยที่ 151-400	1.6437	0.3624	0.6187	-	-0.1533	-	2.7781	-
ตั้งแต่ 400 หน่วยขึ้นไป	1.6437	0.3624	0.6187	-	-0.3532	-	2.9780	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สาเหตุการปรับค่า Ft 21.95 สตางค์ต่อหน่วย

(เดือนกุมภาพันธ์ 2545 - พฤษภาคม 2545)

คณะกรรมการกำกับดูแลการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ในการประชุมครั้งที่ 1/2545 (ครั้งที่ 101) ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2545 ได้พิจารณาค่า Ft สำหรับเรียกเก็บเงินในเดือนกุมภาพันธ์ 2545 - พฤษภาคม 2545 และมีมติเห็นชอบให้มีการปรับค่า Ft ลดลง 0.82 สตางค์/หน่วย จาก 22.77 สตางค์/หน่วย เป็น 21.95 สตางค์/หน่วย ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่เรียกเก็บจากประชาชนลดลงจาก 2.52 บาท/หน่วย เป็น 2.51 บาท/หน่วย หรือลดลงประมาณ 0.32% คิดเป็นเงินที่ประชาชนประหยัดประมาณ 65 ล้านบาท/เดือน ทั้งนี้ในส่วนของค่าเชื้อเพลิงและค่าซื้อไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.23 สตางค์ต่อหน่วย แม้ว่าจะมีการนำส่วนลดค่าก๊าซธรรมชาติจากการเจรจาซื้อขายกับบริษัทยูโนแคลฯ จำนวน 638 ล้านบาท มาช่วยบรรเทาแล้วก็ตาม (ในช่วง 4 เดือนก่อน ก็มีส่วนลดจากการเจรจาก๊าซฯ แหล่งบงกช 535 ล้านบาท ซึ่งทำให้ค่า Ft ลดลงไปแล้ว) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้พลังงานในการผลิตไฟฟ้าลดลงจากเดิม และราคาค่าเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์ ยังคงทรงตัวอยู่ อย่างไรก็ตามสาเหตุหลักที่ช่วยให้ค่า Ft ปรับลดลง เนื่องจากผลกระทบอัตราแลกเปลี่ยนต่อภาระหนี้ของการไฟฟ้าลดลงจากเดิมเป็นจำนวน 1.84 สตางค์/หน่วย มีผลจากค่าเงินบาทที่แข็งตัวขึ้นจาก 45.22 บาท/ดอลลาร์ เป็น 44.30 บาท/ดอลลาร์รวมทั้งอัตราเงินเฟ้อลดลงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ไม่ใช่ค่าเชื้อเพลิง และค่าซื้อไฟฟ้า ลดลงจากเดิม 0.60 สตางค์/หน่วย และการปรับ Ft ครั้งนี้ยังงรวมผลจากการปรับลดบงกชของ 3 การไฟฟ้า 7 สตางค์/หน่วย อยู่ด้วย

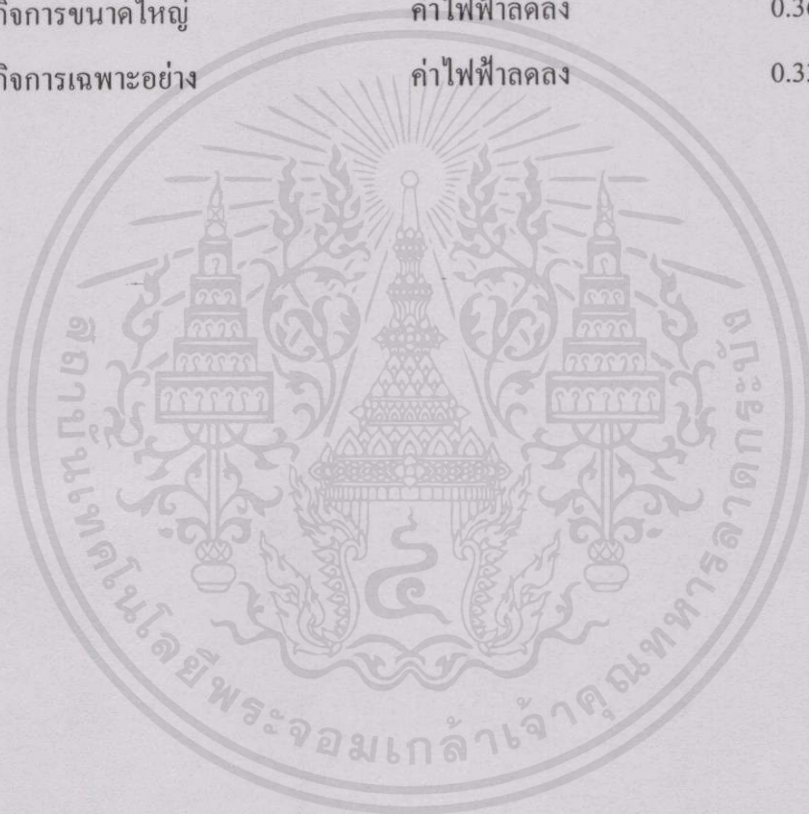
### ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Ft

ค่าเชื้อเพลิงและค่าซื้อไฟฟ้า	+30.15 สตางค์ต่อหน่วย
ผลกระทบอัตราแลกเปลี่ยน	+0.68 สตางค์ต่อหน่วย
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานส่วนที่ไม่ใช่ค่าเชื้อเพลิง	-1.05 สตางค์ต่อหน่วย
รายได้ของการไฟฟ้าที่สูงกว่าแผน (MR)	-7.00 สตางค์ต่อหน่วย
จำนวนเงินของค่า Ft ที่เรียกเก็บได้จริงแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้	+1.36 สตางค์ต่อหน่วย
ค่าสะสมที่เกิดจากค่า Ft ที่คำนวณได้แตกต่างจากที่เรียกเก็บ	-2.19 สตางค์ต่อหน่วย
รวม	+21.95 สตางค์ต่อหน่วย

ดังนั้นค่า Ft จึงลดลงสุทธิเท่ากับ 0.82 สตางค์/หน่วย

โดยแยกเป็นผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทได้ดังนี้

บ้านอยู่อาศัย	ค่าไฟฟ้าลดลง	0.31%
กิจการขนาดเล็ก	ค่าไฟฟ้าลดลง	0.27%
กิจการขนาดกลาง	ค่าไฟฟ้าลดลง	0.31%
กิจการขนาดใหญ่	ค่าไฟฟ้าลดลง	0.36%
กิจการเฉพาะอย่าง	ค่าไฟฟ้าลดลง	0.33%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นาย สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2516 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ในปีการศึกษา 2538

ปี พ.ศ. 2539 เข้ารับราชการในตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 สังกัดสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ กระทรวงศึกษาธิการ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 4 สังกัดสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ กระทรวงศึกษาธิการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้