



กำแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม
WALL ELECTRICAL WIND

ว่าที่ร้อยตรีเอก ไทยกุล

058942

ว 621.381

อ 893

2551

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาโครงการ/สิ่งประดิษฐ์นำศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

งบประมาณประจำปี 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทย

| | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------|
| หัวข้อปริญญานิพนธ์ | กำแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม | |
| ผู้เขียน | นายมนตรี | บุญต่อ |
| | นายรวีเดช | ไชยภักดี |
| | ว่าที่ร้อยตรีธนากร | จันทร์แก้ว |
| | นายอนุพงษ์ | เสนาะศัพย์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ว่าที่ร้อยตรีเอก | ไทยกุล |
| หลักสูตรสาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ | |
| ปีการศึกษา | 2550 | |

บทคัดย่อ

เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยมีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลทั้งอ่าวไทยและอันดามัน โดยมีลมพัดผ่านเกือบตลอดทั้งปี ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 เมตรต่อวินาที (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา) โดยกำแพงเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้วนั้น ได้สร้างมาจากปูนซีเมนต์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งใช้งบประมาณส่วนหนึ่งในการก่อสร้างกำแพงพร้อมกับกระแสนลมที่พัดผ่านเกิดการต้านกับกำแพงตลอดเวลา “จึงทำให้เกิดแนวคิดที่ว่า” หากทำการย่อส่วนรูปแบบของกังหันลมแล้วนำมาใส่ไว้แทนกำแพง โดยจะต่อเป็นแนวยาวเหมือนลักษณะของกำแพงเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้าและเกิดเป็นประติมากรรมรูปแบบใหม่ ที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้โดยใช้หลักการการทำงานของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนรูปแบบกังหันลมที่จะทำการผลิตนี้จะผลิตออกมา 2 ชุด โดยจะแบ่งตามลักษณะของแนวแกนหมุนของกังหัน คือ แบบแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) และ แบบแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

กังหันแบบแกนนอนใช้ใบพัดแบบ 2 ใบ จะใช้ทั้งหมด 4 ตัว โดยมีความกว้าง 1 เมตร สูง 1 เมตร จะสามารถออกตัวได้โดยใช้ความเร็วลมประมาณ 5.5 เมตรต่อวินาที แต่ในความเร็วลมทำงานจะใช้ความเร็วลมประมาณ 4 เมตรต่อวินาที ก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนกังหันแบบแกนตั้งใช้กังหันรูปทรงกระบอกผ่าครึ่ง 2 อันต่อ 1 กังหัน จะใช้กังหันทั้งหมด 8 ตัว โดยมีความกว้าง 1 เมตร สูง 1 เมตร ซึ่งสามารถออกตัวได้ในความเร็วที่ต่ำประมาณ 2 เมตรต่อวินาที แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันทั้ง 2 แบบ แบบแกนนอนจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า เนื่องจากจะมีความเร็วรอบสูงกว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัดแปลงจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของรถจักรยาน แล้วนำมาแปลงเป็นกระแสตรง โดยผ่าน ไดโอดแบบบริด แล้วนำไฟฟ้าที่ได้มาต่อแบบขนาน นำมาประจุไฟฟ้าโดยใช้ถ่านชาร์ตขนาด 1.2 โวลต์ 2 ก้อน

| | | |
|---------------------------|------------------------|------------|
| Minor Thesis Title | Wallelectricalwind | |
| Author | Mr.Montree | Boonto |
| | Mr.Raveedach | Chaipukdee |
| | Act.Sec.Lie.Thanakorn | Jankaew |
| | Mr.Anupung | Sanousop |
| Advisor | Act.Sec.Lie.Anek | Thaikul |
| Major Program | Faculty of Engineering | |
| Academic Year | 2007 | |

ABSTRACT

Because of topography character of Thailand has the area sticks both of Gulf of Thailand coast and Andaman By having the wind blows changes almost through all year, wind speed shares that about 4 the meter per second, (The data from the Department of Meteorology). The wall has originally that exist already that before build to is from the cement mostly which use the budget in wall construction and the wind that blow to are born resisting with the wall all the time , then cause the idea that if doing part format summary has of a wind mill already brings to add keep replace the wall by building in rows long like the character of the wall for does electric current production and are born are new look sculpture, at can use the energy can pay back by using work principle of a wind mill produces the electric current, format wind mill part will to do this production will produce to come out 2 the group, by dividing follow the character of axle line turns of the pin wheel be the axle lies down (Horizontal Axis Wind Turbine) and the axle stands (Vertical Axis Wind Turbine)

The pin wheel is like the axle lies down to use a propeller like 2, use 4 all, the 1 meter wideness, tall 1 the meter, will can defend get by using wind speed about 5.5 the meter per second, but in wind speed will work to use wind speed about 4 the meter per

to use 2 pin figure wheels splits half per 1 the pin wheel, will use 8 all pin wheels by having the 1 meter wideness, tall 1 the meter, which can defend get in lowland speed about 2 the meter per second, but when compare with 2 pin both of wheels like the axle will have lain down can produce the electricity more than because of having the speed round tall more at wind speed is equal.

The electric generator modifies from the electric generator of a bicycle already bring become the direct current by changing to mourn open already lead the electricity has that to come to build in parallel, bring the electric charge by using 2 charcoals feel numb 1.2 volt piece sizes.



กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์เรื่อง กำแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา สำเร็จลงได้ด้วยความสำเร็จของอาจารย์อเนก ไทยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิจัยตั้งแต่ต้นจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ รุ่นที่ 2 ที่มีส่วนให้การสนับสนุน ให้การจัดทำการศึกษา ตลอดจนให้คำปรึกษา ให้กำลังใจในการจัดทำสารนิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ที่สนับสนุนในการศึกษา และคอยเติมเต็มกำลังใจของผู้ศึกษาทุกคนในระหว่างที่ศึกษาเป็นอย่างดี

นายมนตรี

บุญต่อ

นายวิเศษ

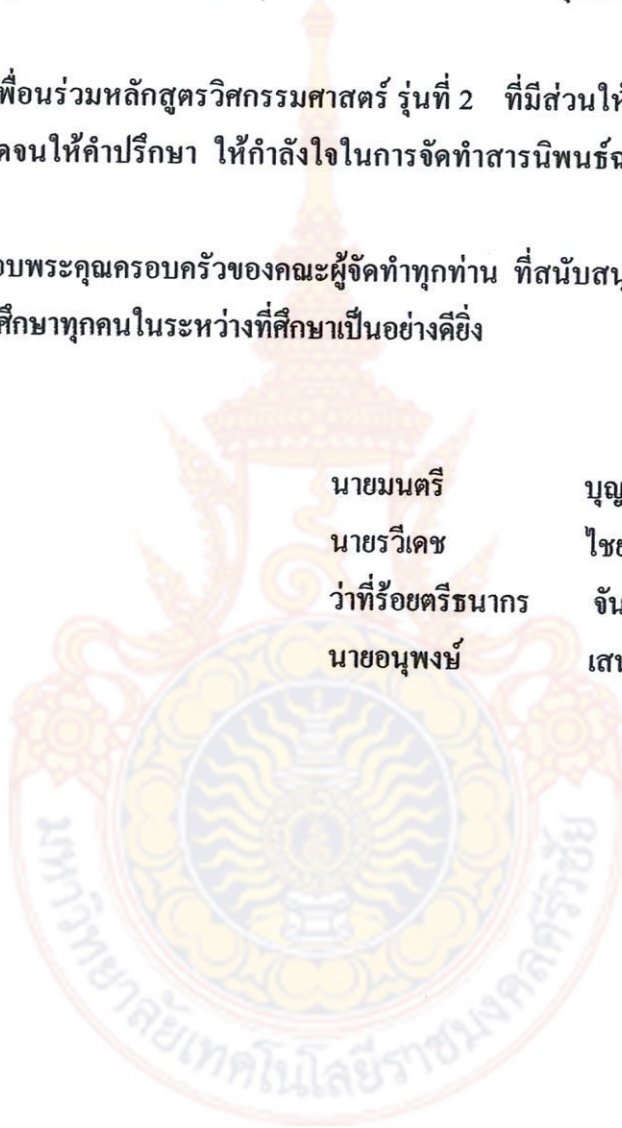
ไชยภักดี

ว่าที่ร้อยตรีธนากร

จันทร์แก้ว

นายอนุพงษ์

เสนาะศัพท์



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| ABSTRACT | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญภาพ | ช |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 6 |
| 1.3 ขอบเขตการของโครงการ | 6 |
| 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย | 6 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 7 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| 2.1 ลักษณะของลม | 8 |
| 2.2 กังหันลม | 14 |
| 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 30 |
| 2.4 การออกแบบ | 45 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน | 56 |
| 3.1 ขั้นตอนการวางแผนและเตรียมการ | 56 |
| 3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณ | 58 |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการสร้าง | 65 |
| 3.4 ขั้นตอนการทดลอง | 72 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง | 73 |
| 4.1 การทดสอบหาค่าแรงมุมของลมที่ใช้ขับเคลื่อนแนวนอน | 73 |
| 4.2 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวนอน | 82 |
| 4.3 การทดสอบหาค่าแรงมุมของลมที่ใช้ขับเคลื่อนตั้ง | 93 |
| 4.4 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวตั้งใต้น้ำ | 110 |
| 4.5 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวตั้งใต้น้ำ | 121 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|-------------------------------------|------|
| บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์ | 132 |
| 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ | 132 |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินโครงการ | 132 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 133 |
| เอกสารอ้างอิง | 134 |
| ภาคผนวก | 135 |
| ภาคผนวก ก ความเร็วลมปี พ.ศ. 2551 | 136 |
| ประวัติผู้เขียน | 141 |



สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แสดงกึ่งหั่นลมแบบแนวแกนนอน | 3 |
| 1.2 แสดงกึ่งหั่นลมแบบแนวแกนตั้ง | 3 |
| 1.3 แสดงส่วนประกอบของระบบกึ่งหั่นลม | 5 |
| 2.1 แสดงเขตละติจูดและลมประจำปี | 9 |
| 2.2 แสดงการเคลื่อนย้ายเขตลมขึ้นลงจากแนวศูนย์สูตร (ก) ฤดูร้อนของซีกโลกเหนือ (ข) ฤดูหนาวของซีกโลกเหนือ | 10 |
| 2.3 แสดงศรลมแบบต่างๆ | 13 |
| 2.4 เครื่องมือวัดลม (ก) แอนิโมมิเตอร์ เครื่องมือวัดความเร็วลม (ข) แอโรเวน เครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม | 13 |
| 2.5 แสดงถึงกึ่งหั่นลมชนิดที่ใช้แรงยกเป็นหลัก และกึ่งหั่นลมชนิดที่ใช้แรงหน่วงเป็นหลัก | 15 |
| 2.6 แสดงถึงกึ่งหั่นลมแนวนอนและกึ่งหั่นลมแนวตั้ง | 16 |
| 2.7 แสดงถึงลำอากาศที่ไหลผ่านกึ่งหั่นลมแนวนอน | 18 |
| 2.8 แสดงถึงใบกึ่งหั่นลมพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง | 20 |
| 2.9 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกึ่งหั่นที่มีรูป ภาคตัดขวางเป็นแพนอากาศ | 22 |
| 2.10 แสดงถึงตัวอย่างค่าสมรรถนะของกึ่งหั่นลมแนวนอน | 24 |
| 2.11 แสดงถึงความเร็วและใบกึ่งหั่นลมแนวตั้งที่แปรตามตำแหน่งการหมุน | 25 |
| 2.12 แสดงถึง Stream tube ของลำอากาศที่ใบกึ่งหั่นลมในแนวตั้ง | 25 |
| 2.13 แสดงถึงตัวอย่างกึ่งหั่นลมหลายประเภท | 28 |
| 2.14 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่แปรตามค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกึ่งหั่นลม ชนิดต่าง ๆ | 29 |
| 2.15 แสดงเปลือกหรือโครง | 31 |
| 2.16 แสดงขั้วแม่เหล็ก | 31 |
| 2.17 แสดงขดลวดสนามแม่เหล็ก | 32 |
| 2.18 แสดงแปรงถ่านและช่องแปรงถ่าน | 33 |
| 2.19 แสดงแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ | 33 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.20 แสดงขดลวดอาร์เมเจอร์ | 34 |
| 2.21 แสดงคอมมิวเตเตอร์ | 34 |
| 2.22 แสดงรูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง | 35 |
| 2.23 ขดลวดแบบวงเดียวอย่างง่ายที่หมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก | 36 |
| 2.24 ตัวนำถูกหมุนเป็นลักษณะวงกลมในสนามแม่เหล็ก | 38 |
| 2.25 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ในหนึ่งรอบการหมุน | 38 |
| 2.26 ขดลวดที่ต่อ Slip Ring | 39 |
| 2.27 ก) ตัวนำ 1 ขดหมุนผ่านสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ และต่อไปยังขั้วแหวนผ่าซีก 2 ชิ้น ข) แรงเคลื่อนไฟตรงที่เป็นห้วง ๆ ซึ่งได้มาจากขั้วแหวนทั้ง 2 ที่ต่อกับตัวนำ 1 รอบ | 40 |
| 2.28 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่งเพื่อหาทิศทางเคลื่อนที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า | 41 |
| 2.29 คอมมิวเตเตอร์ | 42 |
| 2.30 พิจารณาคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อตัวนำ ab อยู่หน้าขั้ว S, A = ขั้วลบ (N หรือ L-) B = ขั้วบวก (P หรือ L+) | 42 |
| 2.31 พิจารณาคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง | 43 |
| 2.32 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต้องต่อปลายสายของขดลวดอาร์เมเจอร์เข้ากับซี่ ทองแดงของคอมมิวเตเตอร์ | 44 |
| 2.33 หลักการของโมเมนต์ | 45 |
| 2.34 แบบของการไหลของลมผ่านกังหัน | 46 |
| 2.35 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันแบบต่างๆ | 49 |
| 2.36 ลักษณะการทำงานของแพนอากาศ | 51 |
| 2.37 สมรรถนะทั่วไปของแพนอากาศ | 52 |
| 3.1 ลักษณะของใบพัดที่ออกแบบ | 58 |
| 3.2 ลักษณะอุโมงค์ลม | 59 |
| 3.3 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่หาได้ตามท้องตลาด | 60 |
| 3.4 ที่จับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 61 |
| 3.5 ลักษณะโครงของกังหันแบบแกนตั้ง | 62 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.6 ลักษณะของตลับลูกปืน | 62 |
| 3.7 ลักษณะของใบกึ่งหันแบบแกนแนวตั้ง | 63 |
| 3.8 ลักษณะของเพลลาของกึ่งหันแบบแนวตั้ง | 63 |
| 3.9 ลักษณะของฐานยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 64 |
| 3.10 ลักษณะของแบบกำแพง | 65 |
| 3.11 กำแพงและอุโมงค์ลม | 65 |
| 3.12 ใบพัดแนวแกนนอน | 66 |
| 3.13 กำแพงและอุโมงค์ลมที่ประกอบแล้ว | 66 |
| 3.14 ชุดจำลองกำแพงพลังงานลม | 67 |
| 3.15 การประกอบกึ่งหันแกนแนวตั้ง | 68 |
| 3.16 การประกอบกึ่งหันแกนแนวตั้งเข้ากับกำแพง | 69 |
| 3.17 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 70 |
| 3.18 ชุดแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง | 71 |
| 4.1 พัดลมที่ใช้ในการทดลอง | 73 |
| 4.2 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้า | 74 |
| 4.3 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหลัง | 74 |
| 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง | 81 |
| 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง | 81 |
| 4.6 แสดงความเร็วลมต่างๆที่สามารถผลิตแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า | 92 |
| 4.7 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าใส่หน้ากาก | 93 |
| 4.8 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหลัง | 93 |
| 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง | 100 |
| 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง | 100 |
| 4.11 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าไม่ใส่หน้ากาก | 101 |
| 4.12 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าไม่ใส่หน้ากาก | 102 |
| 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง | 109 |
| 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง | 109 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.15 แสดงความเร็วมอเตอร์ต่างๆที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อน | 120 |
| 4.16 แสดงความเร็วมอเตอร์ต่างๆที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อน | 130 |
| 4.16 แสดงความแตกต่างระหว่างใส่หน้ากากกับไม่ใส่หน้ากาก | 131 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของ kt , m/s , km/h , m.p.h.ct ,ft/s | 14 |
| 2.2 แผนอากาศแบบต่างๆ | 50 |
| 2.3 แสดงค่าออกแบบของแผนอากาศแบบต่าง ๆ | 54 |
| 4.1 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวนอน | 75 |
| 4.2 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวนอน | 77 |
| 4.3 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวนอน | 79 |
| 4.4 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ | 82 |
| 4.5 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 94 |
| 4.6 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 96 |
| 4.7 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 98 |
| 4.8 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 103 |
| 4.9 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 105 |
| 4.10 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวตั้ง | 107 |
| 4.11 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ | 110 |
| 4.12 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ | |





กำแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม
WALLELECTRICALWIND

อาจารย์อเนก ไทยกุล

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาโครงการ/สิ่งประดิษฐ์นักศึกษา
วิศวกรรมศาสตร์

งบประมาณประจำปี 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง ที่มีต้นกำเนิดมาจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอ้อม กล่าวคือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลก ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศที่เรียกว่า “พลังงานลม” และส่วนนี้ก็ยังมีส่วนทำให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย พลังงานลมเป็นพลังงานธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า “กังหันลม” เป็นตัวสกัดกั้นพลังงานจลน์ของกระแสลมแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล โดยการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลจะใช้กังหันแบบกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง ซึ่งมีข้อดีที่เด่นชัดเหนือกังหันลมแนวนอน 2 ประการคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเฟือง สามารถติดตั้งที่ด้านล่างใกล้กับพื้นดินได้ และไม่มีควมจำเป็นต้องหันหาทิศทางลม ส่วนข้อเสียก็คือแรงบิดที่ได้มีค่าไม่คงที่ในการหมุนรอบแกน 1 รอบและไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ด้วยตนเองเหมือนกังหันลมแบบแนวนอน การหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมด้วยการทดสอบมีความยุ่งยาก และมีต้นทุนสูง หลังจากนั้นพลังงานกลจากการหมุนของกังหันก็จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลมจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมกระแสไฟฟ้า เข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมและประสิทธิภาพของกังหัน และสถานที่ติดตั้ง แต่เนื่องจากประเทศไทยไม่ใช่ผู้ผลิตกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ราคาไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลมมีราคาสูงเนื่องจากค่าติดตั้ง, บำรุงรักษา และยังคงมีปัญหาด้านเศรษฐศาสตร์ในการนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้กังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศ

ข้อจำกัดสำคัญของการใช้ประโยชน์ของพลังงานลมคือ ค่าความเร็วลมสำหรับการใช้พลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้พื้นที่ที่มีศักยภาพความเร็วลมสูง เช่น ชายฝั่งทะเล และที่สำคัญต้องเป็นพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเส้นทางลม จึงทำให้สามารถติดตั้งได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น

เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยมีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลทั้งอ่าวไทยและอันดามัน โดยมีลมพัดผ่านเกือบตลอดทั้งปี ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 เมตรต่อวินาที (ข้อมูลที่ได้มาจากกรมอุตุนิยมวิทยา) โดยกำแพงเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้วนั้น ได้สร้างมาจากปูนซีเมนต์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งใช้งบประมาณส่วนหนึ่งในการก่อสร้างกำแพงพร้อมกับกระแสลมที่พัดผ่านเกิดการต้านกับ

กำแพงตลอดเวลา “จึงทำให้เกิดแนวคิดที่ว่า” หากทำการย่อส่วนรูปแบบของกังหันลมแล้วนำมาใส่ไว้แทนกำแพงโดยจะต้องเป็นแนวยาวเหมือนลักษณะของกำแพงเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้าและเกิดเป็นประติมากรรมรูปแบบใหม่ที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้โดยใช้หลักการการทำงานของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำแพงเดิมที่ไม่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์อะไรได้เลย แต่ถ้าใช้แนวความคิดนี้จะสามารถนำพลังงานลมมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้

เทคโนโลยีกังหันลม

พลังงานลม เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า “กังหันลม” เป็นตัวสกัดกั้นพลังงานจลน์ของกระแสลม แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกล จากนั้นจึงนำพลังงานกลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ เช่น สูบน้ำ หรือใช้ผลิตไฟฟ้า เป็นต้น กังหันลมที่ใช้กันมากในประเทศไทยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ได้แก่ กังหันลมแบบใบกังหันไม้ ใช้สำหรับวิดน้ำเข้านาข้าวบริเวณจังหวัดฉะเชิงเทรา กังหันใบเสือล่าแพนใช้วิดน้ำเค็มเข้านาเกลือบริเวณจังหวัดสมุทรสงคราม และกังหันลมแบบใบกังหันหลายใบทำด้วยแผ่นเหล็กใช้สำหรับสูบน้ำลึก เช่น น้ำบาดาล น้ำบ่อ ขึ้นไปเก็บในถังกักเก็บ

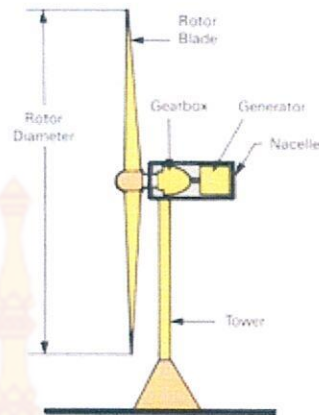
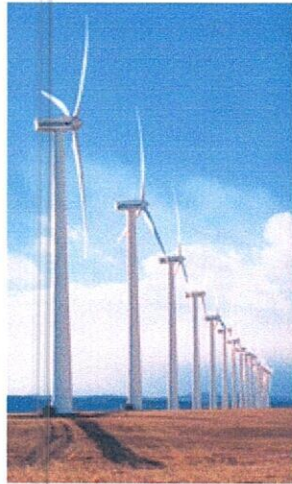
ชนิดของกังหันลม

การจำแนกชนิดของกังหันลม มี 2 วิธี กล่าวคือ

1. การจำแนกตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหัน จำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ กังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวแกนนอน และกังหันลมที่มีแกนหมุนใน แกนแนวตั้ง
2. การจำแนกตามลักษณะแรงขับที่กระแสลมกระทำต่อกังหัน มี 2 แบบ คือ การขับด้วยแรงยก (Lift force) และ การขับด้วยแรงฉุดหรือแรงหน่วง (Drag force)

กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

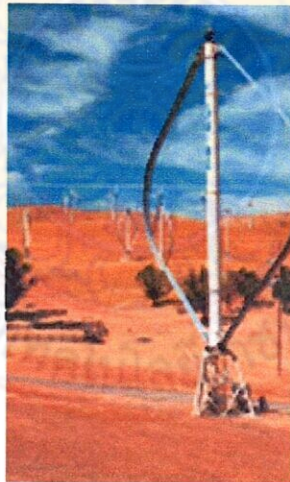
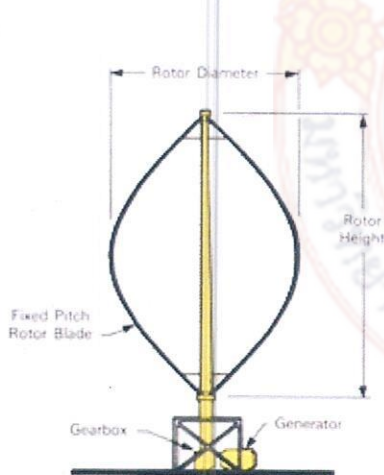
เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสือล่าแพน นิยมใช้กับเครื่องสูบน้ำ กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอบเพลเตอร์ (Propeller)



รูปที่ 1.1 แสดงกังหันลมแบบแนวแกนนอน

กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง



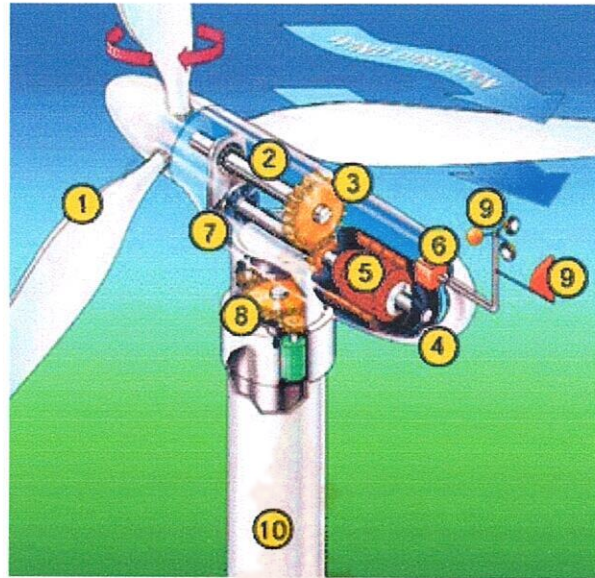
รูปที่ 1.2 แสดงกังหันลมแบบแนวแกนตั้ง

การจำแนกตามลักษณะตามแนวแกนหมุนนิยมมากเพราะเด่นชัดที่สุด และเข้าใจได้ง่าย ส่วนการจำแนกตามลักษณะ แรงขับของกระแสลมนั้น ต้องใช้ความรู้ทางอากาศพลศาสตร์

(Aerodynamic) ประกอบด้วยกังหันลมแบบแนวแกนนอนเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากออกแบบให้เป็นชนิดที่ขับใบกังหันด้วยแรงยก แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งได้รับการพัฒนามากในระยะหลังก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีที่ว่าแบบแนวแกนนอนคือ ในแบบแนวแกนตั้งนั้นไม่ว่าลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแกนนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแกนนอนที่ติดตั้งอยู่บนหอคอยสูง

ส่วนประกอบสำคัญของระบบกังหันลมต่างๆ ไปอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ใบพัด เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลลาแกนหมุน
2. เพลลาแกนหมุน ซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ห้องส่งกำลัง ซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลลาแกนหมุนกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. ห้องเครื่อง ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่างๆ ของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม
5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
6. ระบบควบคุมไฟฟ้า ซึ่งใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ
7. ระบบเบรก เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลมเกินความสามารถของกังหัน ที่จะรับได้ และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา
8. แกนคอกหมุนรับทิศทางลม เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลม โดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์ กับหางเสือรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง
9. เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม ซึ่งเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่นๆ ได้ถูกต้อง
10. เสา ซึ่งตั้งอยู่ที่พื้นที่ที่ทำการก่อสร้างอย่างถาวรวิธี ตามหลักวิศวกรรม และเป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน



รูป 1.3 แสดงส่วนประกอบของระบบกังหันลม

กังหันลมกับการผลิตไฟฟ้า

หลักการการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหัน พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุน และได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ติดตั้งกังหันลม

กังหันลมกับการใช้งาน

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วลมที่แปรผันตามธรรมชาติ และความต้องการพลังงานที่สม่ำเสมอเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว จึงต้องมีตัวกักเก็บพลังงานและใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เชื่อถือได้เป็นแหล่งสำรอง หรือใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น

ก . ตัวกักเก็บพลังงานมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้เช่น ถ้าเป็นกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมักนิยมใช้แบตเตอรี่เป็นตัวกักเก็บ

ข . การใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เป็นตัวหมุน ระบบนี้ปกติกังหันลมจะทำหน้าที่จ่าย พลังงานให้ตลอดเวลาที่มีความเร็วลมเพียงพอ หากความเร็วลมต่ำหรือลมสงบ แหล่ง พลังงานชนิดอื่นจะทำ

หน้าที่จ่ายพลังงานทดแทน (ระบบนี้กักเก็บพลังงานเป็นตัวหลักและแหล่ง พลังงานส่วนอื่น เป็นแหล่งสำรอง)

ค . การใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น อาจเป็นเครื่องจักรดีเซล หรือพลังงานน้ำจากเขื่อน ฯลฯ ระบบนี้ปกติมีแหล่งพลังงานชนิดอื่นจ่ายพลังงานอยู่ก่อนแล้ว กักเก็บจะช่วยจ่ายพลังงานเมื่อ มีความเร็วลมเพียงพอ ซึ่งในขณะที่เดียวกันก็ลดการจ่ายพลังงานจากแหล่งพลังงานอื่น เช่น ลดการใช้ น้ำมันดีเซลของเครื่องยนต์ดีเซล (ระบบนี้ แหล่งพลังงานอื่นจ่ายพลังงานเป็น หลัก ส่วนกักเก็บทำหน้าที่คอยเสริมพลังงานจากต้นพลังงานหลัก)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเร็วลมบริเวณชายหาดชลาลัย
- 1.2.2 เพื่อสร้างกำแพงลมที่มีลักษณะการหมุนแบบแนวตั้ง
- 1.2.3 เพื่อสร้างกำแพงลมที่มีลักษณะการหมุนแบบแนวนอน
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันทั้ง 2 ชนิด
- 1.2.5 เพื่อนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์
- 1.2.6 กำแพงลมสามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย

1.3 ขอบเขตการของโครงการ

- 1.3.1 สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้หลอดไฟ 2.4 W สว่างได้
- 1.3.2 เพิ่มความสวยงามให้กับกำแพง
- 1.3.3 สามารถใช้ความเร็วลมไม่ต่ำกว่า 4 m/s – 10 m/s
- 1.3.4 สามารถเพิ่มและลดขนาดกำแพงได้ง่าย
- 1.3.5 สามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย
- 1.3.6 มีความกว้างเท่ากับ 100 cm สูง 100 cm ต่อ 1 โมดูล
- 1.3.7 ได้กำแพงที่เป็นต้นแบบเพื่อนำไปพัฒนาต่อ
- 1.3.8 วัสดุที่ใช้ทำสามารถหาได้ตามท้องตลาด

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูลจากแหล่งความรู้ต่าง ๆ
- 1.4.2 ศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้
- 1.4.3 รวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม

- 1.4.4 ทำการวิเคราะห์และออกแบบตามหลักวิศวกรรม
- 1.4.5 จัดหาอุปกรณ์ในการดำเนินงาน
- 1.4.6 ประกอบชุดอุปกรณ์ตาม โครงสร้างการออกแบบ
- 1.4.7 ทำการทดลองและบันทึกผล
- 1.4.8 สรุปผลการทดลอง
- 1.4.9 จัดทำเอกสารเพื่อประกอบการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถนำพลังงานลมซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปจากโลกมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า
- 1.5.2 ใช้ความรู้ในการออกแบบนำมาออกแบบกังแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม โดยใช้พื้นที่ให้คุ้มค่าที่สุด
- 1.5.3 ใช้พลังงานลมให้เกิดค่าสูงสุด
- 1.5.4 นำความรู้ หลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ในการทำกังแพงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม
- 1.5.5 เกิดความสวยงามและยังเป็นการสร้างประติมากรรมชิ้นใหม่ให้กับมหาวิทยาลัย
- 1.5.6 สามารถใช้วัสดุที่หาได้ตามท้องตลาด
- 1.5.7 ได้กังแพงขนาดกว้าง 100 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร

บทที่ 2

ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาโครงการเรื่องกำแพงพลังงานลมผู้จัดทำโครงการได้มีการศึกษาทฤษฎี งานวิจัย และงานอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบตามลำดับตามหัวข้อดังนี้

2.1 ลักษณะของลม

2.2 กังหันลม

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4 การออกแบบ

2.4.1 แรงกระทำบนวัตถุเนื่องจากของไหล

2.4.2 ทฤษฎีโมเมนตัมสำหรับกังหันลม

2.4.3 การแพนอากาศ

2.4.4 สมรรถนะของแพนอากาศ

2.4.5 วิธีหาอัตราส่วนแรงจลน์/แรงยกค่าสุด

2.4.6 แรงที่เกิดขึ้นบนใบพัด

2.1 ลักษณะของลม

2.1.1 ระบบการหมุนเวียนของลม

เนื่องจากกระแสอากาศเคลื่อนไหวตลอดเวลา พิจารณาการเคลื่อนไหวของอากาศที่ผิวพื้น ใช้เกณฑ์ช่วงระยะเวลาที่ลมพัด แบ่งการหมุนเวียนของลมได้ 3 ระบบ คือ ระบบการหมุนเวียนทั่วไป ทำให้เกิดลมประจำปี การหมุนเวียนชั้นสอง ทำให้เกิดลมประจำฤดู และการหมุนเวียนชั้นสาม ทำให้เกิดลมประจำเวลา จะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ลมประจำปี

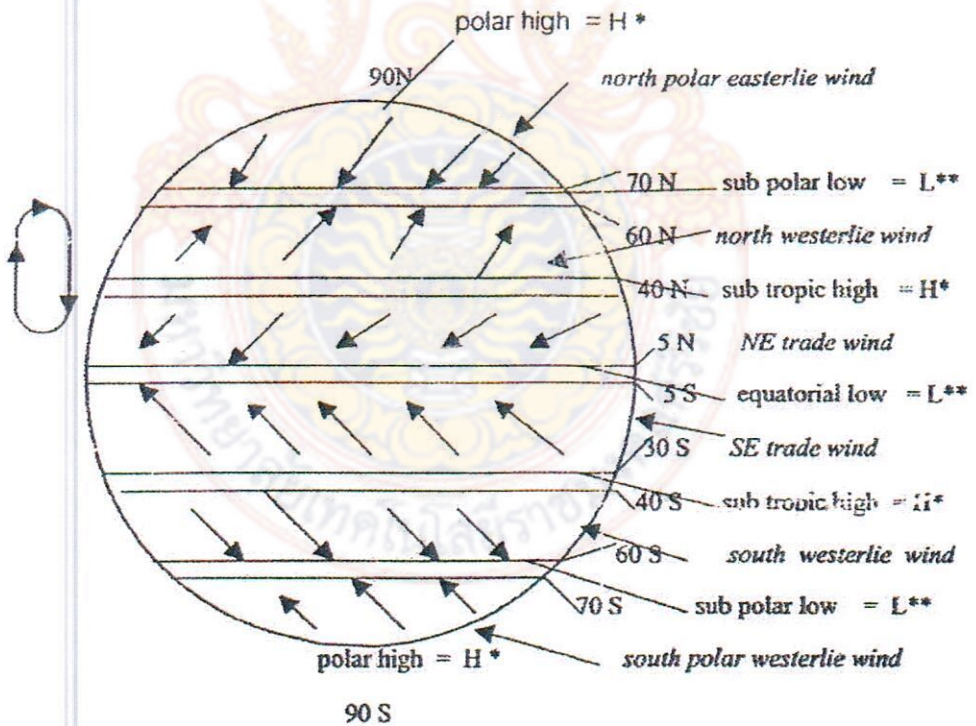
ลมประจำปี เป็นลมผิวพื้นที่อยู่ในระบบ การหมุนเวียนทั่วไป (General circulation) คือ การหมุนเวียนบริเวณกว้างตามเขตละติจูดต่ำ ($0^{\circ} - 30^{\circ}$) เขตละติจูดกลาง ($30^{\circ} - 60^{\circ}$) และเขตละติจูดสูง ($60^{\circ} - 90^{\circ}$) บางทีเรียกว่า ลมถาวร (Permanent winds) คือ พัดจากบริเวณที่มีความกดอากาศสูงมาสู่บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ แล้วกระแสอากาศลอยตัวสูงขึ้นในแนวโค้งกระแสลมอาจพัดย้อนกลับในชั้นบน และไปจมตัวลงที่ที่มีความกดอากาศสูง จึงได้ลักษณะของลมประจำปีเขตละติจูด

ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.1 ลมประจำปีที่สำคัญ เช่น ลมสินค้า ลมตะวันตก และลมตะวันออก จะกล่าวถึงลมแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

ลมสินค้า (trade wind) มีอัตราเร็ว 16 -24 กิโลเมตร/ชั่วโมง พัดตลอดปีปรากฏชัดในบริเวณที่เป็นมหาสมุทรระหว่างละติจูด 30 องศา กับเส้นศูนย์สูตร ในซีกโลกเหนือจะพัดมาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนในซีกโลกใต้จะพัดมาจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับกระแสลมที่พัดย้อนกลับเบื้องบนเรียกว่า ลมต้านสินค้า (Antitrade wind)

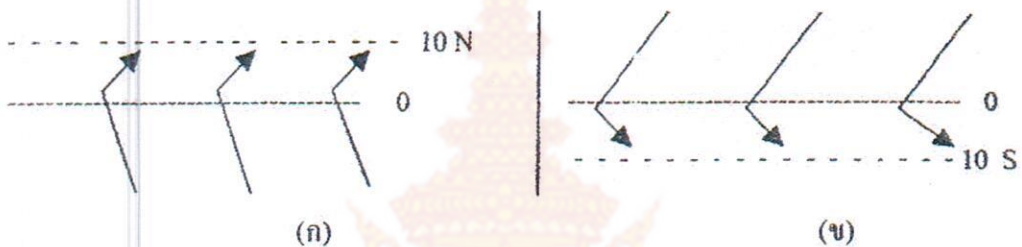
ลมตะวันตก (westerly wind) พัดระหว่างละติจูด 40 – 60 องศาทั้งในซีกโลกเหนือและใต้ ลมนี้มีความเร็วสูงกว่าลมสินค้า พัดแรงมากในฤดูหนาวจนกลายเป็นพายุได้ในซีกโลกใต้ลมนี้พัดแรงจนชาวเรือโบราณขนานนามบริเวณละติจูด 40 – 60 องศาได้เป็น the roaring forties the furious fifties and the screaming sixties ตามลำดับ เพราะซีกโลกใต้ส่วนใหญ่เป็นมหาสมุทรและไม่มีสิ่งกีดขวาง

ลมตะวันออก (Easterlie wind) พัดระหว่างขั้วโลก คือ ละติจูด 90 องศา กับละติจูด 70 องศา มีความเร็วสูง โดยเฉพาะในฤดูหนาวลมยิ่งพัดแรงมากจนเป็นพายุฤดูหนาวได้



ภาพที่ 2.1 แสดงเขตละติจูดและลมประจำปี

การเคลื่อนย้ายเขตลม ในรอบปีหนึ่ง ๆ บริเวณเขตความกดอากาศสูงต่ำจะเคลื่อนขึ้น - ลง ไปจากแนวเส้นศูนย์สูตร เช่น ทางซีกโลกเหนือ ในฤดูร้อนเขตความกดอากาศจะเคลื่อนขึ้นไป 5 องศา แต่ในฤดูหนาว เขตความกดอากาศจะเคลื่อนลงมาจากแนวเดิม 5 องศา ทำให้เขตลมต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วเคลื่อนตามไปด้วย ในช่วง 10 องศาของละติจูดทุก ๆ เขต โดยเฉพาะที่บริเวณศูนย์สูตร ในฤดูร้อน ลมสินค้าในซีกโลกใต้จะพัดข้ามศูนย์สูตร วกขึ้นมาเป็น ลมสินค้าตะวันตกเฉียงใต้ และสำหรับฤดูหนาว ของซีกโลกเหนือนั้น ลมสินค้าในซีกโลกเหนือจะพัดข้ามศูนย์สูตรลงไปเป็น ลมสินค้าตะวันตกเฉียงเหนือ ดังภาพ 2.2 ก และ ข



ภาพที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนย้ายเขตลมขึ้นลงจากแนวศูนย์สูตร (ก) ฤดูร้อนของซีกโลกเหนือ
(ข) ฤดูหนาวของซีกโลกเหนือ

2. ลมประจำฤดู

ลมประจำฤดู เป็นลมที่อยู่ในระบบการหมุนเวียนชั้นสอง ซึ่งนอกจากพัดในช่วงเวลาที่สั้นกว่า ก็ยังพัดในบริเวณกว้างใหญ่ที่รองจากลมประจำปีด้วย ได้แก่ ลมมรสุม (Monsoon wind) คำว่า monsoon มาจากภาษาอาหรับ mausim แปลว่า ฤดู (season) ลมมรสุมเกิดจากสภาพที่มีบริเวณความกดอากาศสูงกึ่งถาวร และมีหย่อมความกดอากาศต่ำกึ่งถาวรปกคลุมทวีปและมหาสมุทรต่าง ๆ เป็นระยะเวลานานเกือบครึ่งปี ทำให้เกิดความชันความกดอากาศ และเกิดลมพัดประจำในบริเวณกว้างใหญ่ในช่วงเวลาที่กล่าวถึงนั้นเป็นลมมรสุมฤดูร้อนและลมมรสุมฤดูหนาว

2.1 ลมมรสุมฤดูร้อน (summer monsoon) ในฤดูร้อนอากาศที่แผ่ปกคลุมทวีปร้อนกว่าอากาศที่แผ่ปกคลุมมหาสมุทร จึงเกิดหย่อมความกดอากาศต่ำกึ่งถาวรขึ้นเหนือพื้นทวีป และเกิดบริเวณความกดอากาศสูงกึ่งถาวรขึ้นเหนือมหาสมุทร จึงมีลมพัดจากมหาสมุทรไปสู่ภาคพื้นทวีป พาเอาไอน้ำจากมหาสมุทรไปด้วย ทำให้มีฝนตกบริเวณที่ลมนี้อัดผ่านจึงกลายเป็นฤดูฝน แต่ถ้าบริเวณใดที่ไม่มีลมนี้อัดผ่านก็จะเป็นฤดูร้อนตามปกติ

2.2 ลมมรสุมฤดูหนาว (winter monsoon) ในฤดูหนาว บนภาคพื้นทวีป เช่น ตอนกลางทวีปเอเชียอากาศหนาวเย็นมากทำให้เกิดบริเวณความกดอากาศสูงกึ่งถาวรขึ้น แต่อากาศที่

แต่ปกคลุมบริเวณทะเลมหาสมุทรใกล้ศูนย์สูตรร้อนกว่าจึงเป็นหย่อมความกดอากาศต่ำกึ่งถาวร ทำให้มีลมพัดจากตอนกลางทวีปเอเชียไปสู่ทะเลแถบศูนย์สูตร โดยพาเอาความหนาวเย็นแห้งแล้งไปสู่บริเวณที่ลมนี้พัดผ่านตลอดฤดูหนาว นอกจากนี้บางแห่งที่ลมนี้พัดผ่านทะเลมหาสมุทรพาเอาไอน้ำติดไปทำให้ฝนตก เช่น ภาคใต้ฝั่งตะวันออกของอ่าวไทย แลลมมลายู เกาะชวา ด้วยเหตุนี้ทำให้ภาคใต้ของประเทศไทยไม่มีฤดูหนาว

3. ลมประจำเวลา

ลมประจำเวลาเป็นลมในระบบหมุนเวียนชั้นสาม พัดประจำในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น เวลากลางวัน กลางคืน ได้แก่ ลมบก ลมทะเล ลมภูเขา ลมหุบเขา อาจเรียกว่า ลมประจำถิ่น เพราะพัดเฉพาะถิ่นใดถิ่นหนึ่ง เช่น Fall wind และ Foehn wind จะกล่าวถึงลมแต่ละชนิดดังนี้

3.1 ลมทะเล (Sea breeze) เป็นลมที่พัดในเวลากลางวัน เนื่องจากแผ่นดินได้รับแสงอาทิตย์และร้อนเร็วกว่าน้ำเพราะดินมีความจุความร้อนต่ำกว่าน้ำ อากาศเหนือแผ่นดินที่ร้อนลอยตัวสูงขึ้น ทำให้อากาศเหนือพื้นน้ำหรือทะเลซึ่งเย็นกว่ามีความหนาแน่นมากกว่าและมีความกดอากาศสูงกว่าพัดเข้ามาแทนที่

ลมทะเลเริ่มพัดตั้งแต่เวลา 11 นาฬิกาหมดเวลา 17 นาฬิกามีความเร็วตั้งแต่ 5 – 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง แต่จะไม่เกิน 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง ลมทะเลอาจพัดลึกเข้าไปในแผ่นดินถึง 20 กิโลเมตร และพัดสูงไม่เกิน 1 กิโลเมตรจากพื้นดิน ลมทะเลจะพัดแรงที่สุดในช่วงเวลาบ่ายและในบางแห่งที่มี แรงโคริโอลิสหรือแรงเฉมาคและมี ความชันความกดอากาศสูงหรือมาก ก็จะทำให้ลมทะเลพัดขนานกับชายฝั่งได้ นอกจากนี้ลมทะเลที่หอบความชื้นมามากพอสมควรก็อาจทำให้เกิดฟ้าคะนอง มีฝนตกได้ชาวเรือมักเรียกลมทะเลว่า ลมขึ้น เพราะอาศัยลมทะเลในการแล่นเรือใบกลับเข้าสู่ฝั่ง

3.2 ลมบก (Land breeze) เป็นลมที่พัดในเวลากลางคืน ชาวเรือเรียกว่า ลมถ่วง เพราะใช้ล่องเรือใบออกไปหาปลา ลมบกเกิดขึ้นได้เนื่องจากกลางคืนพื้นดินแผ่รังสีความร้อนออกไปเร็วกว่าพื้นน้ำ จึงทำให้มวลอากาศเหนือพื้นดินเย็นกว่า มีความหนาแน่นมากกว่าและมีความกดอากาศสูงกว่ามวลอากาศเหนือพื้นน้ำ ทำให้ลมพัดจากแผ่นดินออกไปสู่ทะเล เริ่มพัดตั้งแต่เวลาประมาณ 24 นาฬิกา จนถึงตอนเช้า ลมบกพัดไม่แรงเท่าลมทะเล และพัดลึกเข้าไปในทะเลไม่เกิน 10 กิโลเมตร

3.3 ลมหุบเขา (Valley breeze) เป็นลมที่พัดในเวลากลางวันในแถบภูเขาที่ไม่ค่อยมีต้นไม้ปกคลุม เป็นภูเขาหินส่วนใหญ่ เมื่อได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ภูเขาก็ต่ร้อนกว่าที่หุบเขาทำให้อากาศที่ปกคลุมภูเขาร้อนจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศที่หุบเขาเย็นกว่า มีความหนาแน่นและ

ความกดอากาศสูงกว่าจึงไหลขึ้นตามลาดเขาไปแทนที่ ลมหุบเขาถ้าพัดในบริเวณกว้างมีภูเขา สลับซับซ้อน เรียกว่า anabatic wind

3.3 ลมภูเขา (Mountain breeze) เป็นลมที่พัดในเวลากลางคืน เช่นเดียวกับการเกิด ลมบกกล่าวคือ ภูเขาแผ่รังสีความร้อนออกทำให้อากาศบนภูเขาเย็นกว่าอากาศที่หุบเขาจึงเกิดลมพัด จากภูเขาลงไปสู่หุบเขา ถ้าลมภูเขาพัดในบริเวณกว้างเรียกว่า katabatic wind เช่น ลม boborok ในสู มาตรา ลม buran ในไซบีเรีย ลม bora ในอิตาลี และลม mistral ในฝรั่งเศสตอนใต้

3.4 Fall wind เกิดในบริเวณที่ราบสูง หรือบริเวณธารน้ำแข็ง (glacier) ที่อากาศ หนาวจัดมากในฤดูหนาว มวลอากาศที่เย็นจัดจะพัดลงมาตามลาดเขาและมีความเร็วค่อนข้างสูง ลม นี้พัดแรงมากได้แก่ แถบ Greenland และทวีปแอนตาร์กติกา ซึ่งมีความเร็วลมถึง 160 กิโลเมตร/ ชั่วโมง

3.5 Foehn wind เป็นลมที่พัดข้ามภูเขาไปยังอีกด้านหนึ่งมีลักษณะร้อนและแห้ง แฉก เพราะมวลอากาศที่ร้อนและชื้นเดิมพัดขึ้นไปตามลาดเขาเกิดการกลั่นตัวแบบ orographic เกิด เมฆหรือมีฝนตกทางด้านรับลม (wind ward side) และเมื่อลมพัดข้ามภูเขาไปแล้ว อากาศจะจมตัวลง ตามลาดเขาและร้อนขึ้นแบบอะเดียเบติก (adiabatic) แต่ไม่มีไอน้ำ เช่น ลม Foehn ตอนเหนือของ ภูเขา Alp ในสวิสเซอร์แลนด์และออสเตรีย ลม Chinook ในเทือกเขารอกกีแถบสหรัฐอเมริกาและ แคนาดาภาคกลาง และลม Berg ในอัฟริกา เป็นต้น

2.1.2 การวัดลมผิวพื้น

การวัดลมผิวพื้น มีเครื่องวัดทั้งทิศทางและความเร็วลม ดังต่อไปนี้

1. การวัดทิศทางลม

ทิศทางลม ให้เอาทิศที่ลมพัดเข้าหาสถานีเป็นเกณฑ์ วัดเป็นองศาตามเข็มนาฬิกา โดยใช้ทิศ เหนือจริงของสถานีเป็นหลัก คือ เริ่มนับจาก 0° จนถึง 360° หรืออาจนับจากตำแหน่งของทิศตาม เข็มทิศ (Points of the compass) เช่น 8, 16 และ 32 ตำแหน่ง ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการจะวัด แล้วรายงานทิศลม โคจรหัทธ ตั้งแต่ 00 – 36

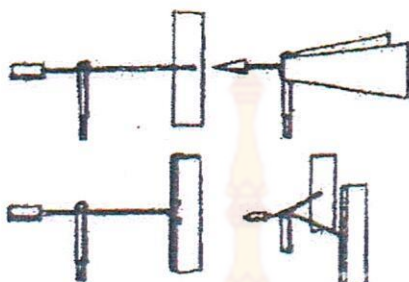
2. เครื่องมือวัดทิศทางลม

เครื่องวัดทิศทางลมผิวพื้นใช้สรลม (Wind vane) ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. หมุนรอบแกนได้คล่อง คือ มีความฝืดน้อยที่สุด ควรใช้แปรงขัดลับลูกปืน
2. ติดตั้งสรลมให้สมดุลกับแกนจริง ๆ และให้ทิศชี้ถูกต้องตามทิศเหนือ
3. ออกแบบให้มีแรงหมุนรอบตัวในอัตราเร็วสูงที่สุด
4. เมื่อลมเปลี่ยนทิศทางไปตามธรรมชาติ สรลมจะต้องไม่สั่น

สำหรับแบบของสรลมที่นิยมใช้กัน ดังภาพที่ 2.3 ที่ใช้กันมากที่สุด คือ ภาพบน

ขวา ซึ่งทำเป็นลูกศร และส่วนปลายเป็น 2 หางจรดกันเป็นมุมประมาณ 22° จะได้รับลมปะทะทั้ง 2 ข้าง ถ้าศรลมหันตรงลมจึงเฉียงให้หนึ่งได้ แม้มลมพัดเบาๆ ก็หันตามได้รวดเร็ว



ภาพที่ 2.3 แสดงศรลมแบบต่างๆ

3. เครื่องมือวัดความเร็วลม

เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบลูกถ้วย ใช้การหมุนของลูกถ้วยรูปทรงกรวย 3 ใบ จะได้มีแรงเหวี่ยงหมุนรอบตัวเองสูงที่สุด และขอบถ้วยทำให้เป็นรูปนูนขึ้นมา เพื่อให้ไวต่ออาการผกผันของกระแสลมน้อยกว่าขอบเรียบธรรมดา เครื่องมือนี้คือ แอนิโมมิเตอร์ (Anemometer) ดังภาพที่ 2.4 (ก) และเครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลมคือ แอโรเวน ภาพที่ 2.4 (ข)



ภาพที่ 2.4 เครื่องมือวัดลม (ก) แอนิโมมิเตอร์ เครื่องมือวัดความเร็วลม
(ข) แอโรเวน เครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม

เครื่องวัดลมจะต้องติดตั้งบนอาคารที่เป็นคานฟ้าในระดับสูง 11 เมตร และไม่มีสิ่งกีดขวาง ความเร็วลมใช้หน่วยในการวัดดังนี้

3.1 หน่วยที่ใช้ในการวัด ความเร็วลม มีหน่วยที่ใช้ในการวัด ดังนี้

3.1.1 นอต (knot) หรือ kt คือ ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง

3.1.2 เมตร ต่อ วินาที หรือ m / s

3.1.3 กิโลเมตร ต่อ ชั่วโมง หรือ km / h

3.1.4 ไมล์ต่อชั่วโมง หรือ m.p.h

3.1.5 ฟุตต่อวินาที หรือ ft / s

หน่วยวัดความเร็วลมทั้ง 5 มีความสัมพันธ์กันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของ kt , m/s , km/h , m.p.h.ct ft/s

| kt | m/s | m.p.h | km/h | ft/s |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.000 | 0.515 | 1.152 | 1.853 | 1.689 |
| 1.943 | 1.000 | 2.237 | 3.600 | 3.281 |
| 0.868 | 0.447 | 1.000 | 1.609 | 1.467 |
| 0.540 | 0.278 | 0.622 | 1.000 | 0.911 |
| 0.592 | 0.305 | 0.682 | 1.097 | 1.000 |

ที่มา : ไสว สุวรรณพงศ์ 1961: 81

ขณะที่ลมพัดเข้าสู่สถานีตรวจอากาศ เจ้าหน้าที่จะต้องคาดคะเนความเร็วลมได้โดยการประมาณจากอาการของสิ่งที่รับลม

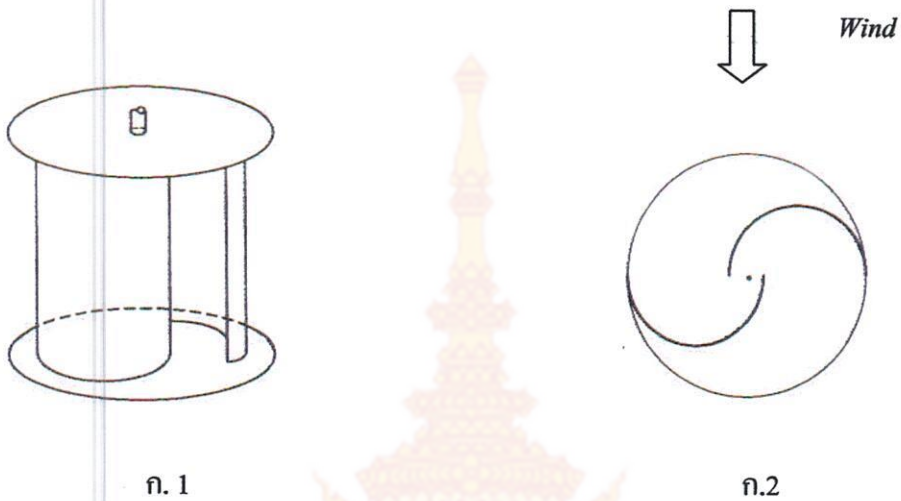
2.2 กังหันลม

กังหันลม (Wind turbine) เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลของไหลชนิดหนึ่งที่ถูกใช้เพื่อดึงเอาพลังงานออกจากลมที่ไหลผ่าน ด้วยเหตุที่ว่าหรืออากาศนั้นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเกือบพันเท่า ดังนั้นตัวกังหันลมและทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์กังหันลมจึงแตกต่างกว่าตัวกังหันน้ำและทฤษฎีวิเคราะห์ของกังหันน้ำมาก กังหันลมจะสามารถแบ่งชนิดตามลักษณะที่แรกกระทำเป็น

1. กังหันลมชนิดที่ใช้แรงยก (Lift) เป็นหลัก
2. กังหันลมชนิดที่ใช้แรงหน่วง (Drag) เป็นหลัก

กังหันลมชนิดที่ใช้แรงยกเป็นหลักมักเป็นกังหันลมที่เวลาหมุนหรือทำงานก่อให้เกิดทั้งแรงยกและแรงหน่วงขึ้น กังหันลมชนิดนี้คือ กังหันลมที่มีใบเป็นลักษณะเรียวยาว โดยที่รูปร่างของพื้นที่ภาคตัดขวางของใบกังหันอาจมีลักษณะเป็นรูปแพนอากาศ (Airfoil) ที่ก่อให้เกิดแรงยกสูง ในขณะที่กังหันลมชนิดที่ใช้แรงหน่วงเป็นหลักนั้นมักเป็นกังหันลมที่รับกระแสลมโดยตรงก่อให้เกิดแรงต้านทานขึ้นบนใบกังหัน ในลักษณะเป็นแรงหน่วง แรงดังกล่าวจะเป็นแรงหลักที่ใช้หมุนตัวใบ

กังหัน กังหันดังกล่าวนี้จะได้แก่ กังหันแบบซาร์โวเนียส รูปที่ 2.5 แสดงถึงตัวอย่างของกังหันลมชนิดที่ใช้แรงยกเป็นหลัก และกังหันลมชนิดที่ใช้แรงโน้มถ่วงเป็นหลัก



ก. กังหันลมชนิดที่ใช้แรงโน้มถ่วงเป็นหลัก (กังหันลมแบบซาร์โวเนียส)



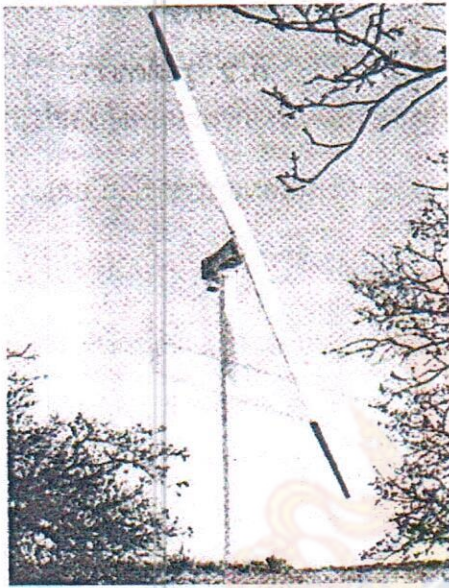
ข. กังหันลมชนิดที่ใช้แรงยกเป็นหลัก

ภาพที่ 2.5 แสดงถึงกังหันลมชนิดที่ใช้แรงยกเป็นหลัก และกังหันลมชนิดที่ใช้แรงโน้มถ่วงเป็นหลัก

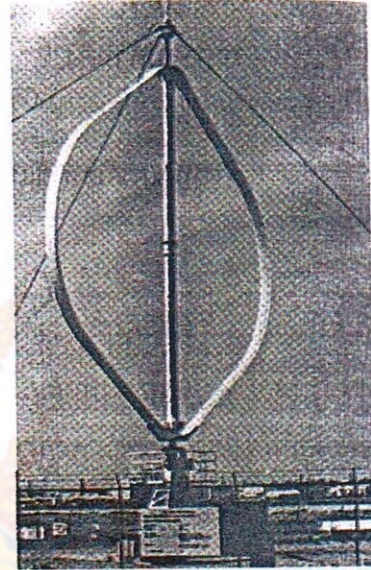
นอกจากการแบ่งกังหันลมตามลักษณะแรงหลักที่กระทำแล้ว กังหันลมยังสามารถแบ่งตามลักษณะแกนการหมุนได้เป็น

1. กังหันลมแนวนอน (horizontal axis wind turbine)
2. กังหันลมแนวตั้ง (vertical axis wind turbine)

ตัวอย่างของกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



ก. กังหันลมแนวนอน 2 ใบ MOD-2



ข. กังหันลมแนวตั้ง Darrieus rotor

ภาพที่ 2.6 แสดงถึงกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้ง

นอกจากนั้นกังหันลมยังสามารถแบ่งต่อไปตามลักษณะของตำแหน่งของใบกังหันว่าเป็นแบบที่ใบกังหันอยู่ด้านหน้าหอกังหัน (Upwind) หรือเป็นแบบที่ใบกังหันอยู่ด้านหลังหอกังหัน (Downwind) จำนวนใบของกังหันลมก็ยังสามารถมีได้หลากหลายตั้งแต่ 1 ใบ จนถึง 20-30 ใบ ซึ่งลักษณะของกังหันลมที่แตกต่างกันนี้จะให้ค่าสมรรถนะการใช้งานที่แตกต่างกัน

2.2.1 ทฤษฎีกังหันลมแนวนอน

จุดมุ่งหมายหลักของกังหันลม คือ พยายามที่จะดึงพลังงานออกจากกระแสลมให้มากที่สุด พลังงานที่มีอยู่ในลมนั้นจะขึ้นกับความเร็วลมว่ามีค่ามากหรือน้อย เราจะสามารถเขียนค่ากำลังงานในลมเป็น

$$P = 1/2 \rho AV^3 = 1/2 \rho AV^3 \quad (2.1)$$

โดยที่

P คือ ค่ากำลังงาน

P คือ ค่าความหนาแน่นของลม (อากาศ)

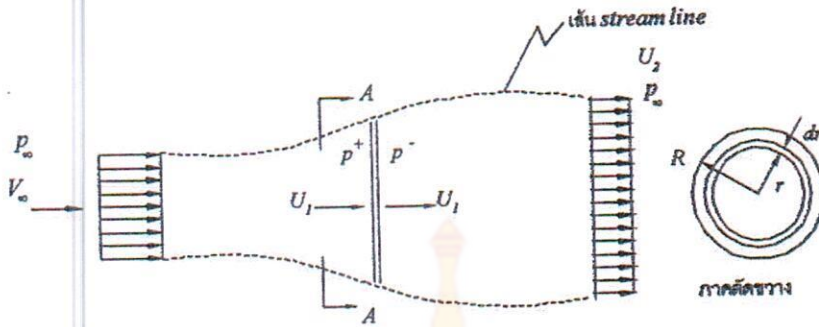
A คือ พื้นที่ซึ่งใช้ในการดักลมไว้

V คือ ความเร็วลม

จะเห็นได้ว่ากำลังงานในกระแสลมนั้นแปรตามความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้นความเร็วลมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดของการพิจารณา ในการเลือกหรือออกแบบกังหันลมเพื่อที่จะนำเอาพลังงานจากลมมาใช้ให้มากที่สุด เพราะว่าไม่ว่าจะประดิษฐ์กังหันลมให้มีประสิทธิภาพสมบูรณ์แบบแค่ไหน แต่ถ้าลมมีความเร็วต่ำ กำลังงานจากลมก็จะมีค่าต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากค่ากำลังงานแปรเป็นสัดส่วนกำลังสามของความเร็วลม และจะพบต่อไปว่าค่ากำลังงานในสมการที่ 2.1 นั้น เราไม่สามารถนำมาใช้งานได้หมด แต่จะเอาออกมาใช้ได้สูงสุดเพียง 59.3 % ของค่ากำลังงานที่มีอยู่จริงในกระแสลม

2.2.1.1 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนสำหรับกังหันลมแนวนอน

ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial momentum theory) สำหรับกังหันลมแนวนอนเป็นทฤษฎีเบื้องต้นที่สุดที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวของการไหลของลำอากาศที่พัดผ่านตัวกังหัน ทฤษฎีนี้ได้ถูกพัฒนามาจากทฤษฎี Actuator disk ของเฮลิคอปเตอร์ ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Rankine และ Froude และต่อมาได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมโดย Betz และ Gluaert ในช่วง ค.ศ. 1920 รูปที่ 2.7 แสดงถึงการไหลของลำอากาศผ่านตัวกังหันลมแนวนอนโดยที่ลมที่พัดเข้าหาตัวกังหันลมจะถูกชะลอให้ช้าลงจากความเร็วต้นทาง V_∞ ลงเป็นความเร็ว U_1 ที่กังหันลม U_2 ที่ปลายทาง และกำหนดให้ค่าความดันที่ด้านหน้าของกังหันลมมีค่าเท่ากับ p_+ และค่าความดันทางด้านหลังของกังหันลมมีค่าเท่ากับ p_- เมื่อเขียนปริมาตรควบคุมเข้ากับลำอากาศและใช้ข้อสมมุติฐาน 1. เป็นการไหลคงตัว 2. เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้ 3. เป็นการไหลที่มีทิศความสูญเสียจากแรงเสียดทานซึ่งเกิดขึ้นบนกังหันลมที่หมุน 4. ค่าความดันของลำอากาศที่ปลายทางที่ตำแหน่งที่ 2 จะมีค่าเท่ากับค่าความดันต้นทางที่ตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ p_∞ 5. ไม่มีการหมุนของอากาศด้านหลังกังหันลม



ภาพที่ 2.7 แสดงถึงลำอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมแนวอน

ค่าแรงขับ (Thrust) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในของไหลนั้น จากสมการโมเมนตัมจะเขียนได้เป็น

$$T = \rho A U_1 (V_\infty - V_2) \quad (2.2)$$

และค่าแรงเดียวกันหากพิจารณาบนตัวกังหันลมจากความดันตกรวมจะสามารถเขียนได้เป็น

$$T = A (p^+ - p^-) \quad (2.3)$$

และจากการใช้สมการเบอร์นูลีเข้ากับการไหลที่ตำแหน่งต้นทางถึงตำแหน่งต้นทางถึงตำแหน่งด้านหน้าของกังหันลม และจากตำแหน่งด้านหลังของกังหันลมจนถึงตำแหน่งปลายทางจะได้

$$p_\infty + 1/2 \rho V_\infty^2 = p^+ + 1/2 \rho U_1^2 \quad (2.4)$$

$$p^- + 1/2 \rho U_1^2 = p_\infty + 1/2 \rho U_2^2 \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.2 ถึง 2.5 จะได้

$$U_1 = \frac{V_\infty + U_2}{2} \quad (2.6)$$

หากกำหนดให้ค่าความเร็วของอากาศ เมื่อไหลมาถึงที่ตัวกังหันนั้น มีค่าลดลงเท่ากับความเร็วที่ตัวกังหันเหนี่ยวนำเป็น $a V_\infty$ โดยให้ค่า a เป็น ค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน (axial induction factor) ค่าความเร็วอากาศที่กังหันลมจะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$U_1 = V_\infty (1-a) \quad (2.7)$$

และเมื่อแทนค่ากลับไปในสมการที่ 2.6 จะได้ค่าความเร็วของอากาศที่ปลายทางเป็น

$$U_2 = V_\infty (1-2a) \quad (2.8)$$

และเมื่อพิจารณาลำอากาศเป็นลักษณะวงแหวนที่มีพื้นที่เท่ากับ $2\pi r dr$ (พิจารณาปัญหาเป็นลักษณะ multiple stream tube) ค่าแรงจลน์ที่เกิดขึ้นบนลำอากาศดังกล่าวจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} dT &= \rho (2\pi r dr) V_\infty (1-a) (2a V_\infty) \\ &= 4a (1-a) (\rho V_\infty^2 \pi r dr) \end{aligned} \quad (2.9)$$

และค่ากำลังงาน, P ที่กังหันลมผลิตได้ จะสามารถคำนวณได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ไหลผ่านกังหันลม ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$P = 1/2 m (V_\infty^2 - U_2^2) \quad (2.10)$$

เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้

$$P = 1/2 \rho A V_\infty^3 [4a(1-a)^2] \quad (2.11)$$

และกำลังงานในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power coefficient) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$C_p = \frac{P}{1/2(\rho A V_\infty^3)} = 4a (1-a)^2 \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานที่มีค่าสูงสุดได้โดยการทำอนุพันธ์ค่าดังกล่าวกับค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแกน และจับให้มีความเท่ากับศูนย์ จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดนี้ จะเป็นค่ากำลังงานเชิงอุดมคติที่กังหันลมสามารถดึงออกจากลมได้ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกระบุว่า ขอบเขตของเบตซ์ (Betz limit)

2.2.1.2 ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันสำหรับกังหันลมแนวอน

ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหัน (Blade element theory) คือ ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ ของใบพัดแต่ละส่วน โดยมีข้อสมมุติฐานที่ว่า แรงที่เกิดขึ้นบนแต่ละชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ ของใบกังหันนั้นจะมีค่าแรงยกและแรงหน่วงเท่านั้น (พิจารณาเป็น 2 มิติ) และสิ่งที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันแต่ละส่วนจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันส่วนถัดไป รูปที่ 2.8 จะแสดงถึงลักษณะของใบกังหันลม ความเร็ว และแรงที่เกี่ยวข้อง โดยที่ผู้ที่ยืนสังเกตการณ์บนใบกังหันที่หมุนอยู่จะเห็นความเร็วรวม W อันเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วลมในแนวแกนที่ถูกชะลอให้ช้าลงจากลมต้นทางจนมีค่าเท่ากับ $V_\infty (1-a)$ กับความเร็วลมที่สังเกตเห็นจากการยืนอยู่บนใบกังหัน ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วของส่วนใบกังหัน $r\Omega$ โดยมีทิศสวนกับความเร็วของใบกังหัน โดยที่ Ω คือความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน และมุม α เป็นมุมปะทะของความเร็วลมรวมกับเส้นแรงยกเป็นศูนย์ (zero lift line) ของชิ้นส่วนใบกังหัน มุม β เป็นมุมบิดของใบกังหันทำกับระนาบใบกังหันและ ϕ เป็นมุมที่เป็นผลรวมของมุม α และมุม β



ภาพที่ 2.8 แสดงถึง ใบกังหันลมพร้อมทั้งความเร็วและแรงที่เกี่ยวข้อง

แรงที่เกิดขึ้นบนของส่วนใบกังหันจะสามารถเขียนเป็นแรงย่อยในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับระนาบใบกังหันลมได้เป็น

$$dF_n = dL \cos \theta + dD \sin \theta \tag{2.13}$$

$$dF_t = dL \sin \theta - dD \cos \theta \tag{2.14}$$

$$\tan \theta = \frac{V_\infty(1-a)}{r\Omega} \tag{2.15}$$

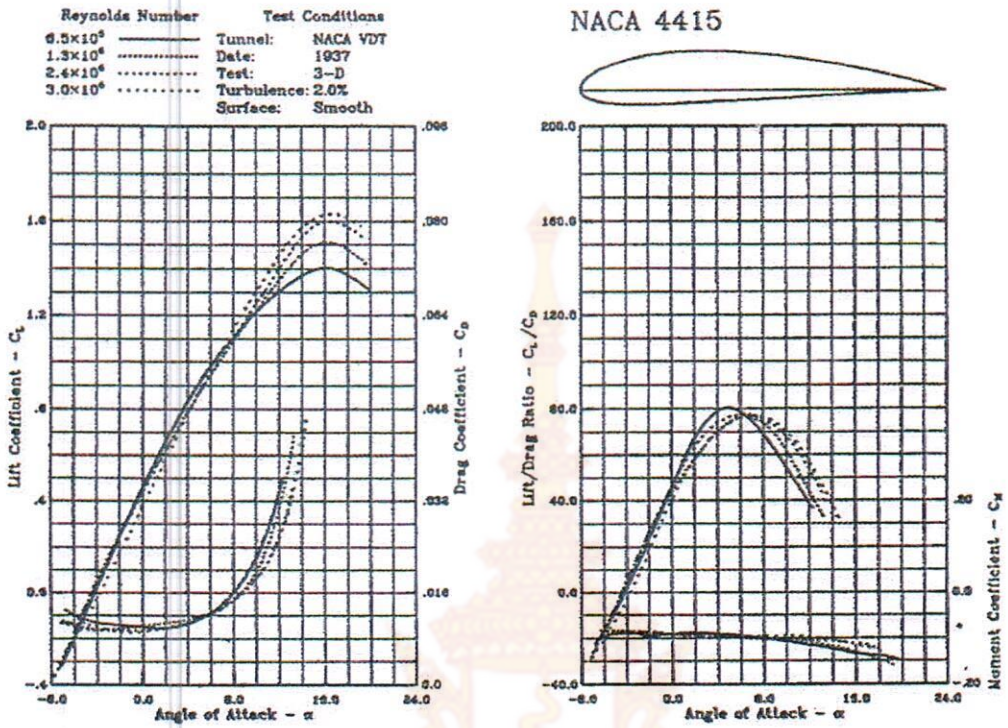
โดยที่ F_n และ F_t เป็นแรงที่อยู่ในทิศตั้งฉากและขนานกับระนาบใบกังหัน L และ D คือ แรงยกและแรงหน่วง \emptyset คือ มุมของสามเหลี่ยมความเร็ว และหากสมการที่ 2.13 และ 2.14 ถูกจัดให้เขียนอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ ก็จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_n = C_L \cos \emptyset + C_D \sin \emptyset \quad (2.16)$$

$$C_t = C_L \sin \emptyset + C_D \cos \emptyset \quad (2.17)$$

ค่า C_n C_t C_L และ C_D เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงในแนวตั้งฉากและในแนวขนาน สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงหน่วงตามลำดับ ซึ่งค่า C_L และ C_D นั้นจะสามารถหาค่าได้จากผลการทดลองสมรรถนะของแพนอากาศ รูปที่ 2.13 แสดงถึงตัวอย่างของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกังหัน ที่มีรูปภาคตัดกรวยเป็นแพนอากาศที่แปรตามมุมปะทะ ดังนั้นค่าแรงธรสต์ที่พิจารณาจากชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันที่มีขนาดความกว้างของคอร์ดเท่ากับ c และมีจำนวน B ใบนั้น จะสามารถเขียนได้เป็น

$$dT = 1/2 B \rho W^2 C_n c dr \quad (2.18)$$



ภาพที่ 2.9 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงหน่วงของใบกังหันที่มีรูปภาคตัดขวางเป็นแพนอากาศ

2.2.1.3 ทฤษฎีสตริปสำหรับกังหันลมแนวนอน

ทฤษฎีสตริป (Strip theory) เป็นทฤษฎีที่นำค่าแรงที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีโมเมนต์ตามแนวแกน และทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจับมาเท่ากัน และเขียนความสัมพันธ์เพื่อนำไปหาค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ 2.9 จับมาเท่ากับสมการที่ 2.18 โดยละทิ้งค่าแรงหน่วงตามข้อสมมุติฐานของสมการที่ 2.9 และนำมาจัดรูปใหม่จะสามารถเขียนได้ เป็น

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{BcC_L \cos \phi}{8\pi r \sin^2 \phi} \tag{2.19}$$

จากนั้นก็จะสามารถหาค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแกน a ได้โดยกระบวนการทำซ้ำ ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมุติค่า a
2. คำนวณค่า $\phi: \phi = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a) V_\infty}{r\Omega} \right)$

3. คำนวณค่า $\alpha : \alpha = \theta - \beta$
4. หาค่า C_L และ C_D จากข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของใบกังหัน
5. คำนวณค่า C_n จากสมการที่ 2.16
6. คำนวณค่า a จากสมการที่ 2.19
7. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้ใหม่กับค่าเก่า ถ้ามีค่าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะหยุด ถ้าไม่เท่าก็เริ่มต้นที่ข้อ 2 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการ

หลังจากที่ได้ค่า a ในแต่ละตำแหน่งของใบกังหันแล้ว ก็จะสามารถนำไปคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันลมที่สนใจ อันได้แก่ ค่าแรงจลน์ ค่าแรงบิด และค่ากำลังงานจากทฤษฎีขึ้นส่วนย่อยของใบกังหันได้ โดยนำเอาค่าแรงหน่วยนำไปคิดประกอบด้วย ค่าเหล่านั้นจะสามารถเขียนได้เป็น

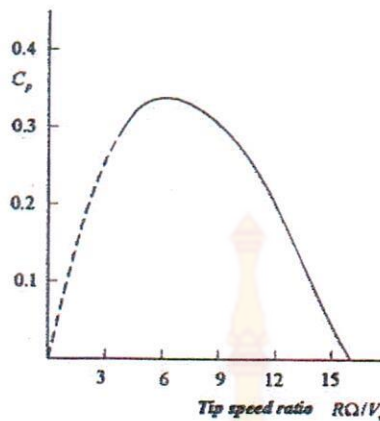
$$T = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_n c dr \quad (2.20)$$

$$Q = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_t r c dr \quad (2.21)$$

$$P = Q\Omega = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 \Omega C_t r c dr \quad (2.22)$$

โดยที่ค่า R คือ ค่ารัศมีของใบกังหันที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายใบ และ R_H คือ ค่ารัศมีของคอกใบกังหัน

ค่าสมรรถนะของกังหันลมที่เป็นที่สนใจก็คือกำลังงาน ซึ่งนิยมถูกนำเสนอในรูปของทอแมไรมิติเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (tip speed ratio, $R\Omega/V_\infty$) ตัวอย่างของค่าสมรรถนะดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



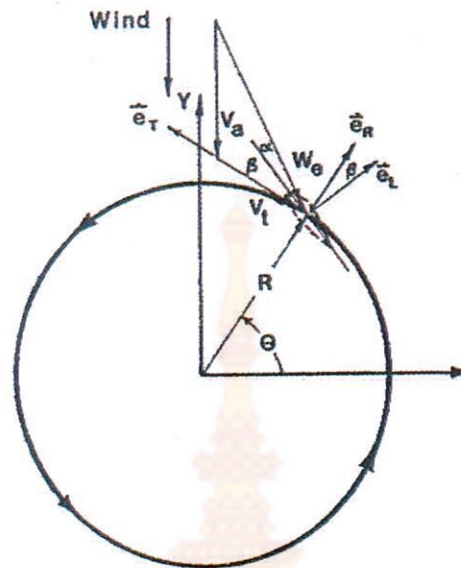
ภาพที่ 2.10 แสดงถึงตัวอย่างค่าสมรรถนะของกังหันลมแนวนอน

สำหรับค่าแรงจลน์นั้นจะเป็นแรงที่ดันให้ใบกังหัน โกงไปทางด้านหลัง ในเชิงสมรรถนะแรงจลน์ ไม่ใช่สิ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ แต่มันจะเป็นแรงที่เกิดขึ้นเป็นภาระต่อโครงสร้างของใบกังหัน ก่อให้เกิดความเค้นและโมเมนต์คดกับใบกังหัน ดังนั้นค่าแรงจลน์จึงเป็นค่าตัวแปรที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อออกแบบใบกังหันให้มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

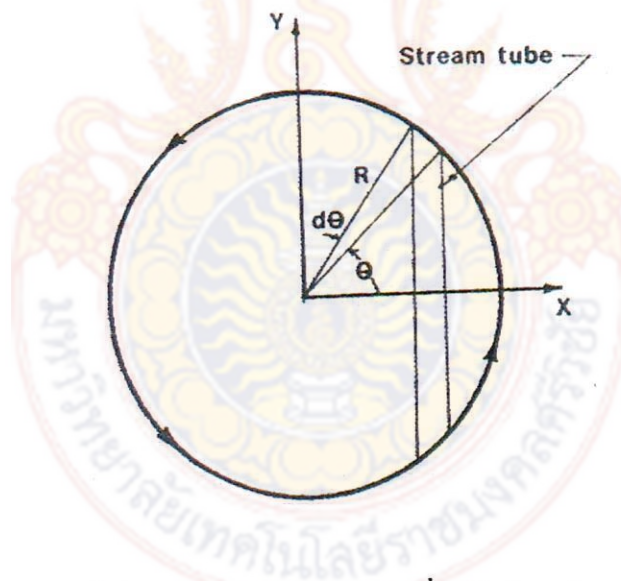
สมการต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อนี้ เป็นสมการที่ใช้วิเคราะห์กังหันลมแนวนอนในลักษณะที่เรียบง่ายที่สุด โดยได้ใช้สมมุติฐานที่เรียบง่ายจำนวนมาก ในขณะที่หากต้องการคำนวณหาค่าสมรรถนะของกังหันลมแนวนอนที่แม่นยำมากกว่าเดิม จะต้องนำผลต่างๆ ที่ละทิ้งไปในการวิเคราะห์แบบเรียบง่ายนี้ นำมารวมไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมแนวนอน อันได้แก่ ผลการหมุนวนของอากาศด้านหลังตัวกังหันลมเมื่อมันไหลผ่านใบกังหัน ซึ่งจะถูกแสดงเป็นค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำเชิงมุม λ (angular induction factor) ผลของการเอียงใบ (coning) ผลของการสูญเสียที่ปลายใบ (tip loss) ผลการสูญเสียที่คุมใบ (hub loss) และผลของการแปรเปลี่ยนความเร็วของอากาศตามความสูง (wind shear) เป็นต้น

2.2.2 ทฤษฎีกังหันลมแนวตั้ง

สำหรับการหาค่าสมรรถนะ ของกังหันลมแนวตั้งชนิดที่ใช้แรงยกเป็นแรงหลักในการทำงานนั้น จะใช้หลักการเดียวกับการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะของกังหันลมแนวนอน กล่าวคือ จะใช้ทฤษฎีโมเมนต์ตามแนวแกน ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหัน และทฤษฎีสตรีป เพียงแต่การคำนวณจะซับซ้อนกว่า เนื่องจากใบกังหันจะเห็นความเร็วลมที่แปรตามตำแหน่งการหมุนรูปที่ 2.11 แสดงถึงใบกังหันของกังหันลมแนวตั้งและความเร็วลมที่เกี่ยวข้องที่แปรตามตำแหน่งการหมุนของกังหัน และรูปที่ 2.12 แสดงถึงลำอากาศ (Stream tube) ที่ไหลผ่านกับกังหันลมแนวตั้งที่พิจารณา



ภาพที่ 2.11 แสดงถึงความเร็วและใบกึ่งหันลมแนวโค้งที่แปรตามตำแหน่งการหมุน



ภาพที่ 2.12 แสดงถึง Stream tube ของลำอากาศที่ใบกึ่งหันลมในแนวโค้ง

2.2.2.1 ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนสำหรับกังหันลมแนวโค้ง

จากการนำเอาทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนมาใช้กับลำอากาศ (Stream tube) ที่อยู่บนระนาบของใบพัด ดังรูปที่ 9.47 ค่าแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกน Y นั้นจะสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมที่ต้นทางและปลายทาง ซึ่งจะสามารถเขียนได้เป็น

$$dT = \rho V_\infty (1-a) (U_2 - V_\infty) dA \quad (2.23)$$

โดยที่ค่า U_2 คือ ค่าความเร็วของลำอากาศที่ปลายทางซึ่งมีค่าเท่ากับ $V_\infty (1-2a) c_j$ และ dA คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของลำอากาศมีค่าเท่ากับ $R d\theta |\sin\theta| dz$ และ R คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการหมุนถึงตัวใบกังหัน และ θ คือ ค่ามุมกวาดของใบพัดวัดจากแกนอ้างอิง X สมการที่ 2.23 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$dT = -2\rho V_\infty^2 (1-a)aR |\sin\theta| d\theta dz \quad (2.24)$$

2.2.2.2 ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันสำหรับกังหันลมแนวตั้ง

ภาคใต้สมมติฐานของอากาศพลศาสตร์ 2 มิติ (ละทิ้งความเร็วในแนวขนานกับแกนใบกังหัน) แรงยก (dL) บนส่วนของใบกังหันซึ่งยาวเท่ากับ dz จะมีค่าเท่ากับ

$$(dL) = 1/2 \rho W_c^2 c_{L_L} dz e_L \quad (2.25)$$

โดยที่ e_L เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศของแรงยก e_n และ e_t เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศที่ตั้งฉากและขนานกับเส้นสัมผัสการหมุนของใบกังหันตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ดังนั้น ค่าความเร็ว W_c จะสามารถเขียนได้เป็น

$$W_c = V_\infty (1-a) \sin\theta e_n - (R\Omega + V_\infty (1-a) \cos\theta) e_t \quad (2.26)$$

2.2.2.3 ทฤษฎีสตรีปสำหรับกังหันลมแนวตั้ง

เมื่อพิจารณาลำอากาศในรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าในการที่ใบกังหันหนึ่งใบหมุนครบหนึ่งรอบนั้น ใบกังหันจะมีโอกาสอยู่ในลำอากาศที่พิจารณา 2 ครั้งคืออยู่ทางด้านหน้า ($\theta=0 \rightarrow \pi$) หนึ่งครั้ง และอยู่ทางด้านหลัง ($\theta=\pi \rightarrow 2\pi$) อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นเวลานำเอาแรงที่เกิดขึ้นตามแนวการไหลที่คำนวณได้ จากทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจับมาเท่ากับแรงที่คำนวณได้จากทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกน จึงต้องหาค่าเฉลี่ยระหว่างใบกังหันทั้งสองตำแหน่ง ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นในแนวการไหลสามารถนำเอาค่าแรงในสมการที่ 2.24 มาเท่ากับองค์ประกอบของแรงที่ได้จากสมการ 2.25 แยกอยู่ในแนวเดียวกัน และจะสามารถเขียนได้เป็น

$$4a(1-a) = \left[\frac{Bc}{R} \right] \left[\frac{R\Omega}{V_\infty} \right] \frac{C_L}{\pi} \left[\frac{W_c}{V_\infty} \right] \quad (2.27)$$

โดยที่มีมุม θ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของมุมปะทะ α และมุมบิดของใบกังหัน β นั้นจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$\tan \theta = \frac{V_\infty (1-a) \sin \theta}{V_\infty (1-a) \cos \theta + R\Omega} \quad (2.28)$$

และค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน a ของชิ้นส่วนย่อยใบกังหันลมในแต่ละตำแหน่งของการหมุนของใบกังหันลม จะหาได้โดยกระบวนการทำซ้ำดังนี้

1. ที่ตำแหน่งหนึ่งบนใบกังหันลม ที่มีมุม θ ค่าหนึ่ง สมมุติค่า a
2. คำนวณหาค่า θ จากสมการที่ 2.28
3. คำนวณหาค่า α จาก $\alpha = \theta - \beta$
4. หาค่า C_L จากข้อมูลของใบกังหันลมที่มีมุม α
5. คำนวณหาค่า a จากสมการที่ 2.27
6. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้ใหม่จากข้อที่ 5 กับค่าเก่า ถ้าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะหยุด ถ้าไม่เท่ากันก็เริ่มต้นข้อที่ 2 ใหม่ จนกว่าจะได้ค่าที่ต้องการ
7. จากนั้นก็เปลี่ยนค่ามุม θ โดยเริ่มที่ข้อที่ 1 ใหม่จนครบรอบการหมุน

โดยที่ตอนคำนวณหาค่าแฟกเตอร์การเหนี่ยวนำตามแนวแกน a นั้นจะละทิ้งแรงหน่วงและเมื่อได้ค่า a แล้ว จึงนำเอาไปคำนวณหาค่าสมรรถนะที่สนใจโดยนำเอาค่าแรงหน่วงมาใส่กลับเข้าไป โดยที่ค่าแรงบิด Q บนชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันลมที่มีใบตรงยาว r จะสามารถเขียนได้เป็น

$$dQ = \frac{R^2}{2} \rho v_\infty^2 \frac{Bc}{R} \frac{W_c}{V_\infty} \left[C_L (1-a) \sin \theta - C_D \left(\frac{R\Omega}{V_\infty} + (1-a) \cos \theta \right) \right] dr \quad (2.29)$$

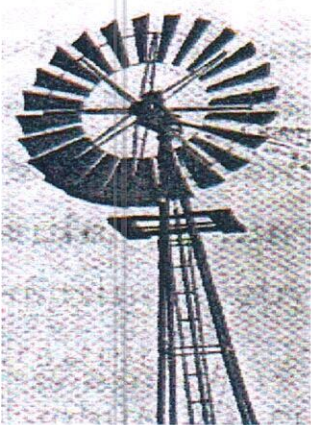
และค่ากำลังงานจะหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = \Omega \int_{R_{in}}^{R_{out}} dQ$$

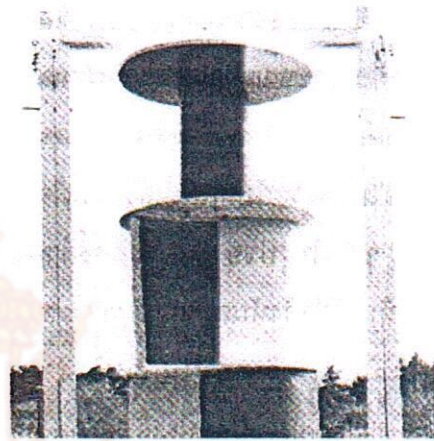
$$P = \frac{R^2 \Omega \rho v_\infty^2 Bc}{2 R} \int_0^{2\pi} \frac{W_c}{V_\infty} \left[C_L (1-a) \sin \theta - C_D \left(\frac{R\Omega}{V_\infty} + (1-a) \cos \theta \right) \right] d\theta \quad (2.30)$$

2.2.3 การเลือกกังหันลม

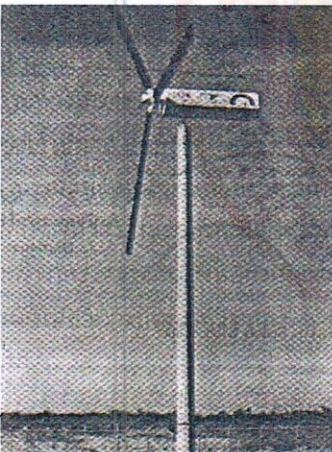
จะเห็นได้ว่ากังหันลมที่มีการผลิตและติดตั้งอยู่นั้นมีหลายแบบ ตั้งแต่กังหันลมแนวนอนแบบหลายใบ (multiblade wind turbine) กังหันลมแนวตั้งแบบชาร์โวนีเยส กังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้งแบบที่ใช้แรงยกเป็นแรงหลัก รูปที่ 2.13 จะแสดงถึงตัวอย่างของกังหันลมเหล่านี้



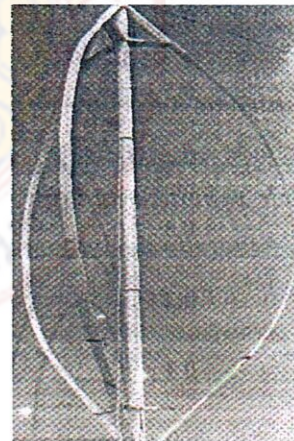
ก. กังหันลมแบบ Multiblade



ข. กังหันลมแบบชาร์โวนีเยส



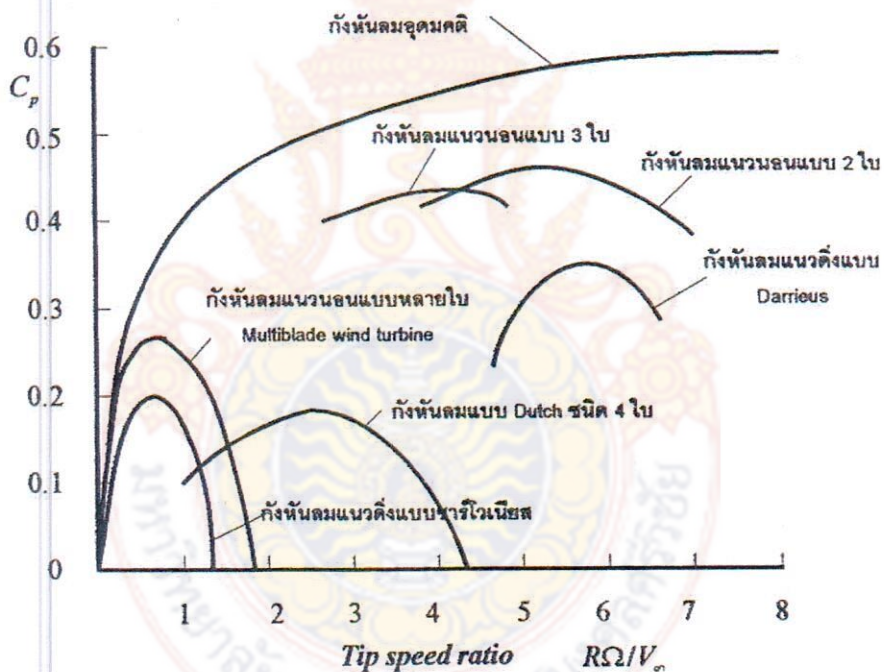
ค. กังหันลมแนวนอนแบบที่ใช้แรงยกเป็นหลัก



ง. กังหันลมแนวตั้งแบบที่ใช้แรงยกเป็นหลัก

ภาพที่ 2.13 แสดงถึงตัวอย่างกังหันลมหลายประเภท

หากพิจารณาจากรูปลักษณะภายนอกของกังหันลมชนิดต่างๆ ก็จะมีลักษณะแตกต่างกัน และหากพิจารณาคุณลักษณะทางสมรรถนะของกังหันลมแต่ละชนิดก็จะเห็นว่ามีลักษณะที่ต่างกันมากพอควรที่สามารถจะนำไปเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้กังหันลมแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการได้ รูปที่ 9.49 แสดงถึงค่าสมรรถนะของกังหันลมชนิดต่างๆ กันในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังงานที่แปรตามค่าอัตราความเร็วปลายใบของกังหันลม ซึ่งจะเห็นได้ว่ากังหันลมแนวตั้งแบบชาร์โวนีเยสให้ค่าสมรรถนะในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังต่ำที่สุดและมีความเร็วรอบในการทำงานค่อนข้างต่ำ ในขณะที่กังหันลมแนวอนแบบหลายใบ (multiblade) จะมีสัมประสิทธิ์กำลังงานที่สูงขึ้น แต่ยังทำงานที่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ กังหันลมแนวอนและกังหันลมแนวตั้งชนิดที่ใช้แรงยกเป็นแรงหลักจะให้ค่าสมรรถนะที่สูง และจะทำงาน



ภาพที่ 2.14 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่แปรตามค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลมชนิดต่างๆ

ที่ความเร็วรอบที่สูงกว่าจึงเหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า กังหันชนิดนี้มีกมีจำนวนใบกังหัน 2 ถึง 4 ใบในขณะที่กังหันลมแบบหลายใบและกังหันลมแนวตั้งแบบชาร์โวนีเยส

จะมีคุณลักษณะที่ให้ค่าแรงบิดสูง ทำให้กังหันลมดังกล่าวสามารถทำงานที่ความเร็วลมต่ำได้ดี และนิยมนำไปใช้กับการสูบน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำเป็นแบบลูกสูบซึ่งต้องการค่าแรงบิดในการส่งผ่านมาเป็นแรงชักสูบสูง

สำหรับข้อดีและข้อด้อยของกังหันลมแนวอนและแนวตั้ง ก็คือ กังหันลมแนวอนนั้นจะมีปัญหาของการที่ลมไม่พัดเข้าไปกังหันตรงๆ เกิดการเอียง (yaw) ของกระแสลมที่พัดพาไปกังหันส่งผลให้สมรรถนะของกังหันลมลดลง ทำให้ต้องมีระบบที่จะเอียงตัวไปกังหันเข้าหากระแสลมเพื่อรักษาประสิทธิภาพของการทำงานให้ยังคงมีค่าสูงไว้ ซึ่งระบบการคัดตัวไปกังหันเข้าหากระแสลมอาจเป็นแบบเรียบง่าย ที่เป็นแค่ทางเสื่อคัดลมสำหรับกังหันขนาดเล็ก จนถึงระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาดใหญ่สำหรับกังหันลมขนาดใหญ่ และการที่กังหันลมแนวอนมีระบบผลิตกำลังงานหรือผลิตกระแสไฟฟ้าติดตั้งอยู่บนส่วนของ nacelle หลังใบพัดจะทำให้เกิดภาระทางโครงสร้างกับหอกังหันลม แต่ข้อดีของกังหันลมแนวอน ก็คือ สามารถเริ่มทำงาน (เริ่มหมุน) ได้ไม่ยาก สามารถติดตั้งระบบควบคุมเวลาเกิดพายุ หรือลมแรงเกินค่าออกแบบได้ไม่ยาก แต่ในขณะที่กังหันลมแนวตั้งจะไม่มีปัญหาเรื่องการหนีลม เพราะกังหันลมแนวตั้งสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง และระบบผลิตกำลังงานนั้นซึ่งต่อจากเพลาหมุนมักติดตั้งไว้ที่พื้น ทำให้ไม่เพิ่มภาระทางโครงสร้างกับตัวหอกังหันลมและตัวกังหันลม ข้อด้อยของกังหันลมชนิดนี้ ก็คือ ตัวกังหันลมมักไม่สามารถหมุนทำงานได้เองภายใต้กระแสลม จะต้องมีระบบช่วยในการทำให้หมุนในตอนแรก

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.1.1 โครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือ ไดนาโม (Generator or Dynamo) เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เรียกว่า มอเตอร์ (Motor) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างและหลักการที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

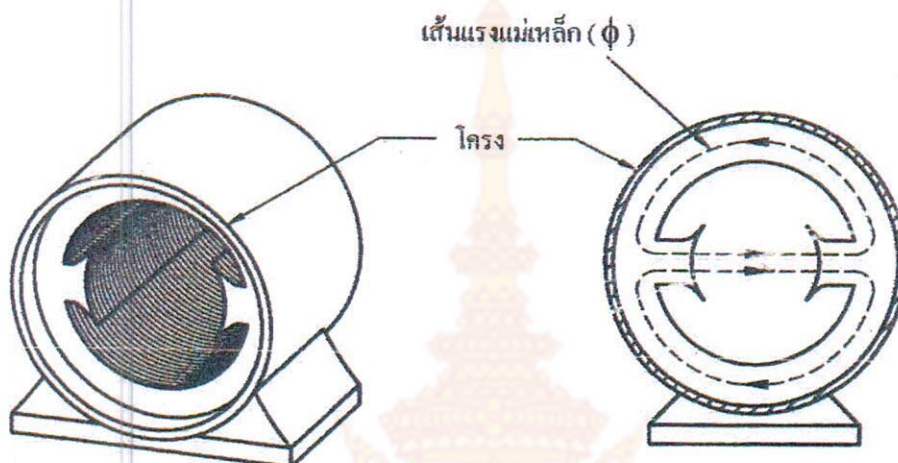
1. ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator Part)
2. ส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor Part)

ส่วนที่อยู่กับที่ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (Stator) ประกอบด้วย

1. เปลือกหรือโครง (Frame or Yoke) ทำด้วยเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กม้วน ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก ทำหน้าที่คือ

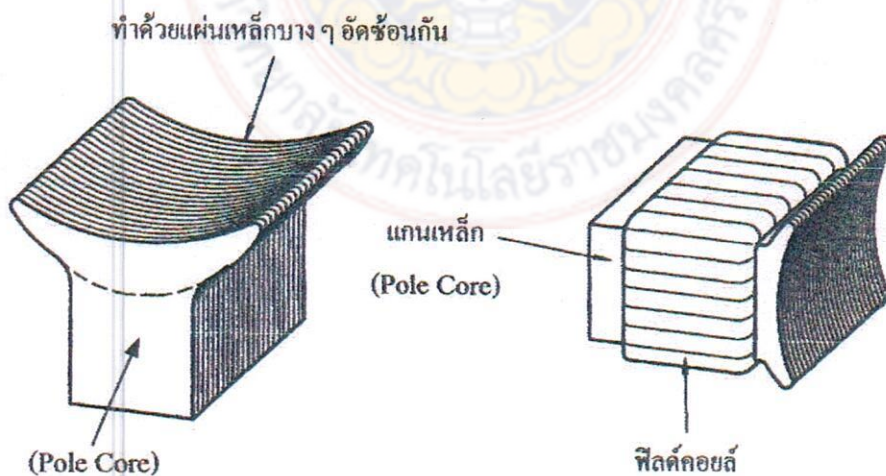
1.1 ยึดขั้วแม่เหล็กและส่วนประกอบทั้งหมด

1.2 เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Part)



ภาพที่ 2.15 แสดงเปลือกหรือโครง

2. ขั้วแม่เหล็ก ประกอบด้วยแกนขั้ว (Pole Core) และหน้าที่ขั้วหรือหน้าขั้วปลายบาน (Pole Shoes) ทำมาจากแผ่นเหล็กบาง (Laminated Sheet Steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยแต่ละแผ่นจะเคลือบไว้ด้วยฉนวน ลักษณะของขั้วแม่เหล็กแสดงได้ดัง รูป 2.16 ขั้วแม่เหล็กนี้จะนำไปยึดเข้ากับโครงด้วยสกรู (Screw) ชั้นหน้าขั้วปลายบาน (Pole Shoes)

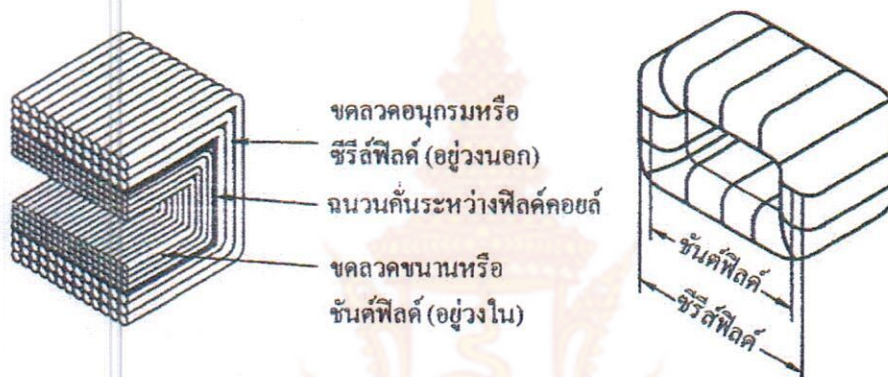


ภาพที่ 2.16 แสดงขั้วแม่เหล็ก

3. ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil or Winding) หรือเรียกว่า ขดลวดฟิลด์คอยล์ เป็นลวดตัวนำพันไว้รอบขั้วแม่เหล็ก ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ขดลวดฟิลด์คอยล์มี 2 ชนิด

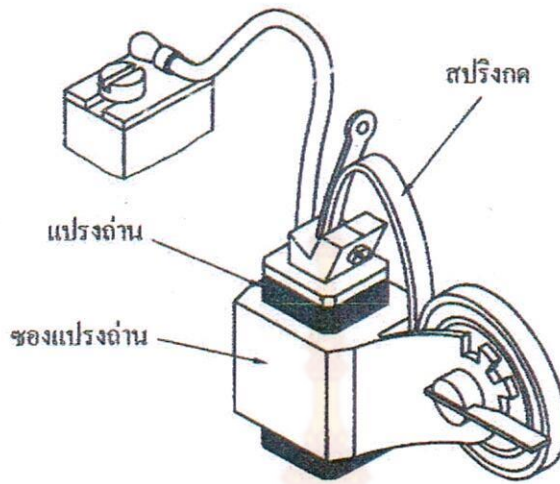
3.1 ขดลวดขนาน (Shunt Field Winding) จะพันด้วยลวดเส้นเล็กมีความต้านทานสูง

3.2 ขดลวดอนุกรม (Series Field or Series Winding) จะพันด้วยลวดเส้นโตมีความต้านทานต่ำ ขดลวดทั้ง 2 ชุด จะพันรวมแกนขั้วแม่เหล็กเป็นรูปฟอร์มดังในรูปที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสดงขดลวดสนามแม่เหล็ก

4. แปรงถ่านและแบร็ริง หรือ ร่องลื่นหรือตลับลูกปืน (Brushes and Bearing) ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟจากคอมมิวเตเตอร์ไปยังวงจรรภายนอก แปรงถ่านทำจากคาร์บอนอัดแน่นมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าบรรจุอยู่ในช่องแปรงถ่านและถูกกดด้วยสปริงให้สัมผัสกับซี่คอมมิวเตเตอร์ตลอดเวลา และช่องแปรงถ่านจะถูกยึดติดอยู่กับฝาครอบ ส่วนแบร็ริงหรือตลับลูกปืนนั้นจะเป็นตัวรองรับน้ำหนักทั้งหมดที่ส่งมาจากตัวหมุน และช่วยลดแรงเสียดทานที่เพลอาชนะที่อาร์เมเจอร์หมุนไป ปกติแล้วแบร็ริงจะยึดติดอยู่กับที่ฝาครอบทั้ง 2 ข้างของเครื่องกำเนิดแปรงถ่านและช่องแปรงถ่าน แสดงได้ดังรูปที่ 2.18

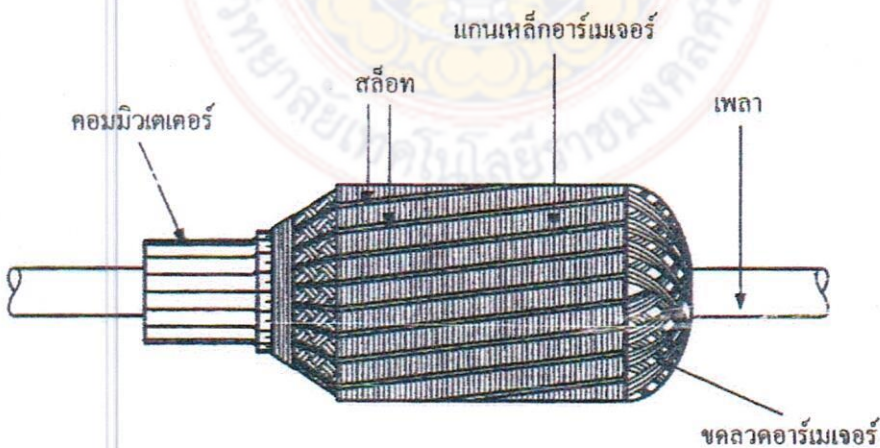


ภาพที่ 2.18 แสดงแปรงถ่านและช่องแปรงถ่าน

5. ฝาปิดหัวท้ายหรือฝาครอบ (End Plate) ทำมาจากเหล็กหล่อเหนียวเช่นเดียวกับตัวโครง ทำหน้าที่รองรับเพลลาของส่วนหมุนและยึดช่องแปรงถ่านไว้

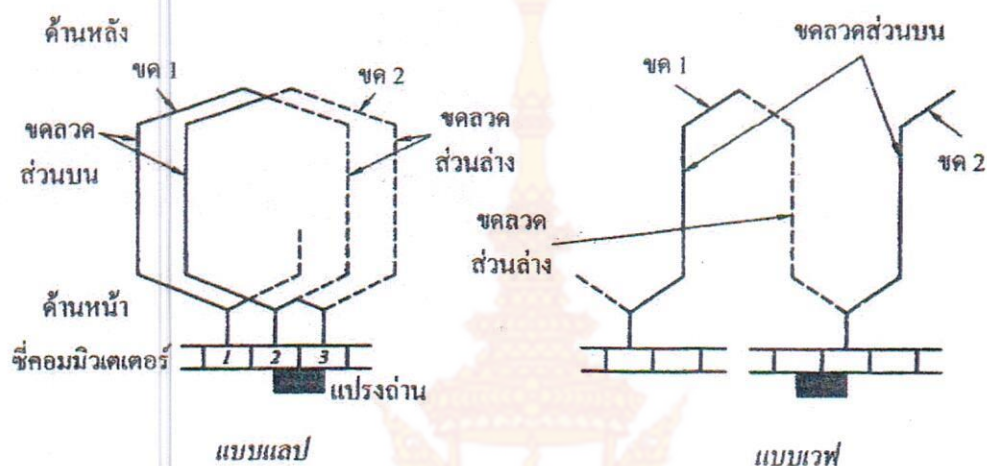
ส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (Rotor / Armature) ประกอบด้วย

1. แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature Core) แกนอาร์เมเจอร์เป็นเหล็กใช้เป็นที่สำหรับบรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ ที่ด้านหนึ่งฉาบด้วยฉนวนอัดซ้อนเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก และเจาะเป็นร่องสลีทไว้ดังรูปที่ 2.19 และที่แกนเหล็กอาร์เมเจอร์นี้จะเจาะรูไว้ด้วย เพื่อช่วยในการระบายความร้อน อันเนื่องมาจากการสูญเสีย



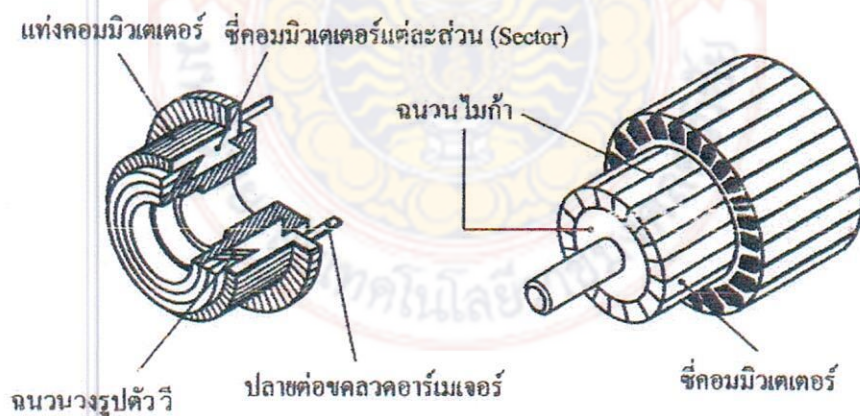
ภาพที่ 2.19 แสดงแกนเหล็กอาร์เมเจอร์

2. การพันขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature or Armature Winding) คือ การวางขดลวดที่บรรจุลงในร่องสลิตของแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ซึ่งการพันจะเป็นแบบแลป (Lap) หรือแบบเวฟ (Wave) โดยสังเกตที่ปลายของขดลวดจะถูกนำไปต่อเข้ากับ แต่ละซี่คอมมิวเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 แสดงขดลวดอาร์เมเจอร์

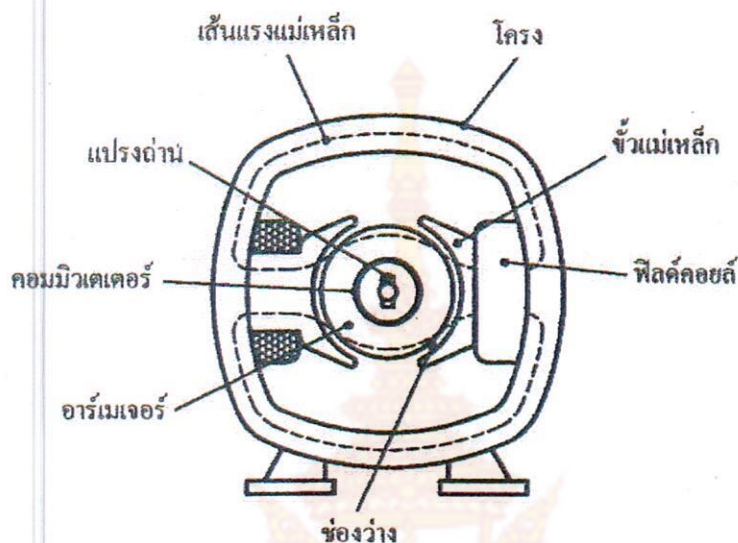
3. ซี่คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งคอมมิวเตเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 แสดงคอมมิวเตเตอร์

คอมมิวเตเตอร์ประกอบด้วยซี่ทองแดงหลายๆ ซี่อัดเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอกและระหว่างซี่ทองแดงแต่ละซี่จะคั่นไว้ด้วยฉนวนหนาที่แข็งแรงและยึดติดไว้บนเพลลาอันเดียวกันกับ

แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ จากโครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมดดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถแสดงส่วนต่างๆ ได้ดังรูป 2.22



ภาพที่ 2.22 แสดงรูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

การเกิดและทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การเกิดและทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลักของการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากวิธีการดังต่อไปนี้

- โดยการให้ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่อยู่กับที่
- โดยการให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวนำที่อยู่กับที่
- โดยการเปลี่ยนจำนวนของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดนั้น

วิธีที่ 1 นำไปใช้ในการทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

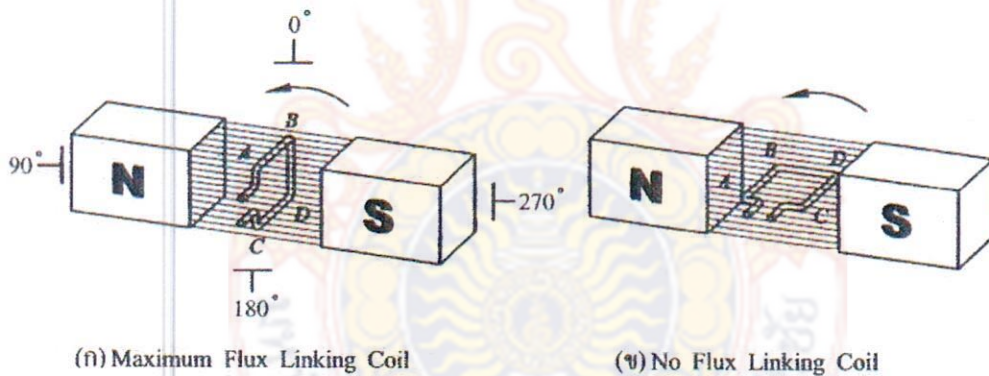
วิธีที่ 2 ใช้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟสลับ

วิธีที่ 3 ใช้กับการเหนี่ยวนำขดลวดและหม้อแปลงไฟฟ้า

การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เกิดจากการที่ตัวนำวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มคงที่ค่าหนึ่งด้วยอัตราเร็วจำนวนหนึ่ง นั่นก็คือ เกิดอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเวลาขึ้น ดังนั้น จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.23 (ก-ข) แสดงถึงขดลวดแบบง่าย ๆ ขดหนึ่งที่วิ่งตัดผ่านสนามแม่เหล็กถาวรที่มีขั้ว N และขั้ว S

โดยที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอทุก ๆ จุดจากขั้วทั้งสองนั้น รูปที่ 2.23 (ก) เป็นตำแหน่งที่มีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องขดลวดมีค่าสูงสุด (คือเส้นแรงแค้ดทั้งตัวนำบนและล่าง โดยที่เส้นแรงแข้างบนก็คล้องตัวนำหรือขดลวดด้านบน ส่วนด้านล่างก็คล้องด้านล่าง) รูปที่ 2.23 (ข) นั้นเป็นตำแหน่งที่ไม่มีเส้นแรงแค้ดขดลวด (No Flux Linking Coil) รูปที่ 2.23 (ก) นั้นแม้ว่าจะเป็นตำแหน่งที่มีเส้นแรงแค้ดขดลวดสูงสุดก็ตาม แต่ว่าแรง เคลื่อนไฟฟ้าที่จะเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดนั้นก็ยังไม่เกิดขึ้นคือมีค่าเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแค้ดที่มากคล้องตัวนำนั้นยังไม่เกิดการตัดกันคือ มีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าต่ำสุด (Rate of change of flux linkage is minimum) เนื่องจากขดลวดยังไม่เคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแค้ด ฉะนั้น เมื่อตำแหน่งระนาบของขดลวดตั้งฉากกับเส้นแรงแค้ดจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดหรือเท่ากับศูนย์ ส่วนรูปที่ 2.23 (ข) นั้นเป็นตำแหน่งที่มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดสูงสุด เพราะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแค้ดต่อหนึ่งหน่วยเวลาสูงสุดเนื่องจากขดลวดได้ถูกทำให้เคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นแรงแค้ดที่คล้องไว้แล้วนั่นเอง



ภาพที่ 2.23 ขดลวดแบบวงเดียวอย่างง่ายที่หมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก

เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาไป 1-4 รอบ ขดลวดด้านข้างของขดลวด AB เคลื่อนที่ไป 90° จากตำแหน่ง 0 ในรูปที่ 2.23 (ก) ไปยังตำแหน่งในรูปที่ 2.23 (ข) นั้น ทำให้เส้นแรงแค้ดที่ไปคล้องขดลวด AB ลดจากค่าสูงสุดลงไปเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดจะเป็นไปตามสมการพื้นฐาน คือ

$$e = \frac{N d\phi}{dt} \quad \text{Volts}$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในขดลวด $E_{av} = N \left(\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right)$ Volts (2.30)

เมื่อ N เป็นจำนวนรอบของตัวนำขดลวดนั้น และ t เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไป 1/4 รอบ นั่นคือ $t = \frac{1}{4f}$

เมื่อ f คือ จำนวนรอบต่อวินาที

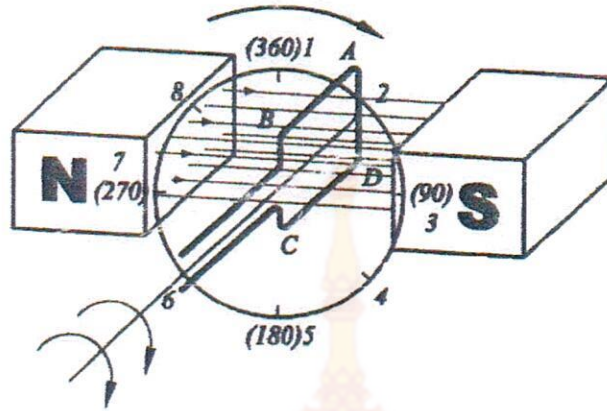
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในระหว่าง 1/4 ของรอบการหมุนก็คือ

$$E_{av} = 4 f N \phi \quad \text{Volts} \quad (2.31)$$

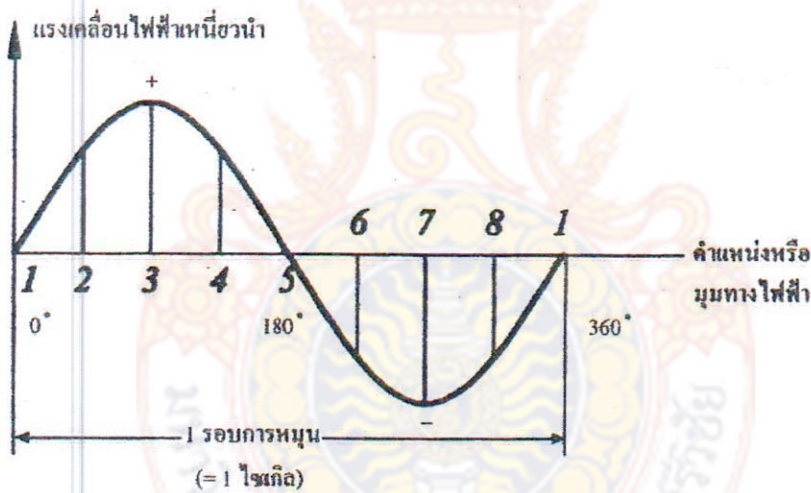
2.3 ในการพันตัวนำรอบอาร์เมเจอร์นั้นขดลวดแต่ละขดจะมีตัวนำที่พันทับซ้อนกันไปมา ทั้งสองข้างของขดลวด ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่มากล้องขดลวดแต่ละขดในระหว่างที่หมุนไปนั้น จึงไม่อาจให้คำนิยามของการเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ได้ อย่างจะแจ้ง ฉะนั้นเพื่อความสะดวกจึงพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละขดนั้นก็คือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำของขดลวดทั้งสองข้างที่หมุนผ่านสนามแม่เหล็กเท่านั้น ส่วนตัวนำที่อยู่ภายนอกสนามแม่เหล็กจะใช้เป็นเพียงตัวต่อเชื่อม โยงระหว่างด้านทั้งสองของขดลวดตัวนั้นจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นเลย มีหน้าที่เพียงแต่ทำให้ครบวงจรของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่านั้น ตัวนำพวกนี้เรียกว่า “Inactive Conductor” (ตัวนำที่ไม่ใช้งาน) สำหรับพวกตัวนำที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นเรียกว่า “Active Conductor” (ตัวนำที่ใช้งาน) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) ที่เกิดขึ้นจากตัวนำยาว 1 เมตร วิ่งผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (B) เวเบอร์/ตารางเมตร ด้วยความเร็ว v เมตร/วินาที คือ

$$e = B \ell v \quad \text{Volts} \quad (2.32)$$

2.4 หลักการเกิดและทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.24 ตัวนำถูกหมุนเป็นลักษณะวงกลมในสนามแม่เหล็ก



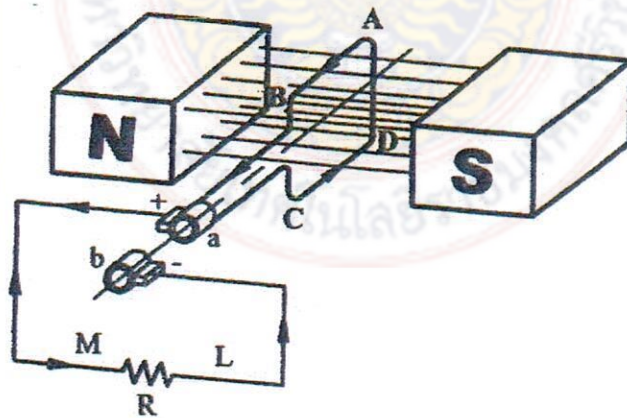
ภาพที่ 2.25 ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ในหนึ่งรอบการหมุน

2.5 ณ ตำแหน่งที่ 1 พิจารณารูปที่ 2.24 เมื่อตัวนำ AB วิ่งตามเข็มนาฬิกาจากตำแหน่ง 1 ไปยัง 3 นั้น ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นจากค่าที่ต่ำสุดหรือศูนย์จนกระทั่งถึงค่าสูงสุด ที่จุด 1 นี้ อัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากับศูนย์ หรือพูดง่ายๆ ว่าตัวนำนั้นวิ่งขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่เกิดการตัดกันระหว่างตัวนำกับเส้นแรงแม่เหล็ก ทั้ง ๆ ที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่มีเส้นแรงมากล้องตัวนำมากที่สุด แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำกลับมีค่าเป็นศูนย์ ($= 0$)

2.6 ณ ตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 2.24 แรงเคลื่อน ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดจะตรงกันข้ามกับตำแหน่ง 1 ทั้งนี้เพราะจุดนี้แม้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กที่มากที่สุดหรือเท่ากับศูนย์แต่กลับมีการตัดของเส้นแรงแม่เหล็กกับตัวนำมากที่สุด นั่นก็คือ มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อน ไฟฟ้าเกิดขึ้นในตัวนำ AB มีค่าสูงสุดดังรูปที่ 2.25

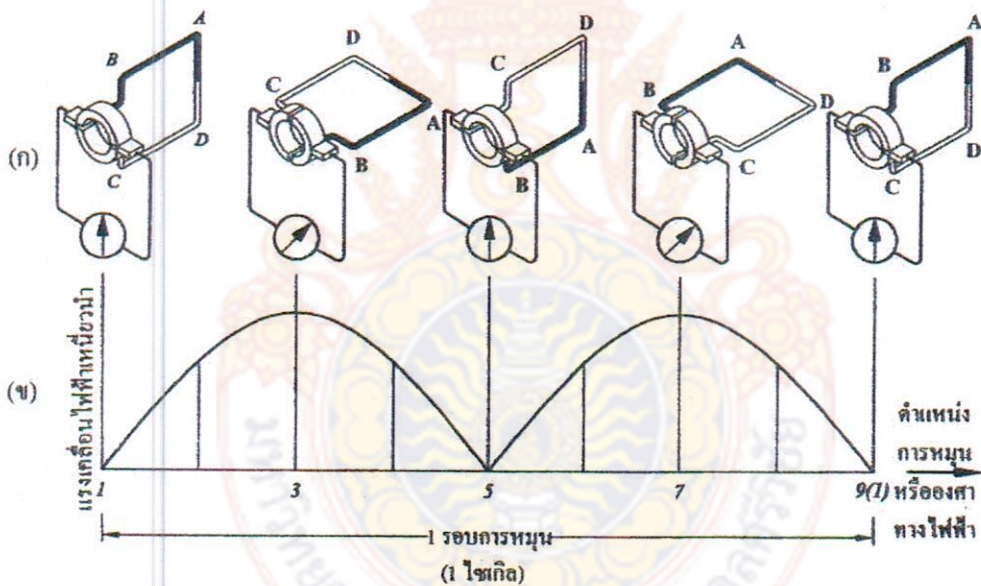
2.7 ณ ตำแหน่งที่ 5 เมื่อตัวนำเคลื่อนที่จาก 3 ผ่าน 4 ไปยัง 5 นั้น ก็ทำให้การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อน ไฟฟ้าค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์เมื่ออยู่ที่ตำแหน่ง 5 จากตำแหน่งที่เริ่มต้นที่ 1 แล้วหมุนตามเข็มนาฬิกาเรื่อยมาจนกระทั่งตัวนำ AB มาอยู่ตำแหน่งสุดท้ายที่ 5 นั้น เกิดแรงเคลื่อน ไฟฟ้าวิ่งจาก A→B แต่เมื่อตัวนำหมุน ไปจาก 5 จนกระทั่งกลับไปตำแหน่งเริ่มต้น 1 ใหม่ นั้น จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อน ไฟฟ้าที่มีหลักการแบบเดียวกับเมื่อเคลื่อนจาก 1 ไปยัง 5 แต่ทว่าทิศทางของแรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัดขึ้นในตัวนำ AB นั้นมีทิศทางตรงกันข้ามคือวิ่งจาก B→A

ฉะนั้น จึงสรุปได้ว่าเมื่อตัวนำ AB หมุนไปครบหนึ่งรอบนั้น ทำให้เกิด การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อน ไฟฟ้าที่เป็นบวกและลบขึ้นในตัวนำ นั่นก็คือ เกิดเป็นแรงเคลื่อนกระแส ไฟสลับแรงเคลื่อน ไฟฟ้าที่ได้ออกมาจากตัวนำ AB นี้ จะเป็นลูกคลื่นไซน์ (Sine Wave) ก็ต่อเมื่อสนามแม่เหล็กที่ตัวนำวิ่งผ่านเป็นสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันทุก ๆ แห่ง (Uniform Magnetic Field) ฉะนั้น ถ้านำเอาปลอกทองเหลือง หรือวงแหวนทองแดง (Slip Ring) หรือวงแหวนลื่นอันหนึ่งมาสวมทับที่ปลายของขดลวด AB (ที่ต่อออกมาภายนอก) โดยให้ปลายขดลวด AB สัมผัสต่อกับภายในปลอกทองเหลือง อยู่ตลอดเวลาจะทำให้ได้กระแสไฟสลับไหลออกมาที่ผิวข้างนอกทองเหลืองนั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 ขดลวดที่ต่อ Slip Ring

2.8 จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตัวนำ AB นั้นก็จะเกิดขึ้นบนตัวนำ CD เช่นเดียวกัน ในทุก ๆ ขณะที่มีการหมุนขดลวดด้วย แต่จะมีทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทางตรงกันข้าม AB นั้นคือเมื่อ AB เริ่มมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นบวก (+) ก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวนำ CD ขึ้นเป็นลบ (-) ในขณะเดียวกันหรือพร้อมกัน ไปเช่นนี้ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ของตัวนำผ่านสนามแม่เหล็กนั้นก็จะได้กระแสไฟสลับออกมาที่ปลอกทองเหลืองทั้งสอง (ดูรูปที่ 2.26) แต่ถ้าต้องการให้ได้กระแสไฟตรงออกมาก็ทำได้โดยใช้ปลอกทองเหลือง 1 วง นำมาผ่าซีกแบ่งเป็น 2 ส่วน แล้วต่อปลายขดลวดให้ตัวนำ AB และ CD แยก ต่อเข้ากับแต่ละซีกวงแหวนผ่าซีก ตามลำดับ ตลอดเวลาที่มีการหมุนของตัวนำทั้งสองดังรูปที่ 2.27 (ก) สำหรับรูปที่ 2.27 (ข) นั้นเป็นรูปคลื่นที่ได้จากตัวนำทั้ง 2 (1 รอบ) ที่ Rectify แล้ว โดยผ่านวงแหวนผ่าซีกหรือคอมมิวเตเตอร์ ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า

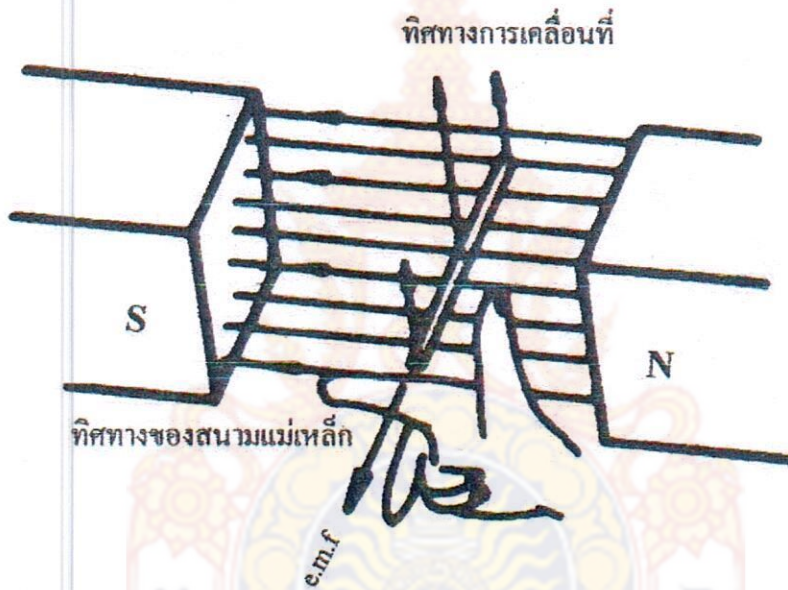


ภาพที่ 2.27 ก) ตัวนำ 1 ขดหมุนผ่านสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ และต่อไปยังซีกวงแหวนผ่าซีก 2 ซีก
ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าตรงที่เป็นห้วง ๆ ซึ่งได้มาจากซีกวงแหวนทั้ง 2 ที่ต่อกับตัวนำ 1 รอบ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำหนึ่ง ๆ นั้นเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับเสมอ ส่วนด้านออก (Output) นั้นจะเป็นกระแสไฟสลับหรือกระแสไฟตรงก็ขึ้นอยู่กับตัวที่นำไฟออกมาจากตัวนำเหล่านั้น นั่นคือขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการไฟสลับหรือไฟตรง ถ้าต้องการไฟสลับก็ให้ใช้สลีปรัง (วงแหวนลื่น) แต่ถ้าต้องการไฟตรงก็ให้ใช้คอมมิวเตเตอร์ (ซี่ทองแดงหลาย ๆ ซี่ที่นำมาต่อกันเป็นรูปวง

แหวนทองแดงทรงกระบอก โดยที่ซี่แต่ละซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีฉนวนเป็นตัวกั้น) มาต่อเข้ากับปลายตัวนำที่ติดกับสนามแม่เหล็กเหล่านั้น

2.9 การหาทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การหาทิศทางแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ หาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง (Fleming's Right Hand Rule) วิธีการหาให้กาง 3 นิ้วตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยให้นิ้วชี้แทนทิศทางสนามแม่เหล็ก (จาก N ไป S) และให้หัวแม่มือชี้ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ ณ ที่แห่งนั้น ๆ ที่ผ่านในสนามแม่เหล็กก็จะได้นิ้วกลางชี้ทิศทางกระแสของกระแสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวนำของตัวนำนั้น (รูปที่ 2.28)

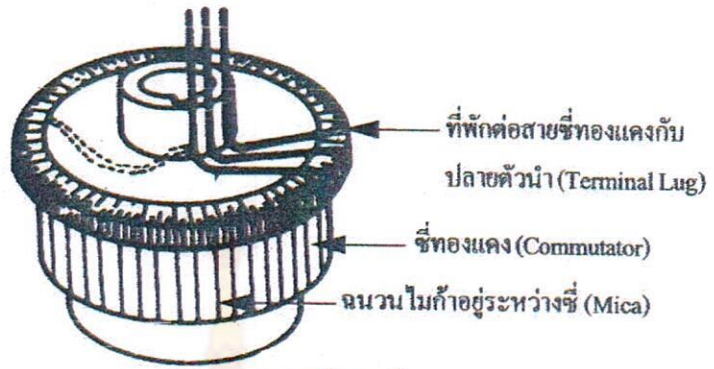


ภาพที่ 2.28 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิงเพื่อหาทิศทางการเคลื่อนที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

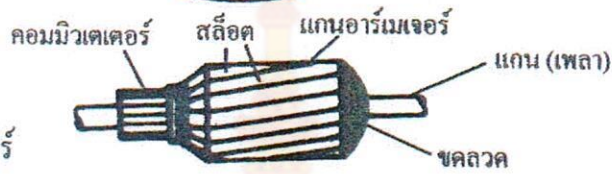
การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอมมิวเตเตอร์

คอมมิวเตเตอร์ เป็นส่วนที่รองรับการต่อปลายสายขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งหมดและมีหน้าที่หลักคือ เปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. = Alternating Current) ที่เกิดขึ้นบนขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. = Direct Current)

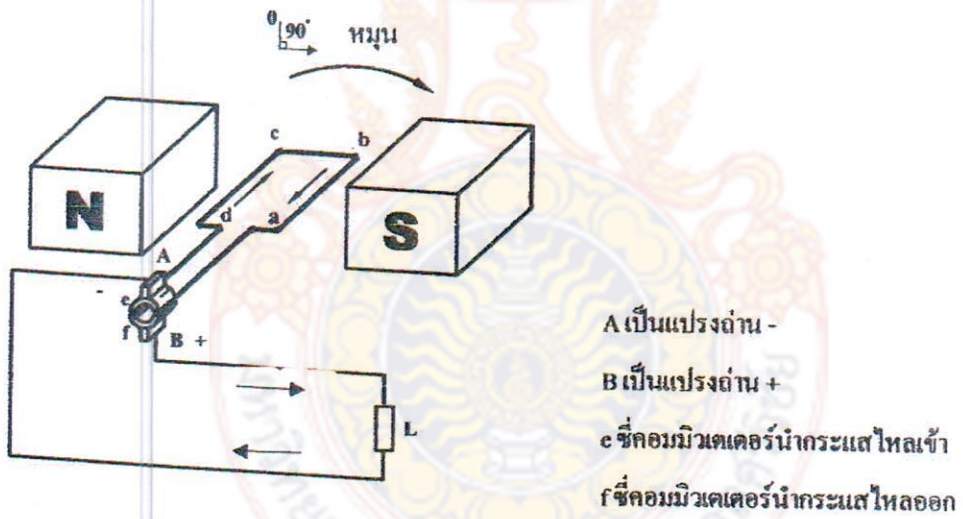
ก) ซีคอมมิวเตเตอร์



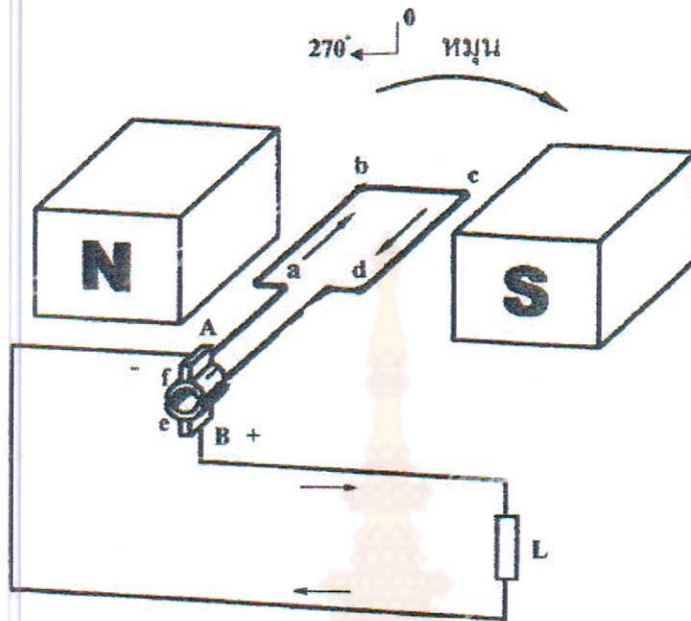
ข) ตัวหุ้มนอร์เมเจอร์
พร้อมซีคอมมิวเตเตอร์



ภาพที่ 2.29 คอมมิวเตเตอร์



ภาพที่ 2.30 พิจารณาคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อตัวนำ ab อยู่หน้าขั้ว S, A = ขั้วลบ (N หรือ L-) B = ขั้วบวก (P หรือ L+)



ภาพที่ 2.31 พิจารณาคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อตัวนำ ab ไปอยู่หน้าขั้ว N จะได้

A เป็นแปรงถ่าน ขั้ว - ตามเดิม

B เป็นแปรงถ่าน ขั้ว +

e ซีลคอมมิวเตเตอร์นำกระแสไหลออก

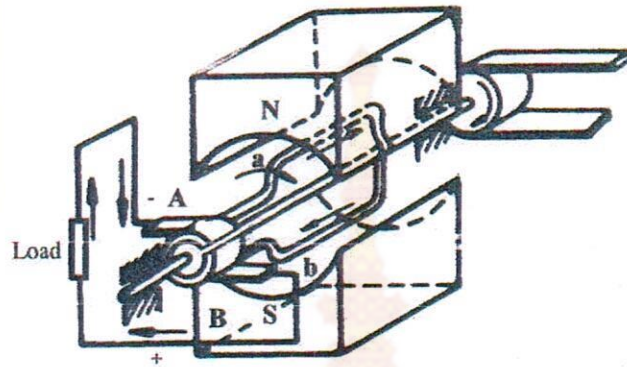
f ซีลคอมมิวเตเตอร์นำกระแสไหลเข้า

2. ทางเดินของกระแสที่ไหลในตัวนำ

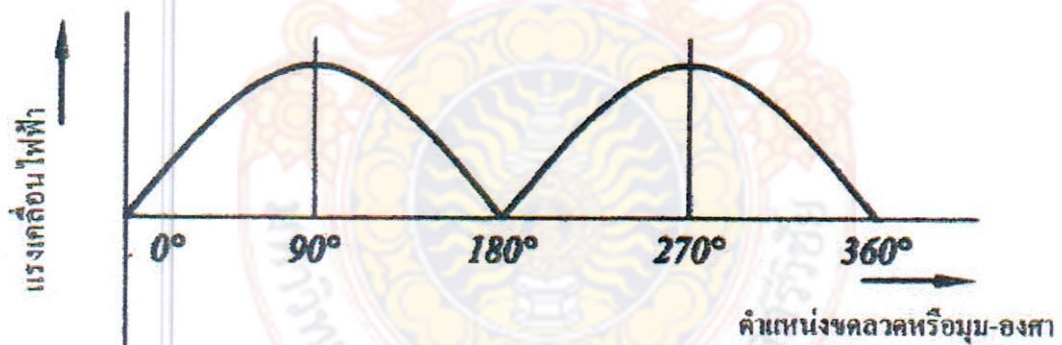
รูปที่ 2.30 ขดลวดในตำแหน่ง 90° กับเส้นแรงแม่เหล็กให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด (Maximum) ไหลจากตัวนำ $d-c$ และ $b-a$ มายังซีลทองแดง f และออกจากแปรงถ่าน B (Brush) (ขั้ว +) ไปจ่ายโหลดไหลย้อนกลับเข้าทางแปรงถ่าน A (ขั้ว -) ไปยังซีลทองแดง e ไปยังตัวนำ

รูปที่ 2.31 ในตำแหน่ง 270° กับเส้นแรงแม่เหล็กขดลวดให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดทางด้านลบ (Minimum) กระแสไหลจาก $a-b-c-d$ มายังซีลทองแดง e และไหลออกไปจ่ายโหลดจากแปรงถ่าน (Brush) (ขั้ว -) กลับเข้าไปยังขดลวดทางแปรงถ่าน A ไปยัง a ดังนั้น จะเห็นได้ว่าคอมมิวเตเตอร์ควบคุมให้กระแสในขดลวดไหลทางเดียว คือออกจากขั้วบวก (B เป็นแปรงถ่านบวก) ไปจ่ายโหลดและกลับไปยังขดลวดทางขั้วลบ (A เป็นแปรงถ่านลบ) จึงกล่าวได้

ว่า “คอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง”



กระแสไหลออกจากขั้วบวกไปจ่ายโหลดและไหลกลับเข้าขดลวดทางขั้วลบ



คลื่นไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ภาพที่ 2.32 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต้องต่อปลายสายของขดลวดอาร์เมเจอร์เข้ากับซี่ทองแดงของคอมมิวเตเตอร์

2.4 การออกแบบ

2.4.1 แรงกระทำบนวัตถุเนื่องจากของไหล

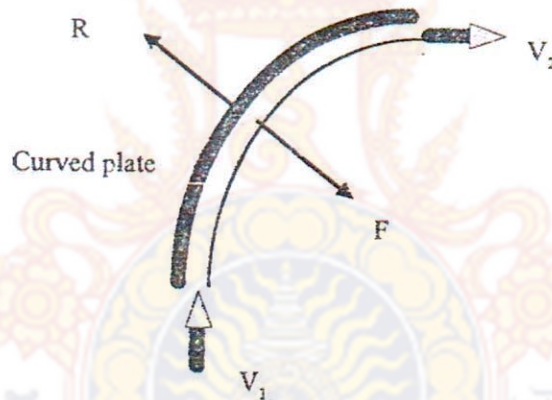
จากหลักการของการกระทบและโมเมนตัม

$$Fdt = d(mV) \quad (2.33)$$

ในกรณีของการไหลแบบคงที่ของของไหล ในปริมาตรควบคุมของท่อกระแส (Stream tube) สามารถอินทิเกรตสมการ (2.33) และเขียนใหม่เป็น

$$F = \rho Q (V_2 - V_1) \quad (2.34)$$

เมื่อ ไม่คิดแรงเสียดทานและน้ำหนักของของไหล และกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่

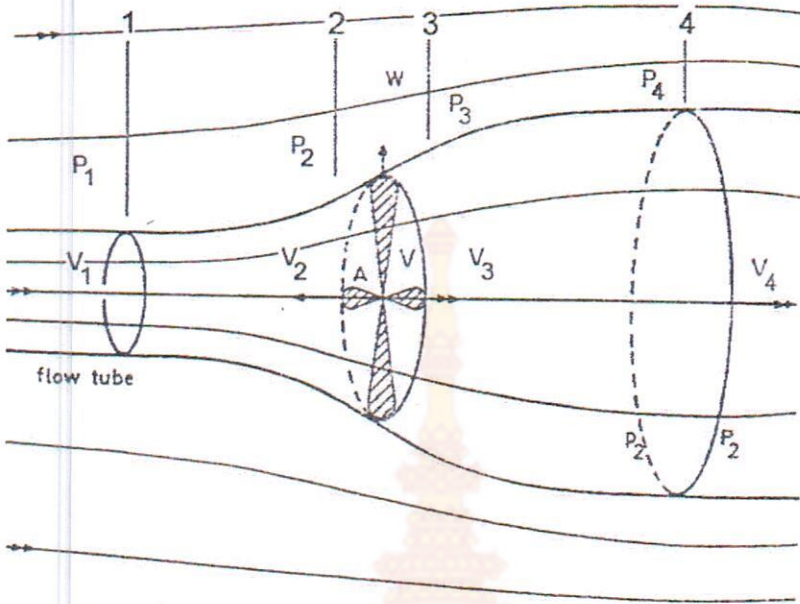


ภาพที่ 2.33 หลักการของ โมเมนตัม

2.4.2 ทฤษฎีโมเมนตัมสำหรับกั้นหลวม

พิจารณาอากาศที่ไหลผ่านกั้นหลวม โดยใช้สมมุติฐานว่า อากาศเป็นของไหลที่ไม่ยุบตัว (Incompressible fluid) และ ไม่มีแรงเสียดทาน

- อากาศก่อนเข้ากั้นที่ตำแหน่ง 1 มีความเร็ว V_1 และความดัน P_1
- เมื่อเข้าใกล้กั้นที่ตำแหน่ง 2 ความเร็วลดลงเป็น V_2 และความดันเพิ่มขึ้นเป็น P_2
- และไหลผ่านตัวกั้นด้วยความเร็ว V
- หลังจากนั้น เขตแดน (Boundary) ของกระแสอากาศจะขยายตัวจนมีความดันเป็น P_4 เท่ากับความดันบรรยากาศ (P_1) ที่ตำแหน่ง 4 โดยมีความเร็วเป็น V_4



ภาพที่ 2.34 แบบของการไหลของลมผ่านก้งหัน

ดังนั้นมวลอากาศที่ไหลผ่านก้งหัน

$$m = \rho AV \quad (2.335)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ

A เป็นพื้นที่กวางของใบพัด

V เป็นความเร็วลมที่ผ่านก้งหัน

จากทฤษฎีโมเมนตัม แรงกระทำบนใบพัดหาได้จาก

$$F = \rho AV (V_1 - V_4) \quad (2.36)$$

เมื่อพิจารณาในเขต 2.35 จะได้ว่า

$$F = A (P_2 - P_3) \quad (2.37)$$

จากสมการ เบริร์นูลลี

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.38)$$

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho V^3 = P_4 + \frac{1}{2} \rho V_4^2 \quad (2.39)$$

จากสมการ (2.38) และ (2.39) ได้

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (2.40)$$

จากสมการ (2.36) และ (2.37) ได้

$$P_2 - P_3 = \rho V (V_1 - V_4) \quad (2.41)$$

ดังนั้นสรุปจากสมการ (2.40) และ (2.41) ได้ว่า

$$V = \frac{1}{2} (V_1 - V_4) \quad (2.42)$$

จะพบว่าความเร็วลมที่ผ่านกังหันนั้น มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของความเร็วลม ก่อนและหลังผ่านตัวกังหัน

เนื่องจากกำลัง, $P = FV$

แทนค่าจากสมการ (2.36) และ (2.42) จะได้

$$P = \frac{1}{2} \rho AV (V_1^2 - V_4^2) \quad (2.43)$$

กำลังของกระแสลมที่อยู่ในรูปพลังงานจลน์ มีค่า

$$P_{\text{air}} = \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \quad (2.44)$$

จากสมการ (2.43) และ (2.44) จะเห็นได้ว่า กำลังที่กังหันลมรับจากกระแสลมมีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดที่กระแสลมมีอยู่

เบทซ์ (Betz) ได้วิเคราะห์ว่า ความเร็วลมหลังจากที่ผ่านกังหันลมซึ่งมีค่าได้ตั้งแต่ $0 - V_1$ ในทางทฤษฎี แต่จะมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยให้กำลังขาออกของกังหันมากที่สุด เมื่อ

$$V_4 = \frac{1}{3} V_1$$

นั่นคือ จากสมการ (2.43)

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \rho A \left(V_1 + \frac{1}{2} V_1 \right) [V_1^2 - (3 V_1^2)] \\
 &= \frac{8}{27} \rho A V_1^3
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

อัตราส่วนระหว่างกำลังที่นำมาใช้งานได้ต่อกำลังทั้งหมดของลม เรียกว่า “สัมประสิทธิ์กำลัง” (power coefficient), C_p

$$\frac{P}{P_{\text{air}}} = C_p$$

จากสมการ (2.12) และ (2.13)

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0.593
 \tag{2.46}$$

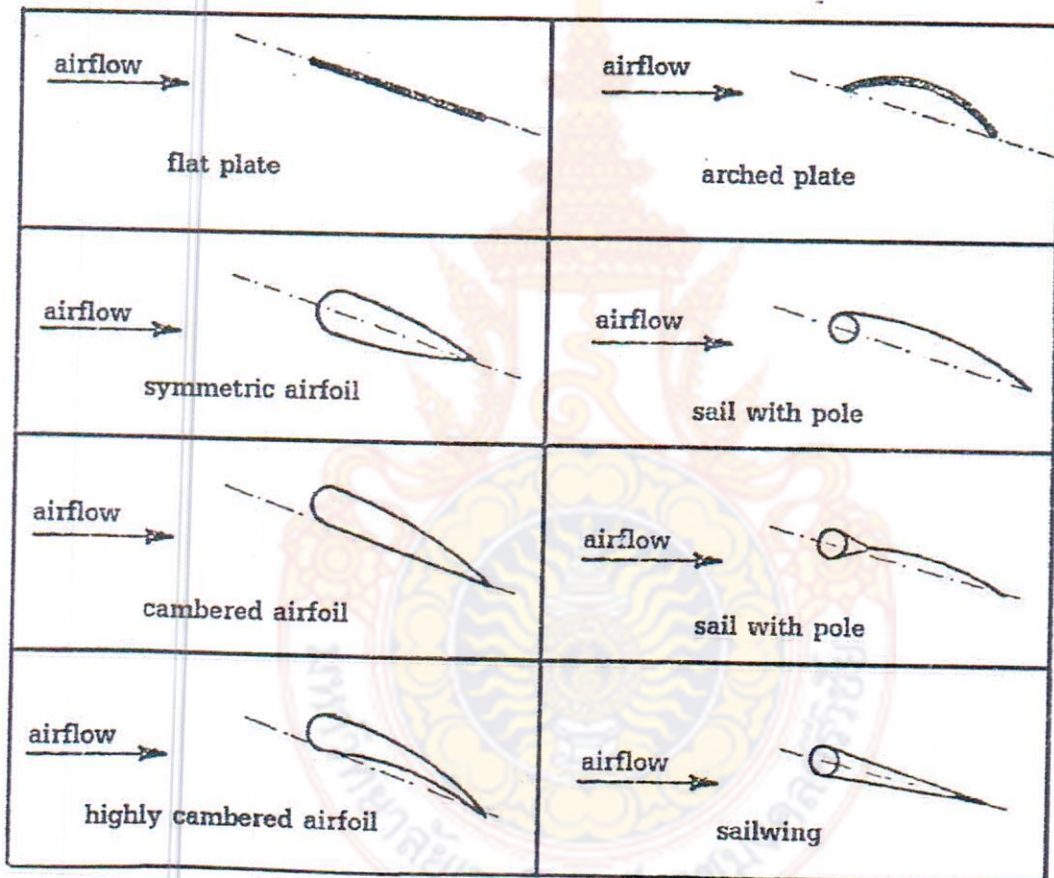
ค่านี้เป็นค่าสูงสุดทางทฤษฎี เรียกว่า “Betz coefficient” ได้จากข้อสมมุติฐานว่า กังหันลม มีลักษณะดังนี้ คือ

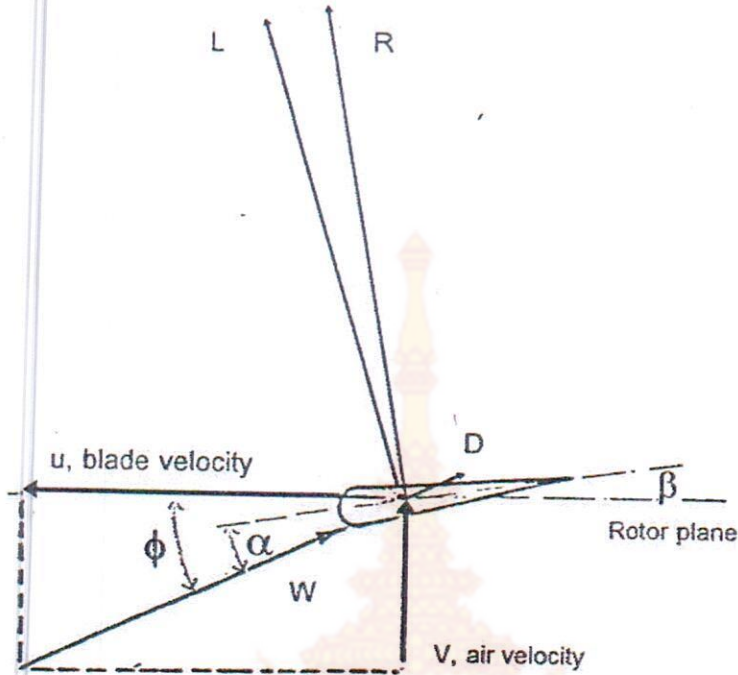
- มีค่าอัตราเร็วปลายใบสูง (High tip-speed ratio)
- มี จำนวนใบพัดเป็นอนันต์
- มี แรงดูดบนใบพัดเป็นศูนย์

2.4.3 แพนอากาศ (Airfoil)

ตัวก้านของกังหันลมประกอบขึ้นด้วย คุมล้อ (hub) และใบพัด (blades) ติดตั้งเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ อาจจะมีจำนวนใบพัดตั้งแต่ 1 ใบพัดขึ้นไปถึงหลายสิบใบก็ได้ตามความเหมาะสม ใบพัดเหล่านี้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ตั้งแต่แบบที่ง่ายที่สุดคือเป็นแผ่นแบนๆ จนกระทั่งแบบโค้งนูนหรือเว้าก็มี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แพนอากาศแบบต่างๆ





ภาพที่ 2.36 ลักษณะการทำงานของแพนอากาศ

เมื่ออากาศไหลผ่านพื้นผิวของแพนอากาศ จะทำให้เกิดแรงกระทำต่างๆ เกิดขึ้นบนแพนอากาศเนื่องจากการกระจายของความดันที่มีค่าต่างกัน และผลของแรงเสียดทาน ซึ่งนิยมนรวมเป็นแรงประกอบหลัก 2 ส่วน คือ แรงยก (lift force) มีทิศทางตั้งฉากกับกระแสอากาศ และแรงฉุด (drag force) มีทิศทางตามกระแสอากาศ ภาพข้างล่างแสดงถึงแนวกระแส (stream lines) ของอากาศเมื่อไหลผ่านแผ่นโลหะแบน เปรียบเทียบกับการไหลผ่านแพนอากาศ การนำรูปทรงแพนอากาศมาใช้จะมีผลทำให้สามารถลดแรงฉุดให้ต่ำลงได้

แพนอากาศมักติดตั้งให้มีลักษณะทำมุมเอียงรับกระแสอากาศ เพื่อทำให้เกิดแรงยก ยิ่งเอียงเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงยกมากขึ้น แต่ขณะเดียวกันจะทำให้เกิดแรงฉุดซึ่งเป็นแรงที่ไม่ต้องการเพิ่มมากขึ้นด้วย ค่าของมุมเอียงนี้เรียกว่า มุมปะทะ (Attack angle) ซึ่งเป็นมุมที่วัดระหว่าง เส้นคอร์ด (chord line) กับทิศทางกระแสอากาศ

2.4.4 สมรรถนะของแพนอากาศ

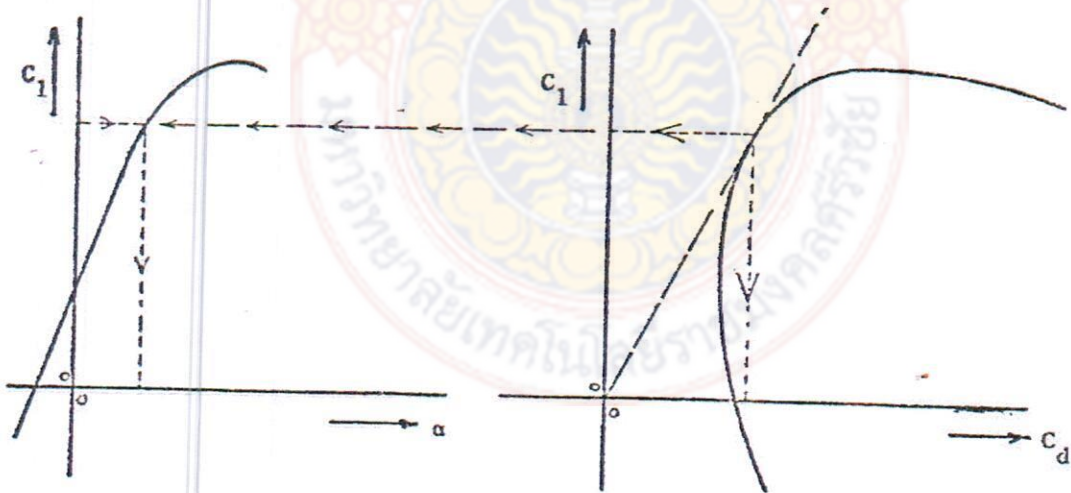
นิยมเขียนอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ 2 ตัว คือ สัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงฉุด (drag coefficient) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.48)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.49)$$

- เมื่อ C_L เป็นสัมประสิทธิ์แรงยก
 C_D เป็นสัมประสิทธิ์แรงจุด
 L เป็นแรงยก
 D เป็นแรงจุด
 ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ
 V เป็นความเร็วของกระแสลม
 A เป็นพื้นที่ของใบพัด

แรงยกและแรงจุดขึ้นกับรูปทรงของแพนอากาศและมุมปะทะ ทำให้แพนอากาศแต่ละแบบมีสมรรถนะแตกต่างกันออกไป ซึ่งนิยมแสดงสมรรถนะของแพนอากาศชนิดต่างๆ ด้วยรูปกราฟ 2 รูปคือ กราฟ $C_L - \alpha$ และกราฟ $C_L - C_D$ ดังภาพตัวอย่างข้างล่าง



ภาพที่ 2.37 สมรรถนะทั่วไปของแพนอากาศ

แพนอากาศนั้นมีรูปทรงหลายแบบด้วยกัน เช่น Clark-Y , NACA Series , Schmitz และ Wortmann Stuttgart เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ อนุกรม NACA หมายเลขต่าง ๆ

เนื่องจากมีมาตรฐาน และรายละเอียดผลการทดสอบสมรรถนะอย่างพร้อมมูล รวมทั้งมีรูปทรง ตั้งแต่แบบธรรมดาจนถึงรูปทรงที่ซับซ้อนมาก ๆ

การเลือกแพนอากาศสำหรับใช้ในการออกแบบกังหันลม นั้นควรเลือกค่าออกแบบที่ C_L และ α ที่ทำให้ได้อัตราส่วน C_D / C_L ต่ำสุด จึงจะได้กำลังงานสูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับแพนอากาศแบบนั้น ๆ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงเลขเรโนลด์ (Re, Renold number) ที่เหมาะสมด้วย

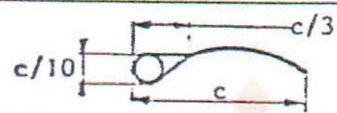


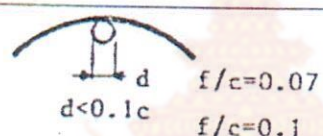

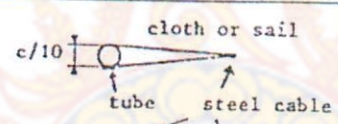
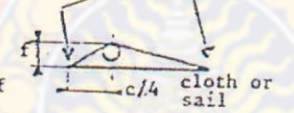
2.4.5 วิธีหาอัตราส่วนแรงจุด/แรงยกต่ำสุด

พิจารณาภาพที่ 2.37 ซึ่งเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะของแพนอากาศแบบหนึ่ง ขั้นตอนวิธีการทำได้ดังต่อไปนี้คือ

- ในภาพ (ข) ลากเส้นจาก 0, 0 ไปสัมผัสเส้นกราฟ ที่จุดสัมผัสนี้ อ่านค่า C_D และ C_L
- ในภาพ (ก) ใช้ค่า C_L ที่ได้จากภาพ (ข) หาค่ามุมปะทะได้ ซึ่งค่ามุมปะทะนี้จะทำให้เกิดค่า C_D / C_L ต่ำสุดสำหรับแพนอากาศแบบนี้ ค่าที่ได้นี้เรียกว่า “ค่าออกแบบ” นั่นคือ
- C_L เรียกว่า สัมประสิทธิ์แรงยกออกแบบ (C_L -design)
- α เรียกว่า มุมปะทะออกแบบ (α - design)



ตารางที่ 2.3 แสดงค่าออกแบบของแพนอากาศแบบต่าง ๆ

| ชื่อของแพนอากาศ | รายละเอียดทางเรขาคณิต | $(C_D/C_L)_{min}$ | α | C_L |
|--|---|-------------------|----------|-------|
| sail and pole |  | 0.1 | 5 | 0.8 |
| flat steel plate |  | 0.1 | 4 | 0.4 |
| arched steel plate |  | 0.02 | 4 | 0.9 |
| | | 0.02 | 3 | 1.25 |
| arched steel plate with tube on concave side |  | 0.05 | 5 | 0.9 |
| | | 0.05 | 4 | 1.1 |
| arched steel plate with tube on convex side |  | 0.2 | 14 | 1.25 |
| sail wing |  | 0.05 | 2 | 1.0 |
| sail trouser |  | 0.1 | 4 | 1.0 |

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าออกแบบของแพนอากาศแบบต่าง ๆ ตั้งแต่แบบง่าย ๆ เช่น แผ่นโลหะจนถึงแบบที่ซับซ้อน แบบ NACA อนุกรมเลข 5 ตัว เช่น NACA 23015 เป็นต้น

ข้อสังเกต ผลของอากาศที่กระทำต่อแพนอากาศ จะเหมือนกันทั้งกรณีอากาศไหลผ่านแพนอากาศ หรือแพนอากาศเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นแรงที่เกิดขึ้น

2.4.6 บนใบพัดกังหันลม

ดังได้กล่าวแล้วว่า มีแรงกระทำต่าง ๆ เกิดขึ้นบนแพนอากาศเมื่อปะทะกับกระแสอากาศ และใบพัดของกังหันลมก็เป็นแพนอากาศที่มีลักษณะเฉพาะแบบหนึ่ง เมื่อปะทะกับลมหรือกระแสอากาศ ย่อมเกิดแรงกระทำต่าง ๆ ขึ้นเช่นกัน เนื่องจากใบพัดขณะทำงานหรือกำลังหมุนอยู่ย่อมมีความเร็วค่าหนึ่ง ขณะเดียวกันลมที่พัดผ่านกังหันลมก็มีความเร็ว จึงต้องพิจารณาผลของความเร็วสัมพัทธ์เป็นหลัก ดังภาพที่ 2.36

- ในที่นี้ V เป็นความเร็วลมสัมบูรณ์
 W เป็นความเร็วลมสัมพัทธ์
 U เป็นความเร็วของใบพัดสัมบูรณ์ = $r\omega$
 α เป็นค่ามุมปะทะ (α - design)
 β เป็นค่ามุมใบพัด (blade angle)

แรงที่เป็นองค์ประกอบหลัก ที่เกิดขึ้นบนใบพัดคือ

- L เป็นแรงยก มีทิศทางตั้งฉากกับ W
 D เป็นแรงจุด มีทิศทางเดียวกับ W
 R เป็นแรงลัพท์ที่เกิดขึ้น

จากผลของแรงลัพท์นี้ สามารถแตกเวกเตอร์ของแรงออกไปในทิศทางใหม่ เพื่อความสะดวกในการคำนวณของกังหันลมได้ 2 แรง คือ แรงในแนวแกน และแรงในแนวสัมผัสซึ่ง

- แรงในแนวแกน, F_A เป็นแรงที่กระทำต่อศูนย์กลางปืนของเพลลา และส่งต่อไปยังหอคอย
- แรงในแนวสัมผัส, F_T เป็นแรงที่ทำให้ใบพัดเกิดการหมุน ให้พลังงานกลออกมาที่เพลลา

$$F_A = \frac{1}{2} C_A \rho V^2 A \quad (2.50)$$

$$F_T = \frac{1}{2} C_M \rho V^2 A \quad (2.51)$$

- เมื่อ C_A เป็นสัมประสิทธิ์แรงในแนวแกน
 C_M เป็นสัมประสิทธิ์แรงบิด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบกังหันลมที่เหมาะสม จำเป็นต้องทราบข้อมูลความเร็วลมของสถานที่ติดตั้ง ที่ละเอียดพอสมควร จึงจะได้ประสิทธิผลสูงสุดคุ้มค่าตอบแทนต่อการลงทุน โดยเฉพาะสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลตลอดปี ด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลม แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาเปลี่ยนให้ในรูปที่เหมาะสม ที่นิยมเรียกว่ากราฟวาระ เพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป ปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มเก็บข้อมูลที่ใช้ในทางพลังงานลมบ้างแล้ว และอาจจะใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ที่ตรวจวัดหรือประมาณการ โดยสถานีตรวจอากาศ ของกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นแนวทางได้บ้างเนื่องจากเป็นข้อมูลแบบหยาดๆ หรือจากผลการวิเคราะห์เทียบเท่าข้อมูลของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ส่วนกรณีของกังหันลมสูบน้ำซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเล็ก และการลงทุนไม่สูงมากนักไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ละเอียดก็ได้

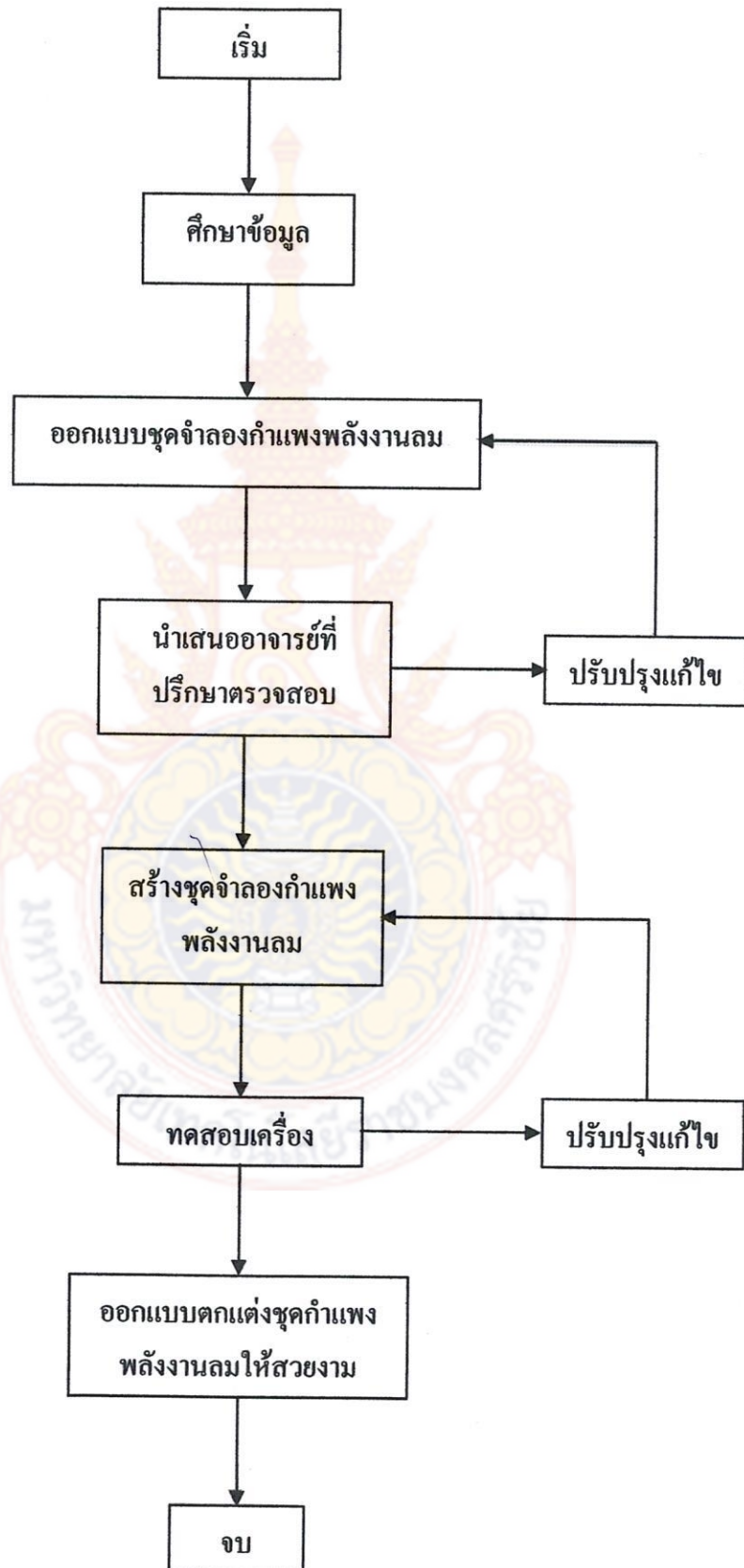
การศึกษาปัญหาโครงการเรื่องชุดจำลองกำแพงพลังงานลมผู้เสนอโครงการได้ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และได้แบ่งลำดับขั้นตอนการดำเนินโครงการดังต่อไปนี้

- 3.1 ขั้นตอนการวางแผนและการเตรียมการ
- 3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณ
- 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการสร้าง
- 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการวางแผนและเตรียมการ

- 3.1.1 ศึกษาข้อมูลลมในพื้นที่ริมทะเลสงขลา เพื่อหาข้อมูลความเร็วลมที่จะนำมาใช้งานได้
- 3.1.2 ศึกษาข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อหาขนาดของการผลิตไฟฟ้าที่สามารถใช้กับความเร็วมที่ศึกษาได้
- 3.1.3 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างชุดจำลองกำแพงพลังงานลมได้อย่างเหมาะสม
- 3.1.4 ศึกษาวิธีการดำเนินโครงการตลอดจนวิธีการเก็บข้อมูล จึงได้เตรียมแผนงานตามขั้นตอนดังนี้

Flow Chart



3.2 ขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณ

การออกแบบชุดจำลองกำแพงพลังงานลมจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ

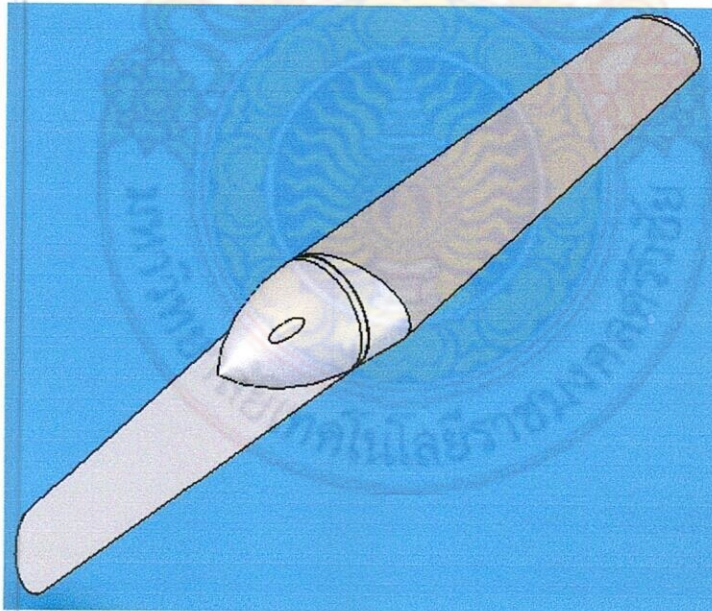
1. แบบแกนแนวนอน
2. แบบแกนแนวตั้ง

3.2.1 แบบแนวแกนนอน

ในการออกแบบชุดจำลองกำแพงพลังงานลมจะทำการออกแบบเพื่อให้อุปกรณ์สามารถถอดประกอบได้ง่าย โดยการกำหนดชุดจำลองกำแพงพลังงานลมให้มีความกว้างและความสูงขนาด 1 เมตร โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน แต่ละส่วนจะมีความกว้าง 50 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร จำนวน 4 เซลล์ รวมเป็น 1 โมดูล

การออกแบบใบพัด

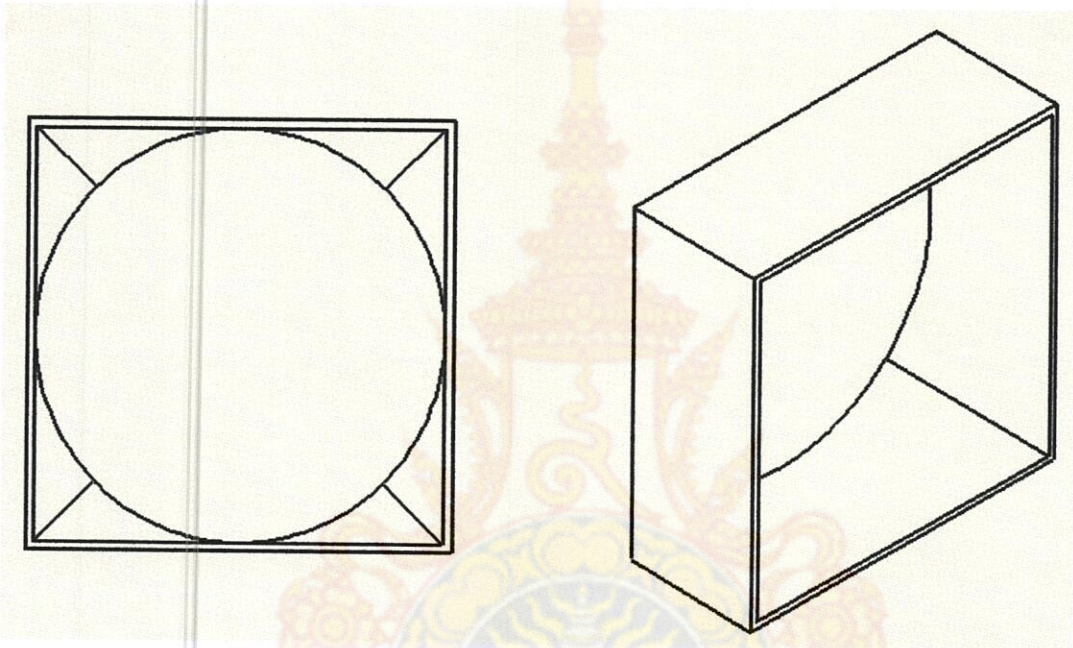
ในการออกแบบใบพัดจะเลือกใช้ใบพัดแบบ 2 ใบจากมีข้อดีคือ จะมีความเร็วรอบสูงเมื่อเทียบกับใบพัดชนิดที่มากกว่า 2 ใบแต่จะมีข้อเสียคือ ในการสตาร์ทออกตัวจะต้องใช้ความเร็วลมที่สูงกว่า



ภาพที่ 3.1 ลักษณะของใบพัดที่ออกแบบ

การออกแบบอุโมงค์ลม

เนื่องจากกึ่งหันลมแบบแนวอนเมื่อหมุนจะเป็นวงกลม จึงมีลมสูญเสียออกไปที่มุมของแต่ละเซลล์ จึงทำให้เป็นอุโมงค์ลมซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียลมน้อยที่สุด โดยลักษณะของอุโมงค์ลมจะมีขนาดเท่ากับ $50 \times 50 \times 20$ เซนติเมตร มีความหนาของขอบแต่ละด้านเท่ากับ 1 เซนติเมตร และขนาดของวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 47 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.2 ลักษณะอุโมงค์ลม

การคำนวณอุโมงค์ลม

$$\text{สูตร } A_1 V_1 = A_2 V_2$$

กำหนดให้

A_1 = พื้นที่หน้าตัดทางลมเข้า

A_2 = พื้นที่หน้าตัดทางลมออก

V_1 = ความเร็วลมทางเข้ากำหนดไว้ 4 m/s

V_2 = หาความเร็วลมทางออก

เพราะฉะนั้น หาความเร็วลมที่ทางออกจะเท่ากับ

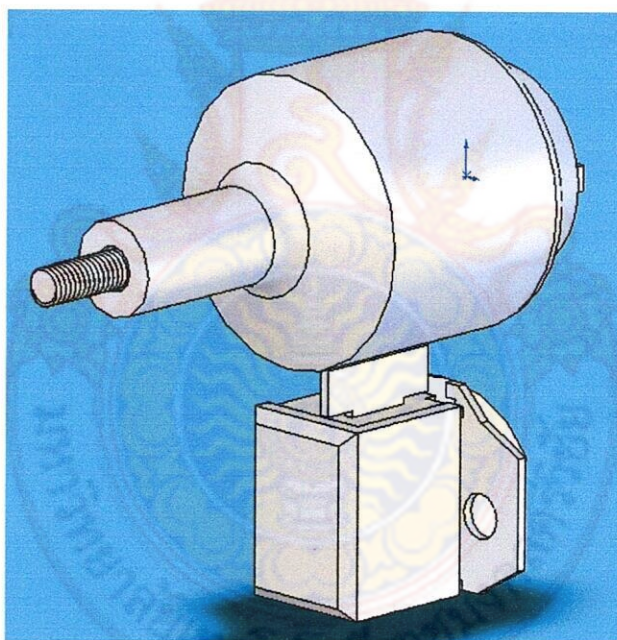
$$V_2 = \frac{A_1 V_1}{A_2}$$

$$V_2 = \frac{48 \times 48 \times 4}{\frac{9 \times 47 \times 47}{4}}$$

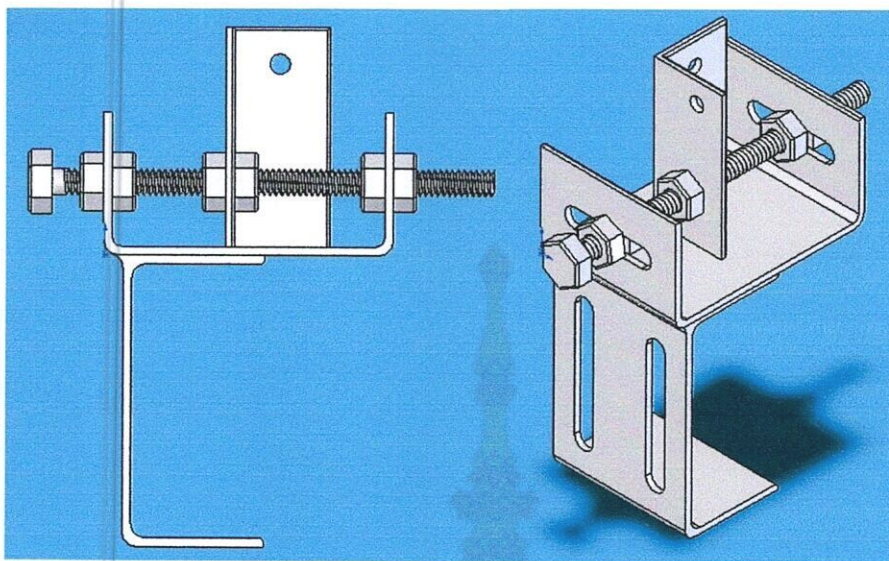
$$V_2 = 5.31 \text{ m/s}$$

การออกแบบที่ยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการออกแบบที่ยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ซ้าย ขวา หน้า หลัง ขึ้น และลงได้



ภาพที่ 3.3 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่หาได้ตามท้องตลาด

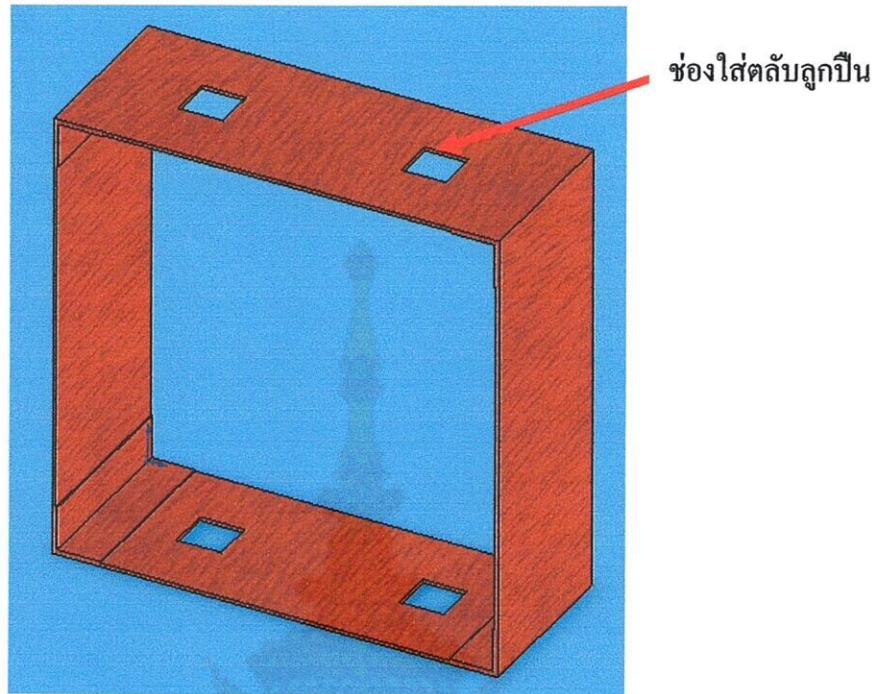


ภาพที่ 3.4 ที่จับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.2 แบบแกนแนวตั้ง

การออกแบบโครงของก้านแบบแกนตั้ง

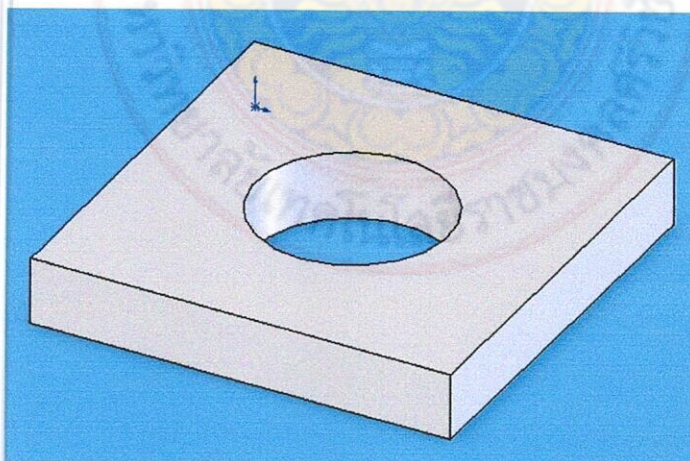
การออกแบบโครงของก้านแนวแกนตั้งซึ่งนำไปใช้ในกำแพงโดยการออกแบบ จะสร้างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีความหนา 20 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร จะใช้ทั้งหมด 4 กล่อง หรือ 4 เซลล์ รวมเป็น 1 ช่องกำแพง ใน 1 เซลล์จะใช้ไปกับก้าน 2 ตัว โดยใช้ไม้กระดานหนา 4 มิลลิเมตร ตัดทำเป็นกล่องสี่เหลี่ยมยึดด้วยเหล็กฉากขนาด 1.5×1.5 ยาว 20 เซนติเมตร แล้วเคลือบโดยการทาเรซิน



ภาพที่ 3.5 ลักษณะ โครงของก้านแบบแกนตั้ง

การออกแบบตลับลูกปืน

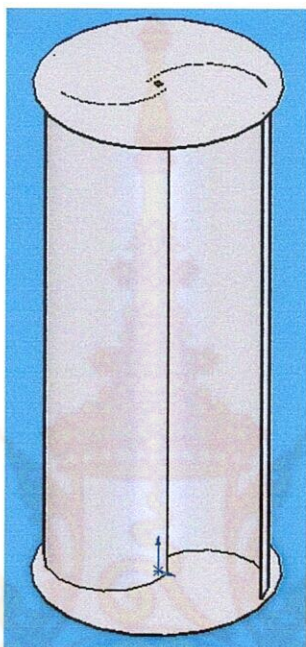
ตลับลูกปืนจะมีขนาดเท่ากับ 5×5 เซนติเมตรและเจาะรูตรงกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของตลับลูกปืน

การออกแบบใบกังหันแบบแนวตั้ง

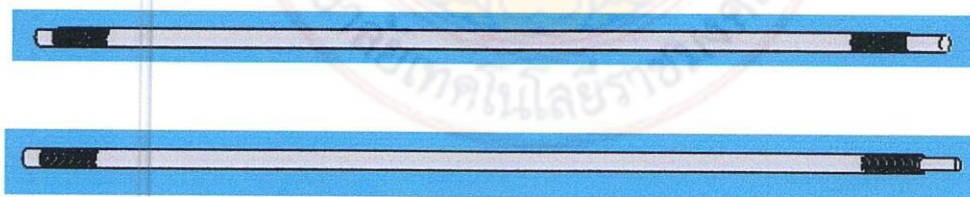
การออกแบบใบกังหันแบบแนวตั้ง โดยใช้สเตนเลสตัดเป็นรูปครึ่งวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร โดยมีความสูง 45 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.7 ลักษณะของใบกังหันแบบแกนแนวตั้ง

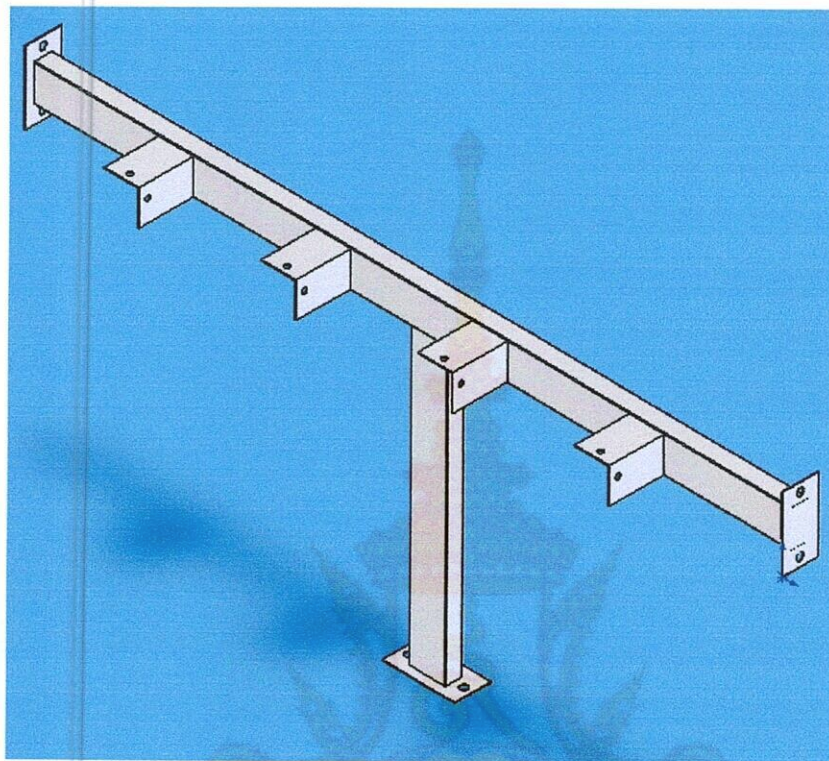
การออกแบบเพลลาของกังหันแบบแนวตั้ง

ลักษณะของเพลลาจะมี 2 แบบ



ภาพที่ 3.8 ลักษณะของเพลลาของกังหันแบบแนวตั้ง

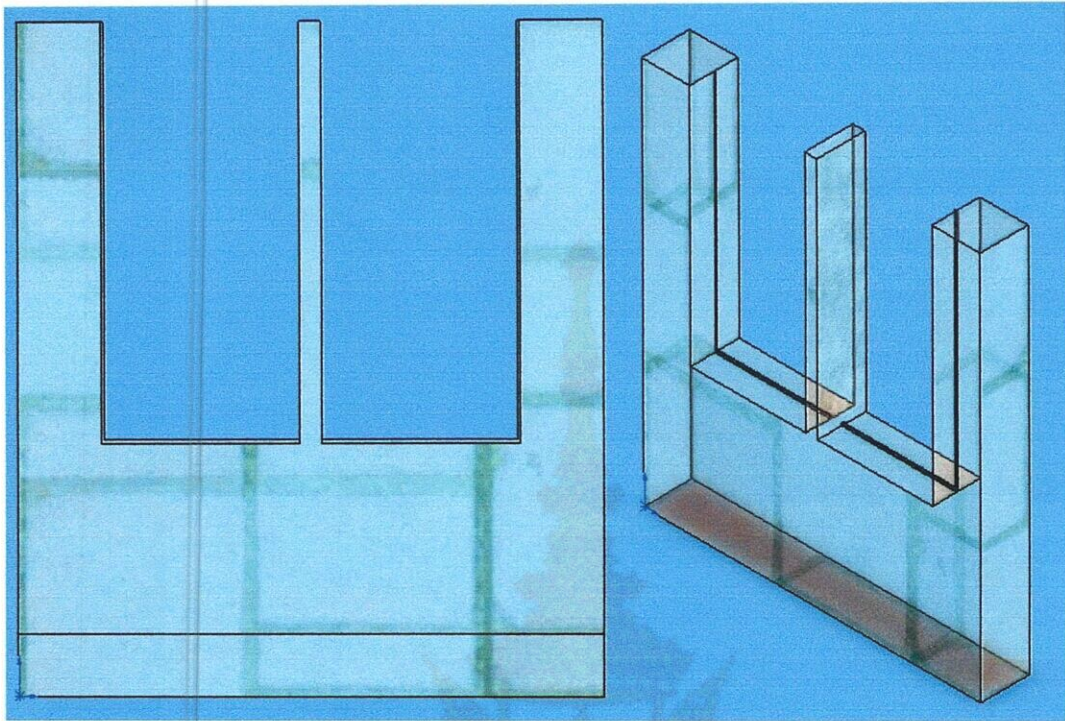
การออกแบบฐานยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 3.9 ลักษณะของฐานยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การออกแบบกำแพง

การออกแบบกำแพงจะออกแบบให้มีความกว้างที่เป็นช่องว่างขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร มี 2 ช่องเพื่อใส่โครงของใบพัดและก้านตามทีออกแบบไว้



ภาพที่ 3.10 ลักษณะของแบบกำแพง

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการสร้าง

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากแบบร่างที่กำหนดขึ้นและผู้เชี่ยวชาญ และได้ดำเนินการสร้างตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1 จัดทำโครงสร้างดำเนินการสร้างตามแบบ



ภาพที่ 3.11 กำแพงและอุโมงค์ลม



ภาพที่ 3.12 ไขควงแบนแกนนอน

3.3.2 ประกอบชุดจำลองกำแพงพลังงานลมในแกนแนวนอน



ภาพที่ 3.13 กำแพงและอุโมงค์ลมที่ประกอบแล้ว



ภาพที่ 3.14 ชุดจำลองกำแพงพลังงานลม

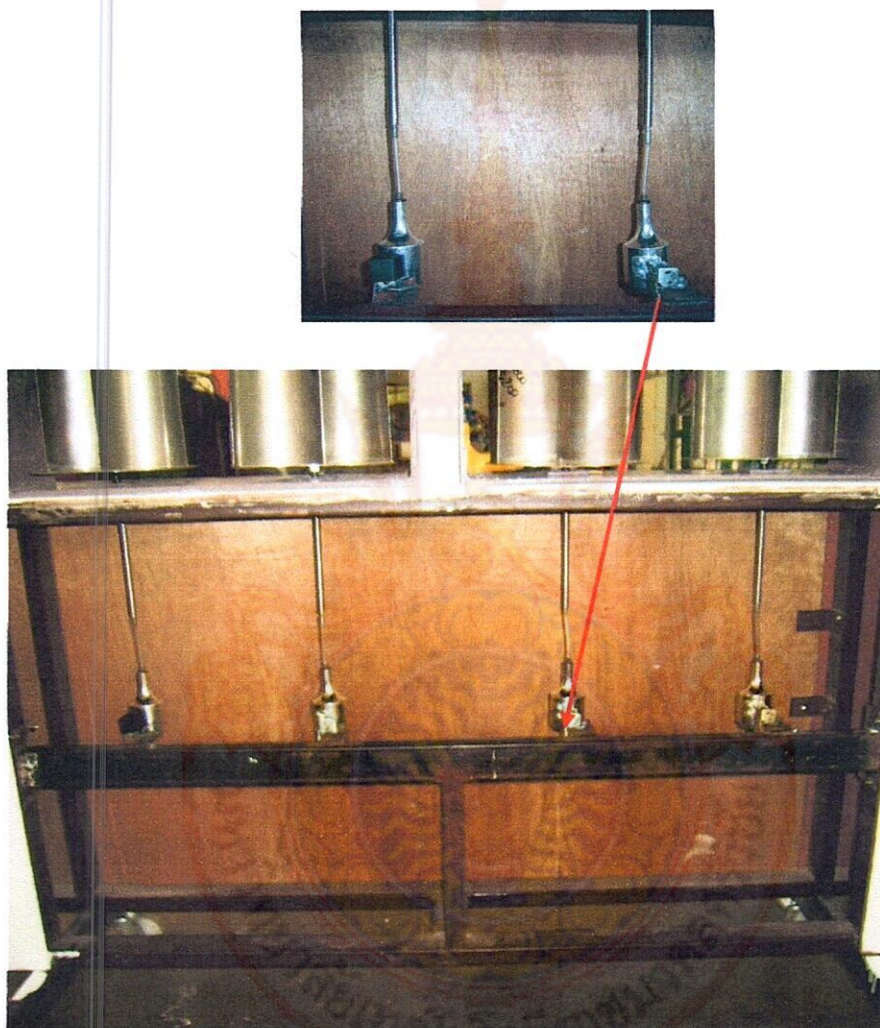
3.3.3 ประกอบชุดจำลองกำแพงพลังงานลมในแกนแนวตั้ง



ภาพที่ 3.15 การประกอบกังหันแกนแนวตั้ง



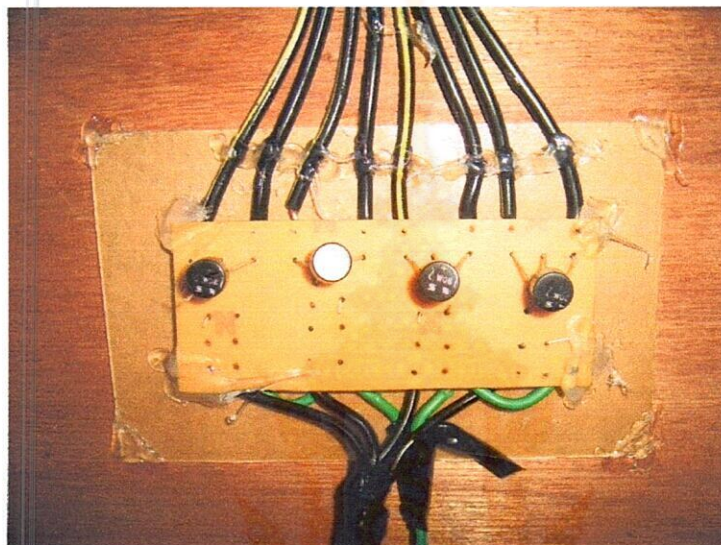
ภาพที่ 3.16 การประกอบกังหันแกนแนวตั้งเข้ากับกำแพง



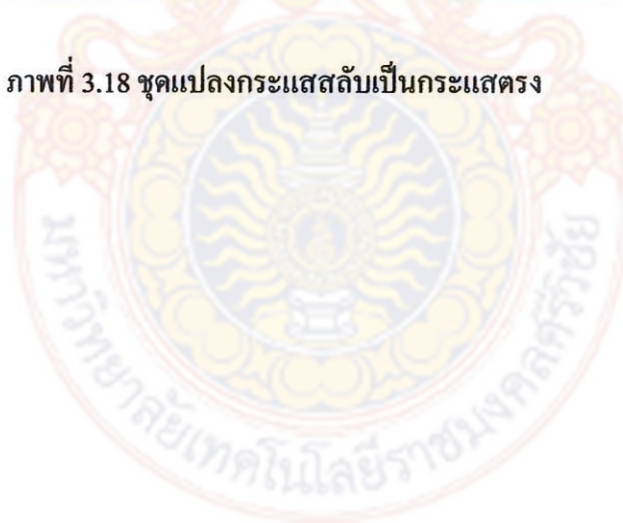
ภาพที่ 3.17 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.3.4 ชุดแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง

ชุดแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงซึ่งใช้แปลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตออกมาโดยประกอบด้วย ไดโอดแบบบริดจ์ 1 ตัว ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัว และใช้ถ่านในการเก็บประจุ



ภาพที่ 3.18 ชุดแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง



3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองการใช้งานของชุดจำลองกำแพงพลังงานลมนั้น ควรทดลองทั้งทางด้านสมรรถนะและเก็บข้อมูลด้านอื่นๆ ด้วยเช่น ปัญหาการซ่อมแซม การบำรุงรักษา อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น และควรมีการเก็บข้อมูลตลอดปี เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ออกแบบกับค่าที่วัดได้จริง

อย่างไรก็ตาม ในโครงการนี้ได้ใช้เวลาส่วนใหญ่ไปกับการปรับปรุงและพัฒนาต้นแบบมากกว่า เนื่องจากการผลิตและประกอบทำไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ จึงประสบปัญหาว่ากังหันไม่สามารถสตาร์ทออกตัวได้ในความเร็วลมที่กำหนดไว้ และในการทดลองไม่สามารถทดลองได้ในสถานที่จริง เนื่องจากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยตลอดปี

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบเคลื่อนที่
2. มัลติมิเตอร์ สำหรับวัดค่า แรงเคลื่อน ไฟฟ้าและวัดค่ากระแส
3. พัดลมขนาดใหญ่ สำหรับสร้างลมเพื่อให้ได้ความเร็วลมที่กำหนด

การทดลองหามุมของลมที่ทำให้กังหันหมุนดีที่สุด

1. เตรียมวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองให้เรียบร้อย
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของชุดจำลองกำแพงพลังงานลม
3. เลื่อนพัดให้ห่างจากกำแพงประมาณ 1.5 เมตร โดยตั้งพัดลมที่มุม 45 องศา 90 องศาและ 135 องศา
4. วัดความเร็วลมหลายๆ จุดที่หน้ากาทั้งด้านหน้าและด้านหลัง
5. บันทึกข้อมูลที่วัดได้

การทดลองหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแส

1. เตรียมวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองให้เรียบร้อย
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของชุดจำลองกำแพงพลังงานลม
3. เลื่อนพัดลมให้ได้ตามความเร็วลมที่ต้องการทดลอง
4. วัดความเร็วลมหลายๆจุด ที่หน้ากาทเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ย
5. บันทึกข้อมูลที่วัดได้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

บทนำ

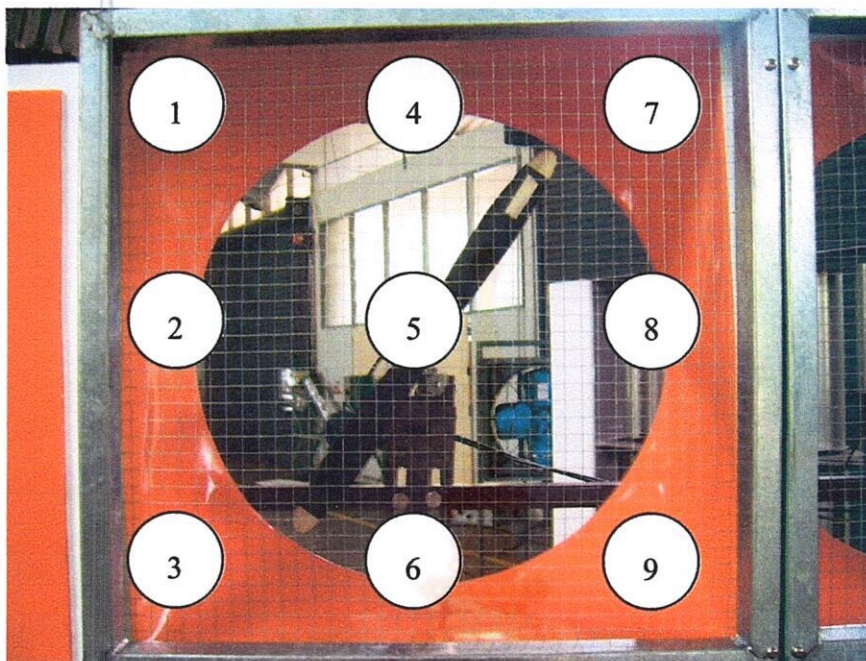
การทดสอบชุดจำลองกำเนิดพลังงานลมได้มีการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งของทิศทางลมว่ามุมไหนที่ทำให้กังหันหมุนดีที่สุด และในแต่ละความเร็วของลมว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตได้กำลังไฟฟ้าเท่าไร เพื่อทดสอบว่าชุดจำลองกำเนิดพลังงานลมใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่ และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาต่อไป โดยมีขั้นตอนทดสอบดังนี้

4.1 การทดสอบหาตำแหน่งมุมของลมที่ใช้ขับเคลื่อนแนวแกนนอน

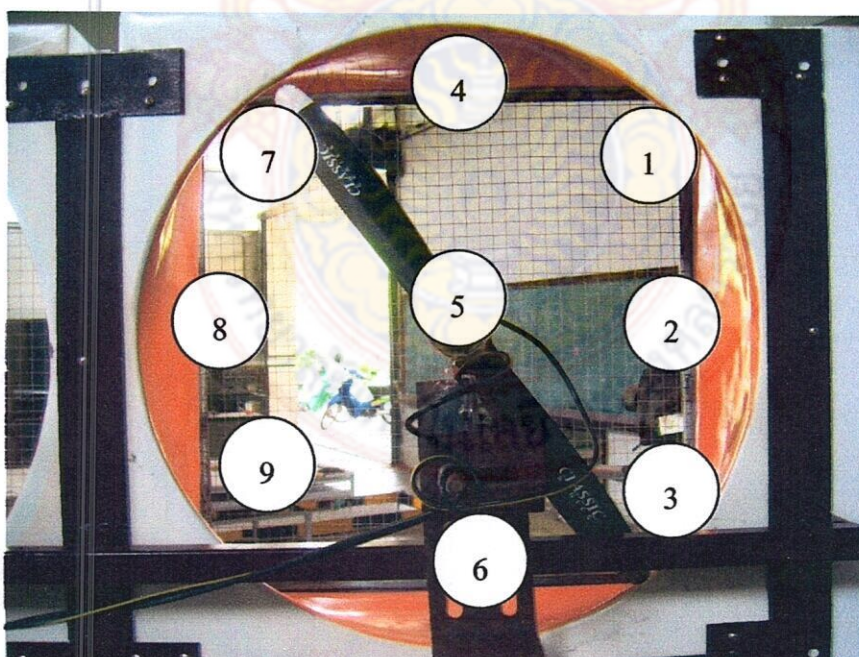
โดยการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งมุมของลมที่ใช้ขับเคลื่อนจะใช้พัดลม 2 ตัวเพื่อสร้างลมมาขับเคลื่อน โดยจะให้พัดลมทำมุมกับกำเนิดลม 45 องศา 90 องศาและ 135 องศาแล้ววัดความเร็วลมในแต่ละชุดของกังหัน จดบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.1 พัดลมที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 4.2 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้า



ภาพที่ 4.3 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหลัง

แกนแนวนอน มุม 45 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวนอน

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | |
| | 2 | 1.7 | 0.6 | |
| | 3 | 3.7 | 0.2 | |
| | 4 | 1.7 | 3 | |
| | 5 | 3.3 | 2.4 | |
| | 6 | 3.5 | 1.9 | |
| | 7 | 1.5 | 3 | |
| | 8 | 1.5 | 3.8 | |
| | 9 | 1.8 | 3 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.27 | 2.19 | 364.5 |
| 2 | 1 | 2.2 | 1.3 | |
| | 2 | 1.9 | 0.8 | |
| | 3 | 2.6 | 0.9 | |
| | 4 | 1.2 | 2.4 | |
| | 5 | 1.9 | 2.2 | |
| | 6 | 2.7 | 2.5 | |
| | 7 | 1.4 | 2.6 | |
| | 8 | 2.1 | 2.9 | |
| | 9 | 1.9 | 3.1 | |
| ลมเฉลี่ย | | 1.99 | 2.08 | 517.5 |
| 3 | 1 | 4.6 | 0.8 | |
| | 2 | 3.5 | 1.4 | |
| | 3 | 2.6 | 2.5 | |
| | 4 | 3.8 | 3.5 | |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 3 | 5 | 3.6 | 3 | |
| | 6 | 2.3 | 2.8 | |
| | 7 | 2.1 | 3.6 | |
| | 8 | 2.5 | 3.4 | |
| | 9 | 1.6 | 2.6 | |
| | ลมเฉลี่ย | | 2.95 | 2.62 |
| 4 | 1 | 2.8 | 0.6 | |
| | 2 | 2.8 | 0.8 | |
| | 3 | 2.5 | 2.7 | |
| | 4 | 2.1 | 3.1 | |
| | 5 | 2.5 | 2.5 | |
| | 6 | 2.2 | 2.4 | |
| | 7 | 2 | 3.1 | |
| | 8 | 1 | 2.9 | |
| | 9 | 1.7 | 2.6 | |
| | ลมเฉลี่ย | | 2.17 | 2.3 |

สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหน้า 2.345 m/s

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหลัง 2.298 m/s

แกนแนวนอน มุม 90 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวนอน

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 2.3 | 2.7 | |
| | 2 | 2.6 | 3 | |
| | 3 | 3.6 | 3.3 | |
| | 4 | 1.1 | 2.6 | |
| | 5 | 2.5 | 3 | |
| | 6 | 4 | 2 | |
| | 7 | 2 | 2.6 | |
| | 8 | 3.3 | 3.2 | |
| | 9 | 4.1 | 2.5 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.83 | 2.76 | 794 |
| 2 | 1 | 2 | 2.4 | |
| | 2 | 2.2 | 2.7 | |
| | 3 | 2.8 | 3.2 | |
| | 4 | 1.2 | 2.6 | |
| | 5 | 2.8 | 2.7 | |
| | 6 | 2.8 | 1.8 | |
| | 7 | 2.3 | 2.6 | |
| | 8 | 2.6 | 2.7 | |
| | 9 | 3.9 | 3.7 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.51 | 2.71 | 506 |
| 3 | 1 | 4 | 4.2 | |
| | 2 | 3.5 | 4.3 | |
| | 3 | 3 | 3.8 | |
| | 4 | 4.3 | 4 | |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 3 | 5 | 3.7 | 4.2 | |
| | 6 | 2.3 | 2.2 | |
| | 7 | 3.4 | 3.8 | |
| | 8 | 3 | 4.2 | |
| | 9 | 1.4 | 3.4 | |
| ลมเฉลี่ย | | 3.1 | 3.78 | 718 |
| 4 | 1 | 3.6 | 3.5 | |
| | 2 | 3 | 3.4 | |
| | 3 | 2 | 3.4 | |
| | 4 | 3.5 | 3.5 | |
| | 5 | 3.1 | 3.2 | |
| | 6 | 1.5 | 2.5 | |
| | 7 | 3.9 | 3.8 | |
| | 8 | 3 | 3.5 | |
| | 9 | 1.6 | 3.3 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.7 | 3.34 | 553 |

สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหน้า 4 ตัว 2.78 m/s

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหลัง 4 ตัว 3.15 m/s

แกนแนวนอน มุม 135 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกึ่งหันแนวนอน

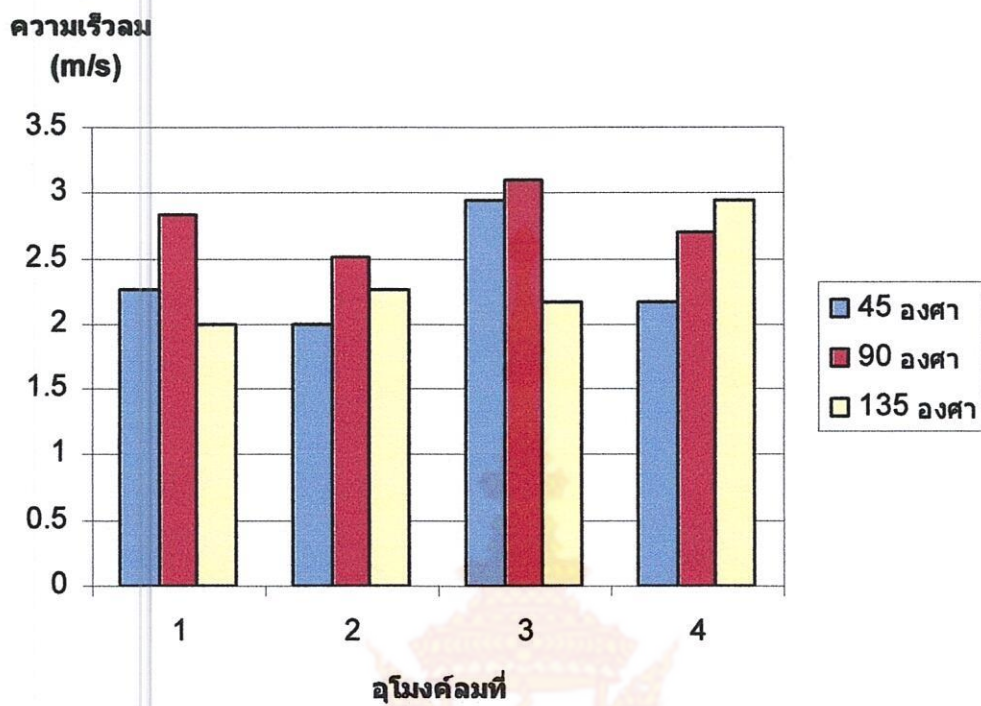
| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 1.4 | 2.6 | |
| | 2 | 2.1 | 2.9 | |
| | 3 | 1.9 | 3.1 | |
| | 4 | 1.2 | 2.4 | |
| | 5 | 1.9 | 2.2 | |
| | 6 | 2.7 | 2.5 | |
| | 7 | 2.2 | 1.3 | |
| | 8 | 1.99 | 0.8 | |
| | 9 | 2.6 | 0.9 | |
| ลมเฉลี่ย | | 1.99 | 2.08 | 517.5 |
| 2 | 1 | 1.5 | 3 | |
| | 2 | 1.5 | 3.8 | |
| | 3 | 1.8 | 3 | |
| | 4 | 1.7 | 3 | |
| | 5 | 3.3 | 2.4 | |
| | 6 | 3.5 | 1.9 | |
| | 7 | 1.8 | 1.8 | |
| | 8 | 1.7 | 0.6 | |
| | 9 | 3.7 | 0.2 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.27 | 2.19 | 364.5 |
| 3 | 1 | 2 | 3.1 | |
| | 2 | 1 | 2.9 | |
| | 3 | 1.7 | 2.6 | |
| | 4 | 2.1 | 3.1 | |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------|----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 3 | 5 | 2.5 | 2.5 | |
| | 6 | 2.2 | 2.4 | |
| | 7 | 2.8 | 0.6 | |
| | 8 | 2.8 | 0.8 | |
| | 9 | 2.5 | 2.7 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.17 | 2.3 | 391 |
| 4 | 1 | 2.1 | 3.6 | |
| | 2 | 2.5 | 3.4 | |
| | 3 | 1.6 | 2.6 | |
| | 4 | 3.8 | 3.5 | |
| | 5 | 3.6 | 3 | |
| | 6 | 2.3 | 2.8 | |
| | 7 | 4.6 | 0.8 | |
| | 8 | 3.5 | 1.4 | |
| | 9 | 2.6 | 2.5 | |
| ลมเฉลี่ย | | 2.95 | 2.62 | 587.5 |

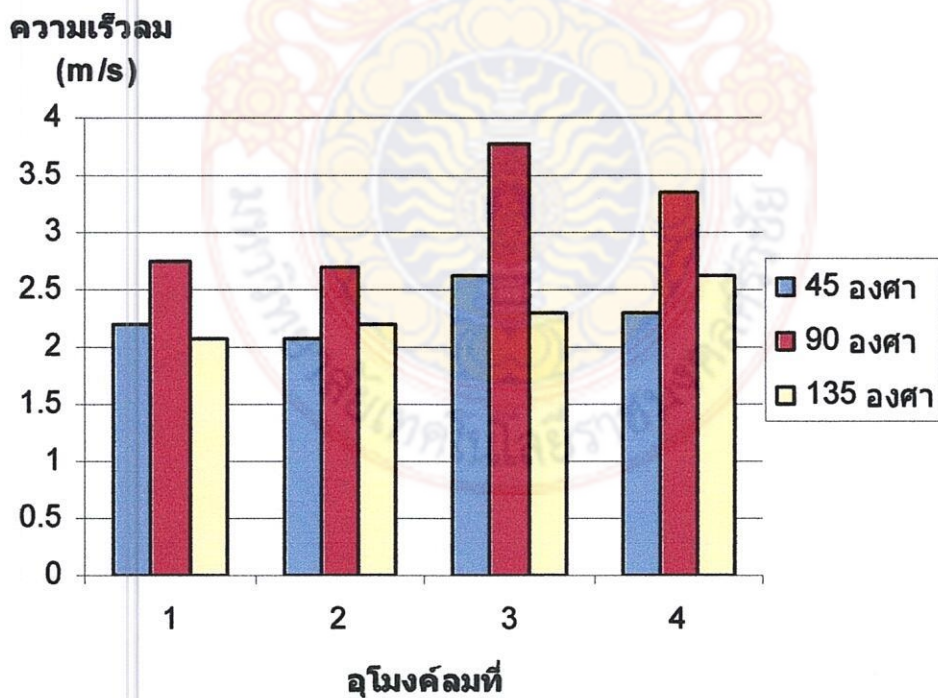
สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหน้า 2.345 m/s

ความเร็วลมเฉลี่ยด้านหลัง 2.297 m/s



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง



ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง

4.2 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวนอน

ตารางที่ 4.4 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1.6 | |
| | | 2 | 0.8 | |
| | | 3 | 5.2 | |
| | | 4 | 1.9 | |
| | | 5 | 5.5 | |
| | | 6 | 4.9 | |
| | | 7 | 1.6 | |
| | | 8 | 1.6 | |
| | | 9 | 3.4 | |
| | | เฉลี่ย | 2.94 | 1197 |
| | 2 | 1 | 2.2 | |
| | | 2 | 1.7 | |
| | | 3 | 2.5 | |
| | | 4 | 2.4 | |
| | | 5 | 4.9 | |
| | | 6 | 4.4 | |
| | | 7 | 1 | |
| | | 8 | 3.4 | |
| | | 9 | 5.3 | |
| | | เฉลี่ย | 3.09 | 582 |
| | 3 | 1 | 4.5 | |
| | | 2 | 5.5 | |
| | | 3 | 2.6 | |
| | | 4 | 6.4 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm | | |
|----------------------------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|-----|--|
| 1 | 3 | 5 | 5.3 | | | |
| | | 6 | 0.7 | | | |
| | | 7 | 4.1 | | | |
| | | 8 | 4.2 | | | |
| | | 9 | 2.5 | | | |
| | | เฉลี่ย | 3.98 | 915 | | |
| | | | 4 | 1 | 5.3 | |
| | | | | 2 | 2.7 | |
| | | | | 3 | 1.1 | |
| 4 | 5.2 | | | | | |
| 5 | 5.7 | | | | | |
| 6 | 2.4 | | | | | |
| 7 | 5.3 | | | | | |
| 8 | 2.2 | | | | | |
| 9 | 1.5 | | | | | |
| | | เฉลี่ย | 3.49 | 756.5 | | |
| สรุป | | | | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 3.37 m/s | | | | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 9.16 โวลต์ | | | | | | |
| วัดกระแสได้ 0.15 แอมแปร์ | | | | | | |
| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm | | |
| 2 | 1 | 1 | 1.6 | | | |
| | | 2 | 3.6 | | | |
| | | 3 | 4.3 | | | |
| | | 4 | 2.2 | | | |
| | | 5 | 4.2 | | | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 2 | 1 | 6 | 4.2 | |
| | | 7 | 1 | |
| | | 8 | 2.9 | |
| | | 9 | 4.3 | |
| | | เฉลี่ย | 3.14 | 1312 |
| | 2 | 1 | 0.9 | |
| | | 2 | 2.3 | |
| | | 3 | 2.6 | |
| | | 4 | 2.8 | |
| | | 5 | 3.5 | |
| 6 | | 3.6 | | |
| 7 | | 2.8 | | |
| 8 | | 3.3 | | |
| 9 | | 4.5 | | |
| 3 | | เฉลี่ย | 2.92 | 475.6 |
| | | 1 | 5.4 | |
| | | 2 | 3.3 | |
| | | 3 | 2.2 | |
| | | 4 | 4.9 | |
| | | 5 | 3.3 | |
| | | 6 | 3.2 | |
| | | 7 | 4.1 | |
| | | 8 | 1.7 | |
| | | 9 | 0.5 | |
| 4 | | เฉลี่ย | 3.18 | 766 |
| | | 1 | 3 | |
| | | 2 | 3.7 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|----------------------------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 2 | 4 | 3 | 0.5 | |
| | | 4 | 3.6 | |
| | | 5 | 2.9 | |
| | | 6 | 1 | |
| | | 7 | 4.8 | |
| | | 8 | 3.8 | |
| | | 9 | 2.5 | |
| | | เฉลี่ย | 2.87 | 604.5 |
| สรุป | | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 3.03 m/s | | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 7.5 โวลต์ | | | | |
| วัดกระแสได้ 0.125 แอมแปร์ | | | | |
| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
| 3 | 1 | 1 | 2.2 | |
| | | 2 | 3.1 | |
| | | 3 | 3.5 | |
| | | 4 | 2.7 | |
| | | 5 | 3.8 | |
| | | 6 | 4.2 | |
| | | 7 | 2.7 | |
| | | 8 | 4.0 | |
| | | 9 | 4.3 | |
| | | เฉลี่ย | 3.39 | 583.5 |
| | 2 | 1 | 2.4 | |
| | | 2 | 3.2 | |
| | | 3 | 1.3 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 3 | 2 | 4 | 1.8 | |
| | | 5 | 3.3 | |
| | | 6 | 3.8 | |
| | | 7 | 1.9 | |
| | | 8 | 3.4 | |
| | | 9 | 3.2 | |
| | | เฉลี่ย | 2.7 | 583.5 |
| | 3 | 1 | 2.9 | |
| | | 2 | 2.9 | |
| | | 3 | 2.1 | |
| | | 4 | 4.2 | |
| | | 5 | 3.4 | |
| | | 6 | 2.2 | |
| | | 7 | 4.0 | |
| | | 8 | 3.3 | |
| | | 9 | 2.9 | |
| | | เฉลี่ย | 3.1 | 652.5 |
| | 4 | 1 | 3.5 | |
| | | 2 | 3.2 | |
| | | 3 | 3.0 | |
| | | 4 | 3.1 | |
| | | 5 | 2.8 | |
| | | 6 | 2.0 | |
| | | 7 | 3.3 | |
| | | 8 | 2.6 | |
| | | 9 | 2.7 | |
| | | เฉลี่ย | 2.91 | 478.2 |

| สรุป | | | | |
|----------------------------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 3.02 m/s | | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 7.14 โวลต์ | | | | |
| วัดกระแสได้ 0.15 แอมแปร์ | | | | |
| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
| 4 | 1 | 1 | 2.7 | |
| | | 2 | 2.9 | |
| | | 3 | 3.2 | |
| | | 4 | 2.9 | |
| | | 5 | 3.1 | |
| | | 6 | 3.2 | |
| | | 7 | 2.6 | |
| | | 8 | 2.7 | |
| | | 9 | 4.1 | |
| | | เฉลี่ย | 3.04 | 590.5 |
| | 2 | 1 | 0.8 | |
| | | 2 | 4.0 | |
| | | 3 | 3.2 | |
| | | 4 | 1.9 | |
| | | 5 | 2.8 | |
| | | 6 | 3.2 | |
| | | 7 | 3.0 | |
| | | 8 | 3.2 | |
| | | 9 | 3.2 | |
| | | เฉลี่ย | 2.81 | 524 |
| | 3 | 1 | 2.9 | |
| | | 2 | 2.7 | |
| | | 3 | 1.8 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|---------------------------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 4 | 3 | 4 | 3.1 | |
| | | 5 | 2.4 | |
| | | 6 | 1.8 | |
| | | 7 | 3.6 | |
| | | 8 | 3.2 | |
| | | 9 | 2.6 | |
| | | เฉลี่ย | 2.68 | 592 |
| | 4 | 1 | 3.1 | |
| | | 2 | 3.0 | |
| | | 3 | 2.9 | |
| | | 4 | 3.5 | |
| | | 5 | 3.2 | |
| | | 6 | 2.8 | |
| | | 7 | 3.3 | |
| | | 8 | 2.9 | |
| | | 9 | 2.9 | |
| | | เฉลี่ย | 3.07 | 515 |
| สรุป | | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.9 m/s | | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 5.9 โวลต์ | | | | |
| วัดกระแสได้ 0.1 แอมแปร์ | | | | |
| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
| 5 | | 1 | 2.6 | |
| | | 2 | 2.2 | |
| | | 3 | 2.0 | |
| | | 4 | 2.7 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm | |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|--|
| 5 | 1 | 5 | 2.5 | | |
| | | 6 | 2.5 | | |
| | | 7 | 2.1 | | |
| | | 8 | 3.0 | | |
| | | 9 | 3.2 | | |
| | | เฉลี่ย | 2.53 | 676.5 | |
| | | 2 | 1 | 2.5 | |
| | | 2 | 2 | 3.4 | |
| | | 2 | 3 | 3.5 | |
| | 2 | 4 | 2.3 | | |
| | | 5 | 2.8 | | |
| | | 6 | 2.9 | | |
| | | 7 | 1.7 | | |
| | | 8 | 2.2 | | |
| | | 9 | 2.9 | | |
| | | เฉลี่ย | 2.69 | 458.9 | |
| | | 3 | 1 | 2.7 | |
| | | 3 | 2 | 2.2 | |
| | | 3 | 3 | 0.9 | |
| | 3 | 4 | 2.9 | | |
| | | 5 | 2.6 | | |
| | | 6 | 1.9 | | |
| | | 7 | 3.3 | | |
| | | 8 | 3.3 | | |
| | | 9 | 2.4 | | |
| | | เฉลี่ย | 2.47 | 545 | |
| | | 4 | 1 | 3.3 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 5 | | 2 | 2.5 | |
| | | 3 | 2.3 | |
| | | 4 | 2.6 | |
| | | 5 | 2.4 | |
| | | 6 | 2.7 | |
| | | 7 | 2.8 | |
| | | 8 | 3.1 | |
| | | 9 | 3.1 | |
| | | เฉลี่ย | 2.76 | 475.9 |

สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.61 m/s

วัดแรงเคลื่อนได้ 5.6 โวลต์

วัดกระแสได้ 0.125 แอมแปร์

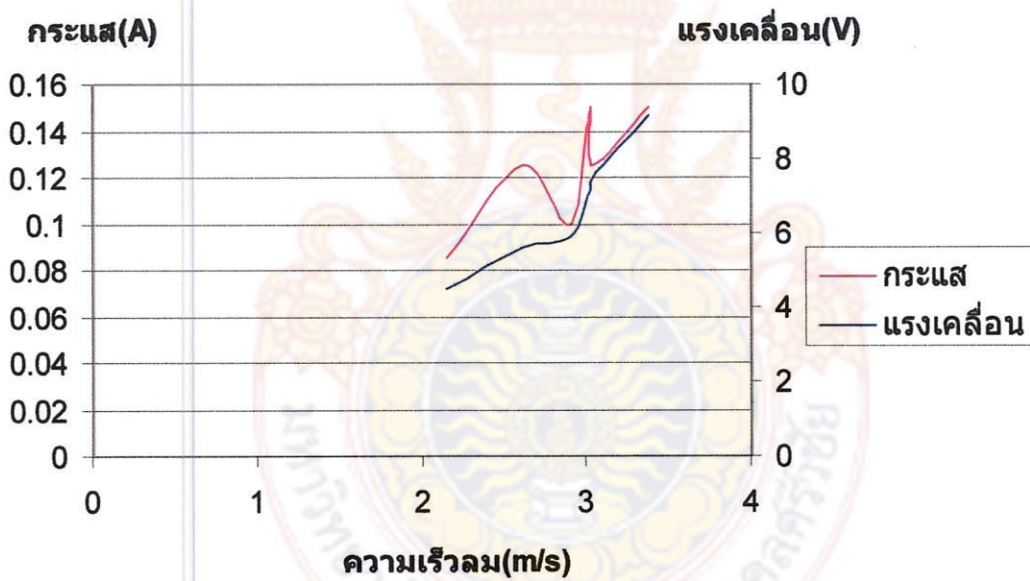
| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 6 | 1 | 1 | 1.9 | |
| | | 2 | 2.4 | |
| | | 3 | 1.7 | |
| | | 4 | 2.5 | |
| | | 5 | 2.6 | |
| | | 6 | 2.6 | |
| | | 7 | 2.5 | |
| | | 8 | 2.7 | |
| | | 9 | 2.5 | |
| | | เฉลี่ย | 2.38 | 745.5 |
| | 2 | 1 | 2.5 | |
| | | 2 | 2.7 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 6 | 2 | 3 | 2.1 | |
| | | 4 | 2.2 | |
| | | 5 | 2.2 | |
| | | 6 | 2.2 | |
| | | 7 | 1.9 | |
| | | 8 | 2.7 | |
| | | 9 | 2.2 | |
| | | เฉลี่ย | 2.3 | 329.9 |
| | | | 3 | 1 |
| 2 | 2.3 | | | |
| 3 | 1.6 | | | |
| 4 | 2.7 | | | |
| 5 | 2.2 | | | |
| 6 | 1.8 | | | |
| 7 | 2.1 | | | |
| 8 | 3.0 | | | |
| 9 | 1.8 | | | |
| | | เฉลี่ย | 2.19 | 514.5 |
| | 4 | 1 | 1.9 | |
| | | 2 | 1.9 | |
| | | 3 | 1.7 | |
| | | 4 | 2.4 | |
| | | 5 | 1.8 | |
| | | 6 | 0.8 | |
| | | 7 | 2.1 | |
| | | 8 | 1.3 | |
| | | 9 | 1.2 | |

| วัดครั้งที่ | ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม m/s | ความเร็วรอบใบพัด rpm |
|-------------|--------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 6 | 4 | เฉลี่ย | 1.68 | 354.5 |

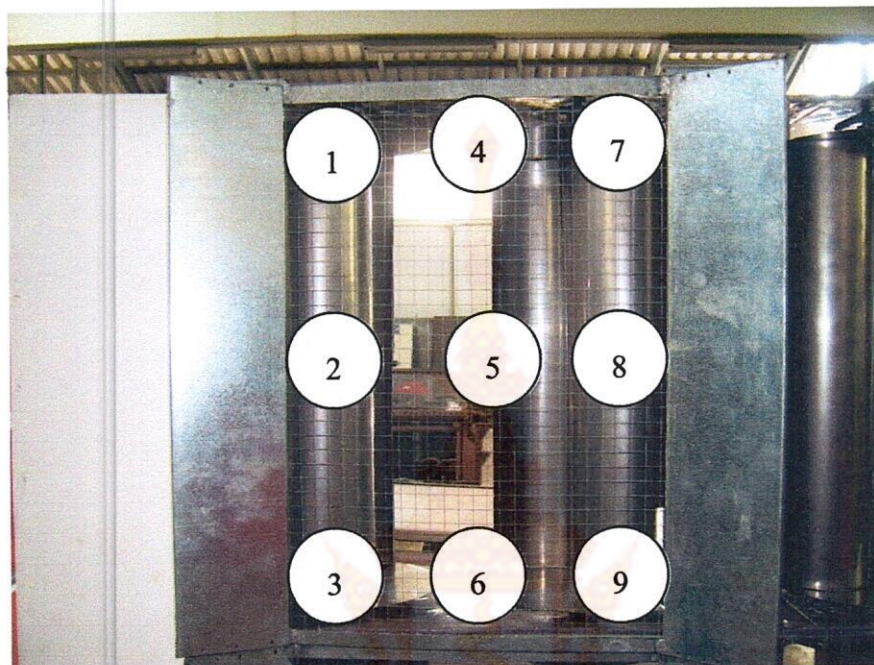
สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.14 m/s
 วัดแรงเคลื่อนได้ 4.5 โวลต์
 วัดกระแสได้ 0.085 แอมแปร์

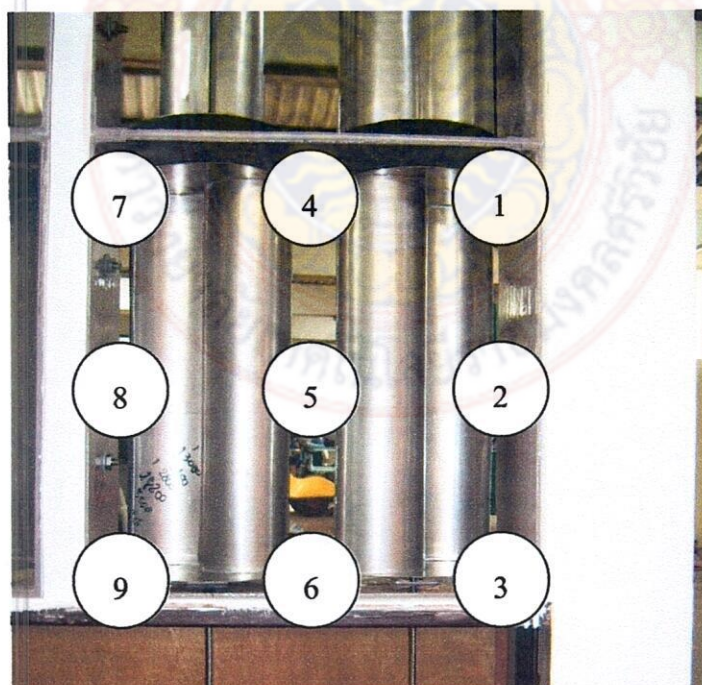


ภาพที่ 4.6 แสดงความเร็วลมต่างๆที่สามารถผลิตแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

4.3 การทดสอบหาตำแหน่งมุมของลมที่ใช้ขับเคลื่อนแนวแกนตั้ง



ภาพที่ 4.7 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าใส่หน้ากาก



ภาพที่ 4.8 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหลัง

แกนแนวตั้งใส่หน้ากาก มุม 45 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขยับกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| 1 | 1 | 1.6 | 0.2 |
| | 2 | 1.9 | 0.6 |
| | 3 | 2.3 | 0 |
| | 4 | 2 | 2.7 |
| | 5 | 3 | 3.1 |
| | 6 | 3.5 | 3 |
| | 7 | 1 | 1.8 |
| | 8 | 1.6 | 2.2 |
| | 9 | 2.1 | 1.8 |
| | เฉลี่ย | 2.11 | 1.71 |
| 2 | 1 | 2 | 0.8 |
| | 2 | 1.9 | 0.9 |
| | 3 | 2.4 | 0.5 |
| | 4 | 2.8 | 3.5 |
| | 5 | 3 | 4 |
| | 6 | 1.3 | 3.6 |
| | 7 | 1.5 | 2.3 |
| | 8 | 1.9 | 3.5 |
| | 9 | 0.8 | 3.4 |
| | เฉลี่ย | 1.96 | 2.5 |
| 3 | 1 | 1.1 | 0.7 |
| | 2 | 1.4 | 0.8 |
| | 3 | 1.8 | 0.1 |
| | 4 | 1 | 2.7 |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 5 | 2.2 | 2.4 |
| | 6 | 2.9 | 1.7 |
| | 7 | 0.9 | 1.4 |
| | 8 | 1.3 | 1.1 |
| | 9 | 2.2 | 1.1 |
| | เฉลี่ย | 1.64 | 1.33 |
| 4 | 1 | 2.4 | 0.5 |
| | 2 | 1.9 | 1.3 |
| | 3 | 1.9 | 0.2 |
| | 4 | 2.8 | 2.9 |
| | 5 | 3.2 | 3.3 |
| | 6 | 2.2 | 2.8 |
| | 7 | 1.9 | 1.9 |
| | 8 | 1.8 | 1.9 |
| | 9 | 1 | 2.1 |
| | เฉลี่ย | 2.12 | 1.88 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 200 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 323 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 235 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 401 rpm

แกนแนวตั้งใส่หน้ากาก มุม 90 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| 1 | 1 | 1.3 | 1 |
| | 2 | 1.8 | 0.9 |
| | 3 | 2.8 | 0.9 |
| | 4 | 1.9 | 3.4 |
| | 5 | 3.7 | 3.7 |
| | 6 | 4.3 | 3.3 |
| | 7 | 1.4 | 1.1 |
| | 8 | 2.1 | 0.8 |
| | 9 | 2.8 | 0.9 |
| | เฉลี่ย | 2.46 | 1.78 |
| 2 | 1 | 3.2 | 0.9 |
| | 2 | 2.2 | 0.8 |
| | 3 | 1.3 | 1.3 |
| | 4 | 5 | 4.7 |
| | 5 | 4.2 | 4.5 |
| | 6 | 2.4 | 3.6 |
| | 7 | 3.2 | 1.1 |
| | 8 | 2 | 1.8 |
| | 9 | 2.2 | 1.6 |
| | เฉลี่ย | 2.86 | 2.26 |
| 3 | 1 | 0.9 | 1.1 |
| | 2 | 1.7 | 0.8 |
| | 3 | 2.6 | 0.8 |
| | 4 | 1.8 | 3.4 |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| | 5 | 3 | 2.9 |
| | 6 | 3 | 3 |
| | 7 | 1.7 | 1.5 |
| | 8 | 2.2 | 0.9 |
| | 9 | 2.5 | 0.7 |
| | เฉลี่ย | 2.16 | 1.68 |
| 4 | 1 | 2.6 | 1.8 |
| | 2 | 2.8 | 2.1 |
| | 3 | 1 | 1.2 |
| | 4 | 3.3 | 3.6 |
| | 5 | 2.6 | 3.6 |
| | 6 | 2 | 3.2 |
| | 7 | 3.1 | 1.1 |
| | 8 | 2.7 | 0.8 |
| | 9 | 1.8 | 1.3 |
| | เฉลี่ย | 2.43 | 2.08 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 495 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 490 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 346 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 385 rpm

แกนแนวตั้งใส่หน้ากาก มุม 135 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| 1 | 1 | 0.9 | 1.4 |
| | 2 | 1.3 | 1.1 |
| | 3 | 2.2 | 1.1 |
| | 4 | 1 | 2.7 |
| | 5 | 2.2 | 2.4 |
| | 6 | 2.9 | 1.7 |
| | 7 | 1.1 | 0.7 |
| | 8 | 1.4 | 0.8 |
| | 9 | 1.8 | 0.1 |
| | เฉลี่ย | 1.64 | 1.33 |
| 2 | 1 | 1.9 | 1.9 |
| | 2 | 1.8 | 1.9 |
| | 3 | 1 | 2.1 |
| | 4 | 2.8 | 2.9 |
| | 5 | 3.2 | 3.3 |
| | 6 | 2.2 | 2.8 |
| | 7 | 2.4 | 0.5 |
| | 8 | 1.9 | 1.3 |
| | 9 | 1.9 | 0.2 |
| | เฉลี่ย | 2.12 | 1.88 |
| 3 | 1 | 1 | 1.8 |
| | 2 | 1.6 | 2.2 |
| | 3 | 2.1 | 1.8 |
| | 4 | 2 | 2.7 |

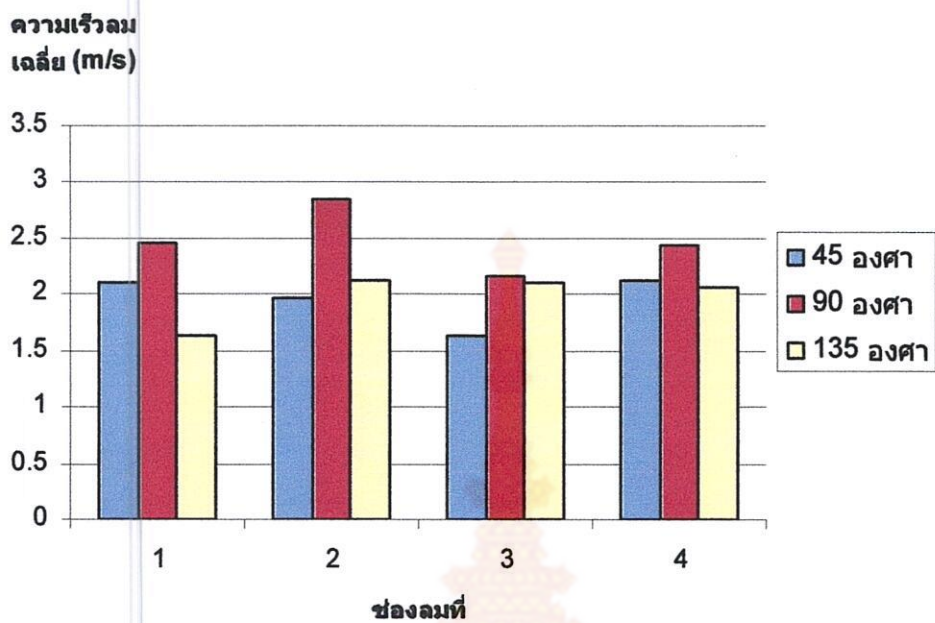
| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 5 | 3 | 3.1 |
| | 6 | 3.5 | 3 |
| | 7 | 1.6 | 0.2 |
| | 8 | 1.9 | 0.6 |
| | 9 | 2.3 | 0 |
| | เฉลี่ย | 2.11 | 1.71 |
| 4 | 1 | 1.5 | 2.3 |
| | 2 | 1.9 | 3.5 |
| | 3 | 0.8 | 3.4 |
| | 4 | 2.8 | 3.5 |
| | 5 | 3 | 4 |
| | 6 | 2.3 | 3.6 |
| | 7 | 2 | 0.8 |
| | 8 | 1.9 | 0.9 |
| | 9 | 2.4 | 0.5 |
| | เฉลี่ย | 2.07 | 2.5 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 401 rpm

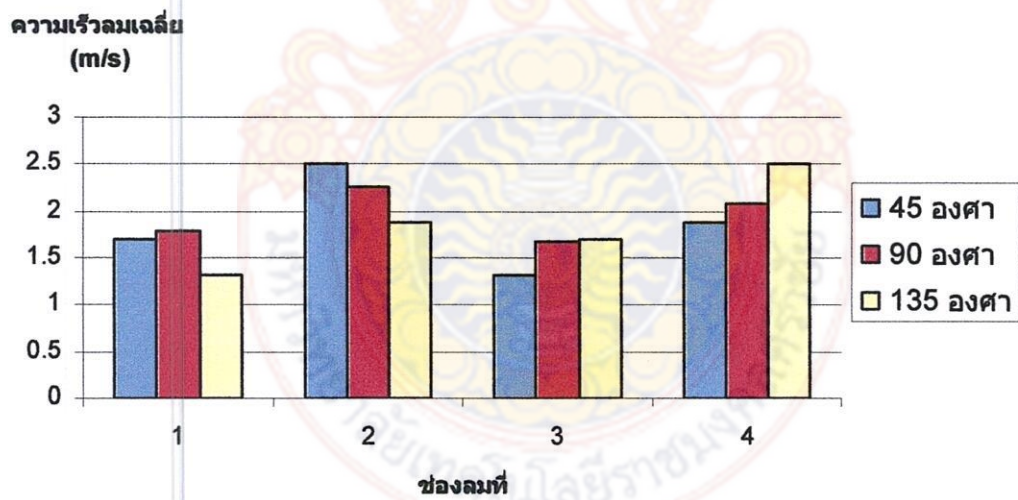
ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 235 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 323 rpm

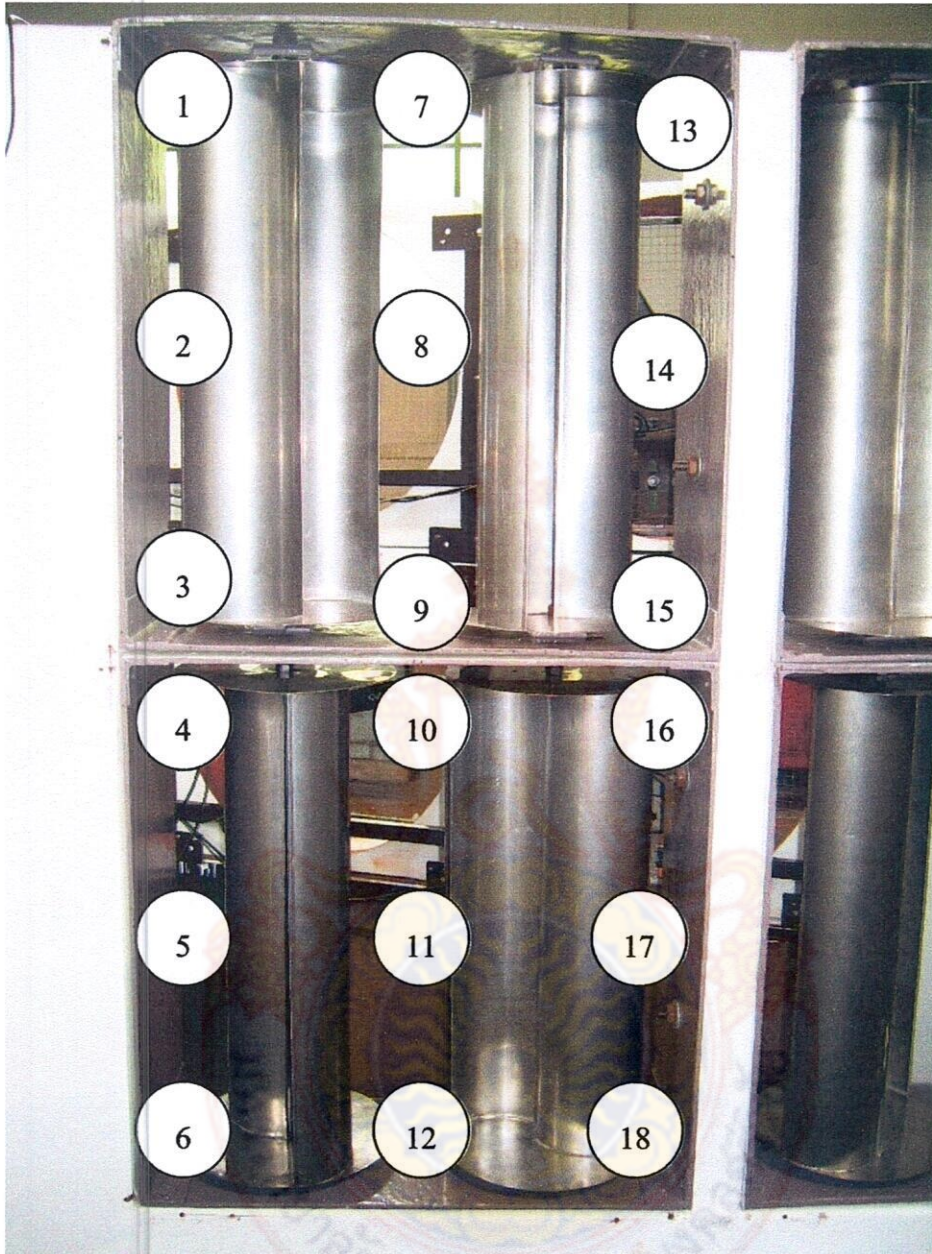
ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 200 rpm



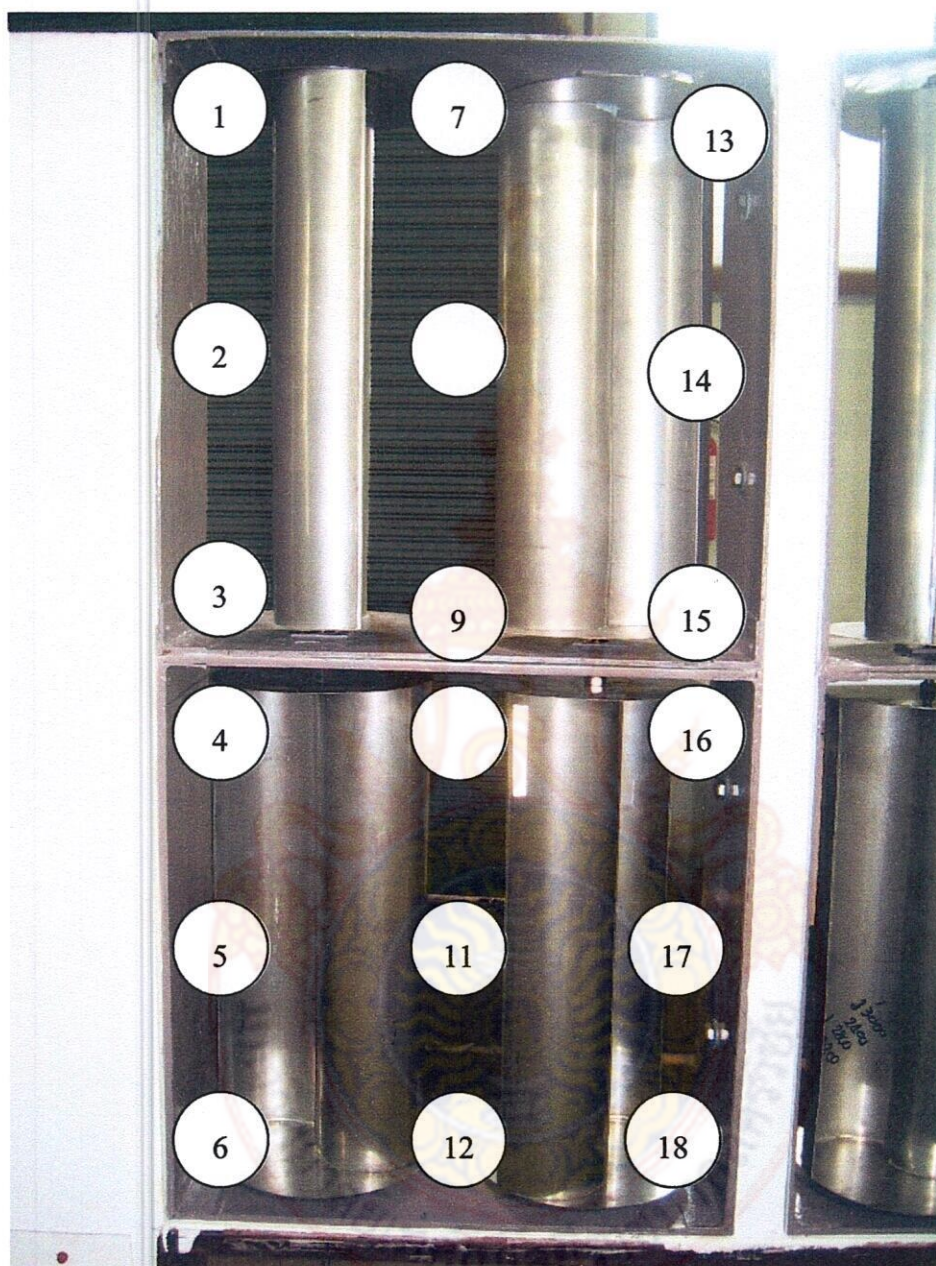
ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง



ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง



ภาพที่ 4.11 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าไม้ไผ่หน้ากาก



ภาพที่ 4.12 ตำแหน่งวัดความเร็วลมด้านหน้าไม้ใส่หน้ากาก

แกนแนวตั้งไม้ไผ่หน้ากาก มุม 45 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 45 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| 1 | 1 | 1.8 | 0 |
| | 2 | 2.4 | 0.1 |
| | 3 | 2.9 | 0 |
| | 4 | 2.8 | 0.1 |
| | 5 | 2.9 | 0.2 |
| | 6 | 1.9 | 0.6 |
| | 7 | 1.1 | 2.6 |
| | 8 | 2.0 | 2.4 |
| | 9 | 2.9 | 1.4 |
| | 10 | 3.6 | 3.2 |
| | 11 | 3.5 | 3.7 |
| | 12 | 2.4 | 2.9 |
| | 13 | 0.7 | 1.9 |
| | 14 | 1.4 | 2.0 |
| | 15 | 1.6 | 2.4 |
| | 16 | 1.8 | 2.8 |
| | 17 | 2.3 | 2.7 |
| | 18 | 1.3 | 2.6 |
| | เฉลี่ย | 2.18 | 1.76 |
| 2 | 1 | 1.4 | 0 |
| | 2 | 1.5 | 0 |
| | 3 | 2.2 | 0 |
| | 4 | 1.9 | 0.6 |
| | 5 | 2.0 | 0.3 |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | 6 | 1.8 | 0.1 |
| | 7 | 1.6 | 2.7 |
| | 8 | 3.0 | 2.8 |
| | 9 | 2.8 | 1.8 |
| | 10 | 3.4 | 3.1 |
| | 11 | 3.8 | 3.0 |
| | 12 | 2.7 | 3.2 |
| | 13 | 1.3 | 1.7 |
| | 14 | 1.0 | 1.8 |
| | 15 | 1.6 | 2.1 |
| | 16 | 1.7 | 2.0 |
| | 17 | 1.9 | 1.5 |
| | 18 | 1.4 | 1.6 |
| | เฉลี่ย | 2.06 | 1.57 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 403.6 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 342.2 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 376 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 346 rpm

แกนแนวตั้งไม้ไผ่หน้าฉาก มุม 90 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 90 องศาที่ใช้ขยับกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า | ความเร็วลมด้านหลัง |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | m/s | m/s |
| 1 | 1 | 1.8 | 2.0 |
| | 2 | 3.0 | 1.8 |
| | 3 | 3.0 | 2.5 |
| | 4 | 2.8 | 1.8 |
| | 5 | 2.4 | 1.7 |
| | 6 | 1.8 | 1.7 |
| | 7 | 1.9 | 2.8 |
| | 8 | 3.8 | 2.9 |
| | 9 | 4.7 | 3.8 |
| | 10 | 4.0 | 3.7 |
| | 11 | 4.5 | 3.0 |
| | 12 | 2.9 | 3.6 |
| | 13 | 2.1 | 1.6 |
| | 14 | 1.4 | 1.2 |
| | 15 | 1.5 | 1.8 |
| | 16 | 1.2 | 1.8 |
| | 17 | 1.4 | 2.5 |
| | 18 | 1.4 | 1.8 |
| | เฉลี่ย | 2.53 | 2.33 |
| 2 | 1 | 1.8 | 1.5 |
| | 2 | 1.8 | 0.9 |
| | 3 | 2.3 | 2.8 |
| | 4 | 2.2 | 1.0 |
| | 5 | 0.8 | 1.3 |

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | 6 | 1.9 | 2.7 |
| | 7 | 1.5 | 2.6 |
| | 8 | 2.7 | 2.6 |
| | 9 | 3.4 | 3.7 |
| | 10 | 3.2 | 4.0 |
| | 11 | 2.3 | 3.4 |
| | 12 | 2.7 | 3.2 |
| | 13 | 1.5 | 1.4 |
| | 14 | 2.0 | 1.9 |
| | 15 | 2.1 | 1.7 |
| | 16 | 2.2 | 2.9 |
| | 17 | 1.9 | 2.8 |
| | 18 | 1.5 | 2.6 |
| | เฉลี่ย | 2.1 | 2.39 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 470.4 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 434.5 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 361 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 438.2 rpm

แกนแนวตั้งไม้ไผ่หน้าาก มุม 135 องศา ระยะ 1.50 เมตร

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองตำแหน่งมุม 135 องศาที่ใช้ขั้วกั้นแนวตั้ง

| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 1 | 1.3 | 1.7 |
| | 2 | 1.0 | 1.8 |
| | 3 | 1.6 | 2.1 |
| | 4 | 1.7 | 2.0 |
| | 5 | 1.9 | 1.5 |
| | 6 | 1.4 | 1.6 |
| | 7 | 1.6 | 2.7 |
| | 8 | 3.0 | 2.8 |
| | 9 | 2.8 | 1.8 |
| | 10 | 3.4 | 3.1 |
| | 11 | 3.8 | 3.0 |
| | 12 | 2.7 | 3.2 |
| | 13 | 1.4 | 0 |
| | 14 | 1.5 | 0 |
| | 15 | 2.2 | 0 |
| | 16 | 1.9 | 0.6 |
| | 17 | 2.0 | 0.3 |
| | 18 | 1.8 | 0.1 |
| | เฉลี่ย | 2.06 | 1.57 |
| 2 | 1 | 0.7 | 1.9 |
| | 2 | 1.4 | 2.0 |
| | 3 | 1.6 | 2.4 |
| | 4 | 1.8 | 2.8 |
| | 5 | 2.3 | 2.7 |

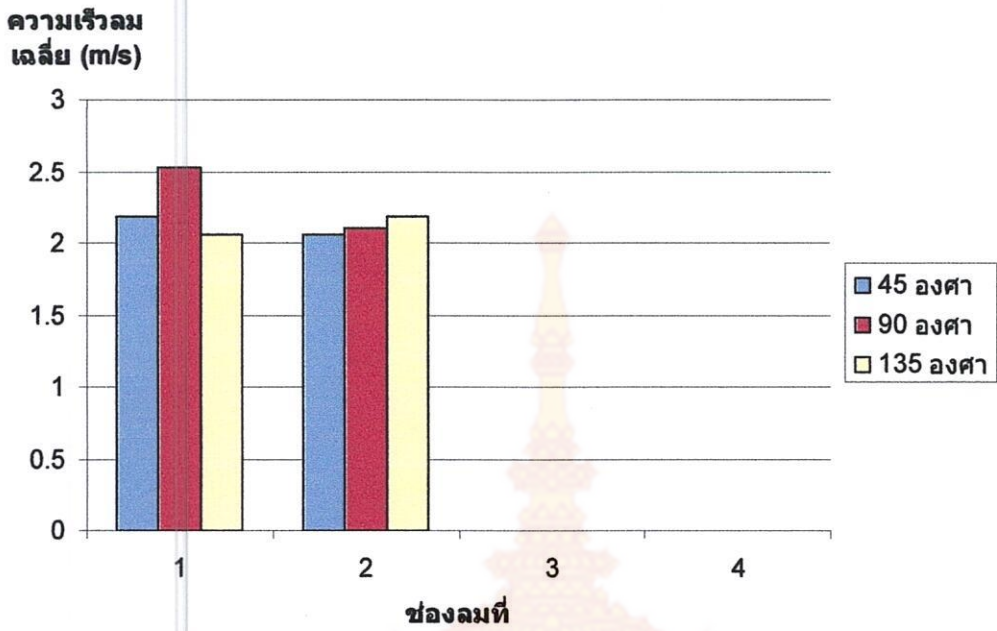
| ตัวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลมด้านหน้า m/s | ความเร็วลมด้านหลัง m/s |
|--------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | 6 | 1.3 | 2.6 |
| | 7 | 1.1 | 2.6 |
| | 8 | 2.0 | 2.4 |
| | 9 | 2.9 | 1.4 |
| | 10 | 3.6 | 3.2 |
| | 11 | 3.5 | 3.7 |
| | 12 | 2.4 | 2.9 |
| | 13 | 1.8 | 0 |
| | 14 | 2.4 | 0.1 |
| | 15 | 2.9 | 0 |
| | 16 | 2.8 | 0.1 |
| | 17 | 2.9 | 0.2 |
| | 18 | 1.9 | 0.6 |
| | เฉลี่ย | 2.18 | 2.18 |

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 470.4 rpm

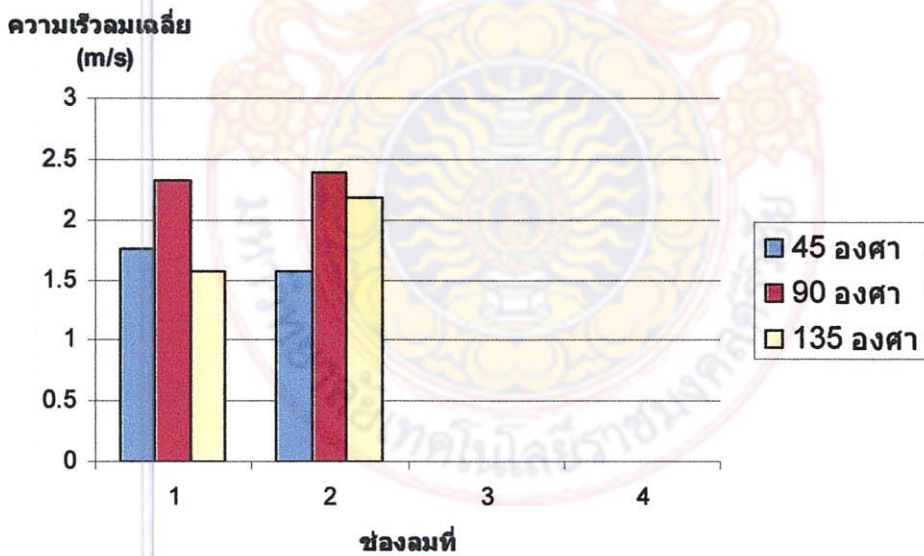
ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 434.5 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 361 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 438.2 rpm



ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหน้ากำแพง



ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมที่มุมต่างๆด้านหลังกำแพง

4.4 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวตั้งใต้น้ำอากาศ

ตารางที่ 4.11 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 1 | 1 | 0.8 |
| | | 2 | 2.1 |
| | | 3 | 6.0 |
| | | 4 | 4.9 |
| | | 5 | 8.4 |
| | | 6 | 1.7 |
| | | 7 | 0.7 |
| | | 8 | 4.5 |
| | | 9 | 2.2 |
| | | 10 | 4.2 |
| | | 11 | 4.3 |
| | | 12 | 1.9 |
| | | 13 | 1.7 |
| | | 14 | 5.5 |
| | | 15 | 4.1 |
| | | 16 | 6.2 |
| | | 17 | 2.2 |
| | | 18 | 2.2 |
| | | เฉลี่ย | 3.53 |
| | 2 | 1 | 2.9 |
| | | 2 | 2.2 |
| | | 3 | 2.3 |
| | | 4 | 1.9 |
| | | 5 | 0.6 |
| | | 6 | 1.1 |
| | | 7 | 0.5 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 1 | 2 | 8 | 4.7 |
| | | 9 | 4.5 |
| | | 10 | 4.4 |
| | | 11 | 6.0 |
| | | 12 | 0.9 |
| | | 13 | 0.8 |
| | | 14 | 1.9 |
| | | 15 | 4.1 |
| | | 16 | 2.5 |
| | | 17 | 7.5 |
| | | 18 | 0.9 |
| | | เฉลี่ย | 2.76 |

สรุป

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 762.3 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 658.8 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 564.3 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 498.8 rpm

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 3.15 m/s

วัดแรงเคลื่อนได้ 5.2 โวลต์

วัดกระแสได้ 0.11 แอมแปร์

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 2 | 1 | 1 | 2.7 |
| | | 2 | 3.0 |
| | | 3 | 3.7 |
| | | 4 | 3.4 |
| | | 5 | 3.1 |
| | | 6 | 2.5 |
| | | 7 | 2.1 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 2 | 1 | 8 | 3.4 |
| | | 9 | 4.7 |
| | | 10 | 4.5 |
| | | 11 | 3.8 |
| | | 12 | 2.2 |
| | | 13 | 0.8 |
| | | 14 | 1.6 |
| | | 15 | 2.8 |
| | | 16 | 2.7 |
| | | 17 | 2.6 |
| | | 18 | 1.0 |
| | | เฉลี่ย | 2.18 |
| | 2 | 1 | 0.6 |
| | | 2 | 0.6 |
| | | 3 | 1.0 |
| | | 4 | 1.8 |
| | | 5 | 2.0 |
| | | 6 | 1.9 |
| | | 7 | 2.7 |
| | | 8 | 2.5 |
| | | 9 | 3.0 |
| | | 10 | 2.4 |
| | | 11 | 2.0 |
| | | 12 | 2.6 |
| | | 13 | 2.3 |
| | | 14 | 2.4 |
| | | 15 | 2.5 |
| | | 16 | 2.6 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 2 | 2 | 17 | 2.7 |
| | | 18 | 3.7 |
| | | เฉลี่ย | 2.18 |

สรุป

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 534 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 515.7 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 393.7 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 418.5 rpm

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.50 m/s

วัดแรงเคลื่อนได้ 3.6 โวลต์

วัดกระแสได้ 0.075 แอมแปร์

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 3 | 1 | 1 | 1.9 |
| | | 2 | 2.3 |
| | | 3 | 2.6 |
| | | 4 | 2.4 |
| | | 5 | 2.4 |
| | | 6 | 1.8 |
| | | 7 | 2.0 |
| | | 8 | 3.4 |
| | | 9 | 4.2 |
| | | 10 | 3.9 |
| | | 11 | 3.7 |
| | | 12 | 2.8 |
| | | 13 | 2.0 |
| | | 14 | 2.4 |
| | | 15 | 2.6 |
| | | 16 | 2.2 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) | |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|------|
| 3 | 1 | 17 | 1.9 | |
| | | 18 | 2.0 | |
| | | | เฉลี่ย | 2.58 |
| | 2 | | 1 | 2.3 |
| | | | 2 | 1.9 |
| | | | 3 | 1.9 |
| | | | 4 | 1.8 |
| | | | 5 | 1.8 |
| | | | 6 | 1.8 |
| | | | 7 | 2.3 |
| | | | 8 | 2.9 |
| | | | 9 | 3.4 |
| | | | 10 | 3.3 |
| | | | 11 | 2.8 |
| | | | 12 | 2.3 |
| | | | 13 | 1.4 |
| | | | 14 | 1.9 |
| | | | 15 | 2.5 |
| 16 | | | 2.0 | |
| 17 | 2.3 | | | |
| 18 | 2.1 | | | |
| | | เฉลี่ย | 2.26 | |

สรุป

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 452.2 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 489 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 392.8 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 340.8 rpm

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.42 m/s

วัดแรงเคลื่อนได้ 3.4 โวลต์

| วัดกระแสได้ 0.065 แอมแปร์ | | | |
|---------------------------|---------------|----------------------|------------------|
| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแฉวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 4 | 1 | 1 | 2.6 |
| | | 2 | 2.3 |
| | | 3 | 2.4 |
| | | 4 | 2.1 |
| | | 5 | 2.2 |
| | | 6 | 1.7 |
| | | 7 | 2.7 |
| | | 8 | 3.6 |
| | | 9 | 3.2 |
| | | 10 | 3.3 |
| | | 11 | 3.4 |
| | | 12 | 2.1 |
| | | 13 | 2.5 |
| | | 14 | 3.0 |
| | | 15 | 3.5 |
| | | 16 | 3.3 |
| | | 17 | 2.4 |
| | | 18 | 2.4 |
| | | เฉลี่ย | 2.71 |
| | 2 | 1 | 1.7 |
| | | 2 | 1.9 |
| | | 3 | 2.3 |
| | | 4 | 1.9 |
| | | 5 | 1.7 |
| | | 6 | 1.5 |
| | | 7 | 2.1 |
| | | 8 | 2.6 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 4 | 2 | 9 | 2.7 |
| | | 10 | 2.2 |
| | | 11 | 2.7 |
| | | 12 | 2.3 |
| | | 13 | 1.2 |
| | | 14 | 1.4 |
| | | 15 | 1.7 |
| | | 16 | 1.7 |
| | | 17 | 1.8 |
| | | 18 | 1.8 |
| | | เฉลี่ย | 1.96 |

สรุป

ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 405.3 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 438.4 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 319.7 rpm

ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 288.9 rpm

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.33 m/s

วัดแรงเคลื่อนได้ 2.9 โวลต์

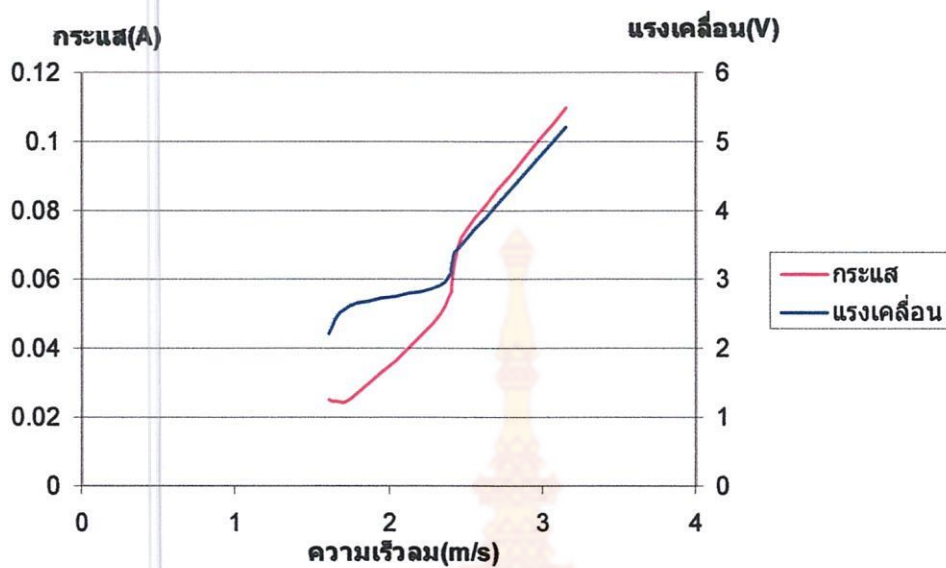
วัดกระแสได้ 0.05 แอมแปร์

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 5 | 1 | 1 | 2.1 |
| | | 2 | 1.5 |
| | | 3 | 1.6 |
| | | 4 | 1.8 |
| | | 5 | 1.1 |
| | | 6 | 0.7 |
| | | 7 | 2.0 |
| | | 8 | 1.7 |
| | | 9 | 1.8 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|----------------|----------------------|------------------|
| 5 | 1 | 10 | 1.7 |
| | | 11 | 1.3 |
| | | 12 | 1.7 |
| | | 13 | 2.4 |
| | | 14 | 1.7 |
| | | 15 | 1.7 |
| | | 16 | 1.9 |
| | | 17 | 1.7 |
| | | 18 | 1.4 |
| | | เฉลี่ย | 1.66 |
| | 2 | 1 | 1.9 |
| | | 2 | 1.9 |
| | | 3 | 1.7 |
| | | 4 | 1.7 |
| | | 5 | 1.6 |
| | | 6 | 1.5 |
| | | 7 | 1.8 |
| | | 8 | 2.5 |
| | | 9 | 2.2 |
| | | 10 | 2.4 |
| | | 11 | 2.2 |
| | | 12 | 1.7 |
| | | 13 | 1.9 |
| | | 14 | 1.5 |
| | | 15 | 1.3 |
| | | 16 | 1.3 |
| | | 17 | 1.8 |
| | | 18 | 1.4 |

| | | เฉลี่ย | 1.79 |
|--|---------------|----------------------|------------------|
| สรุป | | | |
| ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 255.2 rpm | | | |
| ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 338.7 rpm | | | |
| ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 281.8 rpm | | | |
| ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 294.2 rpm | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 1.73 m/s | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 2.6 โวลต์ | | | |
| วัดกระแสได้ 0.025 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 6 | 1 | 1 | 1.5 |
| | | 2 | 1.6 |
| | | 3 | 1.4 |
| | | 4 | 1.2 |
| | | 5 | 0.9 |
| | | 6 | 0.9 |
| | | 7 | 1.8 |
| | | 8 | 2.2 |
| | | 9 | 2.4 |
| | | 10 | 1.8 |
| | | 11 | 1.4 |
| | | 12 | 0.9 |
| | | 13 | 1.9 |
| | | 14 | 2.0 |
| | | 15 | 2.1 |
| | | 16 | 1.7 |
| | | 17 | 1.8 |
| | | 18 | 1.0 |
| | | เฉลี่ย | 1.58 |
| | 2 | 1 | 1.8 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|--|---------------|----------------------|------------------|
| 6 | 2 | 2 | 1.8 |
| | | 3 | 1.6 |
| | | 4 | 1.9 |
| | | 5 | 1.6 |
| | | 6 | 1.3 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 2.0 |
| | | 9 | 2.1 |
| | | 10 | 1.7 |
| | | 11 | 1.8 |
| | | 12 | 1.7 |
| | | 13 | 1.5 |
| | | 14 | 1.1 |
| | | 15 | 1.4 |
| | | 16 | 1.2 |
| | | 17 | 1.7 |
| | | 18 | 1.1 |
| | | เฉลี่ย | 1.62 |
| สรุป ความเร็วรอบของเพลา 1 เท่ากับ 260.7 rpm ความเร็วรอบของเพลา 2 เท่ากับ 253.4 rpm ความเร็วรอบของเพลา 3 เท่ากับ 230.6 rpm ความเร็วรอบของเพลา 4 เท่ากับ 259.8 rpm ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 1.60 m/s วัดแรงเคลื่อนได้ 2.2 โวลต์ วัดกระแสได้ 0.025 แอมแปร์ | | | |



ภาพที่ 4.15 แสดงความเร็วลมต่างๆที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อน



4.5 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆของแกนแนวตั้งไม้ใส่หน้ากาก

ตารางที่ 4.12 การทดลองหาแรงเคลื่อนที่ตำแหน่งความเร็วลมต่างๆ

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1.1 |
| | | 2 | 2.9 |
| | | 3 | 3.2 |
| | | 4 | 1.1 |
| | | 5 | 4.8 |
| | | 6 | 0.8 |
| | | 7 | 2.5 |
| | | 8 | 4.7 |
| | | 9 | 5.8 |
| | | 10 | 7.9 |
| | | 11 | 7.6 |
| | | 12 | 0.9 |
| | | 13 | 1.5 |
| | | 14 | 0.8 |
| | | 15 | 1.9 |
| | | 16 | 1.5 |
| | | 17 | 0.6 |
| | | 18 | 1.2 |
| | | เฉลี่ย | 2.82 |
| | 2 | 1 | 1.1 |
| | | 2 | 1.0 |
| | | 3 | 2.7 |
| | | 4 | 3.0 |
| | | 5 | 0.6 |
| | | 6 | 1.1 |
| | | 7 | 0.5 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|----------------------------------|----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 2 | 8 | 4.0 |
| | | 9 | 3.2 |
| | | 10 | 4.7 |
| | | 11 | 8.4 |
| | | 12 | 1.5 |
| | | 13 | 0.8 |
| | | 14 | 4.7 |
| | | 15 | 3.0 |
| | | 16 | 3.8 |
| | | 17 | 4.5 |
| | | 18 | 1.1 |
| | | เฉลี่ย | 2.76 |
| สรุป | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.79 m/s | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 5.7 โวลต์ | | | |
| วัดกระแสได้ 0.085 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 2 | 1 | 1 | 1.8 |
| | | 2 | 3.0 |
| | | 3 | 3.0 |
| | | 4 | 2.8 |
| | | 5 | 2.4 |
| | | 6 | 1.8 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 3.8 |
| | | 9 | 4.7 |
| | | 10 | 4.0 |
| | | 11 | 4.5 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 2 | 1 | 12 | 2.9 |
| | | 13 | 2.1 |
| | | 14 | 1.4 |
| | | 15 | 1.5 |
| | | 16 | 1.2 |
| | | 17 | 1.4 |
| | | 18 | 1.4 |
| | | เฉลี่ย | 2.53 |
| | 2 | 1 | 1.8 |
| | | 2 | 1.8 |
| | | 3 | 2.3 |
| | | 4 | 2.2 |
| | | 5 | 0.8 |
| | | 6 | 1.9 |
| | | 7 | 1.5 |
| | | 8 | 2.7 |
| | | 9 | 3.4 |
| | | 10 | 3.2 |
| | | 11 | 2.3 |
| | | 12 | 2.7 |
| | | 13 | 1.5 |
| | | 14 | 2.0 |
| | | 15 | 2.1 |
| | | 16 | 2.2 |
| | | 17 | 1.9 |
| | | 18 | 1.5 |
| | | เฉลี่ย | 2.1 |

| สรุป | | | |
|----------------------------------|--------------|----------------------|------------------|
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.32 m/s | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 3.6 โวลต์ | | | |
| วัดกระแสได้ 0.025 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กังหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 3 | 1 | 1 | 1.7 |
| | | 2 | 1.7 |
| | | 3 | 1.7 |
| | | 4 | 1.7 |
| | | 5 | 1.1 |
| | | 6 | 0.8 |
| | | 7 | 2.8 |
| | | 8 | 3.6 |
| | | 9 | 3.8 |
| | | 10 | 3.5 |
| | | 11 | 3.3 |
| | | 12 | 1.9 |
| | | 13 | 1.3 |
| | | 14 | 1.9 |
| | | 15 | 2.0 |
| | | 16 | 2.4 |
| | | 17 | 2.0 |
| | | 18 | 1.7 |
| | | เฉลี่ย | 2.16 |
| | 2 | 1 | 1.8 |
| | | 2 | 1.5 |
| | | 3 | 2.6 |
| | | 4 | 2.2 |
| | | 5 | 1.9 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|--|----------------|----------------------|------------------|
| 3 | 2 | 6 | 1.2 |
| | | 7 | 2.2 |
| | | 8 | 2.3 |
| | | 9 | 2.7 |
| | | 10 | 2.4 |
| | | 11 | 2.3 |
| | | 12 | 2.8 |
| | | 13 | 1.3 |
| | | 14 | 1.4 |
| | | 15 | 1.8 |
| | | 16 | 1.5 |
| | | 17 | 1.5 |
| | | 18 | 1.5 |
| | | เฉลี่ย | 1.94 |
| สรุป ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 2.05 m/s วัดแรงเคลื่อนได้ 2.9 โวลต์ วัดกระแสได้ 0.001 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 4 | 1 | 1 | 1.4 |
| | | 2 | 1.3 |
| | | 3 | 1.6 |
| | | 4 | 1.4 |
| | | 5 | 1.5 |
| | | 6 | 1.2 |
| | | 7 | 2.3 |
| | | 8 | 3.4 |
| | | 9 | 2.8 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|----------------|----------------------|------------------|
| 4 | 1 | 10 | 2.9 |
| | | 11 | 2.6 |
| | | 12 | 1.5 |
| | | 13 | 1.4 |
| | | 14 | 1.8 |
| | | 15 | 2.5 |
| | | 16 | 2.1 |
| | | 17 | 1.9 |
| | | 18 | 1.3 |
| | | เฉลี่ย | 1.94 |
| | 2 | 1 | 1.2 |
| | | 2 | 1.5 |
| | | 3 | 2.6 |
| | | 4 | 2.8 |
| | | 5 | 2.2 |
| | | 6 | 1.6 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 2.5 |
| | | 9 | 2.9 |
| | | 10 | 2.8 |
| | | 11 | 2.7 |
| | | 12 | 2.6 |
| | | 13 | 1.2 |
| | | 14 | 1.5 |
| | | 15 | 1.8 |
| | | 16 | 1.4 |
| | | 17 | 1.3 |
| | | 18 | 1.3 |

| | | เฉลี่ย | 1.99 |
|----------------------------------|---------------|----------------------|------------------|
| สรุป | | | |
| ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 1.96 m/s | | | |
| วัดแรงเคลื่อนได้ 2.4 โวลต์ | | | |
| วัดกระแสได้ 0.0075 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 5 | 1 | 1 | 1.5 |
| | | 2 | 1.4 |
| | | 3 | 1.5 |
| | | 4 | 1.6 |
| | | 5 | 1.0 |
| | | 6 | 1.2 |
| | | 7 | 2.1 |
| | | 8 | 3.0 |
| | | 9 | 2.9 |
| | | 10 | 2.1 |
| | | 11 | 2.1 |
| | | 12 | 1.8 |
| | | 13 | 0.9 |
| | | 14 | 1.4 |
| | | 15 | 1.9 |
| | | 16 | 1.9 |
| | | 17 | 1.5 |
| | | 18 | 1.4 |
| | | เฉลี่ย | 1.73 |
| | 2 | 1 | 1.5 |
| | | 2 | 2.1 |
| | | 3 | 2.1 |
| | | 4 | 1.8 |

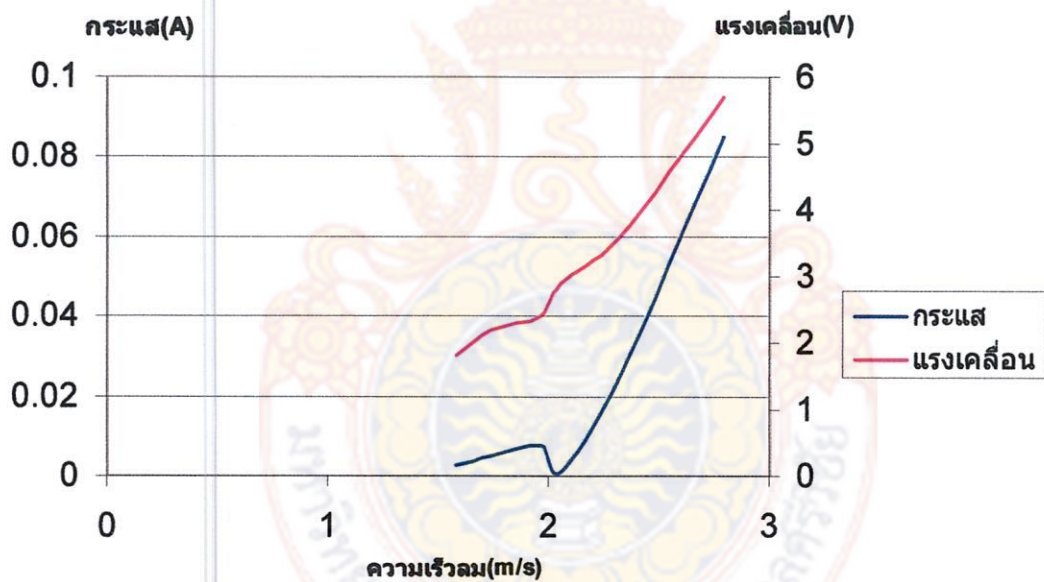
| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|--|----------------|----------------------|------------------|
| 5 | 2 | 5 | 1.8 |
| | | 6 | 1.6 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 1.9 |
| | | 9 | 2.2 |
| | | 10 | 2.2 |
| | | 11 | 1.9 |
| | | 12 | 2.1 |
| | | 13 | 1.1 |
| | | 14 | 1.3 |
| | | 15 | 1.6 |
| | | 16 | 1.4 |
| | | 17 | 1.4 |
| | | 18 | 1.0 |
| | | เฉลี่ย | 1.72 |
| สรุป ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 1.73 m/s วัดแรงเคลื่อนได้ 2.2 โวลต์ วัดกระแสได้ 0.005 แอมแปร์ | | | |
| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
| 6 | 1 | 1 | 1.2 |
| | | 2 | 1.2 |
| | | 3 | 1.0 |
| | | 4 | 1.1 |
| | | 5 | 0.9 |
| | | 6 | 1.0 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 1.8 |

| วัดครั้งที่ | กึ่งหน้าแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|----------------|----------------------|------------------|
| 6 | 1 | 9 | 1.9 |
| | | 10 | 2.0 |
| | | 11 | 1.5 |
| | | 12 | 1.5 |
| | | 13 | 1.7 |
| | | 14 | 1.6 |
| | | 15 | 1.7 |
| | | 16 | 1.8 |
| | | 17 | 1.5 |
| | | 18 | 1.4 |
| | | เฉลี่ย | 1.48 |
| | 2 | 1 | 1.8 |
| | | 2 | 1.8 |
| | | 3 | 2.1 |
| | | 4 | 2.2 |
| | | 5 | 2.2 |
| | | 6 | 1.7 |
| | | 7 | 1.9 |
| | | 8 | 1.8 |
| | | 9 | 2.1 |
| | | 10 | 1.7 |
| | | 11 | 1.8 |
| | | 12 | 1.6 |
| | | 13 | 1.1 |
| | | 14 | 1.4 |
| | | 15 | 1.5 |
| | | 16 | 1.2 |
| | | 17 | 1.2 |

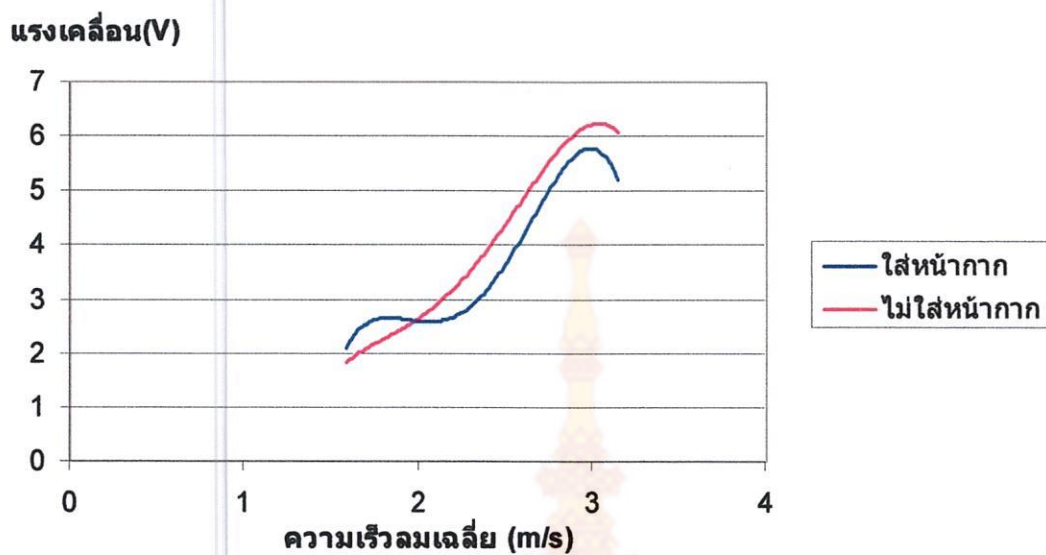
| วัดครั้งที่ | กึ่งหันแถวที่ | ตำแหน่งวัดความเร็วลม | ความเร็วลม (m/s) |
|-------------|---------------|----------------------|------------------|
| 6 | 2 | 18 | 1.0 |
| | | เฉลี่ย | 1.67 |

สรุป

ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมด 1.58 m/s
 วัดแรงเคลื่อนได้ 1.8 โวลต์
 วัดกระแสได้ 0.0025 แอมแปร์



ภาพที่ 4.16 แสดงความเร็วลมต่างๆที่สามารถผลิตแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 4.16 แสดงความแตกต่างระหว่างใส่หน้ากากกับไม่ใส่หน้ากาก



บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการทดลองชุดกำเนิดพลังงานลมทั้ง 2 แบบ คือ แบบแนวแกนตั้ง และแบบแนวแกนนอนทำให้ทราบข้อจำกัดของกังหันแต่ละแบบดังนี้

กังหันแบบแนวแกนนอน

จุดเด่น

- สามารถทำความเร็วรอบได้สูง
- อุโมงค์ลมมีผลให้ความเร็วลมสูงขึ้น
- ผลิตรกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบแนวแกนตั้ง

จุดด้อย

- การเริ่มต้นในการหมุนเคลื่อนที่ของใบในเริ่มแรกต้องใช้ความเร็วลมที่สูง
- ใบกังหันจะทำงานได้ดีเมื่อมีลมพัดตั้งฉากกับใบ

กังหันแบบแนวแกนตั้ง

จุดเด่น

- มีพื้นที่รับลมมากทำให้หมุนได้ในความเร็วลมที่ต่ำ
- สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง
- มีแรงบิดมาก

จุดด้อย

- มีความเร็วรอบน้อยกว่าแบบแกนแนวนอน
- ผลิตรกระแสไฟฟ้าได้น้อย
- มีความซับซ้อนมากกว่าแบบแนวแกนนอน
- ต้องใช้ใบกังหันเยอะกว่าแบบแกนแนวนอน

5.2 ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินโครงการ

ในการจัดทำชุดจำลองกำแพงพลังงานลม มีปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ดังนี้

5.2.1 ผลงานที่ออกมาต้องมีความสวยงามเป็นที่ยอมรับของผู้พบเห็นจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการออกแบบ

5.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทำโครงการหายาก ไม่มีในพื้นที่ใกล้เคียงต้องสั่งจากกรุงเทพมหานคร จึงทำให้เกิดการล่าช้าในการดำเนินงาน

5.2.3 เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการแนวความคิดใหม่เพื่อใช้พลังงานลมมาทดแทนจึงต้องทำการทดลองหลายๆวิธี เพื่อให้ได้ชุดจำลองกำแพงพลังงานที่ดีที่สุด

5.2.4 ในการจ้างทำวัสดุที่ต้องการหาว่าร้านที่จะทำยาก

5.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการมีไม่มากพอที่จะทำให้โครงการบรรลุเป้าหมายได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

กังหันลมที่ทำขึ้นเป็นต้นแบบนี้ยังไม่สมบูรณ์ดีนัก ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงควรปรับปรุงอุปกรณ์บางส่วนให้ดีขึ้น โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับอายุการใช้งาน เพราะจากการสังเกตพบว่าตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาอุปกรณ์และโครงสร้างต่างๆจะเกิดภาวะถูกกัดกร่อนกลายเป็นสนิม และสึกกร่อนจากสภาพที่สัมผัสลมความเร็วสูง รวมทั้งการป้องกันจากน้ำฝนยังไม่ดีนัก

ใบกังหันแบบที่ใช้ยังไม่ใช่ที่ผ่านการทดลองว่ามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งใบกังหันแบบแนวนอนได้ดัดแปลงมาจากใบพัดของเครื่องบินวิทยุ และใบกังหันแนวแกนตั้งได้ทำแบบทรงกระบอกผ่าครึ่งเพราะง่ายในการออกแบบ ซึ่งไม่ได้ทดลองถึงประสิทธิภาพของใบกังหันชนิดนี้ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับชุดจำลองกำแพงพลังงานลมอาจจะยังไม่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้งานจริง

อนึ่งปริมาณพลังงานลมในประเทศไทยนั้นมีความค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการเลือกสถานที่ติดตั้งนับว่ามีส่วนสำคัญมาก ว่าการติดตั้งกังหันลมจะมีความคุ้มค่าหรือไม่

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก ความเร็วลมปี พ.ศ. 2551



