

เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบ  
เคลื่อนที่เชิงเส้น

WATER WAVE ENERGY TO THREE PHASE ELECTRICITY CONVERTER:  
LINEAR MOVEMENT TYPE

อัมพุท แสงสมุทร  
UMPUT SANGSAMUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-080-022

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบ  
เคลื่อนที่เชิงเส้น

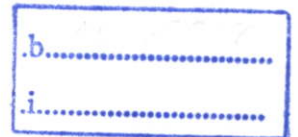
WATER WAVE ENERGY TO THREE PHASE ELECTRICITY CONVERTER :  
LINEAR MOVEMENT TYPE



อัมพุท แสงสมุทร

UMPUT SANGSAMUT

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....105317  
วัน,เดือน,ปี.....18 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-030-022

**WATER WAVE ENERGY TO THREE PHASE ELECTRICITY CONVERTER :  
LINEAR MOVEMENT TYPE**

**UMPUT SANGSAMUT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL-2009-SC-M-030-022**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT.S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น
นักศึกษา	นายอัมพุด แสงสมุทร
รหัสประจำตัว	50067306
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ปิติพร ถนอมงาม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

### บทคัดย่อ

เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส แบบเคลื่อนที่เชิงเส้นนี้ สามารถออกแบบให้แปลงพลังงานจากคลื่นน้ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากกฎของไมเคิล ฟาราเดย์ ที่ได้กล่าวไว้ว่าสนามแม่เหล็กจากที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของขดลวดในทิศทางตั้งฉาก โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะถูกติดตั้งไว้ที่ฐานของเครื่องแล้วอาศัยการเคลื่อนที่ขึ้นลงของชุดแม่เหล็กที่เรียกว่าชุดกล่องเกียร์แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic gearbox) ผ่านหน้าตัดของขดลวดโดยอาศัยพลังงานกลจากการลอยตัวของทุ่นลอยน้ำ ซึ่งจะลอยขึ้นและลงตามคลื่นในมหาสมุทร ชุดแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำระบบนี้จะได้พลังงานอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับแบบหลายเฟสตามจำนวนของชุดขดลวดที่ได้ทั้งหมด และหากต้องการเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ก็จะสามารถทำได้โดยผ่านวงจรชาร์จไฟฟ้ากระแสตรง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงต้นแบบเดิมของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ด้วยการใส่แม่เหล็กรูปทรงโทรอยด์จึงทำให้สามารถใช้ประโยชน์ของสนามแม่เหล็กได้จากทั้งวงในและวงนอกของแม่เหล็กถาวร ได้ทำการออกแบบและติดตั้งขั้วแม่เหล็กแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กให้กับขดลวดวงนอก อีกทั้งยังได้พัฒนาการออกแบบและสร้างชุดขั้วชุดกล่องเกียร์แม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้จำลองการเคลื่อนที่ของทุ่นสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพ เนื่องจากยังไม่สามารถทำการติดตั้งจากสถานที่จริงได้ (ในมหาสมุทร) จึงทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการพบว่าระบบมีกำลังงานต่อพื้นที่โดยรวมสูงสุดอยู่ที่  $293.12 \text{ W/s}^2$

<b>Thesis</b>	Water Wave Energy to Three Phase Electricity Converter: Linear Movement Type
<b>Student</b>	Mr.Umpot Sangsamut
<b>Student ID.</b>	50067306
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Pitiporn Thanomngam
<b>Co Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Aree Wichienchai

## ABSTRACT

The linear movement type water wave energy to three phase electricity convertor is enabling conversion of ocean wave energy to electrical energy by moving of permanent magnets across the induction coils in linear direction according to Faraday's law of electromotive force induction method. The induction coils are attached to generator base support, resulting in up and down motion of the magnetic set or Electromagnetic gearbox passing across induction coils by mechanical energy from buoy floater transferring. The floater is moving upward and downward depending on amplitude of ocean wave. Thus this system has no cost of fuel energy product. Initially, energy product is in the form of multi-phases alternating current which is stored in batteries by direct current charging circuit. In this thesis is developing the first prototype of linear movement type mechanical wave water energy to three phase electricity convertor to more efficiency. By using Toroid shape magnet which is utilizing the usage from inside and outside of magnet. The Iron pole is designed and setup to concentrate the magnetic field line for outside induction coils. And by designing to electromagnetic gearbox, electrical motor has been applied to simulate moving motion of buoy in order to test its efficiency since this thesis have not yet installed in the ocean. After testing in laboratory, the generators power output per area produces  $293.12 \text{ W/m}^2$ .

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ดร.ปิติพร ถนอมงาม, ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์ และ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ได้ให้คำปรึกษาทางด้านหลักการและทฤษฎีต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ที่เกิดขึ้นในขณะทำงานวิจัยนี้อย่างใกล้ชิด ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณท่าน ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา ที่ได้ให้การอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือวัดต่างๆ  
ขอขอบคุณ ผศ.ดร.นฤมล เอมะรัตต์ ที่ได้ให้คำปรึกษาทางการศึกษาและการค้นคว้าเพิ่มเติม  
ขอขอบคุณบริษัท โอบอ อ้อมอุตสาหกรรม ที่ได้ให้การอนุเคราะห์แม่เหล็กถาวรที่ใช้ใน  
โครงการนี้

ขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณน้องบอยที่ช่วยประกอบโครงสร้างและกลไกต่างๆ ซึ่งถือว่าเป็นงานในส่วนที่อันตรายอย่างมาก

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันได้มาจากการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่บิดา มารดาและผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายอัมพุด แสงสมุทร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	6
2.1 พลังงานคลื่นน้ำ.....	6
2.2 เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสกัดพลังงาน.....	6
2.2.1 Oscillating Water Column (OWC).....	7
2.2.2 Tapchan.....	9
2.2.3 Pelamis.....	11
2.2.4 Salter Duck.....	13
2.2.5 Wave Dragon.....	13
2.2.6 Archimedes Wave Swing.....	15
2.2.7 Mighty Whale.....	16
2.2.8 Power Buoy.....	17
2.2.9 Aqua buoy .....	18
2.2.10 McCabe Wave Pump.....	19
2.3 องค์ประกอบของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า แบบเคลื่อนที่แนวตรง.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ Electromotive force ในขดลวดของ Michael Faraday.....	21
2.5 สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ James Clerk Maxwell ที่ใช้ในการอธิบาย สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแนวตรง.....	23
2.6 สมบัติทางกายภาพของแม่เหล็กถาวร .....	24
2.7 หลักการของไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส.....	26
2.8 แรงลอยตัวและหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Principle).....	28
2.9 ลักษณะทางกายภาพของคลื่น.....	30
2.9.1 คุณสมบัติคลื่นและกำลังคลื่น.....	31
2.9.2 คลื่นบริเวณน้ำลึก.....	33
2.9.3 คลื่นบริเวณน้ำลึกปานกลาง.....	33
2.9.4 คลื่นบริเวณน้ำตื้น.....	33
2.10 สมการการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก.....	34
2.11 การวิเคราะห์ขั้วแม่เหล็กอ่อน.....	35
2.12 การออกแบบการจัดวางขั้วแม่เหล็กและขดลวด.....	40
2.13 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยขดลวดคู่.....	41
2.14 การจัดรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้โดยการเรียงกระแสไฟฟ้าด้วยไดโอด.....	45
2.14.1 ไดโอดชนิดเจอร์เมเนียม (Germanium Diode).....	46
2.14.2 ไดโอดชนิดซิลิกอน (Silicon Diode).....	46
2.14.3 การนำไดโอดไปใช้งาน.....	46
2.15 ลวดสลิง.....	47
2.15.1 ลวดค้ำรวม.....	48
2.15.2 ลวดค้ำขนาด.....	48
2.15.3 ลวดเคเบิล.....	48
บทที่ 3 การดำเนินงานออฟแบบและสร้างวิจัย.....	52
3.1 ศึกษาข้อบกพร่องของต้นแบบเดิมที่ได้รับการออกแบบและสร้างไว้.....	52
3.1.1 ข้อบกพร่องจากกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองคลื่นน้ำ.....	52
3.1.1.1 มอเตอร์ที่ใช้มีอัตราการส่งกำลังน้อยเกินไป.....	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1.2 ชุดทรอบที่ใช้มีความสามารถในการส่งกำลังงานที่ต่ำและมีกลไกการทำงานที่ไม่เหมาะสม.....	54
3.1.1.3 ล้อมูเล่และสายพานที่ใช้ไม่เหมาะสมในการส่งกำลัง.....	55
3.1.1.4 สายสลิงมีขนาดเล็กเกินไป.....	57
3.1.2 ข้อบกพร่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ.....	58
3.1.3 ข้อบกพร่องจากรูปสัญญาณที่ได้.....	60
3.2 การออกแบบและสร้างกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองคลื่นน้ำ.....	61
3.2.1 กำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนกลองเฟืองแม่เหล็ก.....	61
3.2.2 ออกแบบล้อและมูเล่ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนกลองเฟืองแม่เหล็ก.....	63
3.2.3 การออกแบบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับกำลังงานที่ต้องใช้.....	65
3.2.4 การออกแบบเกียร์ทรอบที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับล้อและมูเล่ที่ใช้.....	67
3.2.5 การออกแบบสายสลิงสำหรับส่งกำลังงานให้กับกลองเฟืองแม่เหล็ก.....	69
3.2.6 การออกแบบสปริงที่สำหรับช่วยเสริมแรงให้แก่ระบบขับเคลื่อนกลองเฟืองแม่เหล็ก.....	72
3.3 การออกแบบกลไกเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องแบบพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	75
3.3.1 วัสดุที่ใช้สร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	75
3.3.2 จำลองแบบด้วยโปรแกรม COMSOL MultiPhysics.....	76
3.3.3 ออกแบบขั้วแม่เหล็กเพื่อขยายสนามแม่เหล็กให้กับชุดเกียร์แม่เหล็ก.....	83
3.3.4 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	89
3.3.5 ออกแบบขั้วแม่เหล็กสำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	92
3.4 การจำลองสัญญาณเอ๊าท์พุทที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB 7.0.....	94
3.5 การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงาน.....	99

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	104
4.1 ผลการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงในและวงนอกขณะที่ ยังไม่ได้ทำการใส่ขั้วเหล็กก่อนก่อนทำการพัฒนากลไกการจำลองการเคลื่อนที่.....	105
4.2 ผลการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงนอกหลังทำการพัฒนากลไก การจำลองการเคลื่อนที่.....	108
4.3 ผลการทดลองแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง กำเนิดพลังงานไฟฟ้า.....	115
4.4 ประสิทธิภาพของต้นแบบเครื่องแปลงพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ แบบเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	117
4.4.1 กำลังงานที่ใช้ในการยกกล่องเฟืองแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขการจำลอง การเคลื่อนที่จากคลื่นน้ำทะเลจริง.....	117
4.4.2 กำลังงานที่ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำ.....	117
4.4.3 กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำจากการวัดด้วยตัวเก็บประจุ.....	119
4.4.4 กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้ง.....	119
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	121
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
ภาคผนวก ก ไซโครริกเจนเนเรเตอร์.....	124
ภาคผนวก ข ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
เอกสารอ้างอิง.....	126
ประวัติผู้เขียน.....	127

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติของไดโอด.....	47
ตารางที่ 3.1 ค่ากำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) สัมพันธ์กับเวลา ที่กล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่.....	62
ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังงานไฟฟ้าขาออกของระบบ (Output power) สัมพันธ์ กับค่าความต้านทานที่จ่ายให้ของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	118
ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังงานไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้งเมื่อจ่ายไฟฟ้า ให้กับภาระทางไฟฟ้า.....	119

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดง โครงร่างของอุปกรณ์แบบ oscillating water column.....	7
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานของระบบ oscillating water column.....	8
รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้งและทำงานจริงของระบบ oscillating water column.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงการติดตั้งและทำงานแผนภาพของระบบ oscillating water column.....	9
รูปที่ 2.5 ภาพแบบจำลองลักษณะการติดตั้งของอุปกรณ์ TAPCHAN.....	10
รูปที่ 2.6 ภาพแบบอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์ TAPCHAN.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงสภาพการทำงานจริงในทะเลใกล้แนวชายฝั่งของอุปกรณ์ Pelamis.....	11
รูปที่ 2.8 ภาพขนาดจริงของ Pelamis.....	12
รูปที่ 2.9 โครงร่างของอุปกรณ์ Salter Duck.....	13
รูปที่ 2.10 แบบจำลองการทำงานอุปกรณ์ Wave Dragon.....	14
รูปที่ 2.11 สภาพการทำงานจริงอุปกรณ์ Wave Dragon.....	14
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์ Wave dragon.....	15
รูปที่ 2.13 การติดตั้งอุปกรณ์ AWS ในทะเล.....	16
รูปที่ 2.14 แบบจำลองการทำงาน Mighty Whale ในทะเล.....	16
รูปที่ 2.15 ภาพอุปกรณ์ต้นแบบ Mighty Whale.....	17
รูปที่ 2.16 ภาพจำลองการติดตั้ง Power Buoy.....	18
รูปที่ 2.17 แสดงภาพการจำลองทำงานของ Aquabuoy.....	18
รูปที่ 2.18 แสดงภาพรายละเอียดส่วนประกอบของ McCabe Wave Pump.....	19
รูปที่ 2.19 แสดงภาพการติดตั้งและทำงานจริงของ McCabe Wave Pump.....	19
รูปที่ 2.20 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบแนวตรงที่กั้นทะเล.....	21
รูปที่ 2.21 ภาพปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำกระแสจากสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านหน้าตัด ของขดลวด.....	22
รูปที่ 2.22 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์สปินแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic ก่อนการ Magnetization.....	25
รูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์สปินแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic หลังการ Magnetization.....	25
รูปที่ 2.24 สนามแม่เหล็กรอบแม่เหล็กถาวร.....	26

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.25 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ.....	27
รูปที่ 2.26 วงจรแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส.....	27
รูปที่ 2.27 กราฟแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟสกับเวลา.....	28
รูปที่ 2.28 เวกเตอร์แรงต่างๆที่กระทำกับวัตถุที่จมในของไหล.....	29
รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของคลื่นอุโมงค์.....	32
รูปที่ 2.30 ลักษณะลูกคลื่นแบบต่างๆ.....	32
รูปที่ 2.31 แผนภาพแรงต่างๆที่ระบบกระทำกับพิสดัน.....	34
รูปที่ 2.32 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสเตเตอร์เพียง 2 ด้าน.....	36
รูปที่ 2.33 แผนภาพการพันลวดเข้ากับสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Surface mount.....	37
รูปที่ 2.34 แผนภาพทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยม แบบ Surface mount.....	37
รูปที่ 2.35 แผนภาพการพันลวดเข้ากับสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Burry.....	37
รูปที่ 2.36 แผนภาพทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Burry.....	38
รูปที่ 2.37 แผนภาพของกระแสที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โตรซึ่งทำหน้าที่เป็น Stator จะถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสในขดลวดที่พันรอบ Stator ในกรณีของรูป a และ b นั้นเป็นการเกิดของกระแสที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โตร ที่พันลวด แบบแยกแต่ละส่วน (Surface mounts) ในกรณีของรูป c เป็นการเกิดกระแส ที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โตร ที่พันลวดแบบรอบ Stator (Burries).....	39
รูปที่ 2.38 การจัดวางส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ.....	40
รูปที่ 2.39 แผนภาพสเตเตอร์ที่มีจำนวนช่องของขดขดลวดต่อขั้ว และเฟส q เท่ากับ 6/5.....	41
รูปที่ 2.40 แผนภาพแสดงการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำแบบ เคลื่อนที่เชิงเส้น โดยใช้เทคนิคแบบขดลวดคู่.....	42
รูปที่ 2.41 ภาพตัดขวางแสดงการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ แบบเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยใช้เทคนิคแบบขดลวดคู่.....	42
รูปที่ 2.42 รูปสัญลักษณ์และทิศทางการไหลของกระแสในไดโอด.....	45
รูปที่ 2.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันซึ่งเป็นคุณสมบัติ โดยทั่วไปของไดโอด.....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.44 ลักษณะหน้าตัดของลวดควั่นที่แตกต่างกัน 3 ชนิด a) ลวดควั่นรวม b) ลวดควั่นซด และ c) ลวดเคเบิ้ล.....	48
รูปที่ 2.45 การควั่นลวดสลิงแบบต่างๆ a) ควั่นตามขวางวนขวา b) ควั่นตามขวางวนซ้าย c) ควั่นตามยาววนขวาและ d) ควั่นตามยาววนซ้าย.....	49
รูปที่ 3.1 ดันแบบเดิมของระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ออกแบบ และสร้าง.....	52
รูปที่ 3.2 ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบรอบสูงที่ใช้งานอยู่เดิม.....	53
รูปที่ 3.3 ภาพของชุดทดสอบของระบบชักชุดแม่เหล็กด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	54
รูปที่ 3.4 ภาพของชุดทดสอบของระบบชักชุดแม่เหล็กด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	55
รูปที่ 3.5 มู่เต้แบบร่องเดี่ยว.....	56
รูปที่ 3.6 สายพานชนิดร่อง A ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 12 mm.....	56
รูปที่ 3.7 สายพานชนิดร่อง B ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 17 mm.....	57
รูปที่ 3.8 สายสลิงแบบควั่นซดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.08 mm.....	57
รูปที่ 3.9 แม่เหล็กถาวรชนิดเฟอโรไรซ์ชนิดเดียวกับที่ใช้ทำลำโพงขยายเสียง.....	58
รูปที่ 3.10 (a.) Isometric การกระจายของศักย์แม่เหล็กถาวรที่ใช้ (b.) ภาพตัดขวาง ของการกระจายของศักย์แม่เหล็กถาวรที่ใช้ (c.) เส้นแรงแม่เหล็กถาวรชนิด เฟอโรไรซ์ชนิดเดียวกับที่ใช้ทำลำโพง.....	59
รูปที่ 3.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ PVC ที่ใช้ทำสเตเตอร์.....	60
รูปที่ 3.12 กราฟของแรงดันกับเวลาจากทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า กำหนด โดยให้ชุดเกียร์แม่เหล็กมีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 0.6 m คาบของ สัญญาณประมาณคาบละ 700 ms.....	60
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่ากำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) สัมพันธ์กับเวลา ที่ทดลองเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่.....	62
รูปที่ 3.14 วงล้อจักรยานที่ใช้ในการขับเคลื่อนชุดเกียร์แม่เหล็ก.....	63
รูปที่ 3.15 จิ๊กจับล้อจักรยานที่สร้างขึ้นมาเพื่อต่อล้อลูกปืนเข้ากับจิ๊กจับล้อจักรยาน.....	64
รูปที่ 3.16 รางเลื่อนที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของสายสลิง.....	65
รูปที่ 3.17 ชุดล้อสำหรับเปลี่ยนทิศทางของแรงดึงจากสายสลิง.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.18 ตะขอจับที่ใช้แขวนชุดเกียร์แม่เหล็ก.....	65
รูปที่ 3.19 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1/2 Hp ที่ใช้ในการออกแบบ.....	66
รูปที่ 3.20 โครงล้อจักรยานขนาด 24 นิ้ว หรือประมาณ 62 cm.....	67
รูปที่ 3.21 มู่เหล็กหล่อสำหรับใช้กับสายพานร่อน B แบบร่อนสายพาน คู่มือเหล็กหล่อสำหรับใช้กับสายพานร่อน B แบบร่อนสายพาน คู่มือที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว.....	68
รูปที่ 3.22 ภาพของกล่องเกียร์ที่ครอบที่มีอัตราทด 1 ต่อ 30.....	69
รูปที่ 3.23 แผนภาพแสดงทิศทางและตำแหน่งของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง.....	70
รูปที่ 3.24 ลวดสลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.8 mm.....	72
รูปที่ 3.25 สปริงที่ค่าคงที่ของสปริง $800 \text{ N/m}$ ที่ใช้ในการเสริมแรงให้กับชุดขับ เกียร์แม่เหล็ก.....	73
รูปที่ 3.26 เครื่องแบบพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น หลังจากถูกรวม COMSOL MultiPhysics.....	74
รูปที่ 3.27 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วย mm.....	78
รูปที่ 3.28 ภาพ Surface plot และ Arrow plot ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก.....	78
รูปที่ 3.29 ภาพ Contour plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z.....	79
รูปที่ 3.30 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วย mm.....	80
รูปที่ 3.31 ภาพ Surface plot และ Arrow plot ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก.....	80
รูปที่ 3.32 ภาพ Contour plot และ Arrow plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z.....	81
รูปที่ 3.33 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วย mm.....	82
รูปที่ 3.34 ภาพ Surface plot และ Arrow plot Contour ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก.....	82
รูปที่ 3.35 ภาพ Contour plot และ Arrow plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z.....	83
รูปที่ 3.36 รูปของการจัดวางขั้วของแม่เหล็กถาวรของกล่องเฟืองแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic gearbox.....	84
รูปที่ 3.37 ภาพอธิบายการคำนวณมุมของขั้วแม่เหล็กที่ใช้ในการบังคับ สนามแม่เหล็ก (ในหน่วย mm).....	85
รูปที่ 3.38 ภาพด้านข้าง (Side view) ของขั้วแม่เหล็กในหน่วย mm.....	86
รูปที่ 3.39 ภาพด้านบน (Top view) ของขั้วแม่เหล็ก.....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.40 รูปสองมิติด้านข้างของมุมที่ทำการปาดขั้วแม่เหล็กเพื่อบังคับสนามแม่เหล็ก ให้ไปตัดที่ขดลวดได้พอดี.....	86
รูปที่ 3.41 ภาพสามมิติของขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006.....	87
รูปที่ 3.42 ขั้วแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้น.....	87
รูปที่ 3.43 แบบของชุดกล่องเกียร์แม่เหล็กที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006.....	88
รูปที่ 3.44 ชุดกล่องเกียร์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้.....	88
รูปที่ 3.45 ด้านข้างของท่อ PVC ที่ใช้เป็น Stator วงนอก (หน่วย mm).....	90
รูปที่ 3.46 ขนาดของขดลวด Stator วงใน (หน่วย mm).....	90
รูปที่ 3.47 ขดลวด Stator วงในเขียนแบบโปรแกรม AutoCAD.....	90
รูปที่ 3.48 ภาพตัดให้เห็น โครงสร้างภายในของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแม่เหล็ก ถาวรแนวตรง.....	91
รูปที่ 3.49 แสดงส่วนต่างๆ ภายในและภายนอกของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรแนวตรง.....	91
รูปที่ 3.50 วงจรของการเชื่อมต่อขดลวดกำเนิดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส 10 ชุด.....	92
รูปที่ 3.51 ขั้วแม่เหล็กแม่สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามา.....	93
รูปที่ 3.52 ภาพเปรียบเทียบสเตเตอร์ก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) จากขั้วเหล็กอ่อน สำหรับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ.....	94
รูปที่ 3.53 ภาพอธิบายความหมายของระยะและตำแหน่งของตัวแปรต่างๆที่ใช้จำลอง สัญญาณไฟฟ้าของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า แบบเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	95
รูปที่ 3.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ได้กับเวลาและความ สัมพันธ์ตำแหน่งของทุ่นที่ได้กับเวลา ในสถานะคลื่นอุดมคติ.....	99
รูปที่ 3.54 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟสแบบ Y.....	100
รูปที่ 3.55 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟสแบบ $\Delta$ .....	100
รูปที่ 3.56 วงจรแปลงแบบ Y ต่อกับหม้อแปลง Step up.....	101
รูปที่ 3.57 วงจรแปลงแบบ $\Delta$ ต่อกับหม้อแปลง Step up.....	101
รูปที่ 3.58 วงจรแปลงแบบ $\Delta$ ต่อกับหม้อแปลง Step up แบบ Center Tap.....	102

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.59 วงจรแปลงแบบ Y ต่อกับตัวเก็บประจุเพื่อกรองกระแส.....	102
รูปที่ 3.60 วงจรแปลงแบบ $\Delta$ ต่อกับวงจรเรียงและกรองกระแส.....	103
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายเครื่องออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS 420 A ที่ใช้ในการทดลอง.....	104
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงไดอะแกรมการชาร์จแบตเตอรี่ผ่านวงจรแปลง (ขวา) และการวัดค่า ประสิทธิภาพด้วย Oscilloscope ผ่าน โหลดทางไฟฟ้า (ซ้าย).....	105
รูปที่ 4.3 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากขดลวด วงนอก แบบที่มีคาบของสัญญาณไม่คงที่.....	106
รูปที่ 4.4 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากขดลวด วงในแบบที่มีคาบของสัญญาณไม่คงที่.....	106
รูปที่ 4.5 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากขดลวด วงนอกแบบที่มีคาบของสัญญาณคงที่ที่ 600 ms.....	107
รูปที่ 4.6 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากขดลวด วงในแบบที่มีคาบของสัญญาณคงที่ที่ 600 ms.....	107
รูปที่ 4.7 สัญญาณ ไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	108
รูปที่ 4.8 สัญญาณ ไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้น หลังจากใส่ขั้วเหล็กอ่อน.....	109
รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y.....	110
รูปที่ 4.10 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ $\Delta$ .....	111
รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y และหม้อแปลง Step up.....	112
รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ $\Delta$ และหม้อแปลง Step up.....	113
รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ $\Delta$ และหม้อแปลง Step up แบบ Center Trap.....	114
รูปที่ 4.14 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y เข้ากับ ตัวเก็บประจุขนาด 2200 $\mu$ F/35 V.....	115
รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ $\Delta$ เข้ากับตัวเก็บประจุ ขนาด 2200 $\mu$ F/35V.....	116

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากำลังงานไฟฟ้าขาออกของระบบ (Output power) สัมพันธ์ กับค่าความต้านทานที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	118
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้งเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับ ภาระทางไฟฟ้า.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ทุกประเทศมีปัญหาด้านความมั่นคงทางพลังงาน โดยที่พลังงานที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปิโตรเคมี นับมีแต่ความต้องการในการใช้งานมากขึ้น ซึ่งไม่เพียงแต่จะหมดลงไปในช่วงเวลาอันใกล้ แต่การใช้เชื้อเพลิงประเภทดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นทุกประเทศจึงพยายามค้นคว้าและวิจัยแนวทางการผลิตระบบที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้แทนเชื้อเพลิงประเภทปิโตรเคมี อาทิ พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์, พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์, พลังงานจากการปล่อยน้ำออกจากเขื่อน, พลังงานจากกังหันลม เป็นต้น เนื่องจากทุกวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน การนำไปใช้จึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ปัจจัยด้านต่างๆของแต่ละประเทศ

พลังงานจากคลื่นน้ำอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่ได้จากธรรมชาติ พลังงานจากคลื่นน้ำนี้ได้มีการเริ่มใช้ในประเทศสหราชอาณาจักร นอร์เวย์ สวีเดน ญี่ปุ่น จีน อินเดีย สหรัฐอเมริกา เป็นต้น พลังงานคลื่นจัดเป็นพลังงานที่ไม่วันหมด สามารถเกิดขึ้นและมีอยู่อย่างไม่จำกัดและสามารถนำมาใช้ได้ตลอดเวลา นอกจากนี้พลังงานคลื่นยังจัดเป็นพลังงานสะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีต้นทุนในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ต่ำกว่าพลังงานรูปแบบอื่นๆ พลังงานคลื่นจึงสามารถก้าวขึ้นมาเป็นพลังงานรูปแบบใหม่ที่จะทดแทนพลังงานรูปแบบอื่นๆ และสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งพลังงานกลจากคลื่นน้ำจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำไปสู่การสร้างแหล่งพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้ในอีกรูปแบบหนึ่งด้วยการแปลงพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่นน้ำมาเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายในขดลวดทองแดงจากสนามแม่เหล็กที่ปล่อยออกมาจากแม่เหล็กถาวร

งานวิจัยนี้จะเป็นการปรับปรุงและพัฒนาให้ต้นแบบของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นทั้งทางกลและทางไฟฟ้า เพื่อให้สามารถปฏิบัติการทดสอบการแปลงพลังงานไฟฟ้าได้อย่างสะดวกมากขึ้นจากเดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์

การพัฒนาต้นแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำมีวัตถุประสงค์ดังนี้

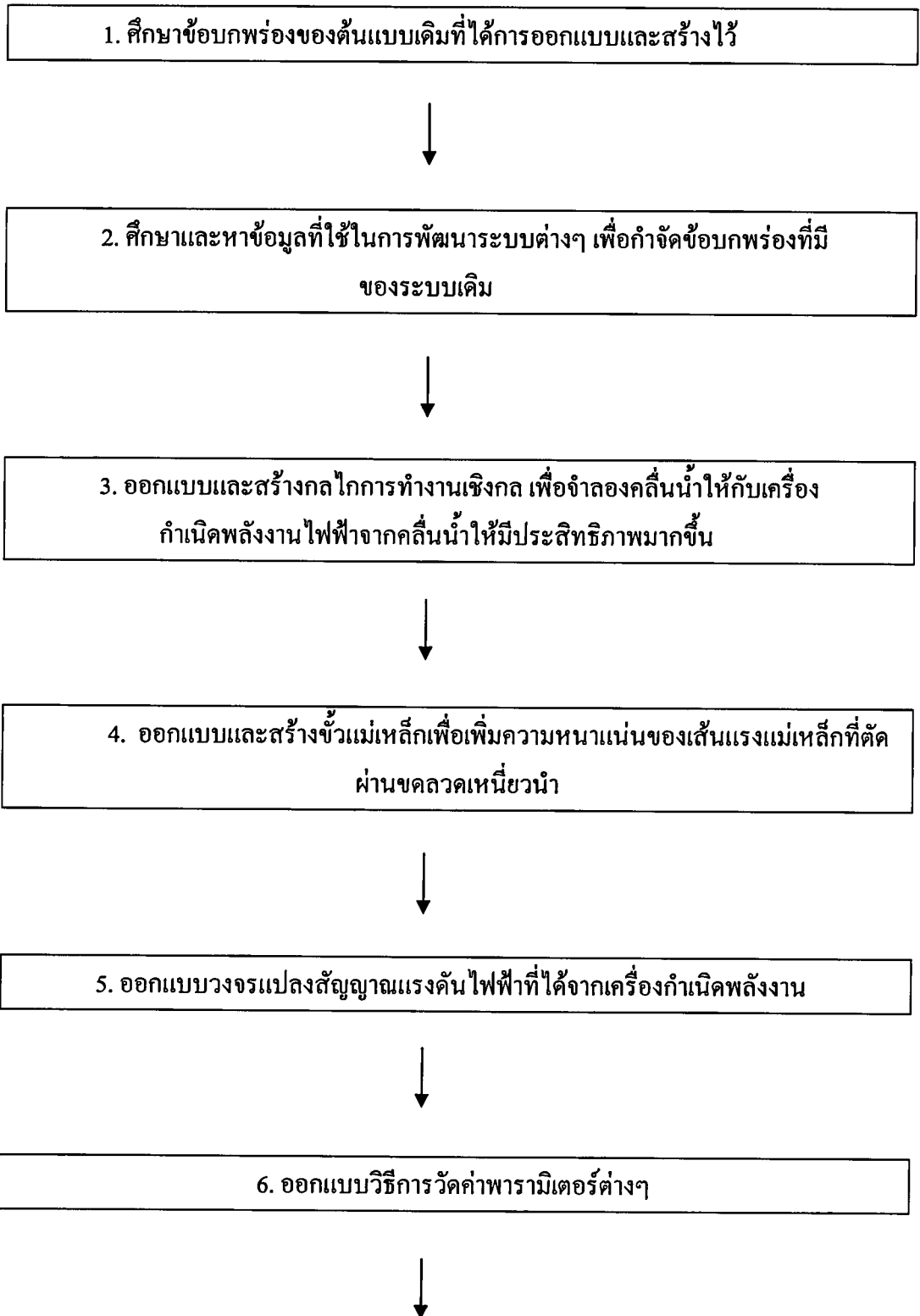
- 1.2.1 พัฒนาการสร้างแหล่งพลังงานสำรองในอนาคต
- 1.2.2 พัฒนาเทคนิคการออกแบบกล่องเฟืองแม่เหล็กถาวร
- 1.2.3 พัฒนาการออกแบบกลไกการทำงานเชิงกลสำหรับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำให้สามารถทำการทดลองได้สะดวกมากขึ้น
- 1.2.4 พัฒนาการสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
- 1.2.5 ศึกษาการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ
- 1.2.6 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบกล่องเฟืองแม่เหล็กถาวร
- 1.3.2 ออกแบบกลไกการทำงานเชิงกลสำหรับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำให้สามารถทำการทดลองได้สะดวกมากขึ้น
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
- 1.3.4 ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ
- 1.3.5 ออกแบบวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลายส่วนการที่พัฒนาระบบในส่วนต่างๆเพื่อทดสอบและวัดค่าพารามิเตอร์มาทำการวิเคราะห์ผลได้นั้น จะต้องดำเนินงานในส่วนต่างๆของระบบดังนี้



## 7. ทดสอบระบบทั้งหมดที่ออกแบบไว้



## 8. วัดค่าพารามิเตอร์และประเมินผลการทดลอง

ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงานในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาข้อบกพร่องของต้นแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำเดิมที่ได้เคยทำการออกแบบและสร้างไว้ ซึ่งมีข้อบกพร่องของต้นแบบเดิมดังนี้

- ระบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นไม่แข็งแรงทนทานและไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของคลื่นน้ำที่ได้ศึกษาเอาไว้
- ก่อ่งเฟืองแม่เหล็กถาวรไม่แข็งแรงและไม่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่
- ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดมีค่าต่ำ
- สัญญาณไฟฟ้าที่ได้ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

2. ศึกษาและหาข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาระบบต่างๆเพื่อกำจัดข้อบกพร่องที่มีของระบบเดิมซึ่งมีข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาดังนี้

- ศึกษาเทคโนโลยีการขนถ่ายวัสดุและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการประกอบระบบ
- ศึกษาเทคนิคการสร้างก่อก่อเฟืองแม่เหล็กถาวร
- ศึกษาเทคนิคการเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดด้วยขั้วแม่เหล็ก
- ศึกษาเทคนิคการวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน

3. ออกแบบและสร้างกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองคลื่นน้ำให้กับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ

ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- วิเคราะห์กำลังงานทางกลที่ต้องใช้ในการจำลองคลื่นน้ำเพื่อทดสอบระบบ
- จัดหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการออกแบบและระบบ
- สร้างและประกอบชิ้นส่วนที่ต้องใช้
- ทดสอบระบบจำลองคลื่นน้ำโดยการขับเคลื่อนก่อก่อเฟืองแม่เหล็กถาวร

4. ออกแบบและสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- ออกแบบและวิเคราะห์ขั้วแม่เหล็กที่จะสร้าง
- จัดหาวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน
- สร้างและประกอบขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบไว้

5. ออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงาน ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- ออกแบบและวิเคราะห์วงจรแปลงสัญญาณแรงดัน
- จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อวงจรแปลงสัญญาณแรงดัน
- สร้างและทดสอบวงจรแปลงสัญญาณแรงดัน

6. ออกแบบการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในวัดค่าพารามิเตอร์
- ศึกษาการวัดในกรณีการใช้งานแบบต่างๆ ไป
- ออกแบบและทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถพัฒนากลไกการทำงานเชิงกลเพื่อเครื่องกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากคลื่นน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.5.2 สามารถสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำให้มีค่าสูงขึ้น

1.5.3 ได้วงจรแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานในรูปของไฟฟ้าที่เหมาะสมกับระบบการกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

1.5.4 ทราบถึงปัจจัยการที่มีผลต่อการกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าเพื่อเก็บเอาไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงจากพารามิเตอร์ที่วัดได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

### 2.1 พลังงานคลื่นน้ำ

พลังงานคลื่น หมายถึงพลังงานที่ได้มาจากการสั่นไหวที่บริเวณผิวและในภายในเนื้อวัสดุใดๆ ซึ่งอาจเกิดขึ้นแบบพัลส์หรือเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหลายๆถูกคลื่นติดต่อกันก็ได้ พลังงานคลื่นใดๆสามารถนำมาเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปพลังงานอื่นๆได้ด้วยวิธีการทางฟิสิกส์

พลังงานคลื่นทะเล หมายถึงการสั่นไหวของโมเลกุลของน้ำที่บริเวณใกล้กับผิวน้ำทะเล คลื่นน้ำทะเลส่วนใหญ่กำเนิดมาจากลมที่พัดเหนือผิวน้ำ ซึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซในอากาศกับโมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำทำให้อนุภาคได้น้ำบริเวณใกล้ผิวน้ำเคลื่อนที่เป็นวงกลมหรือวงรี ในการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีพลังงานจลน์ที่แปรผันตามความเร็ว, ความต่อเนื่องของลม, ความกว้างของทะเลในบริเวณที่ลมพัดเหนือผิวน้ำทะเล, ความลึกของน้ำจากระดับพื้นทะเล รวมถึงแรงภายในของน้ำระหว่างน้ำขึ้นน้ำลง

### 2.2 เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการแปลงพลังงาน

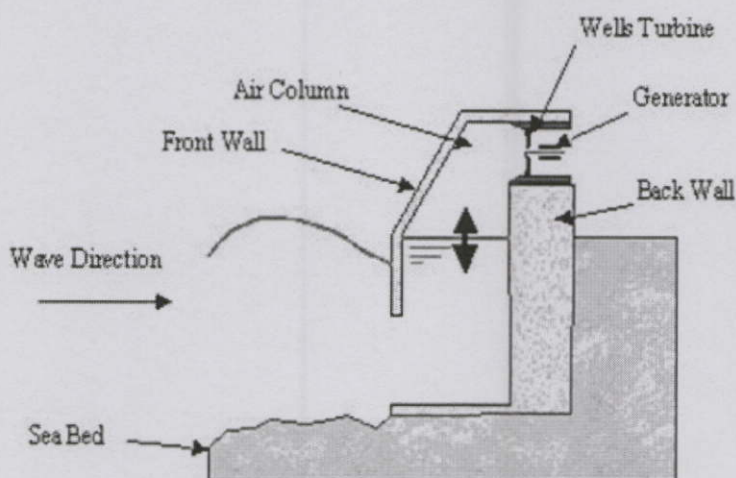
จากวิกฤตการณ์น้ำมันขาดแคลนในปี ค.ศ.1970 ทำให้หลายรัฐบาลทั่วโลกได้มีการส่งเสริมการหาแหล่งพลังงานทดแทน ส่งผลให้มีการนำพลังงานคลื่นซึ่งเป็นพลังงานรูปแบบใหม่ขึ้นมาศึกษาและวิจัยอย่างจริงจัง ด้วยการสนับสนุนงบประมาณจากรัฐบาลประเทศต่างๆ เช่น สหราชอาณาจักร นอร์เวย์ ญี่ปุ่น เป็นต้น จากปี ค.ศ.1974 ถึง ค.ศ.1983 รัฐบาลสหราชอาณาจักรใช้งบประมาณกว่า 20 ล้านปอนด์ในแผนการพัฒนาและค้นคว้าวิจัยพลังงานคลื่น<sup>[1]</sup> โดยส่วนใหญ่รัฐบาลประเทศต่างๆ ให้ความสำคัญในการวิจัยพลังงานคลื่นเป็นกองทุนผ่านทางมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัย สร้างความท้าทายให้กับนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถสกัดเอาพลังงานคลื่นออกมาใช้ประโยชน์ ซึ่งต้องประสานความรู้หลายสาขาวิชา เช่น สมุทรศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมชายฝั่ง เป็นต้น หลังจากนั้นเมื่อวิกฤตการณ์สิ้นสุดลง พลังงานคลื่นน้ำก็เงียบหายไปเนื่องจากอุปกรณ์ต้นแบบมีต้นทุนสูง และมีความยากลำบากในการพัฒนา

ประเทศญี่ปุ่นเริ่มการพัฒนาในต้นปี ค.ศ.1940 และถึงขีดสุดในปี ค.ศ.1970 เมื่อต้นแบบลอยน้ำขนาดใหญ่มีการทดสอบขึ้น ตั้งแต่ปี ค.ศ.1974 ถึง ค.ศ.1985 มีมากกว่า 200 เครื่องต้นแบบที่มีการออกแบบและมีการทดสอบ

กลางปี ค.ศ.1990 พลังงานคลื่นกลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้ง โดยการนำของบริษัทวิศวกรรมขนาดเล็ก ส่งผลให้มีจำนวนชิ้นงานต้นแบบเกิดขึ้นมากมายทั่วโลก (รวมถึงงานเกี่ยวกับวิธีการสร้างด้วย) ด้วยการเรียนรู้จากบทเรียนและการทดลอง ทุกอุปกรณ์ทำในขนาดเล็กและกำลังขาออกไม่มาก (สูงสุดไม่เกิน 2 กิโลวัตต์) แต่อย่างไรก็ตาม ทุกเครื่องที่สร้างตั้งแต่กลางปีจนถึงปลายปี ค.ศ.1990 ยังคงอยู่ในระดับของการวิจัยและการศึกษา จนกระทั่งปี ค.ศ.2000 เทคโนโลยีการแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากำลังเป็นที่น่าสนใจของกลุ่มพัฒนาทางด้านพลังงานทดแทนทั่วโลก ซึ่งในระยะเวลาอันใกล้ พลังงานคลื่นจะกลายเป็นการติดตั้งในระบบอุตสาหกรรม (แต่ก็ยังขึ้นอยู่กับบริษัทวิศวกรรมขนาดเล็ก) สิ่งที่ต้องสนใจต่อไปคือการเน้นความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

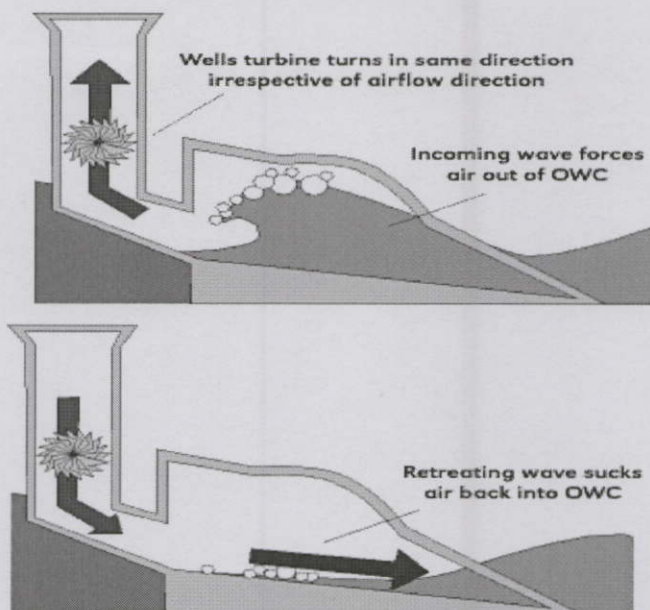
### 2.2.1 Oscillating Water Column (OWC)

OWC เป็นรูปแบบที่นิยมใช้และมีการพัฒนาและศึกษามากที่สุดในบรรดาอุปกรณ์แบบชายฝั่งทั้งหมด OWC มีเป็นโครงสร้างที่มีบางส่วนที่จมน้ำ เป็นการใช้พลังงานจลน์และพลังงานศักย์จากคลื่นมหาสมุทร โครงสร้างของ OWC สร้างจากคอนกรีตขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการให้บริเวณรอบๆ แห่งมีผนังแนวกั้น โดยปกติจะอยู่ด้านที่ติดกับทะเล อย่างไรก็ตามอุปกรณ์นี้ก็สามารถเข้าถึงได้ง่ายกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนอกชายฝั่ง ต้นทุนในการสร้างจะไปตกอยู่ที่แนวผนังกันเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์แบบ oscillating water column <sup>[2]</sup>

ส่วนด้านบนของโครงสร้างเป็นโพรงที่เชื่อมต่อกับด้านหลังและมีช่องกั้นกันกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ ผนังด้านหน้านั้นจะมีส่วนที่ยื่นออกไปในน้ำและมีส่วนที่จมน้ำตลอดเวลา เนื่องจากการขึ้น-ลงของน้ำจะต้องสัมพันธ์กับขนาดของโครงสร้าง

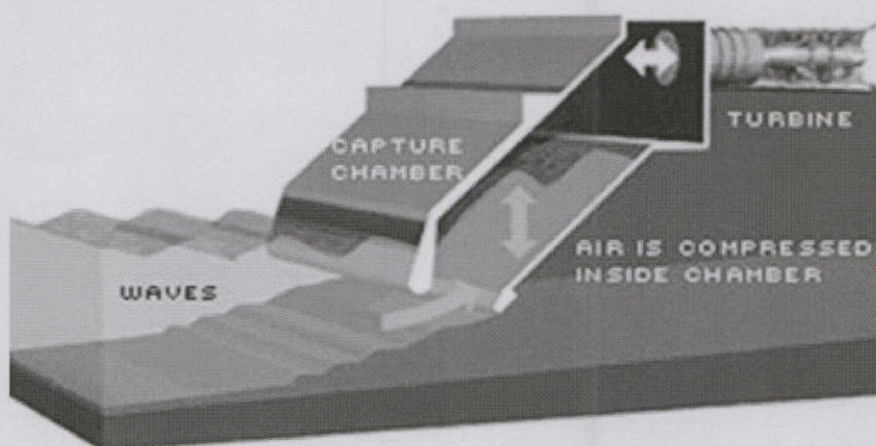


รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานของระบบ oscillating water column<sup>[3]</sup>

การทำงานจะให้กำเนิดไฟฟ้าใน 2 ขั้นตอน คือ เมื่อคลื่นเดินทางเข้ามาที่คอลัมน์ แรงดันอากาศภายในคอลัมน์จะดันอากาศผ่านช่องทางปิดไปยังกังหัน ความดันภายในคอลัมน์นี้จะเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อคลื่นน้ำเคลื่อนกลับออกไปอากาศก็จะไหลตามกลับผ่านกังหันออกมาเนื่องจากความดันอากาศด้านที่ติดกับทะเลลดลง



รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้งและทำงานจริงของระบบ oscillating water column<sup>[4]</sup>

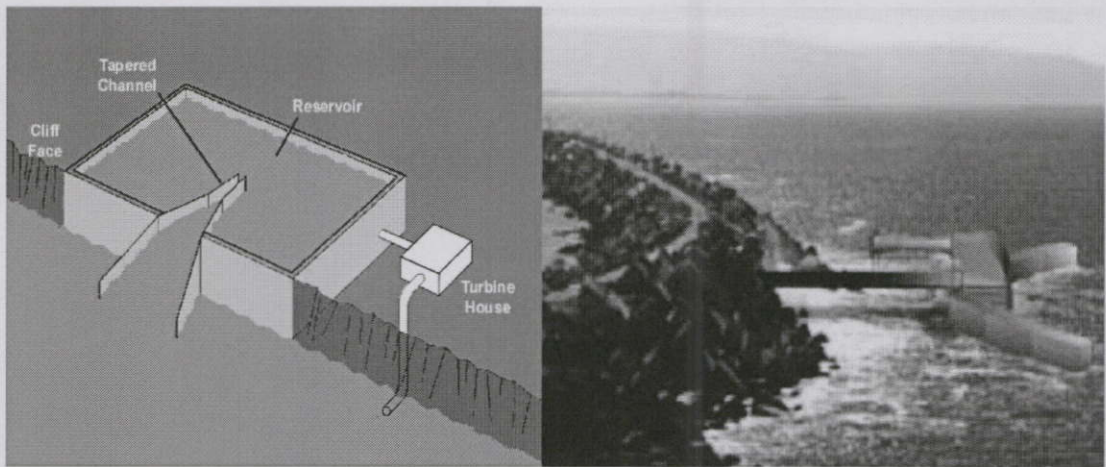


รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพการติดตั้งและทำงานของระบบ oscillating water column<sup>[4]</sup>

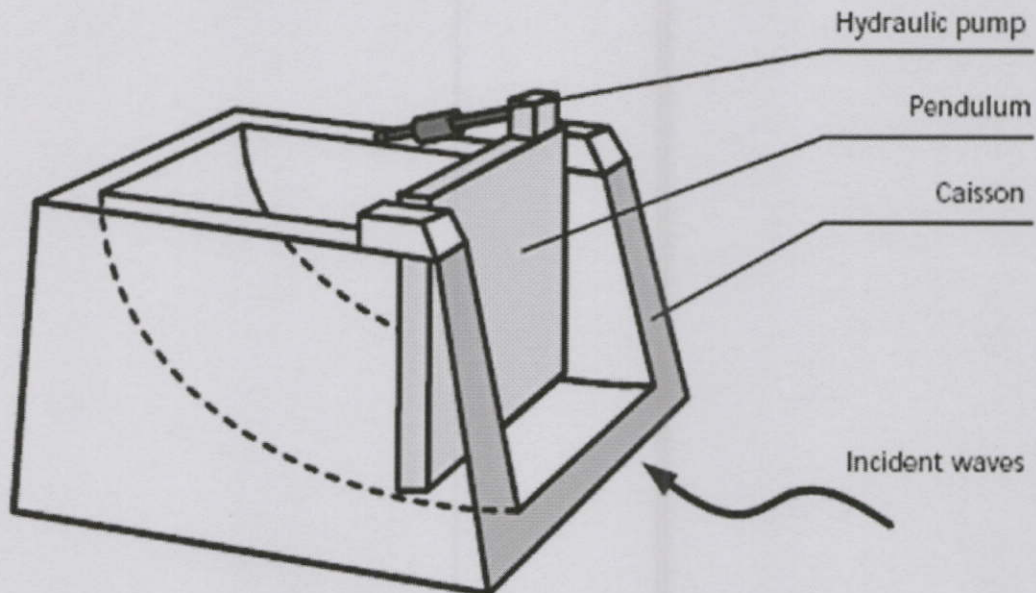
OWC เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ติดตั้งใน เกาะอิสเลย์ (Islay) ประเทศสกอตแลนด์ โดยระบบนี้เรียกว่า LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer) มีการติดตั้งเมื่อปี ค.ศ.2000 ระบบนี้ให้กำลังสูงสุด 500 kWรองรับความหนาแน่นคลื่นเฉลี่ยต่อปีระหว่าง 15 ถึง 25 kW/m<sup>2</sup> แนวคิดดังกล่าวเหมาะสมสำหรับบริเวณที่มีพลังงานคลื่นรุนแรงมาก เช่น เขื่อน แนวป้องกันชายฝั่ง กำแพงอ่าว รูปแบบการกำเนิดพลังงานนี้จึงเหมาะกับการผลิตเข้าสู่สายส่งไฟฟ้า

### 2.2.2 Tapchan

Tapchan หรือเป็นคำย่อของ Tapered channel ซึ่งหมายถึง ช่องเรียวแหลมหรือช่องน้ำเบียด ออกแบบ พัฒนาและวิจัยโดยชาวนอร์เวย์ ในปี ค.ศ. 1985 มีลักษณะเป็นสิ่งก่อสร้างล้อมรอบด้วยคอนกรีตสูง ประกอบด้วยช่องเรียวแหลม ซึ่งให้น้ำไหลผ่านไปยังอ่างเก็บน้ำได้ สร้างอยู่บนหน้าผา การที่ทำให้ช่องแคบเนื่องจากคลื่นที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น (คลื่นสูงขึ้น) เคลื่อนไปยังหน้าผาซึ่งในที่สุดน้ำก็จะล้นข้ามผ่านช่องและเข้าไปในอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ของคลื่นถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์เท่ากับน้ำที่อยู่ในอ่างเก็บน้ำ น้ำที่เก็บไว้จะไหลลงไปสู่กังหัน



รูปที่ 2.5 ภาพแบบจำลองลักษณะการติดตั้งของอุปกรณ์ TAPCHAN



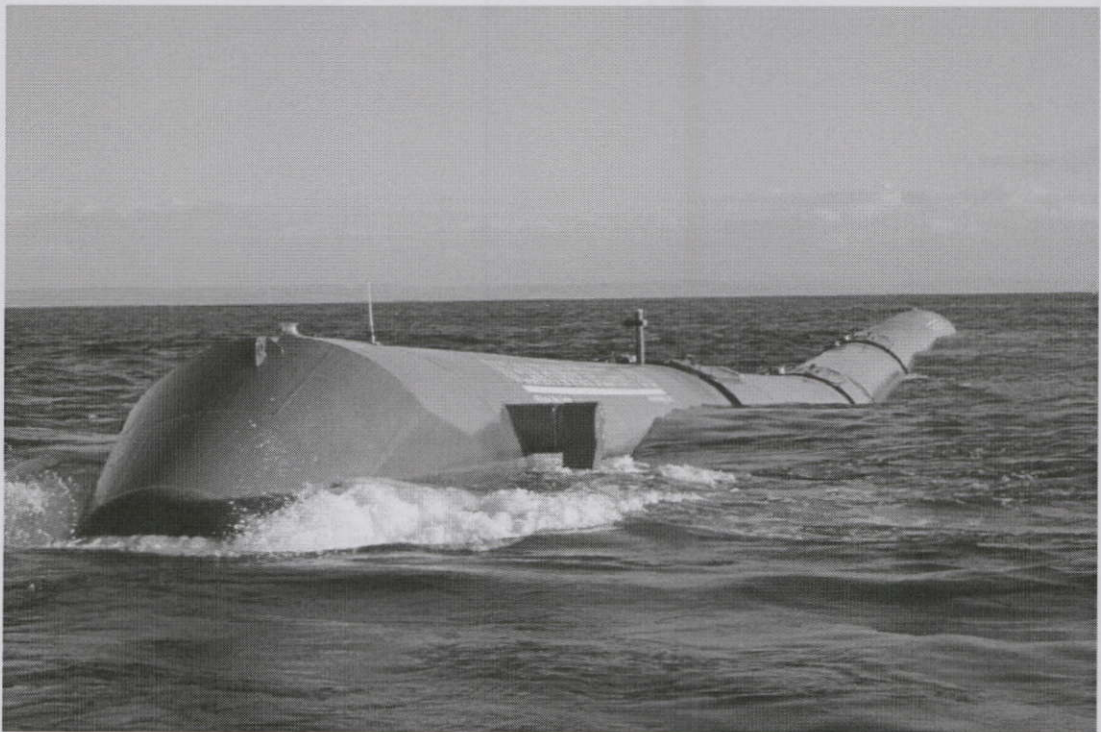
รูปที่ 2.6 ภาพแบบอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์ TAPCHAN

แนวความคิดของ Tapchan ปรับมาจากการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำจากเขื่อน น้ำที่อยู่รวมกันหรือน้ำที่เก็บไว้ ปล่อยให้ไหลผ่านกังหันไปยังท่อทางออกแต่ระบบ Tapchan ไม่เหมาะกับบริเวณที่ชายฝั่งเสียทั้งหมด บริเวณที่เหมาะสมสำหรับ Tapchan จะต้องมีคลื่นที่สม่ำเสมอและมีพลังงานคลื่นเฉลี่ยที่ดี และมีช่วงน้ำขึ้นน้ำลงน้อยกว่า 1 m ลักษณะเด่นของชายฝั่งที่เหมาะสมจะประกอบด้วย น้ำลึกใกล้ชายฝั่ง และมีบริเวณสำหรับสร้างอ่างเก็บน้ำ

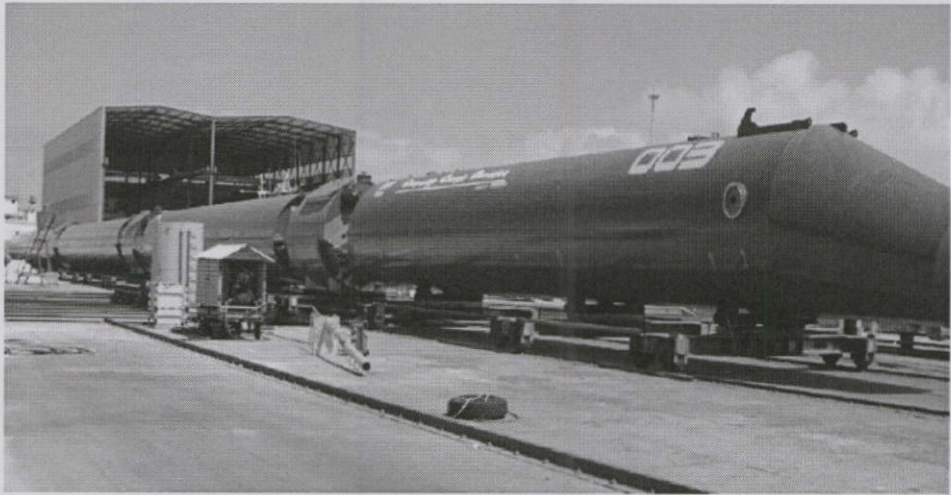
### 2.2.3 Pelamis

สร้างโดย Ocean Power Delivery (OPD) ประเทศโปรตุเกส ทำในรูปแบบฟาร์มคลื่นเชิงการค้า เริ่มต้น Pelamis ประกอบด้วย P-750 จำนวน 3 เครื่องในบริเวณ 5 กิโลเมตรของชายฝั่งโปรตุเกส ใช้งบประมาณ 8 ล้านยูโร ซึ่งจะได้กำลังผลิต 2.25 MW และคาดหวังกับการจ่ายไฟฟ้าให้กับความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยกว่า 1500 ครัวเรือนในระยะต่อไปจะเพิ่มเป็น 30 เครื่อง (20 MW) ซึ่งอุปกรณ์ลอยน้ำรูปแบบใหม่นี้จะกลายเป็นความสำเร็จของอุตสาหกรรมพลังงานคลื่น

Pelamis ติดตั้งอยู่ในสภาพกึ่งจมน้ำ มีลักษณะเป็น โครงสร้างที่เชื่อมกันเป็นข้อต่อประกอบขึ้นเป็นส่วนเชื่อมต่อรูปร่างกระบอกโดยบานพับรอยต่อ การเคลื่อนที่ของจุดข้อต่อถูกต่อต้านโดยแรงไฮดรอลิกแรม ซึ่งเป็นปั้มน้ำมันความดันสูงไปสู่มอเตอร์ไฮดรอลิกผ่านหม้อแบตเตอรี่เก็บกระแสไฟฟ้ามอเตอร์ไฮดรอลิกถูกขับเพื่อกำเนิดไฟฟ้า พลังจากข้อต่อทั้งหมดส่งให้กับสายเคเบิลเดี่ยวใต้พื้นทะเลหลายๆเครื่องสามารถเชื่อมต่อกันและเชื่อมกับชายฝั่งโดยการส่งไฟฟ้าไปโดยสายเคเบิลเดี่ยวใต้ทะเล ประสิทธิภาพที่จะได้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงข้อต่อต่างๆให้เข้ากับคลื่นในทะเล



รูปที่ 2.7 แสดงสภาพการทำงานจริงในทะเลใกล้แนวชายฝั่งของอุปกรณ์ Pelamis [5]

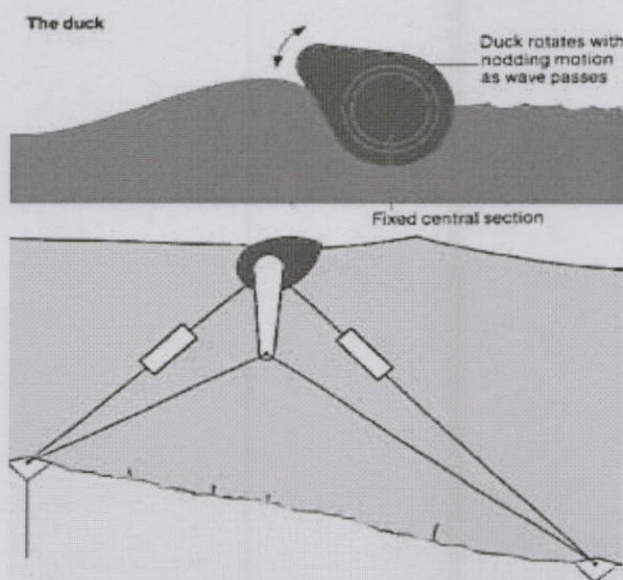


รูปที่ 2.8 ภาพขนาดจริงของ Pelamis<sup>[5]</sup>

อุปกรณ์นี้ยึดตำแหน่งโดยเสาจอด เพื่อป้องกันไม่ให้สายเคเบิลได้นำดึงหรือหย่อน เครื่องต้นแบบขนาดใหญ่ 750 kW มีความยาว 120 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 m ประกอบด้วย 3 ชั้นส่วนต่อกัน ในอัตราตัวละ 250 kW ในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยระบบกำเนิดไฟฟ้าไฮดรอลิกสมบรูณ์แบบ

### 2.2.4 Salter Duck

Salter Duck เป็นอุปกรณ์ลอยน้ำใช้การเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า พัฒนาโดยมหาวิทยาลัย อิดิน-เบิร์ก (Edinburgh) โดยศาสตราจารย์ Steven Salter ในปี ค.ศ.1970 จะมีลักษณะคล้ายกับเป็ดลอยน้ำดำขึ้นดำลงและยึดติดกับพื้นทะเล เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน Duck จะหมุนเฉพาะหัวต่อตรงกลาง การที่เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนเพราะของเหลวภายใน Duck เคลื่อนที่จึงนำมากำเนิดไฟฟ้า



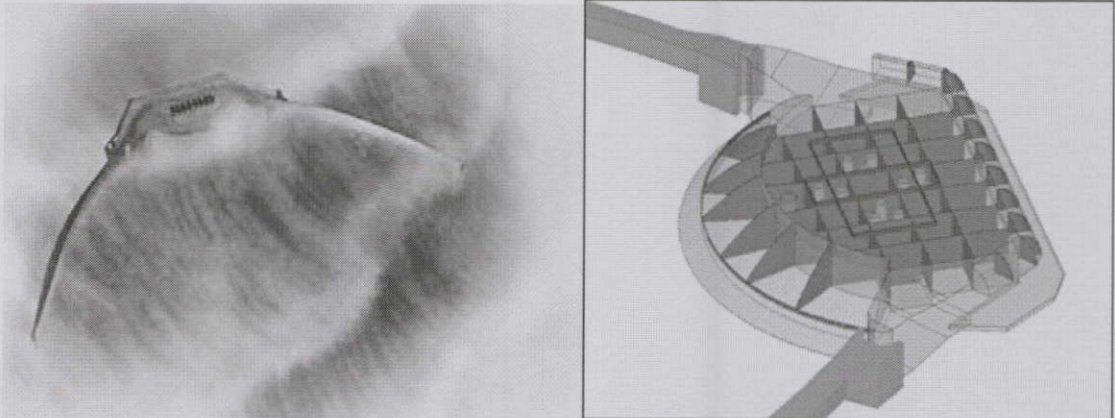
รูปที่ 2.9 โครงร่างของอุปกรณ์ Salter Duck <sup>[5]</sup>

ในระบบนี้ อุปกรณ์จะเคลื่อนที่ขึ้นและลงตามการเคลื่อนที่ของคลื่นและกำเนิดไฟฟ้าผ่านการเคลื่อนที่ Salter Duck สามารถผลิตพลังงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามการพัฒนาล้มเลิกในปี ค.ศ.1980 เนื่องจากการคำนวณผิดพลาดในต้นทุนของการผลิตพลังงาน เมื่อเร็วนี้มีการประเมินค่าทางเทคโนโลยีใหม่แต่ก็ยังมีข้อผิดพลาดอยู่เช่นกัน

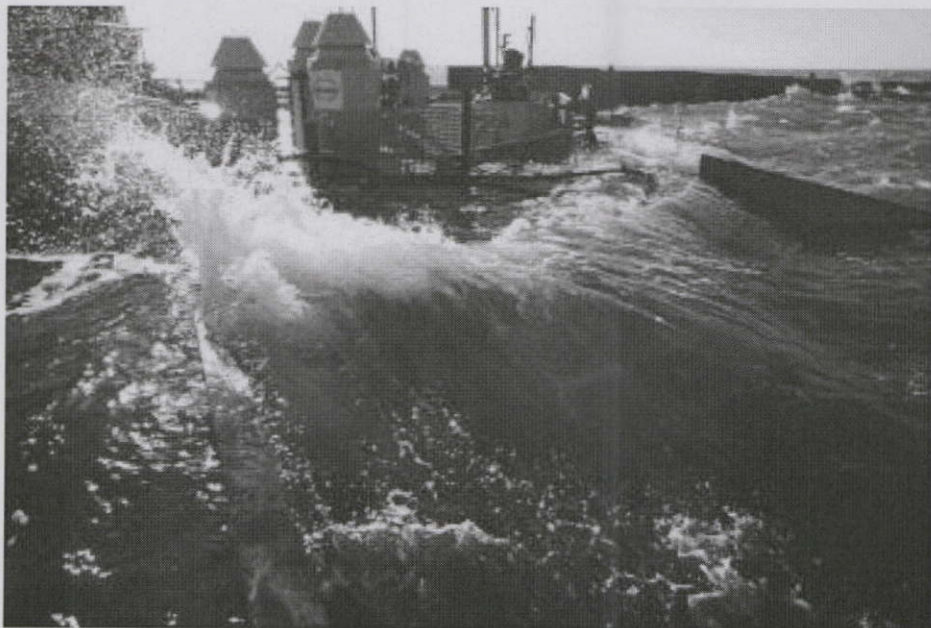
### 2.2.5 Wave Dragon

โดยหลักการแล้ว Wave dragon เป็นอุปกรณ์ที่อยู่เหนือกว่าน้ำทะเลซึ่งทำให้คลื่นมหาสมุทรยกตัวขึ้นสูงขึ้นไปยังอ่างเก็บน้ำเหนือระดับน้ำทะเล โดยน้ำที่ถูกปล่อยออกไปสู่กังหันเป็นการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า Wave dragon สร้างอย่างเรียบง่ายมากๆและมีเพียงกังหันที่เป็นส่วนเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการทำงานนอกชายฝั่งภายใต้คลื่นแรงระดับสูงสุดและสภาวะอากาศที่เลวร้าย

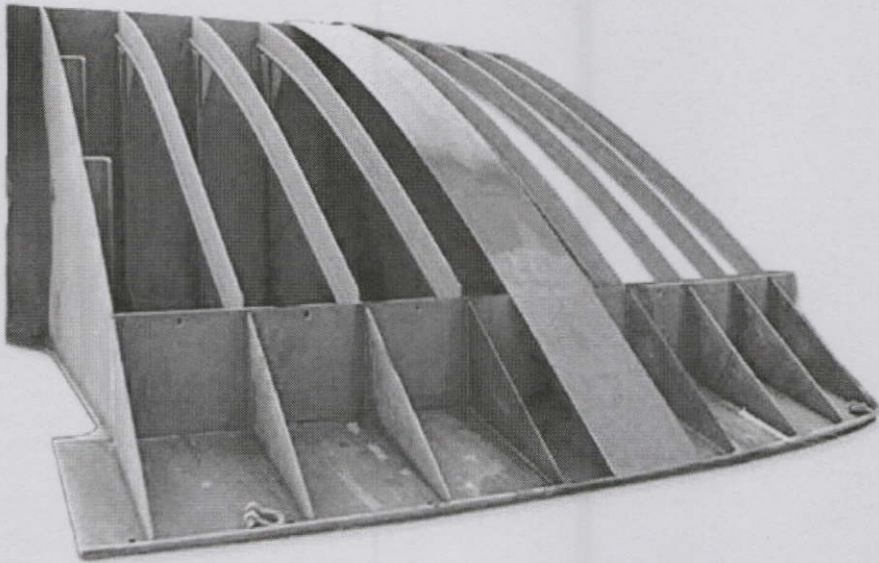
Wave dragon ติดตั้งในบริเวณน้ำลึก(มากกว่า 25 m และจะดีถ้ามากกว่า 40 m) ซึ่งกลายเป็นข้อได้เปรียบจากการที่สกัดคลื่นก่อนที่คลื่นจะสูญเสียพลังงานไปจากการเคลื่อนที่เข้ามาถึงฝั่ง อุปกรณ์นี้ลอยน้ำอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว กลไกเรียบง่ายจากการเปลี่ยนพลังงานศักย์ของน้ำไปเก็บไว้ชั่วคราวอยู่ในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ที่สร้างไว้ด้านบน ก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างระดับน้ำพื้นผิวกับระดับน้ำบนอ่างเก็บน้ำ จะทำให้น้ำไหลออกจากอ่างเก็บน้ำไปสู่กังหันหลายตัวๆ ซึ่งเป็นการกำเนิดไฟฟ้าแบบเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ(เขื่อน)หลายตัวๆ



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของอุปกรณ์ Wave Dragon<sup>[6]</sup>



รูปที่ 2.11 สภาพการทำงานจริงของอุปกรณ์ Wave Dragon<sup>[6]</sup>



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์ Wave dragon<sup>[6]</sup>

### 2.2.6 Archimedes Wave Swing

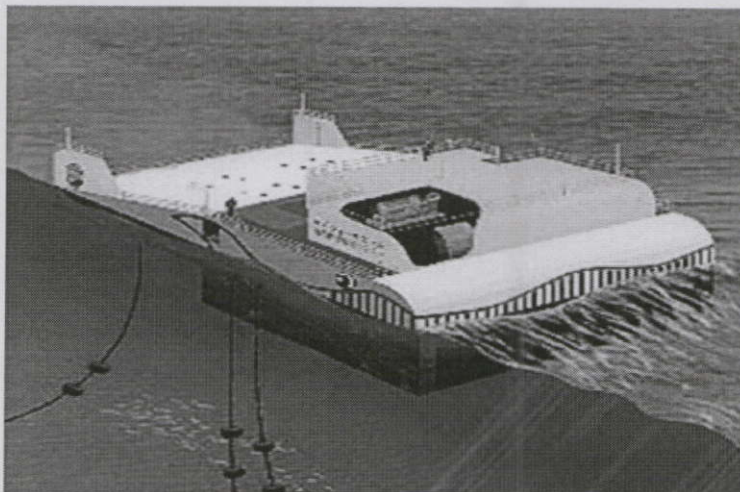
Archimedes Wave Swing (AWS) กำเนิดไฟฟ้าโดยพลังงานจากการม้วนตัวเป็นลูกคลื่น เป็นระบบง่ายของการเชื่อมต่อห้องอากาศระหว่างทรงกระบอกสองอัน AWS ประกอบด้วยทรงกระบอก 2 อัน ทรงกระบอกอันล่างยึดกับส่วนล่างสุดในระหว่างทรงกระบอกอันบน เรียกว่า “ตัวลอย” เคลื่อนที่ขึ้น-ลงภายใต้อิทธิพลของคลื่น ในขณะที่เดียวกันแม่เหล็กซึ่งถูกยึดเข้ากับทรงกระบอกอันบนเคลื่อนที่ตามขดลวด ผลที่เกิดขึ้นเป็นการเคลื่อนที่ของตัวลอยและมีแรงดึงกลับ กำเนิดเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นแม่เหล็กและขดลวดเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงเส้น ภายใน AWS บรรจุด้วยอากาศซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญในระบบนี้ ทำงานคล้ายกับหมอนอากาศเมื่อทรงกระบอกอันบนเคลื่อนที่ต่ำลง อากาศภายในเป็นความดัน เมื่อทรงกระบอกอันบนเคลื่อนที่กลับขึ้นไปจะเกิดเป็นแรงหักล้าง ถ้าปริมาณอากาศมีอยู่อย่างเหมาะสมก็จะทำให้การเคลื่อนที่ของทรงกระบอกได้ผลที่ดี



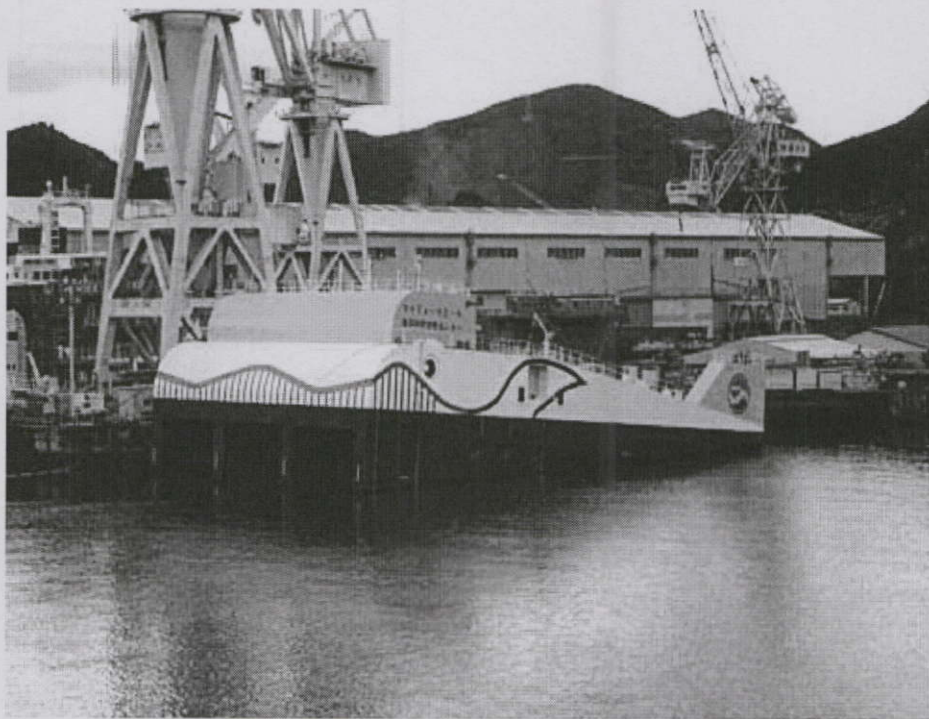
รูปที่ 2.13 การติดตั้งอุปกรณ์ AWS ในทะเล<sup>[7]</sup>

### 2.2.7 Mighty Whale

พัฒนาขึ้นในญี่ปุ่น เมื่อปี ค.ศ.1987 พัฒนาเพื่อมาใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับฟาร์มเลี้ยงปลา และการเพิ่มระบบทำอากาศบริสุทธิ์แก่น้ำทะเล ต้นแบบมีขนาดยาว 50 m กว้าง 30 m ลึก 12 m ให้กำลังที่ 110 kW ทำงานในน้ำลึก ทดสอบในน้ำลึก 40 m ต้นแบบประกอบด้วยระบบ Oscillating water column โดยใช้ช่องอากาศ 3 ช่องสำหรับเปลี่ยนพลังงานคลื่นไปเป็นพลังลมซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นลงของน้ำภายในช่องทำให้อากาศไหลผ่านเข้าไปที่กังหัน กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 ตัว ให้ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงดันขาออกที่ 200 V



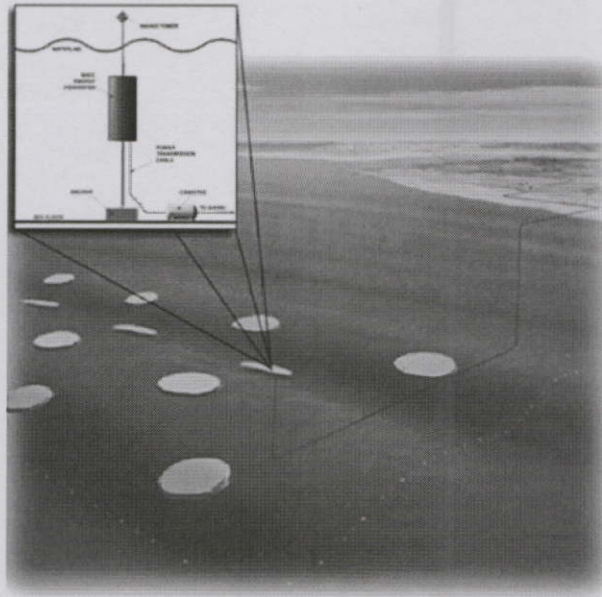
รูปที่ 2.14 แบบจำลองการทำงานของ Mighty Whale ในทะเล<sup>[8]</sup>



รูปที่ 2.15 ภาพอุปกรณ์ต้นแบบ Mighty Whale<sup>[8]</sup>

### 2.2.8 Power Buoy

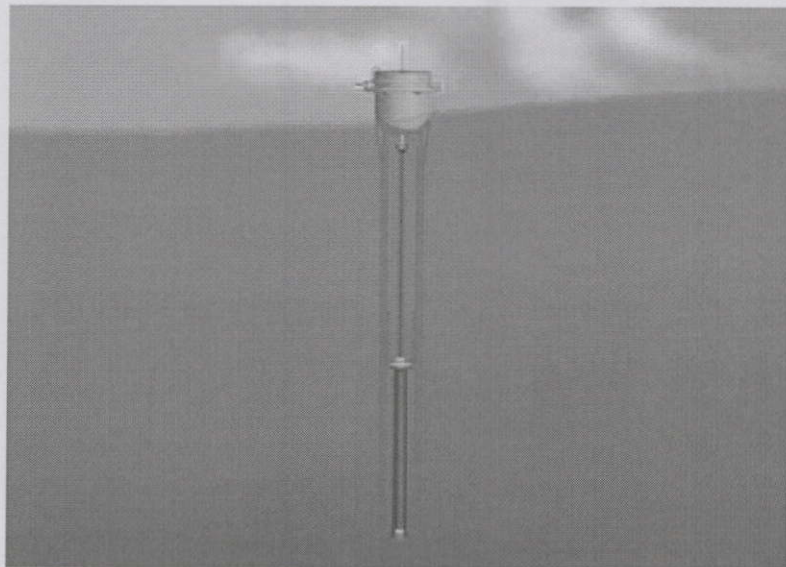
พัฒนาโดย Ocean Power Technology (OPT) ประกอบไปด้วยทุ่นลอยน้ำที่มีการแปลงและเปลี่ยนรูปพลังงานคลื่นโดยใช้พลังกลไป ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มและลดลงของคลื่นนอกฝั่งทำให้ทุ่นเคลื่อนที่ขึ้นลงอย่างอิสระ ได้ไฟฟ้ากระแสสลับออกมาแล้วเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และส่งผ่านสายไฟเคเบิลใต้น้ำที่บริเวณภายในยังมีเซนเซอร์แสดงผลการทำงานอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป มีการติดตั้ง Power Buoy ในลักษณะของสถานีพลังงานคลื่นประกอบด้วยทุ่นหลายๆตัวส่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้ผ่านสายไฟใต้น้ำ ให้กำลัง 10 MW ต่อสถานี ซึ่งในแต่ละสถานีใช้พื้นที่มหาสมุทรประมาณ 10 ไร่



รูปที่ 2.16 ภาพจำลองการติดตั้ง Power Buoy<sup>[9]</sup>

### 2.2.9 Aqua buoy

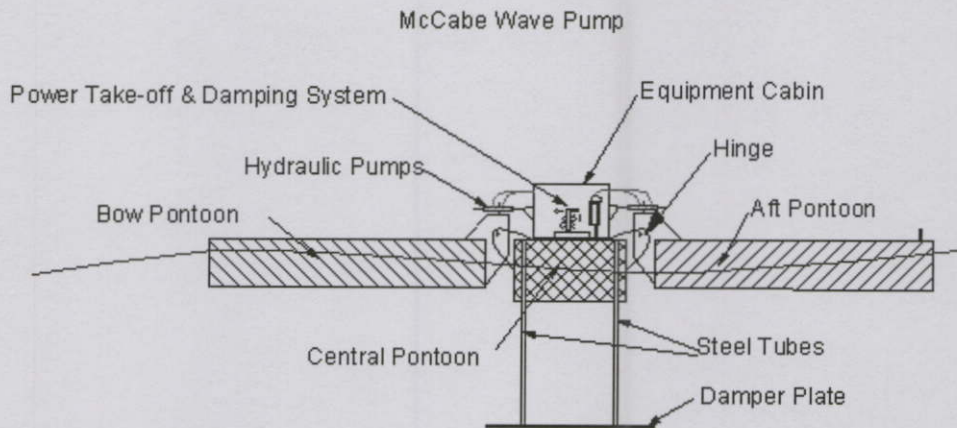
คล้ายกับ Power buoy แต่ Aqua buoy เป็นลักษณะของบั้งท่อยาวใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อยาวด้วยความกดอากาศ ซึ่งใช้น้ำในการไล่อากาศให้ไหลผ่านกังหันเพื่อกำเนิดไฟฟ้า และส่งผ่านพลังงานโดยใช้สายไฟใต้น้ำ ทำงานในน้ำลึก 150-250 ฟุต ผูกโยงอยู่นอกชายฝั่งเมื่อรวมกันเป็นโรงไฟฟ้าสามารถผลิตพลังได้ 100 kW ถึง 100 kW



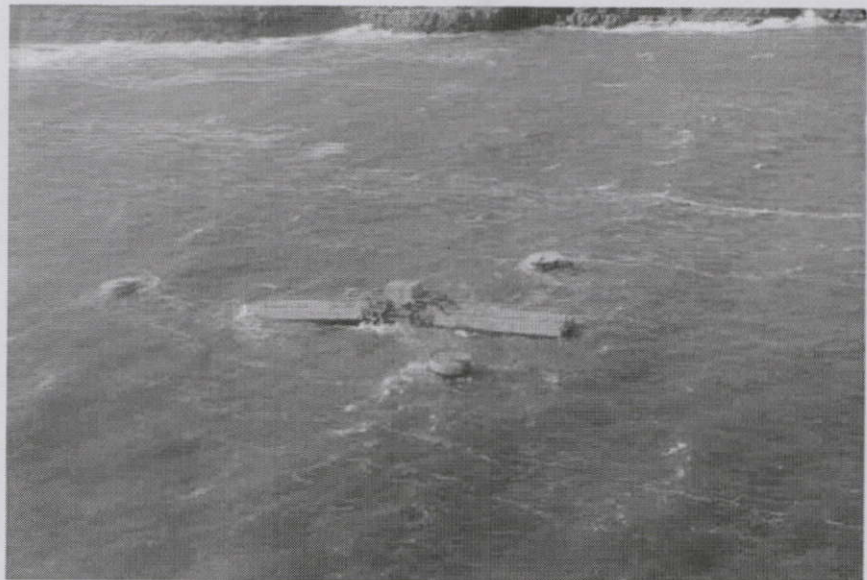
รูปที่ 2.17 แสดงภาพการจำลองทำงานของ Aqua buoy<sup>[10]</sup>

### 2.2.10 McCabe Wave Pump

เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วย โป๊ะเหล็ก 3 ชั้นวางตั้งฉากกัน ซึ่งวางขวางกับแนวคลื่น สามารถพับไปมาเมื่อคลื่นวิ่งเข้ามากระทบ โดยบนพับจะมีปั๊มไฮดรอลิก ติดตั้งอยู่ แรงที่ได้รับจากคลื่นปั๊มไฮดรอลิกจะส่งไปขับยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายได้เพื่อนำไปผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ต่างๆ



รูปที่ 2.18 แสดงภาพรายละเอียดส่วนประกอบของ McCabe Wave Pump <sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.19 แสดงภาพการติดตั้งและทำงานจริงของ McCabe Wave Pump <sup>[11]</sup>

## 2.3 องค์ประกอบของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่แนวตรง

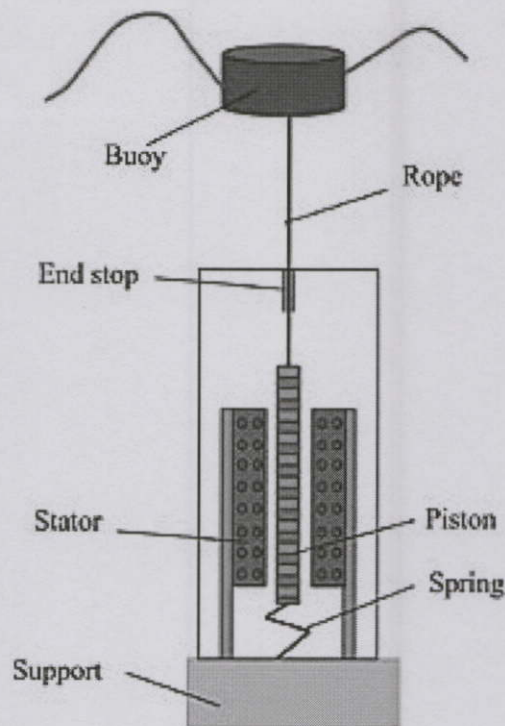
เมื่อนึกถึงอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำทะเลมาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นดูแล้ว อาจจะทำให้ยากและหรืออาจจะทำแล้วไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่เมื่อไม่นานมานี้มีรายงานวิจัยจำนวนมาก<sup>[12]-[16]</sup> ที่พยายามนำเสนอถึงหลักการต่างๆเกี่ยวกับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแนวตรงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในขดลวดทองแดงด้วยสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งรายงานวิจัยฉบับต่างๆเหล่านั้นได้เป็นสิ่งที่สะท้อนว่าระบบการแปลงพลังงานนี้มีโอกาสที่จะสามารถสร้างให้ใช้งานได้จริงและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วย

1. Stator ทำหน้าที่เป็นโครงของขดลวดเหนี่ยวนำที่ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า
2. Rotor หรือ Piston เป็นส่วนที่มีแม่เหล็กถาวรติดอยู่และเคลื่อนที่ขึ้นลงตาม Bouy
3. Bouy หรือทุ่น ช่วยให้ Rotor เคลื่อนที่ตามแนวการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่น
4. Rope ช่วยยึด Bouy กับ Rotor เข้าด้วยกัน
5. End stop จำกัดการเคลื่อนที่ของ Rotor เมื่อมีคลื่นขนาดใหญ่เคลื่อนที่เข้ามาและช่วยลดแรงกระแทกของ Piston
6. Spring ช่วยให้ Piston เคลื่อนที่เข้าสู่ระยะสมดุลเชิงกลได้เร็วขึ้น
7. Support เป็นฐานของเครื่องซึ่งช่วยตัวเครื่องให้อยู่นิ่งที่พื้นทะเลได้

เมื่อมีคลื่นเดินทางเข้ามาทุ่นก็จะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่น ซึ่ง Rope จะดึงให้ Piston เคลื่อนที่ตามทุ่น สนามแม่เหล็กจาก Piston ไปด้วยตัดผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบ Stator ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า EMF ขึ้นที่ปลายของขดลวดและมีกระแสไฟฟ้าไหลตามแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นแรงเคลื่อนจึงสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

สำหรับการแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำทะเลมาเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบกลไกของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยที่ลูกสูบนี้จะติดอยู่กับทุ่นลอยด้วยเชือก ส่วน Stator นั้นจะอยู่ภายนอกล้อมรอบลูกสูบ โดยมีชุดขดลวดพันอยู่แบบสมมาตรรอบๆ Stator ซึ่งการเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่าง Stator กับ Piston จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสภายในขดลวดที่ Stator ดังรูปที่ 2.20<sup>[17]</sup>



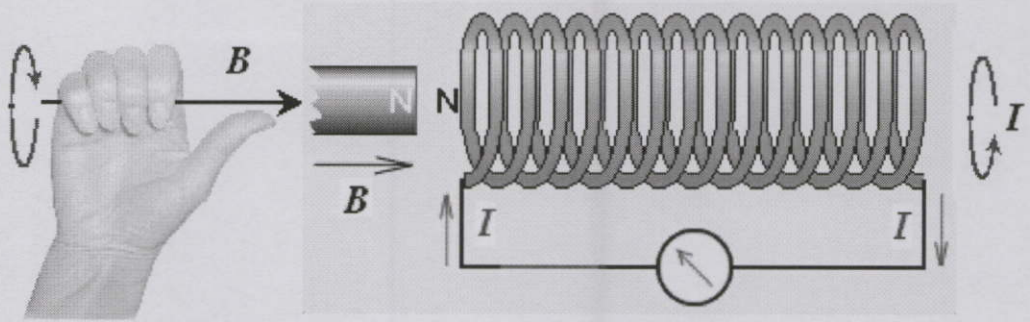
รูปที่ 2.20 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบแนวตรงที่กั้นทะเล

## 2.4 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ Electromotive force ในขดลวดของ Michael Faraday

Michael Faraday ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ตัดผ่านหน้าตัดของขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า Electromotive force (EMF) ซึ่งทำให้ electron ในเส้นลวดเคลื่อนที่ตามทิศทางของกฎมือขวา เมื่อนำโหลลมาต่อเข้ากับปลายขดลวดทั้งสองก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าในวงจร โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมปลายของเส้นลวดดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์ทางสมการเชิงคณิตศาสตร์ดังนี้ [1]

$$V_{emf} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ	$V_{emf}$	คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า Electromotive force (EMF)
	$N$	คือจำนวนรอบของขดลวดหรืออาจจะหมายความถึงจำนวนขั้วของแม่เหล็กก็ได้
	$\phi$	คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านหน้าตัดของขดลวด
	$t$	คือระยะเวลาระหว่างการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก



รูปที่ 2.21 ภาพปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำกระแสจากสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านหน้าตัดของขดลวด

ค่า  $N$  ในสมการที่ 1 อาจจะเป็นค่าของจำนวนรอบของขดลวดคูณกับค่าจำนวนขั้วของแม่เหล็กหรือค่าใดค่าหนึ่งของที่กล่าวมาก็ได้ ซึ่งในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบเป็นหลัก ส่วนเครื่องหมายลบนั้นแสดงให้เห็นว่าทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดมีทิศทางตรงข้ามกับกฎมือขวาเมื่อเราทำการหาที่มาของแรงเคลื่อน  $V_{emf}$  ต่อจะพบว่า

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos \theta = B \cos \theta \int dA = BA \cos \theta \quad (2)$$

โดยที่	$\phi$	เป็นค่าฟลักซ์แม่เหล็ก หรือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดใดๆ
	$\vec{B}$	เป็นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu(\vec{H} + \vec{M})$
	$A$	เป็นค่าพื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่เราสนใจจะพิจารณาค่าสนามแม่เหล็ก
เมื่อ	$\vec{H}$	เป็นค่าสนามภายนอกแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก
	$\vec{M}$	เป็นค่าสนามภายในแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก
	$\mu$	เป็นค่าความยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ในวัสดุใดๆ

มุม  $\theta$  เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  กับเวกเตอร์ของพื้นที่หน้าตัด  $A$  ถ้าขนาดของพื้นที่หน้าตัด  $A$  ของขดลวด และมุม  $\theta$  มีค่าคงที่ ดังนั้น

$$V_{emf} = -N \frac{dB \cdot A \cos \theta}{dt} \quad (3)$$

จากสถานะจริงในการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกำหนดให้  $A$  และ  $\theta$  มีค่าคงที่จะได้ว่า

$$V_{emf} = -NA \cos \theta \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

ในการออกแบบนั้นเราจะพยายามบังคับให้มุม  $\theta$  มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์สุดท้ายสำหรับ  $V_{emf}$  เป็น

$$V_{emf} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะพบว่าจำนวนรอบของขดลวด  $N$  และพื้นที่หน้าตัดของขดลวด  $A$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เทอมที่มีผลทำให้เกิด  $V_{emf}$  ก็คือเทอมของ  $\frac{dB}{dt}$  ซึ่งจำนวนขั้วของแม่เหล็กที่มากก็จะทำให้ช่วงเวลาที่สนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดน้อยลงมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก  $\frac{d\phi}{dt}$  มีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงความเร็วของการเคลื่อนที่ของทุ่นด้วย

## 2.5 สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ James Clerk Maxwell ที่ใช้ในการอธิบายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแนวตรง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแนวตรงนี้มี 2 แบบคือการวิเคราะห์แบบ Stationary (การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับเวลา) และแบบ Trans regime (การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา) ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะใช้สมการ Maxwell ในการอธิบายดังนี้<sup>[18]</sup>

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_f \quad , \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

เป็นสมการของภาค Static ซึ่งใช้วิเคราะห์การจำลองแบบ Stationary

โดยที่  $\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_f$  มาจาก Ampere's law ซึ่งมีความหมายว่าการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งมีความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของพาหะเท่ากับ  $\vec{j}_f$  เกิดจากการใส่สนามแม่เหล็กลงไปในตัวนำเมื่อ  $\vec{j}_f$  คือ ความหนาแน่นของกระแส (conduction current density)

และ  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  มาจาก Gauss's law for magnetic field ซึ่งมีความหมายว่าผลรวมเส้นแรงแม่เหล็กสุทธิภายในพื้นที่ใดๆจะมีค่าเท่ากับ 0 หรืออีกนัยหนึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าพื้นที่ผิวปิดใดๆจะเท่ากับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากพื้นที่ผิวนั้น

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad , \quad \vec{E}_z = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (7)$$

เมื่อ  $\vec{A}$  คือเวกเตอร์ศักย์ของสนามแม่เหล็ก

และ  $z$  คือเวกเตอร์ในแนวแกน Z

เป็นสมการของภาคพลศาสตร์ ซึ่งใช้วิเคราะห์การจำลองแบบ Trans regime

โดยที่  $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  มาจาก Faraday's law of induction ซึ่งมีความหมายว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวกลางใดๆ จะมีผลมาจากการที่มีสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาที่ตัวกลางนั้น

และ  $\vec{E}_z = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$  มาจาก Gauss's law ซึ่งมีความหมายว่าสนามไฟฟ้าในแนวแกนใดๆ จะมีค่าเท่ากับผลลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก (Magnetic potential) เทียบกับเวลา และอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ของสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะทางในแนวแกนนั้น ( $\vec{z}$ )

$$\vec{B} = \nabla \vec{A} \times \vec{z} \quad (8)$$

และจะกำหนดเวกเตอร์ศักย์ดังนี้

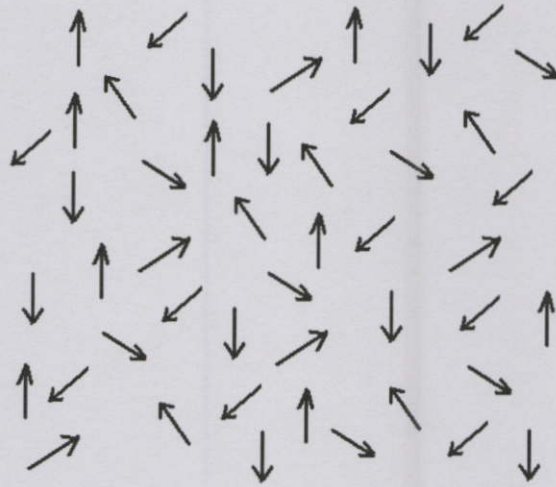
$$\nabla^2 \vec{A} - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \frac{\nabla \mu \cdot \nabla \vec{A}}{\mu} + \sigma \mu_0 \mu_r \frac{d\vec{A}}{dz} \quad (9)$$

กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการ Magnetization เป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้แบบจำลองสำหรับวงจรไฟฟ้า (Stator circuit) มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาแบบไม่เป็นเชิงเส้นเช่นกัน

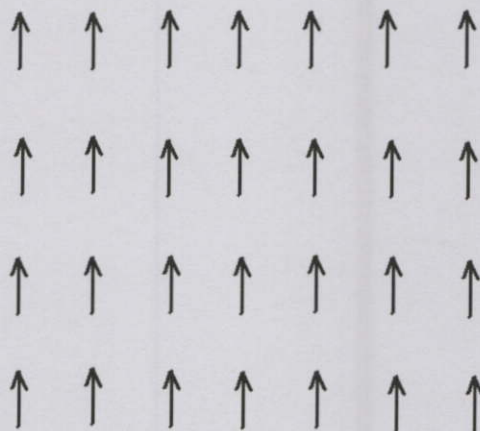
## 2.6 สมบัติทางกายภาพของแม่เหล็กถาวร

เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวรมันเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic ในอะตอมของวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic จะประกอบไปด้วยโมเมนต์สปินแม่เหล็ก (Spin magnetic moment) ที่การจัดเรียงตัวไปในทิศทางต่างๆ กันดังรูปที่ 2.22 แต่เมื่อได้รับการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetized) โมเมนต์สปินแม่เหล็กดังกล่าวภายในเนื้อวัสดุแม่เหล็กชนิด

Ferromagnetic นั้นก็จะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบนี้จะยังคงสภาพอยู่ต่อไปแม้ว่าจะนำสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ใส่ให้กับวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic ออกไปแล้วก็ตาม แต่สภาพโมเมนต์สปินแม่เหล็กที่เป็นระเบียบดังกล่าวก็สามารถทำลายได้ด้วยการทำให้อะตอมภายในวัสดุดังกล่าวสั่นอย่างรุนแรง เช่นการเผาหรือการทุบตีอย่างรุนแรง<sup>[19]</sup>

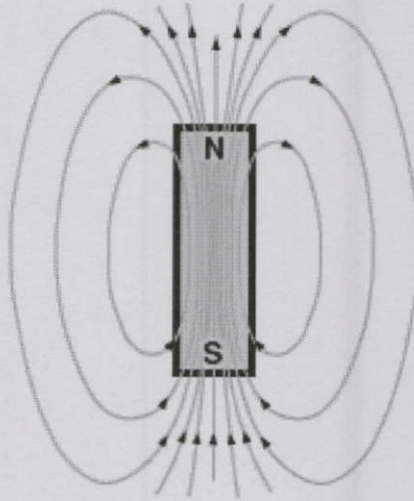


รูปที่ 2.22 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์สปินแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic ก่อนการ Magnetization



รูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์สปินแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กชนิด Ferromagnetic หลังการ Magnetization

ปกติแล้วแม่เหล็กถาวรแต่ละชิ้นที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีขั้วในตัวแม่เหล็กถาวรเอง 2 ขั้ว คือขั้วเหนือ N และขั้วใต้ S โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 สนามแม่เหล็กรอบแม่เหล็กถาวร

โดยที่มีความสัมพันธ์การลดทอนความเข้มของสนามแม่เหล็กตามระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่ทำการวัดดังสมการที่(10)

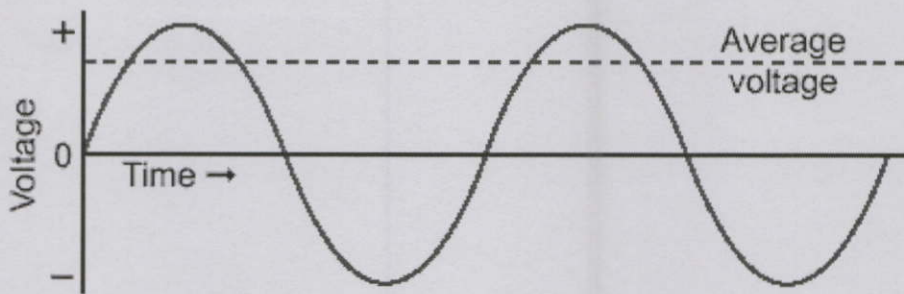
$$\bar{B} = \frac{\mu \bar{B}_0}{r^2} \quad (10)$$

- โดยที่  $\bar{B}$  คือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งใดๆ  
 $\mu$  คือค่าความยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ในวัสดุใดๆ  
 $\bar{B}_0$  คือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวของแหล่งกำเนิด  
 $r$  คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่ทำการวัด

## 2.7 หลักการของไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส

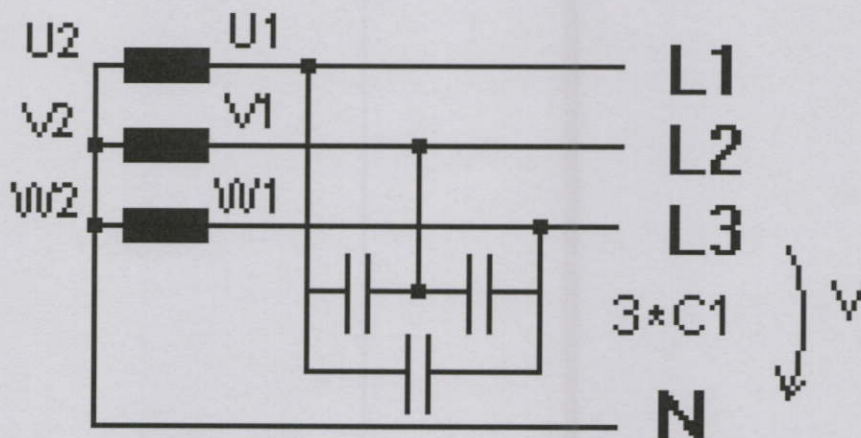
เนื่องจากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้นสำหรับแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำนี่เป็นการจำลองแบบขึ้นมาเพื่อทดลองการให้กำเนิดกำลังไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิงโครนัสซึ่งกระแสไฟฟ้าชนิดนี้จะมีคุณสมบัติดังนี้

ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งทางบวก และทางลบตามเวลาเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนด ดังรูปที่ 2.25 <sup>[20]</sup>



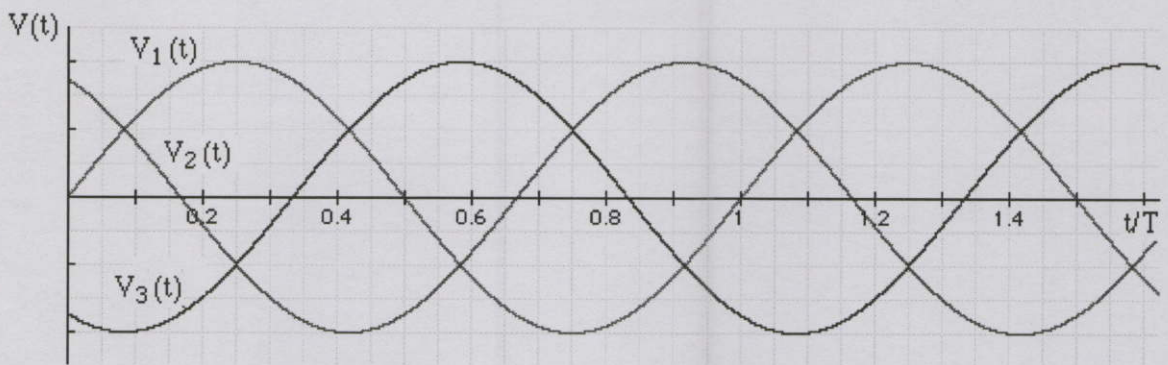
รูปที่ 2.25 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ

แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มาจากแหล่งกำเนิด 3 แหล่งกำเนิด ซึ่งทั้ง 3 แหล่งกำเนิดนี้มีจังหวะการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่ไม่ตรงกัน(เฟสต่างกัน) โดยที่เราจะทำการอ้างอิงความต่างเฟสจากแต่ละแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้วยการนำปลายของขดลวดแต่ละขดที่ให้กำเนิดไฟฟ้ามาต่อร่วมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงหรือกราวด์ของวงจร ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส

โดยปกติแล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่สมมาตรจะมีความต่างเฟสกันในแต่ละเฟสอยู่ 120 องศา และแอมพลิจูดสูงสุดของแรงเคลื่อนในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.27



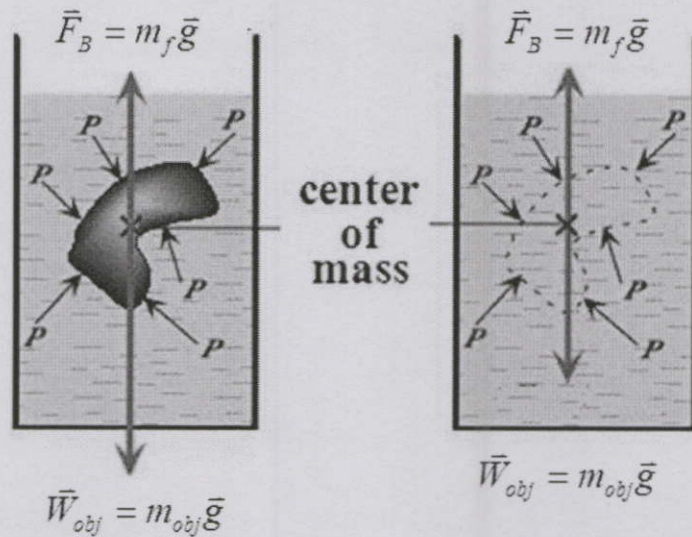
รูปที่ 2.27 กราฟแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส กับเวลา

การกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส เป็นกำเนิดพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหลายแหล่งซึ่งแต่ละแหล่งจะมีเฟสตรงกันในแต่ละจุดที่มีเฟสเดียวกัน

## 2.8 แรงลอยตัวและหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Principle)

ในการออกแบบทุ่นลอยเพื่อรับพลังงานกลจากคลื่นน้ำทะเลที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตลอดเวลาสำหรับการส่งพลังงานกลให้กับชุดเกียร์แม่เหล็กของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า ในเบื้องต้นจะทำการพิจารณาที่แรงลอยตัวเป็นหลัก เนื่องจากขนาดของชุดเกียร์แม่เหล็กจะสัมพันธ์กับขนาดของทุ่นลอยโดยตรง รวมถึงแรงกระทำต่างๆที่เกิดขึ้นกับระบบก็จะต้องทำการวิเคราะห์จากส่วนของแรงลอยตัวเป็นอันดับแรก ส่วนความเสถียรภาพของการลอยตัวจะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างของทุ่นซึ่งก็มีผลต่อการรับพลังงานจากคลื่นน้ำเช่นกัน

แรงลอยตัว คือแรงพุ่งที่ของไหลกระทำกับวัตถุในทิศทางที่ตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงเมื่อวัตถุถูกของไหลล้อมรอบ หลักการของ Archimedes มีว่าวัตถุที่จมอยู่ในของไหลทั้งหมด หรือแม้แต่เพียงบางส่วน นั้นจะมีแรงพุ่งจากความดันของของไหลมาพุ่งวัตถุเอาไว้เช่นกัน โดยแรงพุ่งดังกล่าวจะมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่มีปริมาตรเท่ากับส่วนที่วัตถุจมอยู่<sup>[21]</sup> ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ภาพเวกเตอร์แรงต่างๆที่กระทำกับวัตถุที่จมในของไหล

หลักการที่สำคัญก็คือไม่ว่าวัตถุแต่ละชิ้นจะมีน้ำหนักหรือความหนาแน่นเท่าใด ถ้าปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในของไหลมีปริมาตรเท่ากัน แรงที่ของไหลออกแรงพยุงวัตถุจะมีค่าเท่ากัน โดยสามารถอธิบายเป็นสมการได้ว่า

ในกรณีที่วัตถุจมทั้งหมดและลอยอยู่กึ่งกลางของไหลสมการการเคลื่อนที่ที่จุดศูนย์กลางมวลจะเป็นดังนี้

$$\sum \vec{F}_Y = 0 \longrightarrow \vec{F}_B - \vec{W}_{obj} = 0 \longrightarrow \vec{F}_B = \vec{W}_{obj} \quad (11)$$

- เมื่อ  $\sum \vec{F}_Y$  ผลรวมแรงในแนวแกน Y
- $\vec{F}_B$  แรงที่ของไหลออกแรงพยุงวัตถุที่จมอยู่
- $\vec{W}_{obj}$  แรงที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุ

โดยที่  $\vec{F}_B = m_f \vec{g}$       และ       $\vec{W}_{obj} = m_{obj} \vec{g}$  (12)

- เมื่อ  $m_f$  คือมวลของของไหล
- $m_{obj}$  คือมวลของวัตถุ
- $\vec{g}$  คือค่านิจแรงโน้มถ่วง

ส่วนในกรณีที่วัตถุจมอยู่บางส่วนนั้น เนื่องจากความดันที่ของไหลกระทำที่ด้านล่างของวัตถุ มีมากกว่าที่ด้านบน สมการผลรวมแรงลอยตัวจึงเป็น

$$\sum \vec{F}_{liquid} = \vec{B} = \vec{F}_{bot} - \vec{F}_{top} \quad (13)$$

จาก  $\vec{F} = \vec{P}A \quad (14)$

ดังนั้น  $\vec{F}_B = \vec{P}_{bot}A - \vec{P}_{top}A = \Delta\vec{P}A = \rho_f \vec{g}hA \quad (15)$

$$\vec{F}_B = \rho_f \vec{g}V \quad (16)$$

เมื่อ	$\vec{P}$	คือความดันที่ของไหลกระทำกับวัตถุ
	$A$	คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ
	$\rho_f$	คือความหนาแน่นเชิงมวลของของไหล
	$h$	คือความสูงของวัตถุ
	$V$	คือปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ

เมื่อนำหลักการของ Archimedes มาประยุกต์ใช้กับการออกแบบหุ่นช่วยพยุงแม่เหล็กจะพบว่า น้ำหนักของ Electromagnetic gearbox รวมกับตัวหุ่นเองแล้วต้องมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับส่วนที่หุ่นจมอยู่ในน้ำ ซึ่งการเลือกวัสดุที่ใช้ทำหุ่นที่เหมาะสมก็คือวัสดุที่มีความหนาแน่นเชิงมวลต่ำเป็นหลัก ส่วนรูปทรงนั้นต้องมีการศึกษาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic) ต่อไป เพื่อให้หุ่นที่ออกแบบสามารถถ่ายทอดพลังงานจากแอมพลิฟิเคชันของคลื่นมาเป็นแรงในการยก Electromagnetic gearbox ให้ได้มากที่สุด

## 2.9 ลักษณะทางกายภาพของคลื่น

คลื่นกำเนิดจากลมที่พัดผ่านเหนือผิวน้ำ กลไกการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคลื่นคือปฏิกิริยากันระหว่างลมและผิวน้ำมีกระบวนการ 3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่

1. เริ่มต้น อากาศไหลผ่านเหนือผิวน้ำด้วยความกดอากาศสัมผัสที่สูงกว่าบนผิวน้ำ ทำให้ผิวน้ำเริ่มสั่นและก่อให้เกิดคลื่นขนาดเล็กที่มีเฟสต่างกัน

2. เมื่อความแปรปรวนของอากาศที่ไหลผ่านยอดคลื่นผิวน้ำมากขึ้นทำให้ผิวน้ำเกิดความเครียดมากขึ้น เริ่มเกิดคลื่นน้ำที่มีเฟสเดียวกับคลื่นที่มีอยู่และคลื่นเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้น
3. ท้ายสุด เมื่อคลื่นมีขนาดที่พอเหมาะ ก็จะเคลื่อนที่และสะสมพลังงานจากลมที่มกคอากาศสูงบนผิวน้ำ ทำให้คลื่นมีขนาดใหญ่ขึ้น

ลมเกิดขึ้นมาจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกเก็บสะสมไว้ในมหาสมุทร จะมีความหนาแน่นของพลังงานประมาณ 100 วัตต์ต่อตารางเมตร และสามารถเปลี่ยนไปสู่พลังงานคลื่นในระดับกำลังที่มากกว่า 100 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อพลังงานถูกรวมกันและกลายเป็นคลื่น

คลื่นภายในหรือคลื่นปิดที่อยู่ในแหล่งกำเนิดเรียกว่า คลื่นจากมรสุม (Storm wave) เป็นคลื่นที่มีความซับซ้อนจากทะเลที่มีคลื่นไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามคลื่นจะสามารถเคลื่อนไปโดยสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อย และสร้างเป็นคลื่นขนาดใหญ่ (Swell wave) ที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นมาก ซึ่งการเกิดคลื่นจะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือความเร็วลม, ระยะเวลา และความสามารถในการรับเอาพลังงานหรือระยะทางมากขึ้นที่พลังงานลมส่งผ่านเข้าไปในมหาสมุทร

ลักษณะคลื่นแสดงได้โดย ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ความสูง (H) และคาบเวลา (T) คลื่นที่มีแอมพลิจูดมากและมีพลังงานต่อความสูงและความยาวคลื่นที่มากกว่าคลื่นขนาดใหญ่

### 2.9.1 คุณลักษณะคลื่นและกำลังคลื่น

ลักษณะรูปทรงของคลื่นอธิบายได้โดย คลื่นรูปไซน์ ซึ่งระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นเรียกว่า ความสูงของคลื่น (H) และระยะทางระหว่างจุดสูงสุดของคลื่นที่อยู่ติดกันเรียกว่า ความยาวคลื่น ( $\lambda$ )

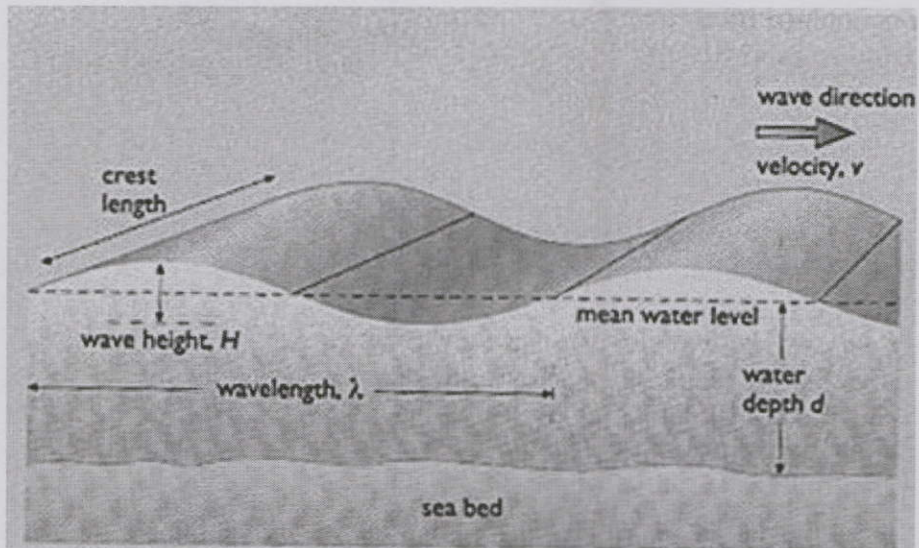
จุดสูงสุดระหว่างคลื่นสองลูกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ( $v$ ) ซึ่งเวลาที่คลื่นสองลูก ผ่านไปยังจุดที่กำหนดไว้ให้เรียกว่า คาบเวลา (T) และความถี่ ( $\nu$ ) ของคลื่นจะใช้ในการอธิบายของการสั่นของผิวน้ำใจหนึ่งหน่วยเวลา โดยจะสังเกตได้โดยให้ผู้สังเกตอยู่กับที่โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ<sup>[22]</sup>

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (17)$$

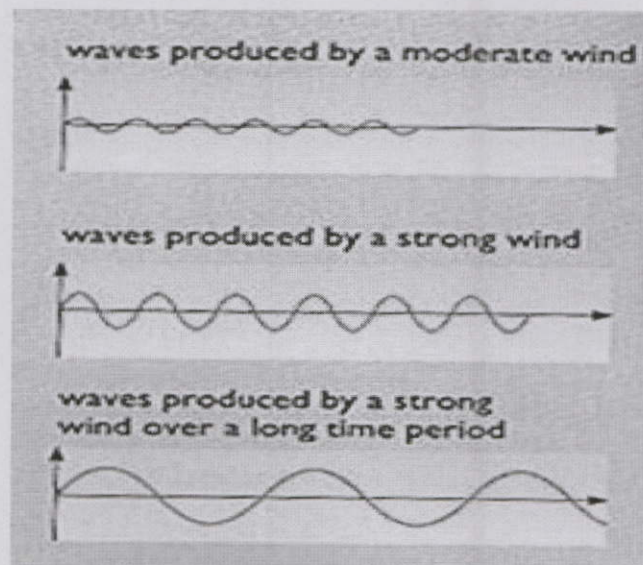
กำลังคลื่นในหน่วยกิโลวัตต์ต่อเมตรของคลื่นในอุดมคติมีค่าแปรผันกับกำลังสองของความสูง H (เมตร) คูณกับคาบเวลาคลื่น T (วินาที) ดังสมการ<sup>[22]</sup>

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (18)$$

โดยที่  $P$  มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร  
 $\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำ  
 และ  $g$  คือค่าโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของคลื่นอุดมคติ<sup>[22]</sup>



รูปที่ 2.30 ลักษณะลูกคลื่นแบบต่างๆ<sup>[22]</sup>

## 2.9.2 คลื่นบริเวณน้ำลึก

ถ้าน้ำลึกมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ความเร็วของคลื่นทะเลตามยาวสามารถแสดง สัมพันธ์กับคาบเวลาคลื่นดังสมการ<sup>[22]</sup>

$$v = \frac{gT}{2\pi} \quad (19)$$

ใช้ในการประมาณค่าความเร็วในหน่วยเมตรต่อวินาทีที่คาบเวลาคลื่นทั่วไปที่ 1.5 วินาที สิ่งที่น่าสนใจของผลลัพธ์นี้คือ ในทะเลน้ำลึกคลื่นตามยาวเดินทางเร็วกว่าคลื่นตามขวาง จากความสัมพันธ์ ดังกล่าว สามารถหาความยาวคลื่นน้ำลึก สำหรับคาบคลื่นใดๆ ได้ดังสมการ<sup>[22]</sup>

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (20)$$

## 2.9.3 คลื่นบริเวณน้ำลึกปานกลาง

ในน้ำตื้น คุณสมบัติของน้ำจะโดดเด่นเพิ่มขึ้นกว่าน้ำลึก เมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณน้ำตื้น  $d = \frac{\lambda}{2\pi}$  คุณสมบัติต่างๆ จะควบคุมได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าในน้ำลึก  $d = \frac{\lambda}{4\pi}$  เมื่อ  $d$  คือระดับความ ลึก ซึ่งในน้ำลึกปานกลางคุณสมบัติของคลื่นจะได้รับอิทธิพลโดยทั้งความลึก  $d$  และคาบเวลา  $T$

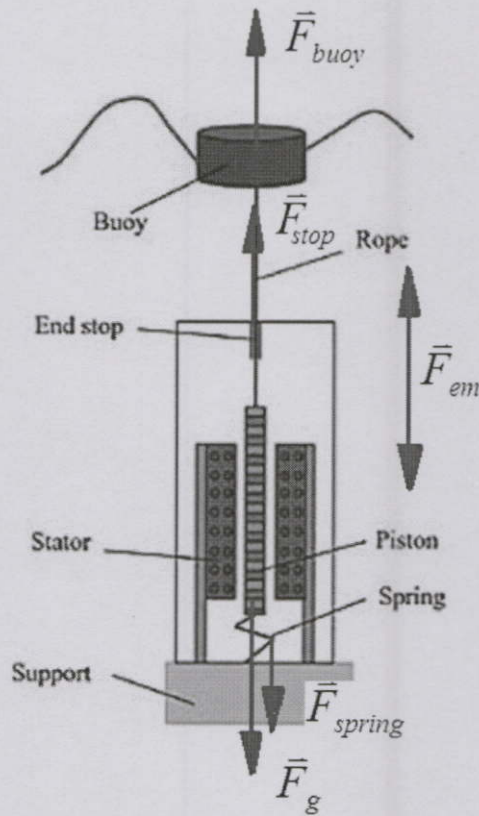
## 2.9.4 คลื่นบริเวณน้ำตื้น

คลื่นที่เข้ามาใกล้ชายฝั่ง พื้นทะเลเริ่มจะมีผลกระทบต่ออัตราเร็วและสามารถแสดงผลที่ เกิดขึ้นได้ ถ้าน้ำมีความลึกน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น สามารถหาความเร็วได้ตามสมการ<sup>[22]</sup>

$$v = \sqrt{gd} \quad (21)$$

## 2.10 สมการการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก

สมการการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กเป็นสมการที่ช่วยในการหาแรงยกของทุ่นลอย  $\vec{F}_{buoy}$  เพื่อช่วยในการออกแบบทุ่นลอย



รูปที่ 2.31 แผนภาพแรงต่างๆที่ระบบกระทำกับพิสตัน

จากกฎการเคลื่อนที่ของ Newton สมการสำหรับการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กจะเป็น

$$m \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} = \vec{F}_{buoy} + \vec{F}_{em} + \vec{F}_{spring} + \vec{F}_{stop} + \vec{F}_g \quad (22)$$

- เมื่อ  $\vec{F}_{buoy}$  คือแรงลอยตัวของทุ่น  
 $\vec{F}_{em}$  คือแรงดึงดูดจากแม่เหล็กถาวรที่กระทำต่อขั้วเหล็กอ่อนของสเตเตอร์  
 $\vec{F}_{spring}$  คือแรงสปริง  
 $\vec{F}_{stop}$  คือแรงจากอุปกรณ์ช่วยหยุดการเคลื่อนที่เมื่อคลื่นที่มีความสูงเกินระยะการเคลื่อนที่เคลื่อนที่เข้ามา  
 $\vec{F}_g$  คือน้ำหนักของ Piston

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของทุ่นจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแอมพลิจูดของคลื่นที่เข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแล้วจะพบว่า มีลักษณะเป็น Simple harmonic ที่มีสมการของตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันกึ่งของเวลาดังนี้

$$\bar{x}(t) = \bar{x}_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (23)$$

- เมื่อ  $\bar{x}(t)$  คือตำแหน่งของทุ่นที่เวลาใดๆ  
 $\bar{x}_{\max}$  คือระยะสูงสุดที่ทุ่นเคลื่อนที่ได้เมื่อเทียบกับจุดสมดุล  
 $\omega$  คือความถี่เชิงมุมของคลื่นที่เข้ามาโดยสามารถหาได้จากคาบของคลื่น  $T$  ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสมการว่า  $\omega = \frac{2\pi}{T}$   
 $\phi$  คือเฟสเริ่มต้นของคลื่นที่เข้ามา

เมื่อ  $\bar{x}_{\max}$  และ  $\phi$  เป็นค่าคงที่จะหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของทุ่นที่สัมพันธ์กับคลื่นที่เข้ามาได้ดังนี้

$$\text{จาก (18)} \quad \frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \bar{x}_{\max} \frac{d}{dt} \sin(\omega t + \phi) = \omega \bar{x}_{\max} \cos(\omega t + \phi) \quad (24)$$

$$\frac{d^2\bar{x}(t)}{dt^2} = \omega \bar{x}_{\max} \frac{d}{dt} \cos(\omega t + \phi) = -\omega^2 \bar{x}_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (25)$$

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของ Piston เมื่อนำ (25) แทนลงใน (22) จะเป็นดังนี้

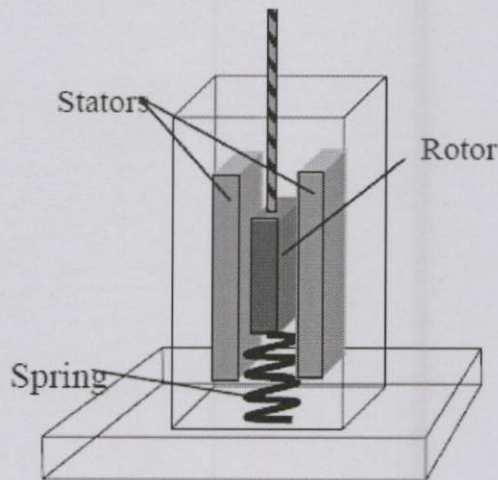
$$-m\omega^2 \bar{x}_{\max} \sin(\omega t + \phi) = \bar{F}_{\text{buoy}} + \bar{F}_{\text{em}} + \bar{F}_{\text{spring}} + \bar{F}_{\text{stop}} + \bar{F}_g \quad (26)$$

$$\text{หรือ} \quad -m \frac{4\pi^2}{T^2} \bar{x}_{\max} \sin(\omega t + \phi) = \bar{F}_{\text{buoy}} + \bar{F}_{\text{em}} + \bar{F}_{\text{spring}} + \bar{F}_{\text{stop}} + \bar{F}_g \quad (27)$$

สมการที่ (27) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับระบบกับคาบเวลา การเคลื่อนที่ของทุ่นและระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของทุ่น ซึ่งในการออกแบบและสร้างระบบจริงจะใช้สมการดังกล่าวออกแบบขนาดของทุ่นเพื่อรับกับน้ำหนักของทุ่นแรงต่างๆที่ด้านการเคลื่อนที่ของระบบรวมถึงออกแบบ End stop และสปริงให้มีความแข็งแรงเหมาะสมกับการเคลื่อนที่สูงสุดของทุ่น

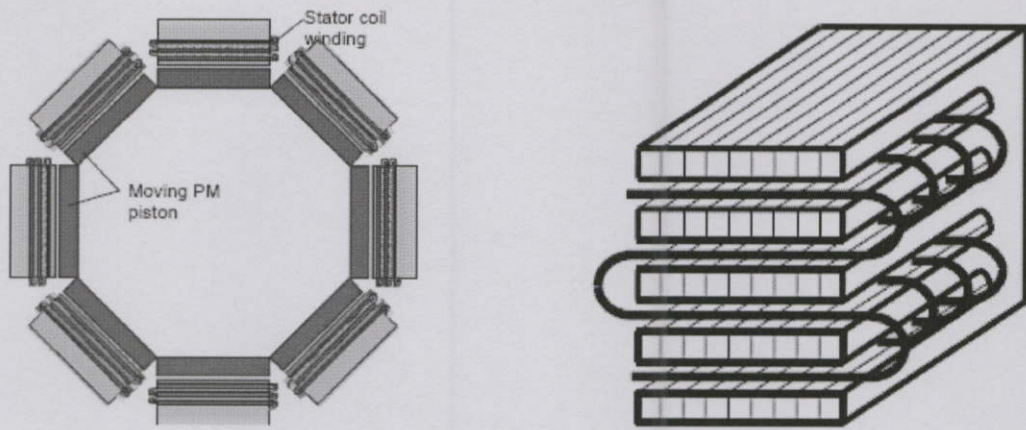
## 2.11 การวิเคราะห์ห้ข้อผิดพลาด

เครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นโดยทั่วไปจะพันขดลวดเข้าไปกับขั้วเหล็กอ่อนที่มีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (Permeability) สูงซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรมีทิศทางไปรวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำได้มากกว่าในอากาศหรือสุญญากาศ ซึ่งในการออกแบบจะเน้นที่การออกแบบให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางมารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำมากที่สุด โดยทั่วไปสเตเตอร์ของเครื่องแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบใดๆจะเป็นทรงกระบอก เนื่องจากเป็นรูปทรงเชิงเรขาคณิตแบบที่ดีที่สุดในการลดการสูญเสียของการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ แต่ในกรณีของสเตเตอร์ทรงเหลี่ยมค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่ปลายขดลวดจะเกิดขึ้นเนื่องจากมุมแหลมที่มุมของสเตเตอร์ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่อสเตเตอร์ของเครื่องมีลักษณะเป็นมุมที่มนหรือกลมกว่าเดิม

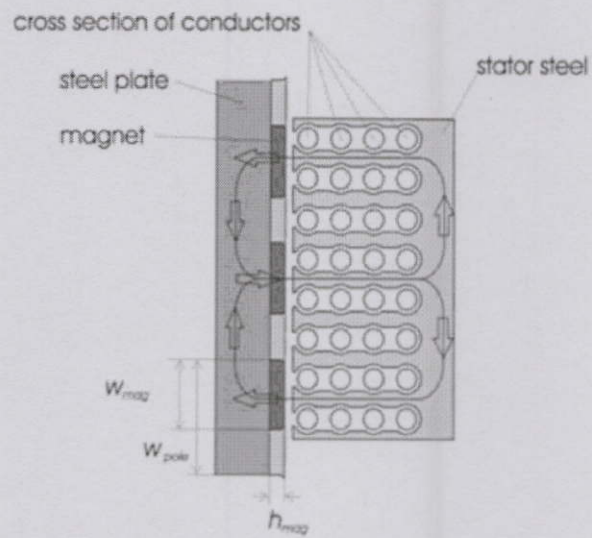


รูปที่ 2.32 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสเตเตอร์เพียง 2 ด้าน

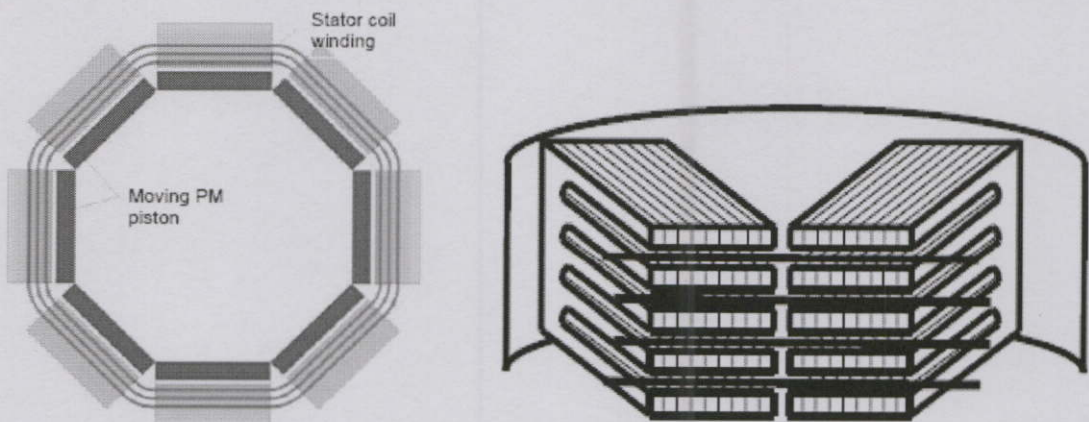
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของพิสดันและสเตเตอร์ ที่เป็นเหลี่ยมซึ่งมีจำนวนด้านมาก (หลายเหลี่ยม) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสเตเตอร์เพียง 2 ด้าน (รูปที่ 2.32) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีทรงกระบอกแล้วพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีทรงกลมจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งผลที่ตามมาก็คือต้นทุนของการผลิตต่อเครื่องจะสูงขึ้น เพื่อให้จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีรูปทรงเข้าใกล้ทรงกระบอกมากที่สุด เพื่อลดผลเสียต่างๆจะที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดแบบทรงเหลี่ยมนั้น การออกแบบระบบจริงที่มีขนาดใหญ่จึงออกแบบให้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นทรงแปดเหลี่ยม<sup>[13]</sup> ดังรูปที่ 2.33-2.36



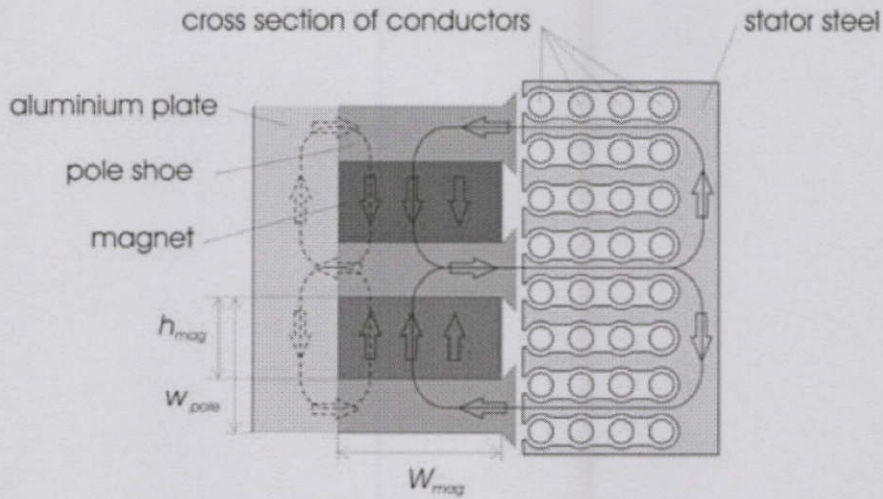
รูปที่ 2.33 แผนภาพการพันลวดเข้ากับสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Surface mount



รูปที่ 2.34 แผนภาพทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Surface mount



รูปที่ 2.35 แผนภาพการพันลวดเข้ากับสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Burr



รูปที่ 2.36 แผนภาพทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในสเตเตอร์ทรง 8 เหลี่ยมแบบ Burry

แผ่นเหล็กที่ใช้ทำเป็นโครงของสเตเตอร์ทำจากเหล็กอ่อนเรียกว่า แผ่นอิเล็กทรอนิกส์<sup>[14]</sup> มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กอ่อนบางๆ ซึ่งเคลือบสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนมาวางซ้อนกันหลายๆแผ่นเพื่อลดการเกิดกระแส Eddy ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำและยังช่วยลดความซึมซับสนามแม่เหล็กในแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ การลดกระแส Eddy ที่ผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ของสเตเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณที่มีช่องว่างอากาศระหว่างแต่ละด้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ช่องว่างของอากาศขนาดเล็กๆนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการสร้างสเตเตอร์ให้มีมุมระหว่างแต่ละส่วนของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดกันหรือมีมุมที่มนมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กผ่านช่องดังกล่าว ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถป้องกันการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กได้เป็นอย่างดี ในกรณีที่พันลวดแบบ Burry ซึ่งจะพันลวดครอบทุกส่วนของสเตเตอร์ ถ้าความยาวของเส้นลวดตัวนำนั้นสั้นก็จะทำให้การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ปลายลวด  $L$  มีค่าต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  ของเครื่องมีค่าต่ำเช่นกัน ซึ่งสามารถพิสูจน์จากสมการค่าอิมพีแดนซ์ในไฟฟ้ากระแสสลับดังนี้

$$Z = [R^2 + (X_L^2 + X_C^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

โดยที่  $X_L = 2\pi fL$  และ  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$  (29)

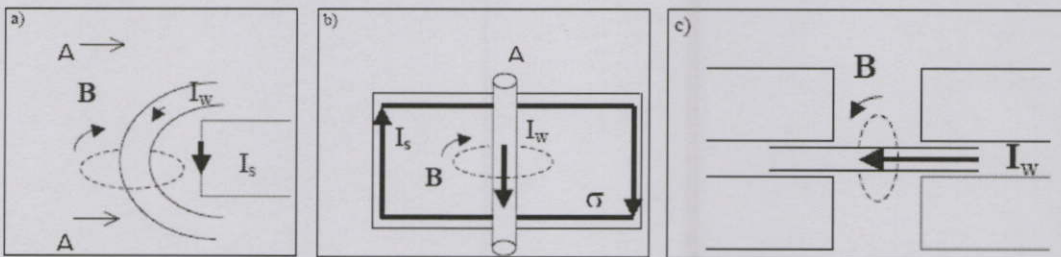
เมื่อ  $R$  เป็นค่าความต้านทานคงที่ของลวด

- $X_C$  เป็นค่าความต้านทานเนื่องจากค่าความเก็บประจุของขดลวด  
 $X_L$  เป็นค่าความต้านทานเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด  
 $L$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด  
 $C$  เป็นค่าความเก็บประจุไฟฟ้าของขดลวด  
 $f$  เป็นค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด

ในที่นี้ค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดมีค่าน้อยจนสามารถประมาณให้เท่ากับ 0 ได้ ดังนั้นผลเฉลยของสมการค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดขณะทำงานจะเป็น

$$Z = [R^2 + X_L^2]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

ตามที่ Biot-Savart <sup>[23]</sup> ได้กล่าวไว้ว่ากระแส  $I_w$  ภายในลวดที่ Stator จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก  $B$  ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแส  $I_s$  ที่ผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ Stator ดังรูปที่ 2.37a และ 2.37b ซึ่งการเกิดการเหนี่ยวนำทั้งสองนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการพันลวดรอบทุกส่วนดังรูปที่ 2.37c



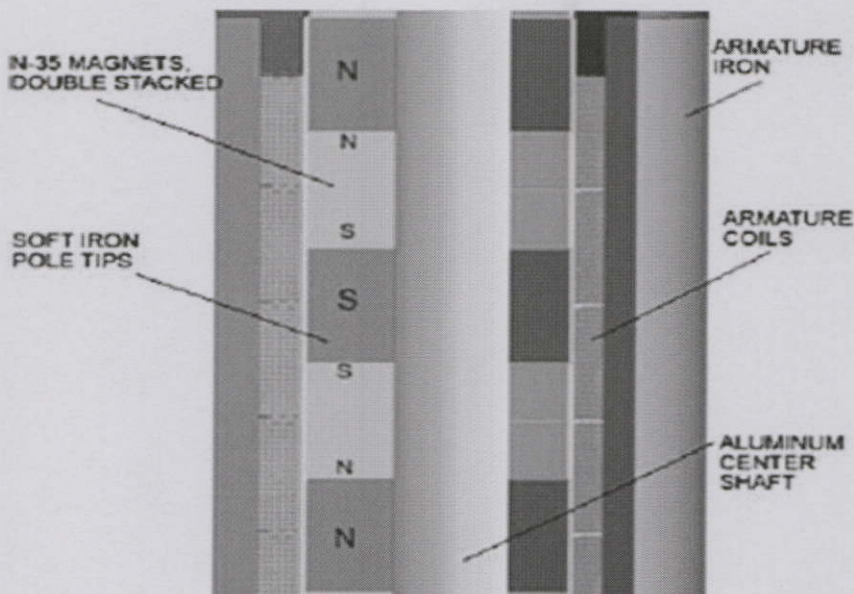
รูปที่ 2.37 แผนภาพของกระแสที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็น Stator จะถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสในขดลวดที่พันรอบ Stator ในกรณีของรูป ก) และ ข) นั้นเป็นการเกิดของกระแสที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ที่พันลวดแบบแยกแต่ละส่วน (Surface mounts) ในกรณีของรูป ค) เป็นการเกิดกระแสที่พื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ที่พันลวดแบบรอบ Stator (Burries)

## 2.12 การออกแบบการจัดวางขั้วแม่เหล็กและขดลวด

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าก็คือการจัดวางตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำและแม่เหล็กถาวร ซึ่งขดลวดที่พันเข้ากับสเตเตอร์จะมีหลายชุด โดยที่แต่ละชุดจะมีขดลวดเหนี่ยวนำตามจำนวนเฟส เพื่อเพิ่มพื้นที่รับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรทำให้ได้พลังงานมากขึ้น ส่วนที่แม่เหล็กถาวรจะมีการสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อขยายสนาม Soft iron pole tips ทำหน้าที่รวบรวมขยายสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแม่เหล็กถาวร ไม่ให้กระจายออกไปที่อื่น และปกป้องแม่เหล็กถาวรจากการกระทบกระเทือน โดยตรงจากการเคลื่อนที่

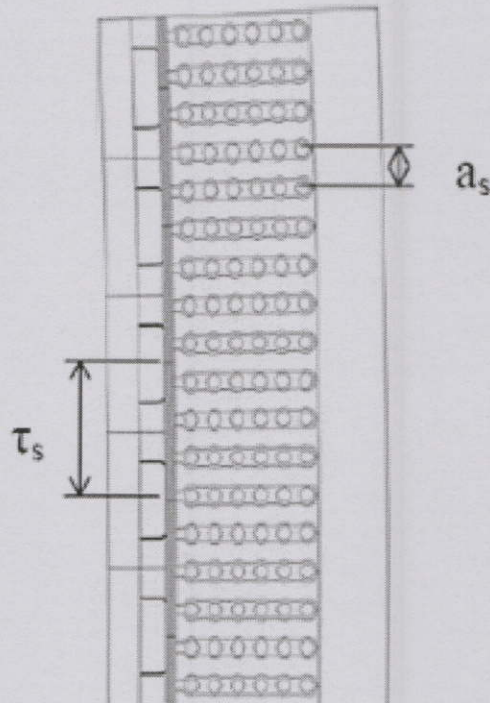
นอกจากรูปทรงเรขาคณิตของสเตเตอร์ที่มีอิทธิพลกับกำลังงานขาออกของเครื่องแล้ว ลักษณะการจัดวางขั้วแม่เหล็กของกล่องเฟืองแม่เหล็กของเครื่องก็มีผลต่อกำลังงานขาออกของเครื่องและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากระบบด้วย จากรูปที่ 2.38 จะมีแกนอะลูมิเนียมเพื่อนำร่องการเคลื่อนที่ของกล่องเฟืองแม่เหล็ก ส่วนจำนวนช่องของชุดขดลวดต่อขั้วและเฟสนั้น ค่า  $q$  มีผลต่อการหาระยะห่างระหว่างช่องของชุดขดลวด (Slot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของจำนวนช่องของชุดขดลวดต่อขั้ว และเฟสเป็นดังสมการนี้<sup>[23]</sup>

$$q = \frac{\tau_s}{pa_s} \quad (31)$$



รูปที่ 2.38 การจัดวางส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ

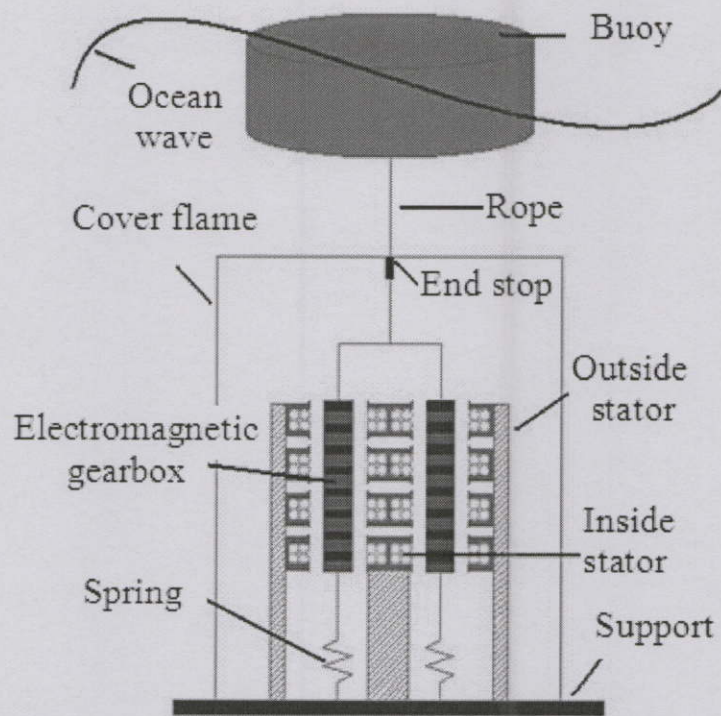
เมื่อ  $p$  เป็นจำนวนของเฟสที่ต้องการ,  $\tau_s$  เป็นระยะห่างระหว่างขั้วของชุดแม่เหล็ก และ  $a_s$  เป็นระยะห่างระหว่างช่องของชุดขดลวดที่ Stator ในตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 2.39 เป็นการออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส โดยมีจำนวนช่องของชุดขดลวดต่อขั้ว และเฟสเป็น 6/5 ซึ่งนั่นหมายความว่าขดลวด 6 ชุด (ชุดละ 3 เฟส) จะมีระยะกระจายปกคลุมขั้วแม่เหล็ก 5 ขั้วในแต่ละเฟส ดังนั้น Stator ที่มี 3 เฟสจะมี 18 ช่องของชุดขดลวดกระจายปกคลุม 5 ขั้วดังรูป



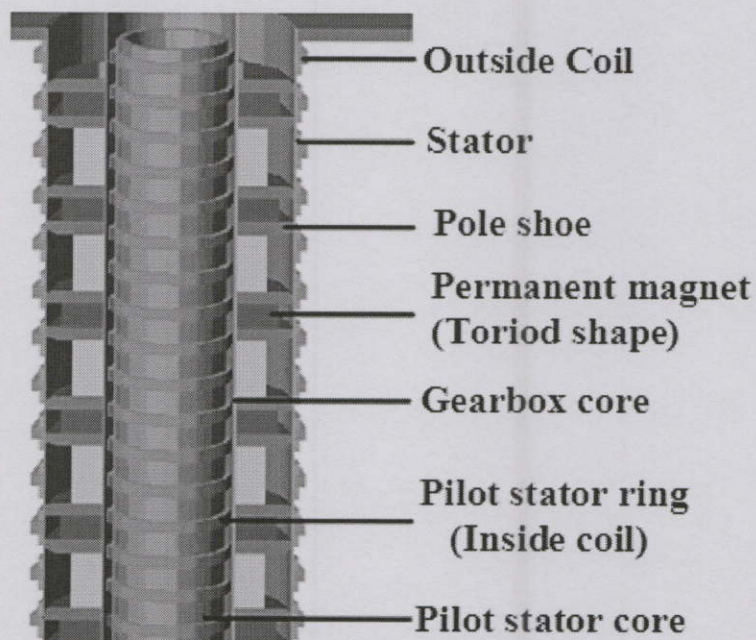
รูปที่ 2.39 แผนภาพสเตเตอร์ที่มีจำนวนช่องของชุดขดลวดต่อขั้ว และเฟส  $q$  เท่ากับ 6/5

### 2.13 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยขดลวดคู่

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำโดยทั่วไปจะใช้แม่เหล็กเป็นลักษณะงานที่สามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้จากการเหนี่ยวนำขดลวดภายนอกเท่านั้น แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้แม่เหล็กถาวรรูปทรง Toroid ที่มีรูตรงกลางซึ่งงานแม่เหล็กถาวร ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางออกจากพื้นที่ภายในของรูของแม่เหล็กรูปทรง Toriod โดยที่สนามแม่เหล็กดังกล่าวสามารถไปเหนี่ยวนำขดลวดวงในให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.40 อัตราส่วนพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ภายในรูของแม่เหล็กรูปทรง Toriod นั้น ซึ่งมีภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.40 แผนภาพแสดงการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยใช้เทคนิคแบบขดลวดคู่



รูปที่ 2.41 ภาพตัดขวางแสดงการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยใช้เทคนิคแบบขดลวดคู่

โดยที่สัดส่วนของอัตราการทำงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันของขดลวดวงในและขดลวดวงนอกซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของชุดขดลวดที่ออกแบบเอาไว้ซึ่งมีที่มาดังนี้

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดจะมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ [12]

จาก

$$P = \frac{E}{t} = \frac{V_{rms}^2}{Z} \quad (32)$$

โดยที่	$P$	คือกำลังงานไฟฟ้า (วัตต์)
	$E$	คือพลังงานไฟฟ้า (จูล)
	$t$	คือเวลารวมที่เครื่องทำงาน (วินาที)
	$V_{rms}$	คือรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
	$Z$	คือค่าความต้านทานภายในรวมของขดลวดขณะทำงาน (โอห์ม)

ดังนั้น

$$E = \frac{V_{rms}^2}{R} t \quad (33)$$

โดยที่

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (34)$$

แทนสมการที่ (34) ลงในสมการที่ (33) จะได้

$$E = \frac{\left(\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} t \quad (35)$$

นำค่า  $V_{max}$  จากสมการที่ (5) มาแทนลงในสมการที่ (35) จะได้

$$E = \frac{\left(\frac{NA\Delta B}{\sqrt{2\Delta t}}\right)^2}{R} t \quad (36)$$

เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

$$E = \frac{1}{2} \frac{t}{R} \left(\frac{NA\Delta B}{\Delta t}\right)^2 \quad (37)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนพลังงานที่ได้ของขดลวดทั้งวงในและวงนอกจะได้ว่า

$$\frac{E_i}{E_e} = \frac{\frac{1}{2} \frac{t}{R_i} \left(\frac{N_i A_i \Delta B}{\Delta t}\right)^2}{\frac{1}{2} \frac{t}{R_e} \left(\frac{N_e A_e \Delta B}{\Delta t}\right)^2} \quad (38)$$

โดยที่  $E_i$  คือพลังงานจากขดลวดวงใน  
 $E_e$  คือพลังงานจากขดลวดวงนอก

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

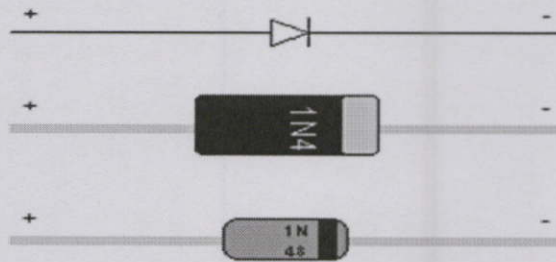
$$\frac{E_i}{E_e} = \frac{R_e (N_i A_i)^2}{R_i (N_e A_e)^2} \quad (39)$$

จากสมการที่ (39) จะสรุปได้ว่าอัตราส่วนพลังงานที่ได้จากขดลวดภายในและขดลวดภายนอกจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบขดลวดซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1. ขนาดของพื้นที่รับสนามแม่เหล็กของขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายในและภายนอกแม่เหล็กถาวรที่ใช้
2. จำนวนรอบของขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ
3. ค่าความต้านทานของขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนรอบของขดลวด

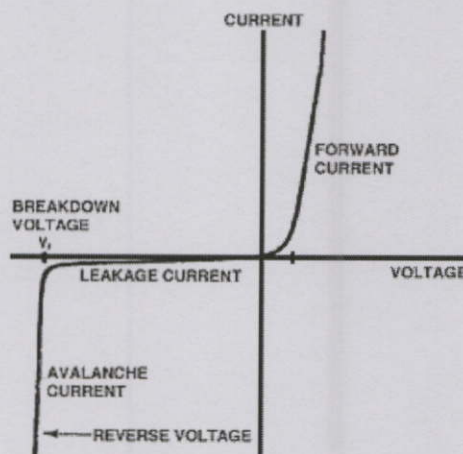
## 2.14 การจัดรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้โดยการเรียงกระแสไฟฟ้าด้วยไดโอด

การจัดรูปสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่มีความถี่และแอมพลิจูดไม่คงที่ ด้วยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยในการเรียงกระแสไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติสามารถเรียงกระแสไฟฟ้าได้และสะดวกต่อการใช้งานคือ ไดโอดชนิดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ โดยการใช้คุณสมบัติการยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียวเมื่อป้อนแรงดันไบแอสตรง และจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้เมื่อป้อนแรงดันไบแอสกลับ ไดโอดที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เรา เรียกว่า “ไดโอดในอุดมคติ (Ideal Diode)”<sup>[24]</sup> โดยมีสัญลักษณ์และทิศทางการไหลของกระแสดังรูป



รูปที่ 2.42 รูปสัญลักษณ์และทิศทางการไหลของกระแสในไดโอด

การไหลของกระแสในไดโอดจะเป็นไปตามทิศทางของลูกศร จาก แอนอด (Anode) ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) ถ้านำการทำงานของไดโอดมาเปรียบเทียบกับการทำงานของสวิตช์ ไดโอดจะทำงานเหมือนกับสวิตช์ ON เมื่อป้อนแรงดันไบแอสตรง และเป็นสวิตช์ OFF เมื่อป้อนแรงดันไบแอสกลับ ซึ่งจะเขียนเป็นคุณสมบัติโดยกราฟและการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของไดโอด

ปัจจุบันไดโอดสารกึ่งตัวนำที่มีเนื้อสารเป็นแบบโฮโมจีเนียส แบ่งตามชนิดของสารที่นำมาทำแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

### 2.14.1 ไดโอดชนิดเจอเมเนียม

ไดโอดชนิดนี้มีความต้านทานต่ำ กระแสรั่วมาก ต้องการแรงดันไฟฟ้าไบแอสเพียง 0.2 โวลต์ ไดโอดชนิดนี้จะถูกนำไปใช้ทำหน้าที่ ดีเทกเตอร์ (Detector) เป็นไดโอดรุ่นแรกที่ใช้งาน ปัจจุบันยังมีเบอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ 1N60, 1N34, 0A70, 0A81 เป็นต้น

### 2.14.2 ไดโอดชนิด ซิลิกอน

เป็นไดโอดที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความต้านทานสูง ทนต่อการไหลของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ต้องการแรงไฟไบแอส 0.7 โวลต์ ถูกนำไปใช้ทำหน้าที่ เร็คติไฟร์ (Rectifier) วงจรจำกัดแรงดันสัญญาณไฟฟ้า (Clipping) เป็นต้น

### 2.14.3 การนำไดโอดไปใช้งาน

ไดโอดนอกจากจะใช้ในวงจรเร็คติไฟเออร์แล้วยังสามารถใช้งานในวงจรอื่น ๆ เช่น วงจรดีเท็คเตอร์ (Detector) วงจรลิมิตเตอร์ (Limiter) วงจรแดมป์เปอร์ (Damper) วงจรป้องกันโหลด (Protector) วงจรจำกัดแรงดันสัญญาณไฟฟ้า (Clipping) วงจรเปลี่ยนระดับสัญญาณ (Clamplng) เป็นต้น ซึ่งการนำไดโอดไปใช้งานจะต้องคำนึงถึง กระแสแรงดันไฟฟ้าและความถี่เป็นหลัก กระแสที่ระบุไว้ในหนังสือคู่มือนั้น เป็นกระแสสูงสุดที่ไดโอดสามารถรับได้ แรงดันไฟฟ้าที่ระบุไว้ เป็นแรงดันในลักษณะรีเวิร์สไบอัส ถ้าเกินกว่านี้จะทำให้เสียหาย หรือ เกินกว่าจุดเบรคดาวนั้นนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติของไดโอด

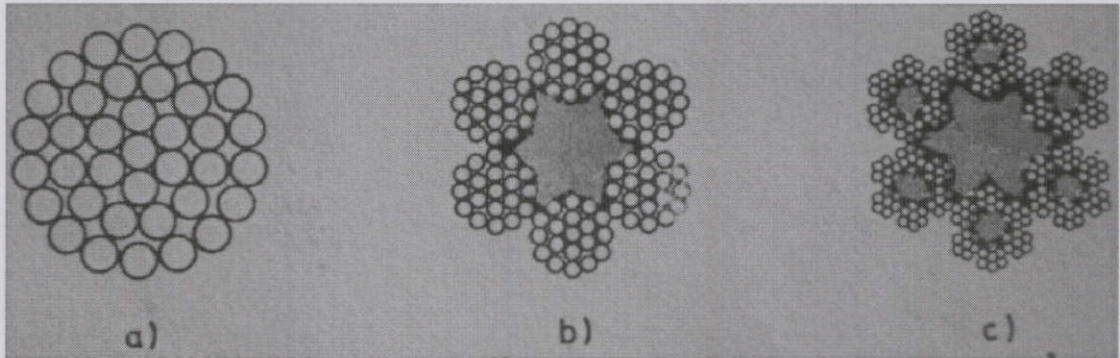
Code Number	Description	Type	Peak Volt at Reverse Current	Average Rectified Forward Current	Forward Current	Forward Voltage Drop
1N60	Gen Purp	Ge	40V	50mA	150 mA	0.2 V
1N4001	Gen Purp,Rect	Si	600V	1A	-	0.8 V at 1A
1N4006	Gen Purp,Rect	Si	1000V	2.5A25C	-	0.8 V at 1A
1N5320	Fast Sw,Det Rect	Si	200V	160mA	250mA	1.0 V at 0.1A
1N4148	Fast Sw Diode	Si	100V	200mA	450mA	1.0 V at 1A
BY252	Fast Purp, Rect	Si	1000V	3A	-	1.0 Vat 1.5A
BY299	Sw Fast Reco, HV	Si	1000V	5A	200A	1.7 V at 5A

## 2.15 ลวดสลิง

สายสลิงที่ใช้สำหรับส่งกำลังงานให้กับกล่องเฟืองแม่เหล็กเป็นลวดเหล็กสลิงที่ใช้งานทั่วไปในงานขนถ่ายวัสดุ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถบิดงอได้ทุกทิศทาง มีกำลังความแข็งแรงสูง แต่มีขนาดเล็ก, น้ำหนักเบา, สึกหรอยากและราคาถูกจากคุณสมบัติข้อดีดังกล่าว ดังนั้นจึงถูกเลือกนำมาใช้งานใน

งานวิจัยนี้ โดยจะทำการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้เหมาะกับน้ำหนักของ กล้องเฟืองแม่เหล็ก

โดยทั่วไปลวดเหล็กสลิงจะมีลักษณะหน้าตัดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ลักษณะของลวด ควันรวมหรือควันขดและลวดเคเบิ้ล ดังรูป 2.44



รูปที่ 2.44 ลักษณะหน้าตัดของลวดควันที่แตกต่างกัน 3 ชนิด a) ลวดควันรวม  
b) ลวดควันขด และ c) ลวดเคเบิ้ล <sup>[25]</sup>

### 2.15.1 ลวดควันรวม

ลวดควันรวมดังรูป a) เป็นสลิงที่นำลวดเหล็กมาควันรวมกันอย่างง่าย ๆ รับน้ำหนักแรงเค้นได้ไม่ มาก คิ้นตัวได้ไม่ตีมาก เนื่องจากกรรมวิธีการควันที่ง่าย นิยมใช้เป็นสายสลิงผูกหรือโยง เพื่อลากวัตถุ ที่ออกแรงคังไม่มากนัก เช่น ลูกรอก เป็นต้น

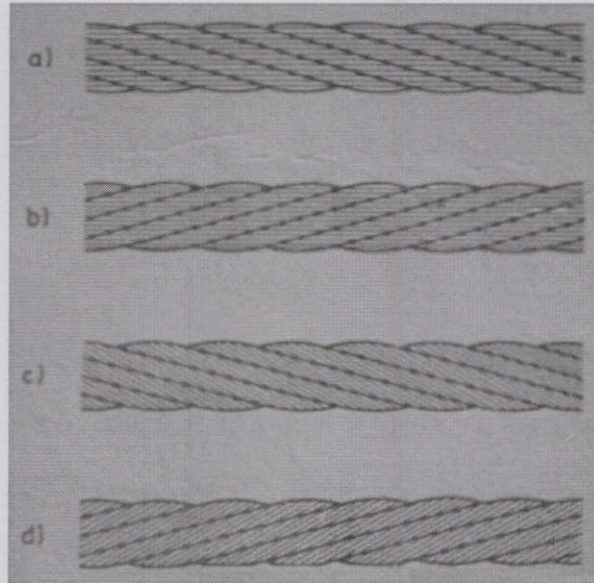
### 2.15.2 ลวดควันขด

ลวดควันขดดังรูป b) เป็นสลิงที่นำลวดเหล็กมาควันสองชั้น คือควันเป็นขดเล็กครึ่งหนึ่ง แล้ว นำขดควันนั้นมาควันเป็นขดใหญ่อีกครั้งหนึ่งรับน้ำหนักของแรงเค้นได้มาก คิ้นตัวได้พอสมควร ใช้ บรรทุกสิ่งที่หนักมาก เช่น เกรนและรอกยกของหนักมากๆ เป็นต้น

### 2.15.3 ลวดเคเบิ้ล

ลวดเคเบิ้ลดังรูป c) เป็นสลิงที่ใช้เส้นลวดเหล็กควันสามชั้น ใช้กับงานบรรทุกที่ต้องการความ แข็งแรงมากที่สุด งานที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่น ลวดสลิงแขวนกระเช้าขึ้นภูเขา หรือใช้ลิฟท์เป็น คัน

ในการควั่นลวดเหล็กให้เป็นสายสลึงที่แข็งแรงจะมีรูปแบบการควั่นที่เป็นมาตรฐานอยู่ทั้งหมด สองแบบคือควั่นตามขวางและควั่นตามยาว ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีการควั่นในสองลักษณะก็คือควั่นวนซ้ายและวนขวาดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 การควั่นลวดสลึงแบบต่างๆ ก) ควั่นตามขวางวนขวาหรือตามเข็มนาฬิกา ข) ควั่นตามขวางวนซ้ายหรือทวนเข็มนาฬิกา ค) ควั่นตามยาววนขวาและ ง) ควั่นตามยาววนซ้าย

สายสลึงแบบควั่นตามกันเหมาะสำหรับใช้รับน้ำหนักการบรรทุกขณะที่แขวนลอยอยู่ ซึ่งเป็นการแขวนในลักษณะที่มีแนวโน้มจะหมุนคลายเกลียวได้ ปกติแล้วมักใช้กับอุปกรณ์ขนถ่ายที่ทำงานในลักษณะของลิฟต์ ส่วนลวดสลึงแบบควั่นขวางกันเป็นลวดสลึงที่บิดโค้งได้ยากกว่าลวดแบบควั่นตามกัน โดยปกติแล้วนิยมใช้กับเครนหรือรอกก้าน ดังนั้นในการเลือกชนิดลวดสลึงแบบต่างๆ ให้เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานลวดสลึงตามรูปแบบการควั่นลวดเป็นหลัก ส่วนขนาดของลวดสลึงที่เหมาะสมจะสามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์การหาแรงเค้นดึงและภาระความดันแรงดึง

$$\sigma_z = \frac{F_{Smax}}{A_s} \quad (40)$$

โดยที่  $\sigma_z$  คือค่าความเค้นสูงสุด  $kN / mm^2$   
 $F_{Smax}$  คือค่าแรงดึงสูงสุดในเส้นลวด  $kN$   
 $A_s$  คือค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวด  $mm^2$

เมื่อจัดรูปสมการให้สัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสลิงเส้นเล็กที่นำมาทำการควั่น  
จำนวน  $n$  เส้นจะได้ว่า

$$\sigma_z = \frac{F_{S\max}}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\delta^2 \pi}{4} \right]_i} \quad (41)$$

โดยที่  $\delta$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดเหล็กที่นำมาควั่น ( $mm$ )

ส่วนค่ากำลังความเค้นบิดม้วนจะสามารถคำนวณได้จากขนาดการบิดม้วนเป็นวงกลมของ  
เส้นลวดใดๆดังสมการ (37)

$$\sigma_b = E \cdot \frac{\delta_{\max}}{D} \quad (42)$$

โดยที่  $\sigma_b$  คือค่าความเค้นบิดม้วนสูงสุด ( $kN / mm^2$ )

$E$  คือค่ายังโมดูลัสของเหล็ก ซึ่งมีค่าประมาณ ( $200 kN / mm^2$ )

$\delta_{\max}$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางโตสุดของเส้นลวดเหล็กที่นำมาควั่น ( $mm$ )

$D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมการบิดม้วนของสายสลิง ( $mm$ )

ค่าความเค้นรวมที่อยู่ในระนาบเดียวกันจะเท่ากับผลบวกความเค้นของ  $\sigma_z$  กับ  $\sigma_b$  ดังสมการ

$$\sigma_{res} = \sigma_z + \sigma_b \quad (43)$$

โดยที่  $\sigma_{res}$  คือค่าความเค้นรวมจากความตึงและการบิดม้วนสูงสุด ( $kN / mm^2$ )

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของเส้นลวดเหล็กที่ยอมรับได้จะเป็นดังสมการที่ (44)

$$d_{\min} = \frac{\sqrt{4 \cdot v \cdot F_{S\max}}}{\kappa \cdot \pi \cdot \sigma_B} \quad (44)$$

โดยที่  $d_{\min}$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของเส้นลวดเหล็กที่ยอมรับได้  $mm$

$v$  คือค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย

$\kappa$  คือค่าแฟกเตอร์พื้นที่หน้าตัด

$\sigma_B$  คือค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ทำลวดสลิง ( $kN / mm^2$ )

กำหนดให้

$$k = \frac{\sqrt{4.v}}{\kappa.\pi.\sigma_B} \quad (45)$$

โดยที่  $k$  ค่าคงที่  $mm^2 / kN^{-\frac{1}{2}}$

ดังนั้นสมการที่ (44) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$d_{\min} = k\sqrt{F_{S\max}} \quad (46)$$

และสามารถวิเคราะห์จากเฟกเตอร์ของพื้นที่หน้าตัดได้จากสมการที่ (47) ดังนี้

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta^2 \pi}{4} \right)}{\frac{d^2 \pi}{4}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{d^2} \quad (47)$$

โดยที่  $x$  คือค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรวมของลวดเส้นเล็กต่อพื้นที่หน้าตัดของสายสลิง โดยปกติค่ามาตรฐานจะอยู่ที่ประมาณ 0.46

## บทที่ 3

### การดำเนินงานออกแบบและสร้าง

#### 3.1 ศึกษาข้อบกพร่องของต้นแบบเดิมที่ได้การออกแบบและสร้างไว้

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาประสิทธิภาพของต้นแบบระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำ โดยการแก้ไขข้อบกพร่องของระบบจากเดิมที่ได้เคยทำการออกแบบเอาไว้ ซึ่งในการพัฒนาดังกล่าวจะเริ่มต้นด้วยการศึกษาข้อบกพร่องของระบบเดิมดังนี้

##### 3.1.1 ศึกษาข้อบกพร่องจากกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองคลื่นน้ำ

เนื่องจากต้นแบบเดิมของระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ออกแบบและสร้างไว้เป็นระบบที่ได้ทำการจำลองแบบด้วยการย่อขนาดลงจากระบบจริงที่จะติดตั้งในทะเลดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นเพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ภายในห้องปฏิบัติการ จึงได้ทำการสร้างกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กแทนคลื่นน้ำจริงที่ประกอบด้วยชุดทดรอบ, มอเตอร์ไฟฟ้า และระบบส่งกำลัง ซึ่งต้นแบบเดิมที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้มีค่ากำลังงานเชิงกลที่ส่งออกมาไม่เพียงพอกับพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนชุดเกียร์แม่เหล็ก

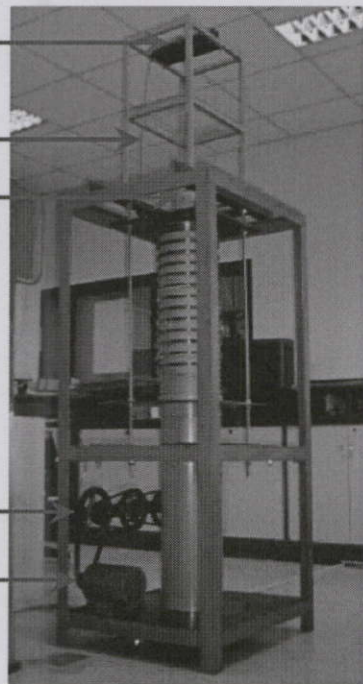
ชุดล้อที่มีร่องสำหรับพาดสายสลิงเพื่อส่งกำลัง

สายสลิงที่ใช้ในการส่งกำลัง

ส่วนบนของชุดเกียร์แม่เหล็กที่ใช้สำหรับต่อกับสายสลิง

ชุดทดรอบเพื่อเพิ่มกำลังขับเคลื่อนชุดเกียร์แม่เหล็ก

มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการส่งกำลัง



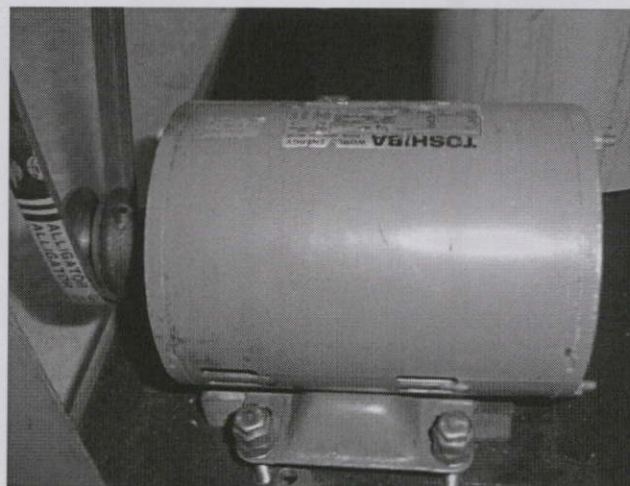
รูปที่ 3.1 ต้นแบบเดิมของระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ออกแบบและสร้าง

จากรูปที่ 3.1 จะพบว่าต้นแบบเดิมของระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ ออกแบบและสร้างไว้มีกลไกการทำงานเพื่อขับเคลื่อนแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงได้นั้น จะมี ลำดับการทำงาน โดยเริ่มจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อกับชุดทรอบเพื่อเพิ่มกำลังในการขับเคลื่อนแม่เหล็ก ผ่านสายพานส่งกำลังงาน โดยที่ชุดทรอบที่ประกอบขึ้นจากเชื่อมต่อมู่เล่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่ต่างกันให้ติดกันเป็นมู่เล่ทรอบ ซึ่งมู่เล่ตัวสุดท้ายของชุดทรอบจะทำหน้าที่เป็นลูกรอกกรอ สายสลิงมาเก็บไว้เพื่อขับเคลื่อนแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้น และปล่อยสายสลิงออกไปเพื่อขับเคลื่อน แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ลง กำลังงานกลที่ชุดทรอบส่งออกมาผ่านสายสลิงที่โยงเข้ากับชุดล้อที่มีร่อง สำหรับพาดสายสลิงเพื่อใช้ในการส่งกำลังแบบเปลี่ยนทิศทางของแรงและช่วยให้สายสลิงเคลื่อนที่ได้ อย่างคล่องตัว ซึ่งปลายของสายสลิงจะไปต่อกับส่วนบนของชุดเกียร์แม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์กลไกการทำงานในระบบในส่วนของการส่งกำลังงานเชิงกลพบว่าต้นแบบเดิม ของระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ออกแบบและสร้างไว้มีข้อบกพร่องต่างๆดังนี้

### 3.1.1.1 มอเตอร์ที่ใช้มีอัตราการส่งกำลังน้อยเกินไป

เนื่องจากมอเตอร์ตัวเดิมที่ใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบรอบสูงที่มีทั้งขดลวดทำงาน (Run coil) และขดลวดเริ่มต้น (Start coil) มอเตอร์ดังกล่าวมีความเร็วรอบอยู่ที่ 1420 รอบต่อนาที หรือ 23.67 Hz ซึ่งมีความสามารถที่จะให้กำลังงานทางกลได้อยู่ที่ 1/4 Hp หรือประมาณ 186.5 W ดังรูปที่ 3.2 การใช้งานมอเตอร์ประเภทนี้จะต้องทำการต่อมู่เล่หรือเฟืองขับเพื่อส่งกำลังงานทางกลผ่าน สายพานหรือโซ่ขับตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณามอเตอร์ดังกล่าวแล้วพบว่าเป็นมอเตอร์ที่มีกำลังงานทาง กลน้อยเกินกว่าที่จะสามารถขับเคลื่อนแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงที่อัตราเร็ว 0.6 m/s ได้อย่างมี ประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.2 ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบรอบสูงที่ใช้งานอยู่เดิม

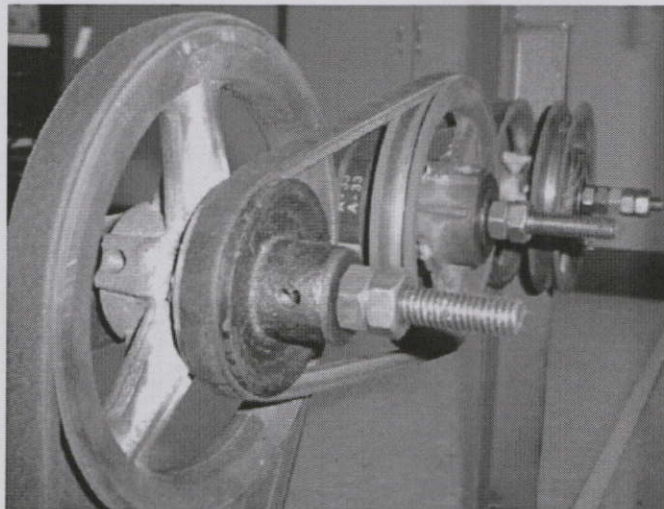
### 3.1.1.2 ชุดระบบทดรอบที่ใช้มีความสามารถในการส่งกำลังงานที่ต่ำและมีกลไกการทำงานที่ไม่เหมาะสม

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้มีความเร็วรอบสูงเกินกว่าที่จะใช้งานได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ใช้มู่เล่เดี่ยว 2 ตัวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันมาทำการเชื่อมติดกันเพื่อให้ได้มู่เล่ทดรอบสำหรับการส่งกำลังแบบรอบต่ำแต่แรงบิดสูง ในการออกแบบชุดทดรอบนี้ได้ใช้มู่เล่ทดรอบจำนวน 3 ชุด โดยที่แต่ละชุดเชื่อมต่อกันด้วยสายพาน ซึ่งเมื่อทำการประกอบมู่เล่ทดรอบทั้งสามอันเข้าเป็นชุดทดรอบตามทีออกแบบเอาไว้แล้วพบว่าได้ค่าความเร็วเส้นสัมผัสที่มู่เล่ตัวสุดท้ายประมาณ 0.6 m/s ซึ่งตรงกับที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยอัตราทดรอบนี้คำนวณจากสมการ

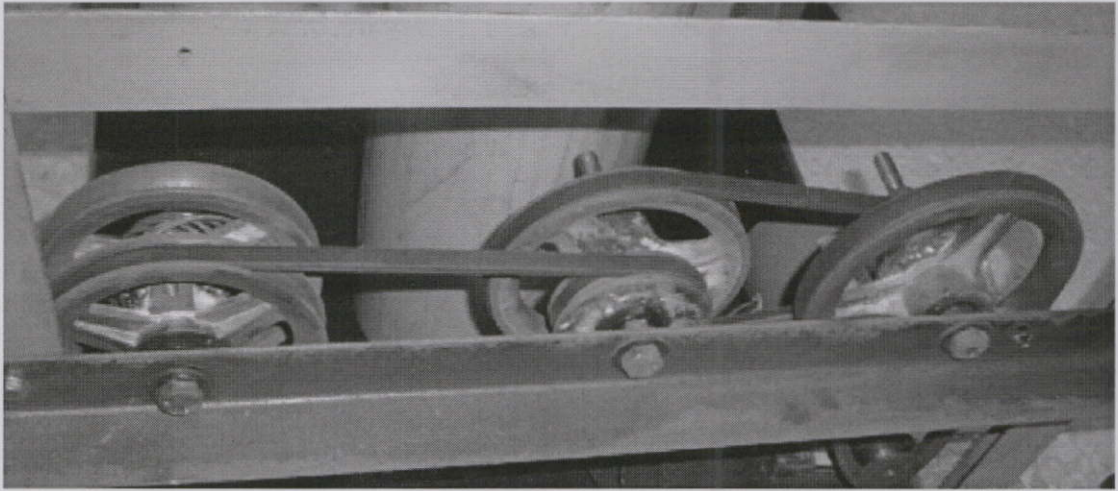
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (48)$$

โดยที่  $\omega_1$  คืออัตราเร็วเชิงมุมของมู่เล่ตัวส่งกำลัง  
 $\omega_2$  คืออัตราเร็วเชิงมุมของมู่เล่ตัวรับกำลัง  
 $r_1$  คือรัศมีของมู่เล่ตัวส่งกำลัง  
 $r_2$  คือรัศมีของมู่เล่ตัวรับกำลัง

ชุดทดรอบเดิมที่ได้ทำการคำนวณออกแบบและประกอบเข้ากันเป็นชุดทดรอบดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดทดรอบของระบบชักชุดแม่เหล็กด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.4 ชุดประกอบของระบบชักชุดแม่เหล็กด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะได้ว่ามู่เล่ตัวสุดท้ายของชุดประกอบจะทำหน้าที่เป็นลูกรอกกรอ สายสลิงมาเก็บไว้เพื่อชักชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้น และปล่อยสายสลิงออกไปเพื่อชักชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ลง กลไกการทำงานในลักษณะดังกล่าวมอเตอร์จะต้องทำงานอย่างหนัก เนื่องจากต้องส่งกำลังชักให้ชุดมู่เล่หมุนกลับไปกลับมาตามจังหวะของการเคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงของชุดเกียร์แม่เหล็กตลอดเวลา ซึ่งในแต่ละครั้งของการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ขดลวดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์จะต้องทำงานทั้งขดลวดครันและขดลวดสตาร์ท เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก เพราะมอเตอร์ชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ขดลวดสตาร์ททำงานช่วงแรกของการหมุน เมื่อความเร็วรอบของการหมุนถึงที่กำหนดขดลวดครันก็จะทำงานเพียงขดเดียว

### 3.1.1.3 ล้อมู่เล่และสายพานที่ใช้ไม่เหมาะสมในการส่งกำลัง

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะสังเกตได้ว่ามู่เล่ที่ใช้มีร่องสำหรับใส่สายพานเพื่อรับการส่งกำลังจากมู่เล่อีกตัวหนึ่งแคว่เองเดียวดังรูปที่ 3.5 และสายพานส่งกำลังบางเส้นที่ใช้ในชุดประกอบนี้เป็นสายพานชนิดร่อง A ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 12 mm ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเล็กกว่าสายพานร่อง B ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 17 mm ดังรูปที่ 3.7 ทำให้พื้นที่รับแรงที่ใช้กำลังน้อยลงส่งผลให้ความสามารถในการส่งกำลังงานทางกลเสียไปด้วย ซึ่งในขณะที่ระบบส่งกำลังทำงานในช่วงของการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กจากเคลื่อนที่ลงเป็นเคลื่อนที่ขึ้น พบว่าเกิดการรูดของชุดสายพานทั้งชุด เนื่องจากความเสียดทานของสายพานกับร่องมู่เล่มีค่าน้อยกว่าแรงบิดจากมอเตอร์ที่กระทำกับชุดประกอบในขณะที่เปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุน



รูปที่ 3.5 มู่เล่แบบร่องเดี่ยว



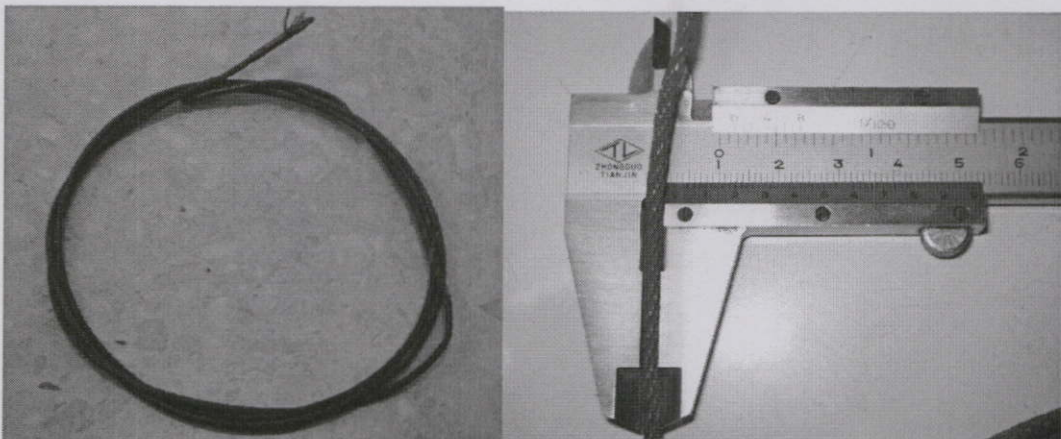
รูปที่ 3.6 สายพานชนิดร่อง A ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 12 mm



รูปที่ 3.7 สายพานชนิดร่อง B ที่มีหน้าตัดของสายพานกว้าง 17 mm

#### 3.1.1.4 สายสลิงมีขนาดเล็กเกินไป

ในการส่งกำลังงานจากชุดทดรอบไปยังชุดเกียร์แม่เหล็กเพื่อให้ขับเคลื่อนให้ชุดเกียร์แม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้นและลง ในระบบเดิมได้ใช้สายสลิงแบบค้ำชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.08 mm สามารถรับแรงดึงได้ไม่เกิน 58 นิวตันดังรูปที่ 3.8 เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าสายสลิงดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กเกินไป อีกทั้งการเชื่อมต่อสายสลิงเข้ากับชุดเกียร์แม่เหล็กไม่เป็นไปตามมาตรฐาน DIN ที่กำหนดเอาไว้ทั้งหมด ซึ่งในระบบเดิมการเชื่อมต่อลวดสลิงเข้าเพลลาของส่วนบนของชุดเกียร์แม่เหล็กไม่ได้ทำการต่อผ่านห่วง โค้งหรือขอยกน้ำหนัก แต่ทำการคล้องลวดสลิงเข้ากับเพลลาโดยตรงจากการวิเคราะห์การทำงานดังกล่าวพบว่าการเชื่อมต่อโดยตรงจะทำให้ลวดสลิงเสียดสีกับเพลลาทำให้เกิดการสึกหลอที่บริเวณดังกล่าวมากกว่าต่อเข้ากับห่วง โค้งหรือขอยกน้ำหนักก่อนที่ใช้งาน อีกทั้งยังเป็นการยุ่งยากที่จะทำการใส่และถอดสายสลิง

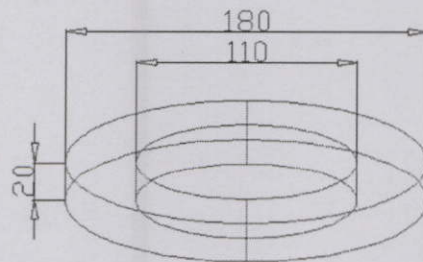
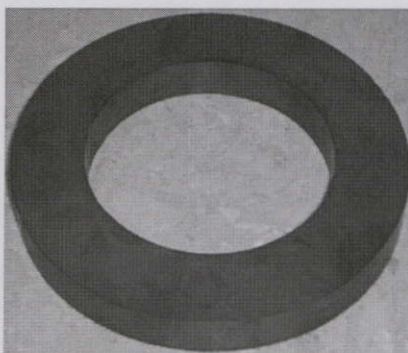


รูปที่ 3.8 สายสลิงแบบค้ำชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.08 mm

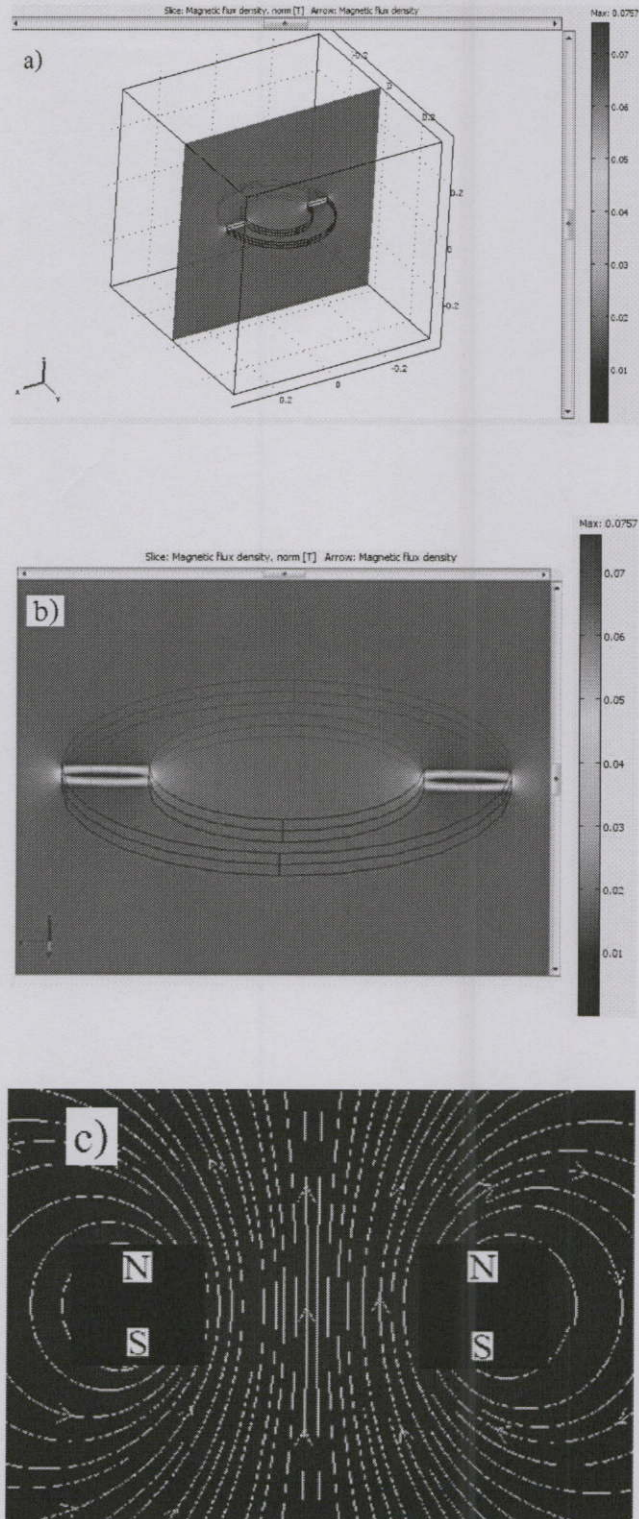
### 3.1.2 ข้อบกพร่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการออกแบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ก็คือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งในการออกแบบจะแบ่งการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้สองส่วน ดังนี้ ส่วนแรกก็คือความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเรียกว่า Remanent force ในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ เช่น สมบัติเชิงแม่เหล็กของสารที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวร ส่วนพลังงานที่ได้จากสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของแม่เหล็กถาวร, รูปทรงของแม่เหล็กถาวร และการจัดวางขั้วแม่เหล็กแต่ละอันเข้าเป็นชุดเกียร์แม่เหล็ก สำหรับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ส่งมาถึงขดลวดเหนี่ยวนำ ในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของช่องว่างระหว่างแม่เหล็กถาวรกับขดลวดเหนี่ยวนำ, วัสดุที่ใช้ในการช่วยรวบรวมเส้นแรงแม่เหล็กและรูปร่างของขั้วเหล็กอ่อนและ สเตเตอร์ รวมถึงลักษณะการจัดวางขดลวดเหนี่ยวนำ

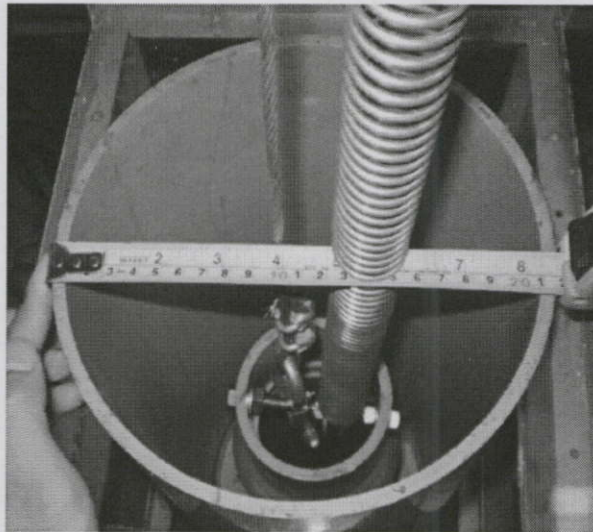
เมื่อทำการวิเคราะห์ชุดเกียร์แม่เหล็กที่ใช้ในระบบแล้วพบว่ารูปทรงของแม่เหล็กถาวร และการจัดวางขั้วแม่เหล็กมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน แต่สารที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรที่ใช้ทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ เนื่องจากสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรเป็นสารแม่เหล็กชนิดแบบเรียบเฟอโรไซชนิดเดียวกับที่ใช้ทำลำโพงขยายเสียงดังรูปที่ 3.9 จึงทำให้ได้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีค่า 0.09 T ซึ่งถือว่ามีความอ่อนขี้างต่ำ ซึ่งมีลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.10 โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กถาวรที่ใช้มีค่าน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ PVC ที่ใช้ทำสเตเตอร์ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชุดเกียร์แม่เหล็กกับขดลวดเหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะส่งผลค่าสนามแม่เหล็กที่ส่งออกมาเกิดการสูญเสียไปก่อนที่จะส่งมาถึงขดลวดเหนี่ยวนำ เพราะวัสดุที่ใช้ทำเป็นสเตเตอร์มีค่า permeability ต่ำเนื่องจากทำจากท่อ PVC ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กไม่มารวมกันที่บริเวณขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ



รูปที่ 3.9 แม่เหล็กถาวรชนิดเฟอโรไซชนิดเดียวกับที่ใช้ทำลำโพงขยายเสียง



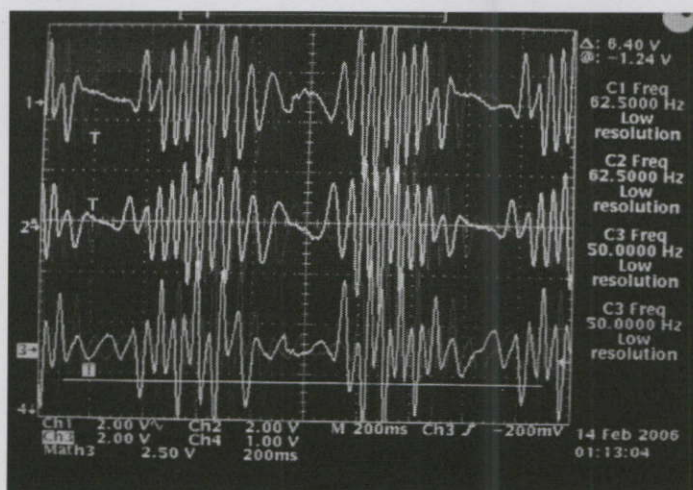
รูปที่ 3.10 a) Isometric การกระจายความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กถาวรที่ใช้ b) ภาพตัดขวางของ การกระจายเข้มฟลักซ์แม่เหล็กถาวรที่ใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้ c) เส้นแรงแม่เหล็ก ถาวรชนิดเฟอไรซ์ชนิดเดียวกับที่ใช้ทำลำโพง



รูปที่ 3.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ PVC ที่ใช้ทำสแตเตอร์ขนาด 208 มิลลิเมตร

### 3.1.3 ข้อบกพร่องจากรูปสัญญาณที่ได้

ต้นแบบของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ได้ทำการออกแบบและสร้างไว้เดิม เป็นการเอาระบบเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้นแบบสามเฟสซินโครนัสมาประยุกต์ใช้ ซึ่งเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้นที่จำลองขึ้นมานี้มีค่า  $q$  แพลกเตอร์เท่ากับ  $3/2$  เมื่อทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า โดยให้ชุดเกียร์แม่เหล็กมีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 0.8 m ที่คาบเวลา 700 ms พบว่ารูปสัญญาณที่ได้ของแต่ละเฟสเป็นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟของแรงดันกับเวลาจากทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า โดยกำหนดให้ชุดเกียร์แม่เหล็กมีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 0.8 เมตร คาบของสัญญาณมีค่า 700 mm

จากรูปที่ 3.12 จะพบว่ารูปสัญญาณของแต่ละเฟสในหนึ่งรอบการเคลื่อนที่จะมีค่าแอมพลิจูดที่ไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบชุดเกียร์แม่เหล็ก และการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กแบบมีความเร่ง ซึ่งในสภาวะจริงคลื่นที่เข้ามาจะมีความไม่แน่นอนของความสูงและคาบเวลามากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในการนำพลังงานไปใช้

### 3.2 ออกแบบและสร้างกลไกการทำงานเชิงกลเพื่อจำลองคลื่นน้ำ

#### 3.2.1 กำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนกล่องเฟืองแม่เหล็ก

กำลังงานในการใช้ยกกล่องเฟืองแม่เหล็กนั้นถือได้ว่าเป็นกำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) ซึ่งจะคิดค่าเฉลี่ยจากอัตราการเปลี่ยนของความเร็วในการเคลื่อนที่ของกล่องเฟืองแม่เหล็กเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแต่ละคาบ โดยที่ในการทดลองนี้จะทำการควบคุมอัตราการเปลี่ยนของความเร็วในการเคลื่อนที่ของกล่องเฟืองแม่เหล็กเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแต่ละคาบ แล้วจึงนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหา กำลังงานขาเข้าของระบบจากสมการที่ (49) ซึ่งมีที่มาดังนี้

$$P_{in} = \frac{W}{t}$$

$$P_{in} = \frac{Fs}{t}$$

$$P_{in} = \frac{mgh}{t} \quad (49)$$

โดยที่

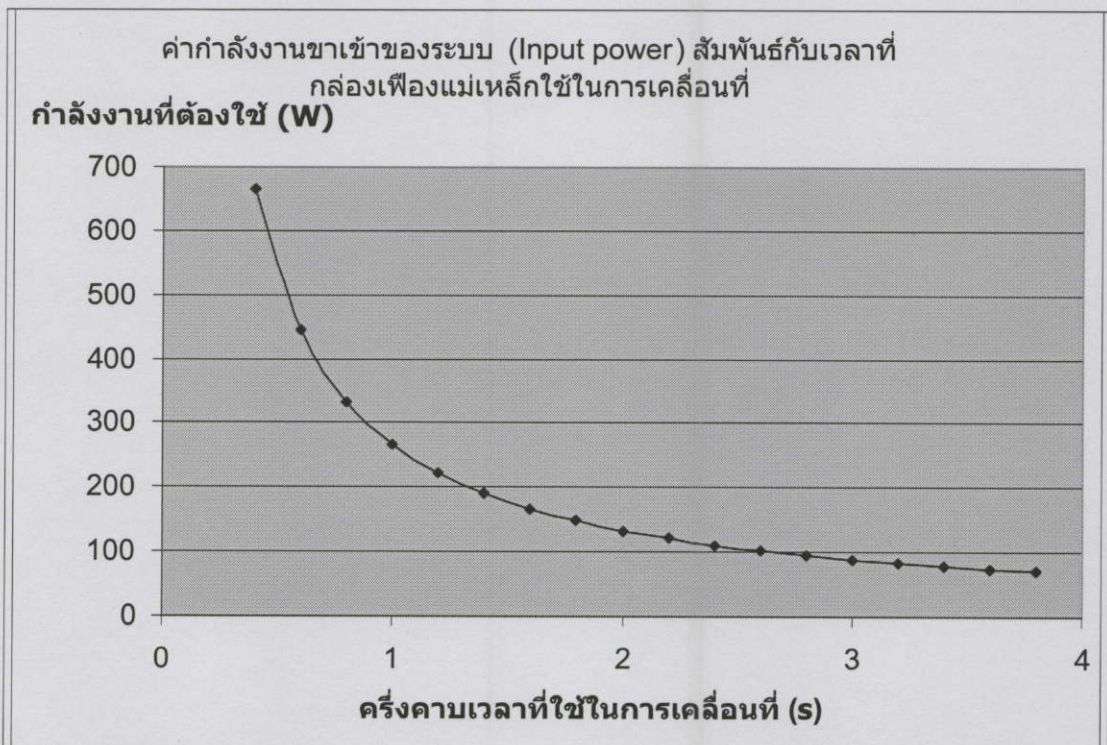
$P_{in}$	คือกำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power)
$W$	คืองานที่ใช้ในการยกกล่องเฟืองแม่เหล็ก
$t$	คือเวลาที่ของกล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่
$F$	คือแรงที่ต้องใช้ยกกล่องเฟืองแม่เหล็ก
$s$	คือระยะทางที่ของกล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่
$m$	คือมวลของกล่องเฟืองแม่เหล็ก
$g$	คือค่านิจแรงโน้มถ่วงโลก
$h$	คือระดับความสูงที่ต้องยกกล่องเฟืองแม่เหล็ก

จากสมการที่ (49) จะพบว่าถ้าต้องการทราบค่า  $P_{in}$  ก็จะต้องแทนค่าต่างๆดังนี้ ค่าน้ำหนักของกล่องเฟืองแม่เหล็ก 43 kg, ระยะในการเคลื่อนที่ 0.62 m ส่วนเวลาที่ใช้การเคลื่อนที่ภายในครั้งหนึ่งของคาบเวลาจะขึ้นอยู่กับผลการทดลอง ซึ่งได้ค่ากำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) สัมพันธ์กับเวลาที่กล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่ดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** ค่ากำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) สัมพันธ์กับเวลาที่กล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่

t (s)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$P_{in}$ (W)	651.83	434.56	325.02	260.73	217.28	186.24	162.96	144.85	130.37

t (s)	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8
$P_{in}$ (W)	118.52	108.64	100.28	93.12	86.91	81.48	76.69	72.42	68.61

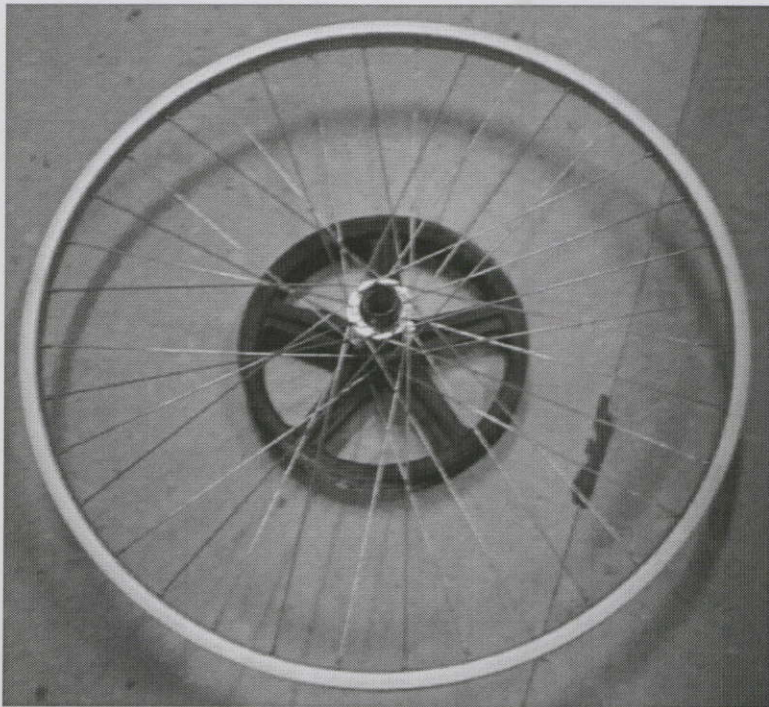


**รูปที่ 3.13** กราฟแสดงค่ากำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) สัมพันธ์กับเวลาที่กล่องเฟืองแม่เหล็กใช้ในการเคลื่อนที่

### 3.2.2 ออกแบบล้อและมุลงที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนกล่องเฟืองแม่เหล็ก

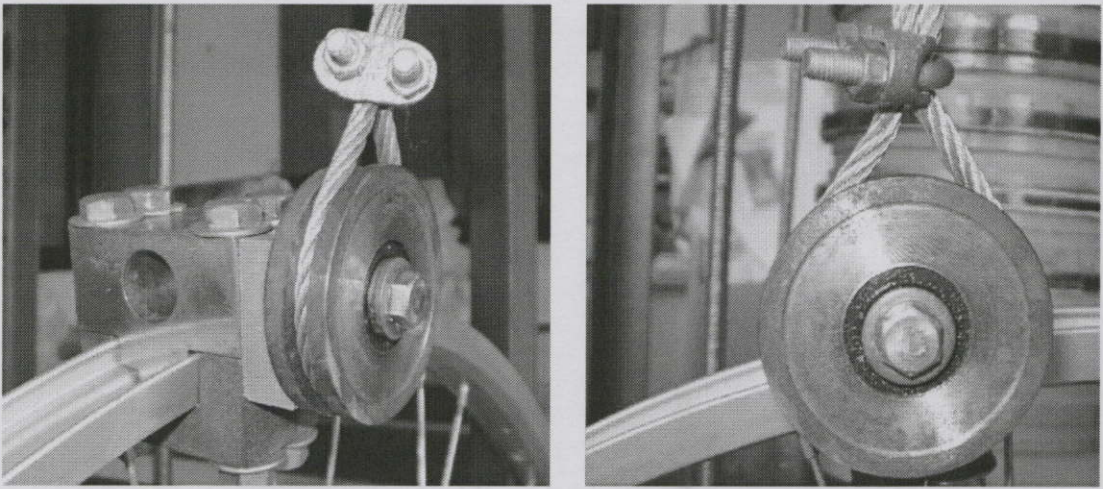
จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อบกพร่องของกลไกการทำงานเชิงกลของระบบชุดทดรอบเดิมที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น พบว่าไม่สามารถนำมาปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วนเพื่อให้สามารถทำการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพได้โดยง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบชุดทดรอบขึ้นมาใหม่ทั้งหมดด้วยการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงและเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งส่วนประกอบและการติดตั้งชุดทดรอบดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มต้นกำหนดระยะการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กให้มีค่า 0.62 m ซึ่งในการกำหนดค่าระยะสูงสุดในการเคลื่อนที่จะกำหนดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อจักรยานที่ใช้ในการขับเคลื่อนชุดเกียร์แม่เหล็กดังรูปที่ 3.14

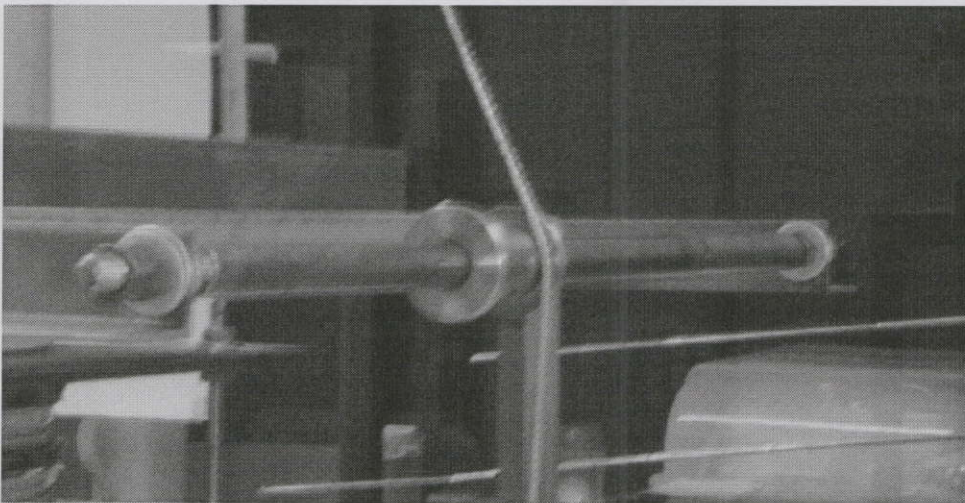


รูปที่ 3.14 วงล้อจักรยานที่ใช้ในการขับเคลื่อนชุดเกียร์แม่เหล็ก

การยึดสายสลิงเข้ากับวงล้อจักรยานดังกล่าวจะใช้การยึดด้วยจิกจับที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อต่อล้อลูกปืนเข้ากับจิกจับล้อจักรยาน และใช้สายสลิงยึดเข้ากับร่องของล้อลูกปืนด้วยก๊ิบล็อกสลิงดังรูปที่ 3.15 จากนั้นทำการพาดสายสลิงเข้ากับรางเลื่อนเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของสายสลิงขณะถูกล้อจักรยานดังรูปที่ 3.16

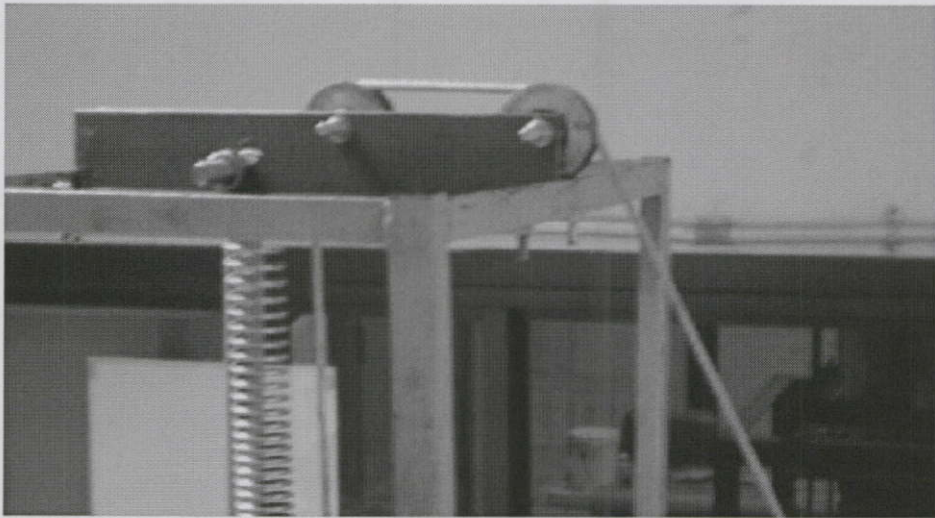


รูปที่ 3.15 จิกจับล้อยจักรยานที่สร้างขึ้นมาเพื่อต่อล้อยูกปีนเข้ากับจิกจับล้อยจักรยาน

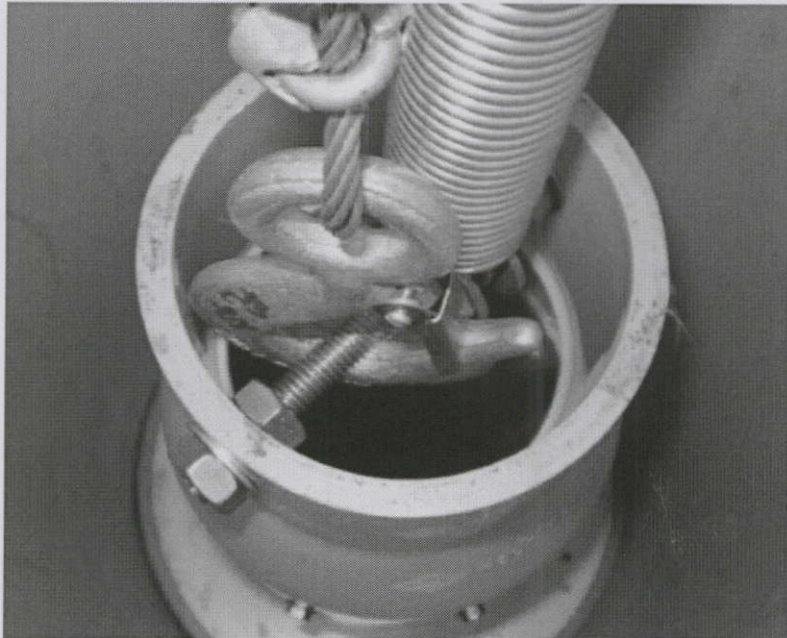


รูปที่ 3.16 รางเลื่อนที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของสายสลิง

สายสลิงจากล้อยจักรยานจะถูก โยงผ่านชุดล้อยที่สร้างขึ้นเดิมเพื่อเปลี่ยนทิศทางของแรงดึงของชุดจับ ดังรูปที่ 3.17 แล้วส่งแรงไปยังตะขอจับที่แขวนชุดเคียร์แม่เหล็กอยู่ผ่านสายสลิงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ชุดล้อสำหรับเปลี่ยนทิศทางของแรงดึงจากสายสลิง



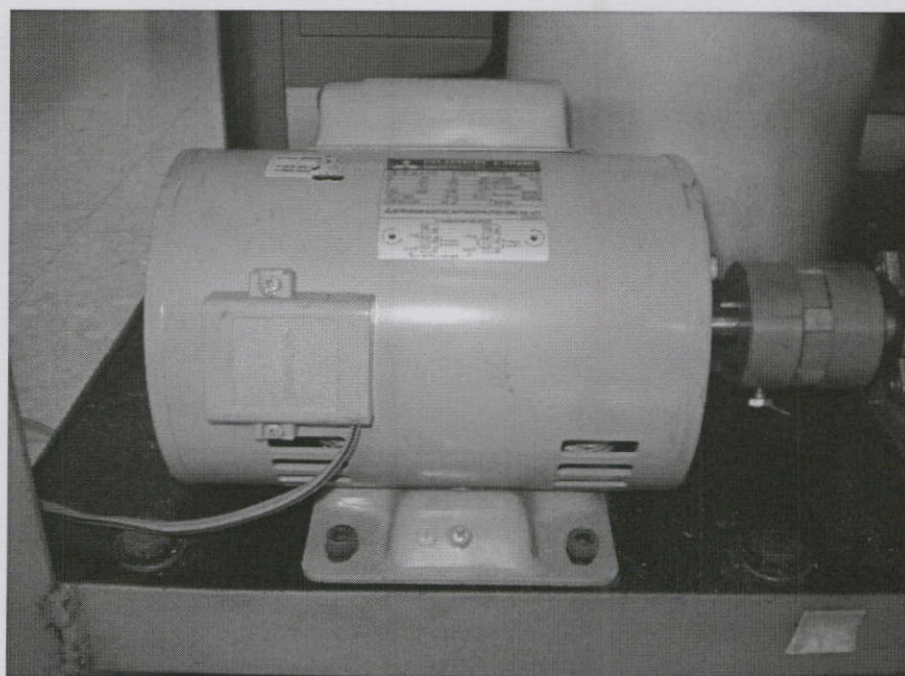
รูปที่ 3.18 ตะขอจับที่ใช้แขวนชุดเกียร์แม่เหล็ก

### 3.1.1 การออกแบบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับกำลังงานที่ต้องใช้

ในการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงเสมือนว่ามีแรงจากคลื่นน้ำมากระทำ ดังนั้นในการออกแบบจะต้องพิจารณาจากกำลังงานกลที่ต้องใช้ในการขับชุดเกียร์แม่เหล็กให้ขึ้นและลง ตามระยะและเวลาที่ต้องการจำลอง ใน

การจำลองการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กแทนคลื่นน้ำได้กำหนดให้มีระยะเคลื่อนที่เป็น 0.62 m และมีคาบเวลาของการเคลื่อนที่ประมาณ 5 วินาที ซึ่งการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานจะมีการวิเคราะห์และออกแบบดังนี้

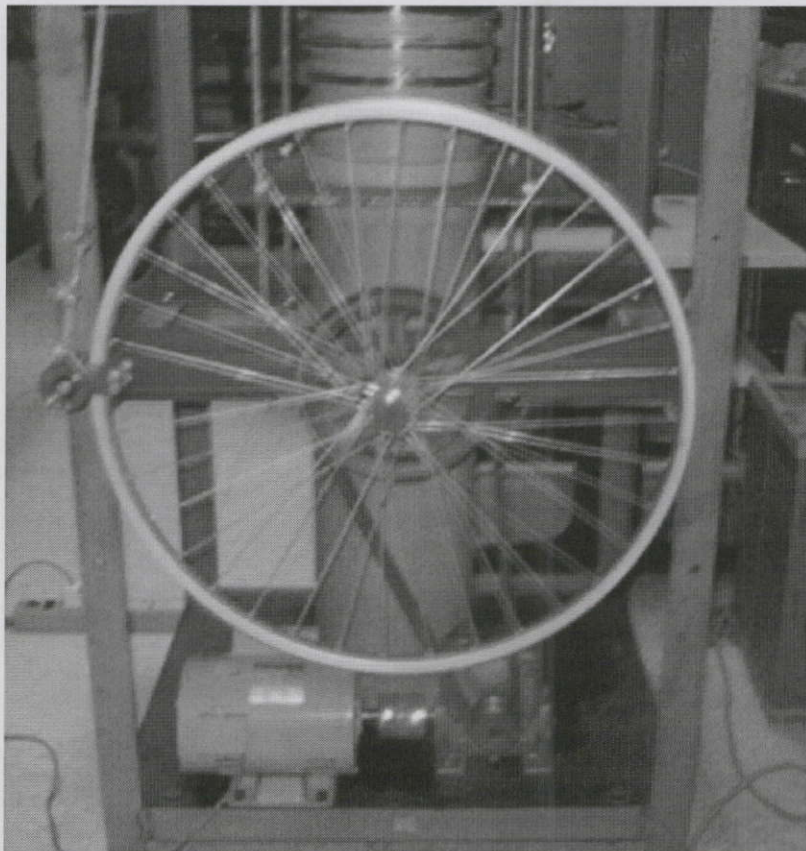
จากการวิเคราะห์กำลังงานในการขับเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก จะพบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าจะทำงานหนักที่สุดในจังหวะที่ชุดเกียร์แม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้นจากจุดต่ำสุด ซึ่งจากตารางที่ 3.1 จะพบว่าการเคลื่อนที่ขึ้นของชุดเกียร์แม่เหล็กในช่วงครึ่งคาบขาขึ้นจากจุดต่ำจนถึงจุดสูงสุดจะใช้เวลาประมาณ 2.6 s จะต้องใช้กำลังงาน 100.28 W ไม่คิดรวมกำลังงานที่ต้องสูญเสียจากแรงเสียดทาน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ อาทิ แรงเสียดทานที่เกิดจากอุปกรณ์ทางกล แรงดึงดูดระหว่างชุดเกียร์ แม่เหล็กกับขั้วเหล็กอ่อน เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบจึงมีการเผื่อค่าความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมที่กำหนดตามมาตรฐานของกำลังงานของแหล่งกำเนิดให้ไม่ควรต่ำกว่า 2.5 เท่าของกำลังงานที่ต้องใช้จริง ในกรณีนี้ค่ากำลังงานที่มอเตอร์สามารถทำงานให้ได้จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 256.35 W ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสี่ขั้วที่สามารถจ่ายกำลังงานกลได้ 373 W หรือขนาด 1/2 แรงม้า ความเร็วรอบของการหมุน 1430 รอบต่อนาที ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220 V ด้วยความถี่ 50 Hz ใช้กระแสไฟฟ้า 4.3 A ดังรูปที่ 3.19 ส่วนค่ากำลังงานกลที่เกินมาจากค่ากำลังงานกลต่ำสุดที่ต้องการจะไปชดเชยกับการสูญเสียกำลังงานกลเนื่องจากปัจจัยต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว



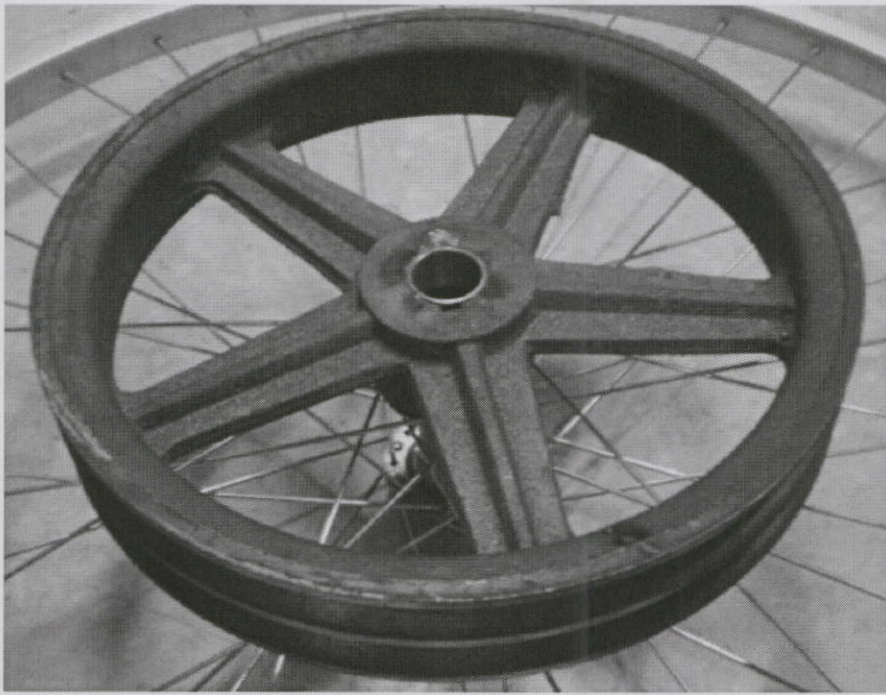
รูปที่ 3.19 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1/2 Hp ที่ใช้ในการออกแบบ

### 3.1.2 การออกแบบเกียร์ทดรอบที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับล้อและมู่เล่ที่ใช้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โครงล้อจักรยานเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 24 นิ้ว หรือประมาณ 62 cm ดังรูปที่ 3.20 มาเป็นตัวขับเคลื่อน Electromagnetic Gearbox ที่มีน้ำหนัก 43 kg ซึ่งถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงแบบซิมเปิลฮามอนิกส์ที่มีคาบเวลาในการเคลื่อนที่อยู่ที่ประมาณ 2.6 s ซึ่งการขับเคลื่อน Electromagnetic Gearbox นี้จะใช้ลวดสลิงในการส่งผ่านกำลังงาน โดยที่ล้อจักรยานจะถูกเชื่อมติดกับมู่เล่เหล็กหล่อสำหรับใช้กับสายพานร่อง B แบบร่องสายพานคู่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ดังรูปที่ 3.21 ในการขับเคลื่อนให้หมุนตามความถี่ที่ต้องการจะใช้สายพานคู่ในการขับเคลื่อนจากมู่เล่เหล็กหล่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่ต่ออยู่กับกล่องเกียร์ทดรอบที่ขับปลิงค์ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 Hp

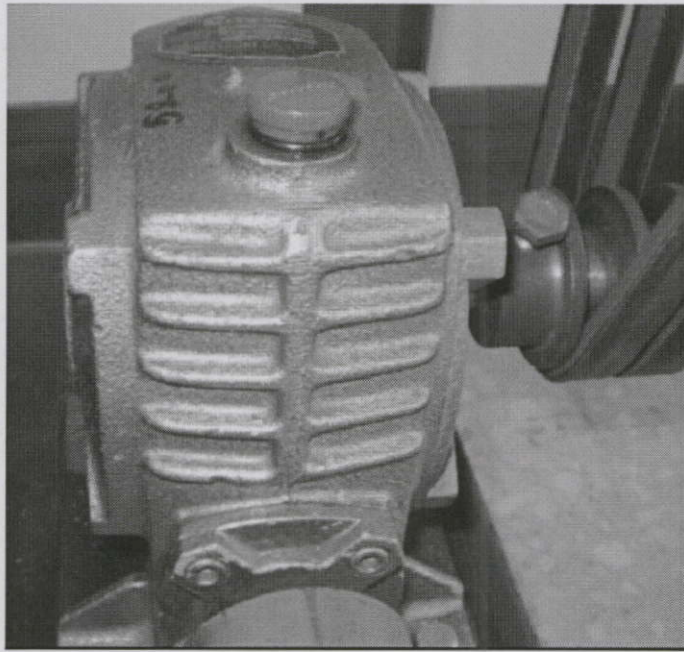


รูปที่ 3.20 โครงล้อจักรยานขนาด 24 นิ้ว หรือประมาณ 62 cm ที่ใช้



**รูปที่ 3.21** มู่เล่เหล็กหล่อสำหรับใช้กับสายพานร่อน B แบบร่อนสายพาน  
คู่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอยู่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบรอบสูงที่มีทั้ง  
ขดลวดทำงานและขดลวดเริ่มต้น ซึ่งมอเตอร์ตัวนี้มีความเร็วรอบอยู่ที่ 1430 รอบต่อนาที เพื่อแก้ปัญหา  
ดังกล่าวจึงได้ใช้กล่องเกียร์ทดรอบที่มีอัตราทด 1 ต่อ 30 แบบสำหรับใช้กับกำลังขับ 0.5 Hp จำนวน 1  
ตัวดังรูปที่ 3.22 มาทำการทดรอบมอเตอร์ และเพื่อให้กล่องเกียร์ทดรอบสามารถขับได้มู่เล่ทดรอบโดย  
ในการทดรอบนี้มีการใช้ชุดทดรอบดังกล่าวเชื่อมต่อกันด้วยสายพานซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบของ  
เพลาส่งกำลังของเกียร์ทดรอบมีค่า 47.67 รอบต่อนาที เมื่อทำการทดรอบแล้วพบว่าชุดทดรอบมี  
ความเร็วเชิงเส้น ณ ขอบวงล้อของจักรยานเป็น 0.248 m/s

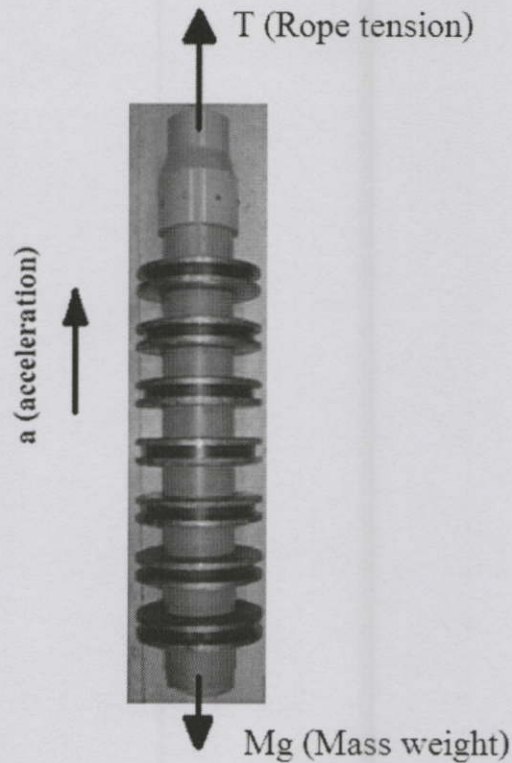


รูปที่ 3.22 ภาพของกล่องเกียร์ที่รอบที่มีอัตราทด 1 ต่อ 30

### 3.1.3 การออกแบบสายสลึงสำหรับส่งกำลังงานให้กับกล่องเฟืองแม่เหล็ก

การออกแบบสายสลึงเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงจะคำนวณขนาดของสายสลึงที่ใช้จากค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสายสลึงขณะที่สายสลึงถูกดึง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติของลวดสลึงควันตามมาตรฐาน DIN 656 และเปรียบเทียบกับสายสลึงที่มีขายอยู่ตามร้านขายอุปกรณ์ก่อสร้าง เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบขนาดสายสลึงจะไม่คิดแรงพุงจากสปริงที่ใส่ลงไปเพื่อช่วยเสริมแรงในการเคลื่อนที่ให้ชุดเกียร์แม่เหล็ก ซึ่งถ้าหากเกิดอุบัติเหตุ เช่น สปริงเกิดการหลุดขณะทดลอง สายสลึงที่ออกแบบไว้จะต้องสามารถทนแรงกระชากจากชุดเกียร์แม่เหล็กได้

เริ่มต้นจะทำการพิจารณาแรงเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับสายสลึงขณะดึงชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่งสูงสุดดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนภาพแสดงทิศทางและตำแหน่งของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

เนื่องจากแรงเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดขณะที่ล้อยับทำการออกแรงดึงชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่งสูงสุด ดังนั้นจากกฎข้อที่สองของนิวตันจะทำให้เราสามารถเขียนสมการผลรวมแรงได้ดังนี้

$$\sum F = ma \quad (50)$$

โดยที่  $\sum F$  คือผลรวมแรงที่เกิดขึ้นกับสายสลิง  
 $m$  คือมวลของชุดเกียร์แม่เหล็ก  
 $a$  คือความเร่งของการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก

เมื่อวิเคราะห์แรงต่างๆที่เกิดขึ้นจะพบว่าสมการที่ (50) จะเป็น

$$T - mg = ma \quad (51)$$

โดยที่  $T$  คือผลรวมแรงที่เกิดขึ้นกับสายสลิง  
 $g$  คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

จากสมการที่ (51) สามารถจัดรูปเพื่อหาแรงดึงสูงสุดในสายสลิง

$$T = m(g + a) \quad (52)$$

แรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อชุดเกียร์แม่เหล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงสุด ซึ่งในรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์จะสามารถหาค่าความเร่งสูงสุดได้จากสมการที่ (53)

$$a_{\max} = A\omega^2 = 4\pi Af^2 \quad (53)$$

โดยที่  $a_{\max}$  คือความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก  
 $A$  คือแอมพลิจูดสูงสุดของการเคลื่อนที่  
 $\omega$  คือความถี่เชิงมุมของการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็ก  
 $f$  คือความถี่ของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์

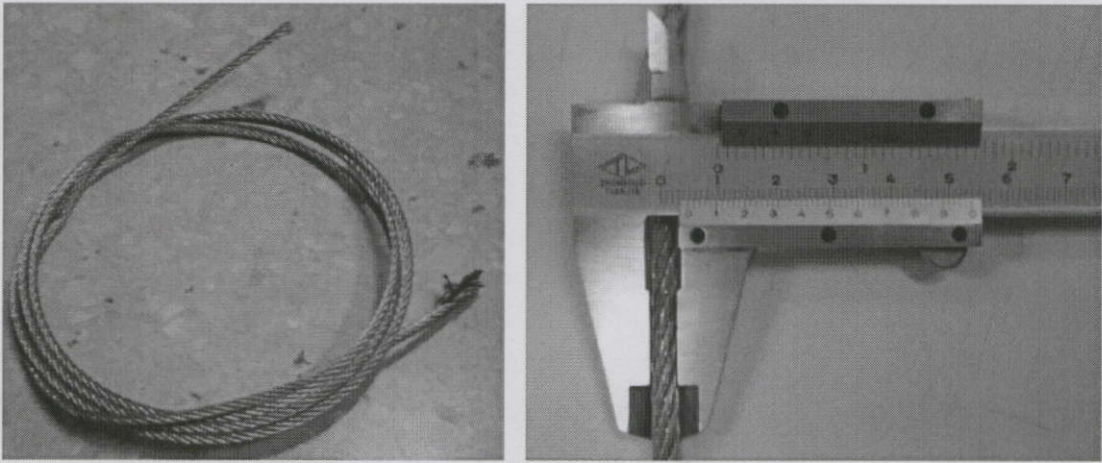
แทนค่า  $a_{\max}$  ลงในสมการที่ (52) จะได้ว่า

$$T = m(g + 4A\pi^2 f^2) \quad (53)$$

เมื่อแทนค่าของตัวแปรต่างๆในสมการที่ (53) ลงไปจะได้ค่าความเร่งดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสายสลิงขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงสุดดังนี้

$$T = 459.46 \text{ N.} \quad (54)$$

เมื่อนำค่าแรงดึงสูงสุดที่คำนวณได้ไปเทียบกับตารางคุณสมบัติของลวดสลิงค้ำวันตามมาตรฐาน DIN 656 และมีขายอยู่ตามร้านขายอุปกรณ์ก่อสร้าง จะพบว่าสายสลิงค้ำวันที่เหมาะสมจะเป็นสายสลิงแบบค้ำวันรวม แบบค้ำวันตามขวางไปทางขวา ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ลวดสลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.8 mm

### 3.1.4 การออกแบบสปริงที่สำหรับช่วยเสริมแรงให้แก่ระบบขับเคลื่อนกล่องเฟืองแม่เหล็ก

การออกแบบระบบยกกล่องเฟืองแม่เหล็กให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการใส่สปริงเข้าไปในระบบเพื่อช่วยเสริมแรงในการดึงให้ชุดเกียร์แม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าหากไม่มีสปริงคอยช่วยดึงชุดเกียร์แม่เหล็กให้เคลื่อนที่ขึ้น ชุดเกียร์แม่เหล็กจะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร่งที่ต่ำกว่าความเร่งขณะเคลื่อนที่ลง ทำให้รูปสัญญาณเอาต์พุตขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงไม่สมมาตรกัน อีกทั้งสปริงก็ยังช่วยลดภาระน้ำหนักโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ซึ่งจะส่งผลให้สามารถทำการทดลองระบบได้ยาวนานยิ่งขึ้น

การออกแบบสปริงช่วยเสริมแรงให้แก่ระบบขับเคลื่อนกล่องเฟืองแม่เหล็กจะคำนึงถึงน้ำหนักและระยะการเคลื่อนที่ของชุดเกียร์แม่เหล็กเป็นหลัก เนื่องจากตัวแปรหลักของสปริงคือค่าคงที่ความแข็งของสปริงหรือ Spring constant ( $k$ ) และความยาวของสปริง ซึ่งในการเลือกค่าความแข็งของสปริงให้เหมาะสมจะสามารถคำนวณได้จากภาวะสูงสุดของระบบยกที่ต้องกระทำในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ (55)

จาก

$$\vec{F} = k\vec{x} \quad (55)$$

$$k = \frac{\vec{F}}{\vec{x}} \quad (56)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  คือแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชุดเกียร์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $459.46 \text{ N}$   
 และ  $\vec{x}$  คือระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของชุดเกียร์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $0.62 \text{ m}$

$$\text{ดังนั้น} \quad k = 741.07 \text{ N/m} \quad (57)$$

จากผลการคำนวณจะพบว่าสปริงที่ใช้แขวนชุดเกียร์แม่เหล็กเพื่อช่วยเสริมแรงให้กับชุดขับจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า  $741.07 \text{ N/m}$  ดังนั้นจึงเลือกใช้สปริงที่ค่าคงที่ของสปริงอยู่ที่  $800 \text{ N/m}$  เนื่องจากเป็นสปริงที่ค่าคงที่ใกล้เคียงกับที่คำนวณเอาไว้และหาซื้อมาใช้ได้ง่าย



รูปที่ 3.25 สปริงที่ค่าคงที่ของสปริง  $800 \text{ N/m}$  ที่ใช้ในการเสริมแรงให้กับชุดขับเกียร์แม่เหล็ก

เมื่อประกอบชิ้นส่วนเชิงกลต่างๆเข้าเป็นระบบเครื่องแบบพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นแล้วพบว่าตัวเครื่องจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เครื่องแบบพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นหลังจากถูกปรับปรุงกลไกเชิงกล

## 3.2 ออกแบบกลไกเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

ส่วนประกอบหลักสำคัญในการทำงานของเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าคือระบบ กลไกการทำงานเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำขดลวดทองแดงด้วยสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้ แม่เหล็กถาวร, ขั้วเหล็กอ่อนขยายสนามแม่เหล็ก, ขดลวดเหนี่ยวนำและขั้วเหล็กอ่อนสำหรับเพิ่มความเข้มของนำสนามแม่เหล็กที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

### 3.2.1 วัสดุที่ใช้สร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

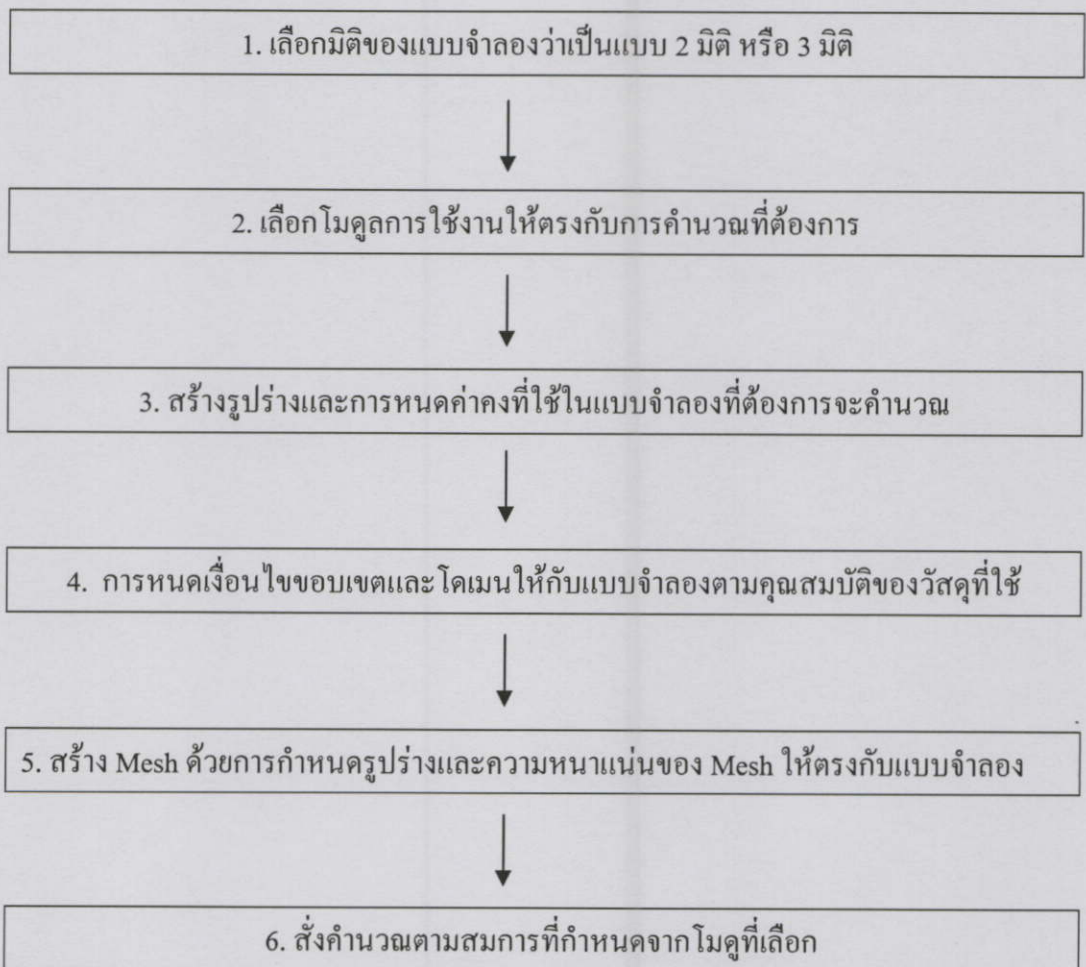
แม่เหล็กถาวรที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแม่เหล็กที่ทำมาจากสารเฟอร์ไรท์ ซึ่งจัดว่าเป็นแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบและสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้นมาเพื่อขยายและเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กสำหรับเหนี่ยวนำสนามเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นการออกแบบขั้วแม่เหล็กจึงต้องคำนึงถึงรูปร่างเชิงเรขาคณิตของขั้วแม่เหล็กและวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างขั้วแม่เหล็ก

ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้นสำหรับขยายสนามและเพิ่มความเข้มแม่เหล็กนั้นจะต้องมีคุณสมบัติทางวัสดุแม่เหล็กที่เหมาะสม โดยวัสดุแม่เหล็กนำมาใช้สร้างขั้วแม่เหล็กจะมีสองส่วนคือ วัสดุที่ใช้สร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อขยายสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดแม่เหล็ก และขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในทิศทางเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่บริเวณสเตเตอร์ วัสดุที่ใช้จะต้องเป็นมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นแม่เหล็กชั่วคราวได้ง่ายเมื่อถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก และมีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กที่สูง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าสามารถเหล็กเพลลาที่มีขายในร้านขายอุปกรณ์ก่อสร้างและอุตสาหกรรมมีความเหมาะสมในการนำมาใช้สร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อขยายสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดแม่เหล็กมากที่สุด ส่วนขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในทิศทางเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำนั้น จะใช้เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสารลวดำหนา 0.8 mm เพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าในการลดการสูญเสียภายในเนื้อเหล็กอ่อนจากกระแสด้านการเหนี่ยวนำกระแสไหลวน (Eddy current)

### 3.2.2 จำลองแบบด้วยโปรแกรม COMSOL MultiPhysics

ในการออกแบบชุดเกียร์แม่เหล็กและสเตเตอร์สำหรับเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นจะให้ความสำคัญกับการออกแบบรูปร่างของขั้วแม่เหล็กเป็นหลัก ในการออกแบบจะใช้โปรแกรม COMSOL Mutiphysics 3.5 ช่วยในการออกแบบ เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายเกี่ยวกับการคำนวณทางฟิสิกส์ที่หลากหลาย และมีโมดูลเฉพาะงานจำลองที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กโดยตรง

โปรแกรม COMSOL Mutiphysics 3.5 เป็นโปรแกรมที่ใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งจะคำนวณตามรูปร่างของอิเลเมนต์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น หลักการทำงานโดยย่อของของโปรแกรมนี้ลำดับกระบวนการดังนี้



การจำลองแบบเพื่อศึกษาโพรไฟล์ของสนามแม่เหล็กแบบสถิตจากแม่เหล็กถาวรจะแยกใช้สมการในการคำนวณตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุต่างๆดังนี้

อากาศและลวดทองแดง

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \bar{A}) = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \bar{e}_z \quad [26] \quad (58)$$

ขั้วเหล็กอ่อน

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times \bar{H} = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \bar{e}_z \quad [26] \quad (59)$$

แม่เหล็กถาวรชนิดเฟอร์ไรต์

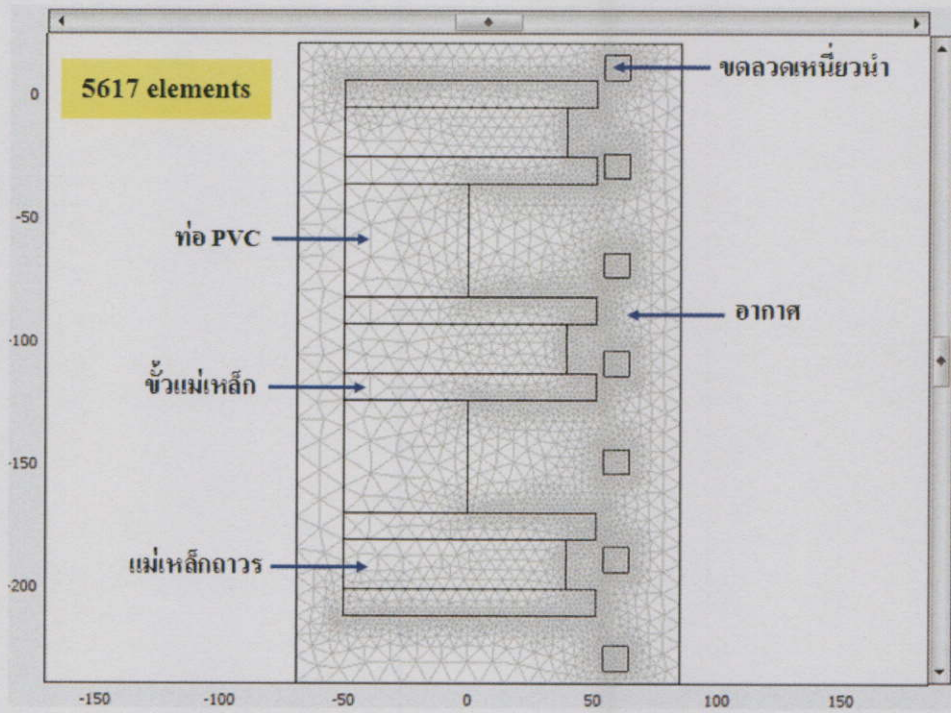
$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} (\nabla \times \bar{A} - \bar{B}_r)) = \left( \sigma \frac{\Delta V}{L} + J_z^e \right) \bar{e}_z \quad [26] \quad (60)$$

โดยที่

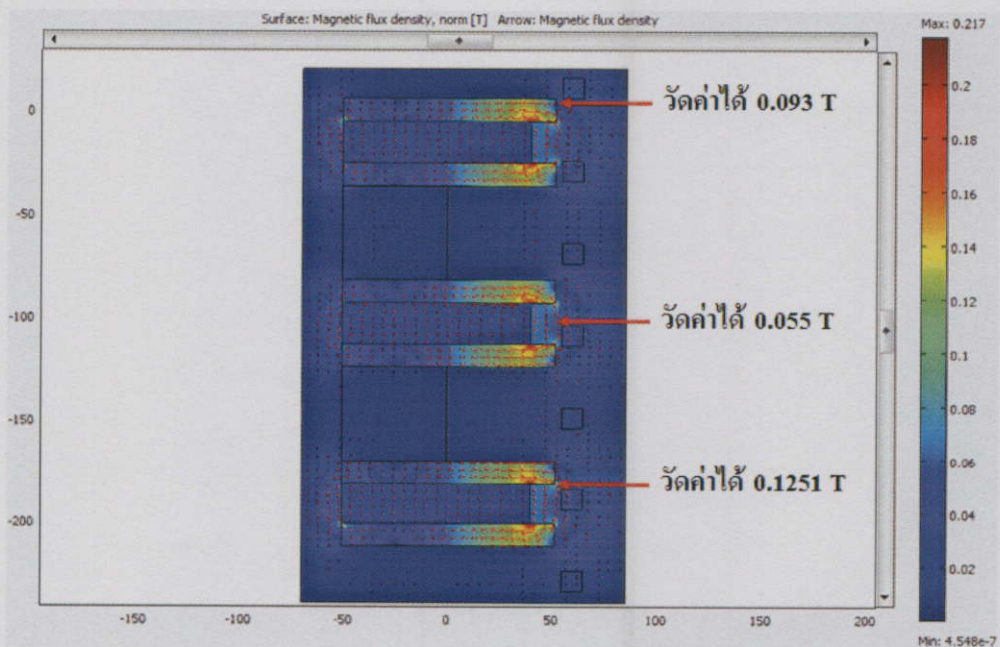
$\sigma$	คือค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ
$\bar{A}$	คือเวกเตอร์ศักย์ของแม่เหล็ก
$\bar{H}$	คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก
$\bar{B}_r$	คือค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกค้าง
$t$	คือเวลา
$\mu_0$	คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ
$\mu_r$	คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ในวัสดุ
$V$	คือความต่างศักย์ไฟฟ้า
$L$	คือค่าความยาวในแนวแกน Z ของแบบจำลอง
$J_z^e$	คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่กึ่งกลางตามแกนของ Loop ของแบบจำลองในแนวแกน Z ของแบบจำลอง
และ $\bar{e}_z$	คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่กึ่งกลางตามแกนของ Loop ในแนวแกน Z ของแบบจำลอง

ในเบื้องต้นจะใช้โปรแกรม COMSOL ในการจำลองแบบของชุดเกียร์แม่เหล็กขณะที่ยังไม่มีการปรับแต่งขั้วแม่เหล็ก และไม่ใส่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ (ขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์) เพื่อศึกษาดันแบบที่ได้เคยสร้างขึ้นก่อนที่จะทำการพัฒนาส่วนประกอบต่างๆเข้าไป แต่เดิมตัวสเตเตอร์ที่ขดลวดเหนี่ยวนำพันอยู่ทำจากท่อ PVC ซึ่งในทางคำนวณจะใช้ค่าคุณสมบัติทางวัสดุแม่เหล็กของอากาศมาคำนวณแทน เนื่องค่าพารามิเตอร์ต่างๆใกล้เคียงกัน

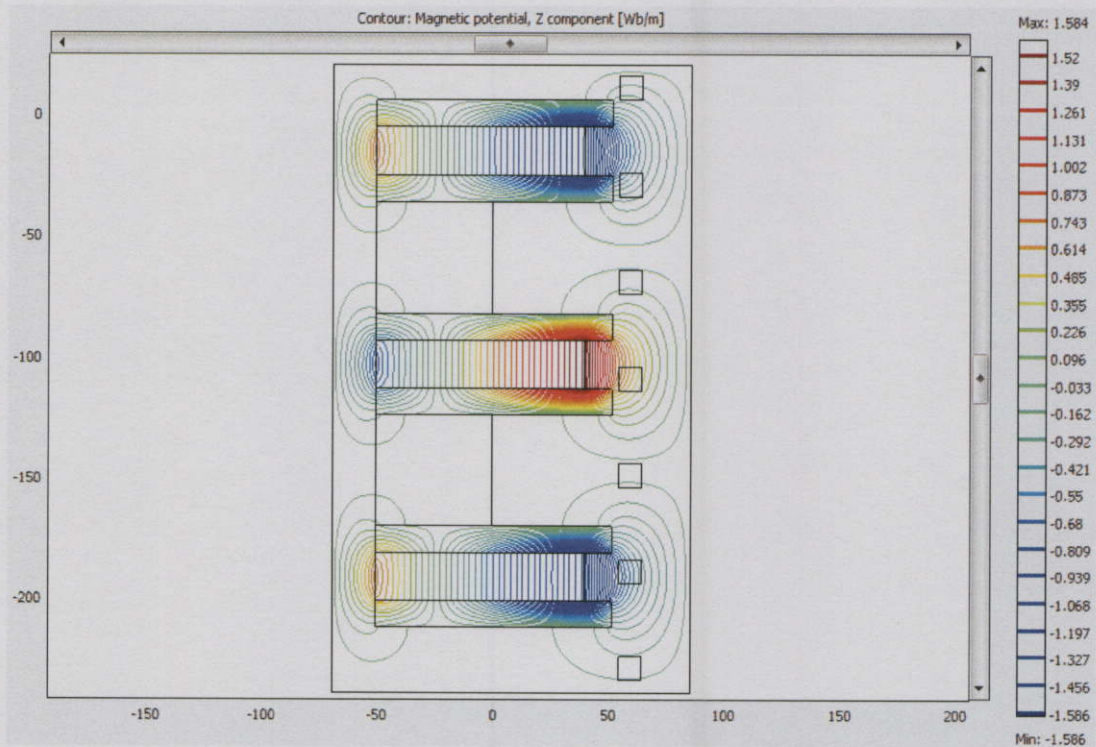
แบบจำลองของต้นแบบเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ได้เคยสร้างขึ้นก่อนที่จะทำการพัฒนาที่ได้จำลองไว้นั้น จะถูกแบ่งเอลิเมนต์เป็น Mesh รูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.27 และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม COMSOL ดังรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.27 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วยมิลลิเมตร



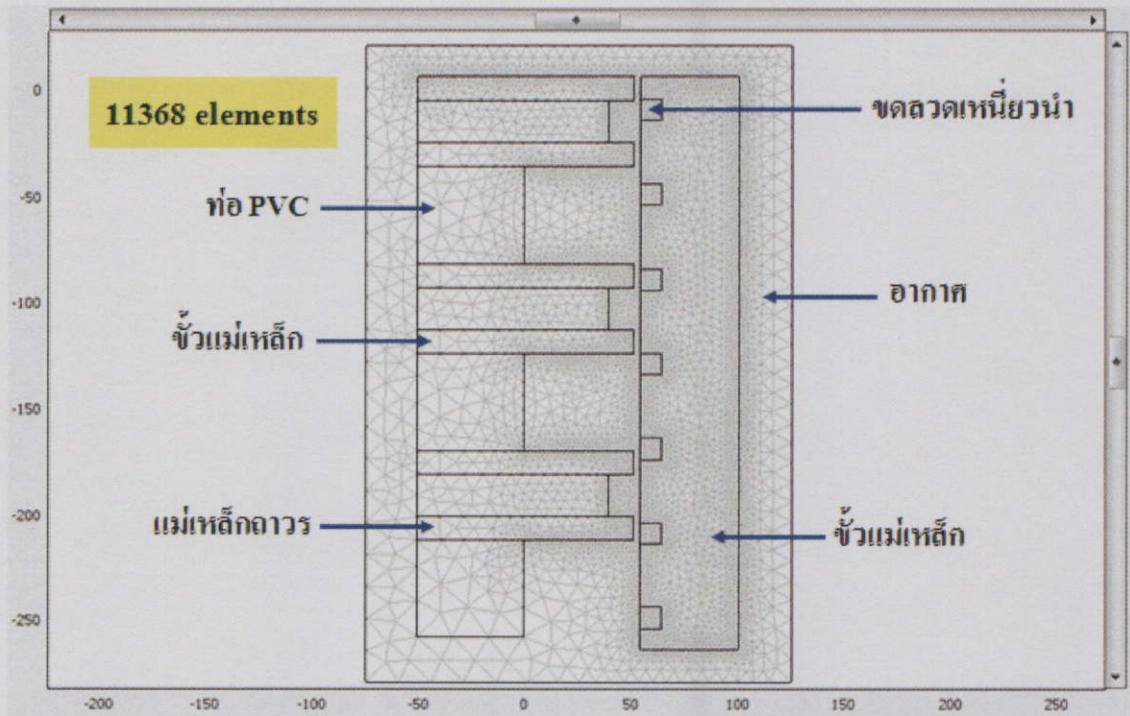
รูปที่ 3.28 ภาพ Surface plot และ Arrow plot ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก



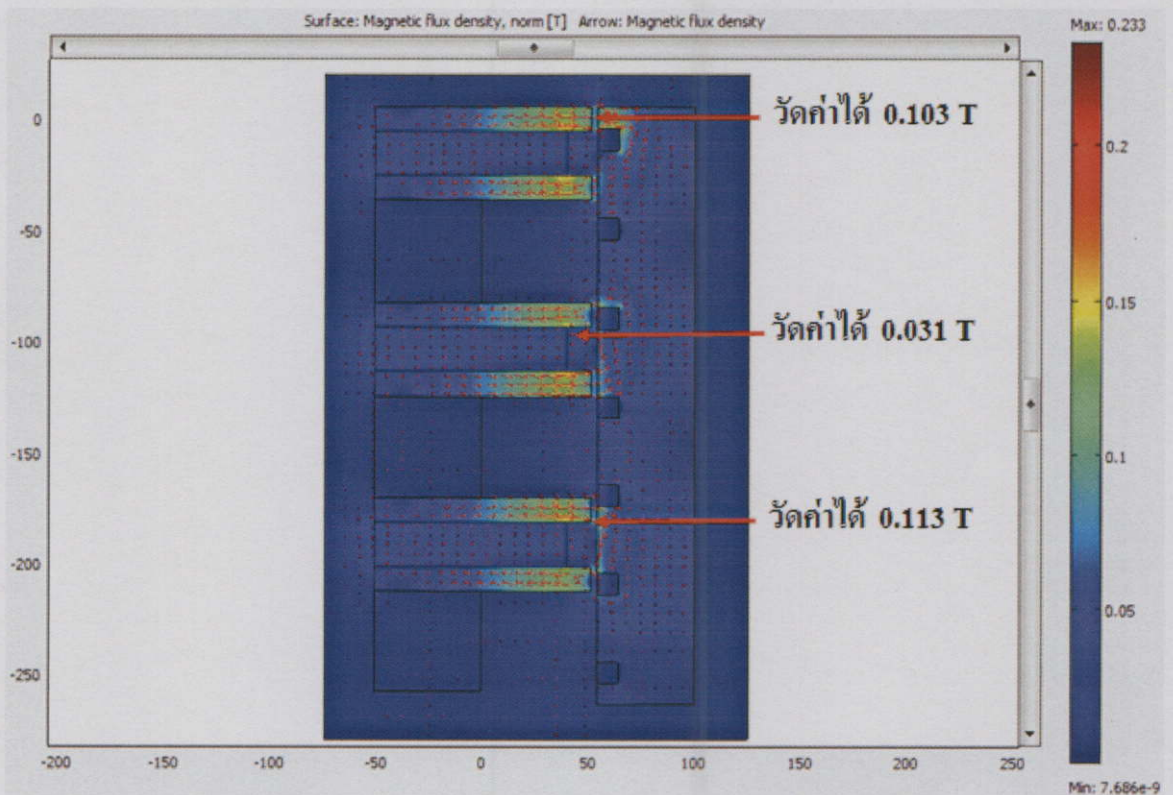
รูปที่ 3.29 ภาพ Contour plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.28 ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กจะกระจายอยู่รอบๆชุดเกียร์แม่เหล็ก, ช่องว่างระหว่างชุดเกียร์แม่เหล็กกับขดลวดเหนี่ยวนำ และรอบๆขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนรูปที่ 3.29 แสดงถึงการแจกแจงศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองของต้นแบบเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ได้เคยสร้างขึ้นก่อนที่จะทำการพัฒนา

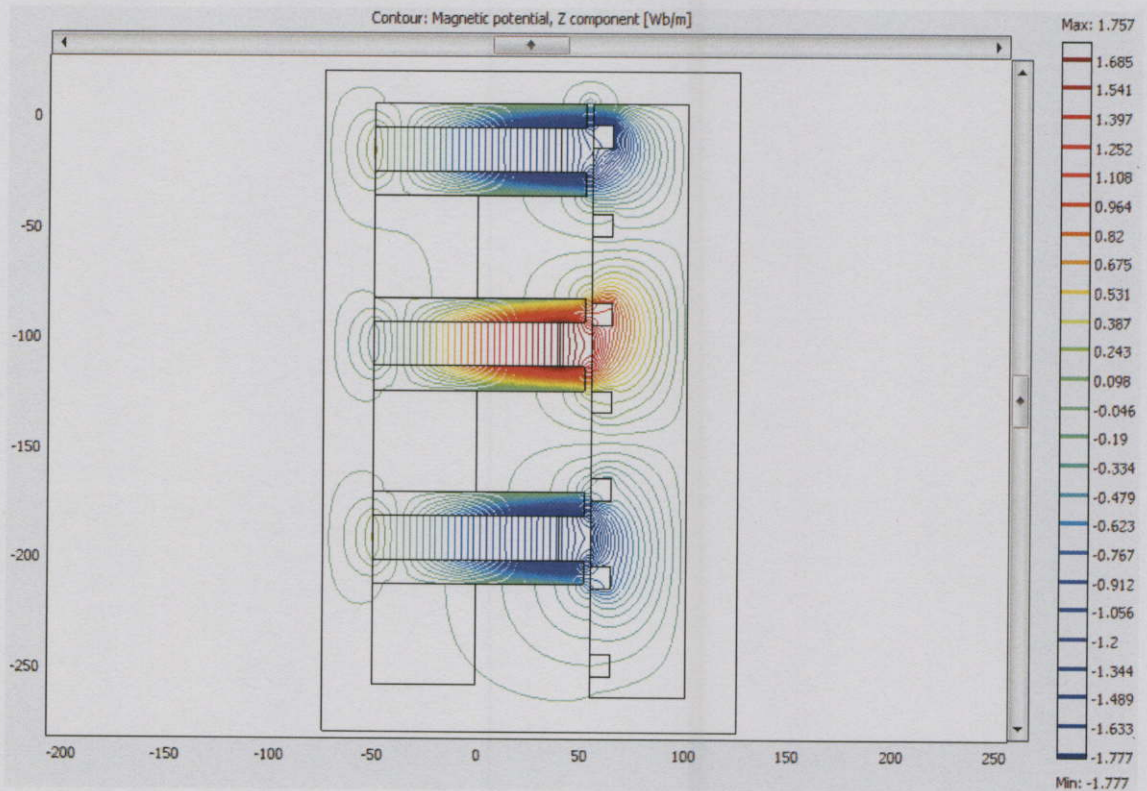
การจำลองเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ใส่ขั้วแม่เหล็กอ่อนสำหรับเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางมารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำได้แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม COMSOL ดังรูปที่ 3.30 ถึงรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.30 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วยมิลลิเมตร



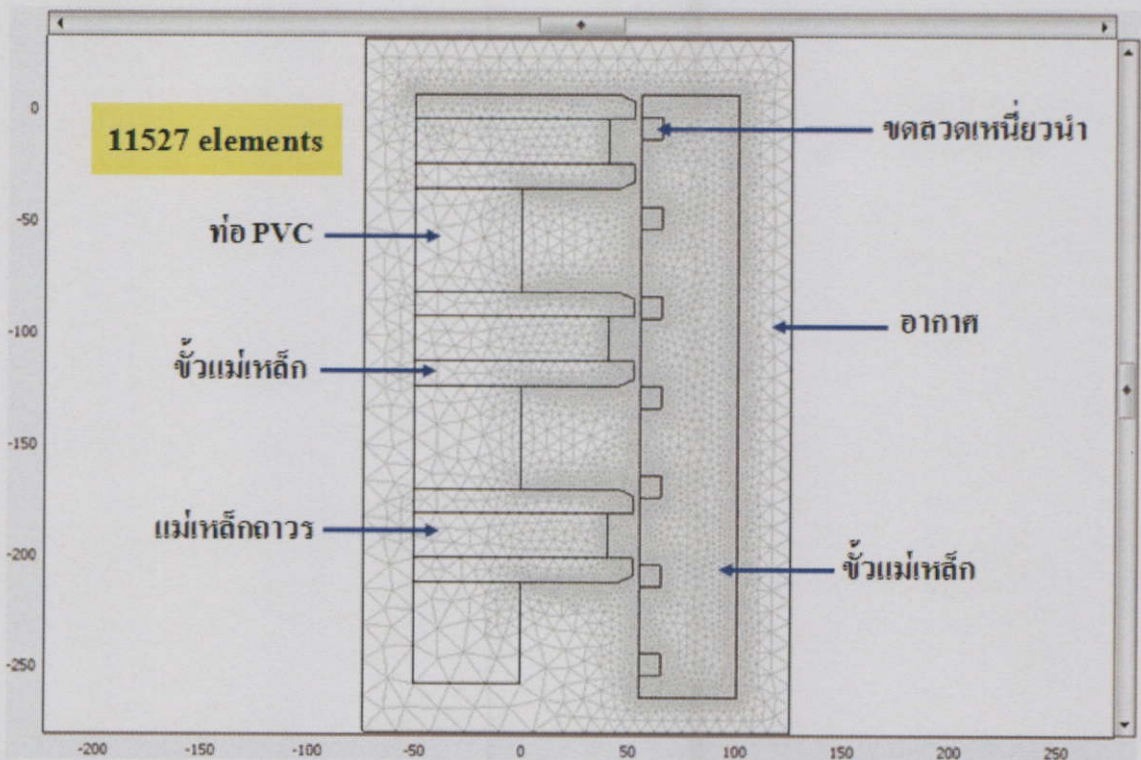
รูปที่ 3.31 ภาพ Surface plot และ Arrow plot ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก



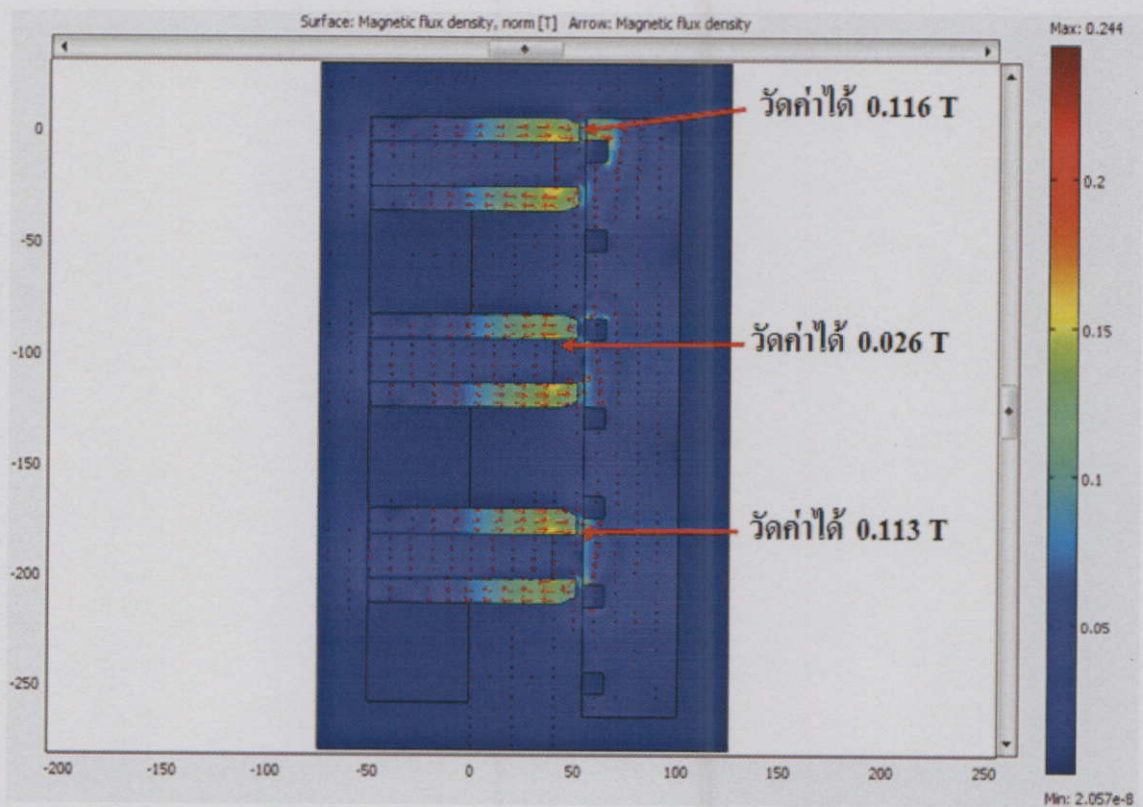
รูปที่ 3.32 ภาพ Contour plot และ Arrow plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.30 ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กจะกระจายอยู่รอบๆชุดเกียร์แม่เหล็ก และรอบๆขดลวดเหนี่ยวนำมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้จากค่าของฟลักซ์แม่เหล็กที่แสดงด้วยสเกลแถบสี ส่วนรูปที่ 3.31 แสดงถึงการแจกแจงศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ใส่ขั้วแม่เหล็กอ่อนสำหรับเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางมารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำพบว่าศักย์แม่เหล็กมีความหนาแน่นมากขึ้นที่บริเวณขั้วแม่เหล็กอ่อนที่มีขดลวดเหนี่ยวนำติดตั้งอยู่

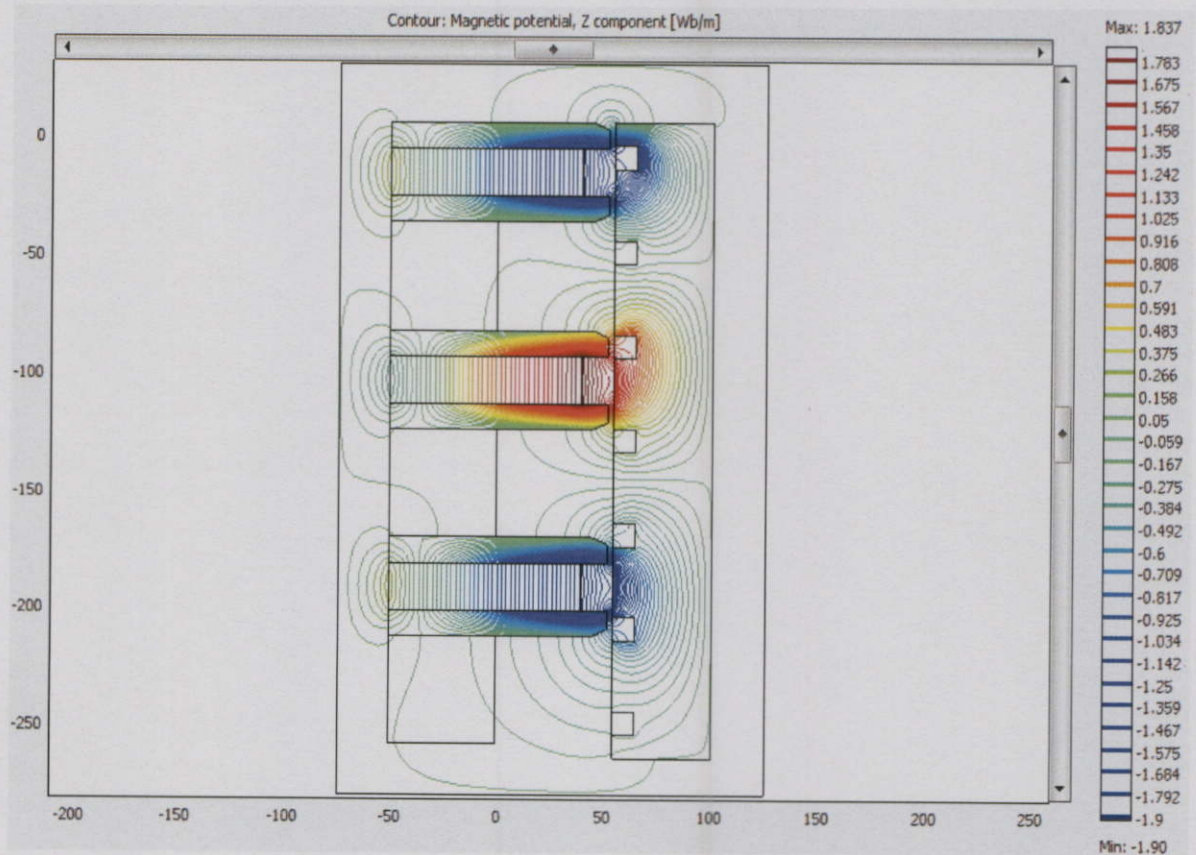
การจำลองเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ใส่ขั้วแม่เหล็กอ่อนสำหรับเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางมารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ และปรับรูปทรงของขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โดระขั้วแม่เหล็ก ได้แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม COMSOL ดังรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.33 การแบ่ง Element รูปสามเหลี่ยมสำหรับการจำลองแบบในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.34 ภาพ Surface plot และ Arrow plot Contour ของค่าความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก

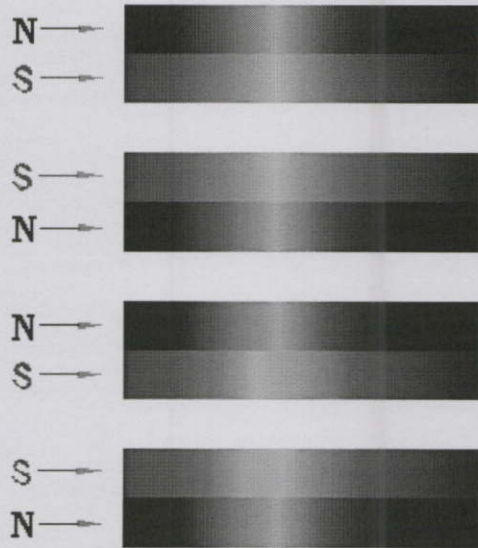


รูปที่ 3.35 ภาพ Contour plot และ Arrow plot ของศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.34 ความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กจะกระจายอยู่รอบๆขดลวดเหนี่ยวนำมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้จากค่าของฟลักซ์แม่เหล็กที่แสดงด้วยสเกลแถบสี ส่วนรูปที่ 3.35 แสดงถึงการแจกแจงศักย์แม่เหล็กในแนวแกน Z ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ใส่ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางมารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำพบว่าศักย์แม่เหล็กมีความหนาแน่นมากขึ้นที่บริเวณขั้วแม่เหล็กที่มีขดลวดเหนี่ยวนำติดตั้งอยู่มากขึ้น

### 3.2.3 ออกแบบขั้วแม่เหล็กเพื่อรวบรวมสนามแม่เหล็กให้กับขุกเกียร์แม่เหล็ก

ในการจัดเรียงแม่เหล็กถาวรเพื่อประเข้าเป็นขุกเกียร์แม่เหล็กจะมีการจัดเรียงแม่เหล็กถาวรแบบสลับขั้วกัน โดยจะหันด้านที่มีขั้วเหมือนกันเข้าหากันเพื่อเพิ่มความสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า Transient ของฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งเข้าหาขดลวดมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 3.36



**รูปที่ 3.36** รูปของการจัดวางขั้วของแม่เหล็กถาวรของกล่องเฟืองแม่เหล็กไฟฟ้า  
หรือ Electromagnetic gearbox

การออกแบบขั้วแม่เหล็กนั้นมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการบังคับสนามให้สามารถไปตัดกันที่ขดลวดพอดีเนื่องจากระหว่างขดลวดที่พันอยู่กับท่อ PVC จากขนาดของแม่เหล็กถาวรที่มีอยู่นั้นพบว่าเหมาะสมกับท่อพีวีซีขนาด 10 นิ้ว (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีค่า 216 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีค่า 204 mm) แต่เนื่องจากแม่เหล็กถาวรที่มีอยู่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 180 mm ทำให้เหลือช่องว่างระหว่างขดลวดกับแม่เหล็กถาวรมาก เพื่อลดช่องว่างดังกล่าวจึงมีการสร้างขั้วเหล็กอ่อนขยายสนามแม่เหล็กและทำการสร้างมุมของขั้วแม่เหล็กเพื่อบังคับสนามแม่เหล็กให้ไปตัดที่ขดลวดเหนียวนำได้พอดี

การคำนวณมุมของขั้วแม่เหล็กเพื่อบังคับสนามแม่เหล็กให้ไปตัดที่ขดลวดเหนียวนำได้พอดีจะใช้ทฤษฎีของสนามแม่เหล็กที่กล่าวว่า “สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก”<sup>[21]</sup> และ “สนามแม่เหล็กจะมีความเข้มของสนามมากที่สุดบริเวณมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด”<sup>[21]</sup> ดังนั้นการออกแบบจึงต้องออกแบบให้ขั้วแม่เหล็กบริเวณที่ต้องการให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งออกมามีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าบริเวณอื่นทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งเข้าหากันที่ขดลวดเหนียวนำ (สีส้ม) ดังรูปที่ 3.37 ที่พันอยู่รอบแกนสเตเตอร์ที่ทำจากท่อ PVC (สีฟ้า) ซึ่งเป็นบริเวณที่ต้องการให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันตามการจัดเรียงขั้วในรูปที่ 3.36 การทำให้บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุดจะทำให้เกิดมุมของขั้วแม่เหล็กขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นสีแดงเข้มในรูปที่ 3.37 จากรูปจะพบว่าขดลวดทองแดงหนา 10 mm ส่วนท่อ PVC มีส่วนที่บางที่สุดอยู่ที่ 2 mm และช่องว่างอากาศ 1 mm จากระยะดังกล่าวเมื่อรวมกับระยะครึ่งของขดลวดเหนียวนำและครึ่งหนึ่งความลาดเอียงของขั้วแม่เหล็กในแนวราบจะ

พบว่าฐานของสามเหลี่ยม (สีน้ำเงิน) มีค่าเท่ากับ 11.13 mm ส่วนในแนวดิ่งจะหาได้จากการรวมกันของครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างขั้วเหล็กอ่อนกับครึ่งหนึ่งของระยะขั้วแม่เหล็กในแนวดิ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.48 mm

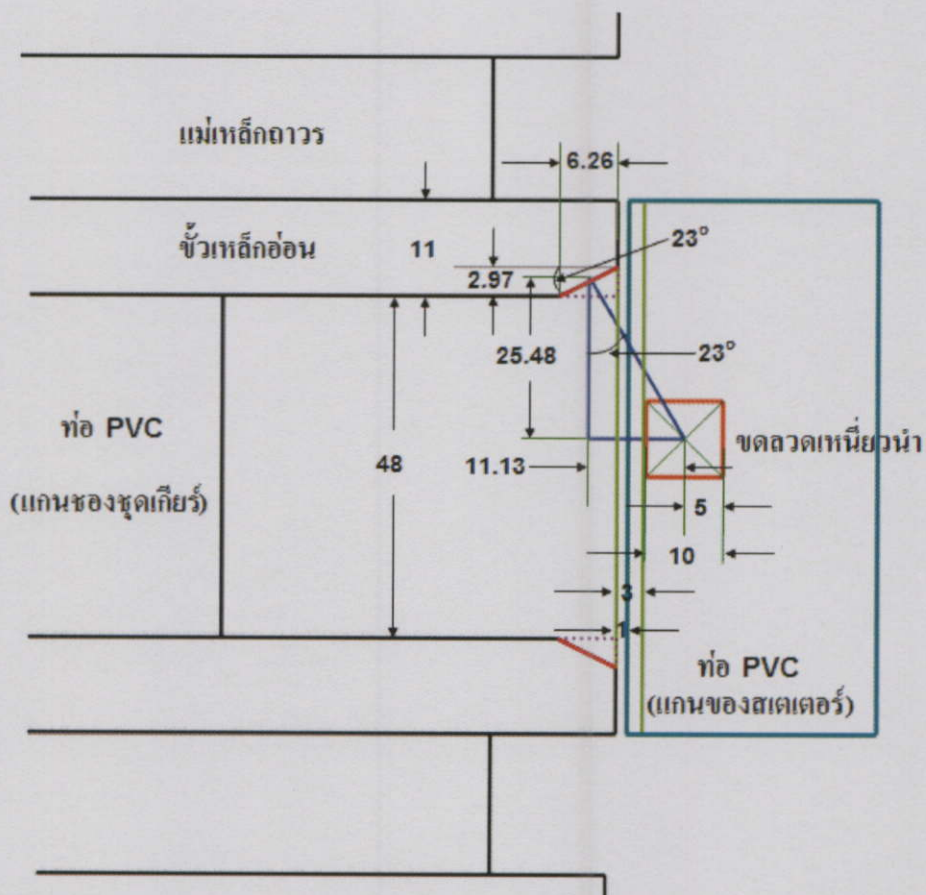
หลักการและเงื่อนไขดังกล่าวจะพบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าของฐานต่อความสูงของสามเหลี่ยมเป็นดังสมการที่ (61)

$$\tan \theta = \frac{11.13}{25.48} = 0.4368 \quad (61)$$

$$\tan \theta = \tan 23^\circ \quad (62)$$

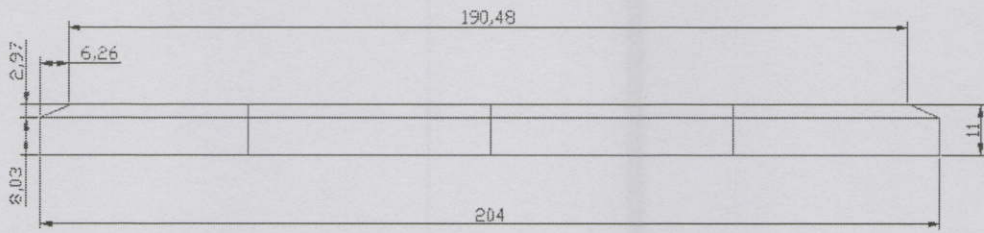
ดังนั้น

$$\theta = 23^\circ \quad (63)$$

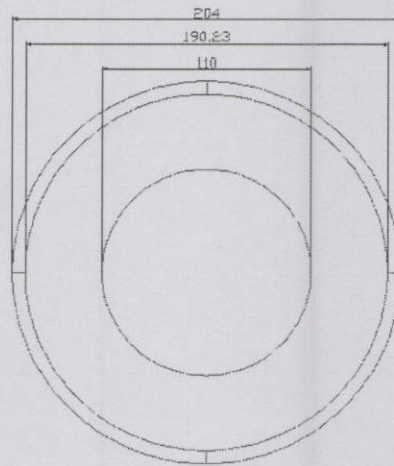


รูปที่ 3.37 ภาพอธิบายการคำนวณมุมของขั้วแม่เหล็กที่ใช้ในการบังคับสนามแม่เหล็ก (ในหน่วยมิลลิเมตร)

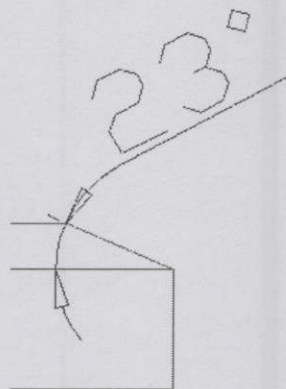
เมื่อทำการออกแบบตามมุมที่ได้ทำการคำนวณไว้แล้วจะพบว่าข้อแม่เหล็กขยาย  
สนามแม่เหล็กจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.38 ถึงรูปที่ 3.42



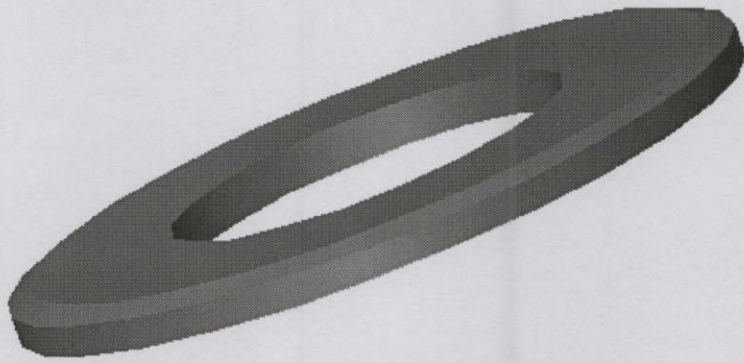
รูปที่ 3.38 ภาพด้านข้าง (Side view) ของข้อแม่เหล็กในหน่วยของ mm



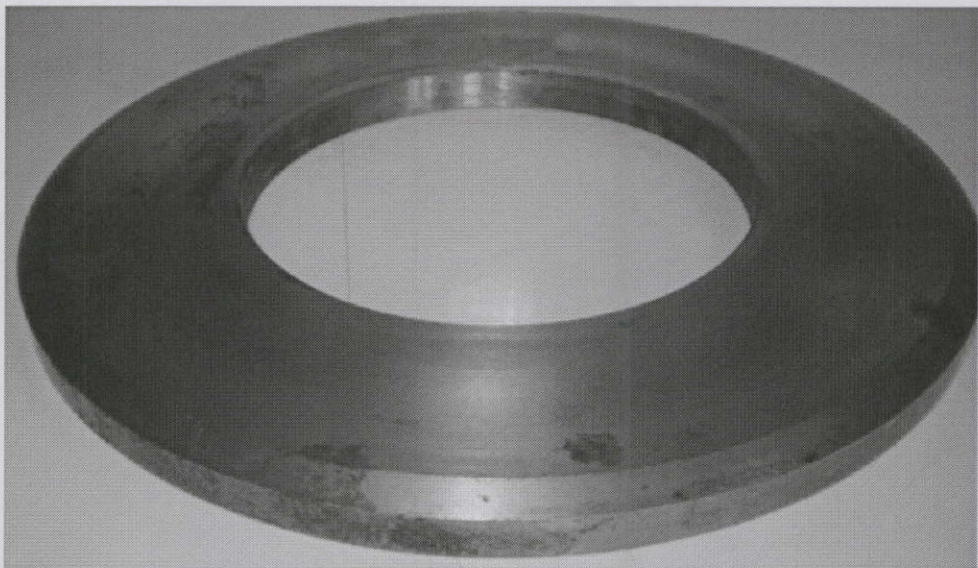
รูปที่ 3.39 ภาพด้านบน (Top view) ของข้อแม่เหล็ก



รูปที่ 3.40 รูปด้านข้างของมุมที่ทำการปาดข้อแม่เหล็กเพื่อบังคับสนามแม่เหล็กให้ไปตัดที่  
ขดลวดได้พอดี



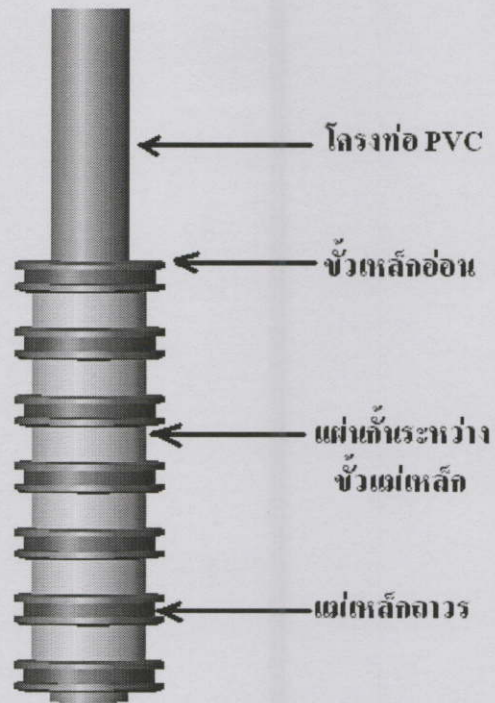
รูปที่ 3.41 ภาพสามมิติของขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006



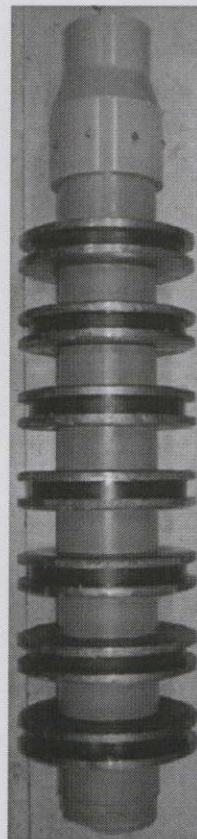
รูปที่ 3.42 ขั้วแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้น

ส่วนในการวางตำแหน่งของชุดแม่เหล็กถาวรหรือกล่องเฟืองแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic gearbox) จะเป็นการนำแม่เหล็กถาวรหลายๆอันมาวางซ้อนกันโดยที่แม่เหล็กอันที่อยู่ติดกันจะถูกลวางให้ขั้วที่เหมือนกันหันหน้าเข้าหากันดังรูปที่ 3.36 ซึ่งจะให้เกิด Gradient field ที่มีค่าสูงขึ้น

เมื่อประกอบกันเข้าเป็นชุดแม่เหล็กถาวรแล้วตัวแม่เหล็กถาวรแต่ละอันจะมีขั้วแม่เหล็กประกบทั้งด้านที่เป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006 ดังรูปที่ 3.43 และรูปที่ 3.44 เป็นภาพของชุดเกียร์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.43 แบบของชุดค่องเกล็ดแม่เหล็กที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 2006



รูปที่ 3.44 ชุดค่องเกล็ดแม่เหล็กที่สร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้

### 3.1.1 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

การออกแบบขดลวดกำเนิดพลังงานและขั้วแม่เหล็กอ่อนขยายสนามแม่เหล็กนั้นต้องทำการออกแบบให้มีมิติต่างๆที่สัมพันธ์กัน เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่จะมาตัดผ่านขดลวดนั้นจะออกมาจากแม่เหล็กถาวรแล้วส่งผ่านออกไปทางขั้วแม่เหล็กอ่อนไปตัดผ่านขดลวด ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขดลวดกำเนิดพลังงานตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะได้รับและให้เหมาะสมกับชุดแม่เหล็กถาวรที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ก่อนแล้ว

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากคลื่นน้ำที่ให้กำเนิดกำลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิงโครนัสดังนั้นจึงใช้หลักการจากหัวข้อ 2.8 เป็นหลักในการออกแบบโดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

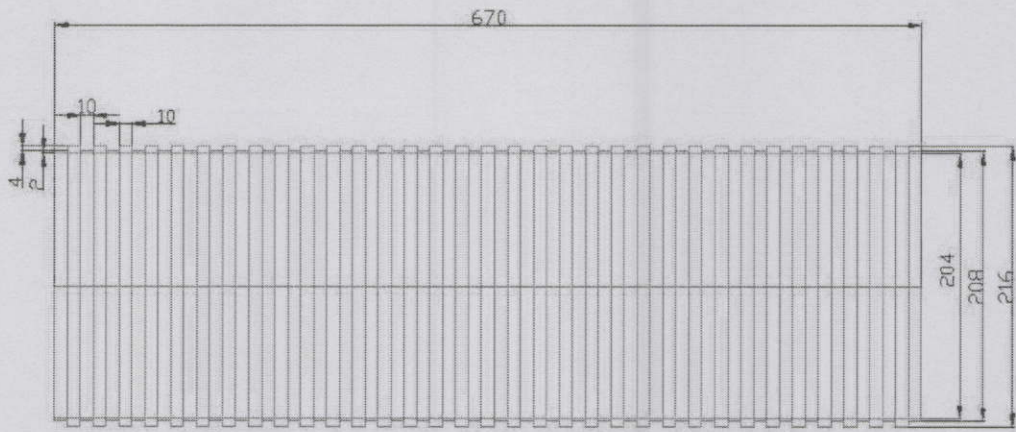
$$\text{จากสมการที่ (26)} \quad q = \frac{\tau_s}{3a_s} \quad (64)$$

$$\text{กำหนดค่า} \quad \tau_s = 90 \text{ mm} \quad (65)$$

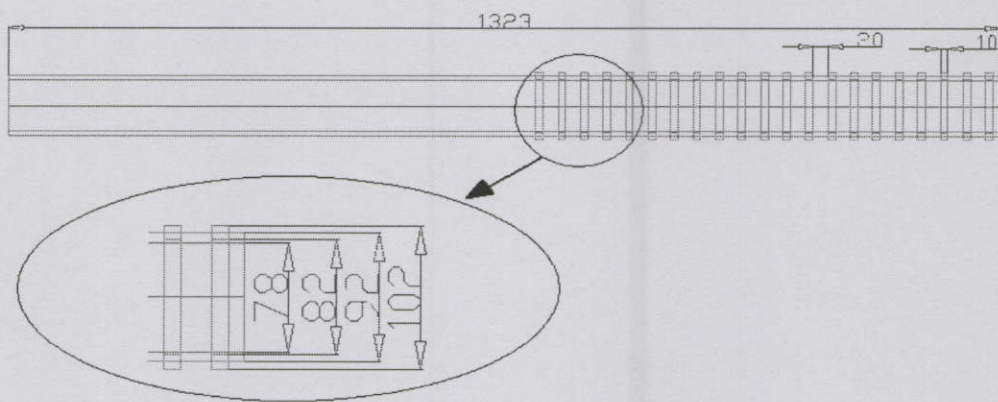
$$a_s = 20 \text{ mm} \quad (66)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad q = 3/2 \quad (67)$$

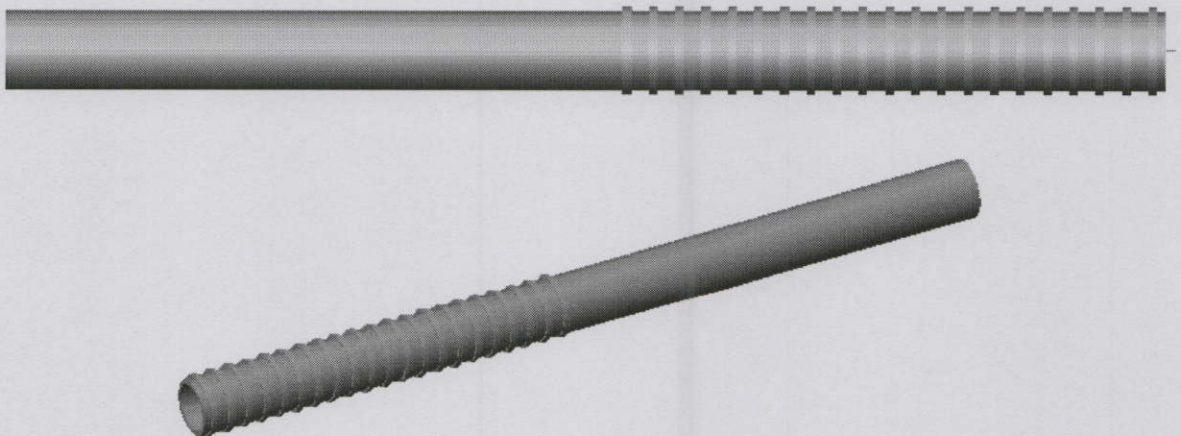
ค่า  $q$  หมายความว่า จะมีชุดขดลวด 3 เฟส 1 ชุด (3 ขด) กระจายปกคลุมระยะของขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เนื่องจากท่อ PVC ที่ใช้เป็น Stator มีขนาดดังรูปที่ 3.45 จึงมีขดลวดทั้งหมด 15 ขด เพราะมีการเผื่อร่องที่ปลายทั้ง 2 ด้านของ Stator กล่าวคือจะมีขดลวดกำเนิดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส 5 ชุด ส่วนจำนวนรอบของขดลวดจะขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $V_{emf}$  ที่ต้องการ พื้นที่หน้าตัดขดลวด  $A$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา  $\frac{dB}{dt}$  ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กต่อหน่วยเวลานี้จะพิจารณาจากแอมพลิจูดของคลื่น , ความถี่ของคลื่น , ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก และค่าผลต่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กถาวร(Gearbox) เมื่อทำการคำนวณแล้วพบว่าขดลวดวงในใช้ลวดเบอร์ 29 (0.38 mm) จำนวน 962 รอบ และ ขดลวดวงนอกใช้ลวดเบอร์ 27 (0.44 mm) จำนวน 540 รอบ



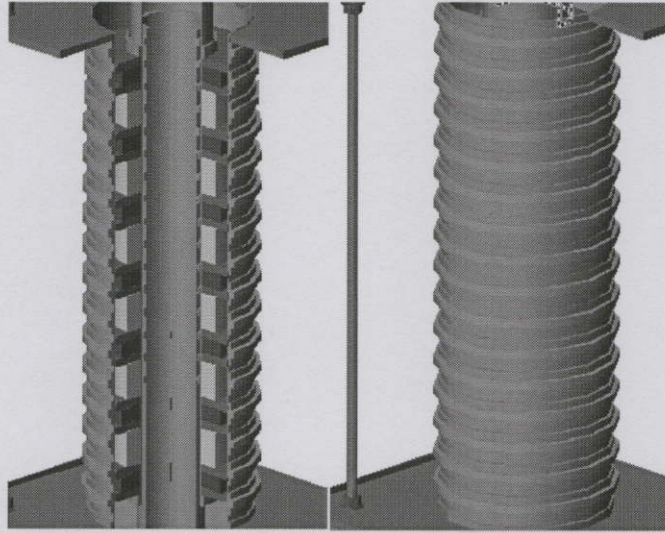
รูปที่ 3.45 ด้านข้างของท่อ PVC ที่ใช้เป็น Stator วงนอก (หน่วย mm)



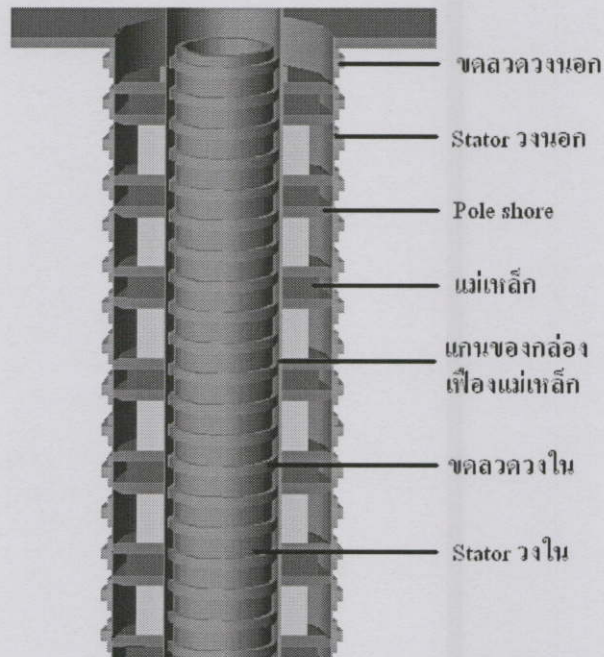
รูปที่ 3.46 ขนาดของขดลวด Stator วงใน (หน่วย mm)



รูปที่ 3.47 ขาดลวด Stator วงในเขียนแบบโปรแกรม AutoCAD



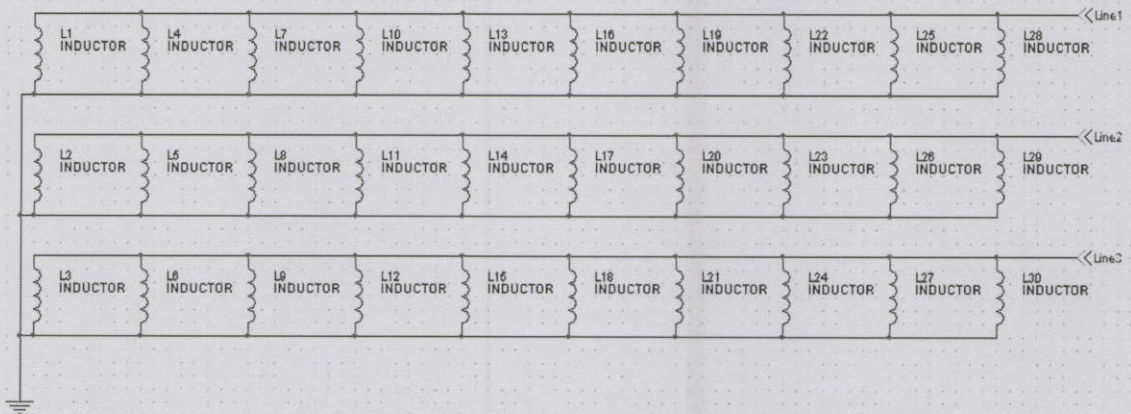
รูปที่ 3.48 ภาพตัด โครงสร้างภายในของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแนวตรง



รูปที่ 3.49 ส่วนต่างๆ ภายในและภายนอกของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแนวตรง

จากขนาดของแม่เหล็กถาวรที่มีอยู่นั้นพบว่าเหมาะสมกับท่อพีวีซีขนาด 10 นิ้ว ( 216 mm ) ที่จะใช้เป็น โครงในการพันลวดวงนอกและท่อพีวีซีขนาด 3.5 นิ้ว ( 89 mm ) ที่จะใช้เป็น โครงในการพันลวดวงใน โดยที่ทั้งวงนอกและวงในนั้นจะถูกเซาะร่องไว้สำหรับพันลวดซึ่งมีลักษณะเป็นร่องๆที่มี

ความกว้างของร่องเท่ากันทุกร่องทั้งวงนอกและวงใน และมีระยะห่างของแต่ละร่องเท่าๆกันเรียงต่อกันไป จะทำให้เกิดเป็นขดลวดหลายๆขด แล้วทำการแบ่งทีละขดซึ่งในแต่ละขดจะมี 3 ขด แล้วนำขดแรกของแต่ละขดมารวมกันก็จะได้เป็นเฟสที่ 1 นำขดที่ 2 ของแต่ละขดมารวมกันก็จะได้เป็นเฟสที่ 2 และนำขดที่ 3 ของแต่ละขดมารวมกันก็จะได้เป็นเฟสที่ 3 ดังรูปที่ 3.50

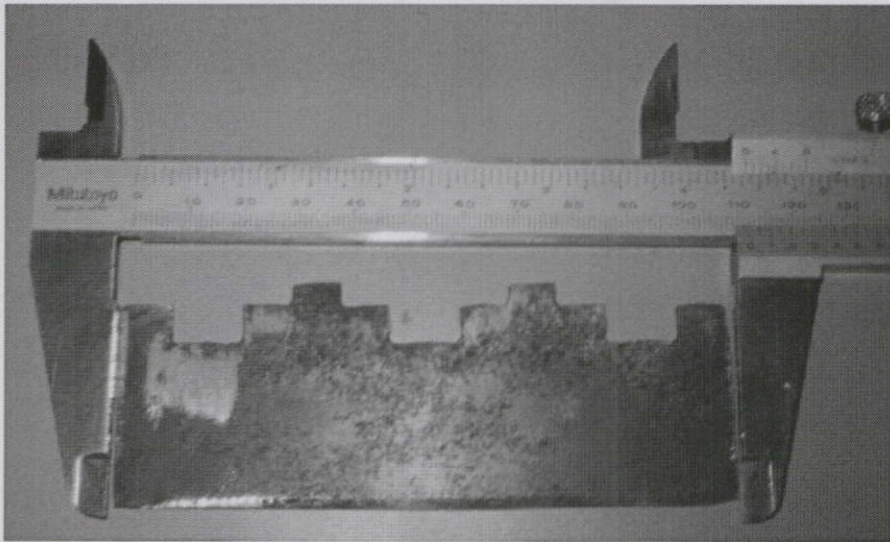


รูปที่ 3.50 วงจรของการเชื่อมต่อขดลวดกำเนิดพลังงานไฟฟ้า 3 เฟส 10 ขด

### 3.3.5 ออกแบบขั้วแม่เหล็กสำหรับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

การออกแบบขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเน้นการออกแบบให้ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ใกล้ชิดกับชุดเกียร์แม่เหล็กมากที่สุด เพื่อลดการสูญเสียความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากระยะห่างที่เกิดขึ้นจากช่องว่างอากาศและในเนื้อวัสดุท่อ PVC รวมถึงได้ออกแบบให้ช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแส Eddy ภายในเนื้อเหล็กอ่อนที่ใช้สร้างขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการใช้แผ่นเหล็กที่มีบางที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งแผ่นเหล็กที่ใช้มีความหนาเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1

เมื่อทำการออกแบบและสร้างขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดเหนี่ยวนำเสร็จแล้วจะทำการเคลือบแล็กเกอร์ทับชั้นสารฟิล์มบางที่ใช้ลดค่าแผ่นเหล็กดังกล่าวอีกชั้นหนึ่งเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้รับการออกแบบและสร้างไว้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.51 ขั้วเหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้น

ในการประกอบขั้วเหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามารวมกันที่ขดลวดเหนี่ยวนำ พบว่าต้องใช้ขั้วเหล็กอ่อนทั้งหมดจำนวน 816 ชิ้น ซึ่งจำนวนดังกล่าวจะคำนวณจากอัตราส่วนของเส้นรอบวงของสเตเตอร์กับความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ในการสร้างคังสมการที่ (68)

$$n = \frac{L}{t} \quad (69)$$

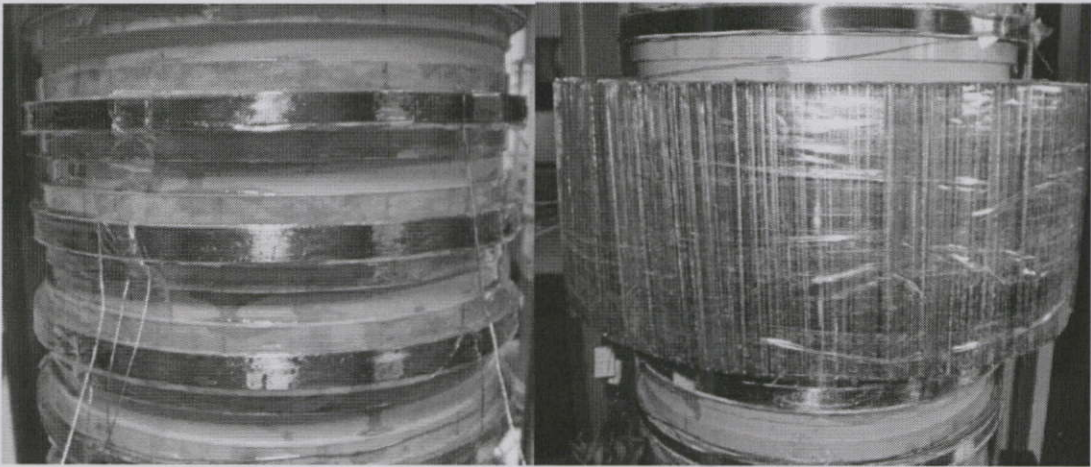
$$n = \frac{2\pi R}{t} \quad (70)$$

$$n = \frac{2\pi(104\text{mm})}{0.8\text{mm}} \quad (71)$$

$$n = 816.81 \quad (72)$$

โดยที่

- $n$  คือจำนวนของขั้วเหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์
- $L$  คือเส้นรอบวงของสเตเตอร์บริเวณที่ใกล้ชิดกับชุดเกียร์แม่เหล็กมากที่สุด
- $R$  คือรัศมีของสเตเตอร์บริเวณที่ใกล้ชิดกับชุดเกียร์แม่เหล็กมากที่สุด (104 mm)
- $t$  คือความหนาแผ่นเหล็กที่ใช้ในการสร้างขั้วเหล็ก (0.8 mm)



รูปที่ 3.52 ภาพเปรียบเทียบสเตเตอร์ก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) จากข้อเหวี่ยงที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ

### 3.2 การจำลองสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB 7.0

จากการจำลองสัญญาณไฟฟ้าจากการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสซินโครนัสด้วยโปรแกรม MATLAB ที่จะจำลองการทำงานจากของระบบภายใต้เงื่อนไขของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาในสถานะอุดมคติ (Sine wave) ซึ่งคลื่นน้ำทะเลที่ใช้เป็นในการจำลองจะมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.7 m คาบเวลา 9 s<sup>[27]</sup>

สมการที่ใช้การจำลองจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดกับแอมพลิจูด ซึ่งมีที่มาของสมการดังกล่าวดังนี้

จากสมการที่ (5) 
$$V_{emf} = -NA \frac{dB}{dt}$$

และสมการที่ (10) 
$$\bar{B} = \frac{\mu_0 \bar{B}_{max}}{r^2}$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (5) จะได้

$$V_{emf} = -NA\mu_0 \bar{B}_{max} \frac{dr^{-2}}{dt} \quad (73)$$

จากกฎของ Chain's rule

$$\frac{dr^{-2}}{dt} = \frac{dr^{-2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (74)$$

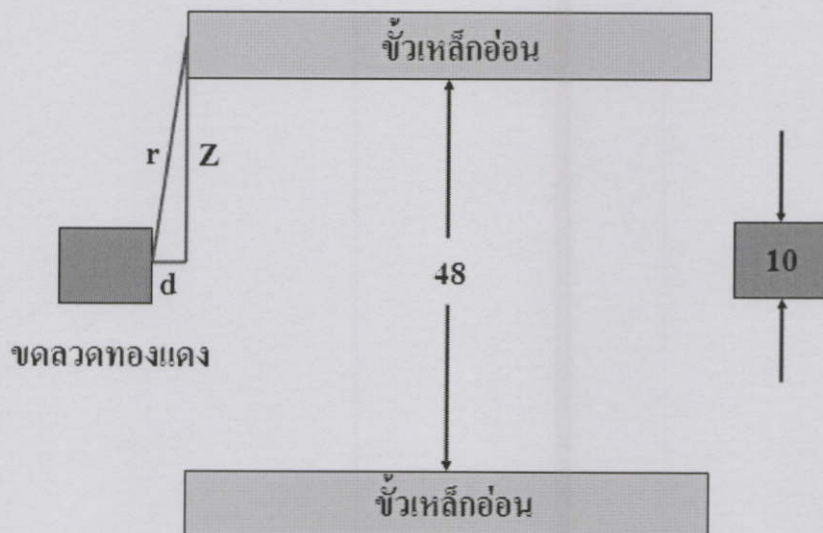
เมื่อแทนสมการที่ (74) ลงในสมการที่ (73) จะได้

$$V_{emf} = -NA\mu_0\bar{B}_{max} \frac{dr^{-2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (75)$$

โดยที่

- $r$  คือระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำและกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กของชุดเกียร์แม่เหล็ก
- $z$  คือระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำและกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กของชุดเกียร์แม่เหล็กในแนวตั้ง
- $d$  คือระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำและกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กของชุดเกียร์แม่เหล็กในแนวราบ

ความหมายของตำแหน่งของตัวแปรต่างๆจะถูกริบายไว้ในรูปที่ 3.53



รูปที่ 3.53 ภาพอธิบายความหมายของระยะและตำแหน่งของตัวแปรที่ใช้จำลองสัญญาณไฟฟ้าของเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าเส้นในหน่วยมิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.53 จะพบว่าสามเหลี่ยมที่มีด้านประกอบสามเหลี่ยมเป็น  $r z d$  จะมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีพีทาโกรัสดังสมการที่ (76)

$$r^2 = z^2 + d^2 \quad (76)$$

แทนค่า  $r$  จากรูปที่ 3.53 ลงในสมการที่ (75)

$$V_{emf} = -NA\mu_0 \bar{B}_{max} \frac{d(z^2 + d^2)^{-1}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (77)$$

เนื่องจากขดเคียวแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่ขึ้นและลงกลับไปกลับมาเป็นฟังก์ชันคาบ ดังนั้นค่า  $z$  จึงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชัน Sine

$$z = z_{max} \sin(\omega t + \phi) \quad (78)$$

หรือ

$$z = z_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi\right) \quad (79)$$

โดยที่  $z_{max}$  คือค่าระยะห่างมากที่สุดระหว่างขั้วแม่เหล็กกับขดลวดเหนี่ยวนำ  
 $\lambda$  คือค่าระยะพิชของกล่องเฟืองแม่เหล็ก  
 $T$  คือคาบเวลาการเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็กที่กล่องเฟืองแม่เหล็กกับขดลวด  
 และ  $\phi$  คือมุมเฟสเริ่มต้นของฟังก์ชันการเคลื่อนที่

แทนค่า  $z$  จากสมการที่ (79) ลงในสมการที่ (77)

$$V_{emf} = -NA\mu_0 \bar{B}_{max} \left\langle \left\{ \frac{d}{dz} \left( [z_{max} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi\right)] + d^2 \right)^{-1} \right\} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} [z_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \phi\right)] \right\} \right\rangle \quad (80)$$

เมื่อ  $d$  มีค่าน้อยมากๆ และเพื่อให้ง่ายต่อการจำลองสัญญาณจึงไม่นำค่า  $d$  มาพิจารณา

$$V_{emf} = \frac{-NA\mu_0\bar{B}_{max}}{z_{max}} \left\{ \frac{d}{dz} \left( \left[ \sin^2 \left( \frac{2\pi}{T} + \phi \right) \right]^{-1} \right) \right\} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} \left[ \sin \left( \frac{2\pi}{T} + \phi \right) \right] \right\} \quad (81)$$

กำหนดให้

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} + \phi \quad (82)$$

ดังนั้นสมการที่ (82) จะเป็น

$$V_{emf} = \frac{-NA\mu_0\bar{B}_{max}}{z_{max}} \left\{ \frac{d}{dz} \left( \sin^2 \varphi \right)^{-1} \right\} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} [\sin \varphi] \right\} \quad (83)$$

จากสูตรการหาอนุพันธ์ของผลคูณของอนุพันธ์

$$\frac{d}{d\varphi} \sin^2 \varphi = \frac{d}{d\varphi} (\sin \varphi \cdot \sin \varphi) = \sin \varphi \frac{d}{d\varphi} \sin \varphi + \sin \varphi \frac{d}{d\varphi} \sin \varphi \quad (82)$$

แทนค่าสูตรการหาอนุพันธ์ของผลคูณลงในสมการที่ (81) จะได้

$$V_{emf} = \frac{-NA\mu_0\bar{B}_{max}}{z_{max}} \left\{ \sin^{-1} \frac{d}{dz} (\sin^{-1} \varphi) + \sin^{-1} \frac{d}{dz} (\sin^{-1} \varphi) \right\} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} [\sin \varphi] \right\} \quad (84)$$

จากสูตรการหาอนุพันธ์ของ  $\sin^{-1} \varphi$

$$\frac{d}{dz} (\sin^{-1} \varphi) = \left( \frac{1}{\sqrt{1-\varphi^2}} \right) \frac{d\varphi}{dz} \quad (85)$$

แทนค่าสูตรการหาอนุพันธ์ของ  $\sin^{-1} \varphi$  ลงในสมการที่ (84) จะได้

$$V_{emf} = \frac{-NA\mu_0\bar{B}_{max}}{z_{max}} \left\{ 2(\sin^{-1} \varphi) \left( \frac{1}{\sqrt{1-\varphi^2}} \right) \frac{d\varphi}{dz} \right\} \cdot \left\{ \frac{2\pi}{T} \cos \varphi \right\} \quad (86)$$

$$V_{emf} = \frac{-2NA\mu_0\bar{B}_{max}}{z_{max}} \left\{ \frac{\sin^{-1}\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) \frac{2\pi}{\lambda}}{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right)^2}} \right\} \cdot \left\{ \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) \right\} \quad (87)$$

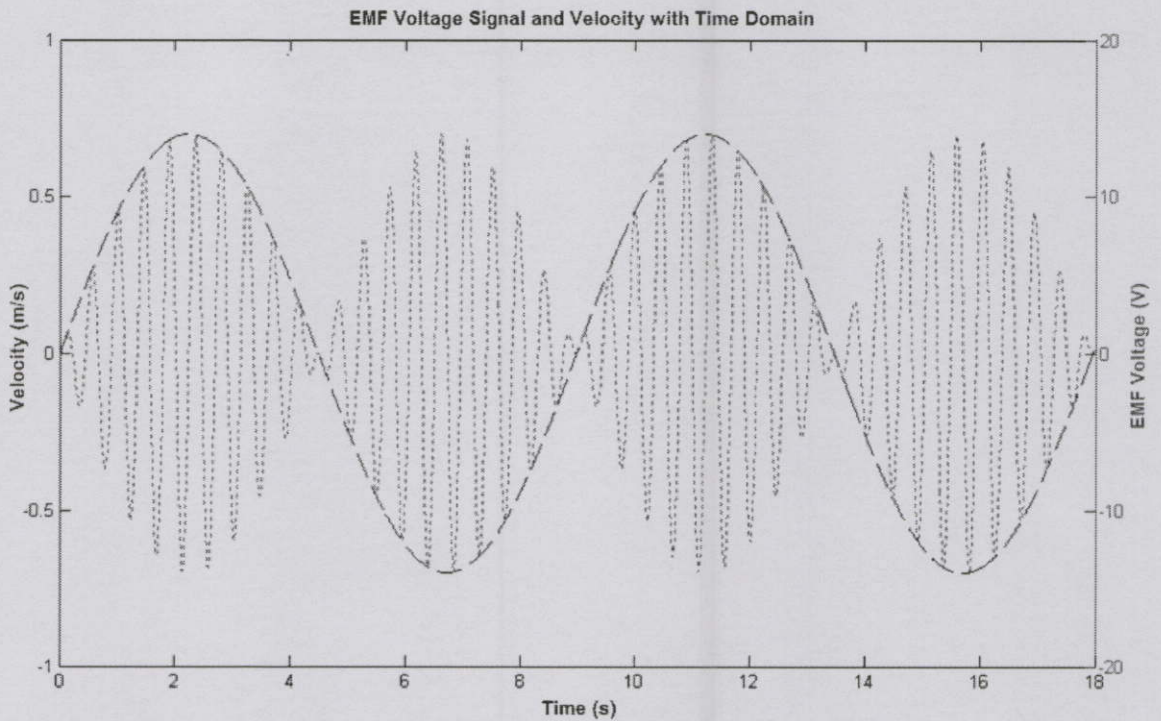
กำหนดให้  $\tau = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$V_{emf} = \frac{-4\pi^2 NA\mu_0\bar{B}_{max}\tau}{z_{max}T} \left\{ \frac{\left(\sin^{-1}\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right)\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right)^2}} \right\} \cdot \left\{ \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right) \right\} \quad (88)$$

โดยที่

- $N$  คือจำนวนของขดลวด
- $A$  คือพื้นที่วงรอบของขดลวด
- $\mu_0$  คือค่าการยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ ในที่นี้คืออากาศ
- $B_{max}$  คือค่าความเข้มสูงสุดของสนามแม่เหล็ก
- $T$  คือคาบเวลาการเปลี่ยนแปลงชั่วแม่เหล็กที่กลองเฟืองแม่เหล็กกับขดลวด
- $\tau$  คือค่าระยะพิทของ กลองเฟืองแม่เหล็ก
- $z_{max}$  คือค่าระยะห่างมากที่สุดระหว่างชั่วแม่เหล็กกับขดลวดเหนี่ยวนำ

ซึ่งเป็นรูปแบบของคลื่นที่ใช้ในการจำลองจะเป็นคลื่นในสภาวะอุดมคติ (Sine wave) จากสมการการเคลื่อนที่ที่ (78) และสมการแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส (88) จะพบว่าได้ผลของเป็นดังรูปที่



รูปที่ 3.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ได้กับเวลา และความสัมพันธ์ตำแหน่งของท่อนที่ได้กับเวลา ในสถานะคลื่นอุดมคติ

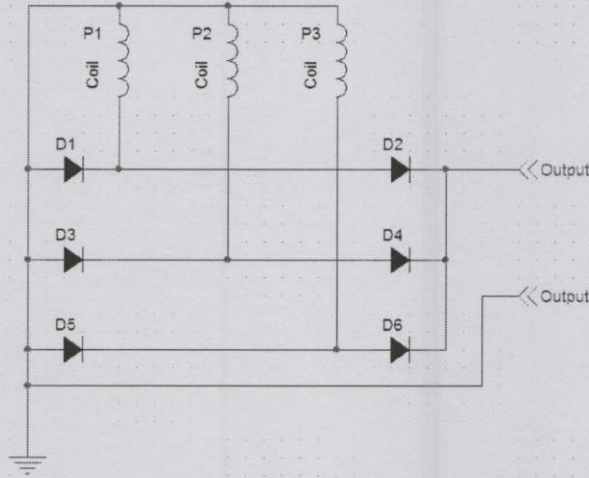
รูปสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตามเวลาที่ได้จากการจำลองสัญญาณไฟฟ้าพบว่า มีลักษณะคาบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชุดแม่เหล็กตามคลื่นน้ำที่เคลื่อนที่เข้ามา (Sine Wave) มีคาบของเวลาเท่ากับคาบเวลาของคลื่นที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของท่อน ส่วนคาบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากับระยะพิทของชุดแม่เหล็กถาวรต่ออัตราเร็วเชิงมุมของคลื่นที่เข้ามายังท่อน

### 3.5 การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงาน

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสแบบซิงโครนัส ในเบื้องต้นนี้จะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้อยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันคงที่แล้วจึงนำมาเก็บกักเอาไว้ในแบตเตอรี่ โดยผ่านวงจรแปลงกระแส ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่มีความถี่ไม่คงที่ ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้อยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการเรียงกระแสโดยใช้เจอเมเนียมไดโอด 6 ตัว เนื่องจากเป็นไดโอดที่มีแรงดันขีดเริ่มต่ำกว่าซิลิกอนไดโอดคือ 0.37 V จึงทำให้สูญเสียพลังงานในการเรียงกระแสน้อยกว่าใช้ซิลิกอนไดโอด ซึ่งจะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังคงมีการแกว่งของสัญญาณ ต่อมาทำการลดแอมพลิจูดการแกว่งของสัญญาณด้วยตัว

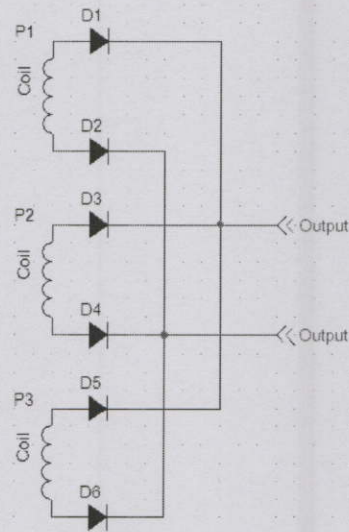
เก็บประจุและเร็กกูเลเตอร์ ดังนั้นจึงทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปอัดไฟฟ้าเข้าไปที่แบตเตอรี่ตามที่ต้องการ ซึ่งในเบื้องต้นจึงต้องทำการแปลงสัญญาณแรงดันดังกล่าวให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยที่การแปลงสัญญาณดังกล่าวสามารถต่อวงจรแปลงได้ 2 แบบคือแบบ Y และแบบ  $\Delta$  ดังนี้

#### วงจรแปลงแบบ Y



รูปที่ 3.54 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟสแบบ Y

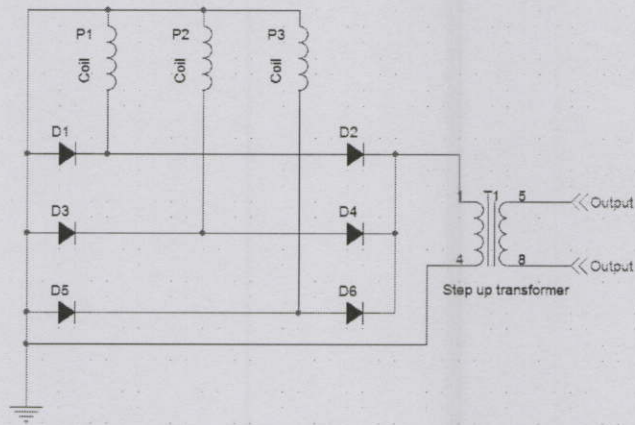
#### วงจรแปลงแบบ $\Delta$



รูปที่ 3.55 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟสแบบ  $\Delta$

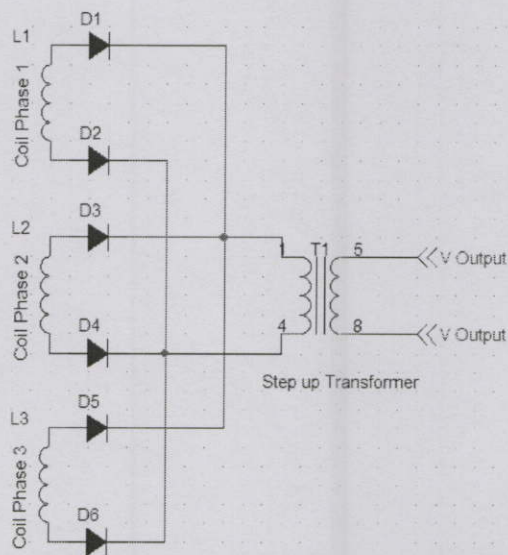
เมื่อได้ต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสแล้วแรงดัน Output ที่ได้จะมีค่าแรงดันพิคทูพิคที่สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการ Superposition กันของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปต่อกับหม้อแปลง Step up หรือวงจรเรียงและกรองกระแสได้ต่อไป ดังนี้

วงจรแปลงแบบ Y ต่อกับหม้อแปลง Step up

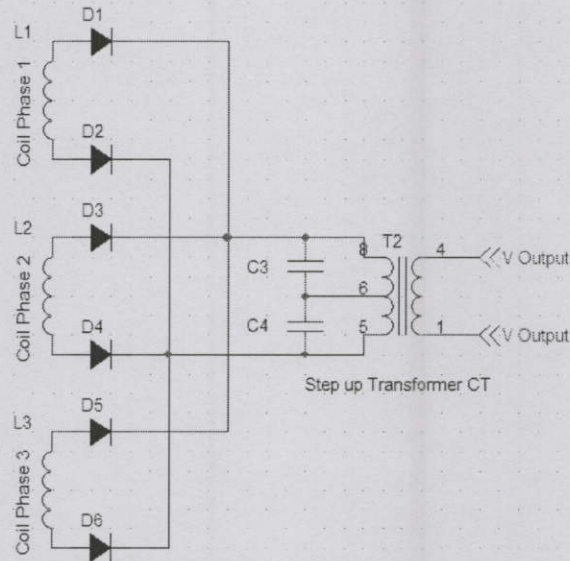


รูปที่ 3.56 วงจรแปลงแบบ Y ต่อกับหม้อแปลง Step up

วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อกับหม้อแปลง Step up

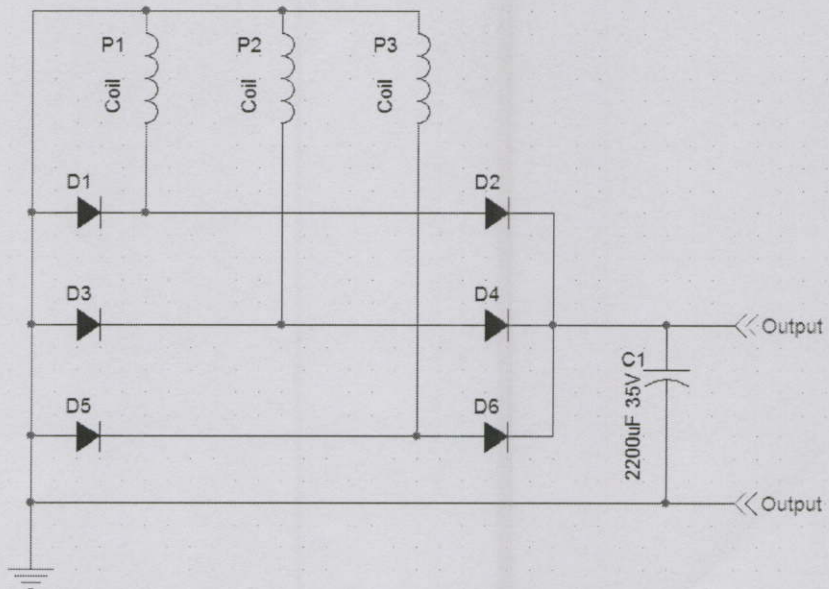


รูปที่ 3.57 วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อกับหม้อแปลง Step up  
 วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อกับหม้อแปลง Step up แบบ Center Tap



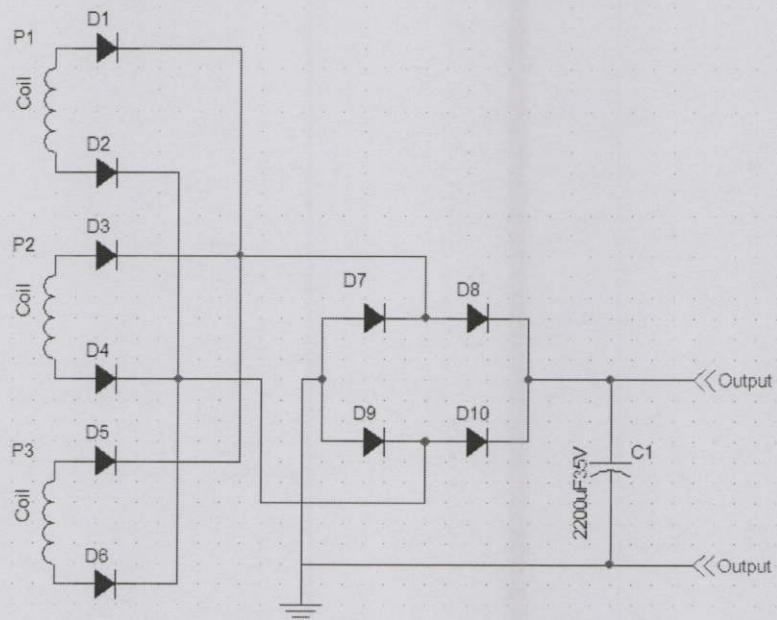
รูปที่ 3.58 วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อกับหม้อแปลง Step up แบบ Center Tap

วงจรแปลงแบบ Y ต่อดั้วเก็บประจุเพื่อกรองกระแส



รูปที่ 3.59 วงจรแปลงแบบ Y ต่อกับดั้วเก็บประจุเพื่อกรองกระแส

วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อวงจรเรียงและกรองกระแส



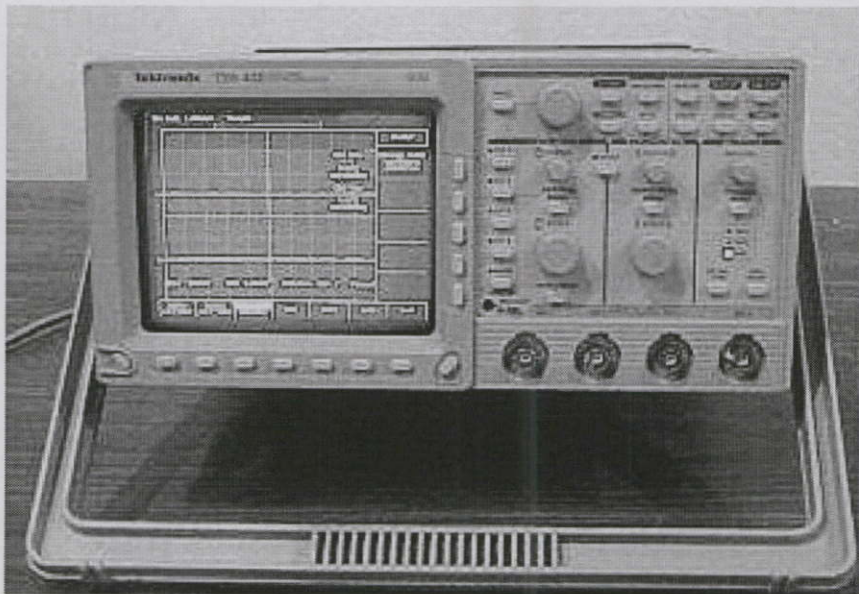
รูปที่ 3.60 วงจรแปลงแบบ  $\Delta$  ต่อกับวงจรเรียงและกรองกระแส

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

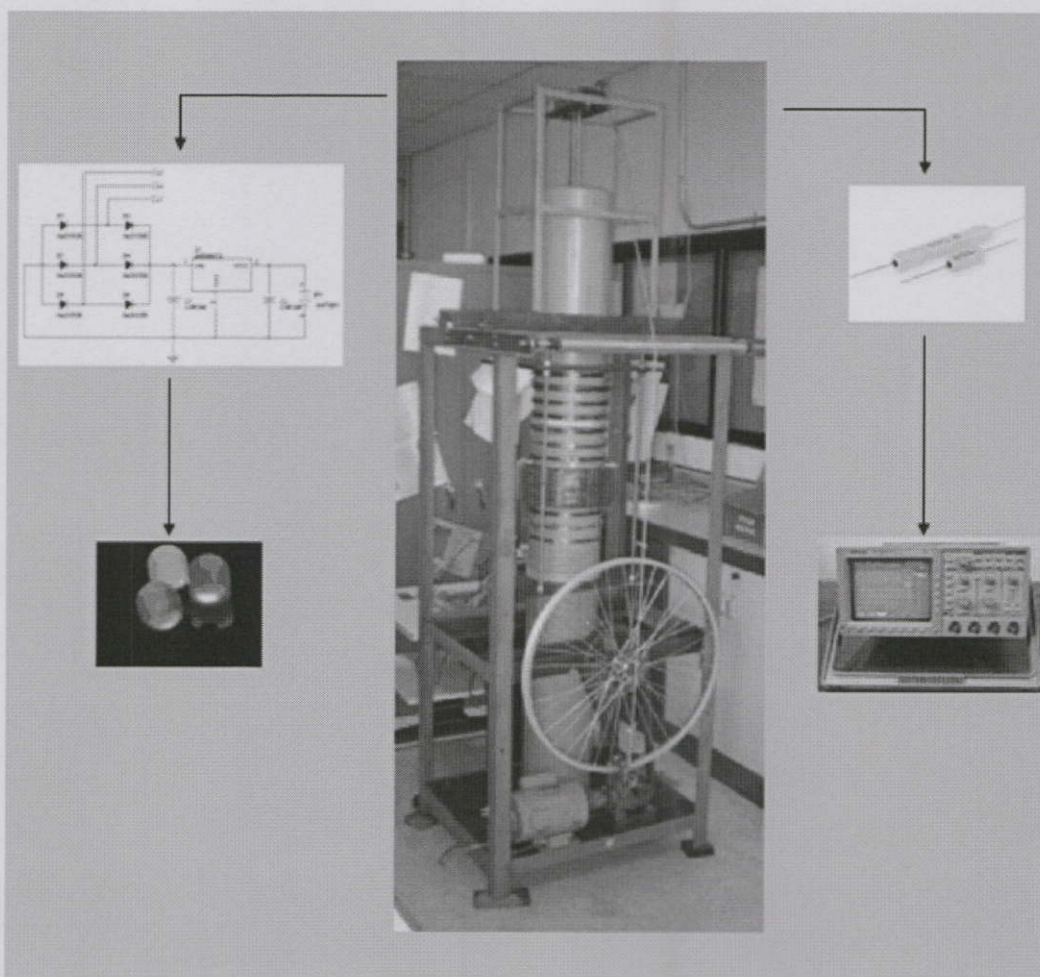
จากการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสแบบซิงโครนัสด้วยการเคลื่อนที่แบบแนวตรงแล้วทำการเก็บตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปแบบ 4 ช่องสัญญาณ พบว่าสามารถวัดพลังงานไฟฟ้าในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตามความถี่ของคลื่นที่ถูกจำลองขึ้นจากมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการทดลองกำเนิดพลังงานในสภาวะระบบทำงานภายใต้เงื่อนไขการจำลองที่มีคาบเวลาของแต่ละช่วงการกำเนิดที่ไม่คงที่และแบบที่มีคาบเวลาคงที่ รวมถึงได้ศึกษาการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าหลังจากผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณตามวงจรที่ออกแบบไว้

ในการทดลองเก็บค่าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปนี้ได้ใช้เครื่องออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 420 A ซึ่งมีภาพถ่ายของเครื่องดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายเครื่องออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS 420 A ที่ใช้ในการทดลอง

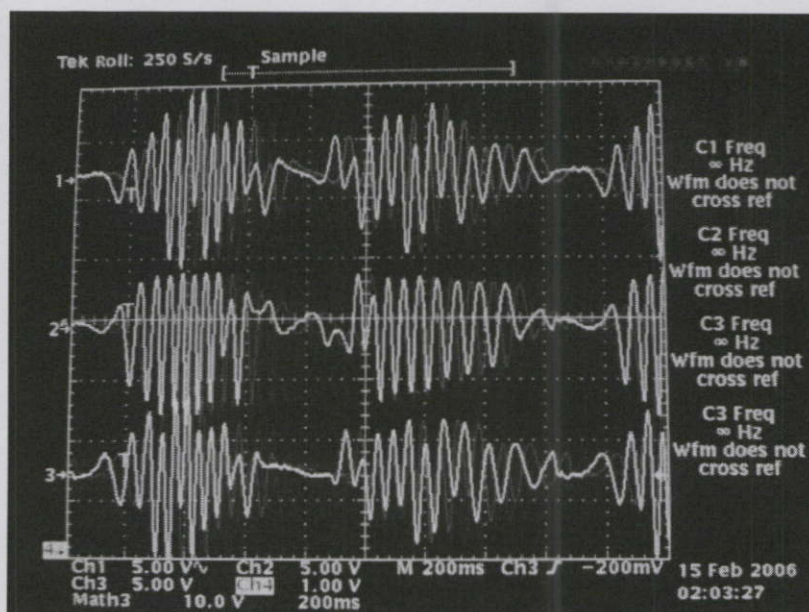
ในการทดลองเพื่อเก็บผลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นจะทำการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.2



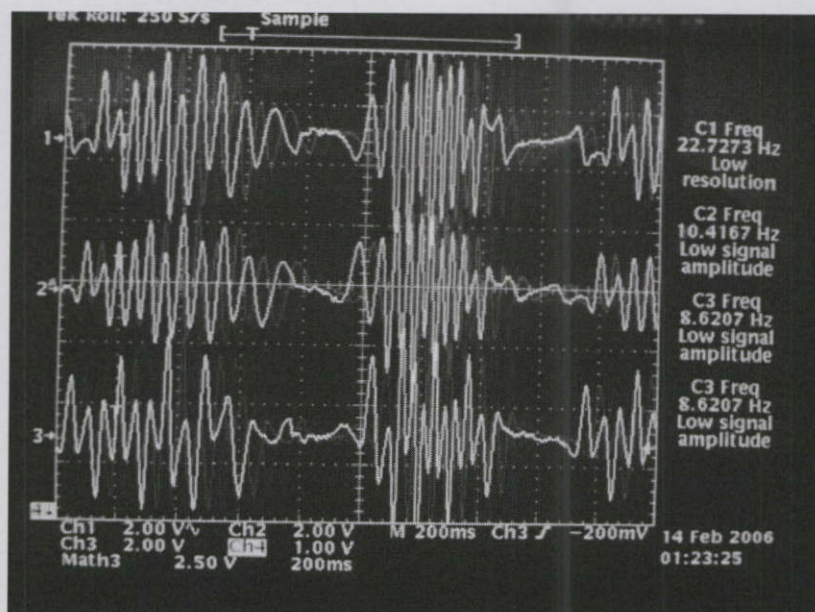
รูปที่ 4.2 โค้ดอะแกรมการชาร์จแบตเตอรี่ผ่านวงจรแปลง (ซ้าย) และการวัดค่าประสิทธิภาพด้วย Oscilloscope ผ่านโหลดทางไฟฟ้า (ขวา)

#### 4.1 ผลการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงในและวงนอกขณะที่ยังไม่ได้ทำการใส่ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ก่อนทำการพัฒนากลไกการจำลองการเคลื่อนที่

รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นก่อนทำการปรับปรุงระบบกลไกการจำลองคลื่น จะเป็นรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบที่มีคาบเวลาของแต่ละช่วงการกำเนิดที่ไม่คงที่ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 และแบบคาบเวลาคงที่ในช่วงเวลาที่สั้น (ประมาณ 600 ms) ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

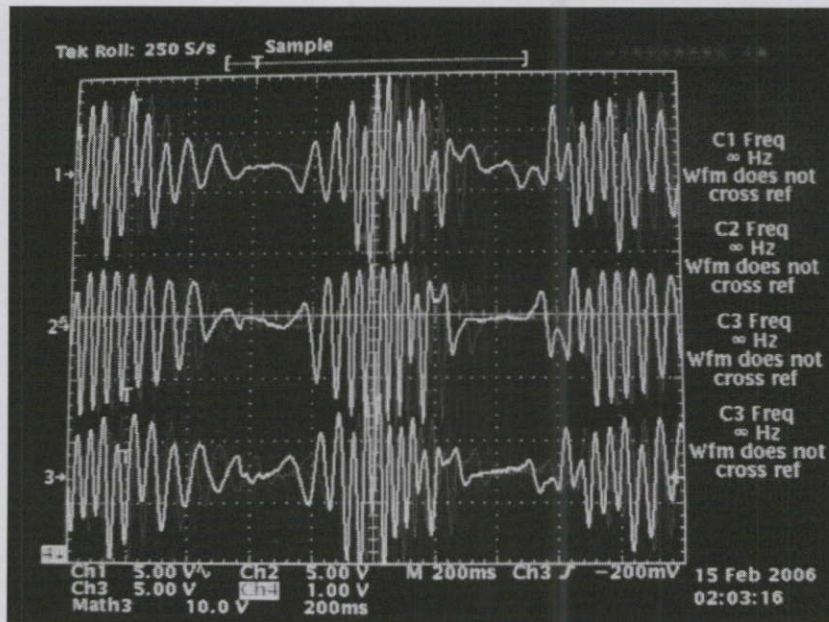


รูปที่ 4.3 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงนอก แบบที่มีคาบของสัญญาณไม่คงที่

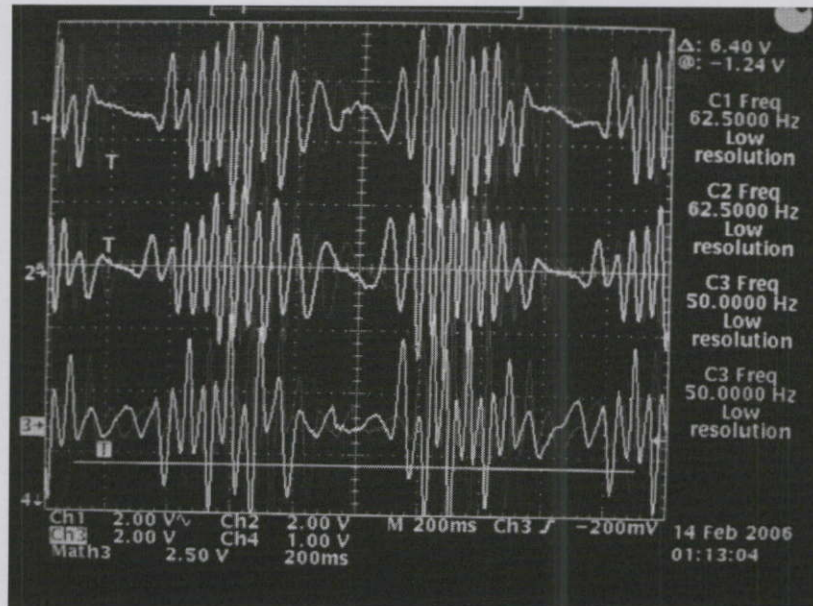


รูปที่ 4.4 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงใน แบบที่มีคาบของสัญญาณไม่คงที่

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะพบว่า การวิเคราะห์รูปสัญญาณไฟฟ้าทำได้ยากมาเนื่องจากคาบเวลาของสัญญาณแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดของแต่ละคลื่นมีค่าไม่เป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับเวลาในสมการที่ (88)



รูปที่ 4.5 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงนอก แบบที่มีคาบของสัญญาณคงที่ที่ 600 ms

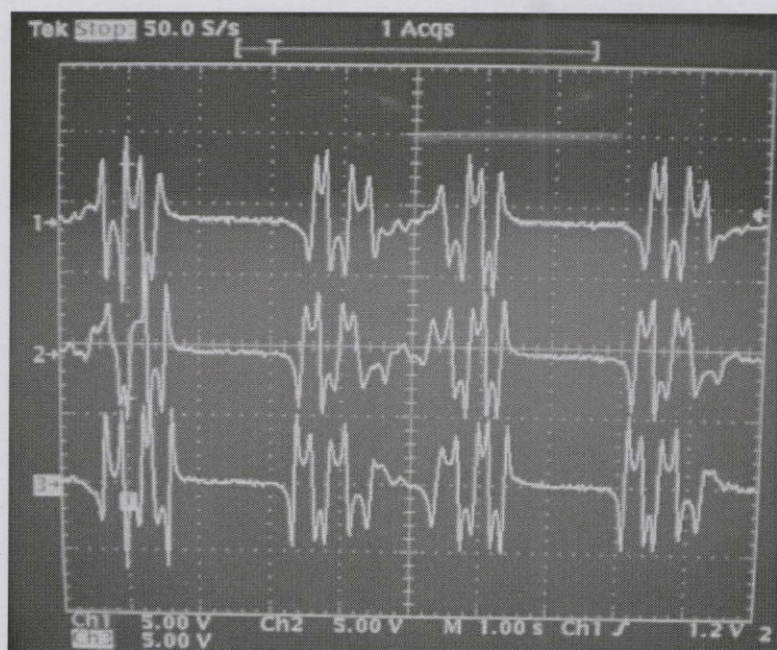


รูปที่ 4.6 กราฟของแรงดันกับเวลา ที่ทำการทดลองให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงใน แบบที่มีคาบของสัญญาณคงที่ที่ 600 มิลลิวินาที

ส่วนในรูปที่ 4.4 และ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีคาบเวลาคงที่แต่ก็เป็นคาบเวลาที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นของน้ำทะเลจริงที่มีคาบเวลาประมาณ 2-8 s ทำให้ต้องทำการปรับปรุงกลไกการจำลองคลื่นด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

#### 4.2 ผลการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดวงนอกหลังทำการพัฒนา กลไกการจำลองการเคลื่อนที่

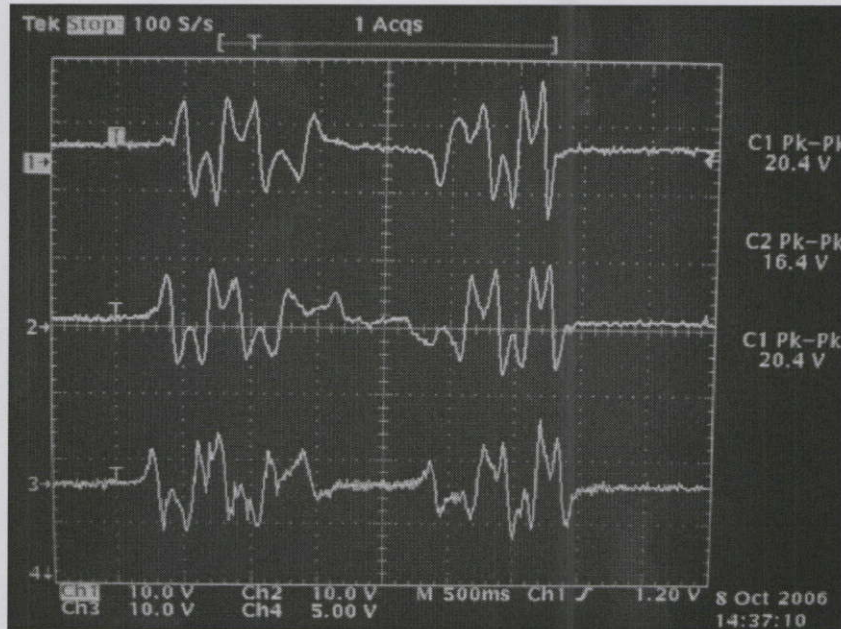
หลังจากที่ได้ทำการพัฒนากลไกดังกล่าวแล้วพบว่ารูปสัญญาณมีคาบเวลาที่สม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ระยะการเคลื่อนที่ 0.62 m ที่คาบเวลา 4.5 s พบว่าแรงดันไฟฟ้าขณะที่ยังไม่ได้ใส่ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอีเล็กโตรรอบๆขดลวดเหนี่ยวนำเป็นรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สัญญาณไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้น

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่าสัญญาณที่ได้ค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  เฉลี่ยของทั้ง 3 เฟสอยู่ที่ 10 V ส่วนแรงดัน  $V_{RMS}$  เฉลี่ยของทั้ง 3 เฟสอยู่ที่ 1.65 V ส่วนกำลังไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถวัดได้เนื่องจากยังไม่ได้มีการทดลองต่อโหลดเข้ากับระบบ

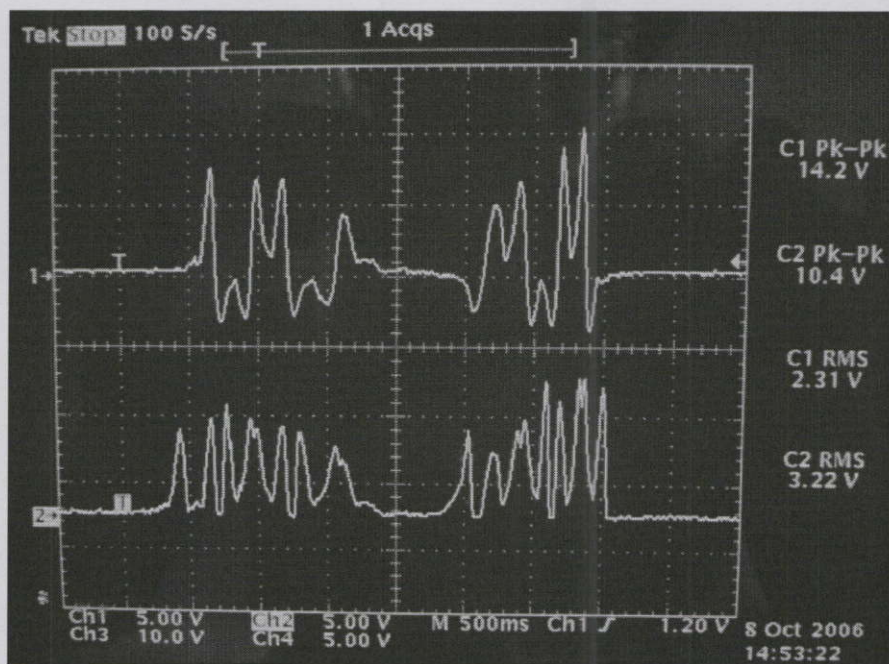
เมื่อใส่ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปในระบบโดยครอบคลุมเหนี่ยวนำทั้ง 3 เฟส พบว่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากแรงดันที่วัดได้จากขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัญญาณไฟฟ้า 3 เฟสที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่เชิงเส้นหลังจากใส่ขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าสัญญาณที่ได้ค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  เฉลี่ยของทั้ง 3 เฟสอยู่ที่ 18.58 V ส่วนแรงดัน  $V_{RMS}$  เฉลี่ยของทั้ง 3 เฟสอยู่ที่ 3.33 V ส่วนกำลังไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถวัดได้เนื่องจากยังไม่ได้มีการทดลองต่อโหลดเข้ากับระบบ

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ Y ดังรูปที่ 3.54 เข้ากับระบบพบว่ารูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.9

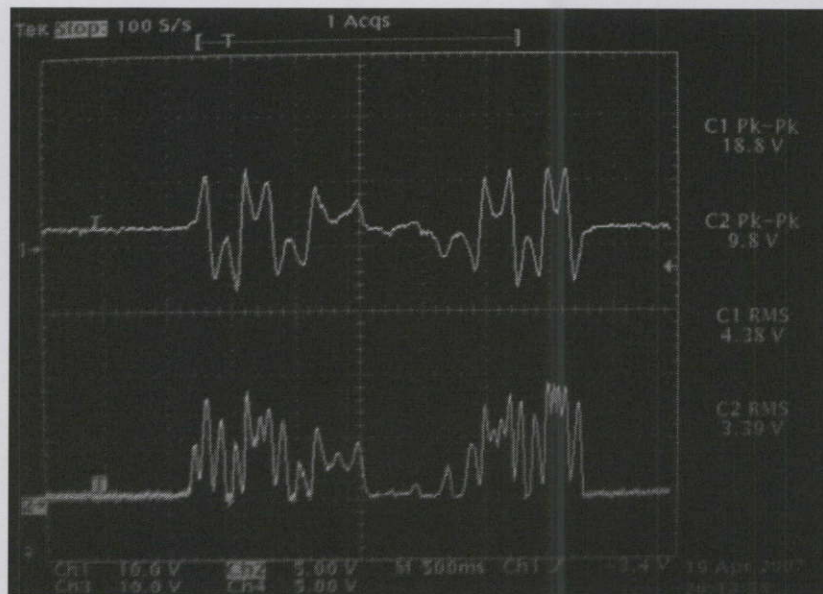


รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 14.2 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 2.31 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y ที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 10.4 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 3.22 V ส่วนกำลังไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถวัดได้เนื่องจากยังไม่ได้มีการทดลองต่อโหลดเข้ากับระบบ

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ  $\Delta$  ดังรูปที่ 3.55 เข้ากับระบบพบว่ารูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.10

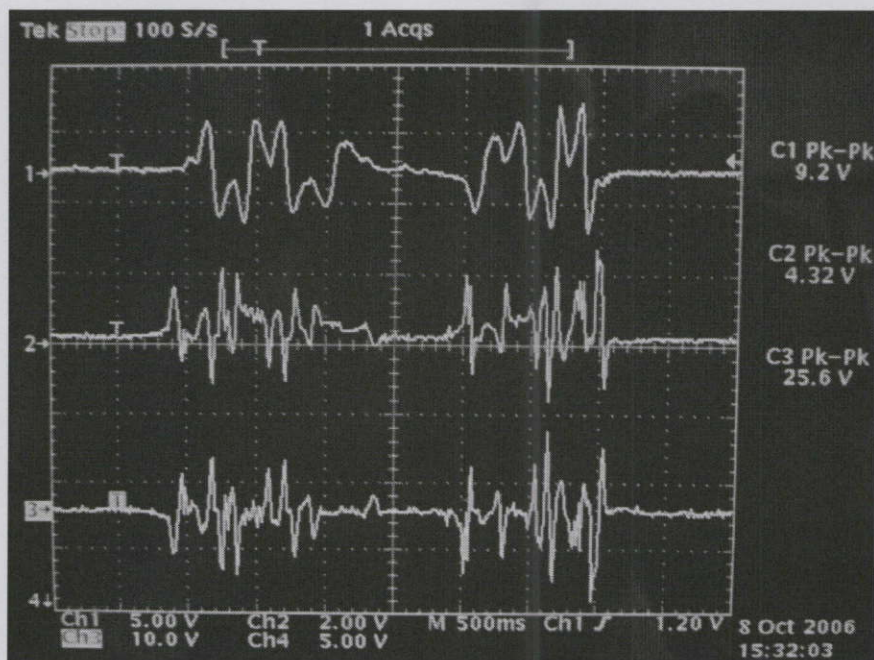


รูปที่ 4.10 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 18.8 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 4.38 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y ที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 9.8 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 3.39 V ส่วนกำลังไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถวัดได้เนื่องจากยังไม่ได้มีการทดลองต่อโหลดเข้ากับระบบ

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ Y และต่อเข้ากับหม้อแปลง Step up ดังรูปที่ 3.56 พบว่า รูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y และหม้อแปลง Step up

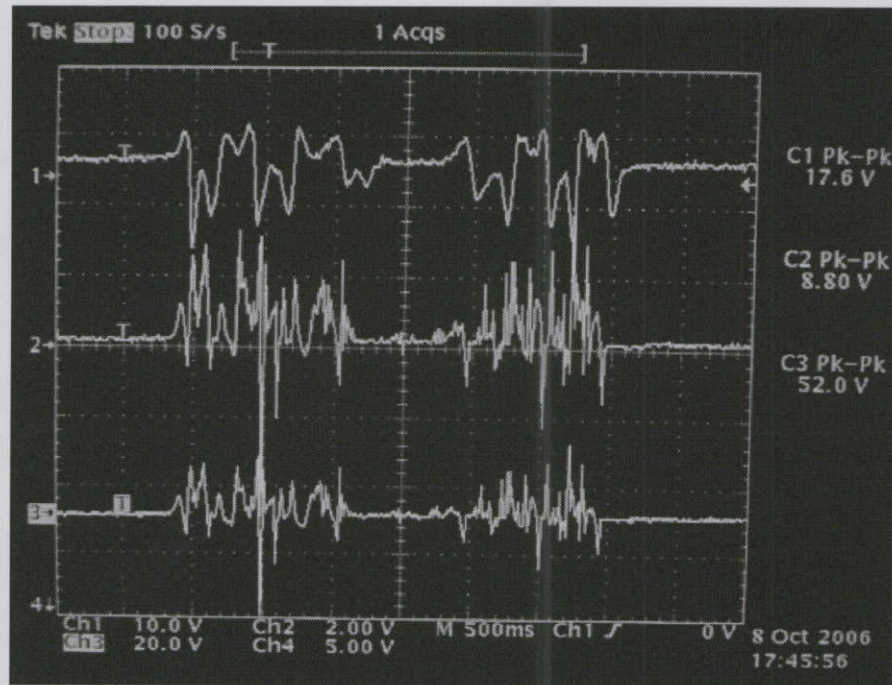
จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{P-P}$  ของเฟสอยู่ที่ 9.2 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 1.15 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y ที่มีค่าแรงดัน  $V_{P-P}$  ของเฟสอยู่ที่ 4.32 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 0.648 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 3 คือแรงดันจากหม้อแปลง Step up ที่มีอัตราเพิ่มแรงดันที่ 6.11 เท่า ซึ่งพบว่าค่าแรงดัน  $V_{P-P}$  ของเฟสอยู่ที่ 25.6 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 2.52 V

แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังเกิดขึ้นทั้งที่ผ่านไดโอดที่อยู่ในภาคเรียงกระแส ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จากขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝง

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ  $\Delta$  และต่อเข้ากับหม้อแปลง Step up ดังรูปที่ 3.57 พบว่า รูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  และหม้อแปลง Step up

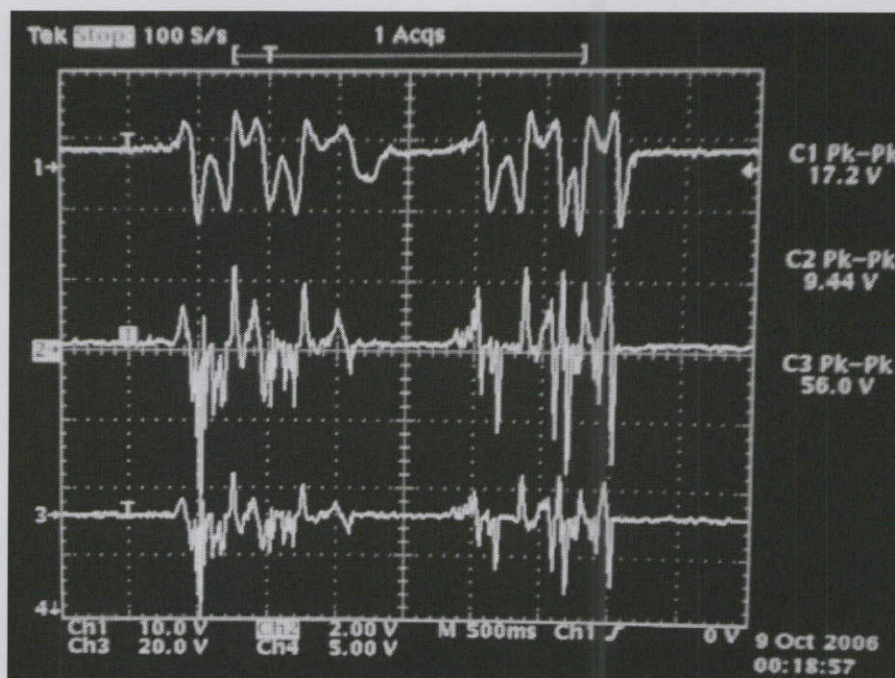
จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 17.6 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 3.27 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  ที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 8.80 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 0.77 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 3 คือแรงดันจากหม้อแปลง Step up ที่มีอัตราการเพิ่มแรงดันที่ 6.11 เท่า ซึ่งพบว่าค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 52.0 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 4.6 V

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านลบเกิดขึ้นทั้งที่ผ่านไดโอดที่อยู่ในภาคเรียงกระแส ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จากขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝง

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ  $\Delta$  และต่อเข้ากับหม้อแปลง Step up แบบ Center Trap ดังรูปที่ 3.58 พบว่า รูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  และหม้อแปลง Step up แบบ Center Trap

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 17.2 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 3.74 V

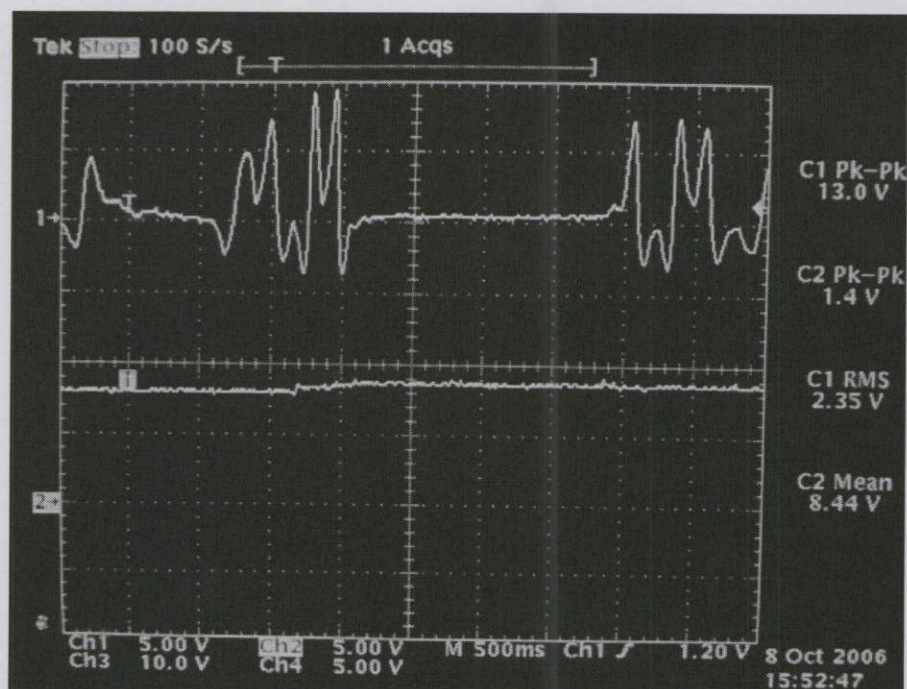
ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  ที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 9.94 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 0.724 V

ส่วนช่องสัญญาณที่ 3 คือแรงดันจากหม้อแปลง Step up ที่มีอัตราเพิ่มแรงดันที่ 6.11 เท่า ซึ่งพบว่าค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่ 56.0 V และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่ 4.24 V

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านลบเกิดขึ้นทั้งที่ผ่านไดโอดที่อยู่ในภาคเรียงกระแส ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จากขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝง

### 4.3 ผลการทดลองแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ Y และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด  $2200\mu\text{F}/35\text{ V}$  ดังรูปที่ 3.59 พบว่า รูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y เข้ากับตัวเก็บประจุขนาด  $2200\mu\text{F}/35\text{ V}$

จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{P-P}$  ของเฟสอยู่ที่  $13.0\text{ V}$  และแรงดัน  $V_{RMS}$  ของเฟสอยู่ที่  $2.35\text{ V}$

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ Y ที่มีค่าแรงดัน  $V$  ของเฟสอยู่ที่  $8.44\text{ V}$

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้เป็น 1 เฟสแบบ  $\Delta$  และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด  $2200\mu\text{F}/\text{V}$  ดังรูปที่ 3.60 พบว่า รูปสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณหลังจากต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  เข้ากับตัวเก็บประจุขนาด  $2200\mu\text{F}/35\text{V}$

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าช่องสัญญาณที่ 1 คือแรงดันจากขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่  $29.6\text{ V}$  และแรงดัน  $V_{\text{RMS}}$  ของเฟสอยู่ที่  $4.92\text{ V}$

ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันจากวงจรแปลงสัญญาณแบบ  $\Delta$  ที่มีค่าแรงดัน  $V_{p-p}$  ของเฟสอยู่ที่  $15.2\text{ V}$  และแรงดัน  $V_{\text{RMS}}$  ของเฟสอยู่ที่  $3.67\text{ V}$

ส่วนช่องสัญญาณที่ 3 คือแรงดันจากหม้อแปลง Step up ที่มีอัตราการเพิ่มแรงดันที่  $6.11$  เท่า ซึ่งพบว่าค่าแรงดัน  $V$  ของเฟสอยู่ที่  $10.2\text{ V}$

#### 4.4 ประสิทธิภาพของต้นแบบเครื่องแปลงพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของต้นแบบเครื่องแปลงพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น นั้นจะแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์กำลังงานจากขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ต้องใช้ในขดลวดเฟืองแม่เหล็ก โดยในการวิเคราะห์นี้จะมีการเปรียบเทียบอัตราส่วนพลังงานในการให้กำเนิดพลังงานของขดลวดเหนี่ยวนำ

##### 4.4.1 กำลังงานที่ใช้ในการยกกล่องเฟืองแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขการจำลองการเคลื่อนที่จากคลื่นน้ำทะเลจริง

จากหัวข้อที่ 3.2.1 กำลังงานที่ต้องใช้ในการยกกล่องเฟืองแม่เหล็กนั้นถือได้ว่าเป็นกำลังงานขาเข้าของระบบ (Input power) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองการเคลื่อนที่จากคลื่นน้ำทะเลจริงที่มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองที่ 3.8 s จะพบว่ากำลังงานที่ใช้ในการยกกล่องเฟืองแม่เหล็กเป็น 68.61 W

##### 4.4.2 กำลังงานที่ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำ

เมื่อกำลังแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนที่จะทำให้มีสนามแม่เหล็กไปตัดผ่านขดลวดที่ Stator ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากขดลวดทั้งสองนั้นเราจะทำการวัดแรงดันสูงสุดตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้าค่าคงที่จากนั้นก็จะสามารถคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (89)

$$\langle P_{out} \rangle = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (89)$$

โดยที่

- $\langle P_{out} \rangle$  คือค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากขดลวด
- $V$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขดลวด ซึ่งตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานคงที่

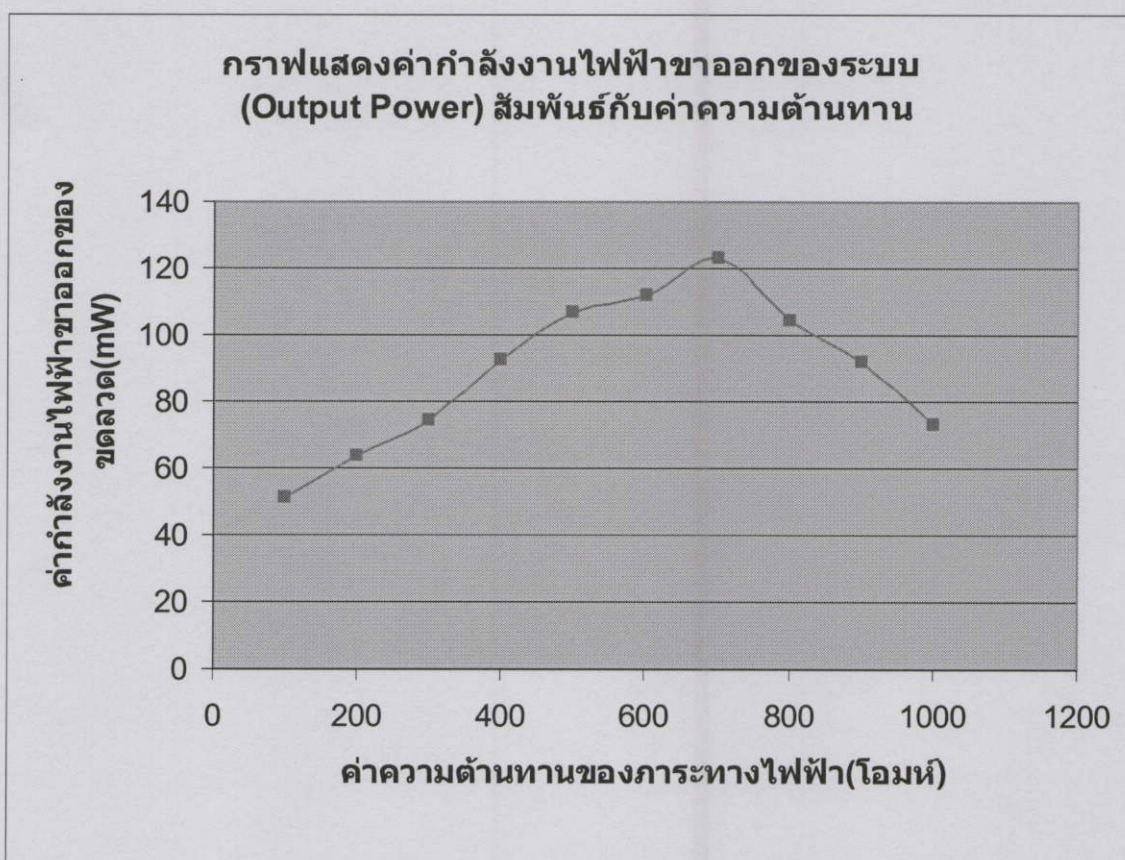
$I$  คือค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งถูกจ่ายให้ตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานคงที่

$R$  คือค่าความต้านทานไฟฟ้า

จากสมการที่ (89) จะพบว่าเพื่อความสะดวกในการวัดนั้นเราจะทำการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานคงที่ ซึ่งทราบค่าความต้านทานอยู่แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังงานไฟฟ้าขาออกของระบบ (Output power) สัมพันธ์กับค่าความต้านทานที่จ่ายให้ของขดลวดเหนี่ยวนำ

R ( $\Omega$ )	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\langle P_{out} \rangle$ mW	50.98	63.97	74.17	92.55	106.59	112.13	123.11	104.52	92.17	73.03



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากำลังงานไฟฟ้าขาออกของระบบ (Output power) สัมพันธ์กับค่าความต้านทานที่ขดลวดเหนี่ยวนำจ่ายให้

#### 4.4.3 กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำจากการวัดด้วยตัวเก็บประจุ

กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำจากการวัดด้วยตัวเก็บประจุทำได้โดยการต่อเก็บประจุเข้ากับวงจรแปลงแบบวาย และแบบเคลด้า เข้ากับตัวเก็บประจุขนาด  $2200\mu\text{F}/35\text{V}$  โดยที่แรงดันสูงสุดที่วัดได้จากวงจรแปลงแบบวายมีค่า  $8.44\text{ V}$  ส่วนวงจรแปลงแบบเคลด้ามีค่า  $10.20\text{ V}$  ซึ่งวงจรจะซาตที่เต็มภายใน  $2.326\text{ s}$  และ  $3.476\text{ s}$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณพลังงานขาออกได้จากสมการพลังงานในตัวเก็บประจุดังนี้

$$U = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2$$

โดยที่  $U$  คือพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุ

$C$  คือค่าความเก็บประจุไฟฟ้า

$\Delta V$  คือค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ดังนั้นพลังงานที่ได้จะเป็น

$$P = \frac{1}{2} \frac{C (\Delta V)^2}{t}$$

โดยที่  $t$  คือเวลาที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานในตัวเก็บประจุ

จากผลการคำนวณพบว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบด้วยวงจรแปลงแบบวายมีค่ากำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ  $78.35\text{ mW}$  ส่วนวงจรแปลงแบบเคลด้ามีค่ากำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ  $114.44\text{ mW}$  ตามลำดับ

#### 4.4.4 กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้ง

กำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้งในการให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าหมายถึง อัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ขดลวดจากขดลวดเหนี่ยวนำต่อต่อพื้นที่ติดตั้งของระบบที่สามารถให้ได้ ซึ่งสามารถหาจากการนำค่าต่างๆ ในหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2 มาคำนวณค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (90)

$$P_A = \frac{\langle P_{out} \rangle}{A} \times 100\% \quad (90)$$

โดยที่

$P_A$  คือกำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้ง

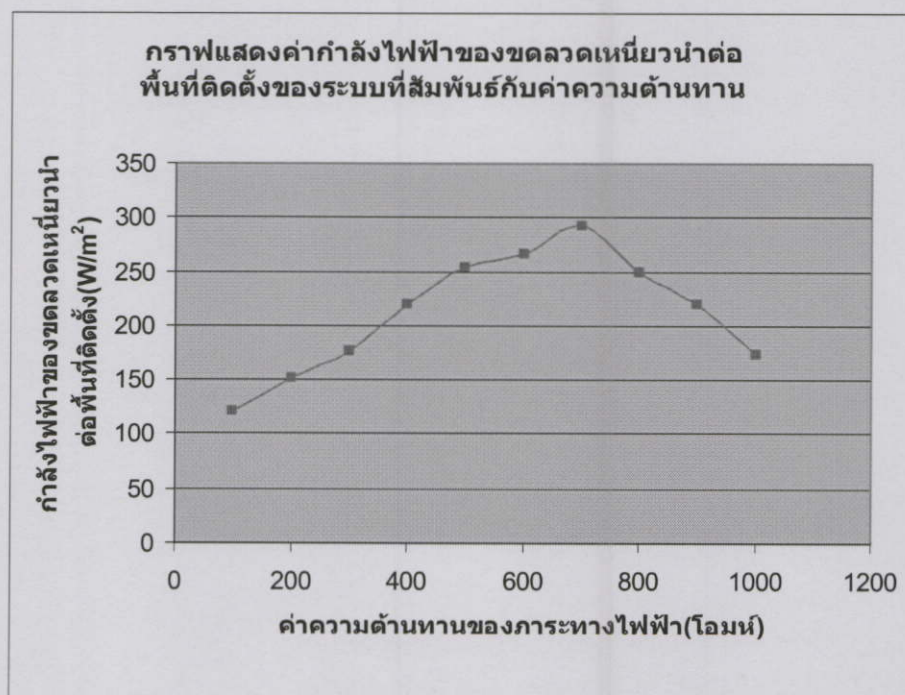
$\langle P_{out} \rangle$  คือค่ากำลังงานเฉลี่ยไฟฟ้าที่ออกมาจากขดลวดเหนี่ยวนำ

$A$  คือพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ

จากสมการที่ (90) จะพบว่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถจ่ายให้ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ติดตั้งเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้า

R ( $\Omega$ )	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$P_A$	121.38	152.31	176.60	220.36	253.79	266.98	293.12	248.86	219.45	173.88



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้า

#### 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองเก็บผลของพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแนวตรง ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับ 3 เฟสแบบซิงโครนัสนี้ พบว่าผลของแรงดันที่ได้จากของขดลวดค่อนข้างสูงกว่ารูปสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยจะสามารถสังเกตได้จากกราฟที่จำลองได้กับที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลดังรูปที่ 3.53 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าผู้ทดลองได้ทำการจำลองสัญญาณเอาท์พุทที่คาบเวลา 4.5 s เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของรูปสัญญาณกับความถี่ของพลังงานที่ใส่เข้าไป ซึ่งพบว่ารูปสัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกันเมื่อชุกเกียร์แม่เหล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ในช่องสัญญาณที่ 2 และ 3 จะสังเกตเห็นว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านลบเกิดขึ้นทั้งที่ผ่านไดโอดที่อยู่ในภาคเรียงกระแส ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จากขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่มีค่าความเหนี่ยวนำแฝง

กำลังงานขาออกของเครื่องแปลงพลังงานกลจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานที่ขดลวดต้องจ่ายให้ ซึ่งถือว่าเป็นภาระทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งของระบบ โดยที่ค่าความต้านทานที่เหมาะสมที่ขดลวดเหนี่ยวนำสามารถจะจ่ายได้อย่างเหมาะสมจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานภายในของขดลวด และคาบเวลาที่เลือกมาคำนวณค่ากำลังงานกลขาเข้านั้นเลือกมาจากค่าความถี่ที่ใช้ในการให้กำเนิดกำลังงานไฟฟ้าจากขดลวด ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบขดลวดจากแรงดันที่ต้องการ โดยที่เราสามารถสังเกตการณ์เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของขดลวดได้จากตารางที่ 4.2

ในการทดลองให้กำเนิดพลังงานด้วยเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่แนวตรงพบว่าสามารถจ่ายแรงดันได้ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ แต่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากขดลวดที่พันเอาไว้กับ Stator มีความต้านทานที่ต่ำมากทำให้เมื่อนำภาระทางไฟฟ้ามาต่อจะทำให้แรงดันตกคร่อมที่ภาระทางไฟฟ้าเป็นส่วนมาก ทำให้มีกระแสไหลผ่านภาระทางไฟฟ้าน้อย

## บทที่ 5

# สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาการเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสแบบเคลื่อนที่เชิงเส้นจากต้นแบบเดิม โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างแหล่งพลังงานสำรองในอนาคต ซึ่งในการพัฒนาระบบจะเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของระบบเดิม รวมถึงทำการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนต่างๆขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบดังนี้

1. การพัฒนาเทคนิคการออกแบบกล่องเฟืองแม่เหล็กถาวร ได้ทำการออกแบบกลไกการทำงานเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการจัดวางแม่เหล็กถาวรและขั้วแม่เหล็กให้มีขั้วที่เหมือนกันหันหน้าเข้าหากัน เพื่อให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กต่อเวลาสูงขึ้น ในขณะที่ชุดกล่องเฟืองแม่เหล็กเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันตลอดหนึ่งวน

2. การพัฒนาการสร้างขั้วแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านตลอดหนึ่งวน สามารถทำได้โดยการสร้างขั้วแม่เหล็กที่เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหนึ่งวน สนามแม่เหล็กให้มีทิศทางพุ่งเข้ามาที่ตลอด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมาช่วยในการสร้างแม่เหล็ก เพื่อความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณตลอดหนึ่งวน ทำให้แรงดันและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กำลังงานขาออกของระบบมีค่ามากขึ้น

3. การพัฒนาการออกแบบกลไกการทำงานเชิงกลสำหรับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำให้สามารถทำการทดลองได้สะดวกมากขึ้น ในการพัฒนาได้ใช้หลักการออกแบบระบบส่งกำลังงานกลจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ถูกห่อหุ้มเพื่อเพิ่มกำลังงานและลดความเร็วรอบด้วยกล่องเกียร์ห่อหุ้มและจะส่งกำลังงานต่อไปยังล้อจกยานด้วยสายพานคู่ เพื่อให้ล้อจกยานช่วยชักรถกล่องเฟืองแม่เหล็กผ่านสายสลิง หลังทำการทดสอบพบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

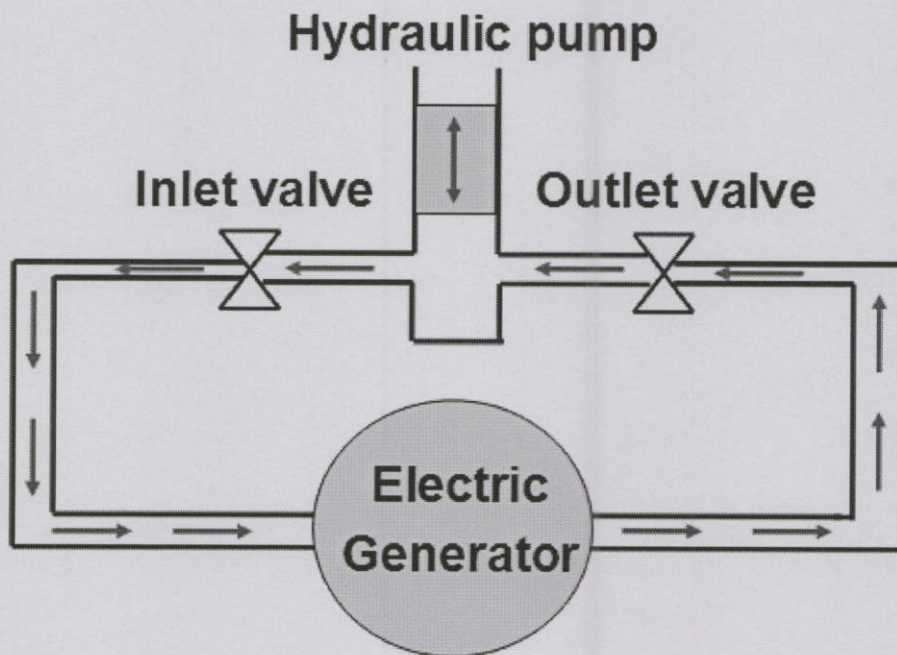
4. การออกแบบและสร้างวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องแปลงพลังงานจากคลื่นน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าจะใช้หม้อแปลงในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและใช้ไดโอดในการเรียงกระแสเพื่อจัดรูปสัญญาณไฟฟ้าก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปทำการดริบเปิดของสัญญาณด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งานในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรง

5. การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญในการวิเคราะห์กำลังงานขาออกจะใช้เครื่องออสซิลโลสโคปวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในโหมดที่เหมาะสมกับวงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

## ภาคผนวก ก

### ไฮดรอลิกเจนเนอเรเตอร์

ไฮดรอลิกเจนเนอเรเตอร์ (Hydraulic generator) คืออุปกรณ์ที่ช่วยแปลงพลังงานกลจากการเคลื่อนที่ของลูกเลื่อนที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาคล้ายกับลูกสูบให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ไฮดรอลิกเจนเนอเรเตอร์จะประกอบไปด้วยชุดไฮดรอลิกปั๊มและเจนเนอเรเตอร์ โดยที่พลังงานกลจากการเคลื่อนที่ของลูกเลื่อนจะไปเพิ่มแรงดันภายในระบบไฮดรอลิก ซึ่งจะสะสมความดันภายในของไหลและเก็บไว้ในรูปของพลังงานศักย์ จนกระทั่งมีความดันมากพอก็ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแรงดันซึ่งจะไปขับใบพัดที่ต่ออยู่กับไดนาโมของระบบคังรูป



เมื่อพลังงานกลจากลูกเลื่อนเกิดการบีบแรงดันให้กับระบบไฮดรอลิกปั๊ม Inlet valve จะเปิดออกของไหลจะไหลเข้าสู่ระบบและเมื่อแรงดันภายในมีมากพอของไหลก็เคลื่อนที่ผ่าน ใบพัดของเจนเนอเรเตอร์ และเมื่อลูกเลื่อนเคลื่อนที่ขึ้นแรงดันภายในหัวลูกสูบจะมีค่าต่ำลงทำให้ของไหลไหลกลับมาที่หม้อพักของไหล ทำให้เจนเนอเรเตอร์หมุนและได้พลังงานไฟฟ้าออกมา

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bent Sorensen. Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impact, economy and planning aspect 3<sup>rd</sup> ed. USA: ELSEVIER Academic Press, 2005, ISBN 0-12-656153-2
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wave power.](http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power)
- [3] <http://www.fujitaresearch.com>
- [4] <http://www.wavegen.co.uk>
- [5] <http://www.Ocean Power Delivery.or.uk>
- [6] <http://www.wavedragon.net>
- [7] <http://waveswing.wvxs.net>
- [8] <http://www.jemtec.co.jp>
- [9] <http://www.Ocean Power Technology.co.jp>
- [10] <http:// aquaenergygroup.com>
- [11] <http://www.wave-power.com>
- [12] Mats Leijon, "Multiphysics Simulation of Wave Energy to Electric Energy Conversion by Permanent Magnet Linear Generator", IEEE transaction on energy conversion, Volume 20, No. 1, March 2005.
- [13] Oskar Danielsson, Karin Thorburn, Mikael Erikson and Mats Leijon. "Permanent magnet fixation concepts for linear generator.", Fifth European wave energy conference 17-19 sept, 2003.
- [14] Kai-Uwe Graw , A breakwater to harness wave energy-the asian approach to connect coastal protection with energy production , School of Bergische University , Germany September 1994.
- [15] Chiang C.Mai , White paper on wave energy research , Department of civil and environment engineering , October 2006.
- [16] M. Leijon, O. Danielsson, M. Eriksson, K. Thorburn, H. Bernhoff, J. Isberg , J. Sundberg, I. Ivanova, E. Sjöstedt, O. gren, K.E. Karlsson and A. Wolfbrandt." An electrical approach to wave energy conversion.", Sciencedirect, Renewable Energy , Volume 31, Issue 9, July 2006, Pages 1309-1319.

- [17] K. Rhinefrank, E.B. Agamloh, A. von Jouanne, A.K. Wallace, J. Prudell, K. Kimble, J. Aills, E. Schmidt, P. Chan, B. Sweeny and A. Schacher, " Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy.", Sciencedirect, Renewable Energy, Volume 31, Issue 9, July 2006, Pages 1279-1298 School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-3211, USA, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-3211, USA.
- [18] Magdy F. Iskander. Electromagnetic field and wave. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall. 1992, ISBN 0-13-249442-6.
- [19] Peter Campbell. Permanent magnet materials and their application. Cambridge , Great Britain : Cambridge University Press. 1994 . ISBN 0-521-24996-1.
- [20] Theodore Wildi. Electrical Machines, Drives, and Power System 5<sup>th</sup> ed. New Jersey : Prentice Hall.2002, ISBN 0-130-093083-0.
- [21] Raymond A. Serway and John W. Jewett ,Jr. Principle of physics ,3 edition Singapore : Thomson brook/cole. 2002 , ISBN 981-243-042-3.
- [22] Michael E. McCormick. Ocean engineering wave mechanics. United State of America : John wiley and Sons, Inc. 1973 , ISBN 0-471-58177-1.
- [23] I. Ivanova, O. Agren, H. Bernhoff, M. leijon. "Simulation of a 100 kW permanent magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion.", Fifth European wave energy conference 17-19 sept., 2003.
- [24] Mark E. Hazen. Exploring electronic devices, International ed. United State of America : Saunders college publishing. 1991, ISBN 0-030-53854-8.
- [25] ศาสตราจารย์ บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ. อนุกรมเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ 1 "เครื่องกลผ่อนแรง". กรุงเทพฯ, ประเทศไทย. โรงพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ. 1979.
- [26] <http://www.comsol.com>
- [27] <http://www.marine.tmd.go.th/wam.html>

ภาคผนวก ค ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

# Three phase-synchronous linear electric energy generators

U. Sangsamut, P. Thanomngam, A. Wichainchai

Department of Applied Physics, Faculty of Science,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

## Abstract

This research presents a design and a prototype of linear electric energy generator, for converting ocean wave energy to electric energy using law of magnetic induction. The prototype of linear generator has high efficiency but was design with a simple mechanism for easy maintenance. It is a clean technology since it converts ocean energy to electric energy without using any fuel. Therefore it is one of considerable alternative energy source available nowadays.

The main part of the prototype is the design of three phase generator coils for generating three phase synchronous electricity. The signals from the three generator coils were analyzed which are compared with signal from mathematic modeling. The testing system has 0.42 m<sup>2</sup> working area. The ocean wave was modeled using electric motor and the generated mechanical wave high and frequency is about 0.7 m and 0.5 Hz respectively. The output signal of the testing system has about 12 volts peak to peak with 0.5 ampere per phase. The experimental result showed that the electrical signal directly related on the coils, gearbox and movement of the permanent magnet set. As a result, the output energy per phase of the system is 8.5 watt.

**Keyword:** Linear permanent magnet electric generator, Electric generator, Linear motor.

## 1. Introduction

Nowadays, world energy problem is the most importance problem since petroleum which has been used as a major energy source in the last decade running out in a very short time. The usage of petroleum fuel is also the main cause of pollution which introduces global warming. As a result, researches and developments relating to renewable energy source, such as nuclear energy, solar cell energy, dam turbine energy, wind energy and etc., are the main interest in order to replace the petroleum fuel. This research introduces another way for the generated the new renewable energy resource to use as a future energy source.

When we think about system that converts mechanical wave energy to electrical energy, technical difficulty seems to be a major thing to be concerned. The system itself is also not worthwhile in the cost of construction. Recently, many research papers have presented a principle of linear generator system which emphasize on direct energy conversion using magnetic induction principle. Ivanova and co-worker designed the 100kW permanent magnet linear generator (PMLG) which had octagonal shape using computer simulation in 2003[1]. In 2005, their works are focused on the PMLG in deep water [2]. After that Rhinefrank and co-worker simulated and built the 50 W power output of PMLGB using 5 hp electrical motor as input power source and NdFeB-magnet as the magnetic source in 2006 [3]. These researches have been proved that this system can be made and be operated.

This paper presents a prototype of linear electric energy generator which can generate 25.5W electricity. The generator consists of following components:

1. Stator which is used for the induced coil support.
2. Rotor or Piston which is a permanent magnet set (Electromagnetic gearbox) that move upward and downward depends on buoy direction.
3. Buoy float on water surface which push and pull the moving piston when wave amplitude changes.
4. Rope which connects buoy and piston together.
5. End stop is a limiter for limiting piston movement and decreasing crashing force between piston and supporter.
6. Spring which helps piston movement to get back to its mechanical equilibrium point faster.
7. Support which is a base of system, transfix the system to the ground of the ocean.

When waves travel to the buoy, the buoy moves upward and downward depends on the changing of wave amplitude. The piston is pulled upward by the rope that connected between the piston and the buoy.

The changing of magnetic flux (from the piston movement) induces the copper coils at the stator to generate the electromotive force (EMF) between the ends of the coils. The output current will occur if the ends of the coils are connected with electrical load. By this simple mechanism, the system can generate

electrical energy without using any fuel. It is also easy to maintenance.

The cylindrical shape generator for converting ocean wave energy to electrical energy composed of 7 permanent magnets. The piston is driven with electric motor rotation to model the wave motion. The stator has symmetrical coils which are wrapped around outside and encircle the piston. Relating moment of the piston with the stator causes the electric induction in the coils. The general structure of the linear generator buoy is presented in figure 1.

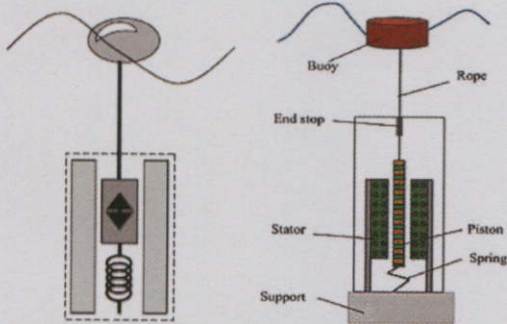


Figure 1: The general structure of linear electric energy buoy generators.

## 2. Method

### 2.1 Electromotive Force Induction in the Coils by Michael Faraday Principle.

When the magnetic field lines cross through the cross section area of the coils which has magnetic flux density changing in times, it produces electric potential at the ends of the coils. Due to the electromotive force induced by magnetic flux density, electrons in the coils move follow the right hand rule. When electrical load is connected to the ends of the coils, the currents is generated in the circuit. The electromotive force at the ends of the coils can be explained by the following equation.

$$V_{emf} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$V_{emf}$  is the electromotive force.

$N$  is the number of turns of the coils or the number of electromagnetic gearbox's poles.

$\phi$  is magnetic flux .

$t$  is the time in which the magnetic flux amplitude is changed.

Vector  $B$  and normal vector of the coil loop area  $A$  are designed to be parallel. In other words the angle between these vectors must be zero. The relation between  $B$ ,  $A$  and  $V_{emf}$  is shown in equation (2).

$$V_{emf} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

Form equation (2),  $B$  is magnetic flux density, the changing of term  $dB/dt$  depends on the number of electromagnetic gearbox's poles. It highly effects to the electromagnetic force  $V_{emf}$ . The more magnetic poles the more changing in magnetic flux density transient and the change of magnetic flux  $d\phi/dt$  is also increased.

### 2.2 The Changing of Magnetic Flux Density at the Coils with Position of the Magnet Poles.

The permanent magnet used in the electromagnetic gearbox was made from ferries magnet, ferromagnetic material. The magnetic flux density is decreased by inversed square with the distance between magnetic source and observed position. This relation is shown in the following equation.

$$B = \frac{\mu B_0}{r^2} \quad (3)$$

$B$  is magnetic flux density at any specific position.

$B_0$  is magnetic flux density at the surface of magnetic source.

$\mu$  is permeability of medium.

$r$  is the distance between magnetic source and observed position.

This research used the permanent magnet which is the same type as in the general speakers. The magnet was provided by Obom Industry Corporation. It has 8 inches diameter with 0.09 Tesla of maximum flux density in direction of normal vector to the cross section area.

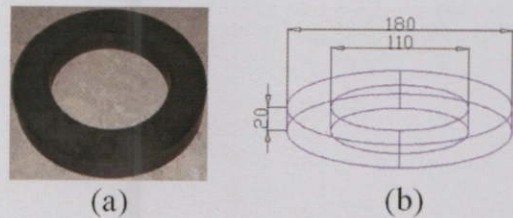


Figure 2: (a) Permanent magnet. (b) Dimension of permanent magnet.

### 2.3 Sinusoidal Wave Equation with Motion of Piston

From basic mechanism of this system as mentioned before the electromagnetic gearbox movement depends on the changing of amplitude changing in upward and downward direction. The characteristic of amplitude changing in time is a sine function. In the real situation, the movement of electromagnetic

gearbox may not be in phase with the phase of wave traveling to the buoy. This is because of 4 reasons. Firstly, the traveling wave is multi frequency wave. Secondly, the rope has elasticity property. Thirdly, the buoy force and magnetic gearbox weight is unbalanced. Lastly, the wave amplitude is larger than displacement of piston. All of these problems can be solved by mechanical analysis and buoy design.

In motion modeling, the linear electric generator was assumed to have using ideal characteristic of buoy moving (sinusoidal movement). The piston has to transfix with the rope, so the equation of piston motion is sinusoidal wave equation. From Newton's second law of motion, the Piston displacement can be explained by the following equation.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{buoy} + F_{end} + F_{spring} + F_{stop} + F_g \quad (3)$$

$F_{buoy}$  is the buoy force

$F_{end}$  is the magnetic pulling force

$F_{spring}$  is the spring force

$F_{stop}$  is the end stop force

$F_g$  is the weight of piston

The buoy displacement is changed with the traveling wave amplitude. Since the motion of the gearbox was considered as simple harmonic, the period ( $T$ ) of the motion which is directly related to the period of the traveling ocean wave can be explained by this equation.

$$T = \left[ \frac{-4\pi^2 m x_{max} \sin(kx - \omega t + \phi)}{F_{buoy} + F_{end} + F_{spring} + F_{stop} + F_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$T$  is a period of the piston motion.

$m$  is total mass of the buoy, the rope and the piston.

$k$  is the electromagnetic gearbox pit.

$x$  is vertical distance between the magnetic pole and the stator.

$x_{max}$  is maximum amplitude of the displacement (Wave height).

$\omega$  is angular frequency of the ocean wave.

$t$  is time of the traveling wave.

### 3. System Design.

#### 3.1 Electromagnetic Gearbox Design

Magnetic iron pole (pole shoe) was designed to maximize the magnetic field at the coils and to decrease the air gap between permanent magnet and stator (PVC pipe). Without magnetic iron pole, this system has 12 mm. air gap. The air gap was reduced to about

1 mm with the magnetic iron pole. The pole shoe design is presented in figure 3

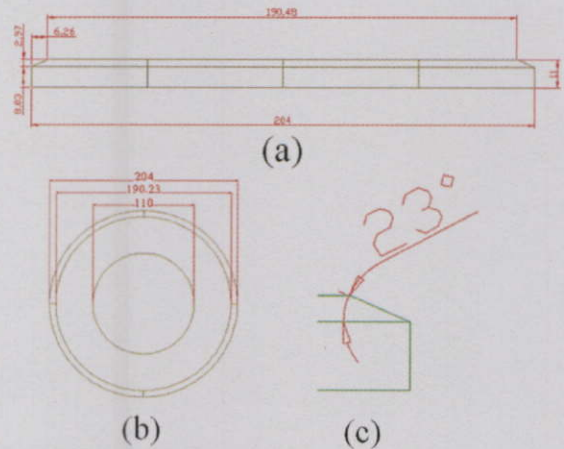


Figure 3:(a) Side view of the pole shoe in mm. unit. (b) Top view pole of the pole shoe in mm. unit. (c) The angle of pole shoe that to constrain the magnetic field

The arrangement of the electromagnetic gearbox components was designed in a way that the overlaid permanent magnets were faced the same pole to each other, as shown in figure 4 (a). This arrangement caused a higher gradient field of the electromagnetic gearbox. The order of electromagnetic gearbox components from top to bottom are the pole shoe, the permanent magnet and the separate plate respectively, as shown in figure 4 (b).

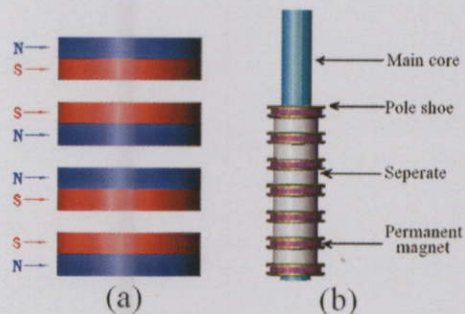


Figure 4 (a) Magnetic pole arrangement. (b) Electromagnetic gearbox.

After the electromagnetic gearbox components are combined, the electromagnetic flux density at the coils position was increased from 0.09 Tesla to 0.12 Tesla.

#### 3.2 Coils and Stator Design.

The electric generated coils design must be related to the pole shoe design to create the maximum magnetic field at the coils. The electric generated coils should be designed based on the electrical power needed and appropriate with the electromagnetic gearbox design.

In this research, mechanical ocean wave energy must be converted to three phase synchronous electricity. The main equation used for designing the pit of the coils and the gearbox in order to generate the three phase synchronous electricity is presented in equation (5).

$$q = \frac{\tau_s}{3a_s} \quad (5)$$

$\tau_s$  is the pit of the gearbox

$a_s$  is the pit of coils

In this design, we fixed the parameters as follow:

$$\tau_s = 90\text{mm}$$

$$a_s = 20\text{mm}$$

So

$$q = \frac{3}{2}$$

Value  $\frac{3}{2}$  of parameter  $q$  means that the stator has 3 set of three phase coils (3 coils with different phase in each coil) cover 2 zones of magnetic pole. The dimension of PVC pipe which is used as a stator is shown in figure 5. The stator consists of 30 coils for three phases. Therefore there are 10 sets of coils per phase. The coil groove is 10 mm. thick and the distance between each groove is also 10 mm.

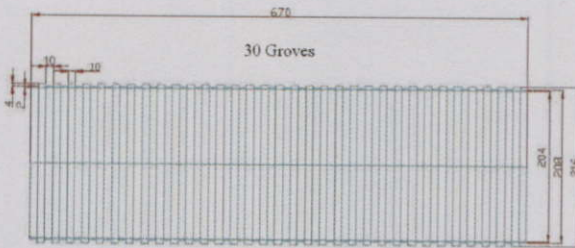


Figure 5: The side view of PVC pipe which is used to be a stator

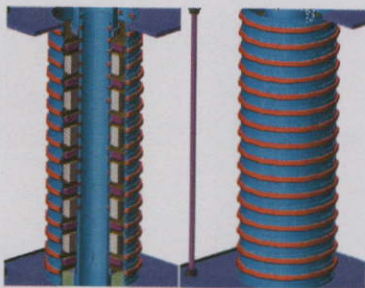


Figure 6: Cross section and isometric view of the permanent magnet linear generator.

Since the permanent magnet has Toroid shape, the pilot stator core made from 3.5 inches PVC pipe can be inserted to the

electromagnetic gearbox. The stator and the pilot stator core are placed at the same level. Figure 7 showed the components of the permanent magnet generator.

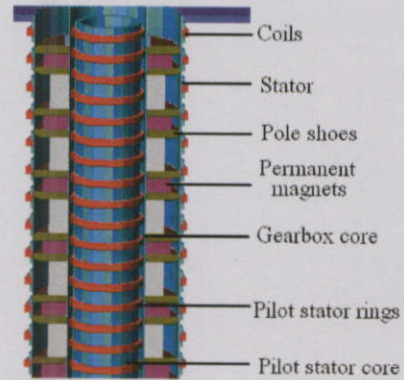


Figure 7: The main permanent magnet linear generator components

The three phase coils is shown in figure 8.

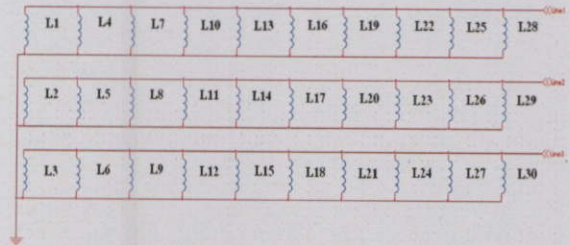


Figure 8: three phase coils circuit connecting.

According to Michael Faraday principle, the electromotive force voltage  $V_{emf}$  depends on a number of the coil turns, cross section area of coils, air gap and changing in magnetic flux density transient. This research designed the 12 voltages three phase synchronous coils using copper coils number 27 (0.44 mm. in diameter) and 540 turns.

#### 4. The one phase voltage signal simulation.

From Michael Faraday's principle, the one phase voltage signal of the coil with electromagnetic gearbox condition can be explained in equation (6).

$$V_{emf} = \frac{-NA\mu B_0}{r^2} \frac{d}{dt} (\sin^{-2}(kx - \omega t + \phi)) \quad (6)$$

This work used sinusoidal waves (ideal ocean waves) as an input parameter to simulate the output voltage signal. The buoy equation of motion is shown in equation(0.1).

$$x = x_{max} \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (7)$$

The result of the simulation of one phase voltage signal can be illustrated in figure 9.

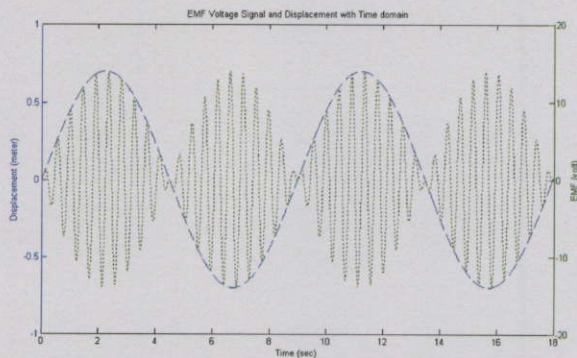


Figure 9: Graph of one phase voltage signal versus time showing the amplitude of buoy's motion.

### 5. The Three Phases Synchronous Voltage Signal of the Generator Prototype.

The testing condition of the three phase synchronous generator was setup to be closest to the ideal case which is 0.7 meter amplitude with 1.3 seconds or 0.76 Hertz period. This experimental condition was created by electric motor that is connected to wave motion modeling system. The experimental result of three phase synchronous voltage signals from the generator is about 12 volts peak to peak and 0.5 amperes per phase as shown in figure 10.

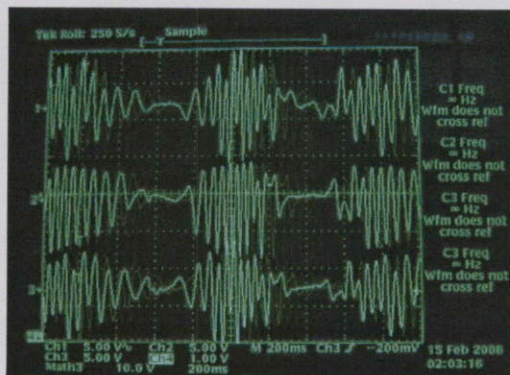


Figure 10: The result of the three phases synchronous voltage signals from the generator which is shown in 5 volts per division vertically and 200 milliseconds per division horizontally.

The voltage signal from the simulation and the experiment are different in period characteristic because inertia in the experiment effected the displacement of the piston. The peaks of voltage signals are increased and decreased by the time period due to the changing in magnetic flux density transient from piston displacement which depends on the pit length of gearbox and angular frequency of the traveling wave.

### 6. Conclusion

The amplitude of voltage signals from the experiment is varied by 3 main parameters, which are the number of turns of coils, the cross section area of the coils and changing in magnetic flux density transient. The time period of peak to peak voltage signals depends on the period of wave traveling to the buoy, the magnetic pole setting and the three phase synchronous generator's coils design. The total power from this three phase generator is about 25 Watts which is very low. In the real operation, the system is needed to be develop for higher efficiency. Magnetic material with higher magnetic flux will be used and the size of the generator will be larger for achieving high power output.

### REFERENCES

- [1] I. Ivanova, O. Agren, H. Bernhoff, M. leijon. "Simulation of a 100 kW permanent magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion.", Fifth European wave energy conference 17-19 sept., 2003.
- [2] I. Ivanova, H. Bernhoff, O. Agren, M. leijon. "Simulation generator for wave energy extraction in deep water," Sciencedirect, Ocean engineering, August 2005, Pages 1164-1678.
- [3] K. Rhinefrank, E.B. Agamloh, A. von Jouanne, A.K. Wallace, J. Prudell, K. Kimble, J. Aills, E. Schmidt, P. Chan, B. Sweeny<sup>b</sup> and A. Schacher, "Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy.", Sciencedirect, Renewable Energy, Volume 31, Issue 9, July 2006, Pages 1279-1298 School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-3211, USA, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-3211, USA .
- [4] M. Leijon, O. Danielsson, M. Eriksson, K.Thorburn, H. Bernhoff, J. Isberg , J. Sundberg, I. Ivanova, E. Sjöstedt, O. gren, K.E. Karlsson and A. Wolfbrandt. " An electrical approach to wave energy conversion.", Sciencedirect, Renewable Energy , Volume 31, Issue 9, July 2006, Pages 1309-1319.
- [5] Oskar Danielsson, Karin Thorburn, Mikael Erikson and Mats Leijon. "Permanent magnet fixation concepts for linear generator.", Fifth European wave energy conference 17-19 sept, 2003.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	อัมพุด แสงสมุทร
เกิดวันที่	23 มกราคม พ.ศ. 2528
สำเร็จการศึกษา	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนพระโขนงพิทยาลัย</li> <li>- ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</li> </ul>
ความสามารถ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เขียนแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Auto CAD และ Unigraphics NX สามารถ</li> <li>- ควบคุมเครื่องกัด กลึง เชื่อม และสามารถทำ CAM ใช้ CNC ได้</li> <li>- การออกแบบวงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Or CAD</li> <li>- ตรวจสอบและวัดค่าทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ซิลิกอน Fabrication</li> <li>- ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ฟิล์มบางในห้องคลีนรูม ได้แก่ AFM SEM XRD XRF</li> <li>- ออกแบบและสร้างสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรและขดลวดเหนี่ยวนำ</li> </ul>
งานที่สนใจ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เทคโนโลยีการสร้างแหล่งพลังงานทดแทน</li> <li>- เทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์</li> </ul>