



กังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
WIND YURBINE IN GENNERATOR ELECTRICCAL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๖๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

047574

กังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
WIND YURBINE IN GENNERATOR ELECTRICCAL



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทชั้นปีการศึกษา 2547

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล วิทยาเขตชุมพร

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง กังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

WIND TURBINE IN GENERATOR ELECTCAL

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติ สุขเอียด รหัสประจำตัว 45515970

2. นายพิสุทธิ แหวนเพชร รหัสประจำตัว 45515986

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลมเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

กิตติ สุขเอียด 45515970
 พิสุทธิ แหวนเพชร 45515986
 อ.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้พลังงานที่มีอยู่นั้นได้หมดไปเรื่อย ๆ เช่น พกน้ำมัน , ถ่านหิน เป็นต้น ส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ การคิดค้นพลังงานทดแทนจึงมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก ในปัจจุบันและอนาคต ส่วนในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงพลังงานลมที่จะมาใช้เป็นพลังงานทดแทน พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป

พลังงานลมเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด เหมาะที่จะนำมาเป็น พลังงานทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้นในการทำกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าก็เป็นส่วนที่ช่วย ทดแทนและประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่งต่อไปจะกล่าวถึง

กังหันลมแกนนอนแบบ Airfoil ชนิด 3 ใบเป็นทางเลือกหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานลมมาเป็น พลังงานไฟฟ้าโดยใช้โคแอร์จรอยนต์ที่ออกแบบความเร็วลมที่ 4.0 m/s เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของ กังหันลมแกนนอนAirfoil ชนิด 3 ใบจากผลการทดลองปรับมุมใบกังหันที่มุม 10, 15, 20, 25 และ 30 องศา ผลปรากฏว่าที่มุม 20 องศา มีความเร็วรอบ 1,207 RPM โดยผ่านชุดเฟืองทด จึงเลือกใช้มุมองศานี้ ในการทดลองที่ความเร็วลมต่างๆ 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, และ 5 m/s จากที่ความเร็วลม 5.0 m/s ผลิตไฟฟ้า ออกมา 150 มิลลิแอมแปร์ แรงเคลื่อนที่วัดได้ 2.5 โวลต์ มีความเร็วรอบ 1,200 RPM และมุม 20 องศา

WIND TURBINE IN GENERATOR ELECTRICAL

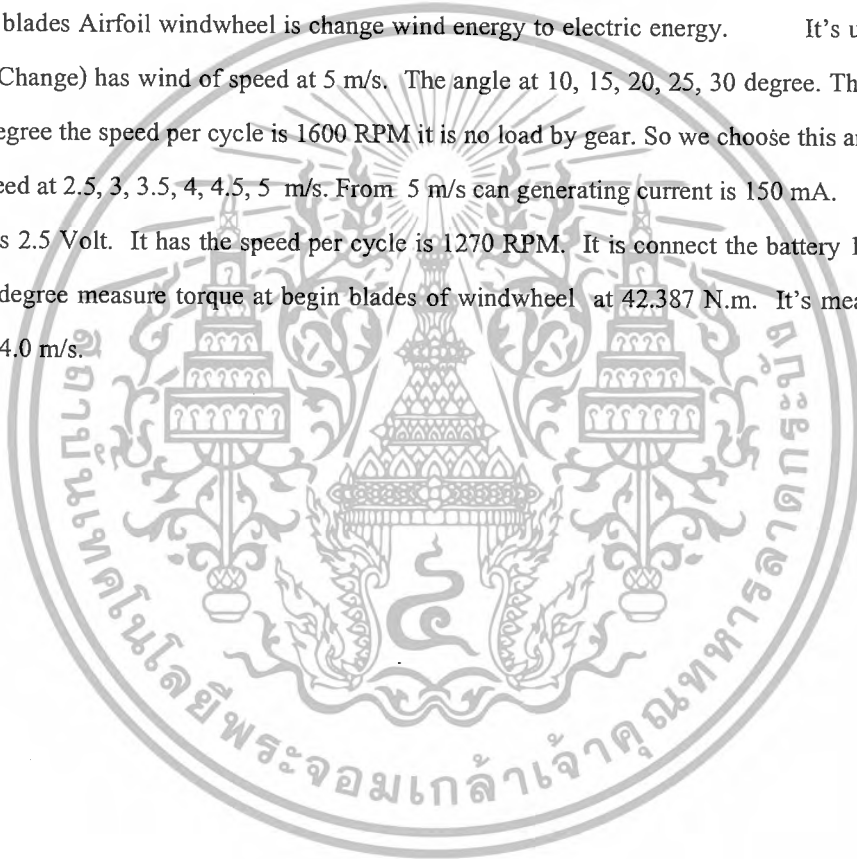
KITTI SUKAIAD	45515970
PISUT WAENPET	45515986
MR.PANYA DAUNGVILUX	ADVISOR

ABSTRACT

Now, The energy is reduce every day . Such as oil, coal. Is has effect to life. So the people think to save energy by find the compensation energy. It's importance to present and future. Wind energy is not exhaust. It's appropriate to use produce electric current by used wind wheel.

A three blades Airfoil windwheel is change wind energy to electric energy. It's used the generator (Di – Change) has wind of speed at 5 m/s. The angle at 10, 15, 20, 25, 30 degree. The result at the angle 20 degree the speed per cycle is 1600 RPM it is no load by gear. So we choose this angle for test a wind of speed at 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 m/s. From 5 m/s can generating current is 150 mA.

Voltage is 2.5 Volt. It has the speed per cycle is 1270 RPM. It is connect the battery 12 Volt. At the angle 20 degree measure torque at begin blades of windwheel at 42.387 N.m. It's measure at wind of speed is 4.0 m/s.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เพราะความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึง ซึ่งก็คือ อาจารย์ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณพี่ชัยรัตน์ เพชรศิริเจ้าหน้าที่ตึกเครื่องกลและขอขอบคุณเพื่อนภาควิศวกรรม อิเลคทรอนิกส์ที่ช่วยสอนการต่อวงจรทางไฟฟ้า ขอขอบคุณเพื่อนต่างกลุ่มทุก ๆ คน ที่มีน้ำใจมาช่วยใน สภาวะเร่งด่วนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้ง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่ เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาดและ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



ขอขอบพระคุณอย่างสูง
คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 การดำเนินการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 กังหัน	3
2.1 กังหันลม	5
2.2 ประสิทธิภาพของกังหันลม	10
2.3 ลม(WIND)	11
2.4 แหล่งกำเนิดของลม	12
2.5 ทิศทางและความเร็วของลม	13
2.6 การกระจายของความเร็วลม	14
2.7 ศักยภาพของพลังงานลม	15
2.8 การเลือกสถานที่ตั้งกังหันลม	16
บทที่ 3 ทฤษฎีและการออกแบบกังหันลม	19
3.1 แนวทางการออกแบบเบื้องต้น	19
3.2 การออกแบบทางพลศาสตร์	19
3.3 แรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหัน	23
3.4 คุณสมบัติของแรงบิดและกำลังงาน	23
3.5 ระบบส่งกำลัง	24
3.6 การคำนวณหาขนาดแอร์ฟอยล์และขนาดของกังหันลม	24
3.7 การคำนวณ	27
3.8 การคำนวณแรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์	30
3.9 การคำนวณหาอัตราเฟืองทด	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.10 โครงสร้าง	34
3.11 การคำนวณแรงที่กระทำต่อใบกังหัน	37
3.12 การคำนวณหาอายุการใช้งานของเบรริง	38
3.13 การคำนวณหาขนาดของเพลลา	39
บทที่ 4 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและขั้นตอนการทดลอง	40
4.1 ส่วนประกอบของกังหันลม	40
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	46
บทที่ 5 ผลการทดลอง	49
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์การทดลอง	70
ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน	
แนวทางในการแก้ปัญหา	
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกังหันลมแนวแกนนอนกับแนวแกนตั้ง	11
3.1 ค่า Upper และ Lower ของใบพัดชนิดต่าง ๆ	25
3.2 ค่า Upper และ Lower ของใบพัดชนิด NACA 4412 (%) ที่ Ordinate	28
3.3 ค่า Upper และ Lower ของใบพัดที่คำนวณได้ที่ Ordinate	29
5.1 บันทึกผลการทดลองที่มุม 10 องศา	49
5.2 บันทึกผลการทดลองที่มุม 15 องศา	52
5.3 บันทึกผลการทดลองที่มุม 20 องศา	56
5.4 บันทึกผลการทดลองที่มุม 25 องศา	59
5.5 บันทึกผลการทดลองที่มุม 30 องศา	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปกึ่งหันลมในยุโรปสมัยกลาง	3
2.2 กึ่งหันลมของรัสเซีย	4
2.3 กึ่งหันลมของเฮินฟีลด์ – แอนดรู	4
2.4 ระบบของกึ่งหันลม Mod – O	5
2.5 ระบบการติดตั้งของกึ่งหันลม Mod – O ที่ปลัมบรูก	5
2.6 ภาพด้านบนของกึ่งหันลมแบบ 2, 3, และ 4 ใบ	6
2.7 แบบของกึ่งหันลมหมุนในแนวตั้ง	7
2.8 กึ่งหันลมแบบแกนนอน	8
2.9 กึ่งหันลมแบบดัตช์	9
2.10 ลักษณะของใบพัดแบบเชล – วิง	9
2.11 กึ่งหันลมแบบพริ้นซ์ตันเชล – วิง	10
2.12 รูปการเกิดลมบกกลมทะเล	12
2.13 การเกิดลมภูเขาและลมหุบเขา	13
2.14 ทิศทางกระแสลมที่เกิดขึ้นบนโลก	13
2.15 รูปลักษณะทั่วไปของข้อมูลลม	14
2.16 กราฟวาระความเร็วลมชุมชนพรเจ็คต์ถึงปี 2541	14
2.17 ศักยภาพของพลังงานลมต่อปีบริเวณต่าง ๆ	15
2.18 ลักษณะผิวโลกที่มีผลต่อลม	16
2.19 ความเร่งเมื่อลมผ่านเนิน	16
2.20 ผลการบังลมของกึ่งหัน	17
2.21 การเลือกเนิน	17
3.1 แรงต่าง ๆ ที่กระทำที่แอร์ฟอยล์	19
3.2 แบบแอร์ฟอยล์ลักษณะต่าง ๆ	20
3.3 ค่าประกอบของแรงยกแรงลาก	21
3.4 SOLIDITY	22
3.5 การงอของใบพัด	23
3.6 ลักษณะของกำลังงานและแรงบิด	24
3.7 รูปแบบโครงสร้างของใบพัด	26
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม Power Factor	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง U/V กับค่า E (Essiciency Factor)	27
3.10 แอร์ฟอยล์	29
3.11 แรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์	30
3.12 ความสัมพันธ์ C_D กับอัตราส่วนของคอร์ด	31
3.13 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับค่าสัมประสิทธิ์ C_D, C_L	32
3.14 โครงถักรับแรง	34
3.15 ส่วนรับแรงดึงและแรงกด	35
3.16 ไดอะแกรมของแมกซ์เวลล์	35
3.17 ลักษณะแรงต่าง ๆ	36
3.18 แรงที่กระทำที่เพลลา	38
4.1 ใบกังหันลม	40
4.2 แอร์ฟอยล์	40
4.3 โครงสร้างใบ	41
4.4 ใบกังหัน	41
4.5 หน้าแปลน	42
4.6 ชุดเฟืองทด	42
4.7 ไคซาร์จ	43
4.8 โครงฐานรองรับชุดเฟืองทด	43
4.9 ประกอบชุดเฟืองทดกับ โครงฐาน	44
4.10 หางเสือ	44
4.11 โครงสร้างฐานรองรับ	45
4.12 กังหันลม	45
4.13 ปรับมุมใบกังหัน	46
4.14 การวัดลม	46
4.15 การวัดความเร็วรอบ	47
4.16 การวัดกระแสไฟฟ้า	47
4.17 การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า	48
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ	48
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ ที่มุม 10 องศา	49
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 10 องศา	50
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 10 องศา	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 10 องศา	51
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 10 องศา	51
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า ที่มุม 10 องศา	52
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วรอบ ที่มุม 15 องศา	53
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 15 องศา	53
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 15 องศา	54
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 15 องศา	54
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 15 องศา	55
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า ที่มุม 15 องศา	55
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วรอบ ที่มุม 20 องศา	56
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 20 องศา	57
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 20 องศา	57
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 20 องศา	58
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 20 องศา	58
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า ที่มุม 20 องศา	59
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วรอบ ที่มุม 25 องศา	60
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 25 องศา	60
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 25 องศา	61
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 25 องศา	61
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 25 องศา	62
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า ที่มุม 25 องศา	62
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วรอบ ที่มุม 30 องศา	63
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 30 องศา	64
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 30 องศา	64
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่มุม 30 องศา	65
5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า ที่มุม 30 องศา	65
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า ที่มุม 30 องศา	66
5.31 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วรอบ	66
5.32 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า	67
5.33 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า	68
5.35 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า	68
5.36 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันนี้ ประชากรของโลกเรานั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นผลให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และทรัพยากรธรรมชาติเหล่านั้นอย่างเห็นได้ชัด เช่นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งโดยมากจะใช้เชื้อเพลิงจากธรรมชาติ อาทิเช่น โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือถ่านหิน เป็นต้น โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งที่จำเป็นต้องมีเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก็ต้องใช้พลังงานจากน้ำมัน หรือ ก๊าซ แหล่งพลังงานเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่สิ้นเปลืองหรือที่เรียกว่า ทรัพยากรประเภทใช้แล้วหมดไป และโรงงานเหล่านี้ก็ได้ก่อตั้งเพิ่มมากขึ้นทุกวันเพื่อตอบสนองกับอุปสงค์ของประชากรโลกที่สูงขึ้นอย่างมาก และด้วยเหตุเหล่านี้เอง จะพบได้ว่าปัจจุบัน มีการรณรงค์การประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเราได้ตระหนักถึงปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการคิดค้นการนำพลังงานลมที่เป็นพลังงานที่สะอาด บริสุทธิ์ และใช้แล้วไม่หมดไป มาใช้ประโยชน์โดยการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากกระแสลมให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเราได้ทำการประดิษฐ์ และคิดค้นกังหันลมในแนวแกน โดยมีหลักการดังนี้

เมื่อกังหันลมรับลมจะเกิดแรงหมุนขึ้นที่เพลลาโดยความเร็วรอบของเพลลาที่หมุนจะมีค่าน้อยเราจึงต้องทำการทดรอบโดยการ ใช้ประโยชน์จากเฟือง และ ใช้โซ่ถ่ายแรงเพื่อทำให้ความเร็วรอบเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเนื่องจากความเร็วลมจะมีค่าไม่คงที่ แต่เราสามารถทำการวัดค่าความเร็วในหลาย ๆ ช่วงเวลา และทำการหาความเร็วลมเฉลี่ย เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณต่อไปได้

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันนี้พลังงานที่มีอยู่ค่อย ๆ หมดลงเรื่อย ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตเป็นอย่างมาก และด้วยเหตุนี้การคิดค้นหาพลังงานทดแทนจึงจำเป็นอย่างมาก ในที่นี้จะคิดถึงพลังงานลม พลังงานลมเป็นพลังงานที่สะอาด เกิดขึ้นจากธรรมชาติเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดเกิดขึ้นโดย

1. โลกหมุนรอบตัวเองทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศ

2. เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันเช่น ลมบกและลมทะเล

พลังงานที่จะนำมาใช้ในที่นี้จะใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการนำพลังงานลมมาหมุนใบพัดและใบพัดจะหมุนแกนของไดซารจ์เนื่องจากคุณสมบัติของไดซารจ์จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาประสิทธิภาพของกังหันแบบแกนนอนชนิด AIRFOIL 3 ใบ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างกังหันลมโดยใบกังหันใช้ Airfoil ชนิด 3 ใบ ที่ความเร็วลม 4.0 m/s โดยใช้ไดซารจ์รถยนต์ปั่นไฟฟ้า

2. หาประสิทธิภาพของกังหันโดยปรับมุมใบกังหันที่มุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การดำเนินงาน

เราควรทราบข้อมูลเกี่ยวกับลมก่อนว่า เป็นยังไงบ้าง โดยการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับลมให้มากที่สุดไม่ว่าจะเป็นความเร็วลมทิศทางและมีมากในช่วงใดมีลมมรสุมอะไรบ้างพัดผ่านและที่สำคัญอีกอย่างคือสถานที่ที่จะตั้งกังหันลมต้องเป็นที่รับลมตรง ๆ ด้านหน้าไม่ควรเป็นสิ่งก่อสร้างหรืออะไรมาบดบังทิศทางของลมเมื่อได้ข้อมูลเกี่ยวกับลมและสถานที่ที่จะตั้งเพียงพอแล้วก็ป็นขั้นตอนการสร้างกังหันต่อไป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เนื่องจากตอนนี้พลังงานที่ใช้โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น พวก น้ำมัน, ถ่านหิน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษางานชิ้นนี้จึงเหมาะมากที่จะนำไปใช้ประโยชน์คือจะเป็นการนำพลังงานลมมาใช้ทดแทนพลังงานต่างๆ เพื่อที่จะเป็นการลดการใช้พลังงานที่ใช้หมดไป และพลังงานที่นำมาทดแทนยังเป็นพลังงานบริสุทธิ์อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

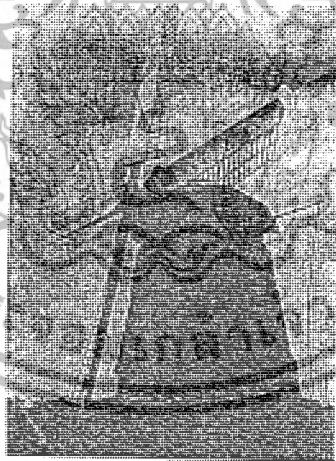
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

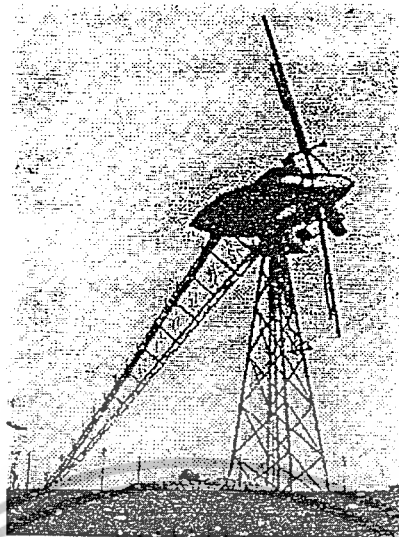
ในช่วงปี ค.ศ. 1941 – 1945 สหรัฐอเมริกา ได้มีการสร้างกังหันลมขนาดใหญ่ที่ Vermont เป็นแบบ 2 ใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 53 เมตร กำลังการผลิต 1.25 เมกกะวัตต์ ที่ความเร็วลม 13.4 เมตร/วินาที เริ่มใช้งานในเดือนมีนาคม 1945 เป็นเวลา 23 วันใบพัดเกิดหัก และเลิกใช้งานไปเนื่องจากไม่คุ้มค่าใช้จ่าย

ราวกลางปี ค.ศ. 1950 บริษัทเอ็นพีแอลเคเบิลแห่งอังกฤษ ได้สร้างกังหันลมระบบส่งกำลัง นิวเมติก ขนาด 0.1 เมกกะวัตต์ ที่ความเร็วลม 13.4 เมตร/วินาที โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 เมตร ใบพัดมีลักษณะกลวงทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง ดูดอากาศผ่านกังหันที่จับเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายในหอคอยกลวง แต่ปรากฏว่าประสิทธิภาพต่ำกว่ากังหันแบบธรรมดาจึงไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร

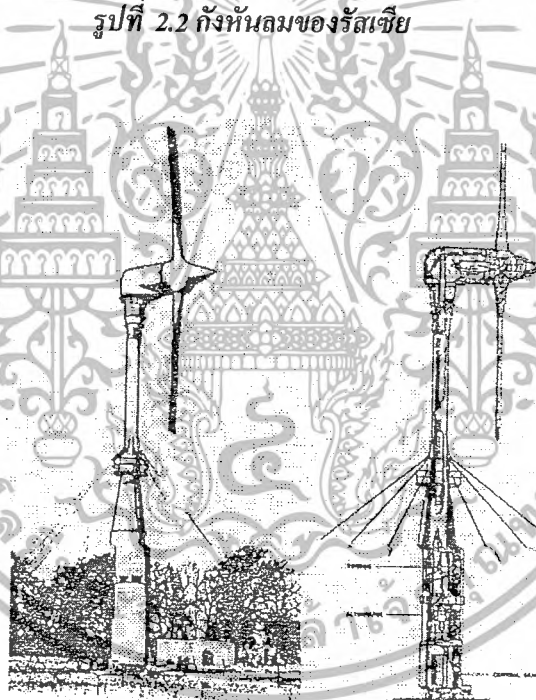
เดนมาร์ก ได้มีการสร้างกังหันลมในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 70-90 กิโลวัตต์ จำนวน 18 ตัว และต่อมาในปี ค.ศ. 1957 ได้สร้างกังหันลมแบบ 3 ใบพัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 เมตร กำลังการผลิต 0.2 เมกกะวัตต์ที่ความเร็วลม 15 เมตร/วินาที แต่เลิกใช้งานไปเมื่อปีค.ศ. 1968



รูปที่ 2.1 กังหันลมในยุโรปสมัยกลาง



รูปที่ 2.2 กังหันลมของรัสเซีย

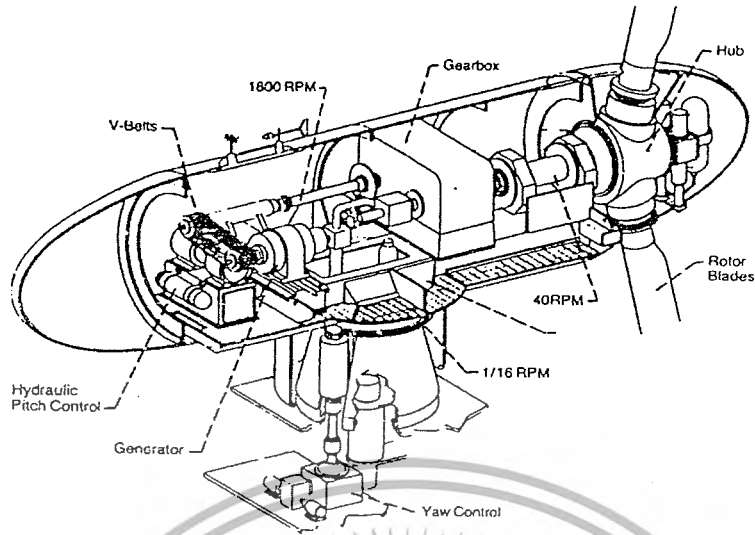


2.3

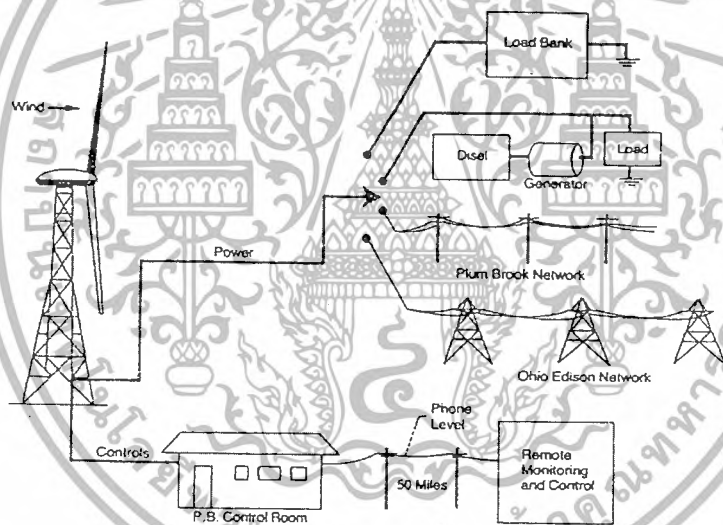
รูปที่ 2.3 กังหันลมเอ็นฟิลด์ - แอนครู

หลังจากนั้นการสร้างและพัฒนากังหันลมแบบต่าง ๆ ได้หยุดชะงักไป เนื่องจากพบว่ายังไม่คุ้มค่าต่อการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม จนกระทั่งในราวปี 1974 ได้เกิดวิกฤตการณ์ทางพลังงานของโลกขึ้นทั้งทางตรงคือแหล่งสำรองพลังงานที่มีปริมาณลดลง และทางอ้อมคือกลุ่มประเทศผู้ผลิตน้ำมันเป็นสินค้าออกได้ขึ้นราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่ส่งออก ทำให้ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้ตระหนักถึงปัญหาและความจริงในเรื่องนี้ จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนรูปต่าง ๆ ขึ้นรวมทั้งกังหันลมสำหรับการผลิต

ไฟฟ้าด้วย เช่น อานาตาร์กติก และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น[1] เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ระบบทางกลของกังหันลม Mod-O



รูปที่ 2.5 ระบบการติดตั้งของกังหันลม Mod-O ที่พลัมบ์

2.1 กังหันลม

ในการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ เราต้องมีเครื่องแปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานรูปอื่นซึ่งได้แก่ กังหันลม ในทางทฤษฎี พลังงานที่ได้จากลม โดยผ่านกังหันลมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 59.3% โดยกังหันลมแบบต่าง ๆ นั้นจะให้กำลังงานออกมาได้น้อยมากเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ, ขนาด และการออกแบบ กังหันลมที่มีประสิทธิภาพต่ำจะมีขนาดใหญ่กว่าชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันลมที่ใช้กันอยู่ที่มีชื่อเรียกแตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกตามลักษณะแกนโรเตอร์ที่ติดตั้งใบพัดว่าหมุนในลักษณะใดเมื่อมีลมพัดผ่าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กังหันลมแนวนอน (Horizontal axis machines) กังหันลมที่ปะทะใบพัด ซึ่งจะทำให้เกิดแรง 2 แรง คือ

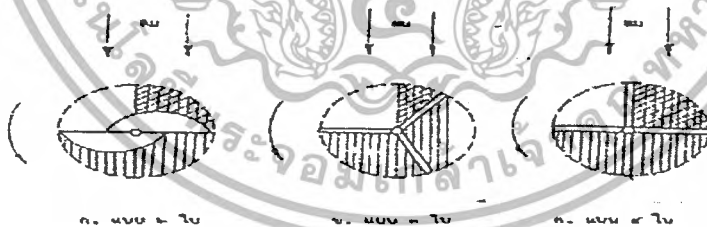
1) แรงลาก (Drag Force) เป็นแรงที่มีทิศทางเดียวกันกับความเร็วสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของความเร็วลมกับทิศทางการหมุนของกังหัน

2) แรงยก (Lift Force) เป็นแรงที่มีทิศตั้งฉากกับแนวแรงลาก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแรงยกที่เกิดขึ้นกับปีกของเครื่องบิน

ปัจจุบันอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้กังหันมีความแตกต่างกันคือ ความเป็น solidity เท่ากับพื้นที่หน้าตัดที่ใบพัดกังหันหมุนต่อพื้นที่ของใบพัดของกังหัน ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะการใช้งานด้วย เช่น ถ้าเป็นพวก High Solidity Machine จะมีแรงบิดตอนออกตัวสูงแต่กำลังสูงสุดจะเกิดที่ความเร็วการหมุนต่ำเหมาะที่จะใช้เป็นกังหันน้ำ ส่วนพวก low solidity machine แรงบิดตอนออกตัวต่ำ กำลังเกิดสูงสุดที่ความเร็วการหมุนสูงเหมาะที่จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.2 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

กังหันลมแบบนี้แกนหมุนของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นดิน กังหันลมแบบนี้มีคุณสมบัติคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง น้ำหนักของใบพัดจะทิ้งลงในลักษณะสมมาตร (Symmetry) และไม่มีผลต่อความกว้างของใบ เมื่อเพิ่มแขนหมุน (moment arm) ไม่เป็นปัญหาต่อการติดตั้งฐาน การหมุนของใบจะอยู่ในแนวระนาบเดียวกับทิศทางของลม ดังนั้นแรงปะทะจะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนโดยตรง ซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์จากแรงปะทะมีมากขึ้น ส่วนเสียของกังหันแบบนี้คือ ลักษณะการวางใบไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกใบ ในเวลาเดียวกันเนื่องจากมีส่วนใบที่บังลมอยู่ และยังมีส่วนใบที่ถูกลมปะทะทำให้เกิดแรงต้านการหมุนขึ้นอีกด้วย



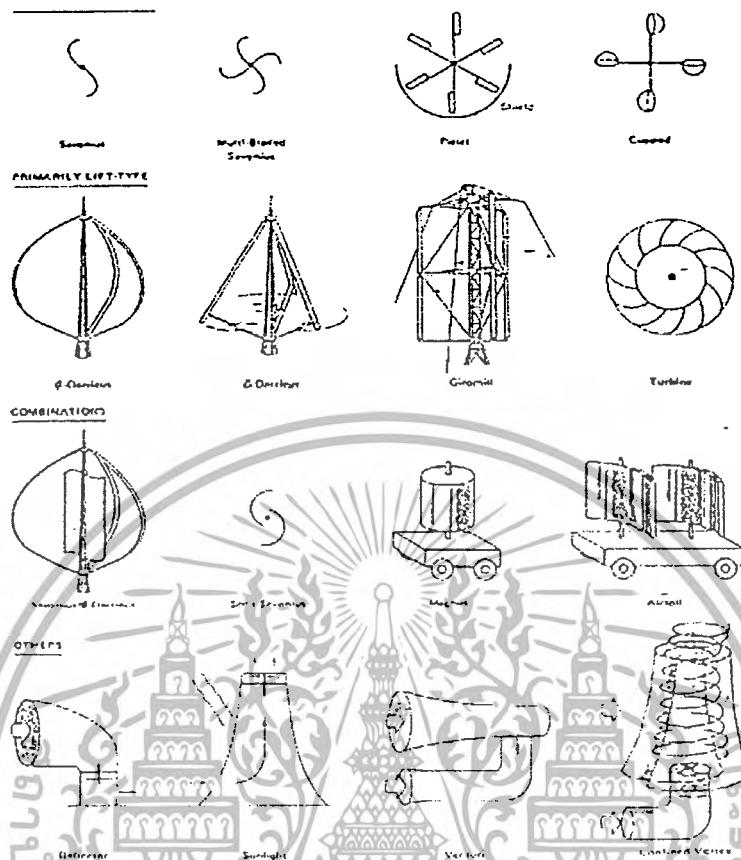
รูปที่ 2.6 ภาพด้านบนของกังหันลมแบบ 2, 3 และ 4 ใบ

แบบของกังหันลมชนิดที่มีแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

แบบซาโวเนียส หรือเอสโรเตอร์ (Savonius or S.rotor) เป็นกังหันลมชนิด 2 ใบ การหมุนเกิดจากการที่ลมปะทะทางด้านเว้า แล้วทำให้ใบหมุนรอบแกน กังหันแบบนี้มีแรงบิดบนแกนสูงทำให้พลังงานค่อนข้างคงที่แต่ความเร็วรอบต่ำ ส่วนมากนำไปใช้งานทางด้านกล เช่น เครื่องสูบน้ำ

แบบดาร์เรียม (Darrieus) กังหันลมแบบนี้จะมีความเร็วรอบสูง แต่จะมีแรงบิดเริ่มต้นต่ำฉะนั้นจะต้องมีตัวช่วยเริ่มต้นการหมุนในขณะไม่มีลมหรือลมแรงไม่พอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

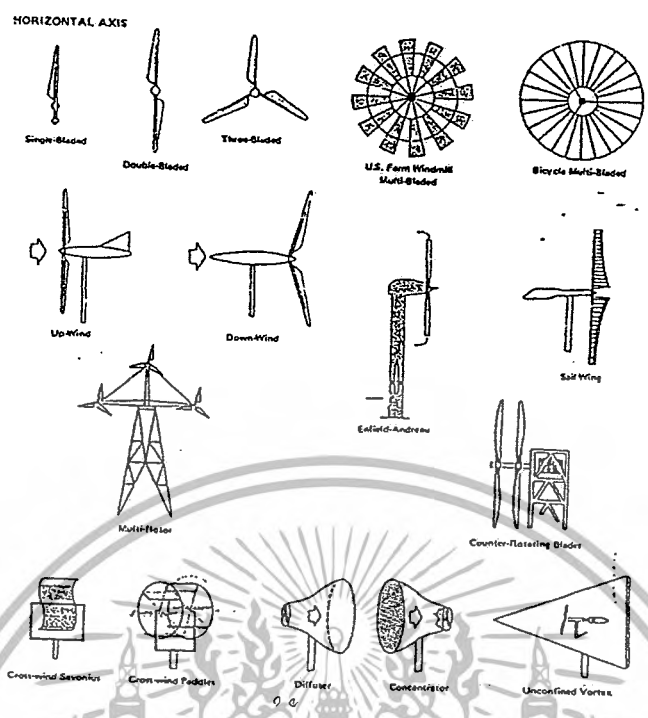


รูปที่ 2.7 แบบของกังหันลมหมุนในแนวตั้ง

2.1.3 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน

กังหันลมแบบนี้จะมีแกนหมุนของใบพัดขนานกับพื้นดิน คุณสมบัติของกังหันลมแบบนี้คือ ใบพัดของกังหันสามารถรับลมได้เต็มที่และจะทำให้กำลังงานมากกว่าแบบแรกเมื่อเทียบขนาดเท่า ๆ กัน เพราะว่าแบบนี้มีพื้นที่หน้าตัดของส่วนรับลมของกังหันชนิดนี้เทียบเท่าแบบหมุนในแนวตั้งกังหันแบบนี้มีความซับซ้อนมาก ติดตั้งลำบากต้องหันตั้งลมเข้าสู่ทิศทางที่ลมผ่าน ใบพัดมีลักษณะอยู่ในแนวตั้งยึดติดกับเดือยของแกนหมุนในแนวนอนจำนวนใบพัดมีได้ตั้งแต่ 1 ใบขึ้นไป

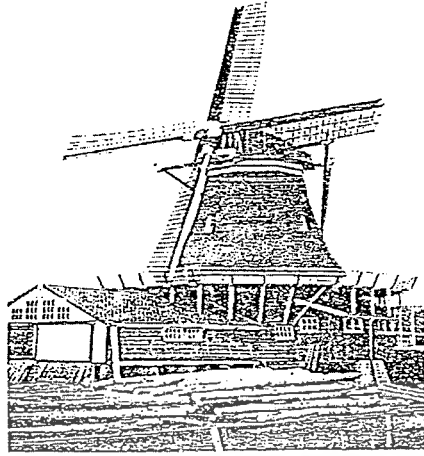
จากทิศทางลมซึ่งขนานกับแกนหมุน การหมุนของมันจะเกิดขึ้นได้ จากการรับลม 2 แบบคือรับลมแนวหน้า (up-wind) และรับลมด้านหลัง (down-wind)



รูปที่ 2.8 กังหันแบบแกนนอน

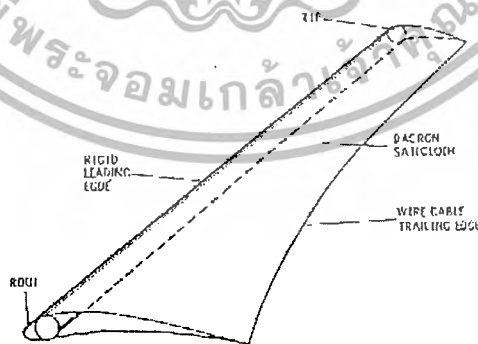
แบบของกังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวนอน

กังหันแบบดัตช์ (Dutch windmills) ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นจากชาวดัตช์ ในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 14 ใช้วิดน้ำออกจากพื้นที่ที่เกิดน้ำท่วม บริเวณริมแม่น้ำและยังแยกชนิดตามลักษณะของใบได้อีก ในศตวรรษที่ 19 ประมาณว่ามีกังหันใช้กันอยู่ 9000 ตัว ตั้งแต่เมื่อมีการประดิษฐ์อุตสาหกรรมมีการใช้น้ำและเทคโนโลยีมากขึ้นจำนวนกังหันจึงลดลง



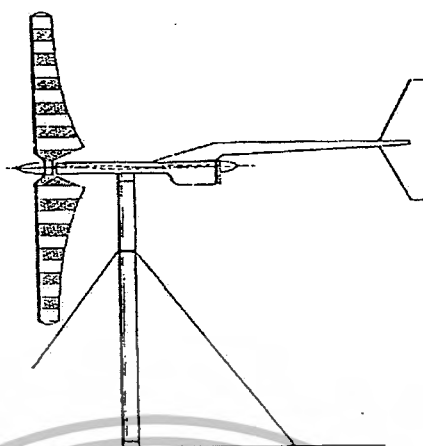
รูปที่ 2.9 กังหันลมแบบดัตช์

กังหันแบบเซลวิง (Sail - wing or PRINCETON) เป็นกังหันแกนนอนที่พัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัย PRINCETON ซึ่งประยุกต์มาจากใบของเรือ ลักษณะของใบเป็นไปตามรูปที่ ซึ่งประกอบด้วยท่อโลหะเป็นแกนของใบและเป็นด้านขอบนำในการหมุน ผิวใบเป็นผ้าไหมชนิดหนึ่ง มีลักษณะยืดหยุ่น ทางด้านขอบหลังจะใช้เคเบิลแข็ง ใบพัดแบบนี้มีประสิทธิภาพในเกณฑ์ดี ราคาไม่แพง สร้างง่าย น้ำหนักเบากว่า แบบที่ทำด้วยไฟเบอร์กลาสถึง 50% มีการออกแบบตามหลักอากาศพลศาสตร์ เพื่อให้เกิดอัตราส่วนของ แรงยกต่อแรงหน่วง (L/D) ขนาดของเซล-วิง จะจำกัดแค่ 30 ฟุต (เส้นผ่าศูนย์กลาง) เนื่องจากความแข็งแรงของใบพัด ดังรูปที่ 3.1 เป็นลักษณะของเซล-วิง ของมหาวิทยาลัย PRINCETON เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 ลักษณะของใบพัดแบบเซล - วิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กังหันลมแบบพริ้นซ์ตัน เซล - วิง

กังหันแบบโพรเพลเลอร์ เป็นกังหันรอบสูง มีความแข็งแรงคงทนน้อยกว่าแบบมัลติ-เบรค ปกติจะมี 2-3 ใบ หรืออย่างมาก 4 ใบ เริ่มทำงานที่ TSR=5 จนถึงประมาณ 20 โดยทั่วไปมักใช้งานที่ 5-10 กังหันชนิดนี้เหมาะที่จะนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะรอบสูง สามารถใช้การทอดอัตราต่ำ ๆ เพื่อขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าได้ กังหันลมที่ใช้อยู่ในประเทศไทยแถบจังหวัดฉะเชิงเทรา ก็จัดเป็นกังหันชนิด โพรเพลเลอร์ด้วย

2.2 ประสิทธิภาพของกังหันลม

กังหันลมสามารถเอากำลังงานจากลมโดยตรง โดยการลดความเร็วลมให้ช้าลง ถ้ากังหันลมสามารถทำให้ลดความเร็วจากเดิมจนหยุดได้สมบูรณ์แล้วคือ ความเร็วของลมหลังจากผ่านกังหันแล้วกลายเป็นศูนย์จะได้พลังงานจากลม 100% แต่จริง ๆ แล้วกังหันลมไม่สามารถทำให้ลมที่พัดผ่านหยุดได้ กำลังลมมากที่สุด ทางทฤษฎีที่กังหันสามารถรับเอาไว้ได้จะเป็น 59.3% ของกำลังทั้งหมด หมายความว่าสามารถลดความเร็วลงได้ประมาณ 3 ส่วนของความเร็วต้นเท่านั้น ดังนั้น กังหันลมที่สามารถลดความเร็วลมออกมาได้มากที่สุด 59.3% จึงถือว่ามี ประสิทธิภาพ 100%

ถ้ากังหันลมมีประสิทธิภาพ 75% เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 75% กำลังงานกลของกังหันลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 33.34% ค่าประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันลม กา ออกแบบและการสูญเสียของระบบเฟืองต่าง ๆ ในกรณีที่ใช้สำหรับลดรอบความเร็วให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเห็นได้ชัดว่า 0.1-0.4 ไม่มากกว่านี้ ค่านี้กำหนดให้เป็น efficiency factor ของกังหันลมใช้สัญลักษณ์ E ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันและ speed ratio โดย seed ratio ของกังหันขึ้นอยู่กับกรหมุนของกังหันและความเร็วที่พัดผ่าน การหมุนของกังหันหมายความว่า ส่วนประกอบของใบพัดบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางมีการหมุนช้า ๆ ขณะที่ส่วนปลายของใบพัดหมุนเร็วอัตราส่วนการหมุนขึ้นอยู่กับรัศมีใบพัดและความเอียง

เอกสารนี้ ใบพัด กสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะการหมุนที่กล่าวแล้วสามารถกำหนดส่วนการหมุนของความเร็วซึ่งมีส่วนมากในการ ออกแบบกังหัน ให้ค่านี้เป็น w/v เมื่อ

U = ความเร็วของกังหันลมที่มีใบพัดเอียงทำมุมเอียงในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง

V = ความเร็วลมที่พัดผ่านกังหัน

ค่า w/v นี้ประมาณ 1-2 เมื่อกังหันลมหมุนช้า และเท่ากับ 5-7 หรือ 8 เมื่อกังหันลมเร็ว

ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกังหันลมกังหันแนวแกนตั้งและกังหันแนวแกนนอน

กังหันลมแนวแกนตั้ง	กังหันลมแนวแกนนอน
<p>ข้อดี</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับลมได้ทุกทิศทางไม่ต้องใช้หางเสือในการปรับทิศทาง 2. น้ำหนักที่ลงที่ฐานมีความสมดุลมากกว่า 3. เริ่มต้นหมุนเองได้เมื่อความเร็วลมต่ำ 4. ระบบส่งกำลังทำได้ง่าย ราคาถูก <p>ข้อเสีย</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. มีแรงต้านการหมุนจากใบพัดที่ไม่ได้รับลม 2. ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ 	<p>ข้อดี</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน 2. ประสิทธิภาพสูงกว่ากังหันแนวตั้ง 3. แรงบิดรอบแกนสูง 4. ความเร็วรอบสูงกว่าเมื่อความเร็วลมเท่ากัน 5. ความเร็วรอบคงที่กว่า <p>ข้อเสีย</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องปรับทิศทางของใบกังหันเข้าหาทิศทางลมไม่ได้ 2. ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับแกนหมุนทำได้ยาก

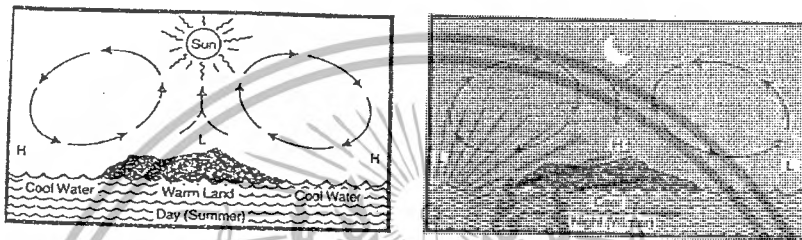
2.3 ลม (WIND)

เนื่องจากการที่บรรยากาศพื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ จึงทำให้ความหนาแน่นของอากาศ หรือความกดอากาศนั้นแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ โดยที่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงๆจะทำให้อากาศบริเวณนั้นลอยตัวขึ้นสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำ (อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะเบากว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ) เป็นเหตุให้อากาศจากบริเวณอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะมีความกดอากาศสูงกว่านั้นจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ และการเคลื่อนตัวของอากาศที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนี้เรียกว่า “ลม” หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ลม คือการเคลื่อนตัวของอากาศ เราอาจจะแบ่งลักษณะการเกิดของลมอย่างกว้างๆได้เป็นสองแบบ คือการเกิดในลักษณะทั่วทั้งโลก และการเกิดในลักษณะเฉพาะที่ สำหรับลักษณะแรกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการที่อุณหภูมิของพื้นผิวโลกที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้ เป็นเหตุให้อากาศร้อนที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นลอยตัวสูงขึ้นสู่บรรยากาศข้างบน ทำให้อากาศที่อยู่ขั้วโลกซึ่งเย็นกว่าเคลื่อนตัวมายังบริเวณเส้นศูนย์สูตร แต่เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเอง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศนี้ โดยที่อากาศร้อนซึ่งอยู่ในบรรยากาศชั้นบนจะมีทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนไปทางตะวันออก และอากาศเย็นซึ่งอยู่ใกล้พื้นผิวโลกจะหมุนตัวไปทางทิศตะวันตก สำหรับลักษณะการเกิดลมแบบที่สองนั้นเกิดได้สองแบบคือ เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นดินและพื้นน้ำ และเกิดจากความลาดชันของเชิงเขาและภูเขา สำหรับแบบแรกในช่วงเวลากลางวันจะมีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นโลกทำให้พื้นดินนั้นดูดซับความร้อนได้มากกว่าพื้นน้ำ ซึ่งจะทำให้อากาศบนพื้นดินมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศบนพื้นน้ำ แล้วอากาศที่พื้นดินจะลอยตัวสูงขึ้นและอากาศพื้นน้ำจะเคลื่อนตัวมาแทนที่ และในเวลากลางคืนทิศทางการเคลื่อนที่ก็จะตรงกันข้ามกับช่วงเวลากลางวัน ในแบบที่สองในช่วงเวลากลางวันอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นไปตามความลาดชันของภูเขา และในเวลากลางคืนของอากาศที่เย็นหนักจะกดตัวลงมาตามความลาดชันของภูเขา



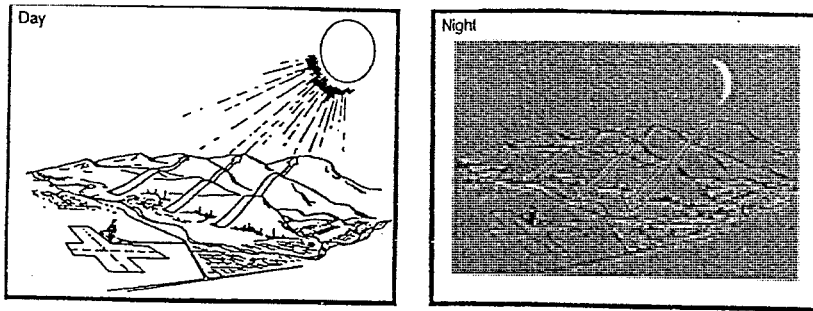
รูปที่ 2.12 การเกิดลมบก - ลมทะเล

2.4 แหล่งกำเนิดของลม

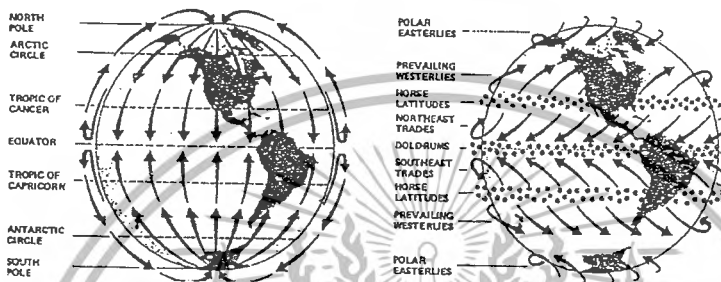
ลมเกิดขึ้นจากมวลไหลของกระแสอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากพื้นผิวโลกได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ไม่เท่ากัน หรือมีคุณสมบัติในการดูดกลืนความร้อนแตกต่างกัน เช่น ในตอนกลางวัน อากาศเหนือทะเล มหาสมุทร จะยังคงความเย็นอยู่เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ไปใช้ในการระเหยน้ำและถูกดูดกลืนไว้ ส่วนอากาศเหนือพื้นดินจะร้อนจึงขยายตัวและลอยขึ้น อากาศที่เย็นกว่า หนักกว่าจากเหนือพื้นน้ำไหลเข้ามาแทนที่ทำให้เกิดลมประจำถิ่นที่เรียกว่า ลมทะเลขึ้น เมื่อตอนเวลากลางคืน พื้นดินจะเย็นตัวเร็วกว่าน้ำเนื่องจากดูดกลืน พลังงานแสงอาทิตย์ไว้น้อย ทำให้อากาศพื้นดินมีอุณหภูมิต่ำกว่าเหนือผิวทะเล อากาศจึงมีการเคลื่อนที่จากพื้นดินไปสู่ทะเล เกิดเป็นลมที่เรียกว่า ลมบกขึ้น

ลมประจำถิ่น เกิดขึ้นได้บริเวณภูเขาและหุบเขาเช่นกัน เนื่องจากในตอนกลางวันอากาศบริเวณไหล่เขาที่เป็นพื้นลาดจะร้อนและลอยตัวขึ้น ทำให้อากาศส่วนบนที่เย็นกว่าไหลลงมาแทนที่ ส่วนในตอนกลางคืนพื้นลาดบริเวณไหล่เขาจะเย็นตัวได้เร็วกว่า ทำให้เกิดลมในทิศทางกลับกันกับตอนกลางวัน

ลมประจำฤดู เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นผิวโลกได้รับความร้อนไม่เท่ากัน เช่น ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรจะร้อนกว่าบริเวณขั้วโลก ทำให้อากาศเย็นจากขั้วโลกไหลเข้ามาแทนที่อากาศร้อนที่ลอยตัวสูงขึ้น และในที่สุดอากาศชั้นบนก็จะไหลไปแทนที่อากาศบริเวณขั้วโลก ทำให้เกิดกระแสลมหมุนเวียนเป็นจักรขึ้น^[1]



รูปที่ 2.13 การเกิดลมภูเขา – ลมหุบเขา

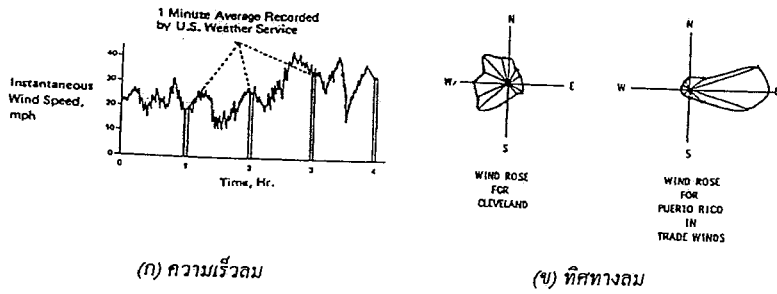


รูปที่ 2.14 ทิศทางกระแสลมที่เกิดขึ้นบนโลก(2)

นอกจากนี้ การที่โลกมีการหมุนรอบตัวเอง จะทำให้ทิศทางของกระแสอากาศเบี่ยงเบนไป โดยอากาศระดับล่างที่เคลื่อนที่เข้าสู่เส้นศูนย์สูตรจะเบนไปทางทิศตะวันตก ส่วนอากาศร้อนในชั้นบรรยากาศชั้นบนที่เคลื่อนที่ไปขั้วโลกจะเบนไปทางทิศตะวันออก และความจริงที่ว่าแกนการหมุนของโลกทำมุม 23.5 องศาับระนาบวงโคจร การได้รับความร้อนบริเวณต่างๆ ของพื้นโลก จึงแปรไปตามเวลาในระหว่างปี ทำให้เกิดฤดูกาล และลมประจำฤดูขึ้น

2.5 ทิศทางและความเร็วของลม

ลมที่พัดผ่านบริเวณหนึ่งๆ นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งทิศทางและความเร็วอยู่บ่อยครั้ง และอาจจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยทิศทางและความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลตลอดปี และปกติลมในฤดูหนาวจะมีปริมาณและความเร็วสูงกว่าฤดูร้อนประมาณ 2-3 เท่า



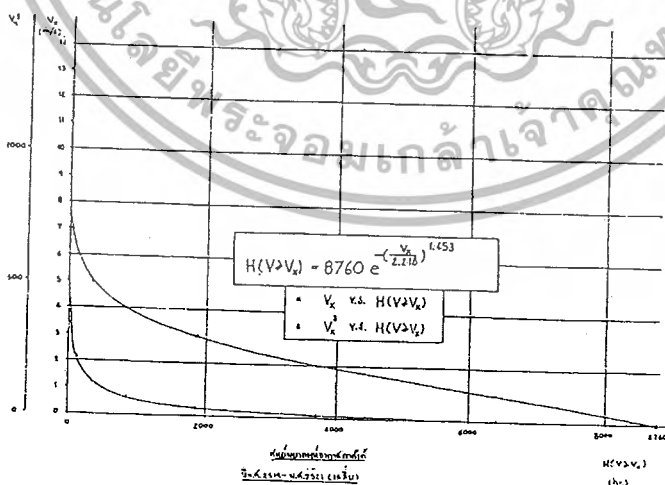
รูปที่ 2.15 ลักษณะทั่วไปของข้อมูลลม

ในการใช้พลังงานนั้น จำเป็นจะต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วลมที่ละเอียดพอสมควร เพื่อทราบศักยภาพของพลังงาน จึงสามารถเลือกใช้ชนิดและขนาดกังหันลมที่เหมาะสมได้

2.6 การกระจายของความเร็วลม

การกระจายของความเร็วลมนิยมแสดงอยู่ในรูปกราฟวาระความเร็วลม (Velocity duration curve) แสดงถึงช่วงเวลาเป็นชั่วโมงที่ลมมีความเร็วเกินค่าหนึ่ง ในเวลาหนึ่งปี ซึ่งในแต่ละบริเวณก็จะมี การกระจายของความเร็วลมแตกต่างกันออกไป

ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลลม ที่วัดจากศูนย์พยากรณ์อากาศ ชุมพร เฉลี่ยถึงปี 2521 เป็น ดังกราฟ



รูปที่ 2.16 กราฟวาระความเร็วลม ชุมพร เฉลี่ยถึงปี 2521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ศักยภาพของพลังงานลมต่อปีบริเวณต่าง ๆ

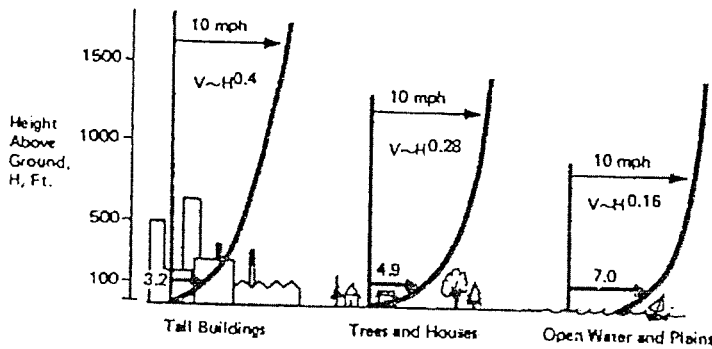
2.7 ศักยภาพของพลังงานลม

ได้จากการวิเคราะห์ เปลี่ยนข้อมูลดิบของลม ให้อยู่ในรูปของการกระจายของความเร็วม ในช่วงเวลา 1 ปี โดยใช้สมการ Weibull distribution ในรูป

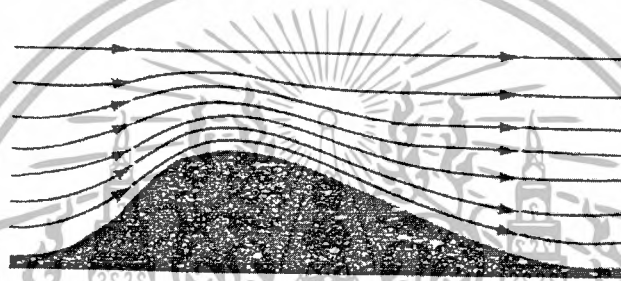
$$H_{(V \geq V_x)} = 8760 e^{-(V_x/C)^k}$$

เมื่อเทอมซ้ายมือแสดงจำนวนชั่วโมงใน 1 ปีที่ลมมีความเร็วตั้งแต่ V_x ขึ้นไป C และ k เป็นค่าคงที่ หรือเรียกว่า Weibull distribution parameters

ผลที่แสดงอยู่ในรูป กราฟวาระของความเร็วม (velocity duration curve) และกราฟวาระของ กำลังลม (power duration curve) และ Weibull distribution parameters



รูปที่ 2.18 ลักษณะผิวโลกที่มีผลต่อลม



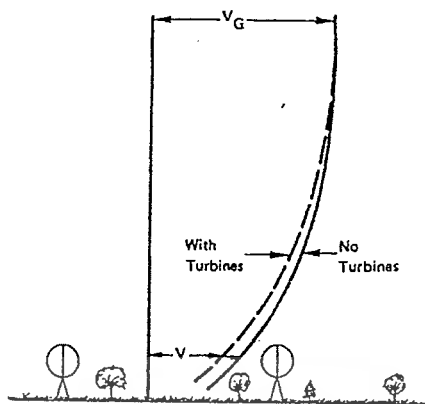
รูปที่ 2.19 ความเร็วเมื่อลมผ่านเนิน

2.8 การเลือกสถานที่ติดตั้งกังหันลม

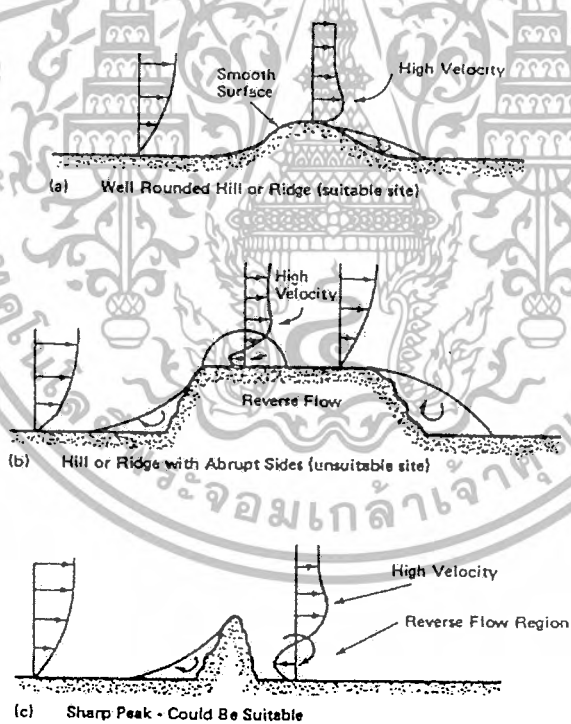
สถานที่ติดตั้งกังหันลม นอกจากต้องมีความเร็วลมและทิศทางที่ดีแล้ว ในรายละเอียดจะต้องคำนึงถึงผลของความเสียดทานและการตีบ (Shear and compression) ของกระแสลมด้วย เนื่องจากกระแสลมที่พัดในแนวราบผ่านพื้นผิวโลก จะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะภูมิประเทศ

ความเสียดทานของพื้นผิวโลก จะมีผลกระทบอย่างมากต่อลมที่ระดับต่ำ ส่วนลมระดับสูงเหนือพื้นดินหลายๆจะพัดอย่างอิสระ โดยทั่วไปลมที่พื้นผิวโลกจะมีความเร็วประมาณ 1/7 ของลมอิสระ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ เช่น อาคาร ต้นไม้ ทะเล หรือทุ่งราบ เป็นต้น

ที่สวีเดน ได้มีการทดสอบในอุโมงค์ลมและสรุปว่า เพื่อป้องกันผลของการบังลม อันเกิดจากกังหันลมต่อกังหันลมตัวอื่นควรวางกังหันลมให้ห่างกันอย่างน้อย 6 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกังหัน และแนะนำให้ใช้ค่าระหว่าง 8-12 เท่า



รูปที่ 2.20 ผลการบังลมของกังหัน



รูปที่ 2.21 การเลือกเนิน

ผลกระทบที่สำคัญต่อกระแสลมอีกอย่างหนึ่งคือ เส้นกระแส (Streamlines) ของกระแสอากาศ ถูกบีบให้ตีบลง จะทำให้ลมมีความเร็วสูงขึ้น เช่น การพัดผ่านหุบเขาแคบๆ เนินเขาเตี้ยๆ แต่เนินบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะอาจทำให้กระแสลมปั่นป่วนได้ ซึ่งไม่เหมาะต่อการติดตั้งกังหันลม รูปสถานที่ที่เหมาะสมต่อการติดตั้งกังหันลมควรมีลักษณะดังนี้

- ความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปีมีค่าสูง
- ไม่มีสิ่งกีดขวางสูงๆในทิศเหนือลม ในระยะใกล้
- เป็นเนินลาดที่เรียบ หรือเกาะกลางทะเล
- เป็นที่ราบ หรือบริเวณชายฝั่ง
- เป็นที่หุบเขาที่ที่ทำให้ลมแรงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทฤษฎีและการออกแบบกังหันลม

3.1 แนวทางออกแบบเบื้องต้น

โดยทั่วไปจะพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้

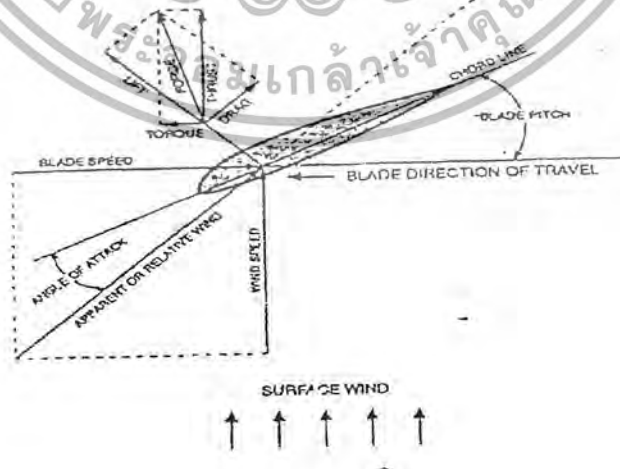
- พิจารณาถึง POWER ที่เราต้องการ
- พิจารณาถึงกำลังลมที่มี
- พิจารณาถึงชนิดและแบบของกังหันลมที่เหมาะสมสำหรับงานนั้น ๆ

เราต้องพิจารณาถึงกำลังลมที่เรามีอยู่ โดยการวัดความเร็วลมเฉลี่ย ณ จุดที่จะทำการติดตั้งกังหันลม ทำกราฟแสดงปริมาณลมที่เกิดขึ้น และทำการเลือกแบบของกังหันลมและขนาดของใบพัด เพื่อให้เหมาะสมและใกล้เคียงกับจุดประสงค์มากที่สุด

3.2 การออกแบบทางพลศาสตร์ (Aerodynamic Design)

ในการออกแบบทางพลศาสตร์นั้นเป็นการออกแบบใบพัดกังหันลม เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งมีส่วนสำคัญ ๆ ดังนี้

3.2.1 แอร์ฟอยล์ (Airfoil) คือ ส่วนพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศ โดยการไหลของอากาศจะสัมผัสกับแรงสองแรง คือ แรงยก (lift) และแรงลาก (drag) โดยแรงยกจะตั้งฉากกับการไหลของอากาศ และ แรงลากจะขนานกับทิศทางของอากาศ (ดังรูปที่ 3.1) แอร์ฟอยล์มีลักษณะอยู่หลายแบบมากมาย (ดังรูปที่ 3.2) แอร์ฟอยล์ทุกอันจะทำมุมกับแรงลมเพื่อจะทำให้เกิดแรงยก โดยแรงยกมากเป็นสิ่งที่เราต้องการ (มุมมากด้วย) โดยมุมจะถูกวัดระหว่างรอบเส้นคอรัคกับเส้นทางการไหลของลม โดยมุมที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า (angle of attack)[3]



รูปที่ 3.1 แรงต่าง ๆ ที่กระทำที่แอร์ฟอยล์[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการบอกค่าของแรงยกและแรงลากนั้นจะบอกอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ (Coefficient)[4]

$$C_l = 2L / \rho V^2 A \quad (3.1)$$

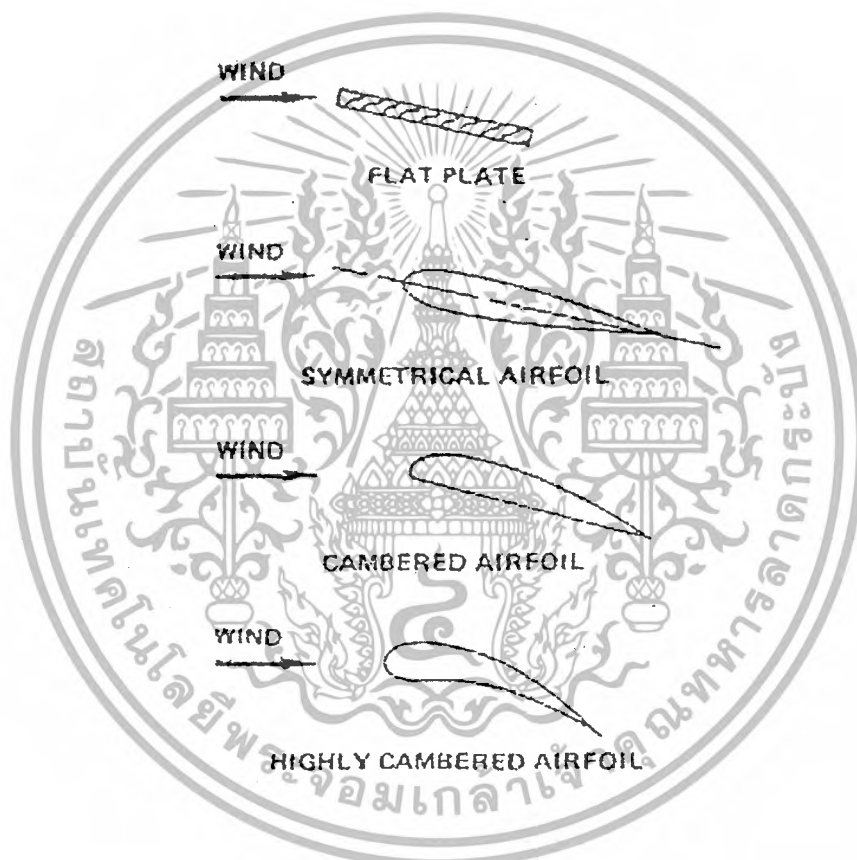
$$C_d = 2D / \rho C_l V^2 A \quad (3.2)$$

เมื่อ C_l = สัมประสิทธิ์แรงยก

D_d = สัมประสิทธิ์แรงลาก

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

A = Blade area (chord length X blade length)

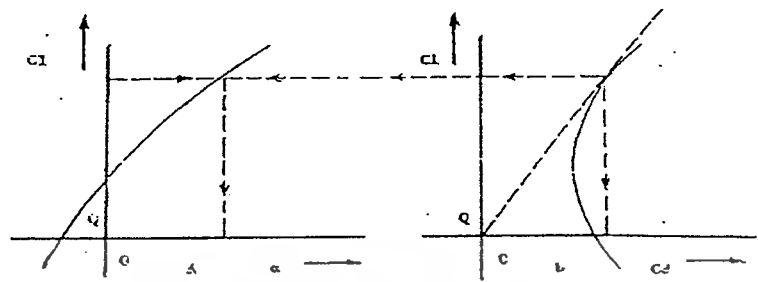


รูปที่ 3.2 แบบแอร์ฟอยล์ในลักษณะต่าง ๆ

ค่าของ C_d , C_l จะมีความสัมพันธ์กับมุมปะทะ (α) ซึ่งในแต่ละชนิดของแอร์ฟอยล์จะแตกต่างกันออกไป เราสามารถหาค่าต่าง ๆ ได้จากกราฟ เช่น 3.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_l - α และ C_l - C_d ตามรูป 3.3 b หากเราลากเส้นสัมผัสจากจุด $C_d = C_l = 0$ ณ จุดสัมผัสเราจะได้อัตราของ C_d -design และ C_l -design เมื่อลากเส้นตัดกราฟในรูป 3.3 a เราก็จะได้ α -design หากเรานำค่าของ C_d หาค่าด้วย C_l เราก็จะได้ค่า C_d/C_l ต่ำสุดสำหรับแอร์ฟอยล์นั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบกังหันลม จึงเป็นเสมือนการเลือกแบบของกังหันลมเพื่อที่จะให้แรงยกสูงสุด และแรงลากต่ำสุด



รูปที่ 3.3 ค่าประกอบของแรงยกและแรงลาก

3.2.2 Relative wind velocity

เมื่อกังหันหมุน หากเรามองจากกังหันเราจะมองเห็นทิศทางลมเปลี่ยนไป ทิศทางใหม่ของลมที่พัดเข้ากังหันนี้เรา

เรียกว่า Relative wind velocity ซึ่งจะทำมุมกับแนวการหมุนของกังหันเป็นมุม ϕ เรียกว่า Wind angle (ดูได้จากรูป 3.1)

3.2.3 สูตรการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของใบพัดกับความเร็วลม

$$\frac{u}{v} \text{ ที่รัศมีใด ๆ} = \frac{u / v (\text{tip}) \times r}{\text{tipradius}} \tag{3.3}$$

$$\frac{u}{v} (\text{tip}) = \frac{0.105 \times N \times r}{k \times v} \tag{3.4}$$

โดย

r (radius) = รัศมีโดยวัดจากศูนย์กลางของการหมุนถึงพื้นที่ที่ U/V ที่เราหาอยู่

tip radius = รัศมีกังหัน/2

N = รอบการหมุน (รอบ/นาที)

U = ความเร็วใบพัด

V = ความเร็วลม

K = constant to adjust

ถ้า

V (ไมล์/ชม.), k = 1.47

V (กม. /ชม.), k = 1.0

3.2.4 การหา BLADE AREA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\text{BLADE AREA} = \text{BLADE LENGTH} \times \text{BLADE CHORD} \tag{3.5}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 สูตรการหามุมใบพัด และ SOLIDITY

$$\text{มุมของใบพัด} = \text{wind angle-angle of attack} + \text{airfoil of zero} \quad (3.6)$$

โดย

Wind angle = มุมที่ relative wind ทำกับ blade direction of zero

Angle of attack = มุมที่ relative wind ทำกับ chord line

Airfoil of zero = 0 สำหรับ symmetrical airfoil

= 2 สำหรับ camber airfoil

= 4 สำหรับ highly camber airfoil

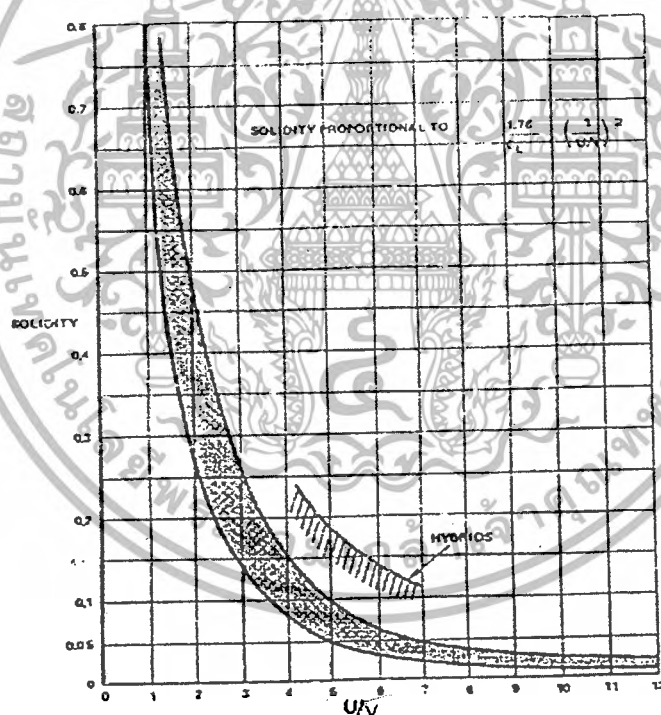
SOLIDITY คือ ลักษณะของใบพัดโดยเมื่อลมเข้าใบพัดหมุนจะหมุนเหมือนเป็น Solid surface

$$\text{SOLIDITY} = \text{BLADE AREA} \div \text{FRONTAL AREA} \quad (3.7)$$

โดย

BLADE AREA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของใบพัด

FRONTAL AREA = พื้นที่ผิวที่ใช้คำนวณหากำลังใบพัด



รูปที่ 3.4 SOLIDITY

การเลือก SOLIDITY FACTOR สำหรับกังหันใช้รูป โดย SOLIDITY VALUE ด้านสูงจะถูกเลือกเมื่อ lift coefficient ถูกประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของ airfoil และ LOW SOLIDITY VALUE ถูกเลือกเมื่อเปอร์เซ็นต์สูงที่สุดของ lift ของ airfoil

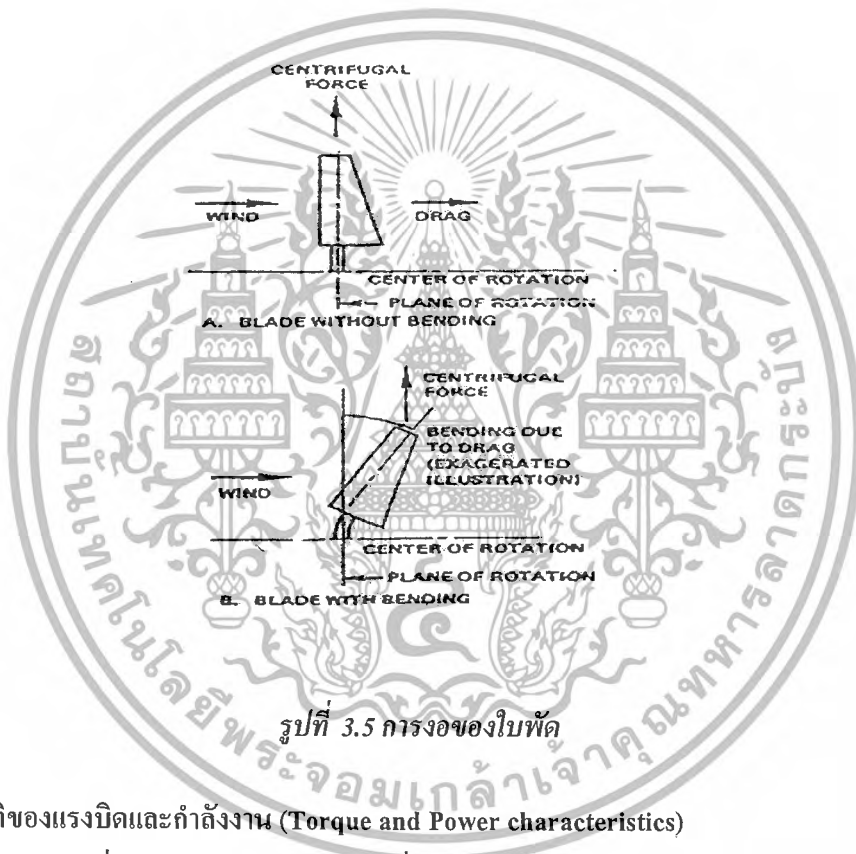
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหัน

เราสามารถแบ่งแรงที่กระทำต่อกังหันลมที่สำคัญที่เราต้องพิจารณาได้ 2 ประเภท

3.3.1 แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เป็นแรงที่กระทำกับใบพัดในแนวแกนการหมุนซึ่งเหมือนกับเวลาเราผูกก้อนหินไว้กับเชือกแล้วเหวี่ยงหรือหมุนในวงรอบการหมุน แรงหนีศูนย์กลางจะเป็นเสมือนแรงดึงเชือกนั้นซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางการหมุนคือ ว่าพร้อมจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงอยู่ตลอดเวลา

3.3.2 แรงลาก (Windmill Drag Force) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างของกังหัน (Truss) หักโค่น และ ทำให้ใบพัดของกังหันบิดงอเสียหาย เช่น ในกรณีที่ใบพัดถูกยึดติดไว้กับที่แต่ เมื่อแรงลากมากระทำที่ใบพัดทำให้ใบพัดเกิดการบิดงอ



รูปที่ 3.5 การงอของใบพัด

3.4 คุณสมบัติของแรงบิดและกำลังงาน (Torque and Power characteristics)

จากรูป 3.1 เมื่อแตกแรงกวาดและแรงยกที่กระทำต่อใบพัด ให้อยู่ในแนวระนาบเดียวกันผลลัพธ์ระหว่างแรงทั้งสอง จะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนของกังหัน

สมมติให้กังหันหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω)

$$\omega = 2\pi n \quad (3.8)$$

ฉะนั้นกำลังงานที่ได้รับจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานกล คือ

$$P = T\omega \quad (3.9)$$

เมื่อ

P: กำลังงาน (Power) (w)

T: แรงบิด (Torque) (N-m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω : ความเร็วเชิงมุม (Angular speed) (rad/sec)

จากสมการ (3.9) กำลังที่ได้รับเท่ากัน แต่อาจได้จากค่าของแรงบิดสูง ความเร็วเชิงมุมต่ำหรือแรงบิดต่ำ ความเร็วเชิงมุมสูงก็ได้ ฉะนั้นในการออกแบบกังหันลมที่จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน เพื่อให้สัมพันธ์กับแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้วย

จากรูป 3.7 เราสามารถสรุปได้ดังนี้

- ขณะที่กำลังงานเท่ากันแต่สามารถ ได้จากค่าความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน

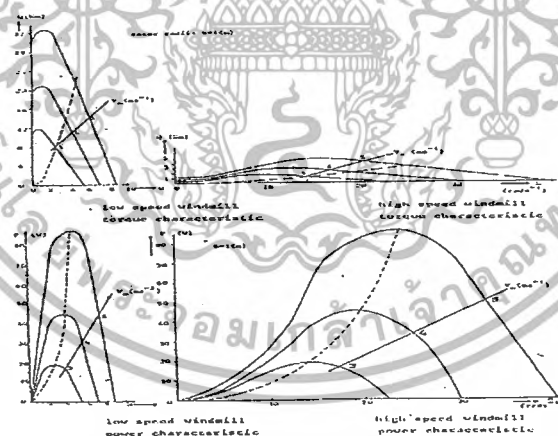
- กำลังงานสูงสุดจะเปลี่ยนไปตามค่าของความเร็วเชิงมุมกำลังสาม และแรงบิดก็จะเปลี่ยนไปตามความเร็วเชิงมุมกำลังสอง

- กำลังงานสูงสุดจะได้จากความเร็วเชิงมุมมากกว่า แรงบิดสูง

- แรงบิดเริ่มต้นสำหรับกังหันลมแบบความเร็วรอบสูง (High speed) จะมีค่าน้อยกว่ากังหันลมแบบความเร็วรอบต่ำ (Low speed)

3.5 ระบบส่งกำลัง

การเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลโดยผ่านกังหันลม ส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง คือ ระบบส่งกำลัง เพราะหากระบบส่งกำลังไม่ดีแล้ว ประสิทธิภาพที่ได้รับก็จะได้ไม่เต็มที่ ในการออกแบบระบบส่งกำลังที่ดี ต้องคำนึงส่วนประกอบมากมาย เช่น ความเหมาะสมกับงานที่จะใช้ ราคาการบำรุงรักษา การสูญเสียในระบบส่งกำลัง เป็นต้น



รูปที่ 3.6 ลักษณะของกำลังงานและแรงบิด

3.6 การกำหนดขนาดของแอร์ฟอยล์และขนาดของกังหันลม

ในการออกแบบใบพัดของเราต้องนำความรู้ทางอากาศพลศาสตร์มาใช้ โดยใบพัดที่เราออกแบบนั้นจะเป็นลักษณะรูปร่างเป็นแอร์ฟอยล์ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยตารางอ้างอิงและทำตามขั้นตอนของ SWD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาขนาดของแอร์พอยล์และขนาดของกึ่งหันลม ก่อนอื่นต้องทราบ

- กำลังลมที่เราต้องการ
- ความเร็วของลม

3.6.1) การออกแบบระบบและวิธีการคำนวณ

เพื่อให้ระบบมีการทำงานที่ดีมีประสิทธิภาพสูงที่สุด เราต้องมีการออกแบบให้ระบบในส่วนต่าง ๆ มีความเหมาะสมซึ่งกันและกัน

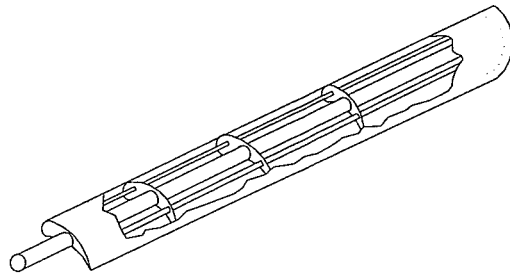
SELECTED AIRFOIL ORDINATES

STA	CLARK Y		St. CYR 234		NACA 0012		NACA 0015		NACA 4412	
	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER
0	3.5	1.5	6.42	6.42	0	0	0	0	0	0
1.25	5.45	1.93	9.55	3.75	1.83	1.83	2.37	-2.37	2.44	-1.43
2.5	6.5	1.47	11.6	2.7	2.62	-2.62	3.27	-3.27	3.39	-1.95
5.0	7.9	.93	12.7	1.4	3.56	3.56	4.44	-4.44	4.73	-2.49
7.5	8.85	.63	13.0	.85	4.2	-4.2	5.25	-5.25	5.76	-2.74
10	9.6	.42	14.6	.5	4.68	-4.68	5.85	-5.85	6.59	-2.86
20	11.36	.03	16.2	.2	5.74	-5.74	7.17	-7.17	8.8	-2.74
30	11.7	0	16.55	.05	6.3	-6.3	7.5	-7.5	9.76	-2.26
40	11.4	0	16.1	1.1	5.8	-5.8	7.25	-7.25	9.8	-1.8
50	10.52	0	15.2	1.35	5.24	-5.24	6.62	-6.62	9.19	-1.4
60	9.15	0	13.3	1.9	4.36	-4.36	5.7	-5.7	8.14	-1.0
70	7.35	0	10.6	1.35	3.56	-3.66	4.58	-4.58	6.69	-.65
80	5.22	0	7.75	1.05	2.82	-2.62	3.28	-3.28	4.09	-.39
90	2.8	0	4.3	.5	1.45	-1.45	1.81	-1.81	2.71	-.22
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	LR = 1.5				LR = 1.58		LR = 1.48		LR = 1.58	

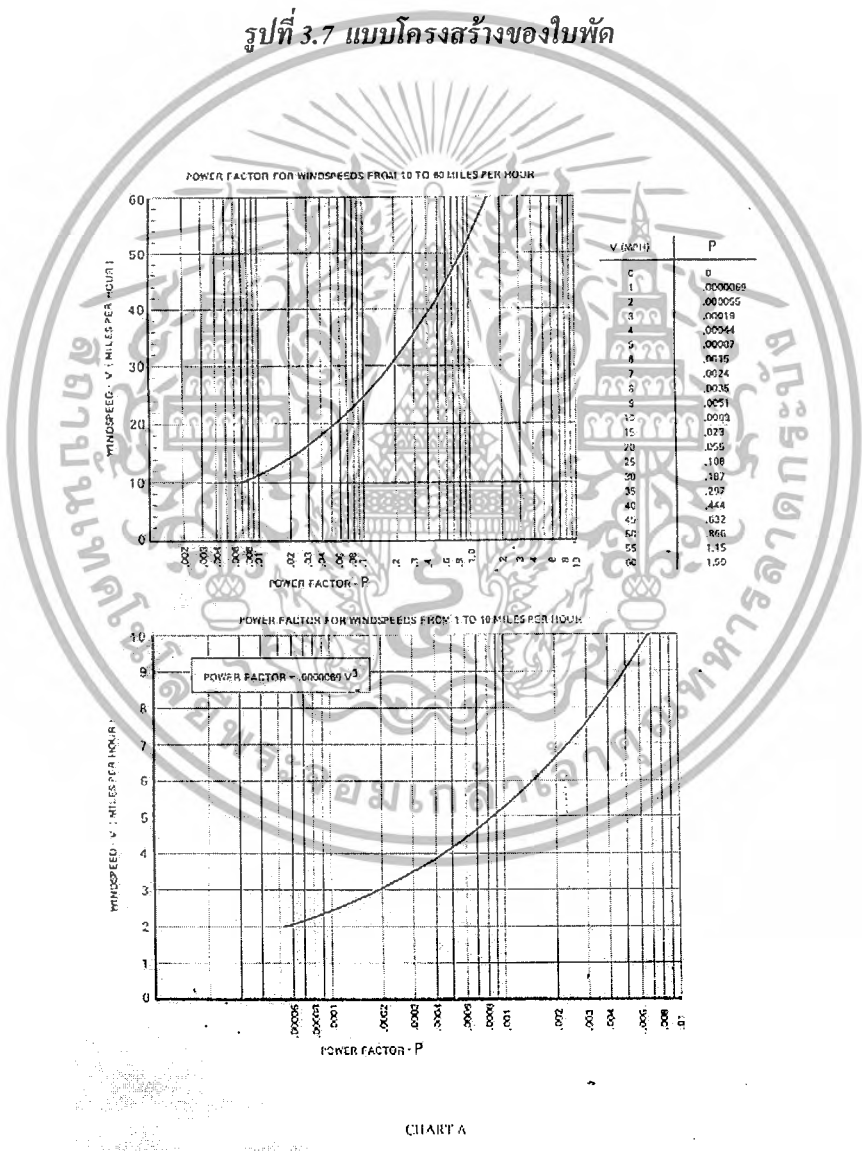
ตารางที่ 3.1 ค่า Upper และ Lower ของใบพัดชนิดต่าง ๆ [3]

3.6.1.1) การออกแบบกึ่งหันลม

ในการออกแบบจำเป็นต้องเลือกจำนวนใบของกึ่งหันลมก่อน แล้วตรวจสอบว่าจะต้องการอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบเท่าไร เมื่อทราบอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ซึ่งพอที่จะสรุปได้ว่า ในกรณีที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูง ๆ จำนวนใบกึ่งหันจะน้อยและถ้าออกแบบที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ จะใช้จำนวนใบมาก

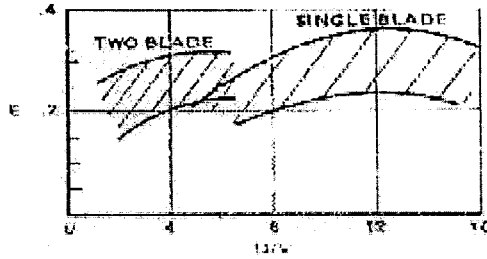


รูปที่ 3.7 แบบโครงสร้างของใบพัด



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม กับ Power factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{u}{v}$ กับค่า E (Efficiency factor)

3.7) การคำนวณ

3.7.1) การคำนวณหาขนาดของ Airfoil

กำหนดกำลังที่เราต้องการ 1000 วัตต์ ชั่วโมง/วัน ความเร็วลม 4.5m/s ดังนั้นกำลังใบพัด generate 1000/8 = 125 วัตต์ ใน 1 ชั่วโมง
 ความเร็วลม 4.5m/s ประมาณ 10 mile/hr

$$Power\ factor = 0.0000069 \times V^3 \tag{3.1}$$

Power factor = 0.007

เราสมมติค่า u/v แล้วจะได้ค่า E (Efficiency factor)

สมมติค่า u/v = 5 จะได้ค่า E = 0.32

จากสมการ

$$HP = P \times A \times E \tag{3.2}$$

และ

$$\text{กำลัง(วัตต์)} = 764 \times P \times A \times E$$

$$\text{กำลังงาน} = 125 \text{ วัตต์}$$

จากรูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม กับ Power factor

ค่า Power factor = 0.007

ค่า E = 0.32

$$125 = (764) \times 0.007 \times A \times 0.32$$

$$A = 125 / (764 \times 0.007 \times 0.32)$$

$$= 74.22 \text{ ตารางฟุต}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2) \tag{3.3}$$

$$74.22 = (\pi / 4) D^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งหันทมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ฟุต หรือประมาณ 3 เมตร จากกราฟ Solidity
ที่ $u/v = 5$

$$\text{Solidity} = 0.07$$

$$\text{Solidity} = \text{Blade} / \text{Frontal area} \quad (3.4)$$

$$0.07 = \text{Blade area} / 74.22$$

$$\text{Blade area} = 0.07 \times 74.22$$

$$= 5.2 \text{ ตารางฟุต}$$

$$\text{Blade area} = \text{Blade long} \times \text{Blade Chord} \quad (3.5)$$

$$5.2 = 3.85 \times \text{Blade chord}$$

$$\text{Blade area chord} = 1.35 \text{ ฟุต} = 40.5 \text{ cm.}$$

$$\text{ความยาวคอร์ด} = 20.5 \text{ c.m}$$

Sta	Upper	Lower
0	0	0
1.25	2.44	-1.43
2.5	3.39	-1.95
5.0	4.73	-2.49
7.5	5.76	-2.74
10	6.59	-2.86
20	8.8	-2.74
30	9.76	-2.26
40	9.8	-1.8
50	9.19	-1.4
60	8.14	-1.00
70	6.69	-0.65
80	4.89	-0.39
90	2.71	-0.22
100	0	0

ตารางที่ 3.2 Upper และ Lower ของใบพัดชนิด NACA 4412 (%) ที่ Ordinates ต่าง ๆ

นำค่าความยาวคอร์ดที่ได้เข้าไปคูณกับค่าในตาราง 3.2 จะได้ขนาดของ Airfoil

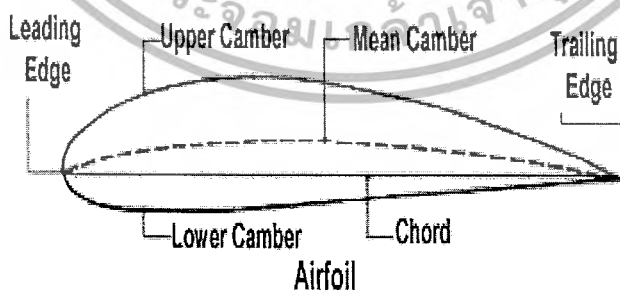
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาขนาด Airfoil

ขนาดAirfoil=ค่าจากตารางชนิดของairfoil*ความยาวคอर्ड

Sta	Upper	Lower
0	0.	0
1.25	0.5002	-0.293
2.5	0.695	-0.399
5.0	0.9697	-0.511
7.5	1.181	-0.562
10	1.351	-0.586
20	1.804	-0.562
30	2.001	-0.463
40	2.001	-0.369
50	1.884	-0.287
60	1.669	-0.205
70	1.371	-0.133
80	1.002	-0.079
90	0.555	-0.045
100	0	0

ตารางที่ 3.3 Upper และ Lower ของใบพัดที่คำนวณได้ที่ Ordinates ต่าง ๆ

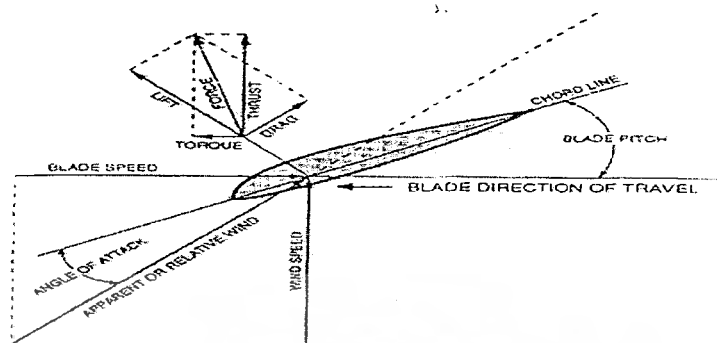


รูปที่ 3.10 Airfoil[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การคำนวณแรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์

3.8.1 แรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์



รูปที่ 3.11 แรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์

3.8.2 Power ที่ได้จากการคำนวณ

ความเร็วลมที่ในการออกแบบ 4.5 m/s

ความเร็วรอบที่ต้องการ = 60 รอบต่อนาที

$$\begin{aligned} \text{Blade speed } V_r &= \frac{\pi DN}{60} \\ &= \frac{\pi(3)(60)}{60} \\ &= 3(\pi) \\ &= 9.424 \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (3.6)$$

4.8.3 การคำนวณ Output จากการออกแบบ

ความเร็วลมที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของแอร์ฟอยล์

$$\begin{aligned} \text{Relative wind } V_A &= \sqrt{V_w^2 + V_r^2} \\ &= \sqrt{4.5^2 + 9.424^2} \\ &= \sqrt{109.06} \\ &= 10.44 \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (3.7)$$

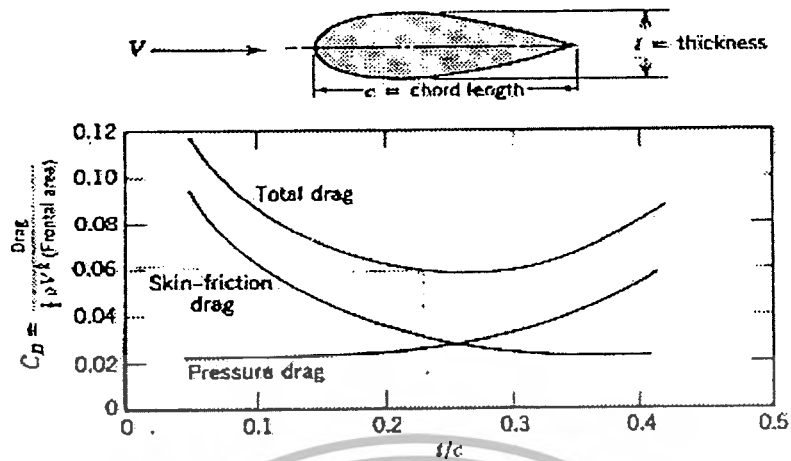
จาก

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (4.8)$$

และ

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ค่าความสัมพันธ์ C_D กับอัตราส่วนของคอร์คอร์ด

จากรูปที่ 3.12

$$\frac{t}{c} = \frac{4.75}{21}$$

$$\frac{t}{c} = 0.226$$

จะได้ $C_D = 0.065$

แทนค่าในสมการ (3.3)

$$0.065 = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

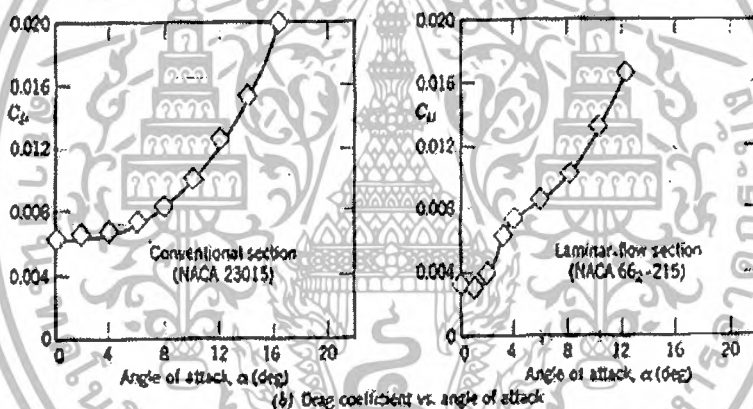
$$\rho_{air} = 1.23 \frac{kg}{m^3}$$

$$A = 6.9498 m^2$$

$$0.065 = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(1.23)(10.44)^2(6.9498)}$$

$$\therefore F_D = 24.61 N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ค่าความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับค่าสัมประสิทธิ์ C_D, C_L

จากกราฟที่ 3.13

Angle of attack = 15° (NACA 4412)

$$C_L = 1.6$$

แทนค่าในสมการ (4.4)

$$1.6 = \frac{F_L}{\frac{1}{2}(1.23)(10.44)^2(6.9498)}$$

$$\therefore F_L = 605.99 N$$

$$F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2}$$

$$= \sqrt{605.99^2 + 24.61^2}$$

$$\therefore F = 606.489 N$$

(3.10)

แรงที่กระทำต่อใบพัด = 606.489 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Wind Angle} = \cos^{-1} \left(\frac{\text{Blade speed}}{\text{Relative Wind}} \right) \quad (3.11)$$

$$= \cos^{-1} \left(\frac{9.424}{10.44} \right)$$

$$= 25.49^\circ$$

$$\text{Torque} = F \times R \quad (3.12)$$

$$= 3F \sin 10.23 \times 0.75$$

$$= 3 \times 606.489 \times 0.177 \times 0.75$$

$$= 241.53 \text{ N.m}$$

จะได้แรงบิด 241.53 N.m นิวตันเมตร

3.9 การคำนวณหาอัตราเฟืองทด[6]

อัตราทด (Velocity ratio) m_ω คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับต่อความเร็วเชิงมุมของเฟืองตาม ถ้าให้ “1” และ “2” แทนเฟืองขับและเฟืองตามตามลำดับ จากความรู้ทางด้านกลศาสตร์จะได้ว่า

$$m_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right) = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (3.13)$$

โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุม, rad/s

N = ความเร็วรอบ, rpm

D = เส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์, mm หรือ in.

N = จำนวนฟัน

อัตราส่วนเฟือง (Gear ratio) m_g คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนฟันของเฟืองต่อจำนวนฟันของพีเนียน ถ้าพีเนียนเป็นตัวขับแล้ว

$$m_g = m_\omega = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

อัตราทดเฟืองของกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดแอร์ฟอยล์แบบ 3 ใบ

กำหนดให้ใบกังหันหมุน 60 รอบต่อนาที

$$\text{จาก สูตร } m_\omega = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า $49/12 = 4.08$

$$m_\omega = 4.08$$

เอกสารนี้เผยแพร่เมื่อผ่านชุดเฟืองทดชุดแรก = อัตราส่วนเฟืองทด (m_ω) \times ความเร็วรอบของใบกังหัน โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วรอบผ่านชุดเฟืองทดชุดแรก} &= 60 \times 4.08 \\ &= 244.8 \text{ รอบต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\text{จาก สูตร } m\omega = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น จะได้ว่า } 45/12 = 3.75$$

$$m\omega = 3.75$$

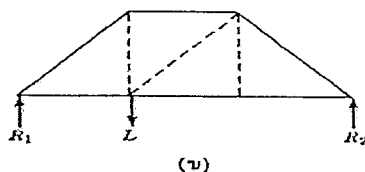
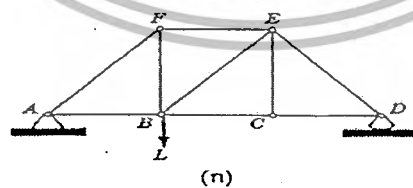
$$\begin{aligned} \text{ความเร็วรอบเมื่อผ่านชุดเฟืองทดชุดที่สอง} &= \text{อัตราส่วนเฟืองทด (} m\omega \text{)} \times \text{ความเร็วรอบของเพลาชุดแรก} \\ \text{ความเร็วรอบเมื่อผ่านชุดเฟืองทดชุดที่สอง} &= 3.75 \times 244.8 \\ &= 918 \text{ รอบต่อนาที} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นความเร็วรอบของเพลาก็ไปหมุนแกนเนอร์เรเตอร์ที่ความเร็วใบกังหัน 60 รอบต่อนาที จะได้ความเร็วรอบของเพลาก่อนเข้าแกนเนอร์เรเตอร์ คือ 918 รอบต่อนาที (ถ้าความเร็วใบกังหันเพิ่มขึ้นความเร็วรอบของเพลาก่อนเข้าแกนเนอร์เรเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือจะขึ้นอยู่กับความเร็วลม)

3.10 โครงสร้าง[7]

ในการออกแบบและสร้างกังหันลมนั้น ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ ฐานของกังหันลม โดยฐานของกังหันลมมีหลายรูปแบบ เช่น เป็นโครงถัก (Truss) ฐานทรงกระบอก เป็นต้น สิ่งที่เราต้องคำนึงถึง คือ ฐานของกังหันลมต้องสามารถรองรับน้ำหนักของกังหันลมและสามารถต้านทานแรงลมที่อาจทำให้กังหันลมเสียหายหรือพังทลายได้ ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงฐานของกังหันลมที่เป็นโครงถัก (truss)

ในการวิเคราะห์หาแรงโครงถักธรรมดา (simple truss) ในที่นี้จะแสดงได้สองวิธีและแต่ละวิธีจะใช้รูปที่ 3.14 (ก) เป็นตัวอย่างและรูปที่ 3.14 (ข) แสดงผังวัตถุอิสระของโครงถัก แรงปฏิกิริยาภายนอกได้โดยการคำนวณจากสมการของการสมดุลเมื่อคิดโครงถักทั้งรูป ต่อไปจึงวิเคราะห์หาแรงในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน

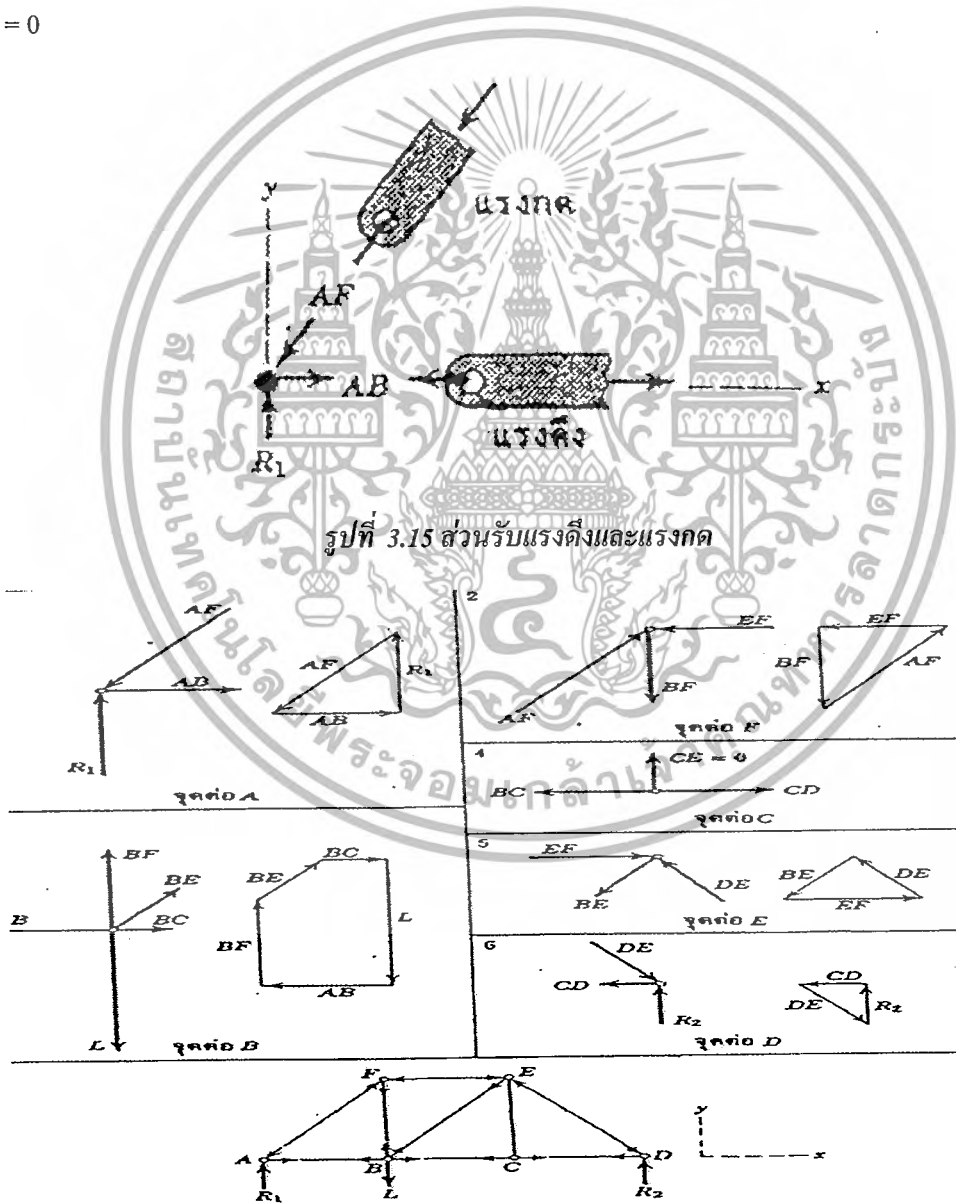


รูปที่ 3.14 โครงถักรับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้จุดต่อ (Method of joint) วิธีนี้ประกอบไปด้วยความสมดุลของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อสลักข้อต่อที่จุดต่อ (joint) ต่าง ๆ ซึ่งก็คือ การสมดุลของแรงที่ตัดกันนั่นเอง และใช้สมการของการสมดุลเพียงสองสมการเท่านั้น วิธีการเริ่มต้นที่จุดต่อใดก็ได้ที่มีแรงที่ทราบค่าแล้ว อย่างน้อยหนึ่งแรงและมีแรงที่ไม่ทราบค่าไม่เกินสองแรง อาจจะเริ่มสลักทางด้านซ้ายก่อนที่ผังวัสดุอิสระ (free body diagram)

แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 จุดต่อต่าง ๆ กำหนดด้วยอักษรแรงในชิ้นส่วนกำหนดด้วยอักษรสองตัวของชิ้นส่วน AF และ AB ได้แสดงไว้ด้วยเพื่อให้เห็นชัดถึงแรงกระทำและแรงปฏิกิริยาจริง ๆ แล้ว ชิ้นส่วน AB จะกดทางด้านซ้ายของสลัก ถึงแม้ว่าเขียนแรง AB ไว้ทางด้านขวาและชี้ออกจากสลัก ดังนั้นถ้าเขียนแรงไว้ทางด้านที่มีชิ้นส่วนอยู่เป็นหลักแล้ว (tension) จะชี้ออกจากสลักแรงกด (compression) จะชี้เข้าหาสลักเสมอ ขนาดของแรง AF หาได้จากสมการ $\sum F_y = 0$ และ AB หาได้จาก $\sum F_x = 0$



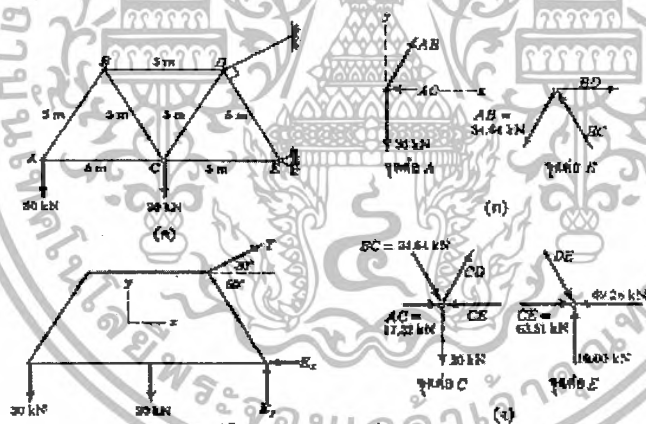
รูปที่ 3.16 ไรอะแกรมของแมกซ์เวลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปคิดที่สลัก F เพราะว่าในตอนนี้มีตัวไม่ทราบค่าเพียงสองแรงเท่านั้น คือ EF และ BF สลัก B , C , E และ D เป็นลำดับขั้นที่จะคิดต่อไป ผังวัสดุอิสระซึ่งเป็นการแสดงสมการของสมการสมดุล $\sum F_x = 0$ และ $\sum F_y = 0$ แบบกราฟฟิกได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 ตัวเลขหมายถึงระดับในการคิดของสลักต่าง ๆ มีข้อควรสังเกตไว้ในที่นี้ว่าเมื่อถึงสลัก D ซึ่งอยู่จุดสุดท้ายแล้ว แรงปฏิกิริยา R_2 จะต้องสมดุลกับแรงใน CD และ ED ซึ่งได้มาจากสองสลักที่อยู่ข้าง ๆ และสิ่งนี้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ และมีข้อสังเกตอีกประการหนึ่งว่า ในการแยกสลัก C ออกเป็นอิสระ จะเห็นได้ทันทีว่าแรงใน CE จะเป็นศูนย์ตามสมการ $\sum F_y = 0$ แต่แรงในชิ้นส่วนนี้จะไม่มีศูนย์ ถ้ามีแรงภายนอกกระทำที่ C บ่อยครั้งที่มักจะแสดงถึงแรงดึง T และแรงกด C ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ลงในรูปเดิม โดยเขียนลูกศรที่ออกจากสลักเมื่อเป็นแรงดึงและชี้เข้าหาสลักเมื่อเป็นแรงกด ดังแสดงไว้ในตอนล่างของรูปที่ 3.15

ในบางกรณีไม่สามารถที่จะกำหนดทิศทางที่ถูกต้องของแรงที่ไม่ทราบค่าที่กระทำต่อสลักได้ เมื่อเป็นเช่นนี้สามารถที่จะกำหนดเช่นไรก็ได้ ค่าลบที่ได้จากการคำนวณ หมายถึงว่าคำตอบที่ถูกต้องจะต้องจะมีทิศทางกลับกับที่สมมติไว้

ตัวอย่างที่ 1 จงคำนวณหาแรงในชิ้นส่วนของโครงถักแบบปลายยึดแน่น (Cantilever truss) ที่รับภาระดังรูปที่ 6.10 ด้วยวิธีการแบบจุดต่อ



รูปที่ 3.17 ลักษณะแรงต่าง ๆ

ถ้าไม่ต้องการคำนวณแรงปฏิกิริยาภายนอกที่ D และ E การคำนวณจะต้องเริ่มจากสลักที่ปลายรับน้ำหนักก่อน แต่อย่างไรก็ดี เมื่อจะต้องการหาแรงในชิ้นส่วนทุกชิ้นอยู่แล้ว ดังนั้นจะเริ่มคำนวณหาแรงปฏิกิริยาภายนอกที่ D และ E ก่อน จากผังวัสดุดังรูป (ข)

จากสมการของการสมดุลจะได้ว่า

$$T = 80.00 \text{ KN} \qquad E_x = 69.28 \text{ KN} \qquad E_y = 10.00 \text{ KN}$$

ในรูป (ค) เป็นผังวัสดุอิสระ ที่แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำที่แต่ละสลัก ทิศทางที่ถูกต้องของแรงจะหาได้

เมื่อพิจารณาสลักเรียงลำดับไป ที่สลัก A ทิศทางของแรงถูกต้องอย่างไม่มีปัญหา จากการสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\sum F_x = 0); \quad 0.866 AB - 30 = 0 \quad AB = 34.64 \text{ KN (T)}$$

$$(\sum F_x = 0); \quad AC - 0.5 (34.64) = 0 \quad AC = 17.32 \text{ KN (C)}$$

ซึ่ง T เป็นแรงดึง และ C เป็นแรงกด

ต่อไปจะวิเคราะห์สลัก B เพราะว่าที่สลัก C มีแรงที่ไม่ทราบค่ามากกว่าสองแรง BC จะต้องมีทิศทางขึ้นเมื่อเป็นดังนี้ แรง BD จะต้องชี้ไปทางขวาเพื่อให้แรงสมดุล เช่นเดียวกัน แรงที่ไม่ทราบค่าคำนวณได้จาก

$$(\sum F_x = 0); \quad 0.866 BC - 0.866 (34.64) = 0 \quad BC = 34.64 \text{ KN (C)}$$

$$(\sum F_y = 0); \quad BD - 0.5 (2) (34.64) = 0 \quad BD = 34.64 \text{ KN (T)}$$

ในขณะที่สลัก C ก็เหลือแรงที่ไม่ทราบค่าเพียงสองแรงและหาได้จากแบบเดียวกับที่แล้วมา

$$(\sum F_y = 0); \quad 0.866 CD - 0.866 (34.64) - 20 = 0 \quad CD = 57.74 \text{ KN (C)}$$

$$(\sum F_x = 0); \quad CE - 17.32 - 0.5(34.64) - 0.5(57.74) = 0 \quad CE = 63.51 \text{ KN (C)}$$

สุดท้ายที่สลัก E จะได้

$$(\sum F_y = 0); \quad 0.866 DE = 10.00 \quad DE = 11.55 \text{ KN}$$

และสมการ $(\sum F_x = 0)$; เป็นการตรวจสอบความถูกต้อง

3.11 การคำนวณแรงที่กระทำต่อใบกังหัน

จากสมการ

$$F = \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (3.14)$$

F = แรงที่กระทำต่อใบกังหัน

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

A = พื้นที่

V = ความเร็วลม

จากสูตร(3.14)เราทราบค่า

$$\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 12 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (3^2 - 0.6^2)$$

แทนค่าลงในสูตร

$$F = \frac{1}{2} \times 1.17 \times \frac{\pi}{4} (3^3 - 0.6^2) \\ = 1,654 \text{ N}$$

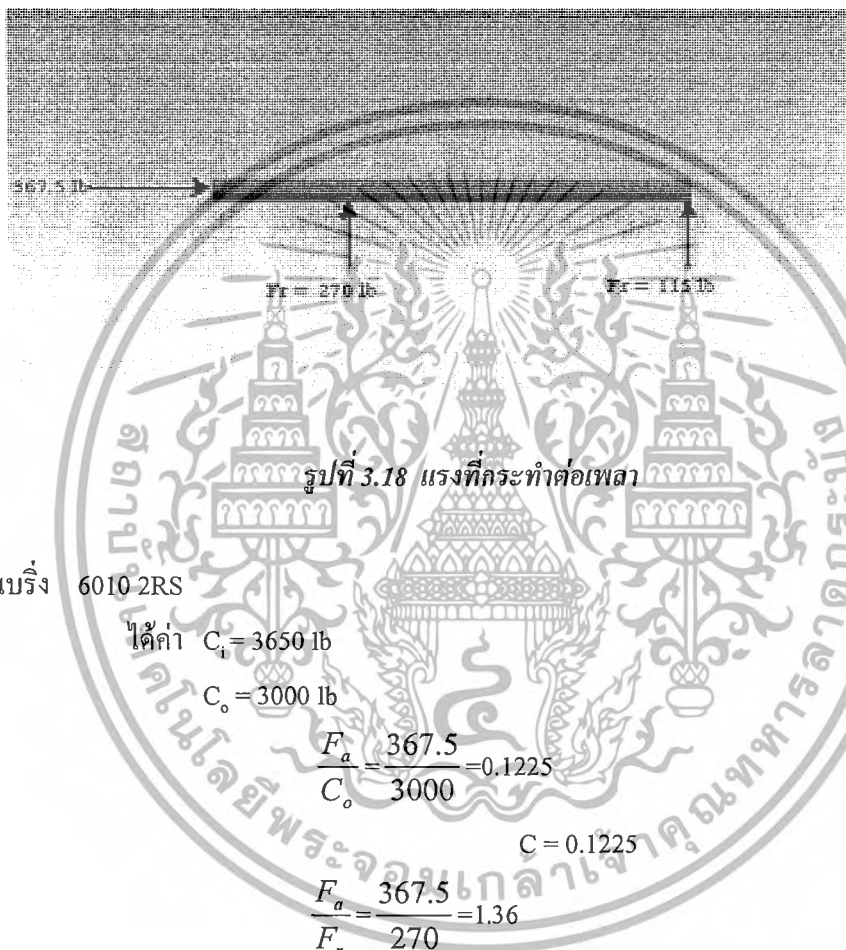
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แรงที่กระทำแต่ละใบ} = \frac{F}{n}$$

$n =$ จำนวนใบกังหัน

$$\begin{aligned} \therefore \text{แรงที่กระทำแต่ละใบ} &= \frac{1,654}{3} \\ &= 501.3 \text{ N} \end{aligned}$$

3.12 การคำนวณหาอายุการใช้งานของแบริ่ง



ใช้บอลแบริ่ง 6010 2RS

ได้ค่า $C_i = 3650 \text{ lb}$

$C_o = 3000 \text{ lb}$

$$\frac{F_a}{C_o} = \frac{367.5}{3000} = 0.1225$$

$$C = 0.1225$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{367.5}{270} = 1.36$$

$$\frac{F_a}{F_r} > C$$

จะได้ $X = 0.56, Y = 2$

จาก

$$P_1 = xF_r + yF_a \quad (3.15)$$

$$= 0.56(270.4) + 2(367.5)$$

$$= 886.42 < C_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\begin{aligned}
 L_{10} &= \left(\frac{C_i}{P} \right)^3 & (3.16) \\
 &= \left(\frac{3650}{886.42} \right)^3 \\
 &= 70 \text{ ล้านรอบ} \\
 L_{10} &= \frac{70 \times 10^6}{60 \times 130} \\
 &= 8974.35 \text{ ชม.}
 \end{aligned}$$

3.13 การคำนวณหาขนาดเพลลา

จากรูปที่ 3.17

$$\begin{aligned}
 M_{AH} &= 0.30 \times 1201.7 = 360 \text{ N.m} \\
 M_{BH} &= 0.04 \times 520 = 206 \text{ N.m} \\
 M_A &= \sqrt{M_{AH}^2 + M_{BH}^2} & (3.17) \\
 &= \sqrt{360^2 + 201^2}
 \end{aligned}$$

โมเมนต์คัตสูงสุด = 414,770 N.mm

$$\begin{aligned}
 \text{โมเมนต์บิดสูงสุด } T &= 360 \text{ N.m} \times \frac{0.49}{2} = 88.2 \text{ N.m} \\
 &= 88,200 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

จากเพลลากระดูกเล็กน้อย $C_m = 1.5$ และ $C_t = 1$

เพลลาไม่มีลวดดัด $C_d = 55 \text{ N/mm}^2$

$$\therefore d^3 = \frac{16}{\pi C_d} \left[(C_t T)^2 + (C_m M_A)^2 \right]^{1/2} & (3.18)$$

$$d^3 = \frac{16}{\pi C_d} \left[(1.5 \times 88,200)^2 + (1 \times 414,770)^2 \right]^{1/2}$$

$$d = 34 \text{ mm}$$

ซึ่งใช้เพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 34 mm

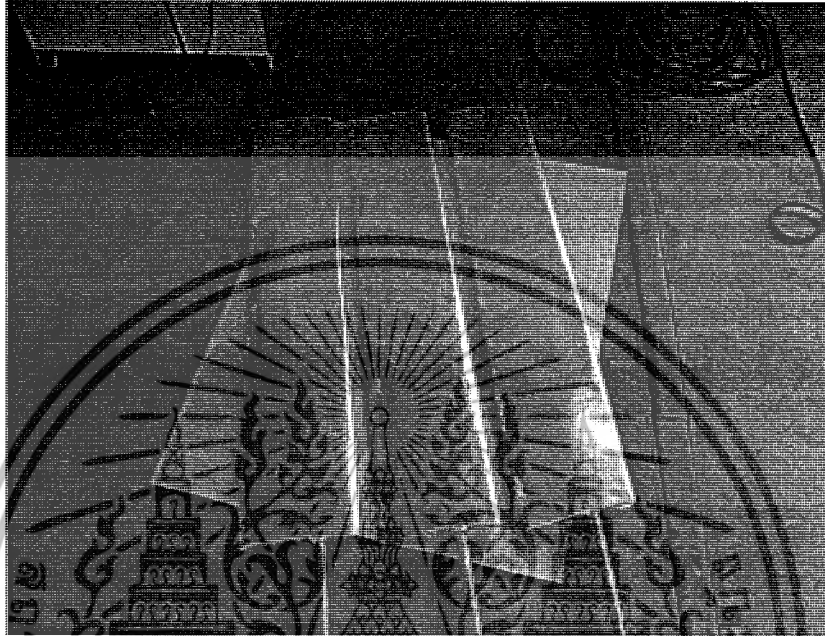
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ส่วนประกอบและขั้นตอนการทดลองของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

4.1 ส่วนประกอบของกังหันลม

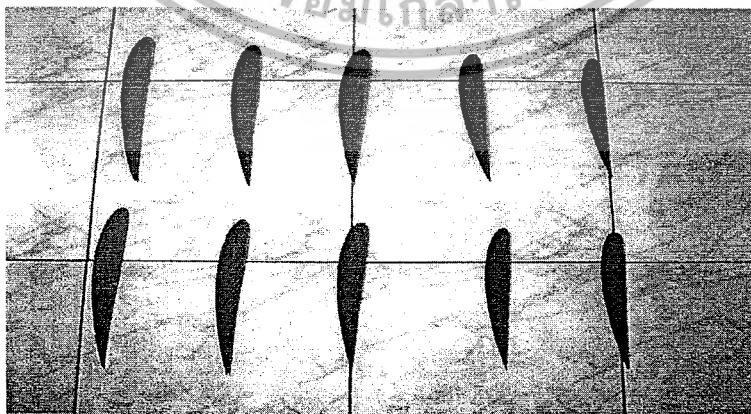
4.1.1 ใบกังหัน



รูปที่ 4.1 ใบกังหันลม

การประกอบและ ส่วนประกอบของใบกังหัน

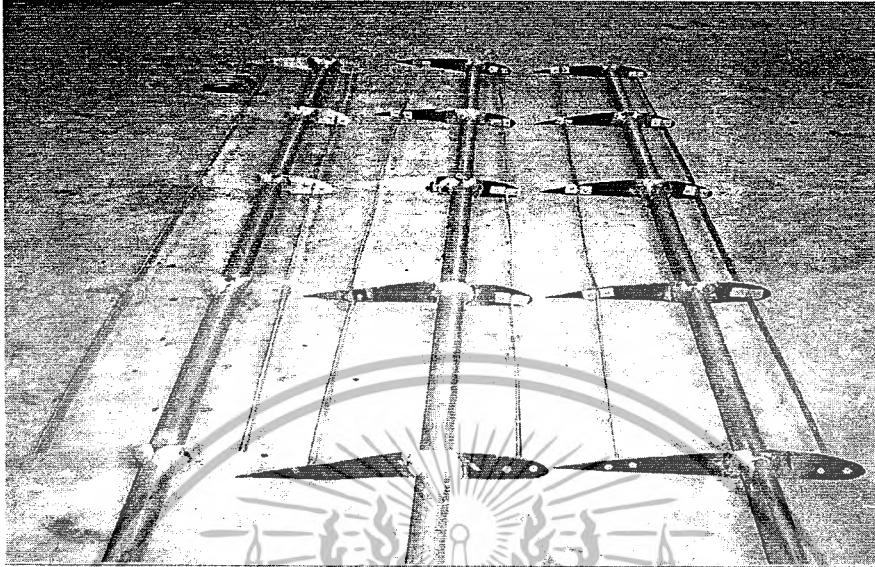
4.1.1.1 แอร์ฟอยล์ ทำจากอลูมิเนียมความหนา 1 มิลลิเมตร แอร์ฟอยล์เป็นส่วนประกอบของกังหัน คือ เป็นโครงสร้างข้างในของใบกังหันซึ่งมีลักษณะโค้ง



รูปที่ 4.2 แอร์ฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 นำแอร์ฟอยล์มาเชื่อมประกอบโดยกรรมวิธีเชื่อมทิก(TIG) เข้ากับแกนของใบกังหันความยาว 1.5 เมตรโดยแอร์ฟอยล์จะมีรูเจาะตรงกลางไว้ใส่แกนใบกังหันจากนั้นเชื่อมประกอบ ดังรูป



รูปที่ 4.3 โครงสร้างใบ

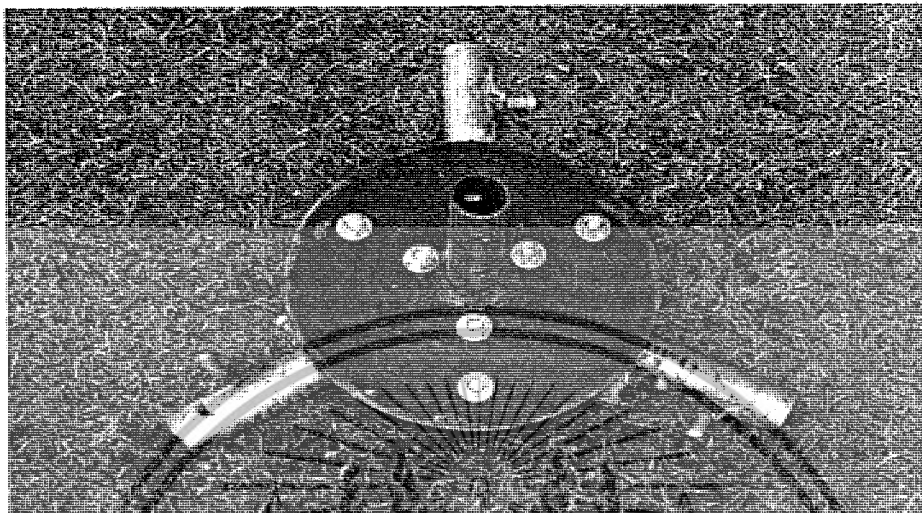
4.1.1.3 นำอลูมิเนียมบาง 0.3 มิลลิเมตร มาหล่อเพื่อประกอบเป็นใบกังหัน เพื่อความแข็งแรงต้องใช้การเชื่อมประสาน โดยกรรมวิธีเชื่อม TIG



รูปที่ 4.4 ใบกังหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 หน้าแปลน ประกอบด้วยเหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น มาไสน็อตโดยมีท่อนเหล็กขนาด 3 นิ้ว จำนวน 3 อัน แบ่งมุมเท่า ๆ กัน โดยใช้ความแตกต่างกัน 120 องศา แล้วยังมีท่อเหล็กติดกับหน้าแปลนอีกด้านเพื่อไว้ให้เพลาสวมเข้าต่อไปยังชุดเฟืองทด



รูปที่ 4.5 หน้าแปลน

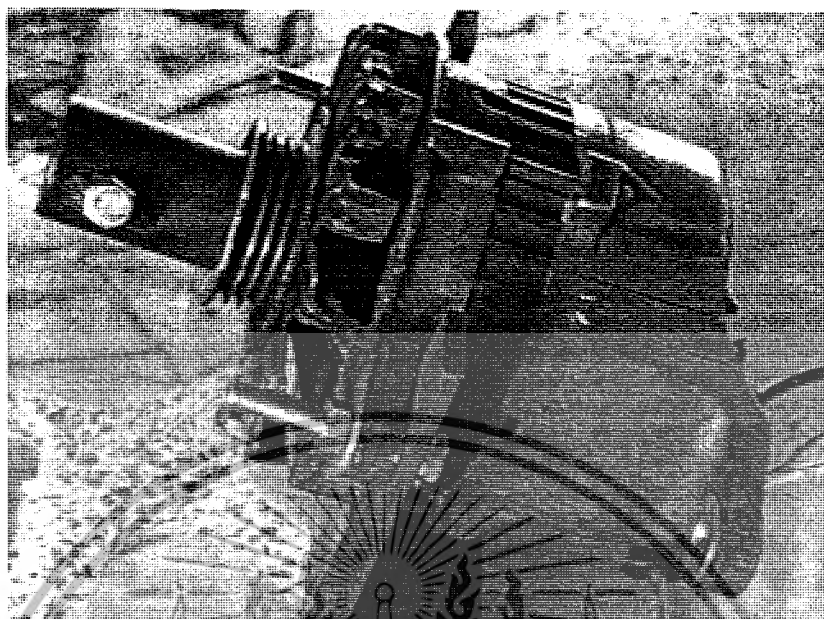
4.1.3 ชุดเฟืองทด ประกอบด้วย เฟืองจำนวน 4 เฟือง แบ่งชุดเฟืองออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก จำนวนฟัน 49 ในเฟืองใหญ่ และเฟืองเล็ก 12 ฟัน ส่วนชุดเฟืองทดชุดที่ 2 มีฟัน 45 ของเฟืองใหญ่ ส่วนเฟืองเล็ก 12 ฟัน และเฟืองทดทุกเฟืองสวมอยู่ในเพลานขนาด 1.5 นิ้ว และ 1 นิ้ว



รูปที่ 4.6 ชุดเฟืองทด

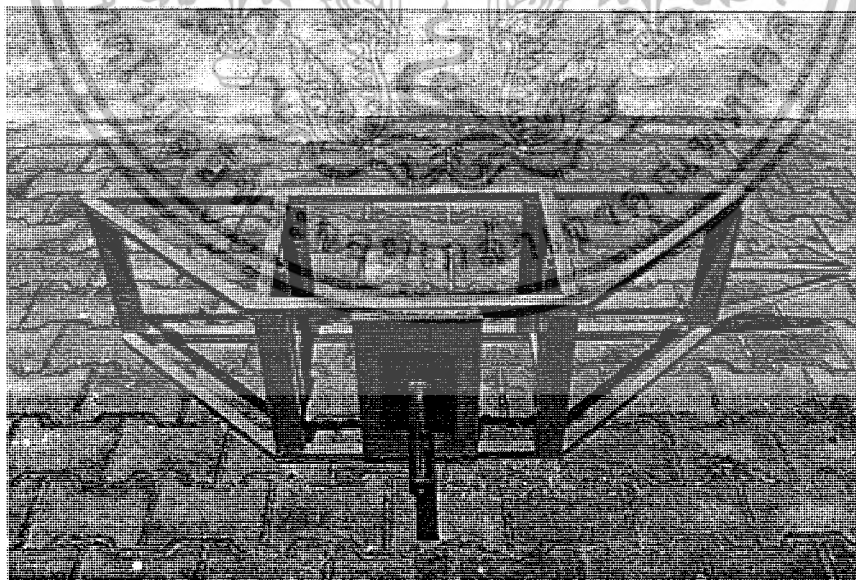
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ไคชาร์จ เป็นของรถยนต์ มีสบูบิชิ ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมแปร์



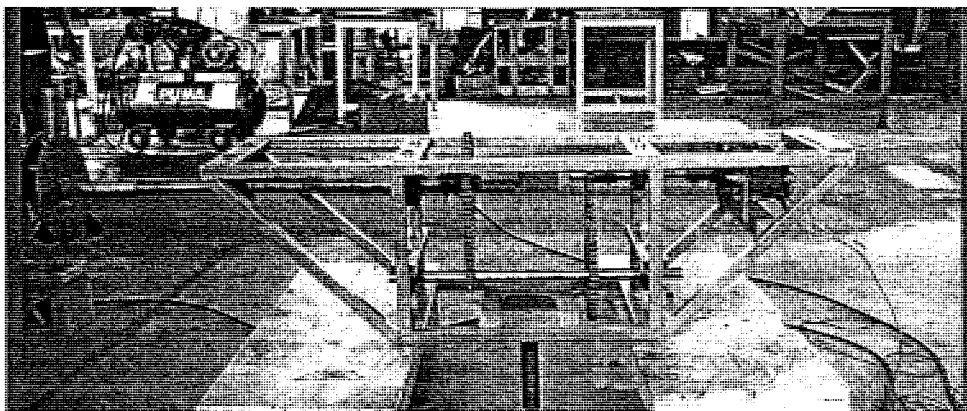
รูปที่ 4.7 ไคชาร์จ

4.1.5 โครงฐานรองรับชุดเฟืองทด ประกอบไปด้วยเหล็กกล่องโลหะขนาด 1x1 นิ้ว ความยาวของ โครงฐานรองรับชุดเฟืองทด ยาว 120 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร



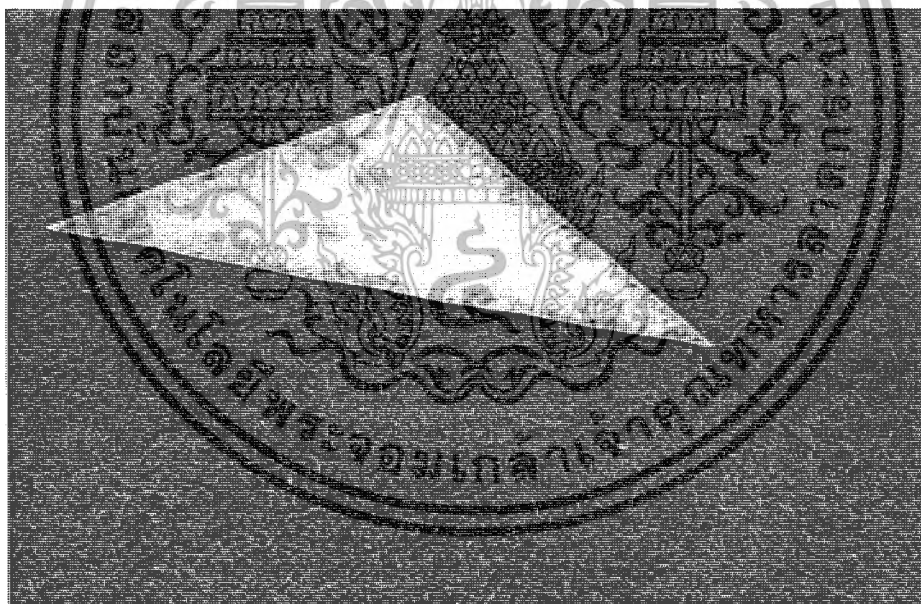
รูปที่ 4.8 โครงฐานรองรับชุดเฟืองทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ประกอบเฟืองทดกับชุดเฟืองทดเสร็จแล้ว

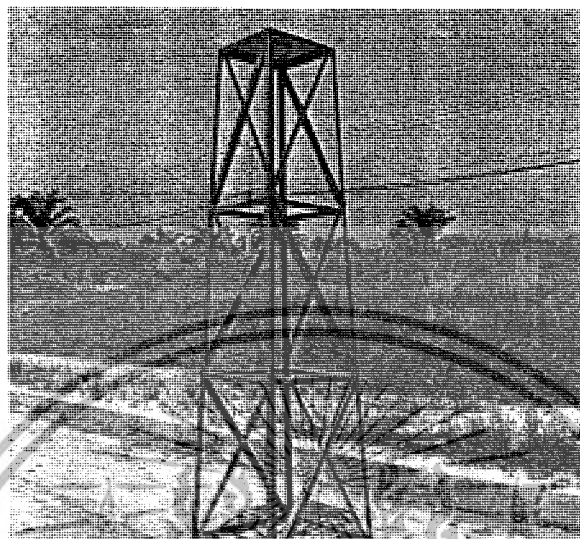
4.1.6 หางเสือ เป็นส่วนรับลมเพื่อปรับมุมหาทิศทาง



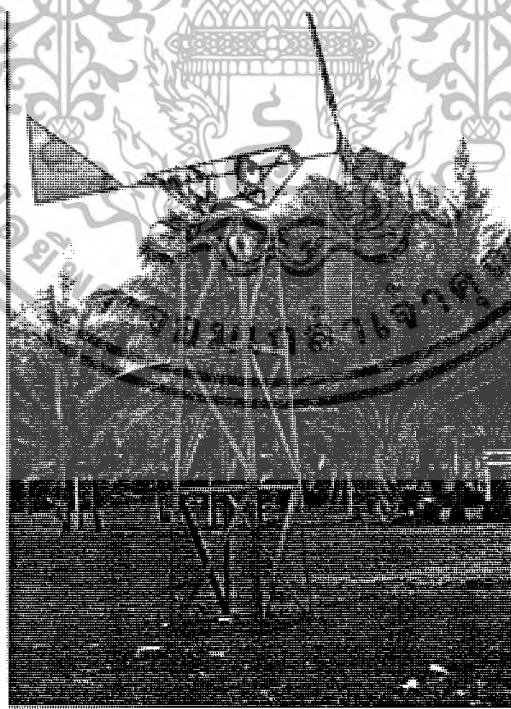
รูปที่ 4.10 หางเสือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 โครงสร้างฐานรองรับ ประกอบด้วยเหล็กฉากขนาด 1.5 นิ้ว โดยการเชื่อมประกอบให้มีการ
 ดักโครงเพื่อความแข็งแรง โดยมีความสูง 3 เมตร ขนาดด้านบน 50×50 เซนติเมตร และด้านล่าง 1×1 เมตร



รูปที่ 4.11 โครงสร้างฐานรองรับ

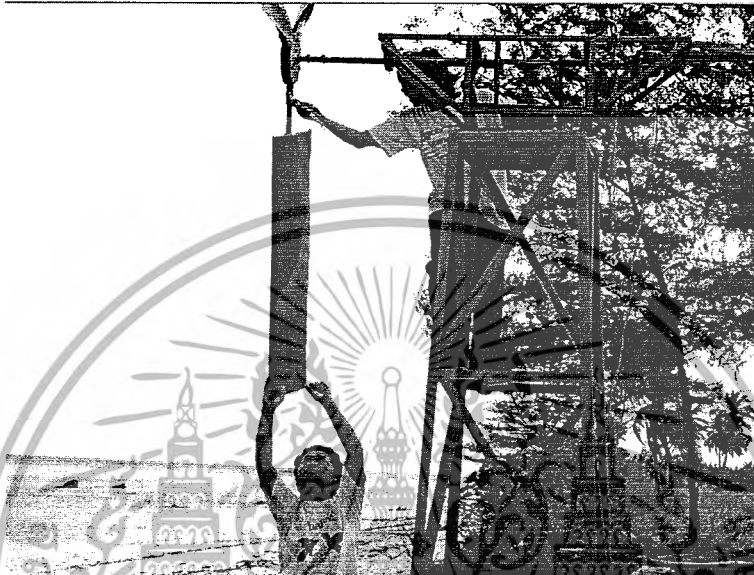


รูปที่ 4.12 กังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือกสถานที่ตั้งที่มีลมเหมาะสมในการทดลองกังหันเมื่อดำเนินการไปติดตั้งตรงสถานที่ตั้งที่เลือกไว้
2. ทำการปรับมุมใบกังหันเพื่อหามุมที่รับลมได้ดีที่สุด โดยการปรับมุมที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 7.12



รูปที่ 4.13 การปรับมุมใบกังหัน

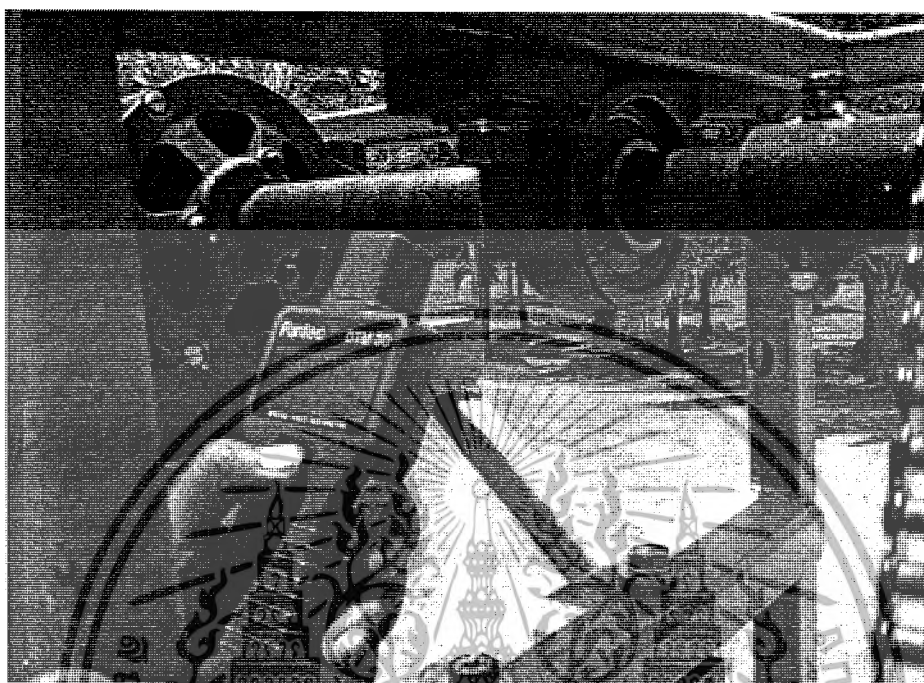
3. เมื่อปรับมุมใบกังหันเสร็จทุกใบ โดยปรับเริ่มจากมุมแรกที่ 10 องศา แล้วปล่อยให้กังหันหมุนเมื่อลมพัดมาจากนั้นวัดความเร็วลมแล้วบันทึกข้อมูลความเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 7.14



รูปที่ 4.14 การวัดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ช่วงที่ทำการวัดความเร็วลมก็วัดความเร็วรอบของเพลลาเข้าไดซาร์จพร้อมกันไปด้วย จากนั้นบันทึกค่าความเร็วรอบ ดังแสดงในรูปที่ 7.15

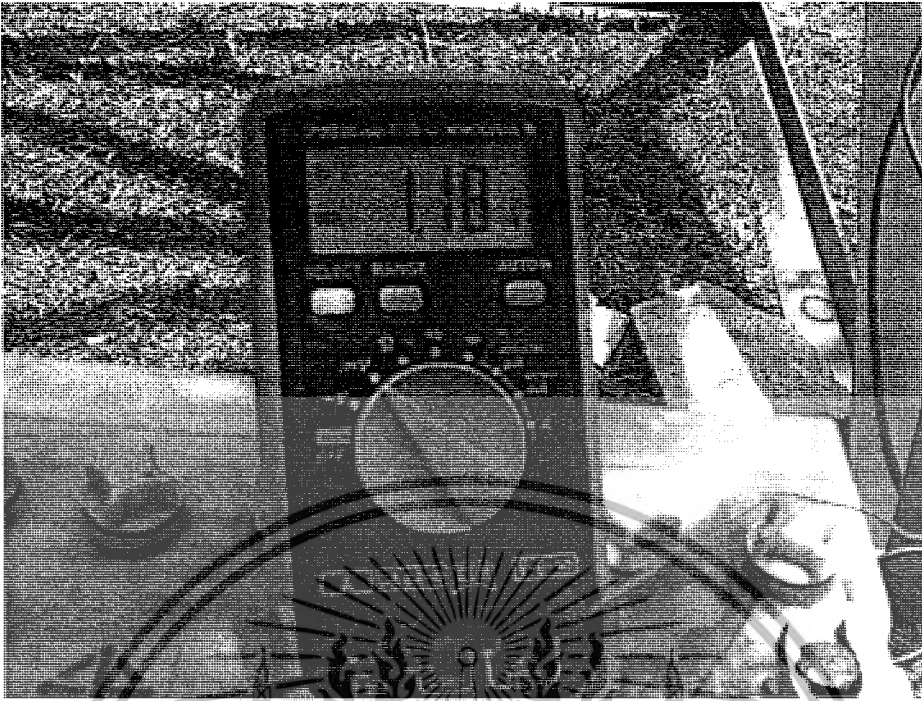


รูปที่ 4.15 การวัดความเร็วรอบ

5. ในขณะเดียวกันก็อ่านค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า จากนั้นจดบันทึกค่า ดังแสดงในรูป 4.16 และ รูปที่ 4.17

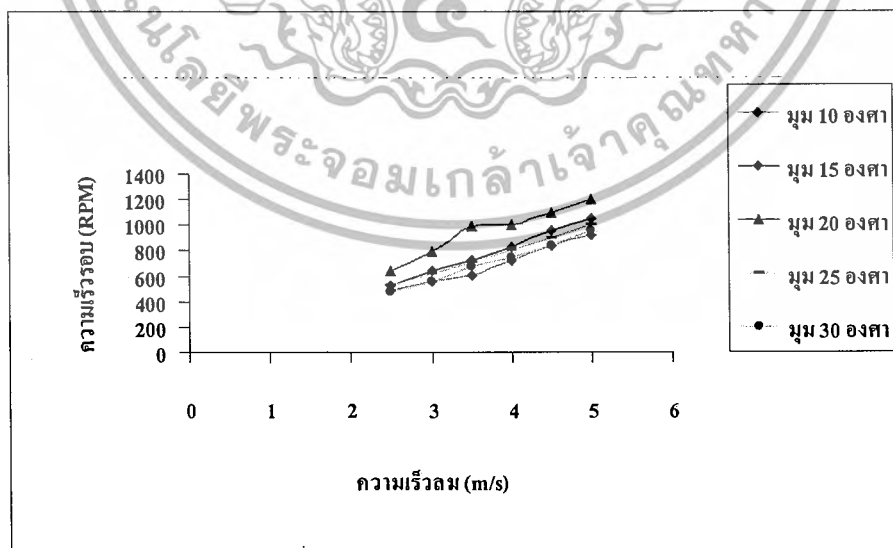


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 4.16 การวัดค่ากระแสไฟฟ้า** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

5. เมื่อบันทึกค่าความเร็วลม, ความเร็วรอบ, กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ของทุกมุมคือที่ 10,15,20,25 และ 30
6. นำค่าที่ได้จากกรบันทึกไปพลอตกราฟ



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

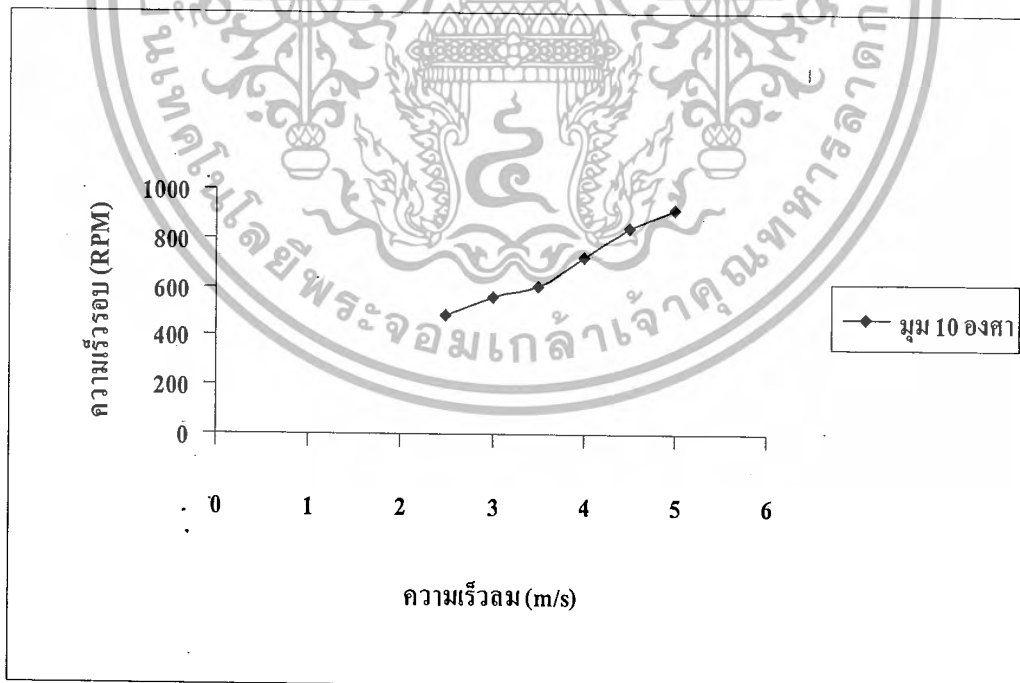
ผลการทดลอง

ผลการทดลอง

ที่มุม 10 องศา

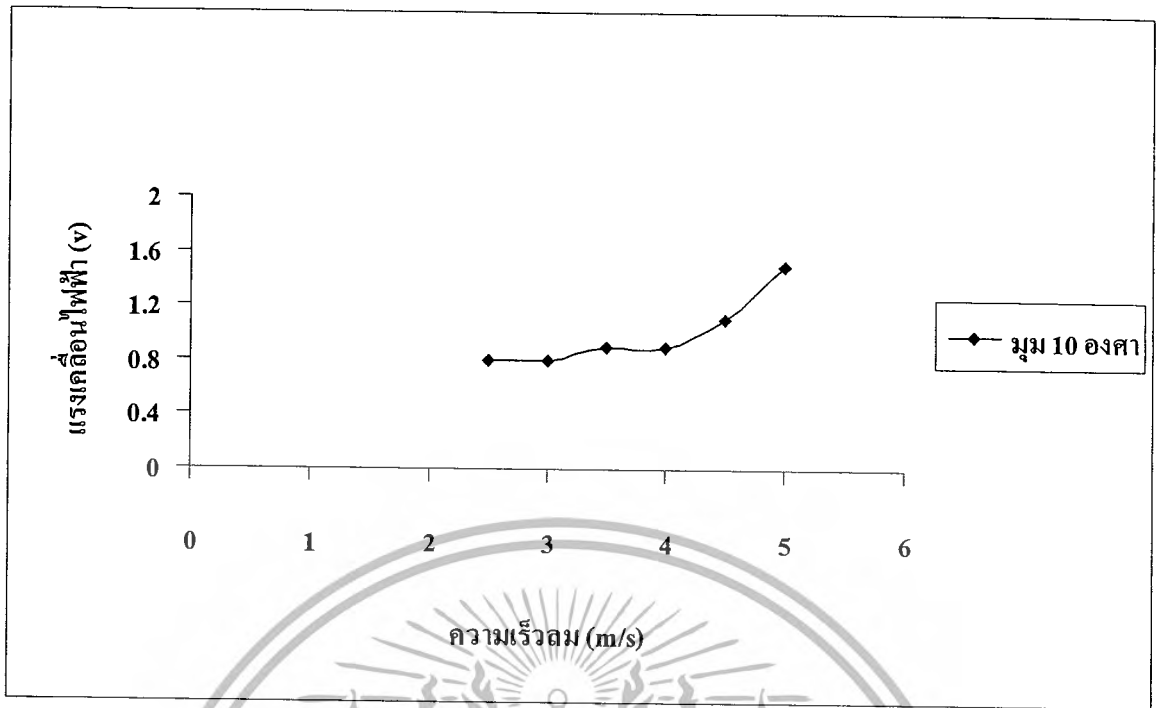
ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลองที่มุม 10 องศา

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (RPM)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (mAmp)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (Volt)
2.5	486	50	0.8
3	556	72	0.8
3.5	603	82	0.9
4	722	87	0.9
4.5	840	98	1.1
5	920	109	1.5

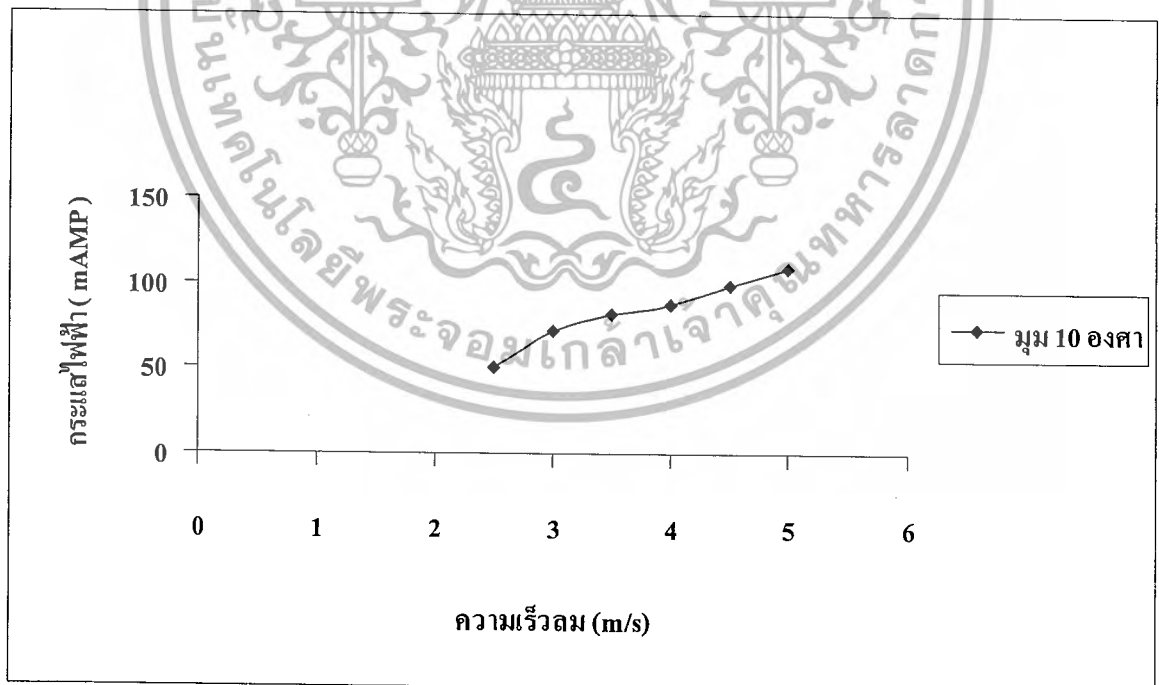


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบที่มุม 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

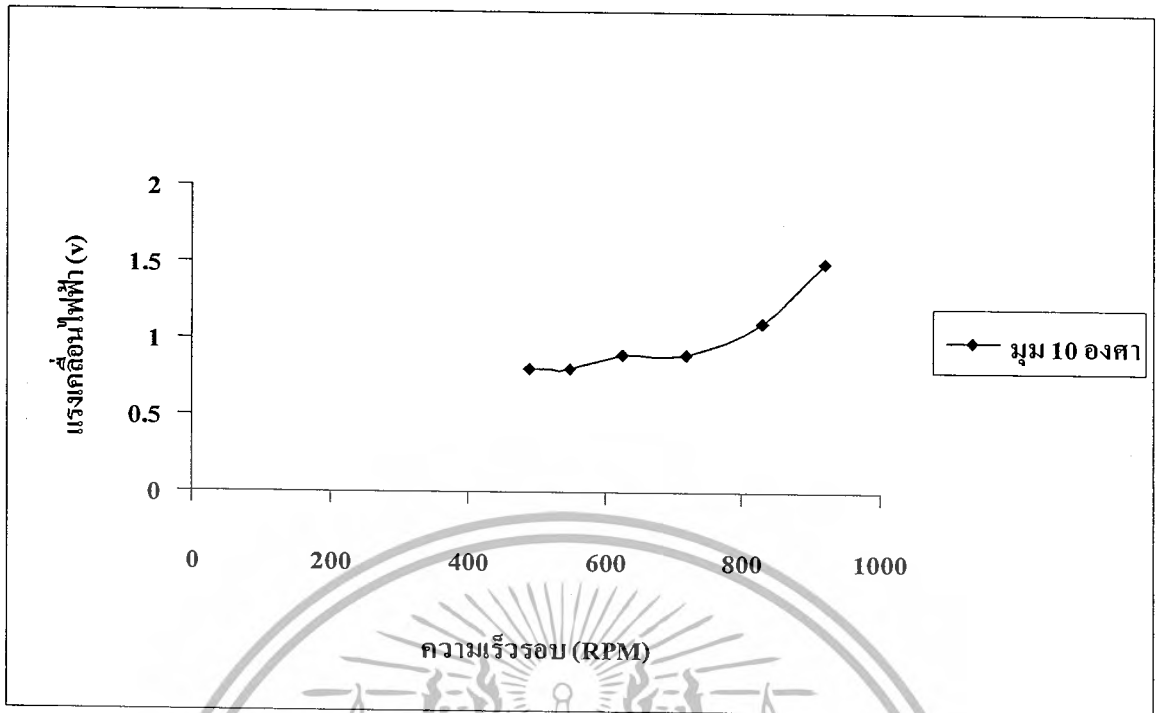


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 10 องศา

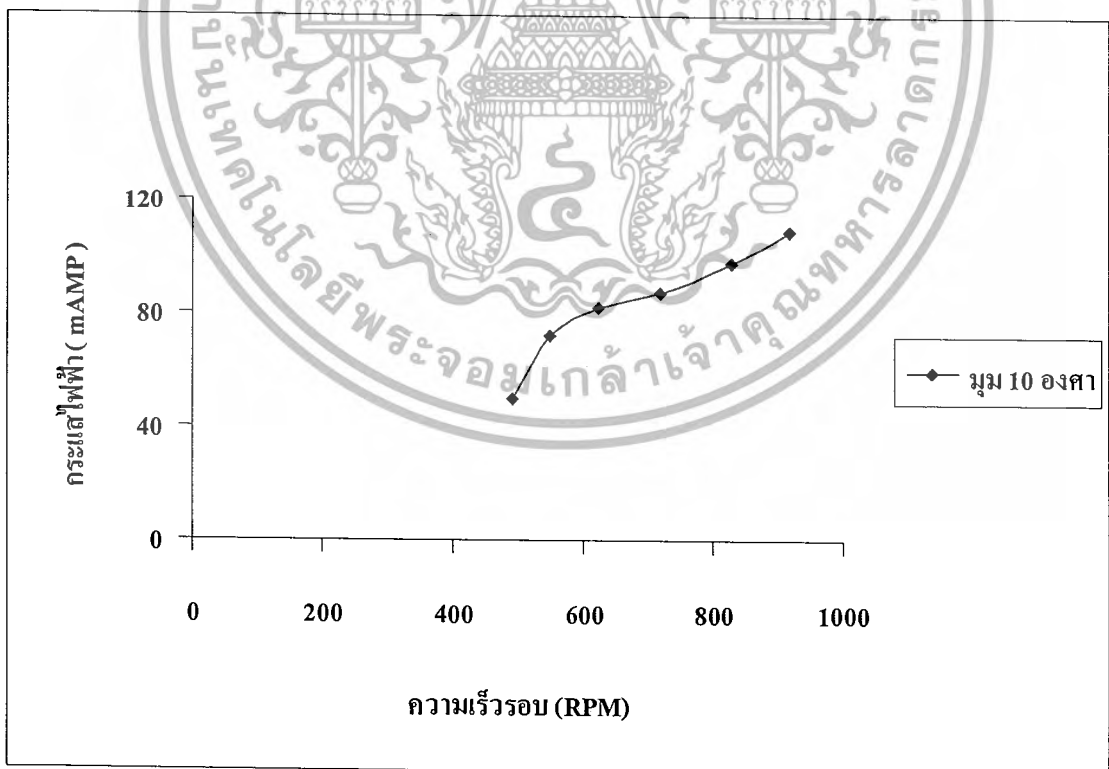


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

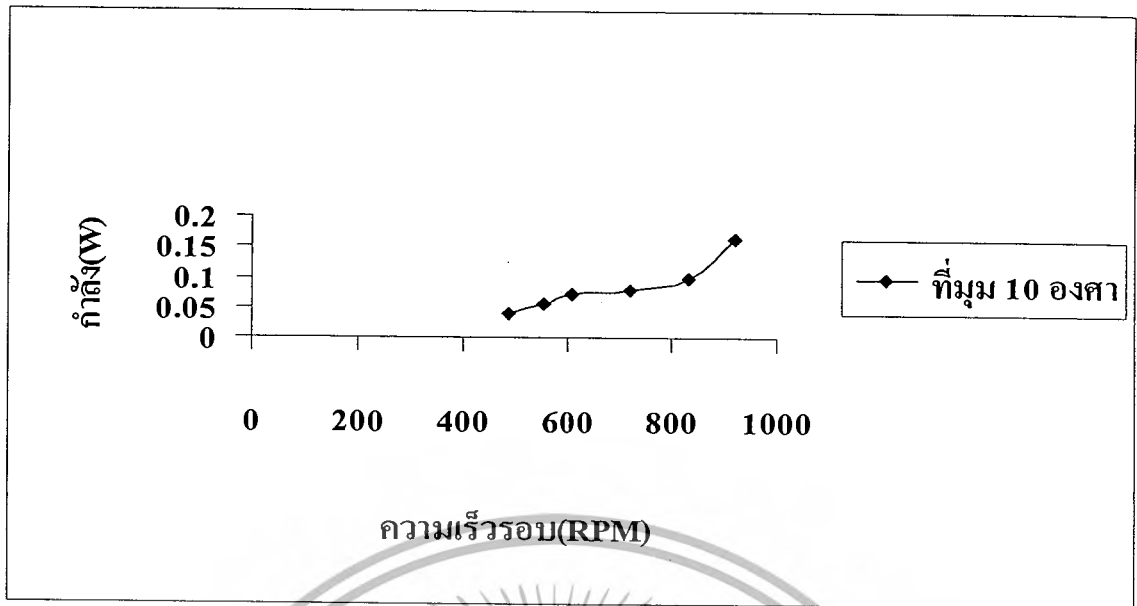


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 10 องศา



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



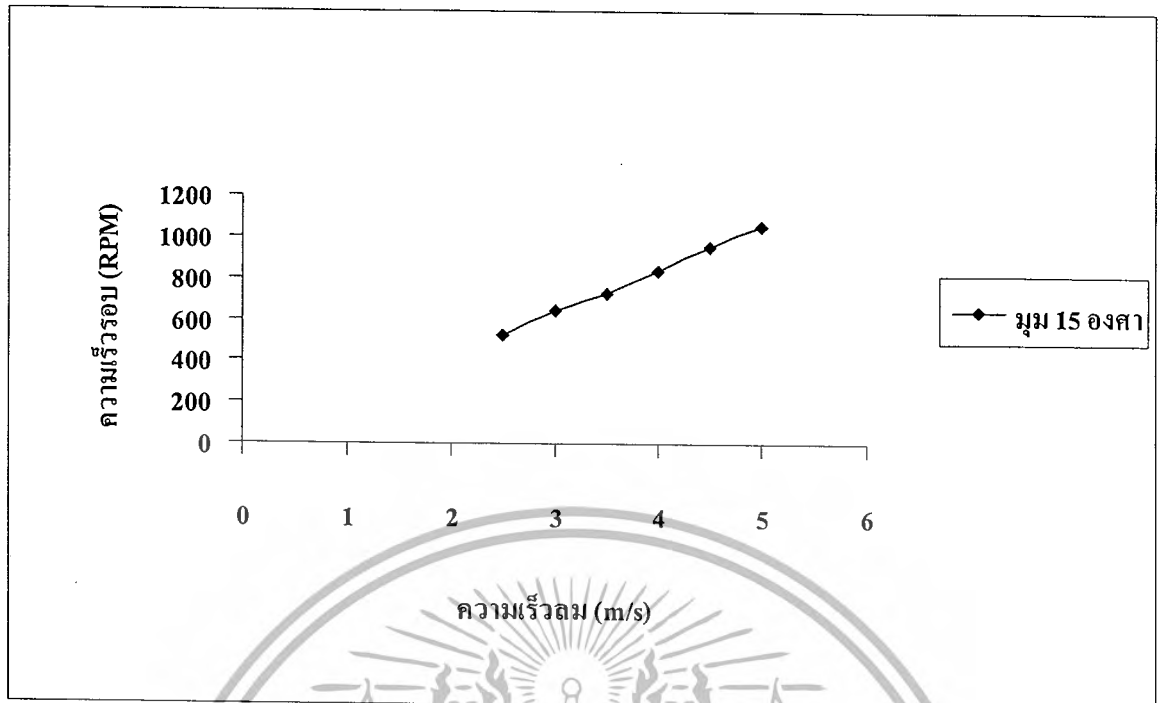
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังที่มุม 10 องศาผ่านเบตเตอร์รี 12 โวลต์

ผลการทดลอง
ที่มุม 15 องศา

ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลองที่มุม 15 องศา

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (RPM)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (mAmp)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (Volt)
2.5	520	70	0.9
3	640	89	1
3.5	720	99	1
4	830	103	1.2
4.5	954	110	1.7
5	1050	112	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

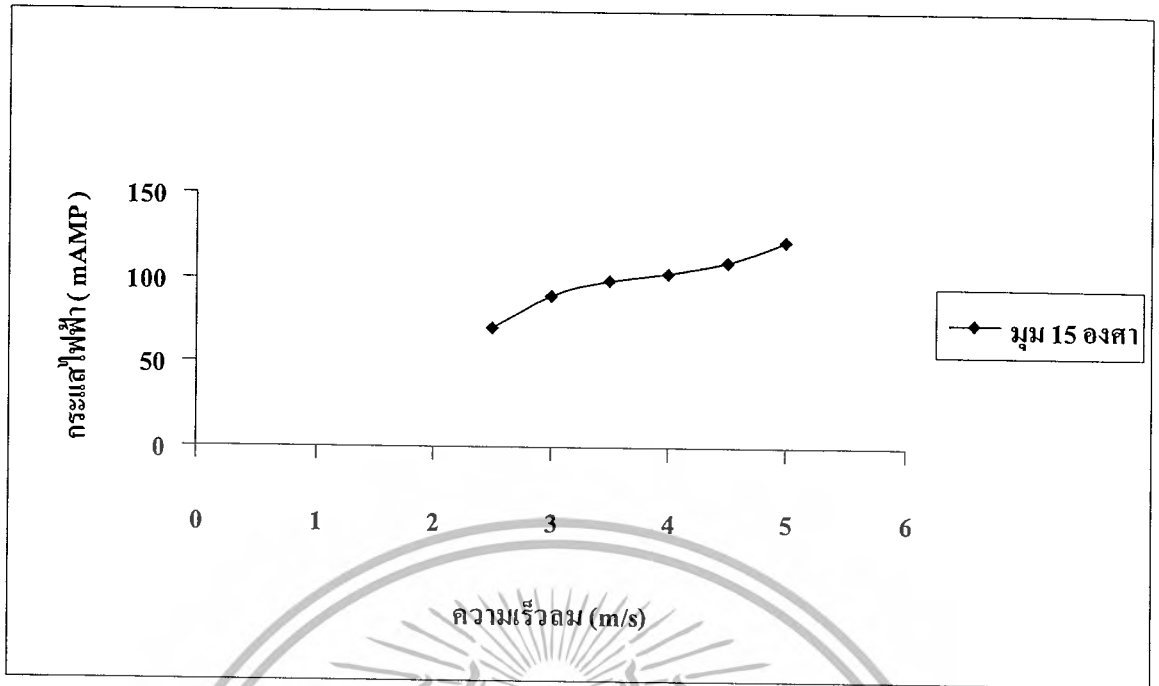


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบที่มุม 15 องศา

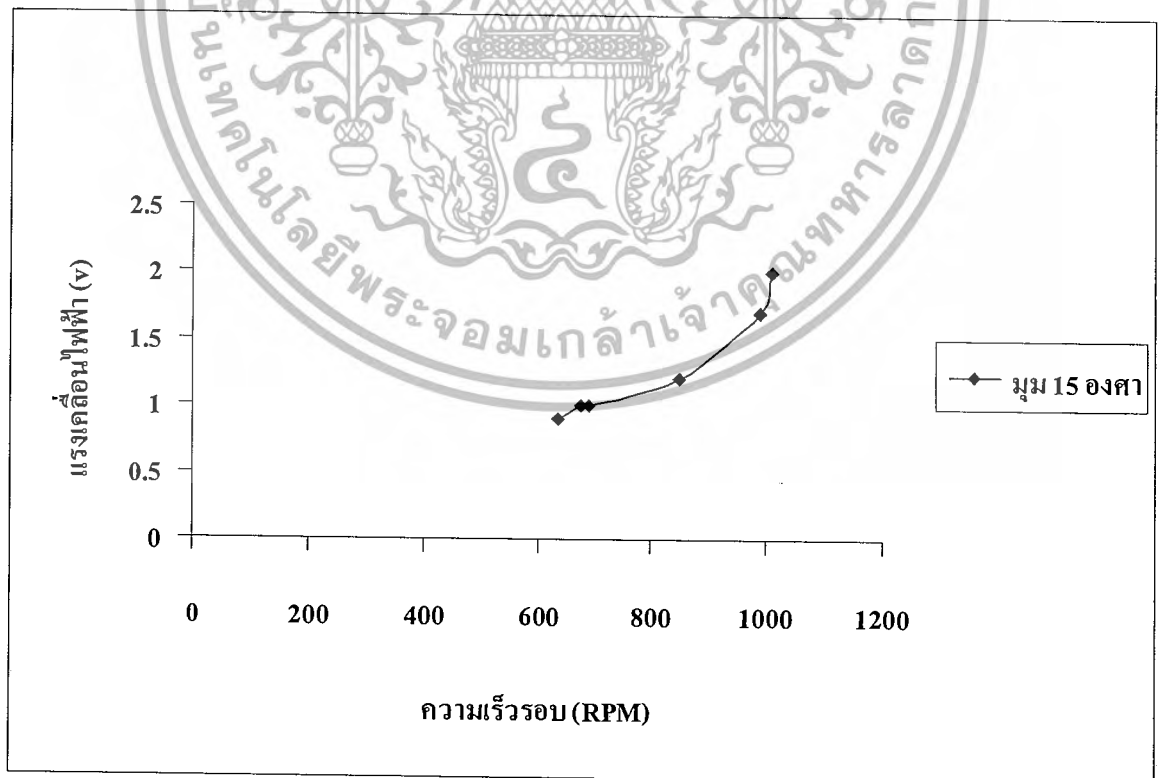


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

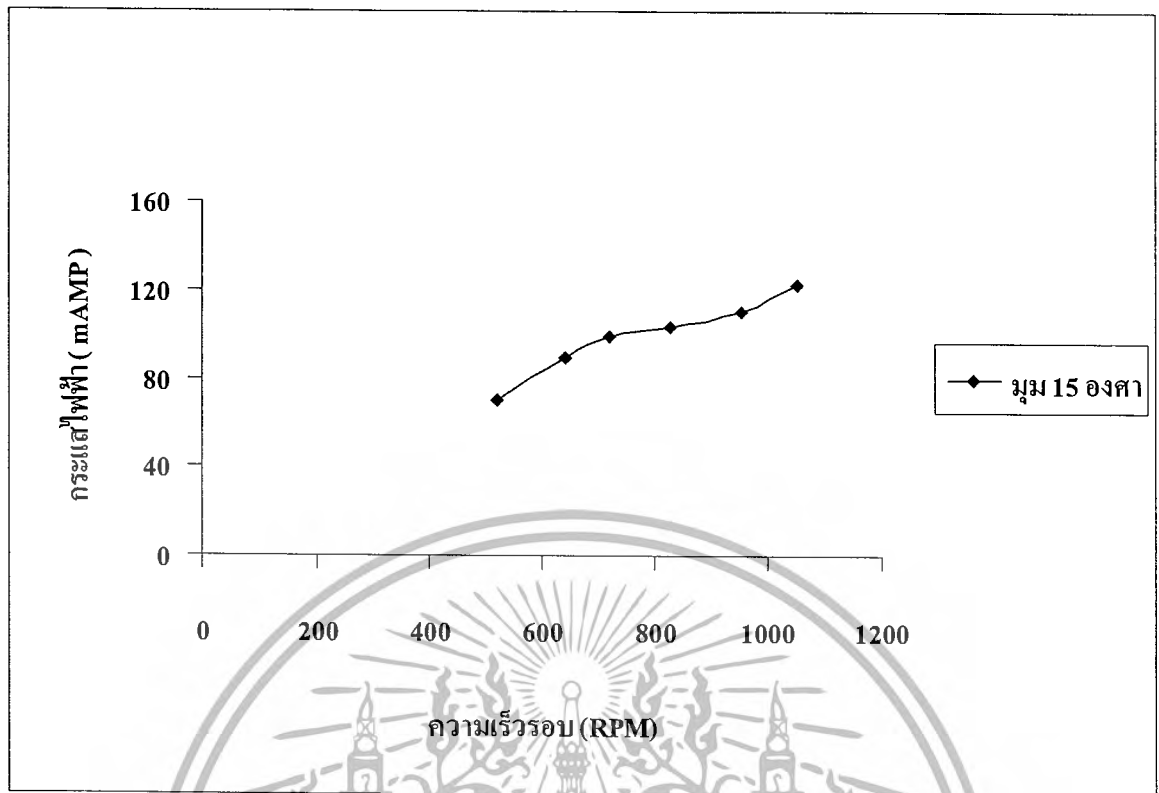


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 15 องศา

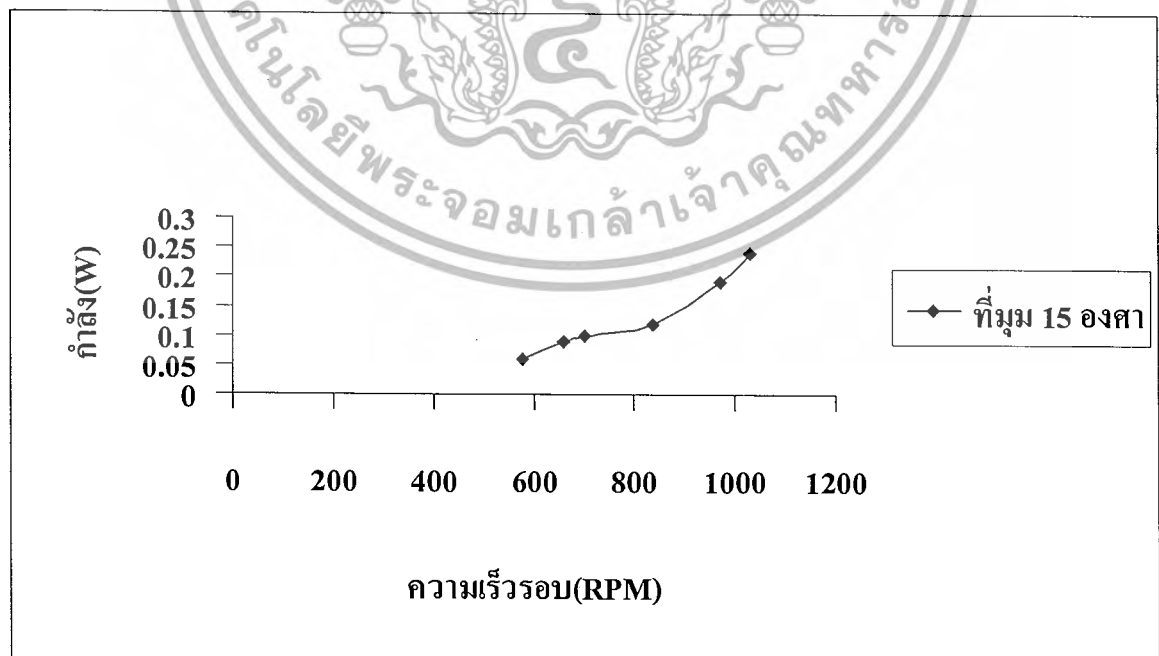


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 15 องศา



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังที่มุม 15 องศาผ่านแบตเตอรี่ 12 โวลต์

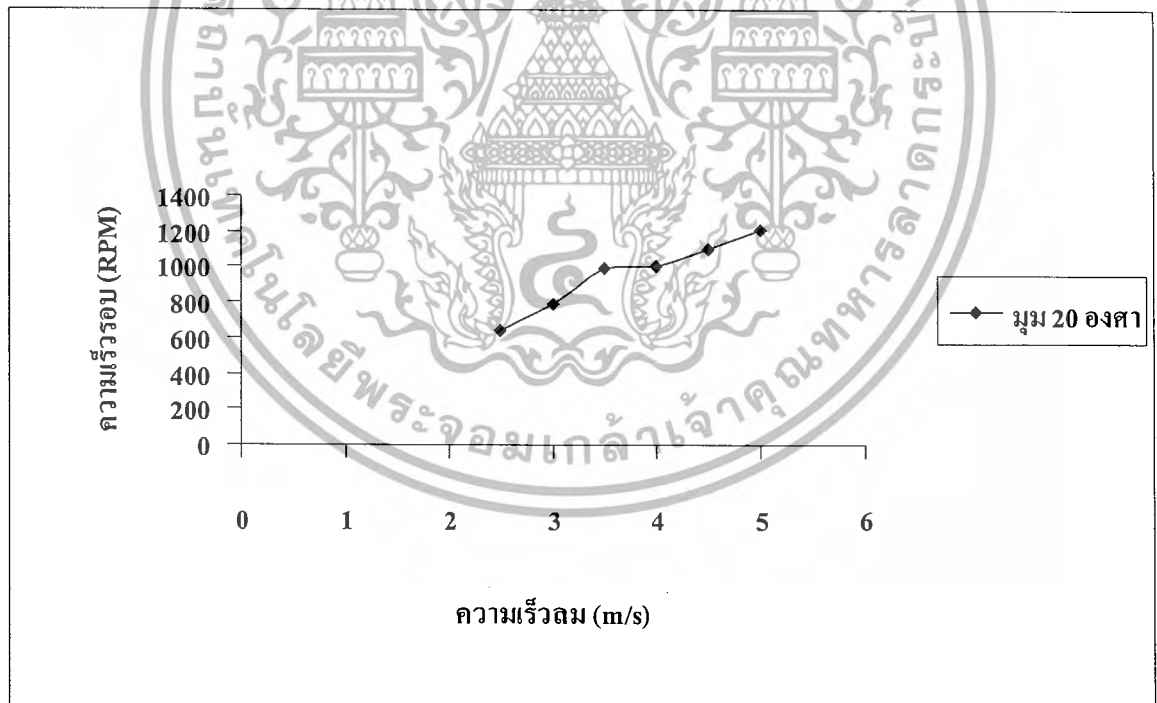
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ที่มุม 20 องศา

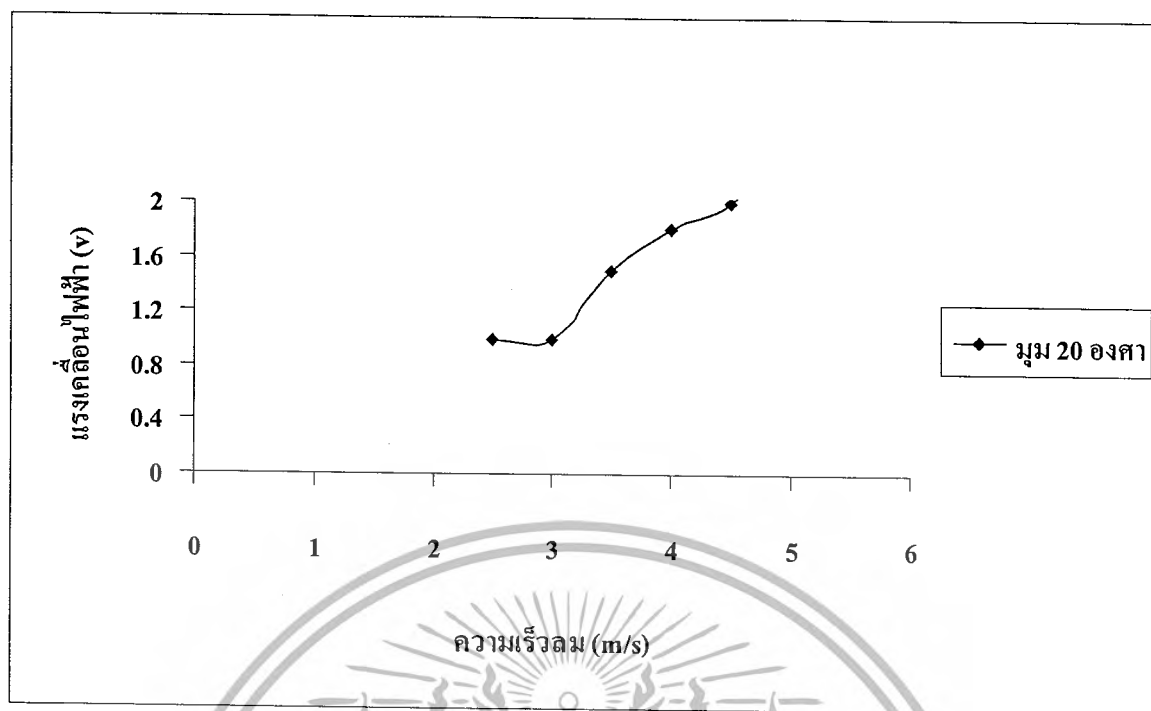
ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลองที่มุม 20 องศา

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (RPM)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (mAmp)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (Volt)
2.5	940	98	1
3	790	100	1
3.5	990	110	1.5
4	1000	115	1.8
4.5	1100	125	2
5	1207	150	2.5

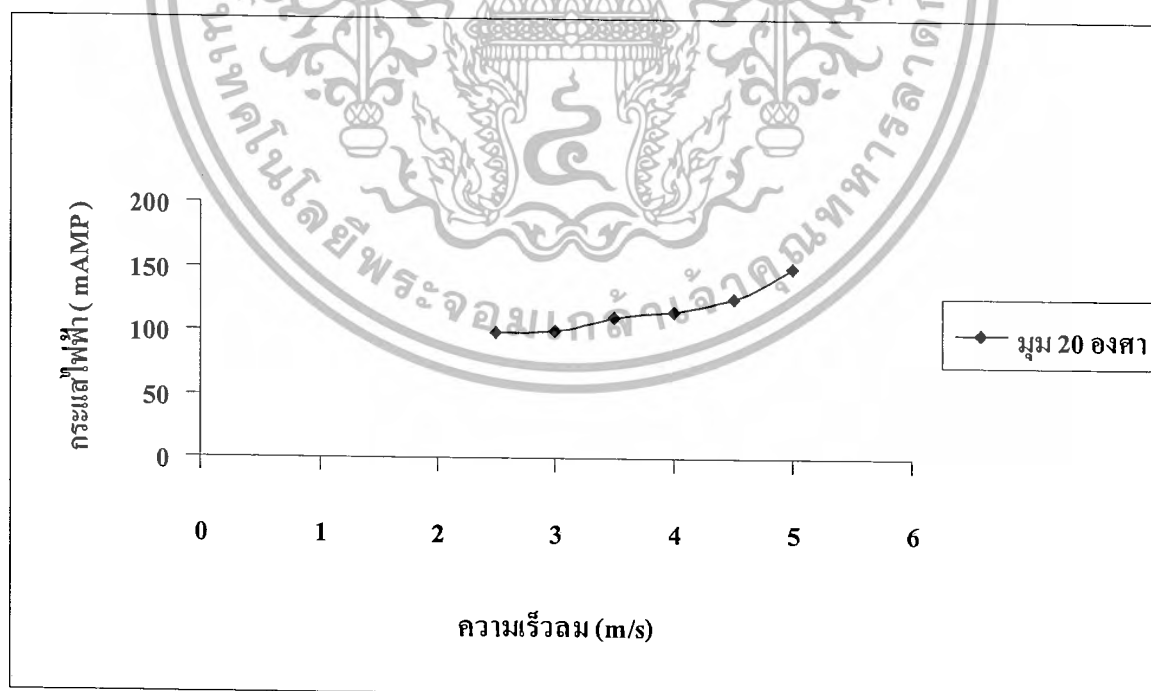


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบที่มุม 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

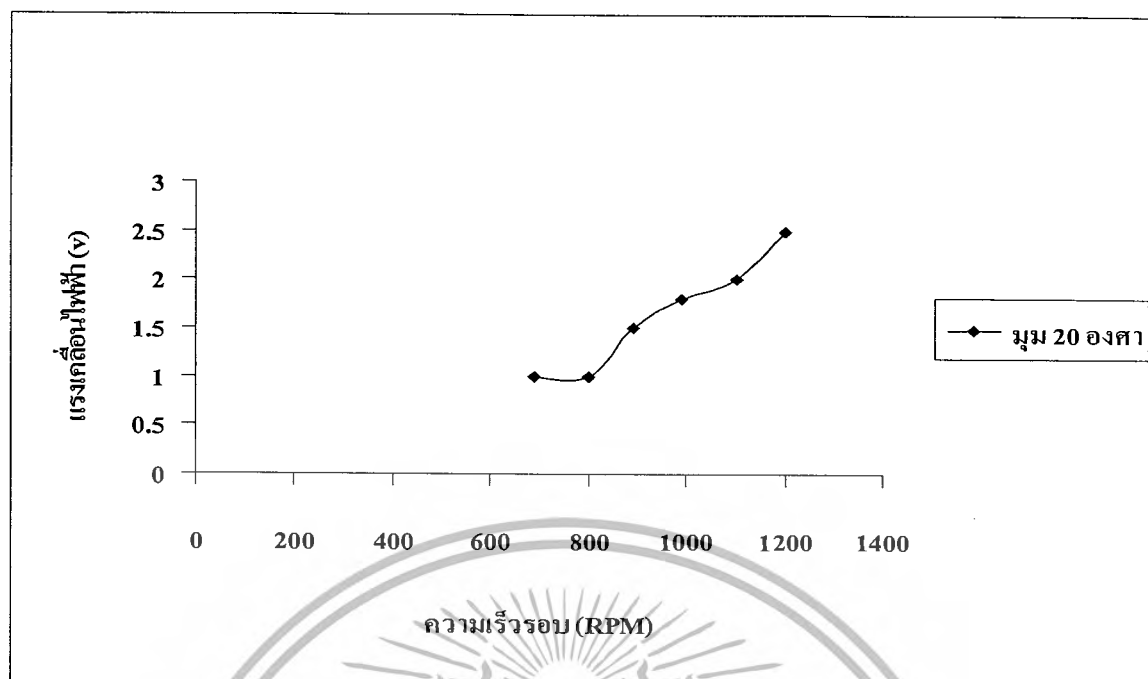


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 20 องศา

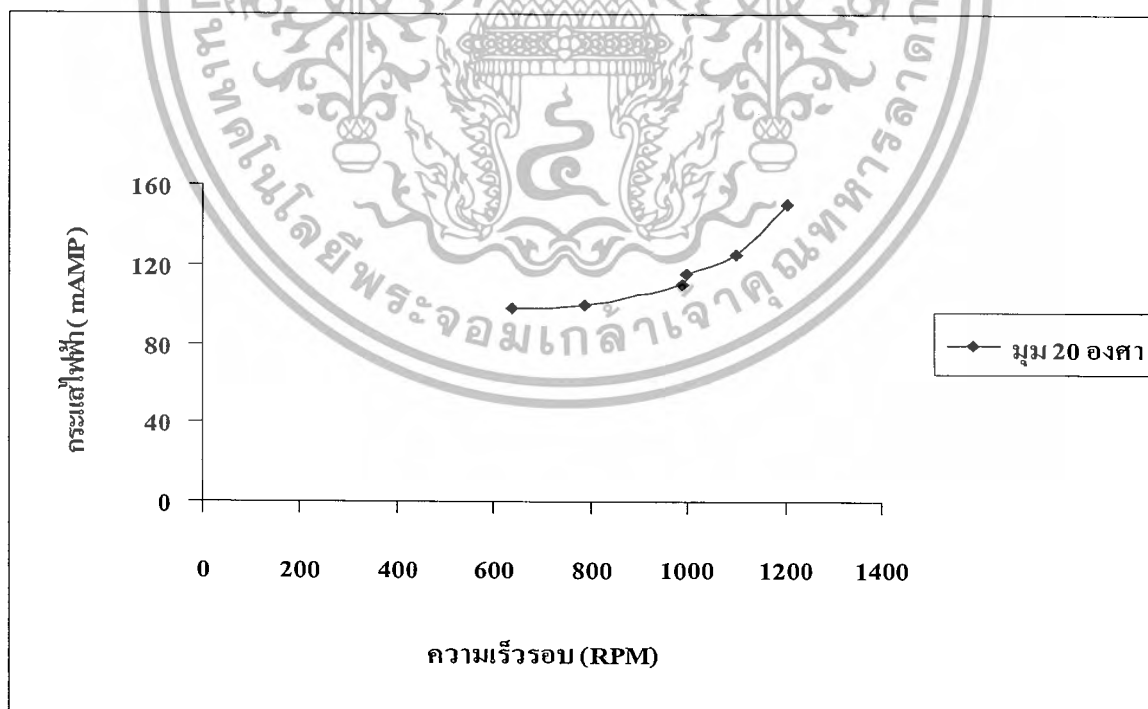


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

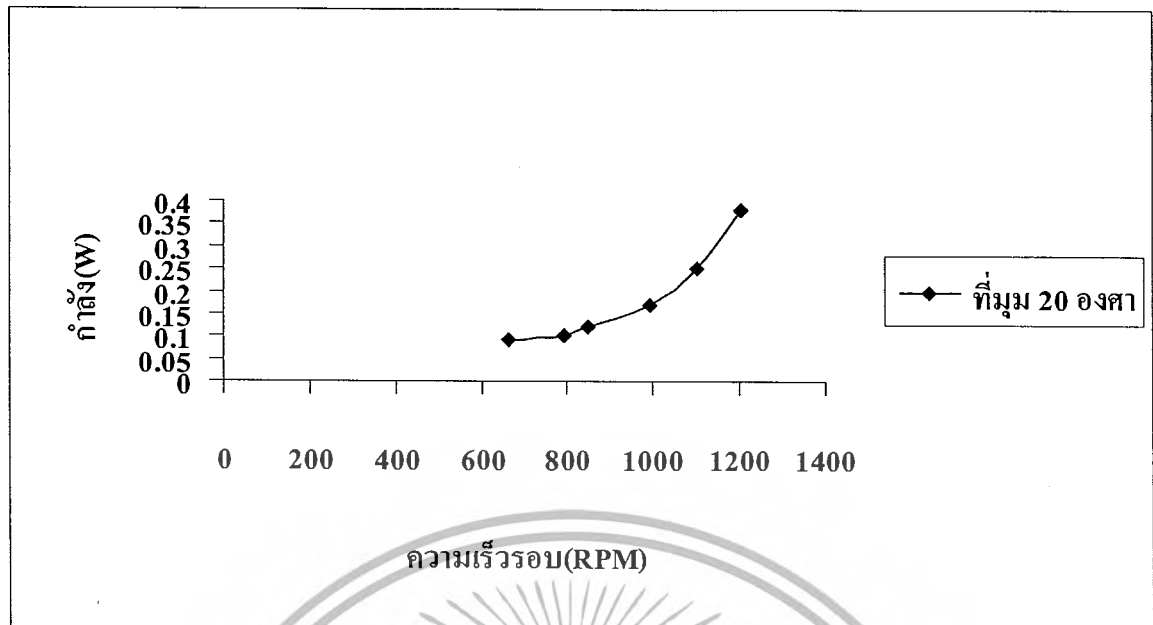


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 20 องศา



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังที่มุม 20 องศาผ่านแบตเตอรี่ 12 โวลต์

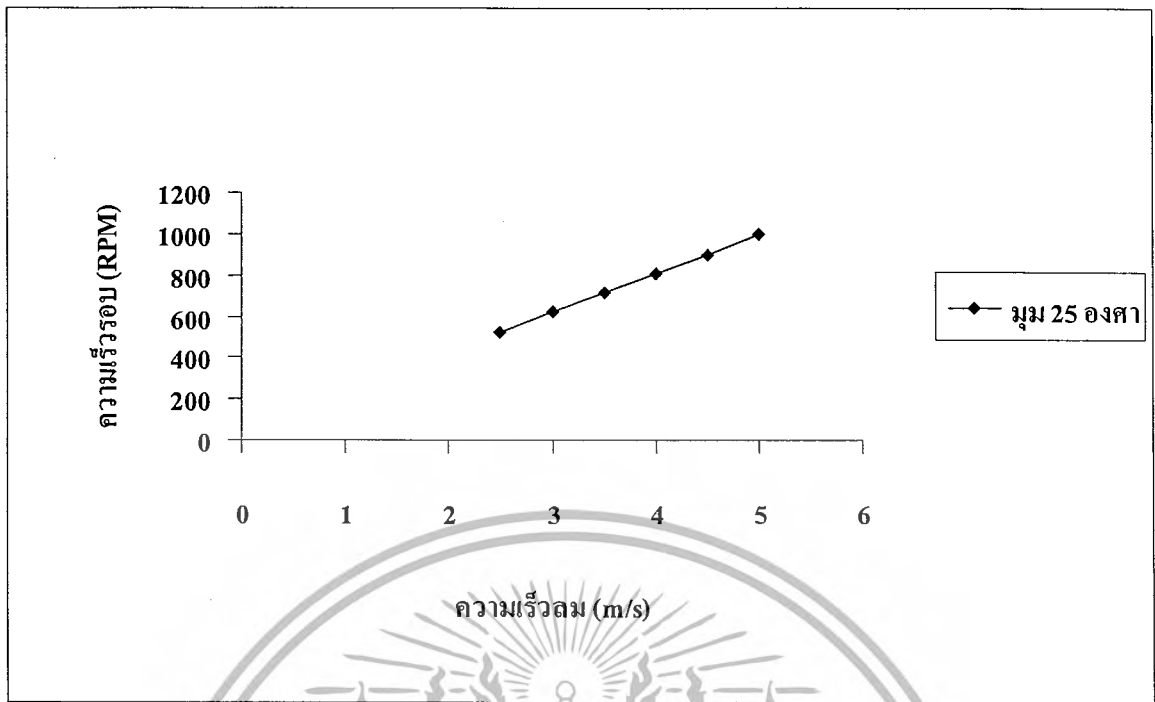
ผลการทดลอง

ที่มุม 25 องศา

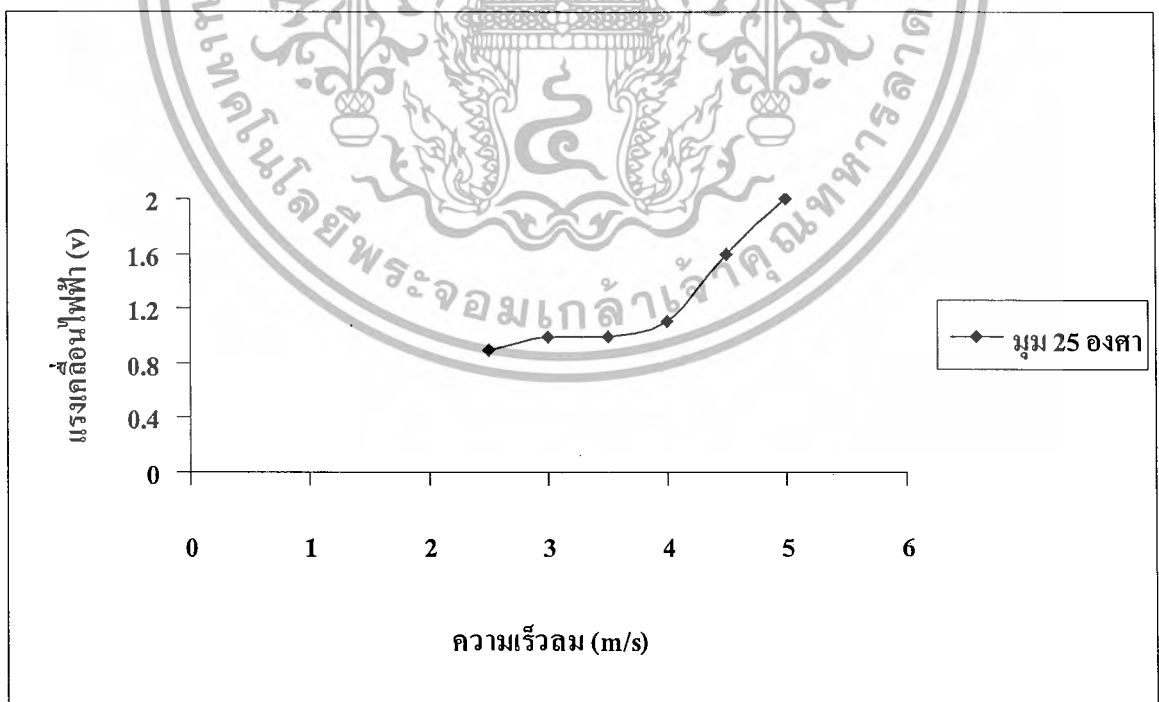
ตารางที่ 5.4 บันทึกผลการทดลองที่มุม 25 องศา

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (RPM)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (mAmp)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (Volt)
2.5	520	65	0.6
3	620	87	1
3.5	715	89	1
4	810	100	1.1
4.5	902	110	1.6
5	1001	122	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

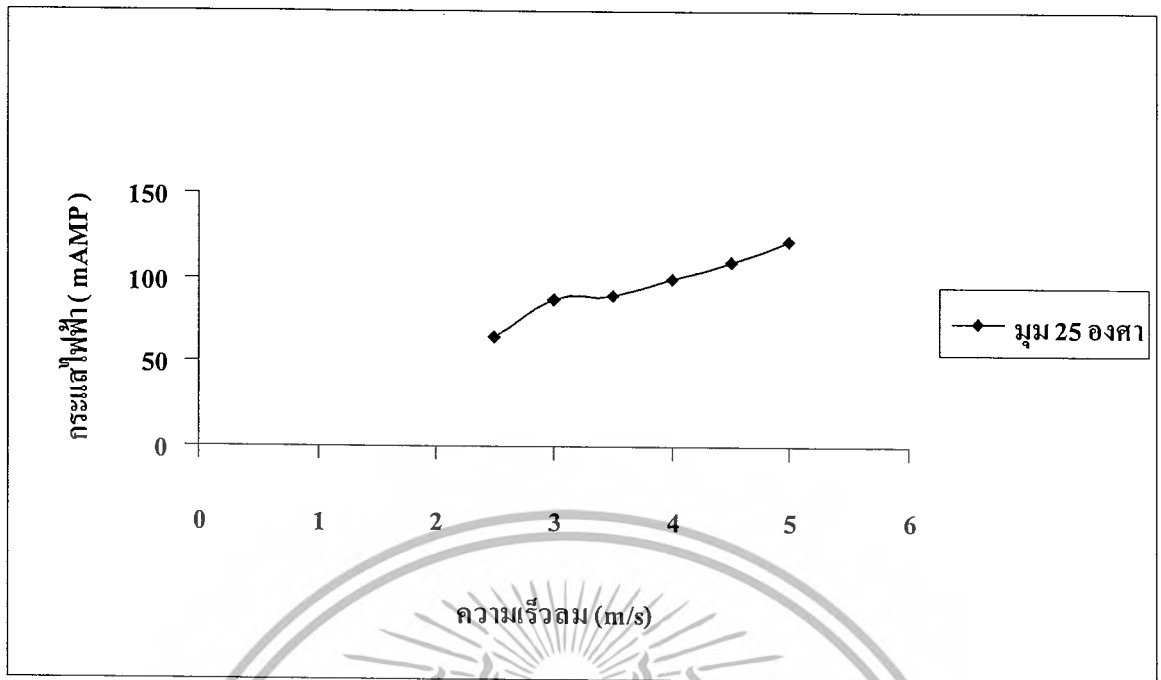


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลมกับความเร็วรอบที่มุม 25 องศา

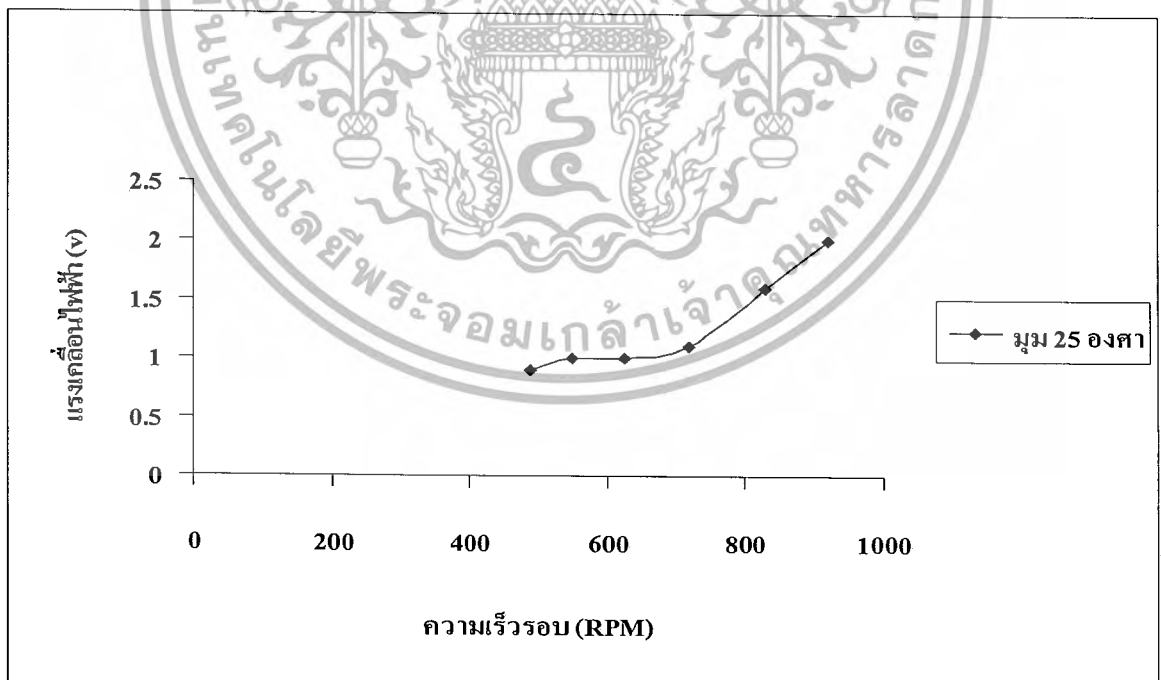


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 25 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

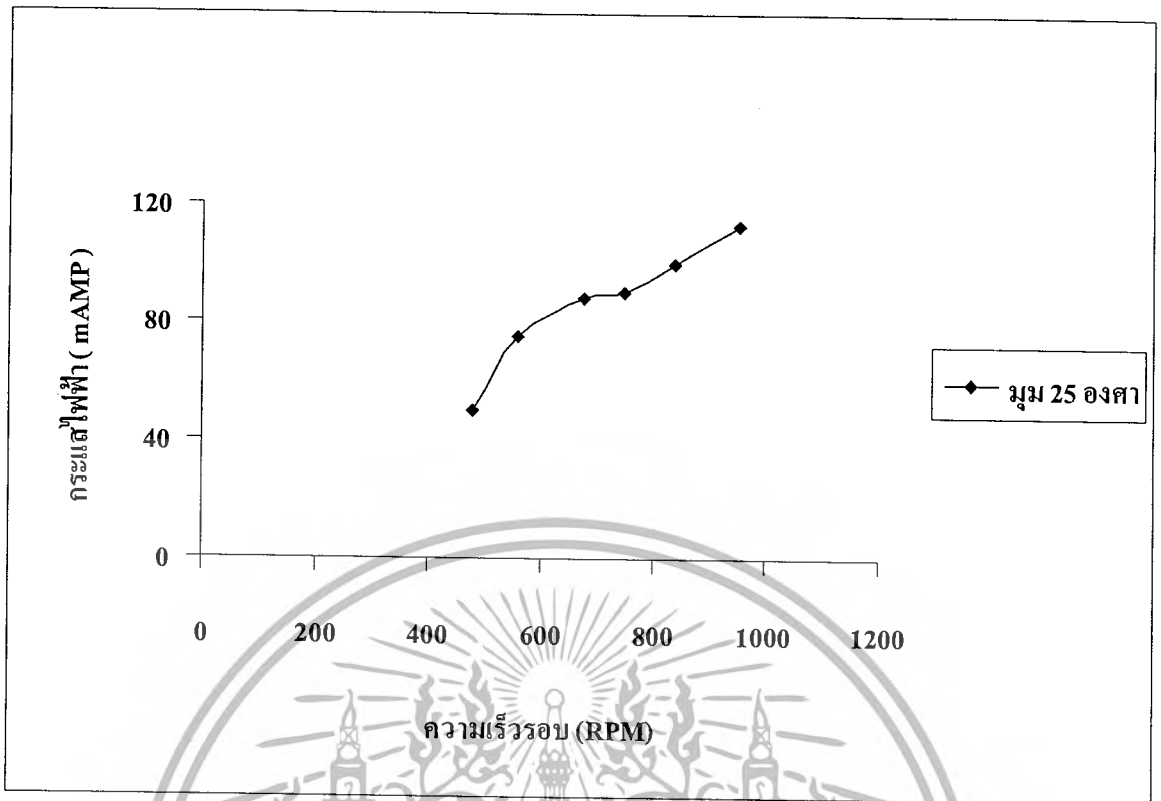


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 25 องศา

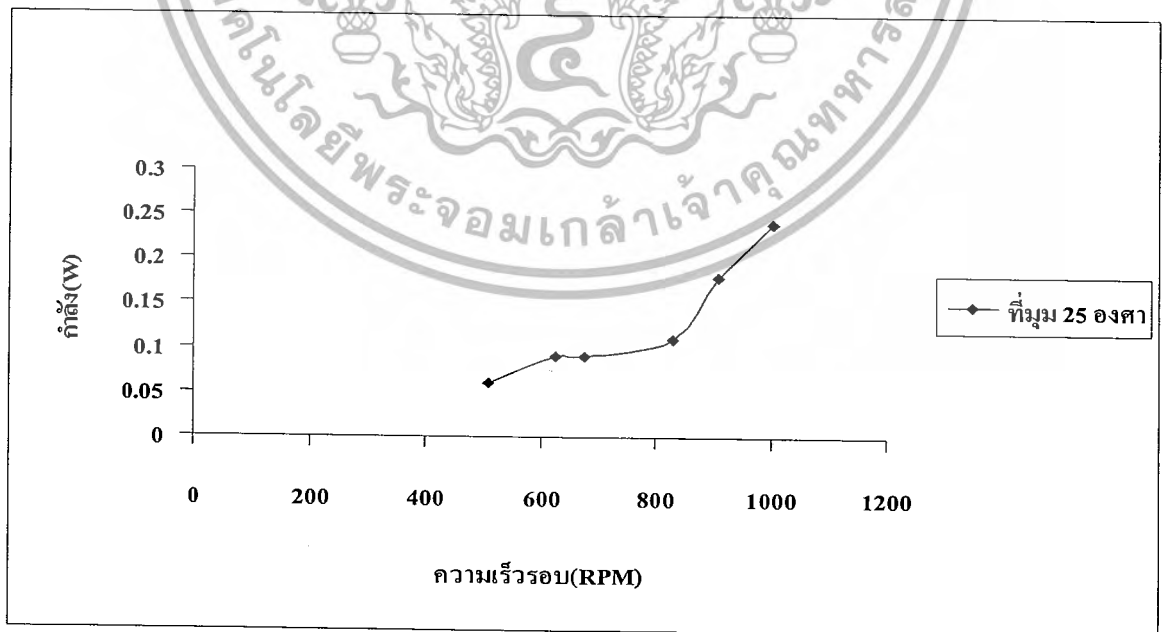


รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 25 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 25 องศา



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังที่มุม 25 องศาผ่านเบตเตอร์รี 12 โวลต์

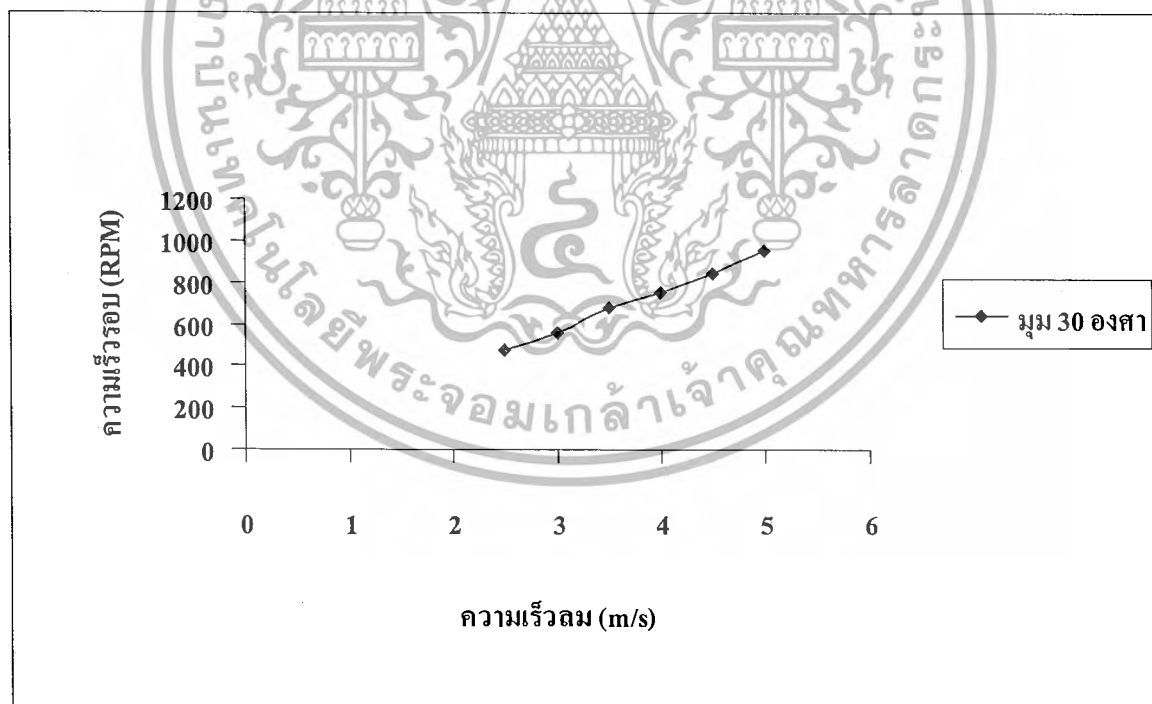
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ที่มุม 30 องศา

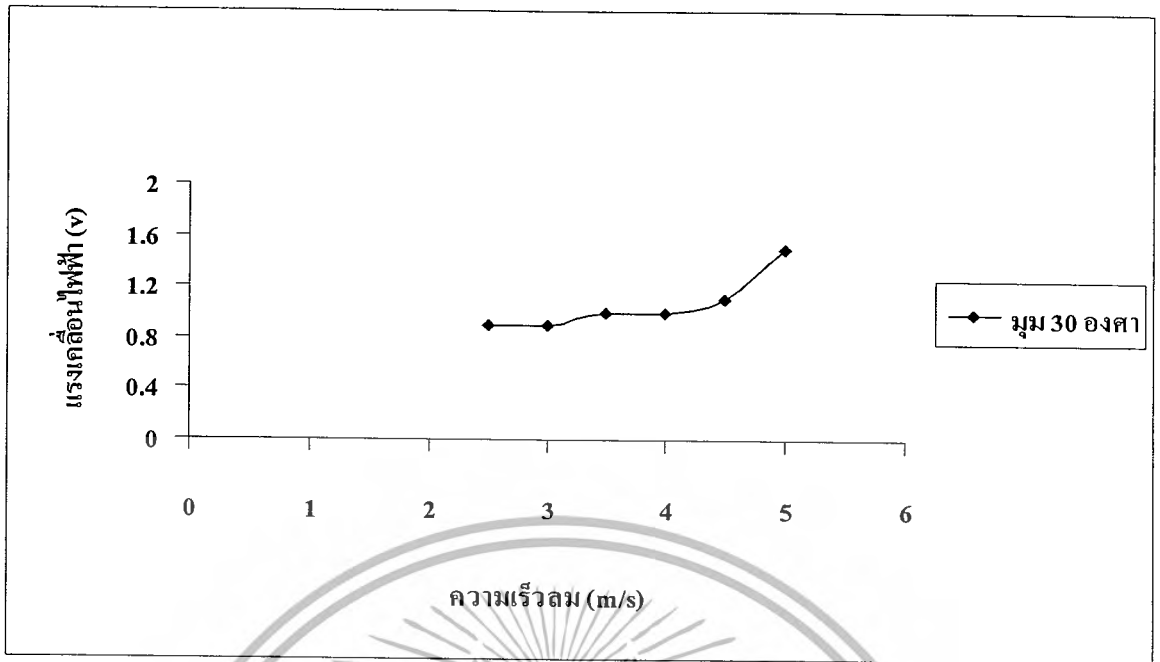
ตารางที่ 5.5 บันทึกผลการทดลองที่มุม 30 องศา

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (RPM)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (mAmp)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (Volt)
2.5	480	50	0.9
3	560	75	0.9
3.5	675	88	1
4	750	90	1
4.5	840	100	1.1
5	954	113	1.5

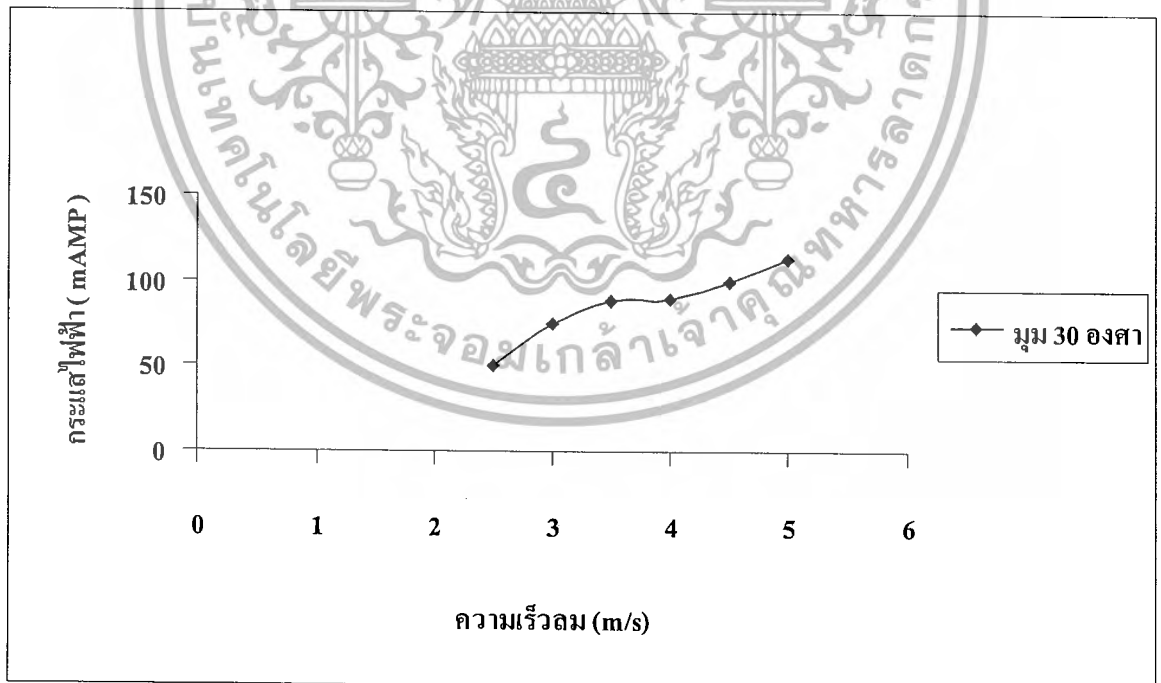


รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยลมกับความเร็วยรอบที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

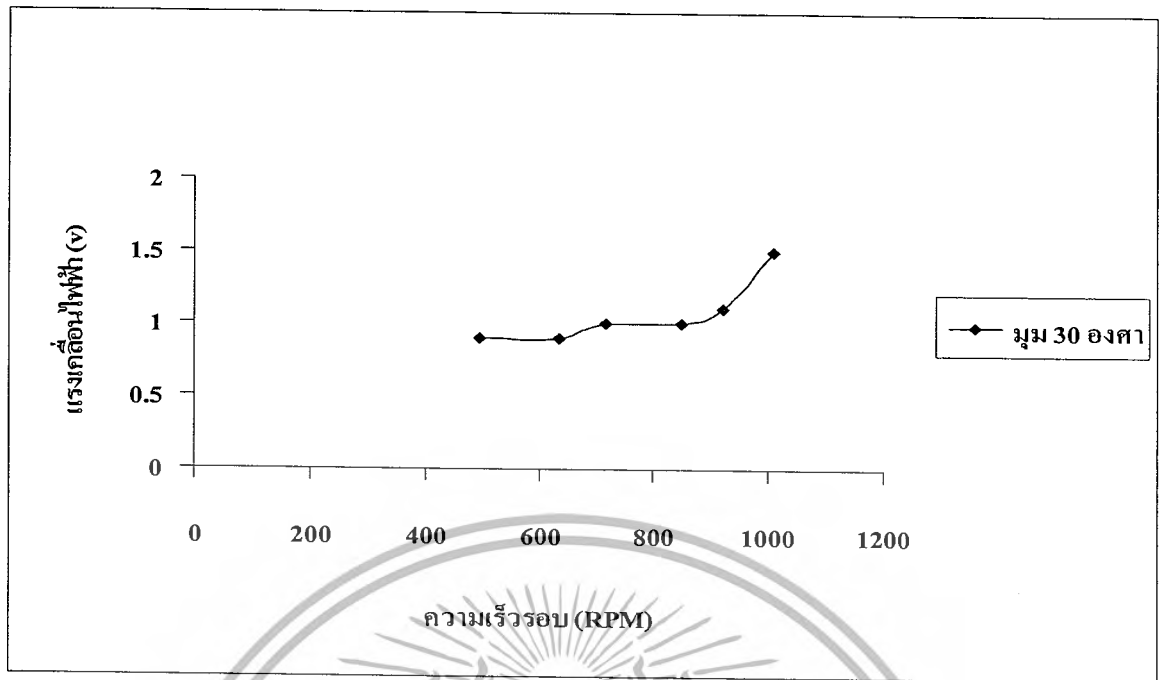


รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 30 องศา

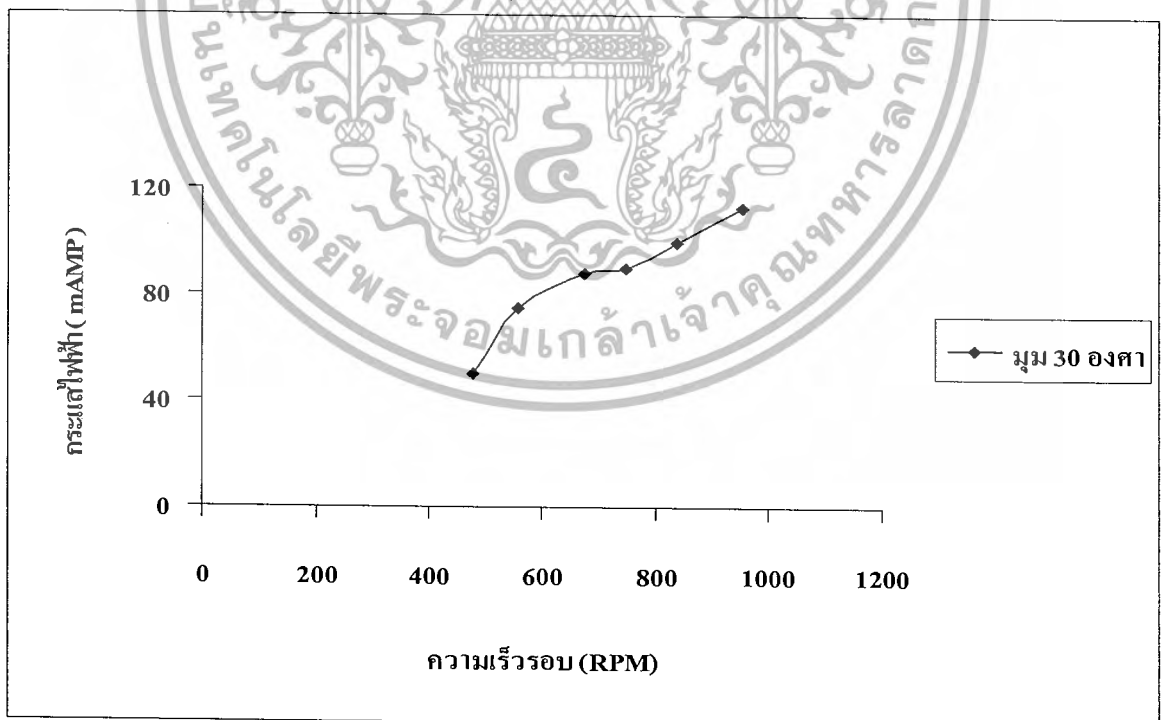


รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

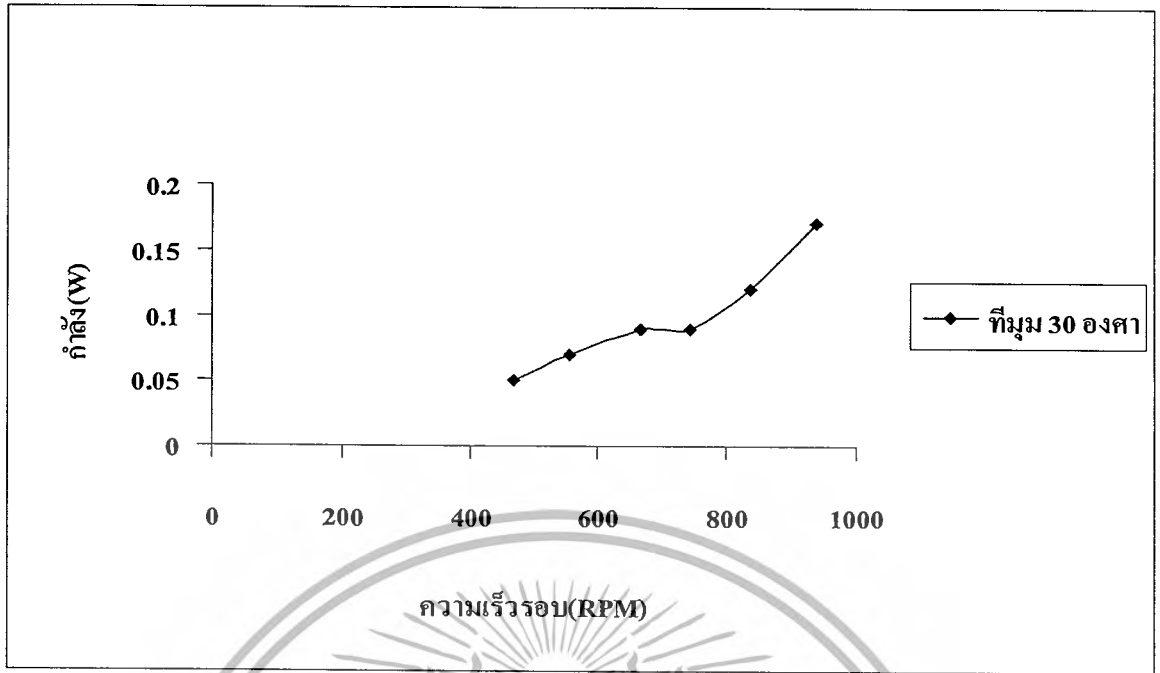


รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มุม 30 องศา



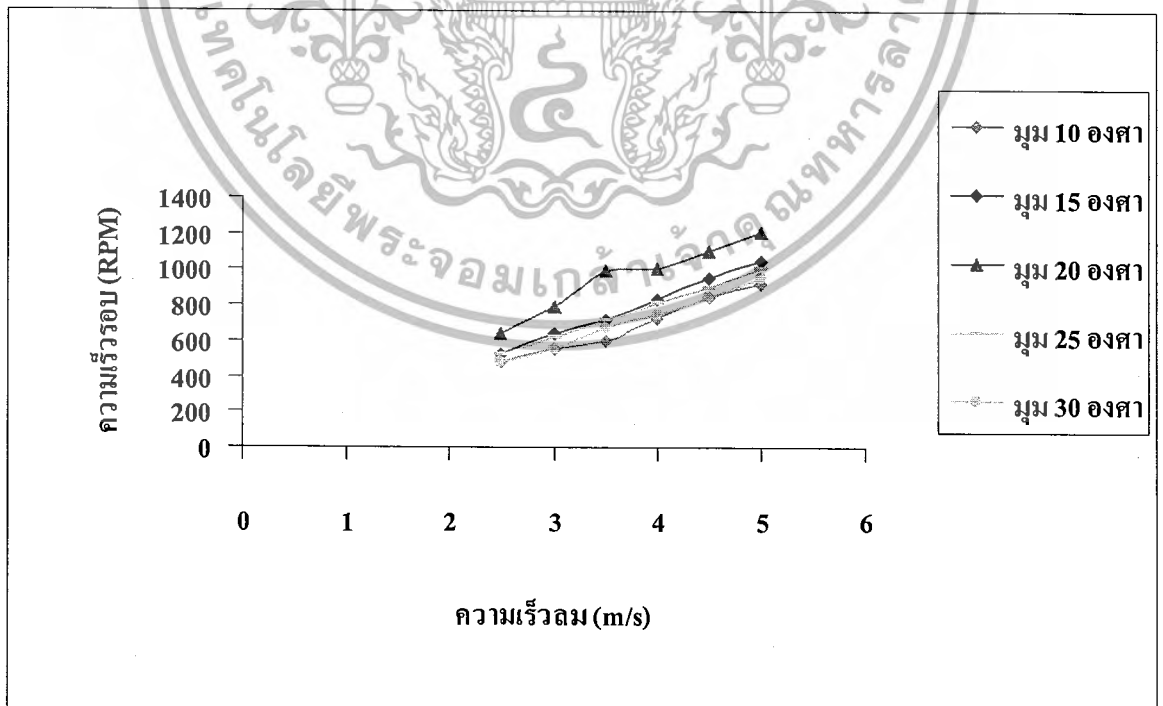
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่มุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



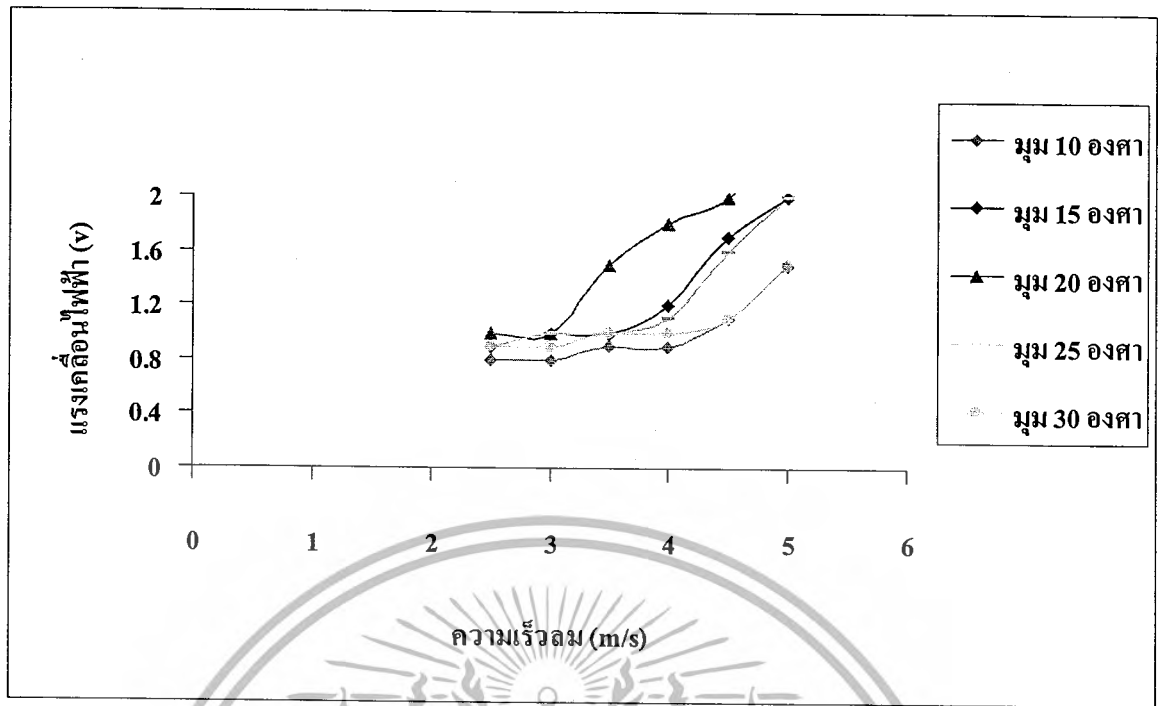
รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังผ่านแบบเตอร์รี 12 โวลต์

การเปรียบเทียบความเร็วลม, ความเร็วรอบ, กระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า

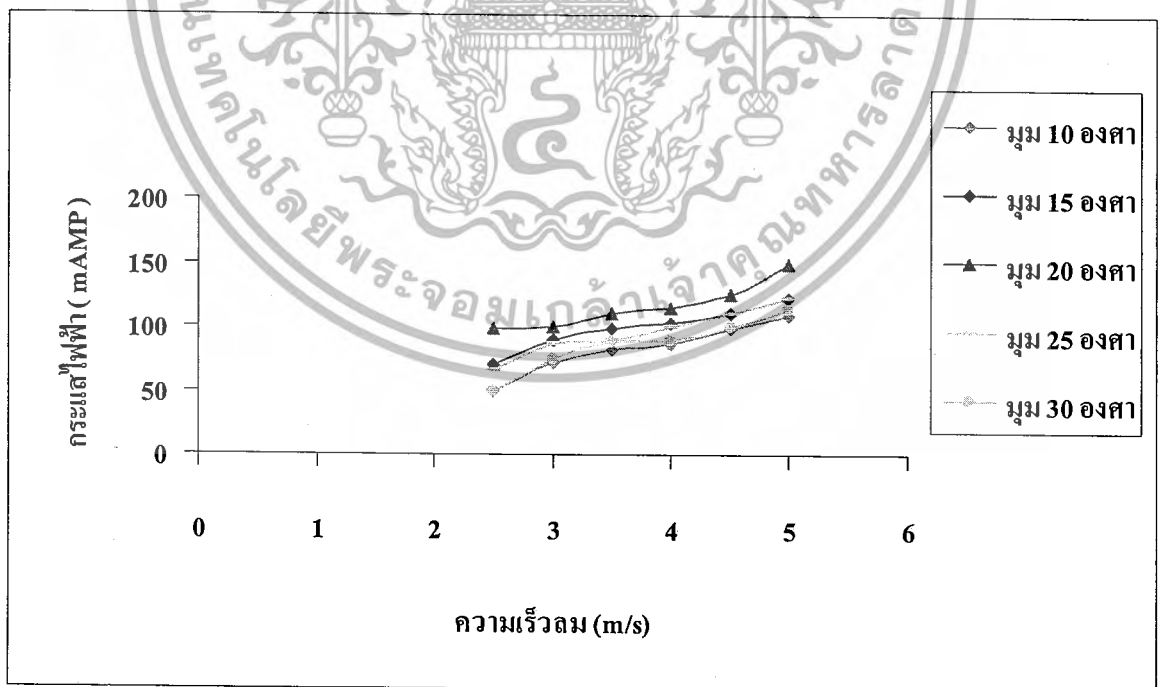


รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

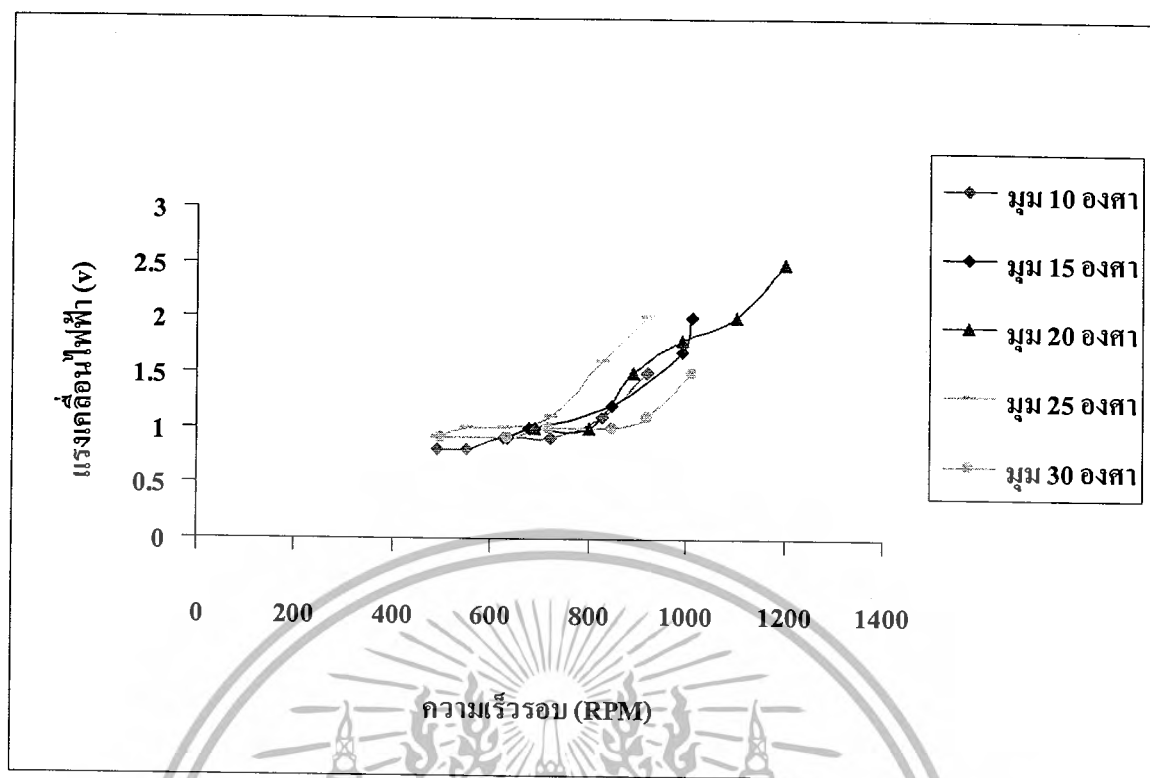


รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

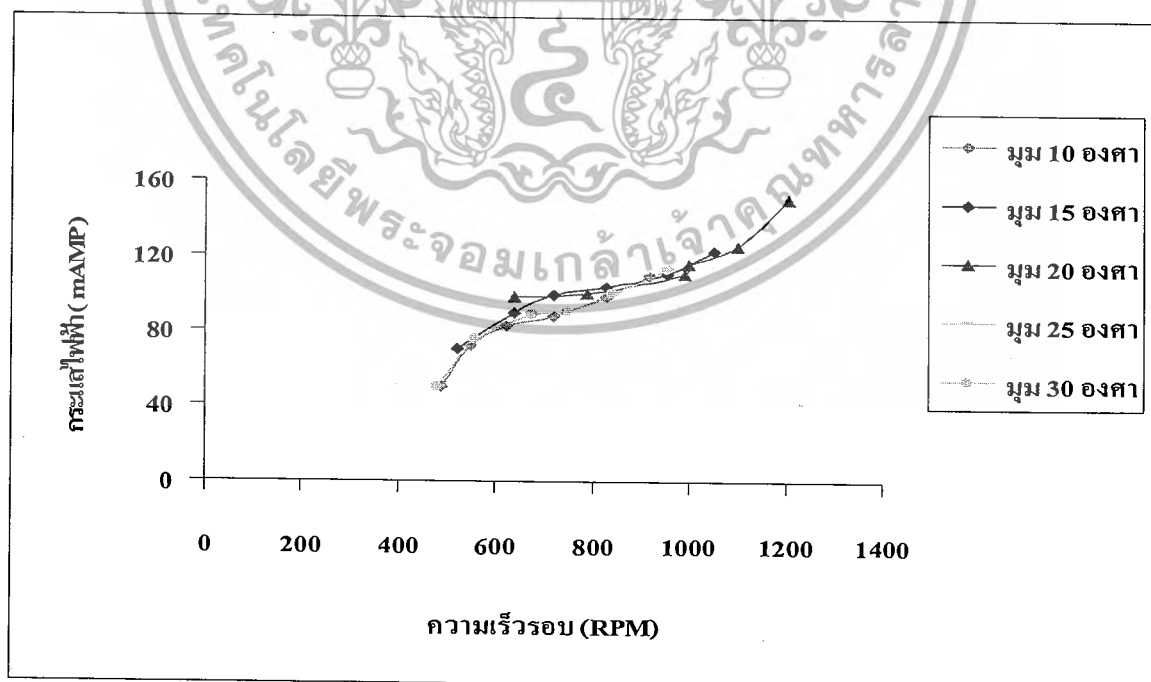


รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

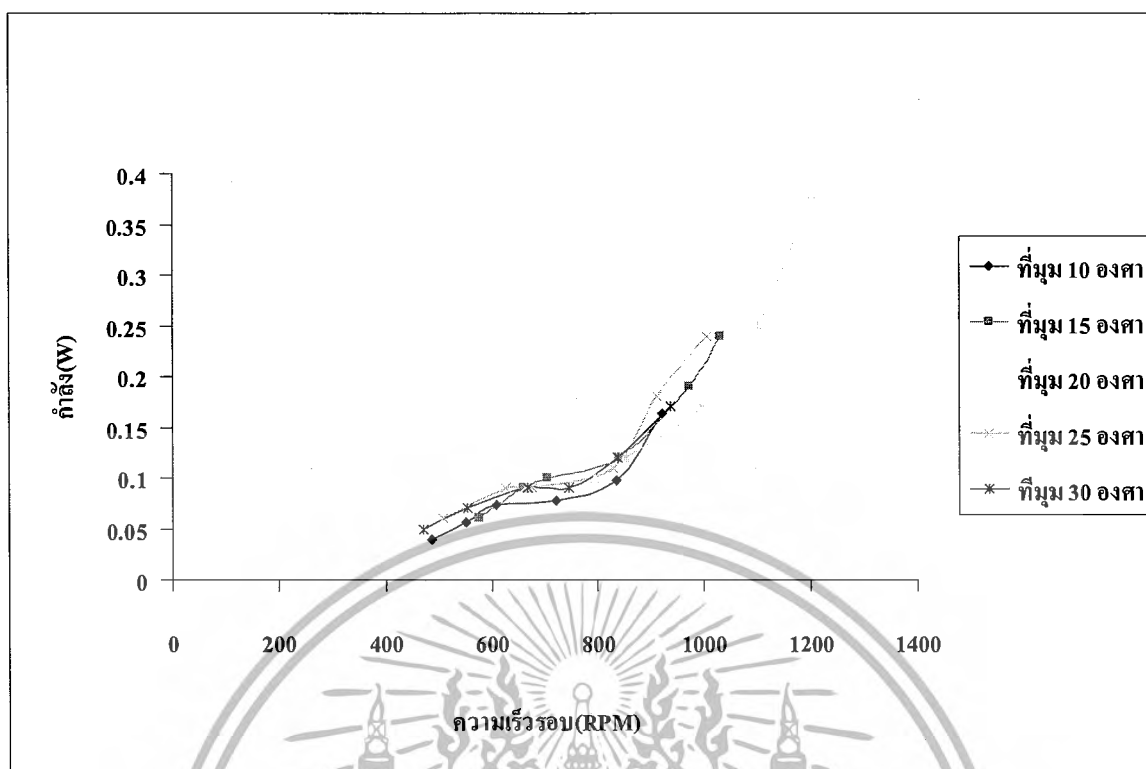


รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์การทดลอง

ในการออกแบบกังหันลมนั้น เราต้องกำหนดกำลังงานที่เราต้องการออกมาก่อน แล้วจึงทำการออกแบบกังหันที่สามารถรับลมแล้วผลิตกำลังออกมาได้ตามที่ต้องการ ซึ่งส่วนที่สำคัญที่สุดคือ การคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลมว่า มีประสิทธิภาพเท่าไรสามารถออกแบบกังหันให้ได้กำลังงานตามต้องการ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษากังหันลมแกนอนแบบ Airfoil ชนิด 3 ใบ ซึ่งทำจากอะลูมิเนียมทั้งหมดเพื่อให้น้ำหนักน้อย และน้ำหนักของใบกังหันแต่ละใบคือ 2.1 กิโลกรัม การทดลองทำโดยปรับมุมใบกังหันที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 องศา จากนั้นทำการบันทึกค่าความเร็วรอบ, กระแสไฟ, แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ จากการทดลองปรับมุมใบกังหันพบว่าที่มุม 20 องศา ได้ความเร็วรอบสูงสุดที่ 1270 RPM ซึ่งทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงและ แรงดันไฟฟ้าก็สูงตามไปด้วย ที่ 1270 RPM ได้กระแสไฟฟ้า 150 mA แรงดันไฟฟ้า 2.5 v. ที่มุม 20 องศา ความเร็วลม 4.5 -5 m/s

จากการวิจัยพบว่าในการสร้างกระแสไฟฟ้าด้วยกังหันนั้นถ้าต้องการกระแสไฟให้ได้ตามต้องการก็ต้องรู้และเข้าใจหลักการทำงานของตัวเปรียบกระแสไฟฟ้า (ไดชาร์จ, เจนเนอเรเตอร์) และถ้ามีความรู้ความเข้าใจในเรื่องเหล่านี้หรือมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านนี้ให้คำปรึกษาก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ

ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1. ปัญหาการเชื่อมประสานอะลูมิเนียมเนื่องจากทะลุง่าย
2. ปัญหาของไดชาร์จรถยนต์มีความหน่วงมากต้องใช้ทอร์คในการเอาชนะมาก
3. ปัญหาความเร็วลมไม่คงที่

แนวทางในการแก้ปัญหา

1. จะต้องขัดผิวของอะลูมิเนียมบริเวณที่จะเชื่อมก่อนเพื่อขัดเอาสนิมอะลูมิเนียมออกแล้วเชื่อมในที่ที่เพราะอะลูมิเนียมก่อตัวได้เร็วมาก
2. เนื่องจากไดชาร์จรถยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบสูงและใช้ทอร์คในการชนะแรงต้านของสนามแม่เหล็กมากจะต้องให้ผู้เชี่ยวชาญด้านไดชาร์จพันขอลวดใหม่หรือสร้างกังหันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่
3. ในการทดลองเนื่องจากเราไม่สามารถควบคุมความเร็วของลมให้มีความเร็วสม่ำเสมอได้ ดังนั้นในการทดลองควรทดลองกับอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

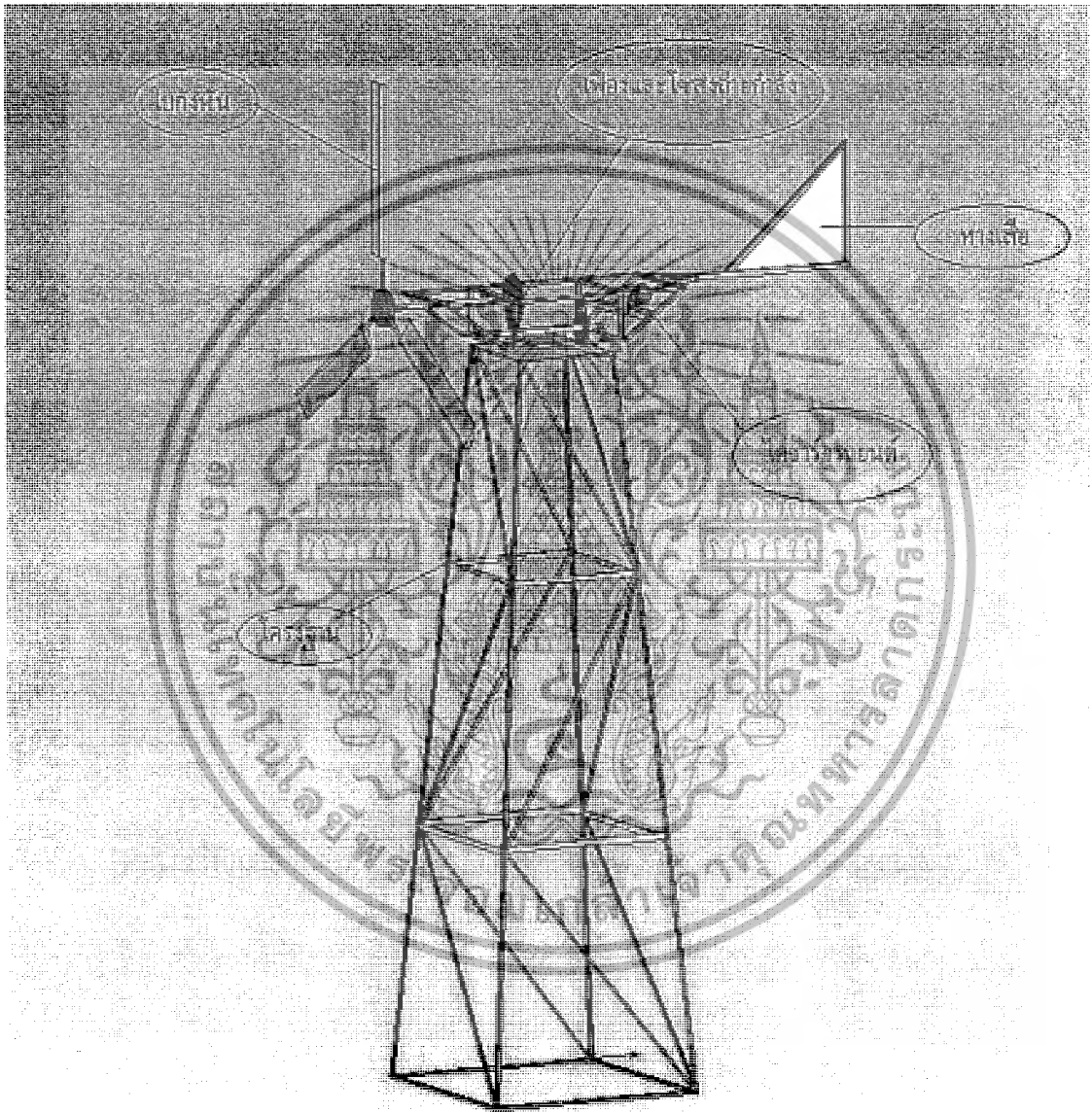


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

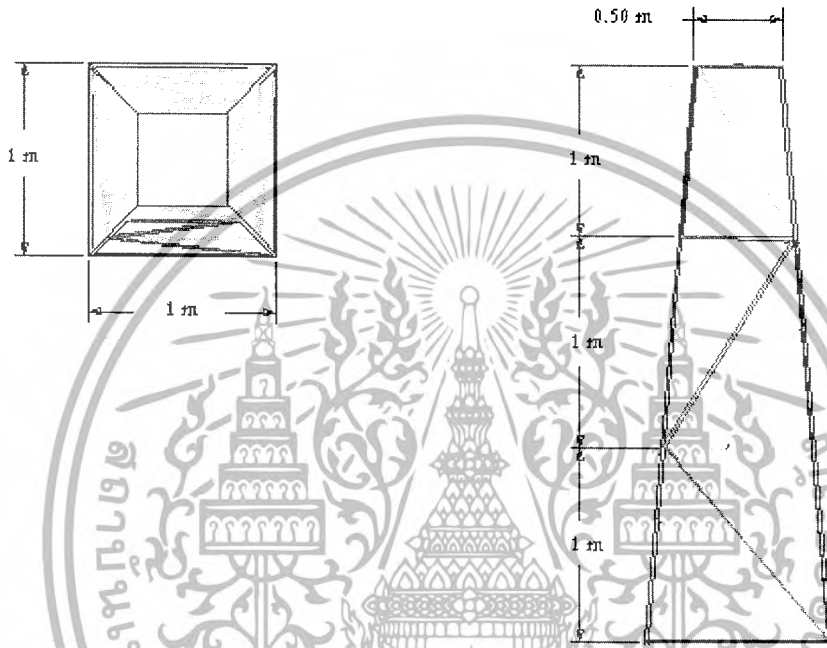
ภาคผนวก ก.

รูปภาคผนวก ก. 1 ภาพชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันลม



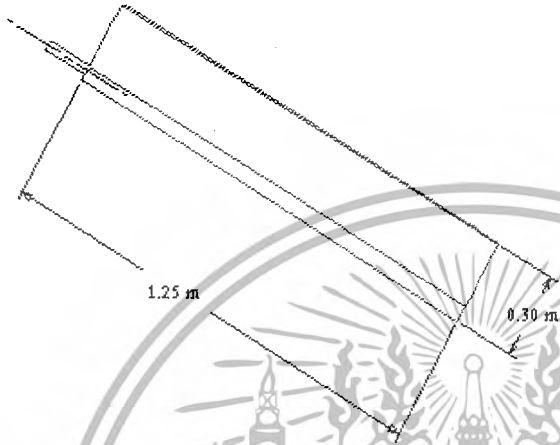
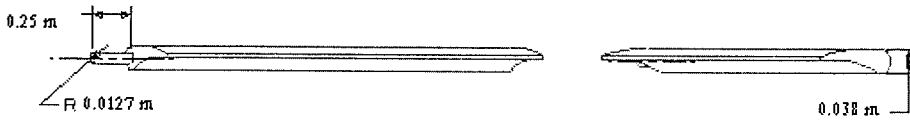
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาคผนวก ก. 2 โครงสร้างของกังหันลม

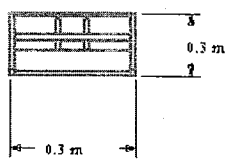
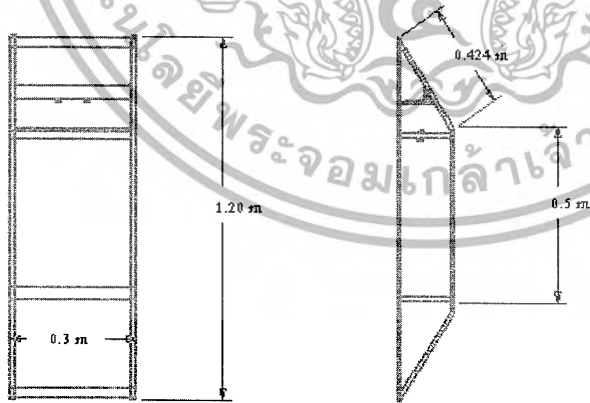


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาคผนวก ก. 3 ใบกึ่งหัน



รูปภาคผนวก ก. 3 โครงชุดเฟืองทด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.สมาน เสนงาม, “วิทยานิพนธ์ กังหันลมผลิตไฟฟ้าในชนบท พ.ศ.2541”
- [2] Jack Park, “Simplified Wind Power System For Experiment”
- [3] V.Daniel Hunt, “Wind Power a Handbook on Wind energy Conversation System.” Van Nostrand Company, 1981
- [4] สมาน เจริญกิจพูลผล และมนตรี พิรุณเกษตร, “กลศาสตร์ของไหล” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ซี เอ็ดยูเคชั่น 2544
- [5] www.westwind.com.au
- [6] ศ.ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน, “การออกแบบเครื่องกล เล่ม 1-2 “กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์ ซี เอ็ดยูเคชั่น 2544
- [7] เมธี หมั่นทำการ และก่อเกียรติ บุญชูกุล, “กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตศาสตร์”
- [8] J.L. Meriam , L.G. Kraige , “Engineering Mechanics Static” Fourth Edition



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้