

การพัฒนากังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

THE DEVELOPMENT OF WIND TURBINE  
FOR ELECTRICAL GENERATOR

นายกฤตยชญ์ ทิพย์วัลย์

นายพีรศิลป์ อัครเดชเรืองศรี

นายจิรยุทธ เจริญไพบูลย์กิจ



อาจารย์ที่ปรึกษา

ร.ศ. ทวี เทศเจริญ

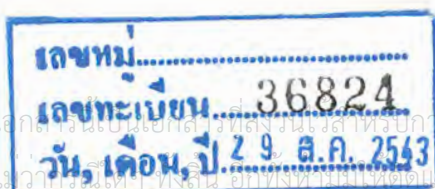
ผ.ศ. จำลอง ปราบแก้ว

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542



# **THE DEVELOPMENT OF WIND TURBINE FOR ELECTRICAL GENERATOR**



**MR. KRITTAYOCH TIPPAWALN**  
**MR. PERASILP ACKARADEJRUANGSRI**  
**MR. JIRAYUT JAROENPIBOONKIT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542  
การพัฒนากังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

โดย

นายกฤษฎชัย ทิพย์วัลย์  
นายพีรศิลป์ อัครเดชเรืองศรี  
นายจิรยุทธ เจริญไพบูลย์กิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ร.ศ. ทวี เทศเจริญ)



(ผ.ศ. จ้างลอง ปราบแก้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การพัฒนากังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

นักศึกษา

กฤตยชญ์

ทิพวัลย์

พีรศิลป์

อัครเดชเรืองศรี

จิรยุทธ

เจริญไพบูลย์กิจ

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ร.ศ. ทวี

เทศเจริญ

ผ.ศ. จำลอง

ปราบแก้ว

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการศึกษาถึงหลักการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine) กล่าวถึงพลังงานที่ได้จากลมหรือพลังงานลมเพื่อนำมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า การคำนวณและการออกแบบกังหันลมโดยใช้ความรู้ทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) และข้อมูลจากการทดสอบกังหันลม ซึ่งนำมาจากหนังสืออ้างอิงเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วขนาดต่าง ๆ และเหมาะสมกับลักษณะใบพัดของกังหันลม รวมถึงการออกแบบโครงสร้างและฐานของกังหัน , การหาทำเลที่ตั้ง และองค์ประกอบอย่างอื่นที่เป็นประโยชน์ในการสร้างกังหันลม โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึง การออกแบบกังหันลมชนิด แกนหมุนในแนวนอนแบบ 2 ใบ (Horizontal axis rotate) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร และ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1 กิโลวัตต์

|                |                                                                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thesis Title   | The Development of Wind Turbine for Electrical Generator                                                |
| Student        | Krittayoch Tippawaln<br>Perasilp Ackaradejruangsri<br>Jirayut Jaroenpiboonkit                           |
| Level of Study | Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering<br>King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang |
| Year           | 1999                                                                                                    |
| Thesis Advisor | Thavee Teschareon<br>Chamlong Prabkaew                                                                  |

### ABSTRACT

This thesis presents the principle and design of wind turbine. The thesis also discusses how electrical energy could be generated by the mean of wind energy. The wind turbine is designed according to the experimental data acquired from simplified wind power system for experiment, aerodynamic , aeronautics and flight mechanics. The thesis also discusses about the design of structure and base of wind turbine , and the method of selecting the site. The goal of the research is the design and fabrication of a horizontal 2-blade wind turbine with a diameter of 3 metres which is capable of generating 1 Kw.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก รศ.ทวี เทศเจริญและ ผศ. จำลอง ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา และ อาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหา ขอขอบคุณ พี่มณฑา เทียมเมือง ที่ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และ เครื่องมือรวมทั้งข้อมูลของแหล่งวัสดุ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนที่มีส่วนร่วมในการทำให้งานทั้งหมดสำเร็จ

กฤตยชญ์ ทิพวัลย์

พีรศิลป์ อัครเดชเรืองศรี

จิรายุทธ เจริญไพฑูรย์กิจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|                                     | หน้า |
|-------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                     | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ                     | III  |
| สารบัญ                              | IV   |
| สารบัญตาราง                         | V    |
| สารบัญรูป                           | VII  |
| บทที่ 1 ลม (Wind)                   |      |
| 1.1 ความเร็วลมเฉลี่ย                | 2    |
| 1.2 ความเร็วลมที่ความสูงใดๆ         | 3    |
| 1.3 เครื่องมือวัดความเร็วลม         | 3    |
| บทที่ 2 กังหันลม (Wind mill)        |      |
| 2.1 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวดิ่ง | 6    |
| 2.2 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน  | 8    |
| 2.3 ประสิทธิภาพของกังหันลม          | 9    |
| 2.4 การเลือกสถานที่ตั้ง             | 10   |
| 2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกำลังลม   | 13   |
| 2.6 การคำนวณกำลังงานจากกังหันลม     | 14   |
| บทที่ 3 ทฤษฎีการออกแบบกังหันลม      |      |
| 3.1 แนวการออกแบบเบื้องต้น           | 18   |
| 3.2 การออกแบบทางพลศาสตร์            | 18   |
| 3.3 แรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหัน    | 24   |
| 3.4 คุณสมบัติของแรงบิดและกำลังงาน   | 25   |
| 3.5 ระบบส่งกำลัง                    | 25   |
| 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า              | 27   |
| 3.7 ตัวควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้า        | 27   |
| บทที่ 4 การคำนวณหาขนาดแอร์ฟอยล์     | 29   |
| บทที่ 5 โครงสร้าง                   | 35   |
| บทที่ 6 ส่วนประกอบและการติดตั้ง     |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

|                            |    |
|----------------------------|----|
| ✓ 6.1 ใบพัด                | 47 |
| ✓ 6.2 ส่วนศูนย์กลางการหมุน | 48 |
| ✓ 6.3 โครงสร้าง            | 51 |
| ✓ 6.4 หาง                  | 52 |

### บทที่ 7 การคำนวณประสิทธิภาพ

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| ✓ 7.1 สมการโมเมนตัม                | 54 |
| ✓ 7.2 Power ที่ได้จากการคำนวณ      | 56 |
| ✓ 7.3 การคำนวณ Output จากการออกแบบ | 56 |

### ✓ บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์

เอกสารอ้างอิง

60

✓ ภาคผนวก

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                       | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| 4.1 กราฟแสดงมุมปะทะต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบพัดแบบต่างๆ     | 31   |
| 4.2 ตารางค่า UPPER และ LOWER ของใบพัดชนิดต่างๆ                 | 32   |
| 7.1 แสดงค่าความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์ $C_D$ กับอัตราส่วนของคอร์ด | 57   |
| 7.2 ค่าความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับค่าสัมประสิทธิ์ $C_D, C_L$     | 58   |



## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                         | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 รูปแบบการทำงานของกังหันลม                                                  | 2    |
| 1.2 ตัวบอกทิศทางลม                                                             | 3    |
| 1.3 ส่วนประกอบของแอนิเมเตอร์ชนิดถ้วย                                           | 4    |
| 1.4 ส่วนประกอบของแอนิเมเตอร์ชนิดผลิตกระแสไฟฟ้า                                 | 5    |
| 2.1 แสดงภาพด้านบนของกังหันลม แบบ 2,3 และ 4 ใบ                                  | 6    |
| 2.2 แบบของกังหันลมหมุนในแนวตั้ง                                                | 7    |
| 2.3 กังหันลมหมุนในแนวนอน                                                       | 9    |
| 2.4 ผลกระทบของลมจากพื้นที่ต่างๆ ณ ความเร็วต่างๆ                                | 11   |
| 2.5 อัตราการเร่งของลมผ่านเนินเขา                                               | 11   |
| 2.6 ผลของการจัดเรียงของกังหันลมในความเร็วลม ณ ความสูงต่างๆ                     | 11   |
| 2.7 การดูแลการปฏิบัติในการเลือกทำเลที่ตั้ง                                     | 12   |
| 2.8 ข้อเสนอแนะของภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับการทดลองของการเพิ่มความเร็วลม | 12   |
| 3.1 แสดงลักษณะและแรงต่างๆ ที่กระทำที่แอร์ฟอยล์                                 | 19   |
| 3.2 แสดงรูปแบบแอร์ฟอยล์ในลักษณะต่างๆ                                           | 20   |
| 3.3 ค่าประกอบของแรงยกและแรงลาก                                                 | 21   |
| 3.4 แสดงค่า $(C_D/C_L)_{min} \propto$                                          | 21   |
| 3.5 โซลิตีตี้                                                                  | 23   |
| 3.6 แสดงการงอของใบพัด                                                          | 24   |
| 3.7 แสดงลักษณะของกำลังงานและแรงบิด                                             | 26   |
| 3.8 แสดงตัวควบคุมแรงเคลื่อนแบบแม่คานิกและอิเล็กทรอนิกส์                        | 28   |
| 4.1 ลักษณะของแอร์ฟอยล์                                                         | 29   |
| 4.2 แสดงค่า U/V ต่อ ค่าประสิทธิภาพ                                             | 30   |
| 4.3 รูปแบบแอร์ฟอยล์ที่ได้                                                      | 34   |
| 5.1 โครงถักแบบต่างๆ                                                            | 36   |
| 5.2 ลักษณะของโครงถัก                                                           | 36   |
| 5.3 ชิ้นส่วนรับสองแรง                                                          | 37   |
| 5.4 แรงในชิ้นส่วนรับสองแรง                                                     | 38   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                   | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| 5.5 แนวศูนย์กลางของชิ้นส่วน              | 38   |
| 5.6 โครงถักรับแรง                        | 39   |
| 5.7 ส่วนรับแรงดึงและแรงกด                | 40   |
| 5.8 ใคอะแกรมของเม็กซ์เวลล์               | 41   |
| 5.9 ภาคตัดแรง                            | 43   |
| 5.10 ลักษณะแรงต่าง ๆ                     | 44   |
| 5.11 ลักษณะแรงในโครงถัก                  | 45   |
| 6.1 แอร์ฟอยล์                            | 47   |
| 6.2 เพลาในแอร์ฟอยล์                      | 47   |
| 6.3 อลูมิเนียมท่อใบพัด                   | 48   |
| 6.4 เพลาหมุน                             | 48   |
| 6.5 แบร็งรับเพลา                         | 49   |
| 6.6 ส่วนหัวการหมุน                       | 49   |
| 6.7 ท่อรองเพลาหมุน                       | 49   |
| 6.8 ไข้ค                                 | 50   |
| 6.9 หน้าแปลนรองใบพัด                     | 50   |
| 6.10 ส่วนตัวกลางกึ่งหัน                  | 50   |
| 6.11 โครงเหล็กส่วนบน                     | 51   |
| 6.12 โครงเหล็กส่วนกลาง                   | 51   |
| 6.13 โครงเหล็กส่วนล่าง                   | 52   |
| 6.14 หาง                                 | 52   |
| 6.15 กึ่งหันลม                           | 53   |
| 7.1 การไหลที่สภาวะต่างๆ                  | 54   |
| 7.2 แสดงลักษณะและแรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์ | 56   |

## บทที่ 1

### ลม ( Wind )

ลม หมายถึง มวลของอากาศที่มีการเคลื่อนที่ จัดว่าลมเป็นพลังงานแบบหนึ่งโดยการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเกิดขึ้นได้เนื่องจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะลอยตัวสูงขึ้น ความกดอากาศต่ำ ทำให้ความหนาแน่นลดลง อากาศบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความกดอากาศสูง จะไหลเข้าไปชดเชยให้ความหนาแน่นเท่ากัน การที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงถูกโลกเพียงด้านเดียวเสมอ เป็นผลให้อุณหภูมิของผิวโลกในแต่ละภูมิภาคแต่ละแห่งไม่เท่ากัน จึงทำให้มีลมเกิดขึ้นตลอดเวลาหรือกล่าวได้ว่าลมคือการเคลื่อนที่ของอากาศนั่นเอง ซึ่งความเร็วลมของลมแตกต่างกันไปแล้วแต่ลักษณะภูมิประเทศและ ณ ระดับความสูงต่างๆ ก็จะมีความเร็วลมต่างกัน ซึ่งสูตรการคำนวณความเร็วลม ณ ระดับต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_x = V_r (h / 30)^{1/n} \quad (1.1)$$

เมื่อ

$V_x$  = ความเร็วลมที่ระดับความสูง ณ ระดับที่ต้องการทราบ

$V_r$  = ความเร็วลมที่ระดับอ้างอิง ความสูง 30 ฟุต

$h$  = ความสูงเหนือพื้นดิน

$1/n$  = เป็นค่าประมาณของการเพิ่มกำลัง

ปริมาณที่แทนค่าสำหรับค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ

$n = 7$  ในกรณีที่พื้นที่เป็นที่โล่งแจ้ง ในชนบทในทุ่งนา หรือที่ภูมิประเทศเป็นคลื่นเล็กน้อย

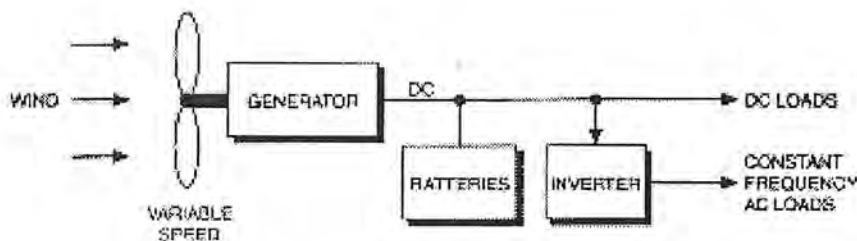
$n = 5$  ในกรณีที่พื้นที่เป็นคลื่นอย่างมากและมีสิ่งกีดขวาง

$n = 3$  ในกรณีที่พื้นที่เป็นพื้นรอบเมืองและใกล้รอบเมืองและพื้นที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวาง

การนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์นั้นจะต้องเปลี่ยนรูปพลังงานให้เป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าเสียก่อน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวแปลงพลังงาน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแปลงรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการดังนี้

ลมจะทำให้กังหันลมหมุน ( กังหันลม คือ เครื่องมือที่สามารถนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์ได้และทำให้ความเร็วของอากาศลดลง ) ซึ่งแกนของกังหันลมจะหมุนตามไปด้วย จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วการหมุนของแกนกังหัน ด้วยการทดสอบ ให้ความเร็วเหมาะสมกับเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำมาเรกติไฟด์ ( rectify )ให้เป็นกระแสตรง แล้วเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อนำไปใช้งานต่อไป (ดังรูปที่1.1)



รูปที่1.1 รูปแบบการทำงานของกังหันลม

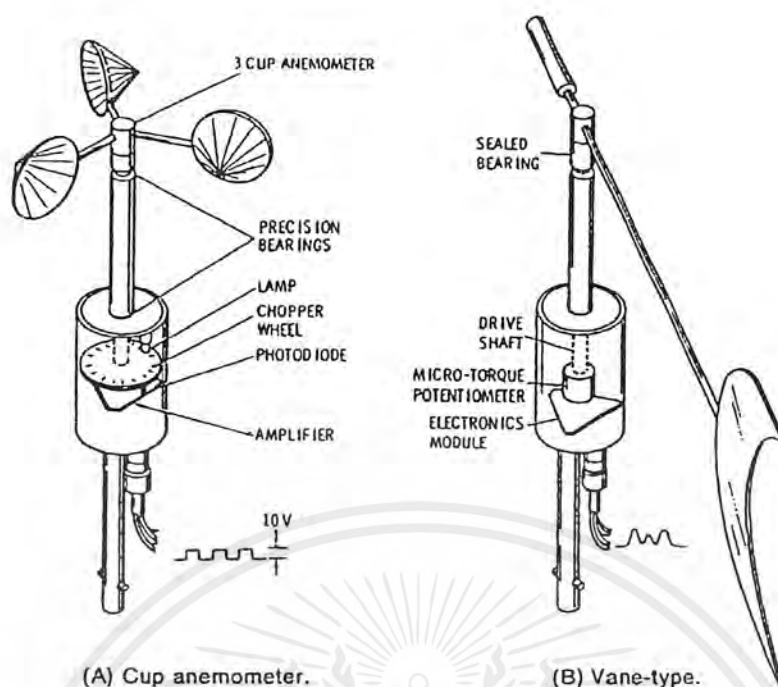
เนื่องจากความเร็วลมจะมีค่าไม่คงที่ องค์ประกอบที่มีส่วนในการกำหนดความเร็วและทิศทางนั้นมีหลายอย่าง แต่ก็สามารถที่จะทำนายหรือกำหนดลงไปได้ในช่วงเวลาหนึ่งที่บริเวณหนึ่ง ๆ โดยกำหนดจากสถิติข้อมูลที่มีการบันทึกไว้เป็นเวลาต่อเนื่องกัน

### 1.1 ความเร็วลมเฉลี่ย

การที่เราสามารถจะกำหนดพลังงานลมให้แน่นอนลงไปนั้นไม่ได้ เพราะว่าลมมีความเร็วไม่คงที่จึงต้องมีการตรวจสอบความเร็วลมตลอดเวลา และในการใช้งานจริง ๆ เราจะหาความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งก็พอแล้ว ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของลม (Wind Characteristic) ส่วนมากนั้นสามารถกำหนดรูปแบบได้ในกรณีที่ลมมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบเดียว เรียกว่า “Prevalent winds” ถ้ามีลักษณะการเคลื่อนที่มากกว่าหนึ่งแบบเรียกว่า “Energy winds” แบบแรกจะเกิดขึ้นในช่วงเวลานานกว่าแบบที่สอง ส่วนแบบที่สองนั้นให้พลังงานออกมามากที่สุดในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน

Prevalent wind นั้นจะเกิดขึ้นประมาณ 5 วันต่อสัปดาห์ และมีความเร็วประมาณ 8-24 Km/hr ส่วนแบบ Energy wind เกิดขึ้นประมาณ 2 วันต่อสัปดาห์ที่มีความเร็วประมาณ 16-40 Km/hr จะกล่าวได้ว่า ลมที่พัดในช่วงเวลา 30% มีกำลังงานมากกว่าลมที่พัดในช่วงเวลา 70 %

วิธีง่าย ๆ ในการกำหนดความเร็วลมเฉลี่ย คือนำข้อมูลจากสถานีวัดลมมาพิจารณา แต่ละประเทศไทยยังมีข้อมูลอยู่น้อย ดังนั้น ถ้ามีอุปกรณ์วัดความเร็วลม แอนิโมมิเตอร์ ( Anemometer ) และทิศทางการลม ( Wind direction ) ก็ทำการทดสอบเองได้ โดยทดสอบในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น หนึ่งเดือน หนึ่งปี แล้วหาความเร็วเฉลี่ยออกมา จะพบว่าความเร็วลมที่สามารถให้พลังงานออกมาได้เพียงพอ และไม่เป็นอันตรายแก่อุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในช่วง 20-40 Km/hr



(A) Cup anemometer.

(B) Vane-type.

รูปที่ 1.2 ตัวบอกทิศทางลม

## 1.2 ความเร็วลมที่ความสูงใด ๆ

ความเร็วลมในระยะความสูงต่าง ๆ กัน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน เช่น ความเร็วลมที่สูงจากพื้นดินขึ้นไป 100 ฟุต จะมีความเร็วลมเพิ่มขึ้น เป็น 2 เท่าของความเร็วเหนือพื้นดิน

สูตร ที่ใช้หาความเร็วที่ความสูงต่าง ๆ กัน ณ บริเวณหนึ่ง ๆ

$$\frac{V}{V_a} = \left( \frac{Z}{Z_a} \right)^{0.27960 + 0.03265 \ln Z_a} + V_a^{0.10528 \ln Z_a - (0.09831 + 0.055021 \ln Z + 0.00642 \ln Z \ln Z_a)} \quad (1.2)$$

เมื่อ

$V$  = ความเร็วลมที่ความสูง  $Z$

$V_a$  = ความเร็วลม  $Z_a$  ที่หาได้จากแอนนิโมมิเตอร์

## 1.3 เครื่องมือวัดความเร็วลม

เครื่องมือวัดความเร็วลมและทิศทางลม เป็นสิ่งสำคัญในการวิจัยพลังงานลมเพื่อที่จะให้ได้สถานที่ตั้งที่เหมาะสมในการที่จะนำมาพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

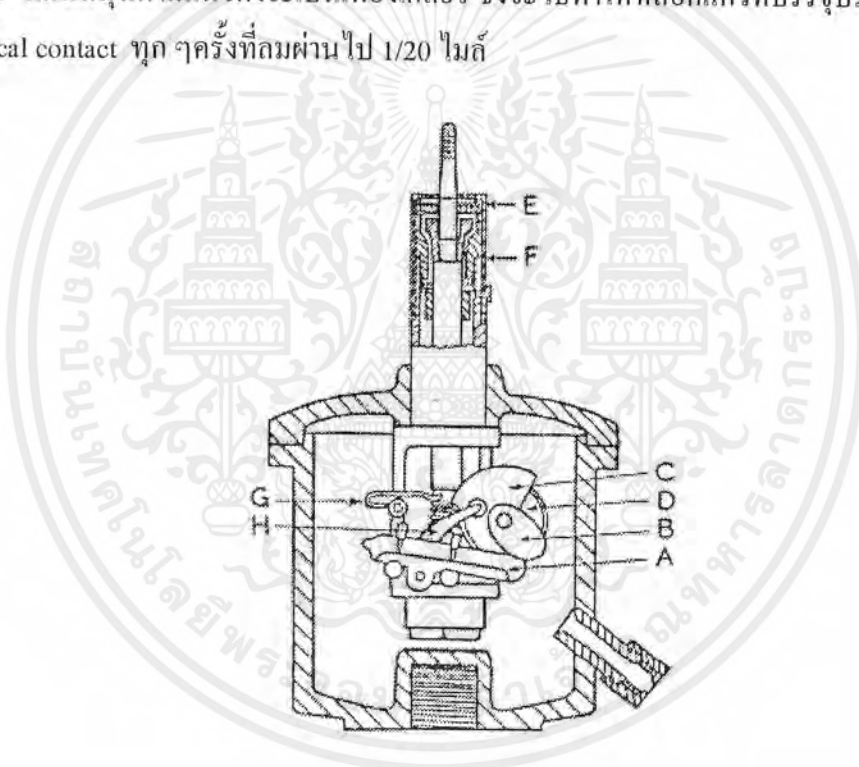
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนนิโมมิเตอร์ ( Anemometer ) คือเครื่องมือวัดความเร็วลมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบบถ้วย ( Cup anemometer ) ซึ่งเรียกว่า Robinson cup anemometer ตามชื่อผู้ที่พัฒนาขึ้นใช้คือ T. H. Robinson

แอนนิโมมิเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะคือ ตัวหมุนประกอบด้วยแกนตามแนวดิ่งซึ่งมีแขนตามแนวนอน 3 หรือ 4 อันติดอยู่โดยทำมุมซึ่งกันและกัน ที่ปลายแขนจะมีลูกถ้วยติดอยู่ ลูกถ้วยอยู่ในแนวดิ่งผ่านแกนหมุนและด้านนอกของลูกถ้วยจะเป็นทิศทางการหมุนและการหมุนไม่ขึ้นกับทิศทางการลม

แอนนิโมมิเตอร์ในปัจจุบันแบ่งได้ตามอุปกรณ์ที่สร้างเป็น 2 ชนิด คือ แบบ Mechanic และแบบ Electronic แบบ Mechanic ที่ใช้อยู่ตามสถานีตรวจอากาศมีอยู่ 2 แบบคือ

**1.3.1 Contact – type anemometer** แบบมาตรฐานทั่วไป ใช้เป็นแบบลูกถ้วย 3 ใบ เป็นตัวหมุนปลายของ แกนหมุนตามแนวดิ่งจะเป็นเฟืองเกลิย ซึ่งจะไปทำให้ลอคแก้วที่บรรจุปรอททำหน้าที่ Electrical contact ทุก ๆ ครั้งที่ลมผ่านไป 1/20 ไมล์



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของแอนนิโมมิเตอร์ชนิดถ้วย

จากรูปที่ 1.3 เป็นโครงสร้างภายในของแอนนิโมมิเตอร์ชนิดนี้

A คือ เมอคิวรีสวิทช์ , B เป็นลูกเบี้ยวที่ไปกระดก A ให้ทำงาน ซึ่ง B จะหมุนไปตามลูกน้ำหนัก C ลูกน้ำหนัก C หมุนขึ้นสูงได้ด้วยการดันของกระเดื่องบนเฟืองล้อซึ่งต่อประสานอยู่กับเฟืองเกียร์และลูกน้ำหนัก C จะตกลงเมื่อเคลื่อนขึ้นถึงตำแหน่งสูงสุด สำหรับเมอคิวรีสวิทช์นั้นต่อ

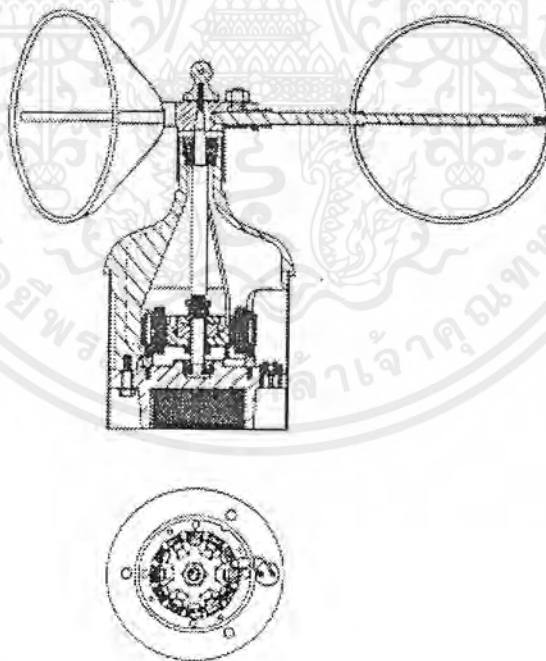
อยู่กับวงจรแบตเตอรี่เพื่อให้ Telephone message refistor ทำงาน แต่อาจจะใช้ electro – magnetic recorder แบบอื่นแทนได้ เครื่องมือชนิดนี้วัดความเร็วลมได้เที่ยงตรงที่ช่วงความเร็ว 0.2-0.3 เมตร / วินาที

**1.3.2 Cup – generator anemometer** แบบนี้วัดความเร็วลมได้อย่างต่อเนื่องเป็นไมล์ต่อชั่วโมง แบบล่าสุดที่ใช้อยู่มีลักษณะเป็นแบบตัวหมุนเป็นลูกถ้วยรูปกรวย 3 ใบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว ติดกับแขนสั้น ๆ ไขกับบอลเบริง

ปลายของแกนหมุนตามแนวตั้งประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร 11 ขั้ว ล้อมรอบด้วยสแตเตอร์ที่พันด้วยขดลวดที่มีความต้านทานต่ำทั้งหมดนี้ประกอบขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้แรงดัน 10 โวลต์ ที่ 100 รอบ/ นาที สำหรับเครื่องอ่านเป็น moving – coil volmeter หมุนได้ 240 มีสเกลเป็นไมล์ต่อชั่วโมงวัดได้ 5-100 ไมล์/ชม. และให้กระแสสลับสูงสุด 5 มิลลิแอมป์

นอกจาก แอนิโมมิเตอร์แบบลูกถ้วยที่ใช้แม่เหล็กแล้วยังมีแบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นแบบค่อนข้างใหม่ ดังรูปที่ 1.4 เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ปลายข้างหนึ่งของแกนหมุนติดกับวงล้อกลมที่เจาะรูโดยรอบแสงจะส่องจากหลอดไฟผ่านรูของวงล้อไปตกกระทบบนโฟโตไดโอดโดยเมื่อลมแรงวงล้อจะหมุนเร็วทำให้แสงตกโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แอมป์ไฟท์ ซึ่งมีโฟโตไดโอดประกอบด้วยอยู่จะมีระดับสัญญาณออกสูง ซึ่งสัญญาณออกถูกส่งผ่านสายไปยังเครื่องอ่านหรือบันทึกต่อไป

ราคาโดยประมาณของแอนิโมมิเตอร์ราคาประมาณ 1.5 – 3 หมื่นบาท



รูปที่ 1.4 ส่วนประกอบของแอนิโมมิเตอร์ชนิดผลิกระแสไฟฟ้า

## บทที่ 2

### กังหันลม ( Wind mill )

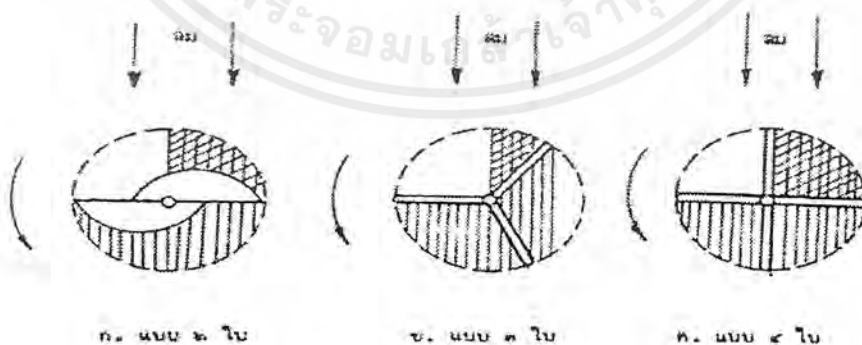
ในการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ เราต้องมีเครื่องแปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานรูปอื่น ซึ่งได้แก่กังหันลม ในทางทฤษฎี พลังงานที่ได้จากลม โดยผ่านทางกังหันลม จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 59.3 % โดยกังหันลมแบบต่างๆ นั้นจะให้กำลังงานออกมาได้น้อยมากเท่านั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ, ขนาดและการออกแบบ กังหันที่มีประสิทธิภาพต่ำจะมีขนาดใหญ่กว่าชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า

กังหันลมแบ่งตามแกนหมุนได้ 2 แบบ คือ

- กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง ( Vertical axle windmill )
- กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน ( Horizontal axis windmill )

#### 2.1 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

กังหันลมแบบนี้แกนหมุนของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นดิน กังหันลมแบบนี้มีคุณสมบัติคือสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง น้ำหนักของใบจะทิ้งลงในลักษณะสมมาตร ( Symmetry ) และไม่มีผลต่อความกว้างของใบ เมื่อเพิ่มแขนหมุน ( moment arm ) ไม่เป็นปัญหาต่อการติดตั้งฐาน การหมุนของใบจะอยู่ในแนวระนาบเดียวกันกับทิศทางลม ดังนั้นแรงปะทะจะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนโดยตรง ซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์จากแรงปะทะมีมากขึ้น ส่วนเสียของกังหันลมแบบนี้คือ ลักษณะการวางใบไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกใบ ในเวลาเดียวกัน เนื่องจากมีส่วนใบที่บังลมอยู่ และยังมีส่วนใบที่ถูกลมปะทะทำให้เกิดแรงต้านการหมุนขึ้นอีกด้วย

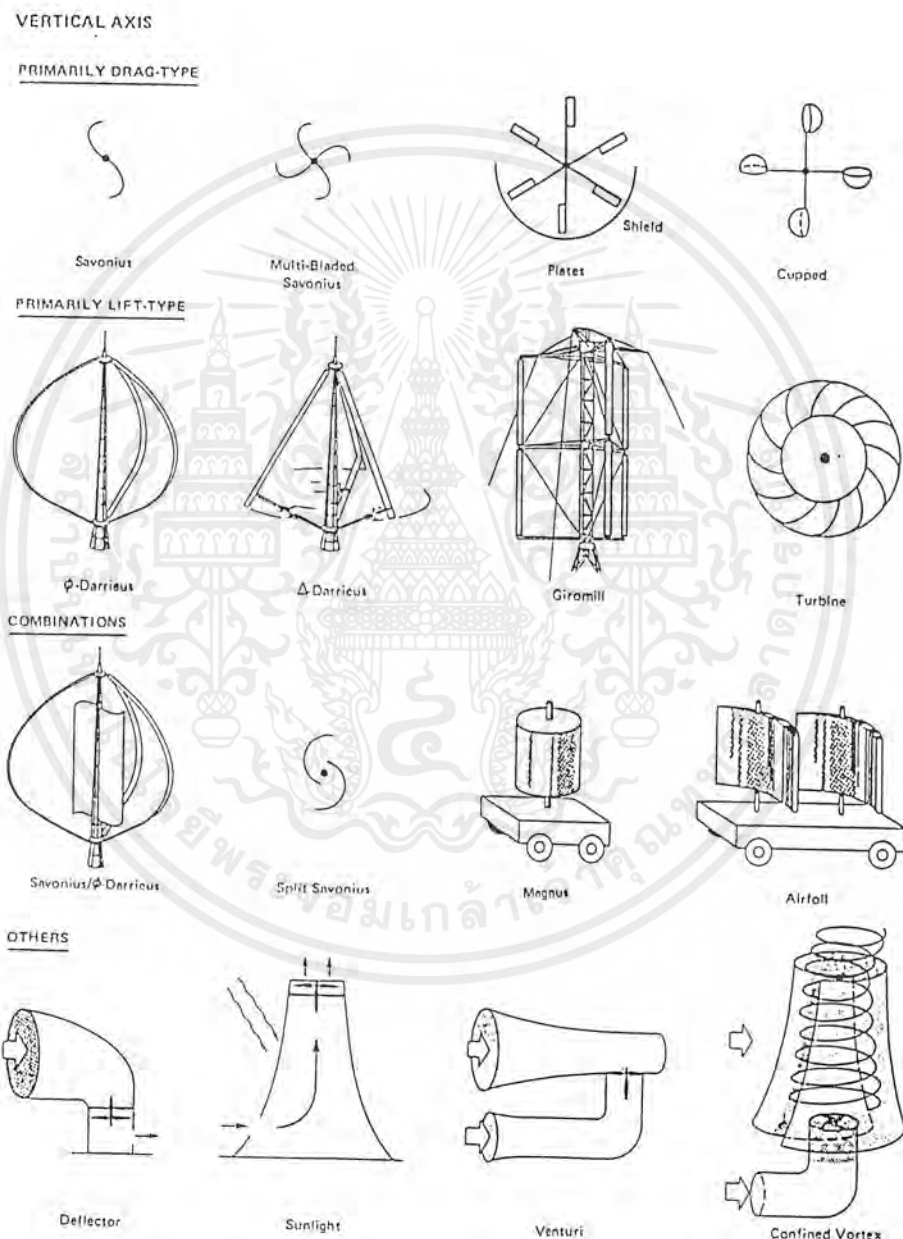


รูปที่ 2.1 แสดงภาพ ด้านบนของกังหันลม แบบ 2,3 และ 4 ใบ

## แบบของกังหันลมชนิดที่มีแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง

2.1.1 แบบซาโวเนียส หรือ เอสโรเตอร์ ( Savonius or S. rotor ) เป็นกังหันลมชนิด 2 ใบ การหมุนเกิดจากการที่ลมปะทะทางด้านเว้า แล้วทำให้ใบหมุนรอบแกน กังหันแบบนี้มีแรงบิดบนแกนสูง ให้พลังงานค่อนข้างคงที่ แต่ความเร็วรอบต่ำ ส่วนมากนำไปใช้งานทางด้านกล เช่น เครื่องสูบน้ำ

2.1.2 แบบดาร์เรียส ( Darrieus ) กังหันลมแบบนี้จะมีความเร็วรอบสูง แต่จะมีแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ฉะนั้นจะต้องมีตัวช่วยเริ่มต้นการหมุนในขณะไม่มีลมหรือลมแรงไม่พอ



รูปที่ 2.2 แบบของกังหันลมหมุนในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กังหันลมแบบแกนหมุนอยู่ในแนวนอน

กังหันลมแบบนี้จะมีแกนหมุนของใบพัดขนานกับพื้นดิน คุณสมบัติของกังหันลมแบบนี้คือใบของกังหันสามารถรับลมได้เต็มที่ และจะให้กำลังงานมากกว่าแบบแรกเมื่อเทียบขนาดเท่า ๆ กัน เพราะว่าแบบนี้มีพื้นที่หน้าตัดของส่วนรับลมของกังหันชนิดนี้เทียบเท่าแบบหมุนในแนวตั้ง กังหันแบบนี้มีความซับซ้อนมาก ติดตั้งลำบากต้องหันตัวกังหันลมเข้าสู่ทิศทางที่ลมผ่าน ใบพัดมีลักษณะอยู่ในแนวตั้งยึดติดกับเดือยของแกนหมุนในแนวนอนจำนวนใบพัดมีได้ตั้งแต่ 1 ใบขึ้นไป

เนื่องจากแบบแกนนอนรับลมทางเดียว จึงต้องมีเครื่องมือทำให้ตัวกังหันเข้าสู่ทิศทางลม และถ้าลมแรงมากก็จะเสียหายกว่าแบบหมุนแกนตั้ง จึงต้องออกแบบใบพัดให้มีลักษณะที่สามารถพับใบพัดหรือเบี่ยงเบนใบพัดออกจากทิศทางลมในช่วงเวลานั้น

### แบบของกังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวนอน

**2.2.1** แบบที่มีจำนวนใบไม่มาก คือมีใบตั้งแต่ 2-4 ใบ กังหันลมแบบนี้จะมีความเร็วรอบสูง คือประมาณ 300 รอบ / นาที หรือมากกว่า แต่แรงบิดเริ่มต้นต่ำ ดังนั้นกังหันลมแบบนี้จึงควรใช้ในที่ที่มีความเร็วลมพอประมาณจนถึงความเร็วลมสูง เมื่อความเร็วลมสูงจึงนิยมนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องการความเร็วรอบสูง

**2.2.2** แบบที่มีจำนวนใบมาก กังหันลมแบบนี้จะให้แรงบิดเริ่มต้นสูง แต่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ ดังนั้นกังหันประเภทนี้จึงเหมาะที่จะใช้งานทางกล เช่น ชุบน้ำรดพืชน้ำ, ปั๊มน้ำ เป็นต้น

### การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกังหันลมทั้ง 2 แบบ

#### กังหันลมแนวตั้ง

##### ข้อดี

- รับลมได้รอบด้าน
- น้ำหนักตกอยู่บนฐานสมดุลกว่า
- เริ่มหมุนได้เองที่ความเร็วต่ำ
- ระบบการผลิต ส่งกำลัง ทำได้ง่าย

##### ราคาถูก

- เพิ่มแขนการหมุนได้ไม่จำกัด

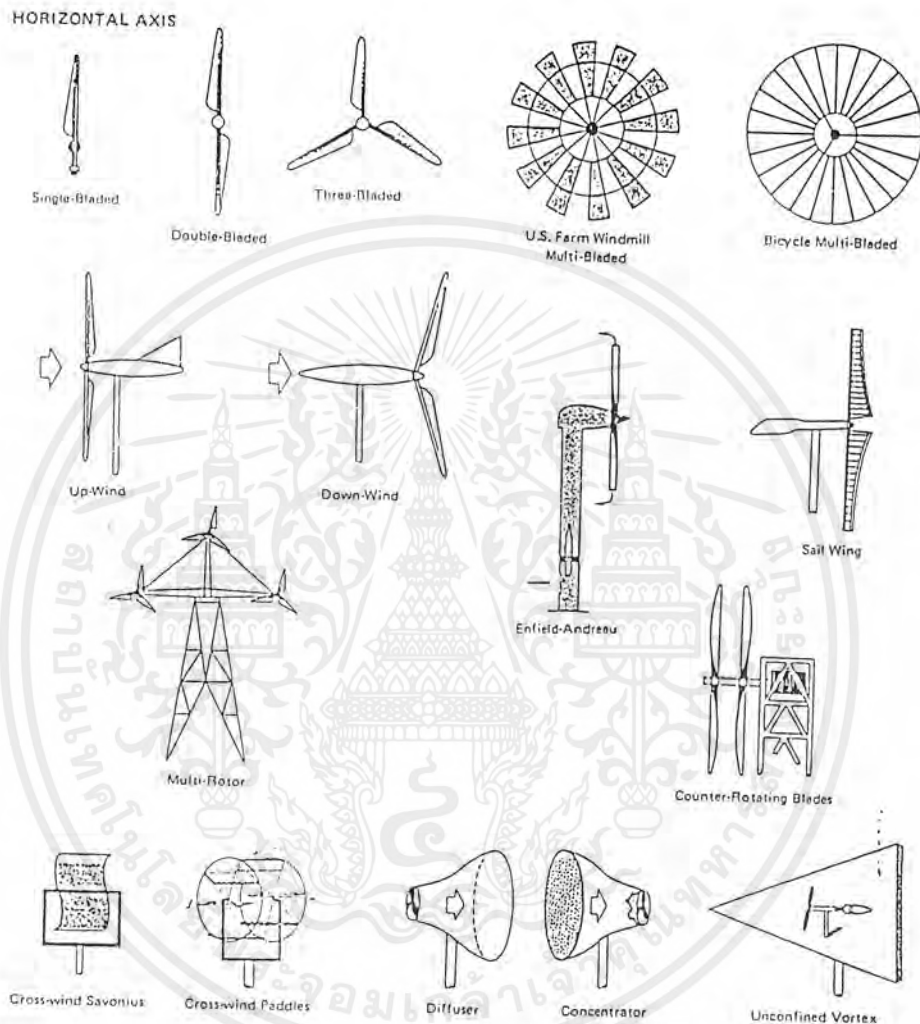
#### กังหันลมแนวนอน

- มีพื้นที่รับลมมากกว่า เมื่อน้ำหนักเท่ากัน
- มีประสิทธิภาพสูง
- มีแรงบิดรอบแกนสูง
- รอบจerkกว่าเมื่อความเร็วเท่ากัน

- รอบหมุนคงที่กว่า

### ข้อเสีย

- ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ
- มีปัญหาในการหมุนใบรับทิศทางลมที่เปลี่ยนไป
- เกิดแรงต้านการหมุน
- มีปัญหาในการประกอบใบพัดกับฐาน



รูปที่ 2.3 แบบของกังหันหมุนในแนวนอน

### 2.3 ประสิทธิภาพของกังหันลม

กังหันลมสามารถเอากำลังงานจากลมโดยตรง โดยการลดความเร็วลมให้ช้าลง ถ้ากังหันลมสามารถทำให้ลดความเร็วจากเดิมจนหยุดได้โดยสมบูรณ์แล้วคือ ความเร็วของลมหลังจากผ่านกังหันแล้วกลายเป็นศูนย์ จะได้พลังงานจากลม 100% แต่จริงๆ แล้วกังหันลมไม่สามารถทำให้ลมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดผ่านหยุดได้กำลังลมมากที่สุด ทางทฤษฎี ที่กังหันลมสามารถรับเอาไว้ได้จะเป็น 59.3 % ของกำลังทั้งหมด หมายความว่าสามารถลดความเร็วลมลงได้ประมาณ 3 ส่วนของความเร็วต้นเท่านั้น ดังนั้นกังหันลมที่สามารถเอากำลังงานจากลมออกมาได้มากที่สุด 59.3 % จึงถือว่ามีประสิทธิภาพ 100 %

ถ้ากังหันลมมีประสิทธิภาพ 75 % เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 75 % กำลังงานกลของกังหันลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 33.34 % คือ

$$75 \% \text{ ของกังหันลม คือ } 75 \% \text{ ของ } 59.3 \% = 0.75 \times 59.3$$

$$75 \% \text{ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า} = 0.75 \times 59.3 \times 0.75 = 33.34 \%$$

ค่าประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันลม การออกแบบและการสูญเสียของระบบเฟืองต่างๆ ในกรณีที่ใช้สำหรับลดความเร็วให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเห็นได้ชัดว่า 0.1-0.4 (10 % - 40 %) ไม่มากกว่านี้ ค่านี้กำหนดให้เป็น efficiency factor ของกังหันลม ใช้สัญลักษณ์ E ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดกังหันและ speed ratio โดย speed ratio ของกังหันขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดผ่าน การหมุนของกังหันหมายความว่า ส่วนประกอบของใบพัดบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางมีการหมุนช้า ๆ ขณะที่ส่วนปลายของของใบพัดหมุนเร็ว อัตราส่วนการหมุนขึ้นอยู่กับรัศมีใบพัดและความเอียงใบพัด

จากลักษณะการหมุนที่กล่าวแล้วสามารถกำหนดอัตราส่วนการหมุนของความเร็วซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการออกแบบกังหัน ให้ค่านี้เป็น  $u/v$  เมื่อ

$u$  = ความเร็วของกังหันลมที่มีใบพัดเอียงทำมุมเอียงในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง

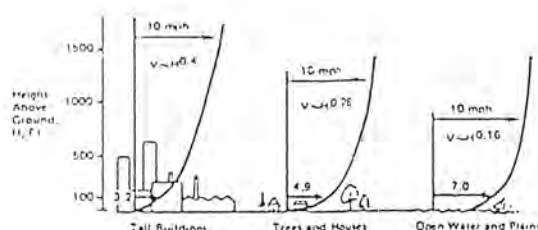
$v$  = ความเร็วลมที่พัดผ่านกังหัน

ค่า  $u/v$  นี้ประมาณ 1-2 เมื่อกังหันหมุนช้า และเท่ากับ 5-7 หรือ 8 เมื่อกังหันหมุนเร็ว

## 2.4 การเลือกสถานที่ตั้ง

ต้องใช้ความระมัดระวัง เพราะมีแรงเชื่อมกับแรงกดในแนวตั้งฉากกับแนวระดับของกระแสลม เมื่อกระแสลมพัดผ่านไปบนพื้นของโลก แรงเฉือนนี้จะมีผลเมื่อกระแสความเร็วต่ำใกล้ผิวโลกมากกว่าที่สูงขึ้นไป ในกรณีเฉพาะคือเมื่อการไหลเป็นแบบอิสระที่สูงมากพอที่จะทำให้ไม่มีผลของผิวการเฉือน

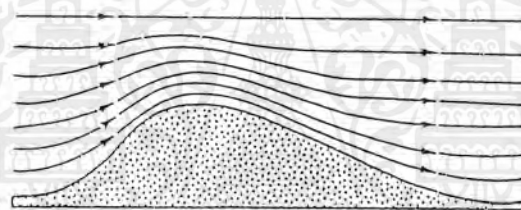
กฎทั่วไป คือ ความเร็วที่ใกล้ผิวโลกจะเพิ่มเป็นกำลังเศษหนึ่งส่วนเจ็ดของความสูงเหนือผิวโลก เหนือระดับน้ำดังรูปที่ 2.4



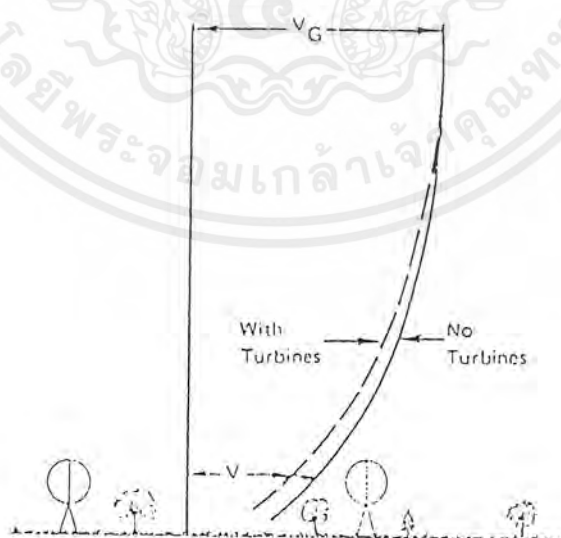
รูปที่ 2.4 ผลกระทบของลมจากพื้นที่ต่างๆ ณ ความเร็วต่างๆ

แต่อย่างไรก็ตามแรงก็ตามแรงเฉือนลมหรือกำลังลมที่ได้จะมีความเรียบของผิวโลกอีกด้วย ถ้าในพื้นที่นั้นมีตึกสูง ๆ ถึงปลูกสร้าง ต้นไม้ หรือ ถึงก็คขวางอย่างอื่นความเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมต่อความสูงเหนือระดับพื้นดินจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่เป็นที่ราบ ดังรูปที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

ผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ กระแสลมจะมีความเร่งเพิ่มขึ้นเมื่อพัดผ่านเนินหรือหุบเขาแคบ ๆ ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มพลังงานที่ได้ออกมาของกังหันลมจึงมีการนิยมตั้งกังหันลมในสถานที่เช่นนี้เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด

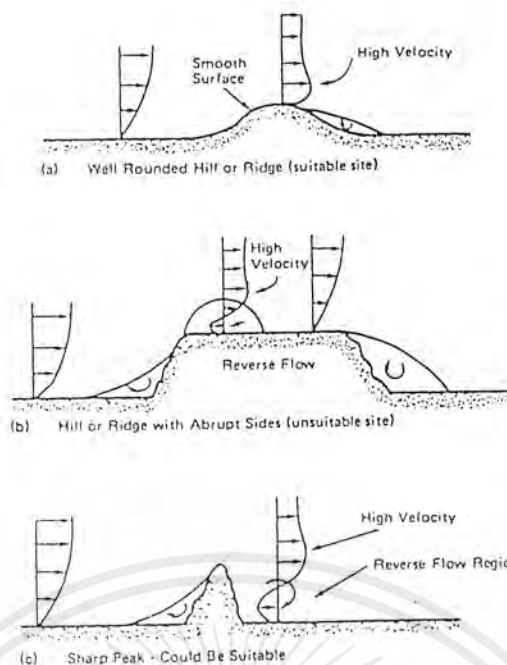


รูปที่ 2.5 อัตราการเร่งของลมผ่านเนินเขา

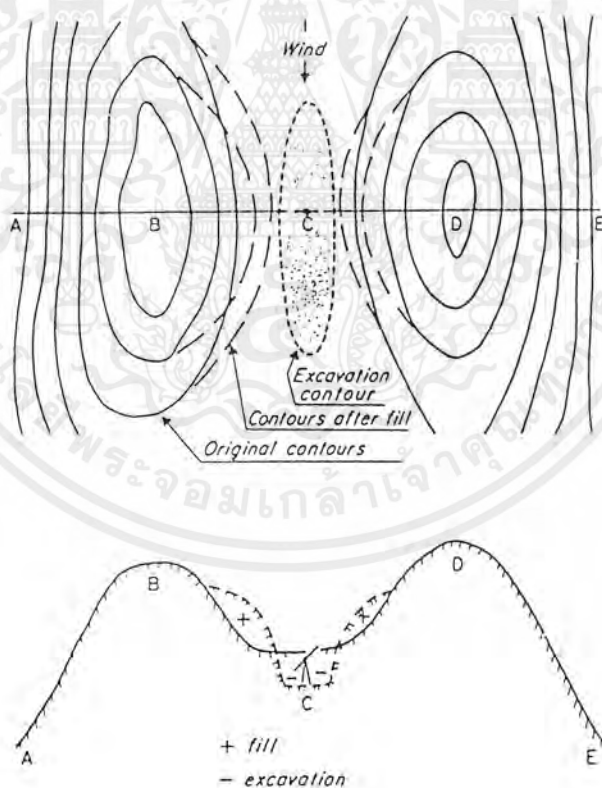


รูปที่ 2.6 ผลของการจัดเรียงของกังหันลมในความเร็วลม ณ ความสูงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การดูแลการปฏิบัติในการเลือกทำเลที่ตั้ง



รูปที่ 2.8 ข้อเสนอชนิดของภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับการทดลองของการเพิ่มความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปลักษณะของสถานที่ตั้งที่เหมาะสม

1. มีความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปีสูงพอ (หาได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา)
2. ไม่มีสิ่งกีดขวางกระแสลมในทางสูง
3. ควรจะอยู่บนเนินที่เรียบหรืออยู่บนเกาะในทะเลหรือเป็นที่ราบ
4. ช่องระหว่างภูเขา

| ลักษณะของลม                 | ผลกระทบ                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * ไม่สม่ำเสมอ               | * พลังงานที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งเก็บสะสมพลังงาน                                                                                         |
| * ถ้ามีลมหลายทิศทาง         | * เพื่อให้ได้พลังงานออกมาสูงสุด จะต้องใช้โรเตอร์แบบแกนในแนวราบ                                                                                               |
| * ความเปลี่ยนแปลงทางแนวตั้ง | * ความไม่ราบเรียบทำให้เกิดความปั่นป่วนของลม ดังนั้นในบริเวณที่ไม่เรียบจะต้องมีหอติดตั้งกังหันลมสูงกว่าบริเวณที่ราบเรียบเพื่อให้ถึงระดับที่ลมมีการไหลสม่ำเสมอ |
| * ความเปลี่ยนแปลงตามแนวราบ  | * ยากที่จะหาพื้นที่ที่เหมาะสม                                                                                                                                |

### 2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกำลังลม

ขั้นแรกเริ่มของการเปลี่ยนพลังลมให้เป็นพลังงานกลนั้นสามารถกระทำให้สำเร็จด้วยวัตถุประเภทใบพัดและเฟืองอุปกรณ์หลักหมุนใบพัดและอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทต่างๆ บางครั้งใช้สายพานหรือระบบเฟืองเกียร์เพื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วหมุน ของเครื่องขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับความเร็วหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การใช้ลมมาช่วยในการผลิตไฟฟ้านั้นจะประสบปัญหาอย่างหนึ่งคือ เมื่อลมมีความเร็วต่ำมากก็ไม่สามารถใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บพลังงานไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ และต้องมีการวางแผนสร้างให้เหมาะสมกับสภาพความเร็วลมโดยเฉลี่ยในพื้นที่หนึ่ง ๆ ระบบที่ใช้กันมากคือใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัดหรือชาร์ตแบตเตอรี่ แล้วจึงจ่ายกระแสไฟตรงออกมาจากแบตเตอรี่ไปยังแหล่งที่ต้องการ

ในปัจจุบันสามารถตั้งกฎเกณฑ์จากประสบการณ์ได้ว่า ถ้ามีความเร็วลมเฉลี่ยประจำปีประมาณ 9 – 10 ไมล์ / ชม. ( 15 – 16 กม. / ชม. ) ก็พอเพียงสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลัง

ลม และกระแสลมที่ผลิตไฟฟ้าได้อย่างดีนั้นก็มีกำหนดได้ประมาณ 15 – 25 ไมล์ / ชม. เพื่ออัตราความเร็วลมขนาดนี้คงที่อยู่ตลอด 2 วันในส่วนเฉลี่ยของความเร็วทั้งปีก็ถือว่าเพียงพอแล้ว

ในปัจจุบันนี้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมมีขนาดตั้งแต่ 50 – 6000 วัตต์ จนสูงขึ้นไปจนถึง 3000 กิโลวัตต์ ซึ่งโครงการวิจัยขององค์การนาซาได้รายงานว่าสามารถทำได้ถึง 300 ล้าน กิโลวัตต์

### วิธีคิดอย่างง่ายสำหรับระบบพลังงานต่ำ

ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งมีกำลัง 48 กิโลวัตต์ – ชม. ต่อ 1 เดือนที่แรงกัน 12 โวลต์ ตรงกับ 4000 แอมแปร์ – ชม. ในการทุก ๆ แอมแปร์ – ชม. จะส่งไปประจุในแบตเตอรี่ พลังงานนี้จะถูกนำไปใช้งาน

สมมติว่าเราต้องการกำลัง 120 วัตต์ ที่ 12 โวลต์ หากกระแสที่ใช้ได้คือ

$$I = P / E = 120 / 12 = 10 \text{ แอมแปร์}$$

$$I = \text{กระแส (แอมแปร์)}$$

$$P = \text{กำลัง (วัตต์)}$$

$$E = \text{แรงดัน (โวลต์)}$$

ให้ใช้เครื่องกับสถานีรับส่งวิทยุที่ทำงาน 8 ชม. / วัน ทำงานประมาณ 80 % นอกจากเครื่องส่งแล้วกระแสนบางส่วนยังต้องไปเลี้ยงเครื่องรับและเครื่องสำรอง สมมติว่าทั้งหมดใช้ในงานตลอดเวลาเป็น 50 % ฉะนั้น ถ้าทำงาน 8 ชม. / วัน จะมีเวลา 4 ชม. ทำงานตลอดเวลาที่ 120 วัตต์ ตลอดวันและสิ้นเปลืองไฟฟ้า 40 แอมแปร์ – ชม. (  $10 \times 0.5 \times 8$  ) ในหนึ่งเดือนสิ้นเปลือง 1240 แอมแปร์ – ชม. ในอัตราส่วนเฉลี่ยเบื้องต้นอุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมที่มีกำลังความจุ 4000 แอมแปร์ – ชม.

ถ้าไม่มีลมพัด 6 วันในหนึ่งสัปดาห์ กำลังทั้งหมดที่ต้องการใช้ในหกวันประมาณ 240 แอมแปร์ – ชม. (  $6 \times 40$  ) ดังนั้นต้องแบตเตอรี่ที่มีความจุ 240 แอมแปร์ – ชม. มาเป็นตัวเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เวลาไม่มีลมพัด

## 2.6 การคำนวณกำลังงานจากกังหันลม

มีสูตรการคำนวณได้หลายอย่าง ซึ่งสูตรเหล่านี้ได้จากการคิดเริ่มต้นอย่างเดียวกัน แต่นำมาดัดแปลงให้ง่ายขึ้น

1) ความหนาแน่นของอากาศแปรผันกับความดันและอุณหภูมิ

$$\rho = 1.3 \times \frac{P}{760 \times (1 + \frac{t}{273})} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ ( กิโลกรัม / ตารางเมตร )  
 $P$  = ความดันบรรยากาศ  
 $t$  = อุณหภูมิ ( องศาเซลเซียส )

ถ้าที่บรรยากาศปกติ

$$P = 760 \text{ ม.ม. ของบาโรมิเตอร์}$$

$$t = 25 \text{ C}$$

จะได้

$$\rho = 1.3 \times \frac{760}{760 \times (1 + \frac{25}{273})} = 1.20 \text{ ก.ก. / ม}^2$$

พลังงานกล ( Kinetic energy ) ของลมที่มีมวล  $m$  ก.ก. และมีความเร็ว  $V$  เมตร / วินาที หาได้จาก

$$\text{K.E.} = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{จุดดี}$$

หาพลังงานภายใน 1 วินาที ที่ลมพัดผ่านพื้นที่ตัดขวาง (  $A$  ) ของกังหันลมมีหน่วยเป็น

ตารางเมตร

$$\text{ปริมาตรของลมที่พัดผ่าน} = AV$$

$$\text{มวล} = \rho AV$$

$$\text{กำลัง ( Power )} = \frac{1}{2} (\rho AV) \times v^2$$

$$= \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad \text{วัตต์}$$

$$\therefore \text{กำลัง} = \frac{1}{2} \rho AV^3 E \quad \text{วัตต์}$$

เมื่อ

$$E = \text{efficiency factor}$$

$$\text{แทนค่า } \rho = 1.2$$

$$\text{กำลัง} = 0.6 \times AV^3 E$$

หรือจาก

$$\text{H.P.} = P \times A \times E$$

เมื่อ  $P$  = power factor ( หาได้จาก chart A เมื่อรู้ค่าความเร็วลม  $V$  ไมล์ / ชม. )

$A$  = พื้นที่ตัดขวาง

$E$  = efficiency factor

H.P. = กำลังม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า Power factor จาก Chart A เมื่อรู้ค่าความเร็วลม  $V$  ไมล์/ชม. และ ค่า  $A$  จาก Chart B

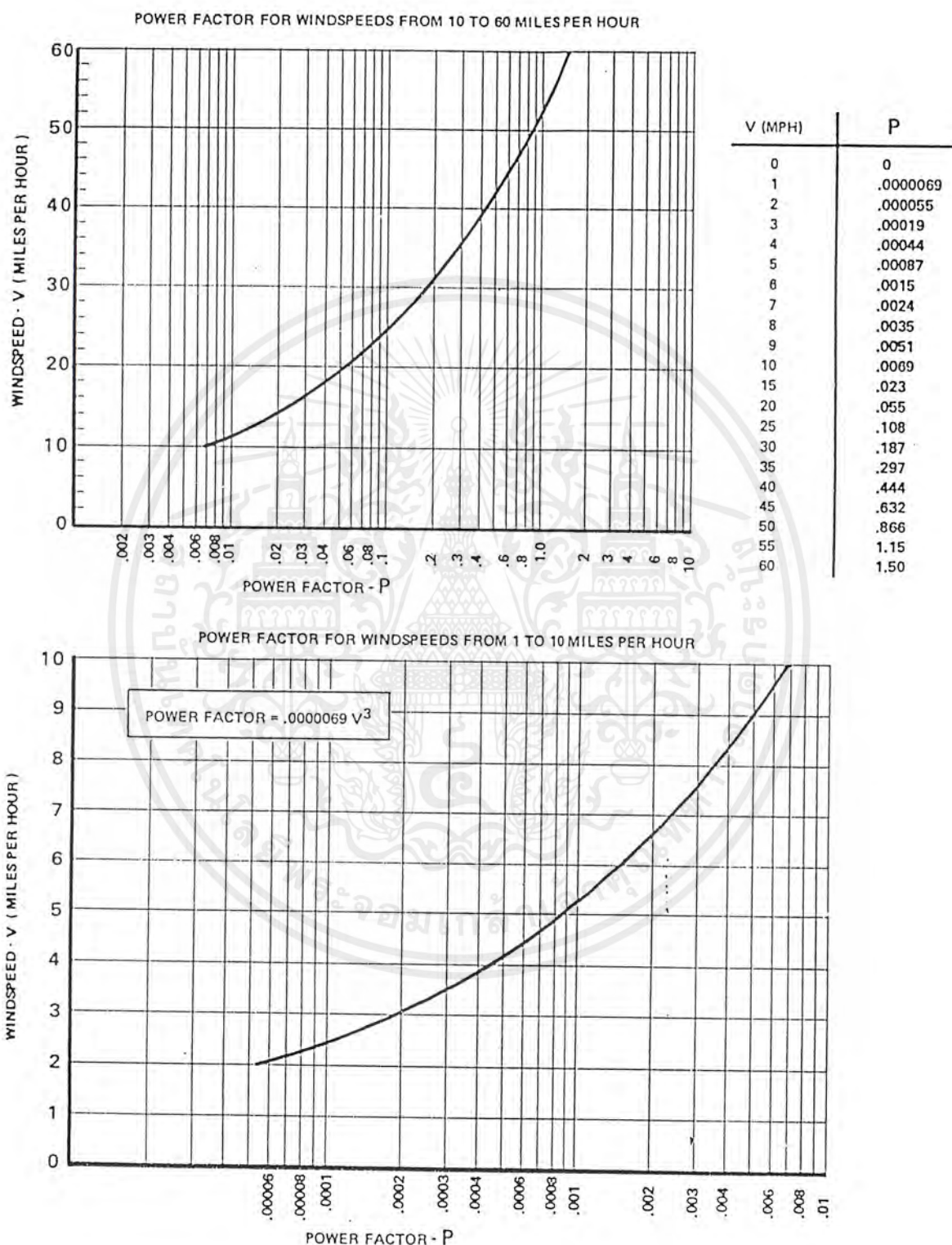
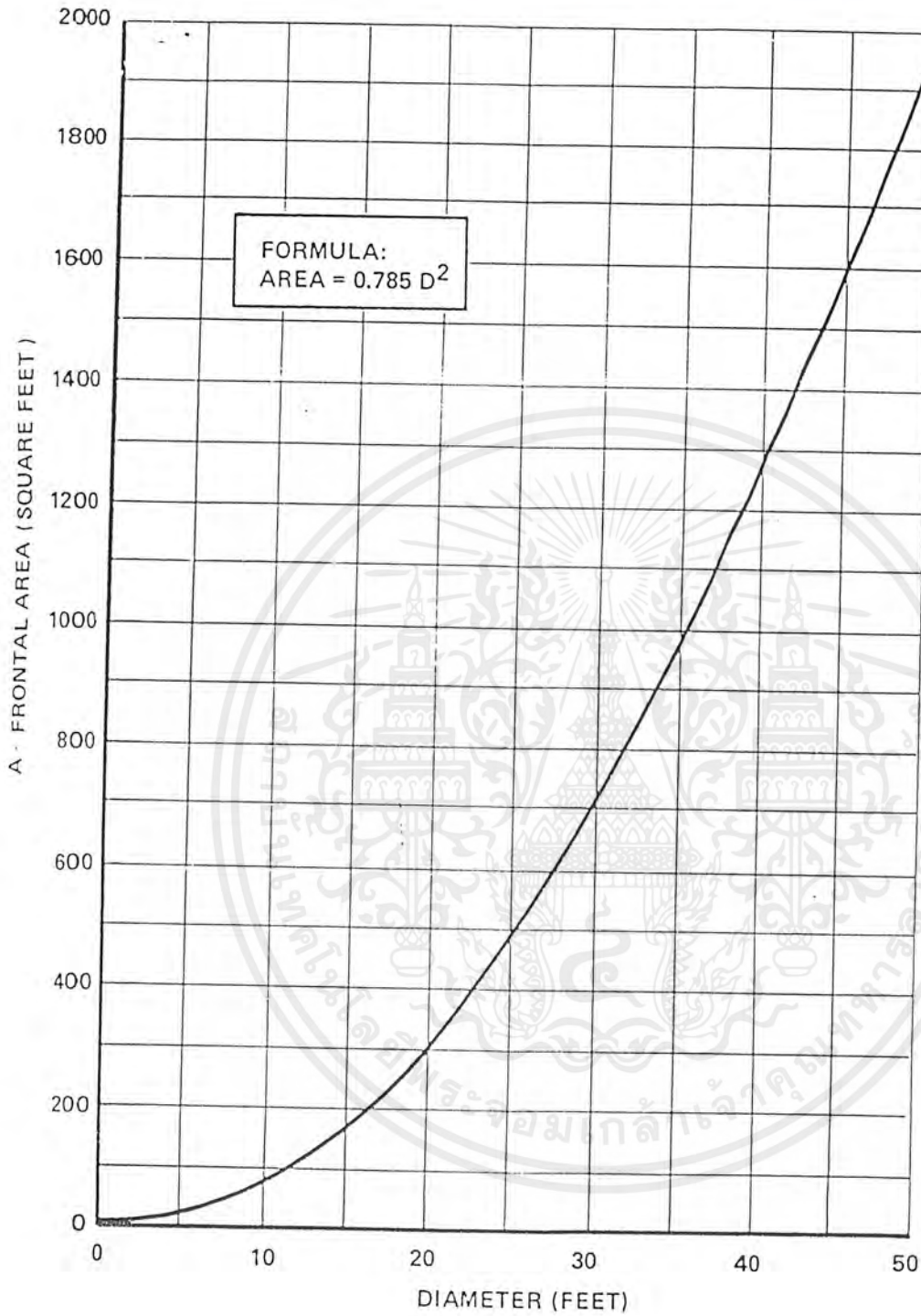


CHART A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# งานหอสวดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



$$A = .785 D^2$$

| D  | A       |
|----|---------|
| 1  | .79     |
| 2  | 3.14    |
| 3  | 7.07    |
| 4  | 12.57   |
| 5  | 19.63   |
| 6  | 28.27   |
| 7  | 38.48   |
| 8  | 50.27   |
| 9  | 63.62   |
| 10 | 78.54   |
| 11 | 95.03   |
| 12 | 113.10  |
| 13 | 132.73  |
| 14 | 153.86  |
| 15 | 176.71  |
| 20 | 314.16  |
| 25 | 490.87  |
| 30 | 706.86  |
| 35 | 962.11  |
| 40 | 1256.64 |
| 45 | 1590.43 |
| 50 | 1963.50 |

CHART B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 36824 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีการออกแบบกังหันลม

### 3.1 แนวการออกแบบเบื้องต้น ( Basic Design )

โดยทั่วไปจะพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้คือ

- พิจารณาถึง Power ที่เราต้องการ
- พิจารณาถึงพลังงานลมที่มี
- พิจารณาถึงชนิดและ แบบของกังหันลมที่เหมาะสมสำหรับงานนั้น ๆ
- พิจารณาถึงการออกแบบเพื่อให้ได้ถูกต้องตามหลักการออกแบบโครงสร้าง

#### 3.1.1 การพิจารณากำลังที่ต้องการ ( Power Demand )

ในการพิจารณากำลังที่เราต้องการนี้ สามารถพิจารณาได้จากความต้องการของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการใช้ ซึ่งในการออกแบบจำเป็นต้องเพื่อค่าสูญเสีย ( loss ) เอาไว้ด้วย นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการใช้งานด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสูงสุดของ Continue load ในช่วงสุดท้ายของอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ตลอดเวลา เมื่อนำกำลังที่ต้องการของอุปกรณ์ไปคูณกับระยะเวลาที่ต้องการเป็นชั่วโมง ผลที่ได้คือกำลังที่ต้องการจากกังหันลม ซึ่งมีหน่วยเป็น วัตต์ - ชั่วโมง เช่น ต้องการใช้หลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ จำนวน 3 ดวง ใช้งานวันละ 4 ชม. ฉะนั้นกำลังที่เราต้องการ คือ  $60 \times 3 \times 4 = 720$  วัตต์ - ชั่วโมง ต่อวัน หากมีการเพื่อค่าสูญเสียไว้ 10 % ดังนั้นกำลังที่ต้องการจริง ๆ จะเป็น  $720 + 72 = 792$  วัตต์ - ชั่วโมง ต่อวันเป็นต้น

#### 3.1.2 การพิจารณากำลังลมที่มีอยู่ เลือกแบบและขนาดกังหันลม

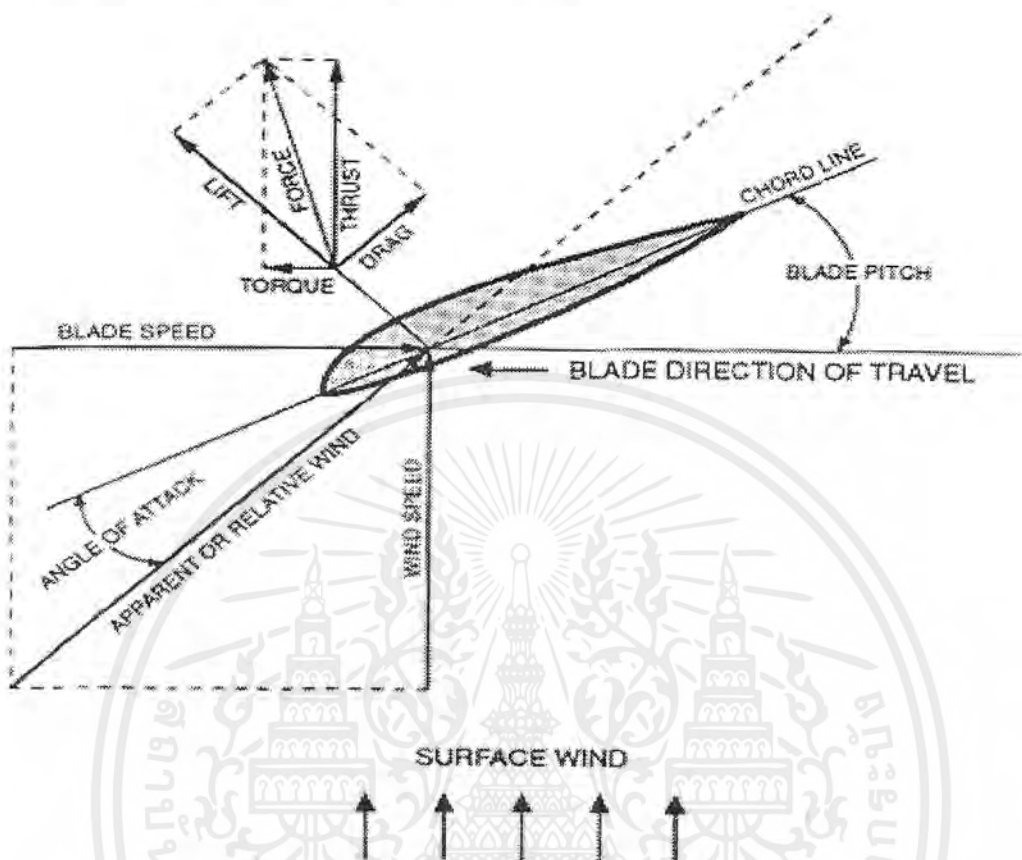
เราต้องคำนึงถึงขนาดของลมที่เรามีอยู่ โดยการวัดความเร็วลมเฉลี่ย ณ จุดที่จะทำการติดตั้งกังหันลม ทำกราฟแสดงปริมาณลมที่เกิดขึ้น ( Velocity duration curve ) และทำการเลือกแบบของกังหันลมและขนาดของใบพัด เพื่อให้เหมาะสมและใกล้เคียงกับจุดประสงค์มากที่สุด

### 3.2 การออกแบบทางพลศาสตร์ ( Aerodynamic Design )

ในการออกแบบทางพลศาสตร์นั้นเป็นการออกแบบใบพัดกังหันลม เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งมีส่วนสำคัญ ๆ ดังนี้

3.2.1 แอร์ฟอยล์ ( Airfoil ) คือ ส่วนพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศโดยการไหลของอากาศจะสัมผัสกับแรงสองแรง คือ แรงยก ( lift ) และ แรงลาก ( drag ) โดยแรงยกจะถูกจัดตั้งฉากกับการไหลของอากาศ และ แรงลากจะขนานกับทิศทางของอากาศ ( ดังรูป 3.1 ) แอร์ฟอยล์ มีลักษณะอยู่หลายแบบมากมาย ( ดังรูป 3.2 ) แอร์ฟอยล์ทุกอันจะทำมุมกับแรงลมเพื่อจะทำให้เกิดแรงยก โดยแรงยกมาก

เป็นสิ่งที่เราต้องการ ( มุมมากด้วย ) โดยมุมจะถูกวัดระหว่างเส้นคอร์ดกับเส้นทางการไหลของลม โดยมุมที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า มุมปะทะ ( angle of attack )



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะและแรงต่าง ๆ ที่กระทำที่แอร์ฟอยล์

ในการบอกค่าของแรงยกและแรงลากนั้นจะบอกอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ ( Coefficient )

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

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

เมื่อ

$C_l$  : Lift Coefficient

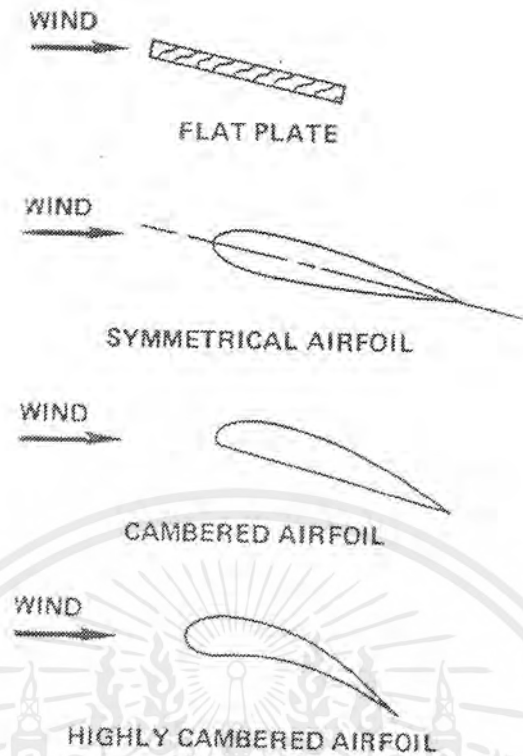
$C_d$  : Drag Coefficient

$\rho$  : air density

$v$  : flow velocity

$A$  : Blade area ( chord length  $\times$  blade length )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



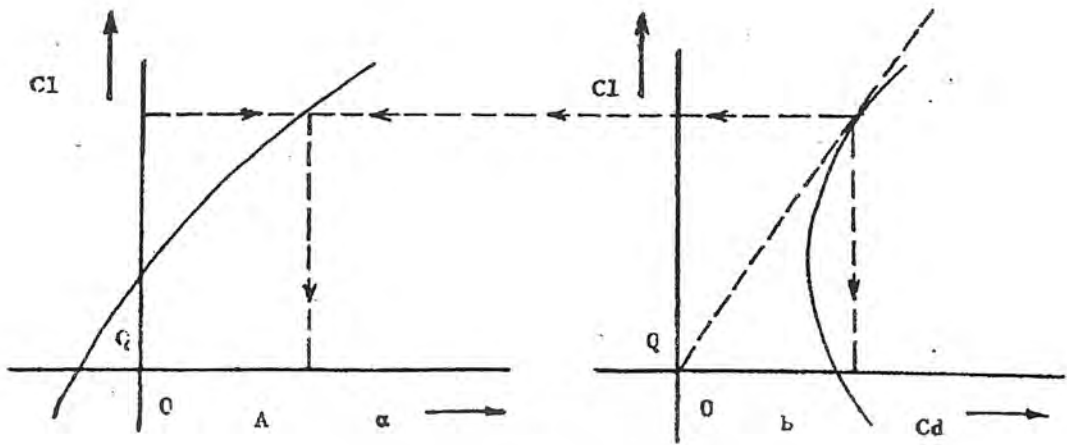
รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบแอร์ฟอยล์ในลักษณะต่าง ๆ

ค่าของ  $C_d$  ,  $C_l$  จะมีความสัมพันธ์กับมุมปะทะ (  $\alpha$  ) ซึ่งในแต่ละชนิดของแอร์ฟอยล์จะแตกต่างกันออกไป เราสามารถหาค่าต่าง ๆ ได้จากกราฟ เช่น รูป 3.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_l - \alpha$  และ  $C_l - C_d$  ตามรูป 3.3 b หากเรลากเส้นสัมผัสจากจุด  $C_d = C_l = 0$  ณ จุดสัมผัส เราจะได้ค่าของ  $C_d - \text{design}$  และ  $C_l - \text{design}$  เมื่อลากเส้นตัดกราฟในรูป a เราก็จะได้  $\alpha - \text{design}$  หากเรานำค่าของ  $C_d$  หารด้วย  $C_l$  เราก็จะได้ค่า  $C_d / C_l$  ต่ำสุดสำหรับแอร์ฟอยล์นั้น ๆ ตามรูป 3.4 แสดงถึงค่า  $C_d / C_l$  ที่ได้ในแต่ละแบบของ แอร์ฟอยล์

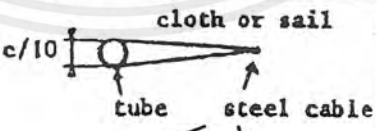
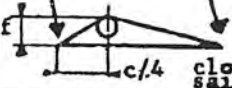
ในการออกแบบกังหันลม จึงเป็นเสมือนการเลือกแบบของกังหันลมเพื่อที่จะให้แรงยกสูงสุดและแรงลากต่ำสุด

### 3.2.2 Relative wind velocity

เมื่อกังหันหมุน หากเรามองจากกังหันเราจะมองเห็นทิศทางการเปลี่ยนไป ทิศทางใหม่ของลมที่พัดเข้ากังหันนี้เราเรียกว่า Relative wind velocity ซึ่งจะทำมุมกับแนวการหมุนของกังหันเป็นมุม  $\phi$  เรียกว่า Wind angle ( ดูได้จากรูป 3.1 )



รูปที่ 3.3 ค่าประกอบของแรงยกและแรงลาก

| airfoil name                                 | geometrical description                                                             | $(C_d/C_l)_{min}$  | $\alpha^\circ$ | $C_l$ |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|-------|
| sail and pole                                |   | 0.1                | 5              | 0.8   |
| flat steel plate                             |  | 0.1                | 4              | 0.4   |
| arched steel plate                           |  | $f/c=0.07$<br>0.02 | 4              | 0.9   |
|                                              |                                                                                     | $f/c=0.1$<br>0.02  | 3              | 1.25  |
| arched steel plate with tube on concave side |  | $f/c=0.07$<br>0.05 | 5              | 0.9   |
|                                              |                                                                                     | $f/c=0.1$<br>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   |

รูปที่ 3.4 แสดงค่า  $(C_d/C_l)_{min}$ ,  $\alpha$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 สูตรการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของใบพัดกับความเร็วลม

$$\frac{u}{v} \text{ at any radius} = \frac{u / v(\text{tip}) \times r}{\text{tip radius}} \quad (3.3)$$

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

โดย

$r$  (radius) = รัศมีโดยวัดจากศูนย์กลางของการหมุนถึงพื้นที่ที่  $u/v$  ที่เราหาอยู่

tip radius = รัศมีกึ่งหัน / 2

$N$  = รอบการหมุน (รอบ / นาที)

$u$  = ความเร็วใบพัด

$v$  = ความเร็วลม

$k$  = constant to adjust

ถ้า  $v$  (ไมล์ / ชม.),  $k = 1.47$

$v$  (กม. / ชม.),  $k = 1.0$

### 3.2.4 การหา BLADE AREA

$$\text{BLADE AREA} = \text{BLADE LENGTH} \times \text{BLADE CHORD} \quad (3.5)$$

### 3.2.5 สูตรการหามุมใบพัด และ SOLIDITY

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

โดย

wind angle = มุมที่ relative wind ทำกับ blade direction of zero

angle of attack = มุมที่ relative wind ทำกับ chord line

airfoil of zero = 0 สำหรับ symmetrical airfoil

= 2 สำหรับ camber airfoil

= 4 สำหรับ highly camber airfoil

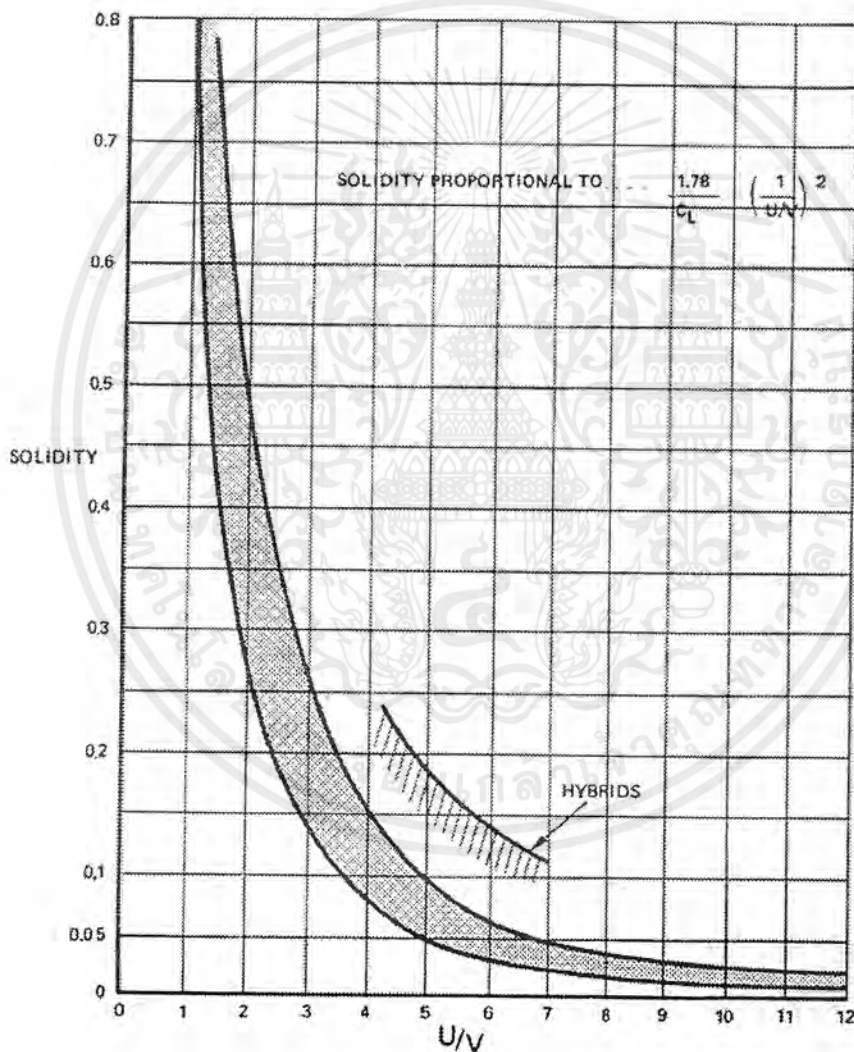
**SOLIDITY** คือ ลักษณะของใบพัดโดยเมื่อลมเข้าใบพัดซึ่งมีหลายใบพัดหมุนจะหมุนเหมือนกันเป็น Solid surface

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

โดย

**BLADE AREA** คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของใบพัด

**FRONTAL AREA** คือ พื้นที่ผิวที่ใช้คำนวณหากำลังใบพัด



รูปที่ 3.5 โซลิติตี้

การเลือก SOLIDITY FACTOR สำหรับกังหันใช้รูปที่ 3.5 โดย SOLIDITY VALUE ด้านสูงจะถูกเลือก เมื่อ lift coefficient ถูกประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของ airfoil และ LOW SOLIDITY VALUE ถูกเลือกเมื่อเปอร์เซ็นต์สูงสุดของ lift ของ airfoil

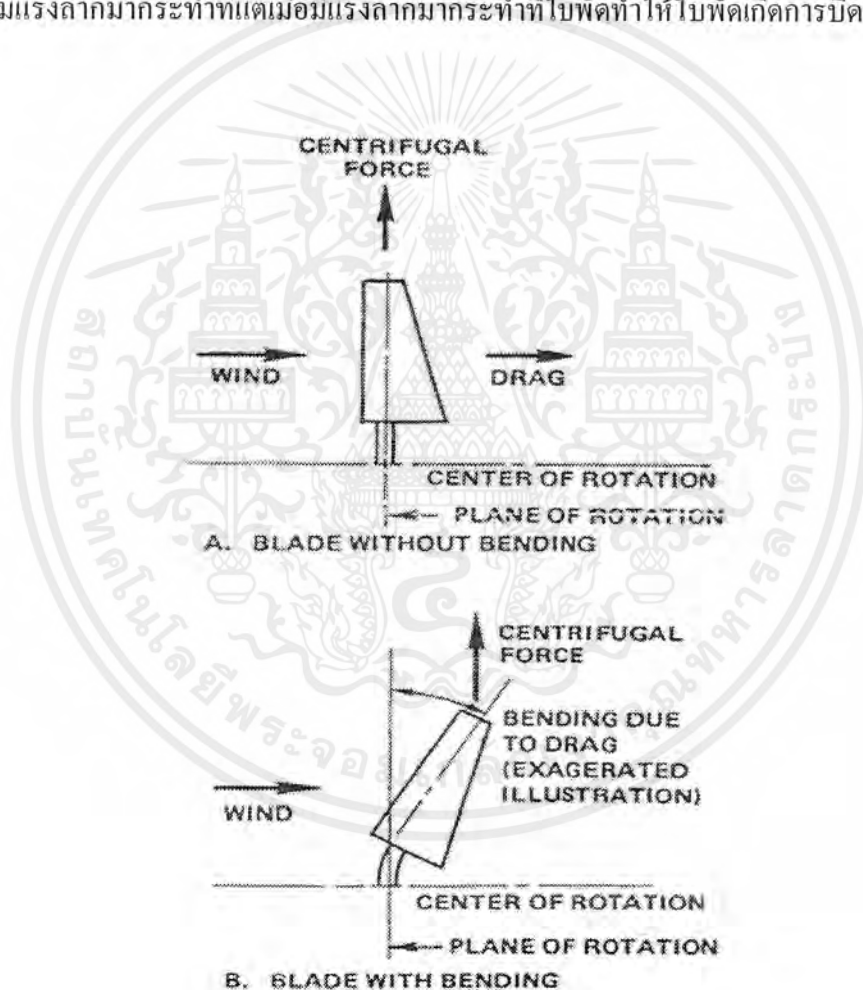
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหัน

เราสามารถแบ่งแรงที่กระทำต่อกังหันลมที่สำคัญที่เราต้องพิจารณาได้ 2 ประเภท

**3.3.1 แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force)** เป็นแรงที่กระทำกับใบพัดในแนวแกนการหมุนซึ่งเหมือนกับเวลาเราผูกก้อนหินไว้กับเชือกแล้วเหวี่ยงหรือหมุนในวงรอบการหมุน แรงหนีศูนย์กลางจะเป็นเสมือนแรงดึงเชือกนั้นซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางการหมุนคือว่าพร้อมจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงอยู่ตลอดเวลา

**3.3.2 แรงลาก (Windmill Drag Force)** เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างของกังหัน (Truss) หักโค่น และ ทำให้ใบพัดของกังหันบิดงอเสียหาย เช่น ในกรณีที่ใบพัดถูกยึดติดไว้กับที่แต่เมื่อมีแรงลากมากกระทำที่แต่เมื่อมีแรงลากมากกระทำที่ใบพัดทำให้ใบพัดเกิดการบิดงอ



รูปที่ 3.6 แสดงการงอของใบพัด

### 3.4 คุณสมบัติของแรงบิดและกำลังงาน ( Torque and Power characteristics )

จากรูป 3.1 เมื่อแตกแรงกวาดและแรงยกที่กระทำต่อใบพัด ให้อยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ผลลัพธ์ระหว่างแรงทั้งสอง จะเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนของกังหัน

สมมติให้กังหันหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (  $\omega$  )

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

ฉะนั้นกำลังงานที่ได้รับจากการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกล คือ

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

เมื่อ

$P$  : กำลังงาน ( Power ) ( w )

$T$  : แรงบิด ( Torque ) ( Nm )

$\omega$  : ความเร็วเชิงมุม ( Angular speed ) ( rad / sec )

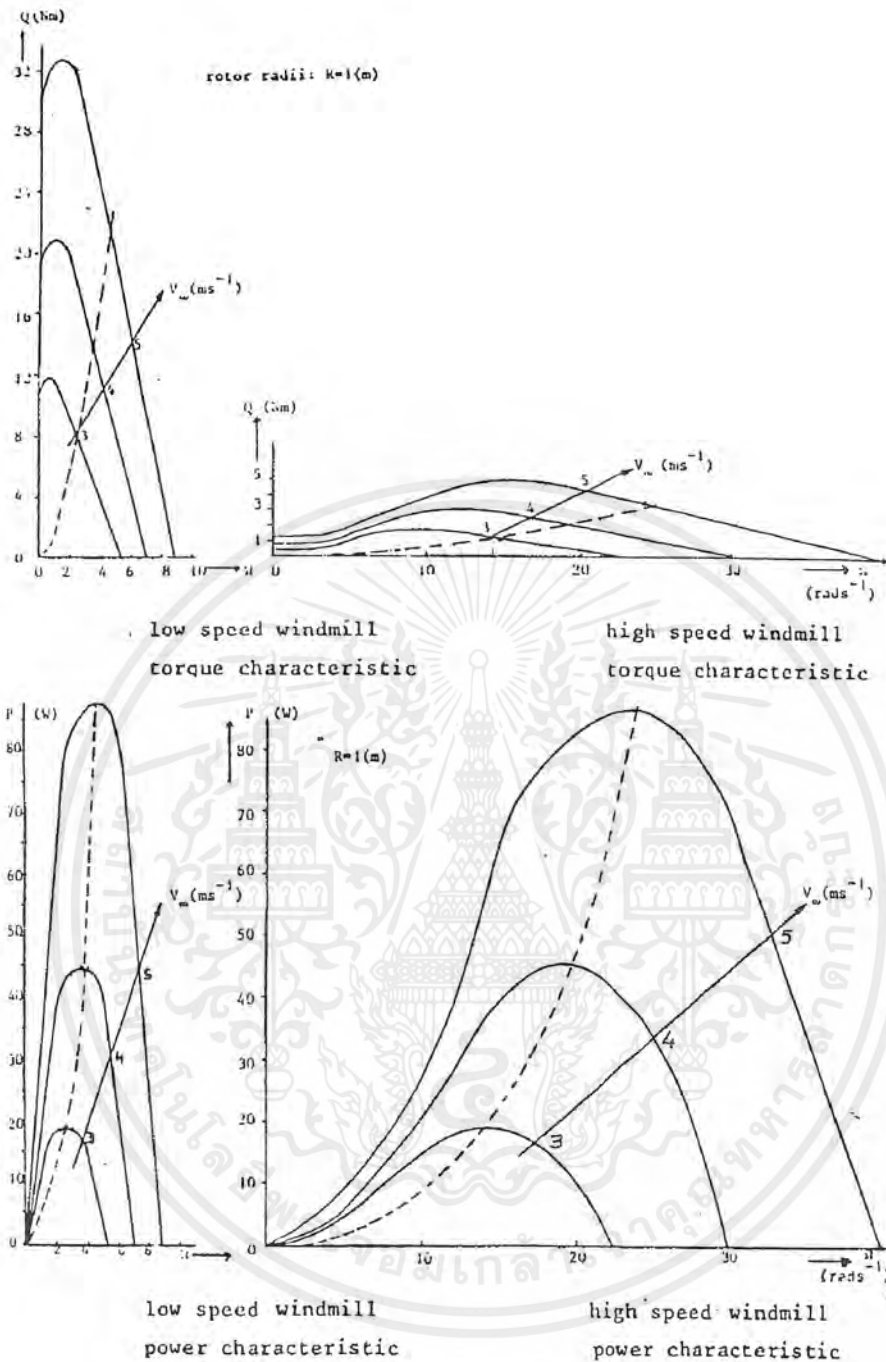
จากสมการ ( 3.9 ) กำลังงานที่ได้รับเท่ากัน แต่อาจได้จากค่าของแรงบิดสูง ความเร็วเชิงมุมต่ำ หรือ แรงบิดต่ำ ความเร็วเชิงมุมสูงก็ได้ ฉะนั้นในการออกแบบกังหันลมที่ดีจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน เพื่อให้สัมพันธ์กับแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้วย

จากรูป 3.7 เราสามารถสรุปได้ดังนี้

- ขณะที่กำลังงานเท่ากันแต่สามารถได้มาจากค่าความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน
- กำลังงานสูงสุดจะเปลี่ยนไปตามค่าของความเร็วเชิงมุมกำลังสาม และแรงบิดก็จะเปลี่ยนไปตามความเร็วเชิงมุมกำลังสอง
- กำลังงานสูงสุดจะได้จากความเร็วเชิงมุมสูงมากกว่าแรงบิดสูง
- แรงบิดเริ่มต้นสำหรับกังหันลมแบบความเร็วรอบสูง ( High speed ) จะมีค่าน้อยกว่ากังหันลมแบบความเร็วรอบต่ำ ( Low speed )

### 3.5 ระบบส่งกำลัง

การเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานกลโดยผ่านกังหันลม ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ ระบบส่งกำลัง เพราะหากระบบส่งกำลังไม่ดีแล้ว ประสิทธิภาพที่ได้รับก็จะได้ไม่เต็มที่ ในการออกแบบระบบส่งกำลังที่ดีต้องคำนึงถึงส่วนประกอบมากมาย เช่น ความเหมาะสมกับงานที่จะใช้ ราคา การบำรุงรักษา การสูญเสียในระบบส่งกำลัง เป็นต้น



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของกำลังงานและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Generator )

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอยู่ 2 แบบ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในการใช้งานนั้น เราจะใช้ไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงไม่ได้เพราะความเร็วลมไม่แน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไม่คงที่ ดังนั้นควรจะต้องมีการสะสมพลังงานไว้ก่อนแล้วจึงนำมาใช้ เพราะแรงเคลื่อนจะคงที่กว่า เครื่องสะสมพลังงานก็คือ แบตเตอรี่ ซึ่งเก็บพลังงานในรูปของการชาร์จด้วยกระแสตรง ดังนั้นไฟที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเป็นกระแสตรง ถ้าใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการชาร์จด้วยกระแสตรง ดังนั้นไฟที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเป็นกระแสตรง ถ้าใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องเปลี่ยนเป็นกระแสตรงเสียก่อนจึงจะเก็บได้ ในการเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ไหนนั้นต้องดูความเหมาะสม และข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบ

ข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

- สามารถหมุนได้ทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา
- มีน้ำหนักเบากว่าแบบกระแสตรง เมื่อให้กำลังเท่ากัน และมีประสิทธิภาพดีกว่า
- ไม่จำเป็นต้องใช้ Current regulation ในขณะที่แบบกระแสตรงต้องการ
- การใช้งานในแบบกระแสสลับง่ายกว่า พวกอุปกรณ์ต่าง ๆ หาง่าย ราคาไม่แพง
- ไม่มีแปรงถ่าน จึงทนทานกว่าแบบกระแสตรง

จากการเปรียบเทียบดูได้ ในการเปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า สิ่งส่วนมากจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

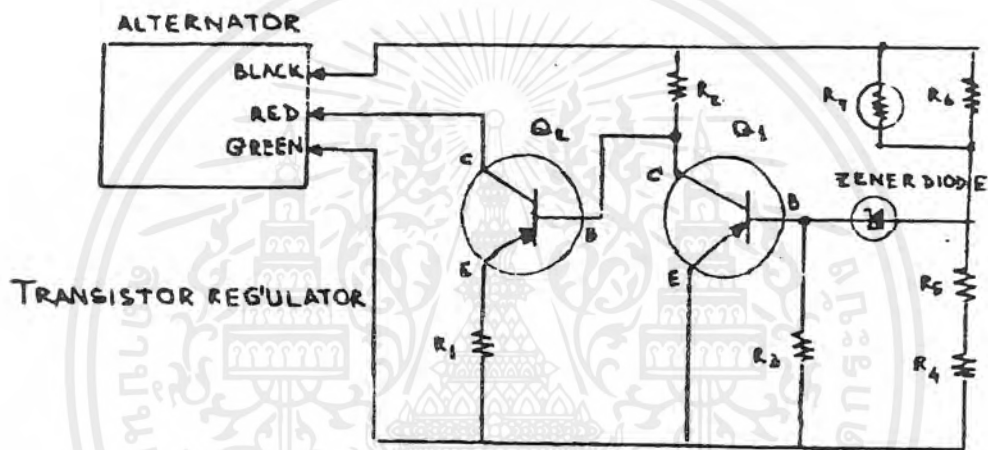
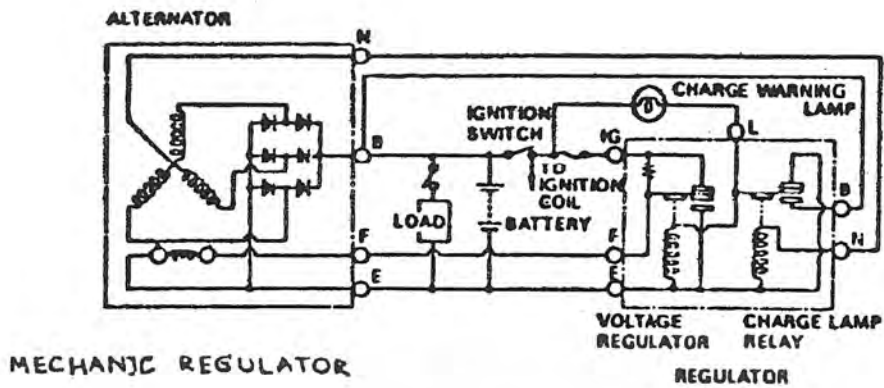
### 3.7 ตัวควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( Voltage regulator )

คือตัวควบคุมแรงเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าขนาดไหนเหมาะสำหรับการเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ตัวควบคุมแรงเคลื่อนจำเป็นต้องใช้ เป็นอุปกรณ์ที่แยกต่างหากจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมากจะมี 4-6 ขั้ว ซึ่งได้แก่ กราวด์ ( G , GND ) , ขั้วต่อ Ignition ( I , IGN ) , ขั้วต่อรีเลย์ ( R ) , ขั้วต่อ Field ( F ) บางครั้งจะมีขั้วต่อแบตเตอรี่ และขั้วต่อสเตเตอร์ ( Stator )

การทำงานของตัวควบคุมแรงเคลื่อนคือมันจะควบคุมแรงเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ( Alternator ) และปรับค่ากระแสที่ไหลในขดลวดสนาม ( Field Winding ) คือมันอาจจะให้กระแสไหล ใน Field เลย โดยปิด - เปิด Field อย่างรวดเร็ว และสามารถปรับตัวควบคุมเพื่อให้ได้ Output ตามต้องการ ตัวควบคุมแรงเคลื่อนในปัจจุบันมีใช้อยู่ 2 แบบ คือ แบบ Mechanic และ แบบ Electronic ซึ่งหลักการทำงานก็เหมือนกัน ตามรูป 3.8 แสดงวงจรของตัวควบคุมแรงเคลื่อนทั้ง 2 แบบ

รูปที่ 3.8 แสดงตัวควบคุมแรงเคลื่อนแบบแมคคานิค และ อิเล็กทรอนิกส์

## CIRCUIT DIAGRAM



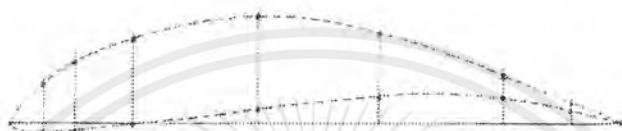
รูปที่ 3.8 แสดงตัวควบคุมแรงเคลื่อนแบบแม็คคานิค และ อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การคำนวณหาขนาดแอร์ฟอยล์

ในการออกแบบใบพัดของกังหันลมเราต้องนำความรู้ทางอากาศพลศาสตร์มาใช้ โดยใบพัดที่เราออกแบบนั้นจะเป็นลักษณะรูปร่างเป็น แอร์ฟอยล์ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้ตารางอ้างอิงและทำตามขั้นตอน ของ SWD ( STEERING COMMITTEE FOR WIND ENERGY IN DEVELOPING COUNTRIES )



รูปที่ 4.1 ลักษณะของแอร์ฟอยล์

ตัวอย่าง การคำนวณหาขนาดของแอร์ฟอยล์และขนาดของกังหันลม

1. กำลังลมที่เราต้องการ = 1000 วัตต์ - ชั่วโมง ต่อวัน
2. ความเร็วลม = 4-10 ไมล์ต่อชั่วโมง เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน

ดังนั้นกำลังที่ใบพัด generate =  $1000/8 = 125$  วัตต์ ใน 1 ชั่วโมง ถ้าเราใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 ไมล์ต่อชั่วโมงมาคิด

จาก chart A ในบทที่ 2

ที่ความเร็วลมเท่ากับ 10 ไมล์ต่อชั่วโมง จะได้ค่า Power Factor เท่ากับ 0.007

และจากรูป 4.2 เมื่อเราสมมติค่า  $u/v$  จากกราฟจะได้ค่า E ( Efficiency Factor )

จากกราฟเราสมมติค่า  $u/v$  ประมาณ 5 จะได้ ค่า  $E = 0.32$

จากสมการ  $HP = P \times A \times E$

และ กำลังงาน ( วัตต์ ) =  $746 \times P \times A \times E$

แทนค่า - กำลังงาน 125 วัตต์

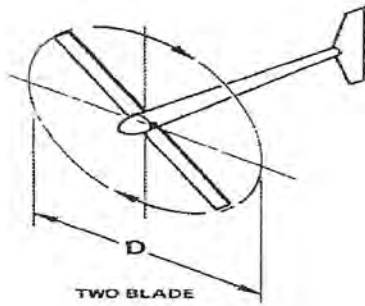
-  $P = 0.007$

-  $E = 0.31$

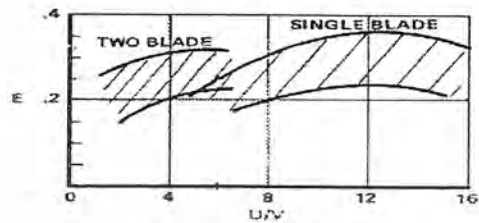
$$125 = 746 \times 0.007 \times A \times 0.31$$

$$A = \frac{125}{746 \times 0.007 \times 0.31}$$

$$A = 77.22 \text{ ตารางฟุต}$$



HIGH-SPEED  
HORIZONTAL AXIS WINDMILLS



รูปที่ 4.2 แสดงค่า U/V ต่อ ค่าประสิทธิภาพ

จากสมการการหาพื้นที่

$$A = \pi D^2 / 4$$

แทนค่า

$$77.22 = \pi D^2 / 4$$

$$D = 9.9 \approx 10 \text{ ฟุต}$$

เพราะฉะนั้น กังหันมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ฟุต หรือ เท่ากับ 3 เมตร

และจากรูป 3.5 SOLIDITY

$$\text{ที่ } u/v = 5$$

$$\text{SOLIDITY} = 0.07$$

จากสมการ 3.7

$$\text{SOLIDITY} = \text{BLADE AREA} / \text{FRONTAL AREA}$$

แทนค่า

$$0.07 = \text{BLADE AREA} / 77.22$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{BLADE AREA} = 0.07 \times 77.22 = 5.4 \text{ ตารางฟุต}$$

จากสมการ 3.5

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

แทนค่า

$$5.4 = 3.85 \times \text{BLADE CHORD}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{BLADE CHORD} = 1.4 \text{ ฟุต หรือ เท่ากับ } 42 \text{ เซนติเมตร}$$

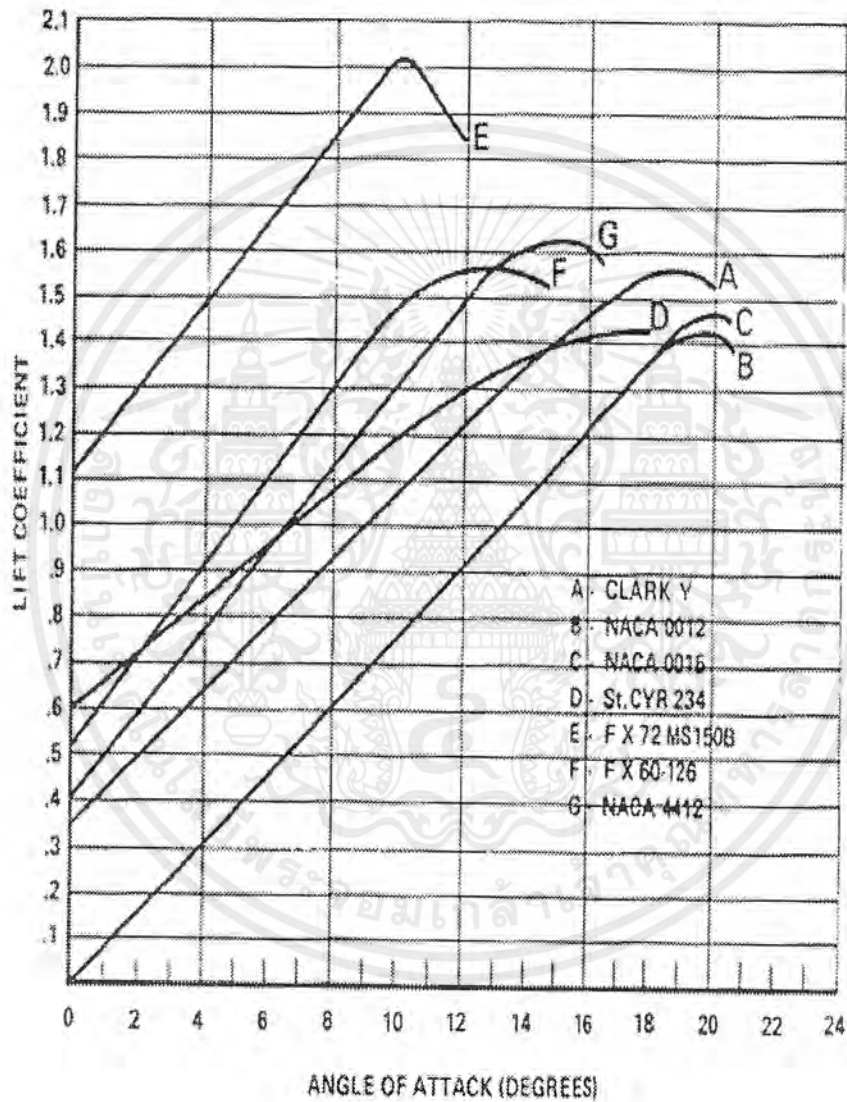
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความยาวคอร์ด จะได้เท่ากับ 21 เซนติเมตร

หลังจากที่เราคำนวณและรู้ว่าความยาวคอร์ดได้เท่าใดแล้ว ต่อไปเราจะนำความยาวคอร์ดที่คำนวณได้นี้ไปหาลักษณะของ แอร์ฟอยล์ โดยใช้กราฟและตารางอ้างอิง โดยทั่วไปเราจะใช้ค่า

มุมปะทะเท่ากับ 15 องศา ในการติดตั้งและอ้างอิง

ตาราง 4.1 กราฟแสดงมุมปะทะต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของใบพัดแบบต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 ตารางค่า UPPER และ LOWER ของใบพัดชนิดต่าง ๆ

## SELECTED AIRFOIL ORDINATES

|      | CLARK Y  |       | St. CYR 234 |       | NACA 0012 |       | NACA 0015 |       | NACA 4412 |       |
|------|----------|-------|-------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| STA  | UPPER    | LOWER | UPPER       | LOWER | UPPER     | LOWER | UPPER     | LOWER | UPPER     | LOWER |
| 0    | 3.5      | 3.5   | 6.42        | 6.42  | 0         | 0     | 0         | 0     | 0         | 0     |
| 1.25 | 5.45     | 1.93  | 9.55        | 3.75  | 1.89      | -1.89 | 2.37      | -2.37 | 2.44      | -1.43 |
| 2.5  | 6.5      | 1.47  | 11.0        | 2.7   | 2.62      | -2.62 | 3.27      | -3.27 | 3.39      | -1.95 |
| 5.0  | 7.9      | .93   | 12.7        | 1.4   | 3.56      | -3.56 | 4.44      | -4.44 | 4.73      | -2.49 |
| 7.5  | 8.85     | .63   | 13.6        | .85   | 4.2       | -4.2  | 5.25      | -5.25 | 5.76      | -2.74 |
| 10   | 9.6      | .42   | 14.6        | .5    | 4.68      | -4.68 | 5.85      | -5.85 | 6.59      | -2.86 |
| 20   | 11.36    | .03   | 16.2        | .2    | 5.74      | -5.74 | 7.17      | -7.17 | 8.8       | -2.74 |
| 30   | 11.7     | 0     | 16.55       | .65   | 6.0       | -6.0  | 7.5       | -7.5  | 9.76      | -2.26 |
| 40   | 11.4     | 0     | 16.1        | 1.1   | 5.8       | -5.8  | 7.25      | -7.25 | 9.8       | -1.8  |
| 50   | 10.52    | 0     | 15.2        | 1.35  | 5.29      | -5.29 | 6.62      | -6.62 | 9.19      | -1.4  |
| 60   | 9.15     | 0     | 13.3        | 1.9   | 4.56      | -4.56 | 5.7       | -5.7  | 8.14      | -1.0  |
| 70   | 7.35     | 0     | 10.8        | 1.35  | 3.66      | -3.66 | 4.58      | -4.58 | 6.69      | -.65  |
| 80   | 5.22     | 0     | 7.75        | 1.05  | 2.62      | -2.62 | 3.28      | -3.28 | 4.89      | -.39  |
| 90   | 2.8      | 0     | 4.0         | .5    | 1.45      | -1.45 | 1.81      | -1.81 | 2.71      | -.22  |
| 100  | 0        | 0     | 0           | 0     | 0         | 0     | 0         | 0     | 0         | 0     |
|      | LR = 1.5 |       |             |       | LR = 1.58 |       | LR = 2.48 |       | LR = 1.58 |       |

จากตาราง 4.1 เมื่อแทนค่ามุมปะทะ ( angle of attack ) เท่ากับ 15 จะได้จุด G โดย G : NACA 4412 และเมื่อเราได้ ลักษณะของแอร์ฟอยล์แล้วเรานำค่าความยาวคอร์ดที่คำนวณได้ไปคูณกับค่าใน ตาราง 4.2 จะได้ค่า Upper และ Lower ของแอร์ฟอยล์ออกมา NACA 4412 จากตาราง 4.2 ได้ค่าดังนี้

| Upper | Lower |
|-------|-------|
| 0     | 0     |
| 2.44  | -1.43 |
| 3.39  | -1.95 |
| 4.73  | -2.49 |
| 5.76  | -2.74 |
| 6.59  | -2.86 |
| 8.8   | -2.74 |
| 9.76  | -2.26 |
| 9.8   | -1.8  |
| 9.19  | -1.4  |
| 8.14  | -1    |
| 6.69  | -0.65 |
| 4.89  | -0.39 |
| 2.71  | -0.22 |
| 0     | 0     |

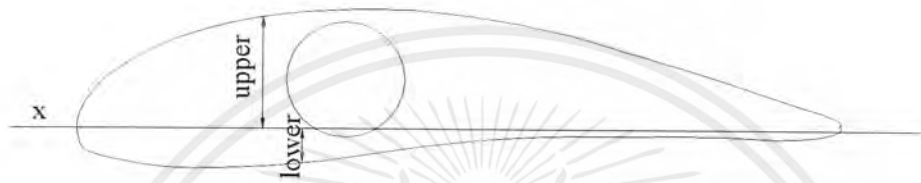
โดยค่าที่อยู่ในตารางอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ต่อไปเราจะนำความยาวของคอร์ค้ำไปคูณกับค่าในตารางข้างบนเราจะได้ค่าดังนี้

| UPPER | LOWER  |
|-------|--------|
| 0     | 0      |
| 0.512 | -0.3   |
| 0.712 | -0.41  |
| 0.993 | -0.52  |
| 1.21  | -0.58  |
| 1.384 | -0.6   |
| 1.848 | -0.58  |
| 2.048 | -0.475 |
| 2.058 | -0.378 |
| 1.93  | -0.294 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|       |        |
|-------|--------|
| 1.71  | -0.21  |
| 1.405 | -0.14  |
| 1.027 | -0.082 |
| 0.569 | -0.046 |
| 0     | 0      |

แล้วนำค่านี้ไปสร้างแอร์ฟอยล์ดังแสดงในรูปที่ ข้างล่างนี้



รูปที่ 4.3 รูปแบบแอร์ฟอยล์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

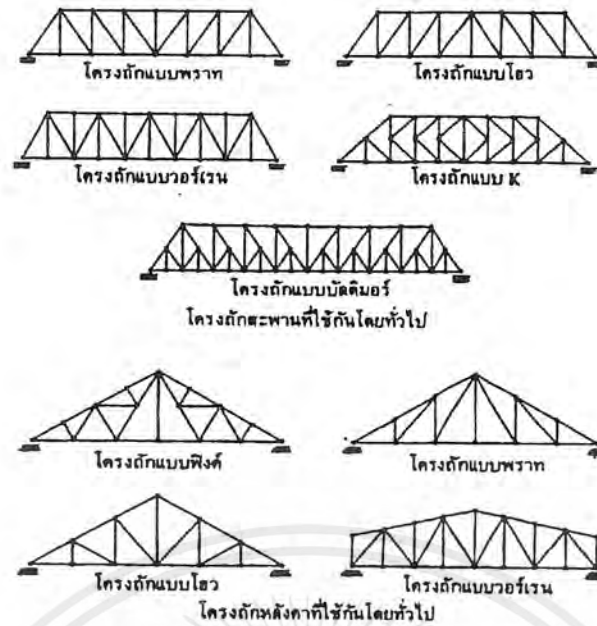
## บทที่ 5

### โครงสร้าง

ในการออกแบบและสร้างกังหันลมนั้นส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือฐานของกังหันลม โดยฐานของกังหันลมมีหลายรูปแบบ เช่น เป็นโครงถัก ( truss ) , ฐานทรงกระบอก เป็นต้น สิ่งเราต้องคำนึงถึง คือ ฐานของกังหันลมต้องสามารถรองรับน้ำหนักของกังหันลมและสามารถต้านทานแรงลมที่อาจทำให้กังหันลมเสียหายหรือพังทลายได้ ในบทนี้เราจะกล่าวถึงฐานของกังหันลมที่เป็นโครงถัก ( truss )

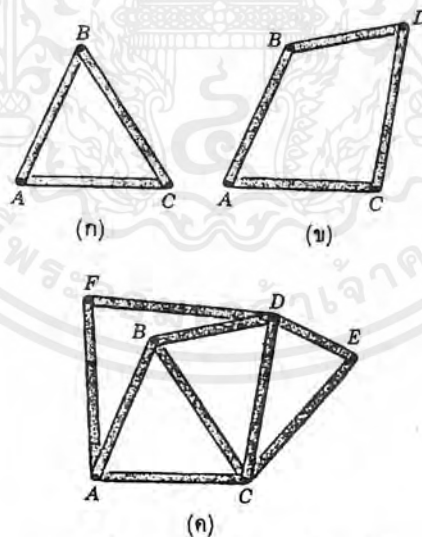
โครงเหล็ก ( frame work ) ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนซึ่งยึดติดกันที่ปลายเพื่อประกอบกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงเรียกว่าโครงถัก ( truss ) สะพาน โครงหลังคา บันจัน และ โครงสร้างในลักษณะเดียวกันตัวอย่างของโครงถักที่พบอยู่เสมอชิ้นส่วนที่ใช้มักเป็นเหล็กรูปตัว I และ U เหล็กฉาก เหล็กกลม และรูปร่างพิเศษอย่างอื่นและยึดกันที่ปลายด้วยวิธีการเชื่อมไฟฟ้า ยึดขันน็อตขันหรือใช้สลัก โครงถักสามารถประกอบได้ทั้งในแบบสองมิติและแบบสามมิติ แต่ในที่นี้เราจะมาพิจารณาเฉพาะ โครงถักสองมิติ โครงถักสองมิติคือโครงถักที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ วางอยู่ในระนาบเดียวกันเรียกว่า โครงถักระนาบ ( Plane truss ) โครงถักระนาบพวกที่ใช้กับสะพานมักจะออกแบบเป็นคู่ ซึ่งจะวางโครงถักแต่ละแถวไว้แต่ข้างของสะพานและยึดกันด้วยคานขวางเพื่อรับน้ำหนักของพื้นถนนซึ่งจะถ่ายน้ำหนักไปยังชิ้นส่วนของโครงถัก ตัวอย่างของโครงถักระนาบที่ใช้กันทั่วไปแสดงไว้ในรูปที่ 5.1

องค์ประกอบหลักของโครงถักระนาบคือรูปสามเหลี่ยม ชิ้นส่วนสามชิ้นต่อกันที่ปลายด้วยสลัก ประกอบกันเป็นโครงที่แข็งแรง ( rigid frame ) ดังแสดงในรูป 5.2 (ก) หรือในลักษณะอื่น ชิ้นส่วนสี่ชิ้นหรือมากกว่าต่อกันด้วยสลักประกอบกันเป็นรูปหลายเหลี่ยมเป็นโครงที่ไม่แข็งแรง ( non-rigid frame ) ดังรูป 5.2 (ข) โครงที่ไม่แข็งแรงสามารถทำให้แข็งแรงได้โดยการเพิ่มชิ้นส่วนทางด้านเส้นทแยงมุมเชื่อมระหว่าง A และ D หรือ B และ C กลายเป็นสามเหลี่ยม 2 รูป โครงสร้างสามารถขยายออกไปได้โดยการเพิ่มจำนวนชิ้น เช่น DE และ CE หรือ AF และ DF ดังแสดงในรูป 5.2 (ค) โดยวิธีนี้โครงสร้างยังคงรักษาความแข็งแรงไว้ได้ คำว่าแข็งแรงที่ใช้นี้หมายถึง การที่โครงสร้างไม่ยุบลง ( noncollapsible ) และการเปลี่ยนรูปไปของชิ้นส่วนเนื่องจากความเครียดภายในที่เกิดขึ้นสามารถละทิ้งได้



รูปที่ 5.1 โครงถักแบบต่างๆ

โครงสร้างที่ประกอบมาจากรูปสามเหลี่ยมในลักษณะที่กล่าวมาเรียกว่า โครงถักธรรมดา ( simple truss ) ถ้ามีชิ้นส่วนมากกว่าความจำเป็นต้องใช้เพื่อให้โครงสร้างขยับตัว โครงถักนั้นเรียกว่า statically indeterminate ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้ถ้ามีแต่เฉพาะสมการของการสมดุลสมการเพียงอย่างเดียว ชิ้นส่วนที่เกินความจำเป็นนั้นเรียกว่า redundant



รูปที่ 5.2 ลักษณะของโครงถัก

ในการออกแบบโครงถักต้องหาแรงในชิ้นส่วนต่าง ๆ และเลือกขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมเพื่อรับแรงดังกล่าว ในการวิเคราะห์หาแรงของโครงถักธรรมดา ( simple truss ) จะต้องตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐานขึ้นหลายอย่าง ประการแรกจะต้องสมมติว่าชิ้นส่วนทุกชิ้นเป็นชิ้นส่วนรับสองแรงซึ่งหมายถึงชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำเพียงสองแรงเท่านั้นเมื่ออยู่ในสมดุลดังรูปที่ 5.3 แรงทั้งสองจะต้องกระทำที่ปลายของชิ้นส่วนโดยขนาดเท่ากัน ทิศทางตรงกันข้ามกัน และ อยู่ในแนวเดียวกัน ชิ้นส่วนนั้นอาจจะถูกดึงหรือถูกกดดังในรูปที่ 5.4 ขอให้สังเกตว่าแรงดึง  $T$  หรือแรงกด  $C$  ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดใด ๆ มีค่าเหมือนเดิมตลอด ต่อไปต้องสมมติว่าไม่คดน้ำหนักรวมของชิ้นส่วน  $W$  เมื่อกระจายอย่างสม่ำเสมอสามารถแทนได้ด้วยแรง  $W/2$  สองแรงกระทำที่ปลายของชิ้นส่วน ซึ่งเทียบได้กับแรงภายนอกที่กระทำที่ข้อต่อสลัก การคดน้ำหนักรวมของชิ้นส่วนเข้าไปด้วยแบบนี้จะได้คำตอบที่ถูกเข้าไปด้วย แบบนี้จะได้คำตอบที่ถูกต้องของแรงดึงหรือแรงกดเฉลี่ยที่กระทำต่อชิ้นส่วนแต่ไม่ได้นับรวมถึงผลการคดตัว (bending) ของชิ้นส่วน

เมื่อการต่อกันของชิ้นส่วนเป็นแบบเชื่อมหรือใช้หมุดย้ำ สามารถสมมติได้ว่าการต่อกันเป็นแบบสลักถ้าแนวศูนย์กลางของชิ้นส่วนทั้งหมดมาตัดรวมกันดังแสดงในรูปที่ 5.5

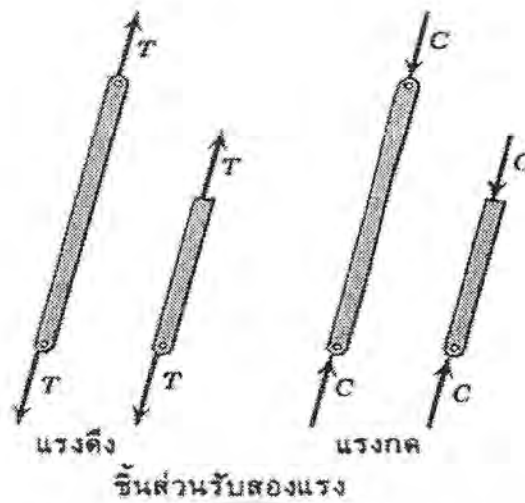
ในการวิเคราะห์ ยังต้องสมมติต่อไปอีกว่าแรงภายนอกทั้งหมดกระทำที่สลักข้อต่อพื้นของสะพานแบบโครงถัก จะวางอยู่บนคานขวางซึ่งต่ออยู่กับปลายชิ้นส่วน (joint)

โครงถักอย่างใหญ่จะมีอุปกรณ์ที่เพื่อไว้สำหรับการยึดและหลุดตัวที่เนื่องมาจากอุณหภูมิ หรือ สำหรับการเปลี่ยนรูปเนื่องจากภาระที่กระทำอุปกรณ์เหล่านี้มักจะมีไว้ที่ฐานใดฐานหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ลูกกลิ้ง (roller) เป็น โยก (rocker) หรือ อาจจะเป็นพวกข้อต่อที่เลื่อนได้ (slip joint) โครงถักที่ไม่มีอุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นปัญหาแบบ statically indeterminate

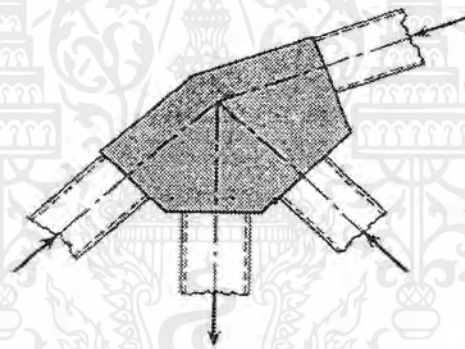


ชิ้นส่วนรับสองแรง

รูปที่ 5.3 ชิ้นส่วนรับสองแรง

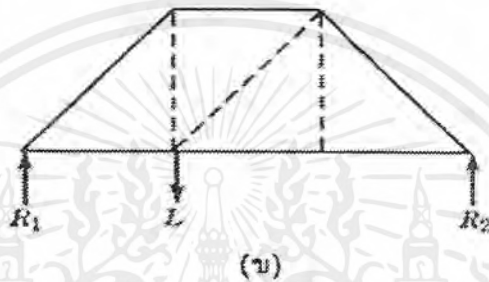
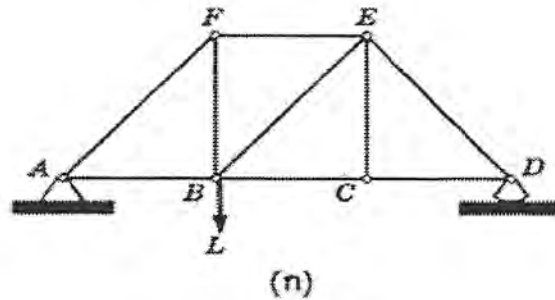


รูปที่ 5.4 แรงในชิ้นส่วนรับสองแรง



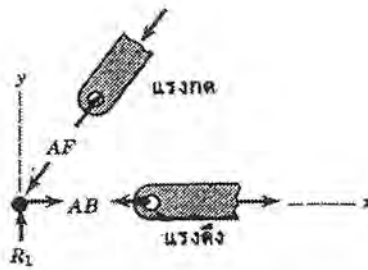
รูปที่ 5.5 แนวศูนย์กลางของชิ้นส่วน

ในการวิเคราะห์หาแรงโครงถักธรรมดา (simple truss) ในที่นี้จะแสดงไว้สองวิธีและแต่ละวิธีจะใช้รูปที่ 5.6 (ก) เป็นตัวอย่างและรูปที่ 5.6 (ข) แสดงห้วงวัตถุอิสระของโครงถัก แรงปฏิกิริยาภายนอกหาได้โดยการคำนวณจากสมการของการสมดุลเมื่อคิดโครงถักทั้งรูป ต่อไปจึงวิเคราะห์หาแรงในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน



รูปที่ 5.6 โครงถักรับแรง

1. วิธีการใช้จุดต่อ ( Method of joints ) วิธีนี้ประกอบด้วยการสมดุลของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อสลักข้อต่อที่จุดต่อ ( joint ) ต่าง ๆ ซึ่งก็คือการสมดุลของแรงที่ตัดกันนั่นเอง และ ใช้สมการของการสมดุลเพียงสองสมการเท่านั้น วิธีการเริ่มต้นที่จุดต่อใดก็ได้ที่มีแรงที่ทราบกันแล้วค่าแล้วอย่างน้อยหนึ่งแรงและมีแรงที่ไม่ทราบค่าไม่เกินสองแรง อาจจะเริ่มจากสลักทางด้านซ้ายก่อนที่ผังวัสดุอิสระ ( free body diagram ) แสดงไว้ในรูปที่ 5.7 จุดต่อต่าง ๆ กำหนดด้วยตัวอักษรแรงในชิ้นส่วนกำหนดด้วยอักษรสองตัวของชิ้นส่วนนั้น ทิศทางของแรงที่ควรจะเป็นดูได้จากหลักการดังนี้ ผังวัสดุอิสระของเสี้ยวหนึ่งของชิ้นส่วน AF และ AB ได้แสดงไว้ด้วยเพื่อให้เห็นชัดถึงแรงกระทำและแรงปฏิกิริยา จริง ๆ แล้วชิ้นส่วน AB จะกดทางด้านซ้ายของสลัก ถึงแม้ว่าเขียนแรง AB ไว้ทางด้านขวาและชี้ออกจากสลัก ดังนั้นถ้าเขียนแรงไว้ทางด้านที่มีชิ้นส่วนอยู่เป็นหลักแล้วแรงดึง ( tension ) จะชี้ออกจากสลักและแรงกด ( compression ) จะชี้เข้าหาสลักเสมอ ขนาดของแรง AF หาได้จากสมการ  $\sum F_y = 0$  และ AB หาได้จาก  $\sum F_x = 0$



รูปที่ 5.7 ส่วนรับแรงดึงและแรงกด

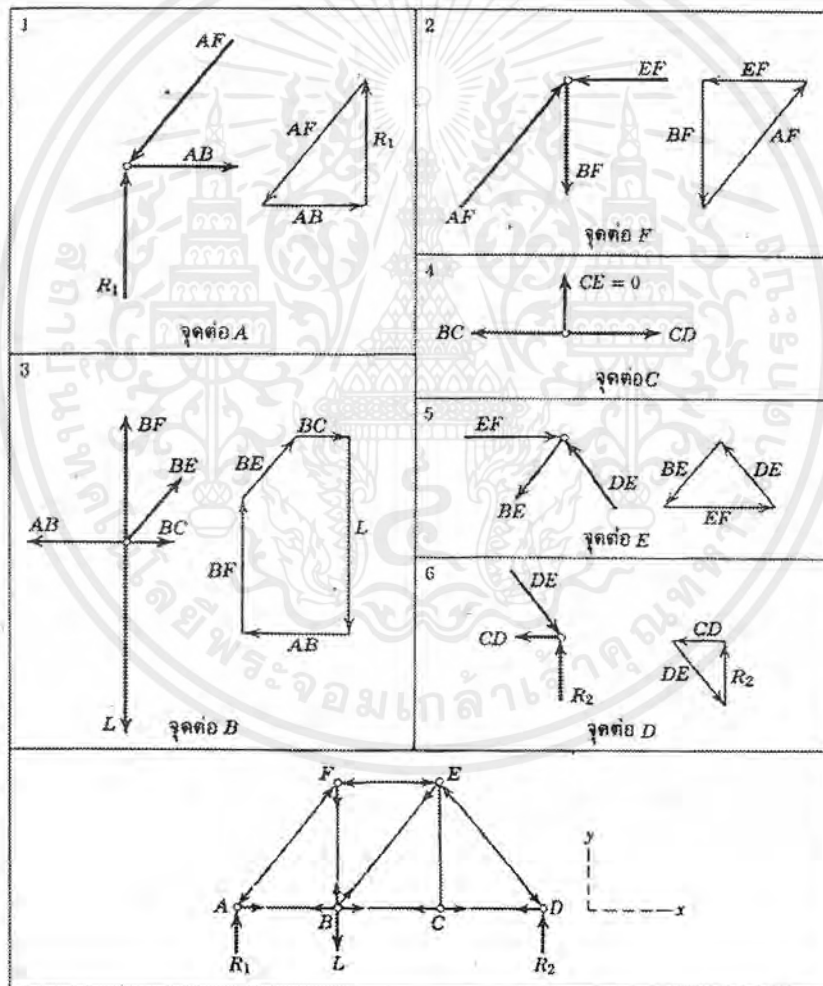
ต่อไปคิดที่สลัก F เพราะว่าในตอนนี้มีตัวไม่ทราบค่าเพียงสองแรงเท่านั้น คือ EF และ BF สลัก B, C, E และ D เป็นลำดับขั้นที่จะคิดต่อไป ฟังวัสดุอิสระและรูปเหลี่ยมของแรงแต่ละสลักซึ่งเป็นการแสดงสมการของการสมดุล  $\sum F_x = 0$  และ  $\sum F_y = 0$  แบบกราฟิกได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ตัวเลขหมายถึงลำดับในการคิดของสลักต่าง ๆ มีข้อควรสังเกตไว้ในที่นี้ว่าเมื่อถึงสลัก D ซึ่งอยู่จุดสุดท้ายแล้ว แรงปฏิกิริยา  $R_2$  จะต้องสมดุลกับแรงใน CD และ ED ซึ่งได้หามาจากสองสลักที่อยู่ข้าง ๆ แล้วสิ่งนี้เป็น การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ และมีข้อสังเกตอีกประการหนึ่งว่า ในการแยกสลัก C ออกเป็นอิสระ จะเห็นได้ทันทีว่า แรงใน CE จะเป็นศูนย์ ตามสมการ  $\sum F_y = 0$  แต่แรงในชิ้นส่วนนี้จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีแรงภายนอกกระทำที่ C บ่อยครั้งที่มักจะแสดงถึงแรงดึง T และ แรงกด C ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ลงในรูปเดิม โดยเขียนลูกศรชี้ออกจากสลักเมื่อเป็นแรงดึงและชี้เข้าหาสลักเมื่อเป็นแรงกดดังแสดงไว้ในตอนล่างของรูปที่ 5.8

ในบางกรณีที่ไม่สามารถที่จะกำหนดทิศทางที่ถูกต้องของแรงที่ไม่ทราบค่าที่กระทำต่อสลักได้ เมื่อเป็นเช่นนี้สามารถที่จะกำหนดเช่นไรก็ได้ ค่าลบที่ได้จากการคำนวณหมายถึงว่าคำตอบที่ถูกต้องจะมีทิศทางกลับกันกับที่สมมติไว้

ถ้าโครงถักธรรมดา ( simple truss ) มีฐานรับมากเกินไปจนทำให้จำเป็นให้อยู่ในสภาพสมดุล โครงถักเช่นนี้เรียกว่า statically indeterminate และ ฐานรับที่เกินมานี้เป็น external – redundancy ถ้าโครงถักมีชิ้นส่วนภายในมากเกินไปจนจำเป็นจะป้องกันไม่ให้เกิดขยุบตัวชิ้นส่วนที่เกินมานี้เป็น internal redundancy สำหรับโครงถักซึ่งเป็น statically determinate externally จะมีความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างชิ้นส่วนและจำนวนของชิ้นส่วน และจำนวนของข้อสลักที่จำเป็นสำหรับความมั่นคงภายในโดยปราศจาก redundancy เนื่องจากมีสมการของแรงสองสมการในการสมดุลของแรงสองสมการในการสมดุลของแต่ละสลัก ดังนั้นจะมี  $2j$  สมการสำหรับโครงถักธรรมดาที่มี  $j$  สลัก ถ้าโครงถักมี  $m$  two-force member และมีตัวไม่ทราบค่าทั้งหมดเท่ากับ  $m+3$  ดังนั้นโครงถักระนาบธรรมดาซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐาน คือ รูปสามเหลี่ยมจะต้องมีเงื่อนไขตามสมการ  $m+3 = 2j$  สำหรับโครงถักแบบ statically determinate internally

ความสัมพันธ์นี้เป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับความมั่นคง แต่ว่าไม่เพียงพอที่จะกำหนดความมั่นคงได้ ทั้งนี้ขึ้นส่วนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งในจำนวนของ  $m$  ชั้นนี้อาจจะประกอบกันเป็นรูปที่ไม่มั่นคงได้ ถ้า  $m+3 > 2j$  แสดงว่ามีจำนวนของชิ้นส่วนมากกว่าจำนวนของสมการที่มี และโครงก็จะเป็น statically determinate internally ถ้า  $m+3 < 2j$  โครงก็จะไม่มั่นคงเพราะชิ้นส่วนขาดไปและขยับตัวได้เมื่อมีแรงกระทำ

รูปเหลี่ยมของแรงสำหรับแต่ละสลักแสดงไว้ในรูป 5.9 ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้หาแรงที่ไม่ทราบค่าและยังเป็นการตรวจสอบคำตอบที่ได้จากการคำนวณเมื่อใช้สมการของสมการสมดุลด้วย ถ้ากำหนดลำดับในการรวมกันของแรงที่แต่ละสลักเหมือนกัน เช่น ตามเข็มนาฬิกา รูปเหลี่ยมของแรงเหล่านี้สามารถนำมาเขียนทับกันได้เรียกว่า Maxwell diagram ขนาดของแรงและทิศทางสามารถหาได้โดยตรงจากไดอะแกรมนี้



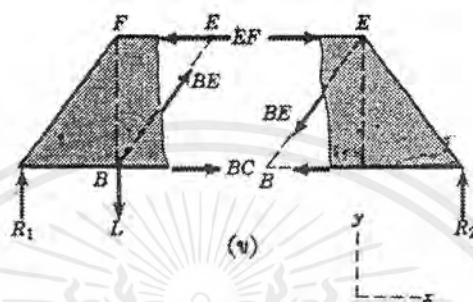
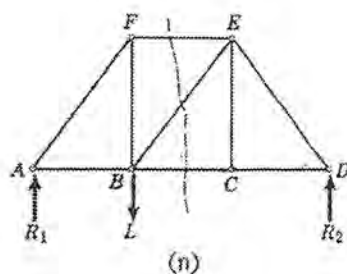
รูปที่ 5.8 ไดอะแกรมของแมกซ์เวลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการใช้ภาคตัด ( Method of section ) ข้อได้เปรียบของวิธีการใช้จุดต่อ คือจะใช้สมการของการสมดุลเพียงสองสมการเท่านั้น ทั้งนี้เพราะวิธีการเกี่ยวข้องกับระบบของแรงตัด กันที่จุดหนึ่ง แต่สำหรับวิธีการใช้ภาคตัด สมการของโมเมนต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยจากการเลือกภาคตัด (section) ที่ระบบของแรงไม่ได้ตัดกันที่จุดหนึ่ง ข้อได้เปรียบของวิธีการใช้ภาคตัดคือสามารถใช้หาแรงในชิ้นส่วนใด ๆ ได้โดยตรงจากการตัด section ผ่านชิ้นส่วนนั้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเริ่มคำนวณจากสลักแรกไปจนถึงชิ้นส่วนที่ต้องการ ในการเลือกตัด section มีข้อพึงสังเกตว่า ชิ้นส่วนไม่ทราบค่าของแรงจะต้องมีไม่เกินสามในแต่ละภาคตัดเพราะว่ามีเงื่อนไขของการสมดุลเพียงสามสมการเท่านั้น

ต่อไปจะแสดงถึงวิธีการนี้กับโครงถักในรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นตัวอย่างในวิธีที่แล้วเช่นกัน โครงถักนี้ได้แสดงไว้อีกในรูปที่ 5.9 (ก) ชิ้นแรกหาแรงปฏิกิริยาภายนอกโดยวิธีเช่นเดียวกับวิธีที่แล้วโดยการคิดโครงถักทั้งหมดเป็นวัตถุชิ้นเดียว เมื่อต้องการหาแรงในชิ้นส่วนใด เช่น BE ให้ตัดโครงถักออกโดยภาคตัดสมมติที่แสดงไว้ด้วยเส้นประดังรูปที่ 5.9 (ข) ภาคตัดนี้ชิ้นส่วนทั้งสามซึ่งยังไม่ทราบแรง เพื่อให้แต่ละส่วนของโครงถักที่ถูกตัดยังคงอยู่ในสมดุลจึงจำเป็นต้องใส่แรงเท่ากับแรงที่ชิ้นส่วนที่ถูกตัดออกไปกระทำ แรงเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นแรงดึงหรือแรงกดจะต้องอยู่ในแนวของชิ้นส่วนเสมอเพราะชิ้นส่วนเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นแรงดึงหรือแรงกดจะต้องอยู่ในแนวของชิ้นส่วนเสมอเพราะชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนรองรับสองแรง ส่วนที่ถูกตัดทางด้านซ้ายอยู่ในสมดุลภายใต้แรงกระทำต่าง ๆ ดังนี้ภาระ  $L$  แรงปฏิกิริยา  $R_1$  และแรงที่ชิ้นส่วนทั้งสามที่ถูกตัดออกไป (ส่วนทางด้านขวา) กระทำ ทิศทางของแรงที่เขียนสามารถสังเกตได้จากเงื่อนไขการสมดุล ดังนั้นถ้าคิดโมเมนต์รอบจุด B สำหรับส่วนทางซ้ายจะเห็นว่าได้ว่าแรง  $EF$  ควรจะชี้ไปทางซ้ายซึ่งก็คือแรงกด ภาระ  $L$  มีค่ามากกว่าแรงปฏิกิริยา  $R_1$  ดังนั้นแรง  $BE$  จะต้องชี้ขึ้นเพื่อให้สมดุลทางแนวตั้ง แรง  $BE$  เป็นแรงดึงเพราะกระทำออกจากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนด้วยการประมาณค่าของแรง  $R_1$  และ  $L$  ไว้ในใจแรง  $BC$  ควรจะไปทางขวาเพื่อการสมดุลของโมเมนต์รอบจุด E ซึ่งถ้าสังเกตจากโครงถักก็จะพบเช่นเดียวกันว่า ชิ้นส่วนในแนวราบด้านล่างจะต้องถูกดึงเนื่องจากการเอนตัวที่เนื่องจากโมเมนต์ตัด เมื่อใช้สมการของโมเมนต์รอบจุด B สามารถหา  $EF$  ได้ทันที เพราะแรงอื่น ๆ ผ่านจุด B โดย  $BE$  หาได้จากสมการของแรงในแนวแกน  $y$   $BC$  หาได้จากสมการโมเมนต์รอบจุด E ด้วยวิธีที่กล่าวมานี้แรงที่ไม่ทราบค่าทั้งสามสามารถหาได้โดยอิสระจากกัน

ส่วนของโครงถักทางด้านขวาอยู่ในสมดุลภายใต้แรงปฏิกิริยา  $R_2$  และแรงในชิ้นส่วนที่ถูกตัดทั้งสาม ซึ่งมีทิศทางกระทำตรงกันข้ามกับเมื่ออยู่ในส่วนทางด้านซ้ายทิศทางของแรงในแนวราบดูได้จากการสมดุลของโมเมนต์รอบจุด B และ E



รูปที่ 5.9 ภาคตัดแรงแรง

โครงสร้างทั้งสองส่วนนี้นำไปใช้คำนวณหาแรงได้เหมือนกัน แต่ส่วนที่แรงเกี่ยวข้องน้อยกว่าจะคำนวณได้ง่ายกว่า

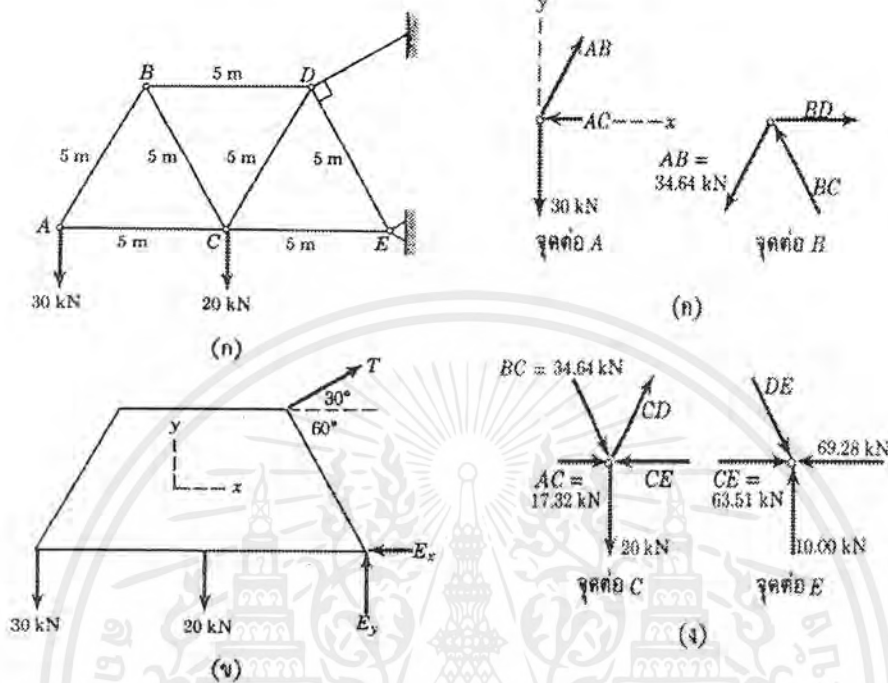
ถึงสำคัญก็จะต้องเข้าใจว่าในวิธีการใช้ภาคตัดนี้คิดส่วนของโครงถักทั้งหมดเป็นชั้นเดียว อยู่ในสมดุล ดังนั้นแรงในชิ้นส่วนที่อยู่ภายในภาคตัดจะไม่นำมาชั่งด้วยการคำนวณ เพื่อให้วัตถุและแรงภายนอกที่กระทำเห็นได้ชัดจึงมักจะให้รอยตัดผ่านที่ชิ้นส่วนไม่ใช่ผ่านสลัก

ในวิธีการใช้ภาคตัดนี้สมการของโมเมนต์มีประโยชน์มาก และจุดศูนย์กลางของโมเมนต์นั้นมักจะเลือกจุดที่มีแรงผ่านมากที่สุด ซึ่งอาจจะอยู่ในหรือนอกส่วนที่ตัดก็ได้ เมื่อเขียนผังวัสดุอิสระของภาคตัดแล้ว ไม่เสมอไปนักที่จะทราบทิศทางที่ควรจะเป็นของแรงที่ไม่ทราบค่า เมื่อเป็นดังนี้จะสมมติเป็นเช่นใดก็ได้ ถ้าค่าที่ได้มีเครื่องหมายบวกแสดงว่าสมมติไว้ถูกต้องได้เครื่องหมายลบแสดงว่าสมมติไว้กลับทิศ การกำหนดสัญลักษณ์ของชิ้นส่วนและแรงมักจะใช้ตัวอักษรที่อยู่ปลายทางทั้งสองของชิ้นส่วนนั้น

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการหาแรงในแต่ละชิ้นส่วนโดยใช้วิธีทั้งสอง คือ วิธีการใช้จุดต่อ และ วิธีการใช้ภาคตัด

ตัวอย่าง 1 จงคำนวณหาแรงในชิ้นส่วนของโครงถักแบบปลายยึดแน่น (Cantilever truss) ที่รับภาระดังรูป ด้วยวิธีการแบบจุดต่อ

วิธีทำ



รูปที่ 5.10 ลักษณะแรงต่าง ๆ

ถ้าไม่ต้องการคำนวณแรงปฏิกิริยาภายนอกที่ D และ E การคำนวณจะต้องเริ่มจากสลักที่ปลายรับน้ำหนักก่อน แต่อย่างไรก็ดี เมื่อจะต้องหาแรงในชิ้นส่วนทุกชิ้นอยู่แล้ว ดังนั้นจะเริ่มคำนวณหาแรงปฏิกิริยาภายนอกที่ D และ E ก่อน จากผังวัสดุรูป (ข)

จากสมการของการสมดุล จะได้ว่า

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

ในรูป(ค) เป็นผังวัสดุอิสระ ที่แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำที่แต่ละสลัก ทิศทางที่ถูกต้องของแรงจะหาได้เมื่อพิจารณาสลักเรียงลำดับไป ที่สลัก A ทิศทางของแรงถูกต้องอย่างไม่มีปัญหา จากการสมดุล

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

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

ซึ่ง T เป็นแรงดึง และ C เป็นแรงกด

ต่อไปจะวิเคราะห์สลัก B เพราะว่าที่สลัก C มีแรงที่ไม่ทราบค่ามากกว่าสองแรง BC จะต้องมียุทธศาสตร์ขึ้น เมื่อเป็นดังนี้ แรง BD จะต้องชี้ไปทางขวาเพื่อทำให้แรงสมดุล เช่นเดียวกัน แรงที่ไม่ทราบค่าคำนวณได้จาก

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

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

ในขณะที่สลัก C ก็เหลือแรงที่ไม่ทราบค่าเพียงสอง และหาได้แบบเดียวกับที่แล้วมา

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

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

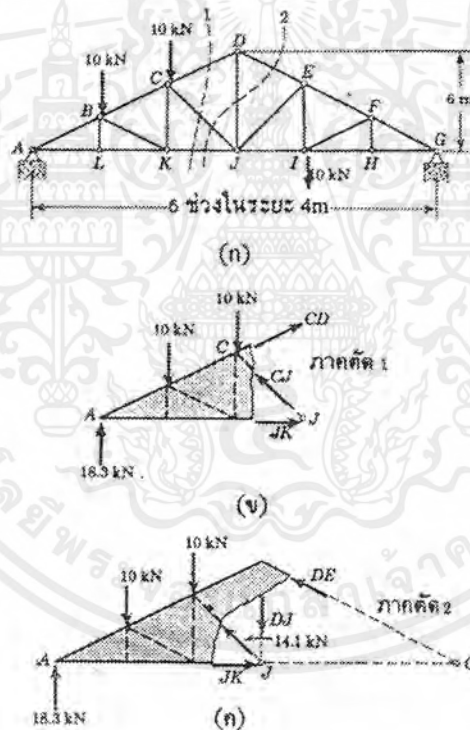
สุดท้ายที่สลัก E จะได้

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

และสมการ  $\sum F_x = 0$  เป็นการตรวจสอบความถูกต้อง

ตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธีการแบบภาคตัด จงคำนวณหาแรงในชิ้นส่วน DJ ของโครงถักแบบโหว ดังแสดงในรูป ไม่ต้องแรงในแนวราบที่ฐานรับ

วิธีทำ



รูปที่ 5.11 ลักษณะแรงในโครงถัก

ภาคตัดหมายเลข 2 ที่ผ่านจำเป็นต้องผ่านถึงชิ้นส่วนซึ่งยังไม่ทราบค่าแรง ถึงแม้ว่าแรงสามแรงจะตัดกันที่ J และใช้สมการของโมเมนต์รอบ J หาแรงที่ DE) ได้ก็ตาม แรงใน DJ ก็ยังคงหาไม่ได้จากสมการของการสมดุลที่เหลืออยู่สองสมการดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาที่ภาคตัดหมายเลขหนึ่งก่อน

ผังวัสดุอิสระของภาคตัดหมายเลข 1 ได้แสดงไว้ในรูปซึ่งแรงปฏิกิริยาที่  $A = 18.3 \text{ kN}$  ได้หามาแล้วจากการคิดโครงถักทั้งหมดเป็นวัตถุชิ้นเดียว ในการกำหนดทิศทางที่ควรจะเป็นของแรงที่ชิ้นส่วนทั้งสามที่ถูกตัด การสมดุลของโมเมนต์รอบ A จัดแรง CD และ JK ออกไปทำให้เห็นได้ชัดว่า CJ จะต้องขึ้นและไปทางซ้ายการสมดุลของโมเมนต์รอบ C จะจัดแรงทั้งสามที่ผ่าน C ออก และชี้ให้เห็นว่า JK จะต้องไปทางขวาเพื่อเพิ่มโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาที่ยังขาดอยู่หรืออาจพิจารณาได้จากชิ้นส่วนทางด้านล่างจะต้องถูกดึง เพราะว่าแนวโน้มที่จะแอ่นตัวของโครงถักชิ้นส่วน CD ถึงแม้เมื่อดูผิวเผินควรจะถูกต้อง แต่จะกำหนดให้เป็นแรงดึงก็ได้ จะไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเมื่อกำหนดทิศทางของแรงไม่ว่าแรงเดียวหรือมากกว่าผิด ตราบเท่าที่การคำนวณยังคงใช้กฎการเดิม คำตอบที่มีค่าเป็นลบแสดงว่าทิศทางจริงกลับกันกับที่สมมติไว้

โดยการวิเคราะห์ที่ภาคตัดหมายเลข 1 หา CJ ได้จาก

$$(\sum M_A = 0) , 0.707CJ(12) - 10(4) - 10(6) = 0 , CJ = 14.1 \text{ kN(C)}$$

ซึ่งในสมการนี้โมเมนต์ของแรง CJ คำนวณโดยแยก CJ ออกเป็นแรงในแนวดิ่งและแนวราบที่จุด J การสมดุลของโมเมนต์รอบ J จะได้ว่า

$$(\sum M_J = 0) , 0.894CD(6) + 18.3(12) - 10(4) - 10(8) = 0 , CD = -18.6 \text{ kN}$$

ซึ่งโมเมนต์ของ CD รอบ J คำนวณโดยแยก CD ออกเป็นสองแรงย่อยที่ D เครื่องหมายลบแสดงว่าทิศทางของ CD กำหนดไว้ผิด

$$\text{ดังนั้น } CD = 18.6 \text{ kN(C)}$$

เมื่อเป็นเช่นนี้ก็อาจเปลี่ยนทิศทางของ CD ในผังวัสดุอิสระ และกลับเครื่องหมายในการคำนวณก็ได้ถ้าต้องการหรือมีจะนั้นก็ปล่อยไว้เช่นนี้ แต่ทำที่สังเกตถึงทิศทางที่ต้องไว้

จากผังวัสดุอิสระของภาคตัดหมายเลข 2 ซึ่งในขณะนี้รู้ค่า CJ แล้วการสมดุลโมเมนต์รอบ G จะจัด DE และ JK ดังนั้น

$$(\sum M_G = 0) , 12DJ + 10(16) + 10(20) - 18.3(24) - 14.1(0.707)(12) = 0$$

$$\therefore DJ = 16.6 \text{ kN(T)}$$

ซึ่งโมเมนต์ของ CJ หาได้จากแรงย่อยของ CJ กระทำที่ J คำตอบของ DJ เป็นบวกแสดงว่าที่สมมติเป็นแรงดึงนั้นถูกต้องแล้ว

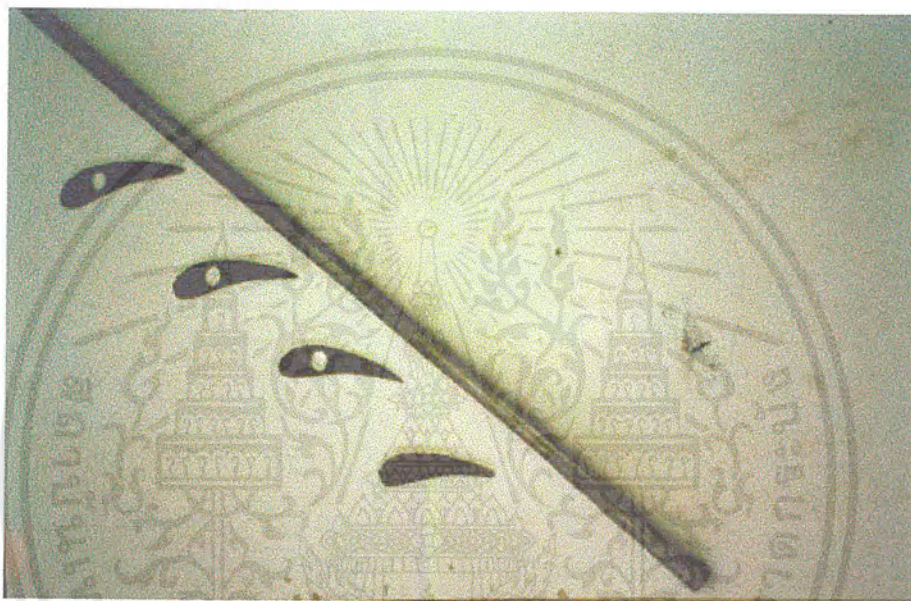
## บทที่ 6

### ส่วนประกอบและการติดตั้ง

ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงส่วนต่างๆ ของ Wind Turbine และการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ จากที่เราได้ออกแบบ ใบพัด ออกแบบ โครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆ แล้วนั้น เราจะนำไปทำ ชิ้นส่วนต่างๆ โดยจะแยกเป็นส่วนๆ ดังนี้

#### 6.1 ใบพัด

ใบพัดประกอบด้วย

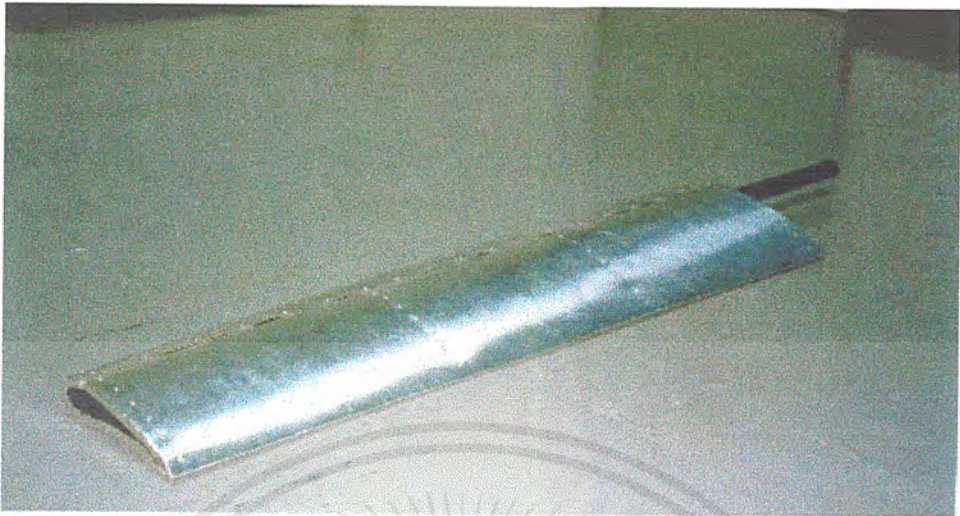


รูปที่ 6.1 แอร์ฟอยล์



รูปที่ 6.2 เพลานในแอร์ฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 อลูมิเนียมแผ่นห่อใบพัด

## 6.2 ส่วนศูนย์กลางการหมุน ประกอบด้วย

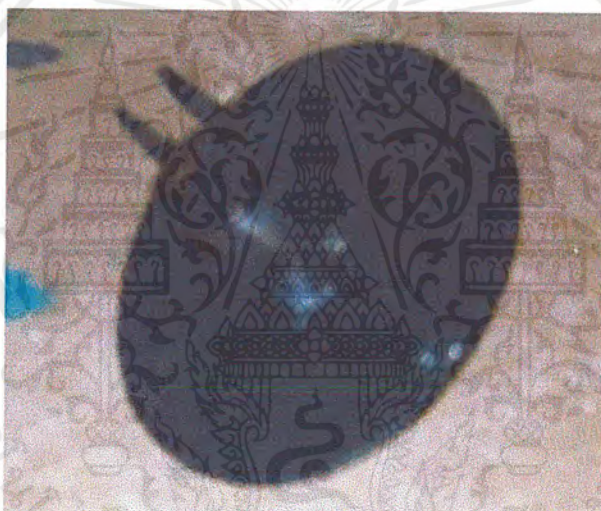


รูปที่ 6.4 เพลาหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แบริ่งรับเพลลา



รูปที่ 6.6 ส่วนหัวการหมุน

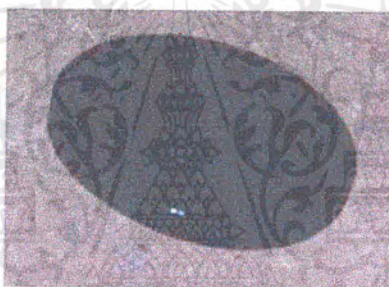


รูปที่ 6.7 ท่อรองเพลลาหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 โช๊ค



รูปที่ 6.9 หน้าแปลนรองใบพัด



รูปที่ 6.10 ส่วนตัวกลางกึ่งหัน

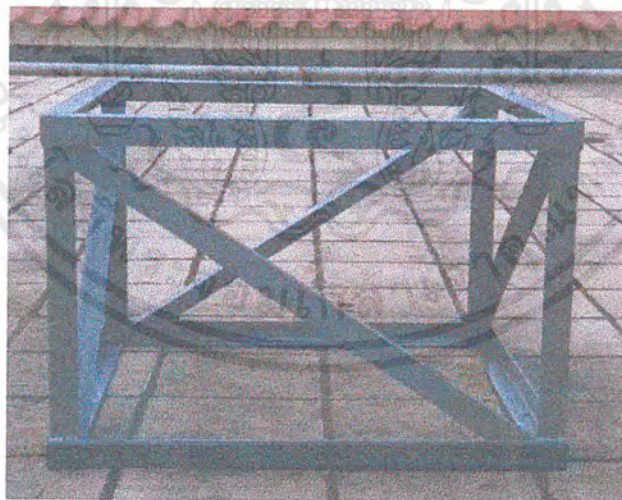
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 โครงสร้าง

ประกอบด้วย

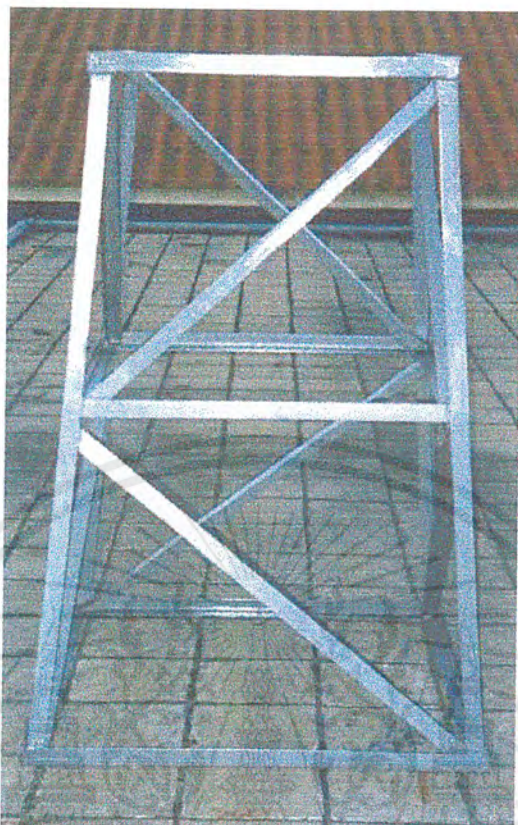


รูปที่ 6.11 โครงเหล็กส่วนบน



รูปที่ 6.12 โครงเหล็กส่วนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 โครงเหล็กส่วนล่าง

#### 6.4 หาง

ประกอบค้ำ



รูปที่ 6.14 หาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ได้ขึ้นส่วนต่างๆแล้ว เราก็จะมาประกอบเฉพาะส่วนต่างๆ ก่อนหลังจากนั้นก็ทำการประกอบรวมโดยนำส่วนศูนย์กลางการหมุน ประกอบเข้ากับส่วนโครงสร้าง และนำส่วนหางประกอบกับ ส่วนศูนย์กลางการหมุนหลังจากนั้น นำโครงสร้างตั้งขึ้น เมื่อตั้งเสร็จแล้วเราก็จะนำปูนมาหล่อเพื่อความแข็งแรง หลังจากนั้นเราก็จะนำส่วนใบพัดมาประกอบ แล้วตรวจสอบความแข็งแรงของส่วนยึดต่างๆ ก็จะเสร็จขั้นตอนการประกอบ

เมื่อประกอบเสร็จแสดงผังรูป



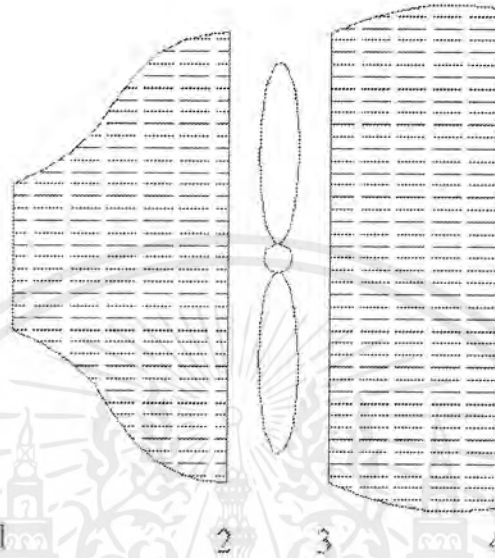
รูปที่ 6.15 กังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

## การคำนวณประสิทธิภาพ

## 7.1 สมการโมเมนตัม



รูปที่ 7.1 การไหลที่สภาวะต่างๆ

จากสมการโมเมนตัม

$$\Sigma F_x = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho u dv + \int_{cs} \rho u \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (7.1)$$

$$P_1 A_1 - P_4 A_4 - F_x = \int_1^4 \rho u dv + \int_1^4 \rho u \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

จาก  $P_1 = P_4 = P_{atm}$ 

$$-F_x = -\rho_1 u_1 v_1 A_1 + \rho_4 u_4 v_4 A_4 \quad \text{โดย } \rho_1 = \rho_4 = \rho$$

โดย  $Q_1 \approx Q_4 = Q$  จะได้

$$-F_x = -\rho v_1 Q + \rho v_4 Q$$

$$F_x = \rho v_1 Q - \rho v_4 Q$$

$$F_x = \rho Q (v_1 - v_4) \quad (7.2)$$

จาก

$$F_x = P_2 A_2 - P_3 A_3 \quad (7.3)$$

โดย  $P_2 > P_3$  และ  $A_2 = A_3 = A^*$ 

$$F_x = (P_2 - P_3) A^* \quad (7.4)$$

จาก (7.2) และ (7.4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho Q (v_1 - v_4) = (P_2 - P_3) A^*$$

$$\rho v A (v_1 - v_4) = (P_2 - P_3) A^*$$

โดยประมาณ  $A \approx A^*$  จะได้

$$\rho v (v_1 - v_4) = (P_2 - P_3) \quad (7.5)$$

จาก สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) จาก 1→2

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad (7.6)$$

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g Z_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g Z_2$$

โดย  $Z_1 = Z_2$  จะได้

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (7.7)$$

ในทำนองเดียวกันจากจุด 3→4 จะได้

$$P_3 + \frac{\rho v_3^2}{2} = P_4 + \frac{\rho v_4^2}{2} \quad (7.8)$$

จาก (7.7) จะได้

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} - \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (7.9)$$

และ

$$P_3 = P_4 + \frac{\rho v_4^2}{2} - \frac{\rho v_3^2}{2} \quad (7.10)$$

แทนค่า  $P_2$  และ  $P_3$  ลงใน (7.5)

$$\rho v (v_1 - v_4) = \left[ P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} - \frac{\rho v_2^2}{2} - P_4 - \frac{\rho v_4^2}{2} + \frac{\rho v_3^2}{2} \right] \quad (7.11)$$

ให้  $P_1 = P_4$  และ  $v_2 = v_3$  จะได้

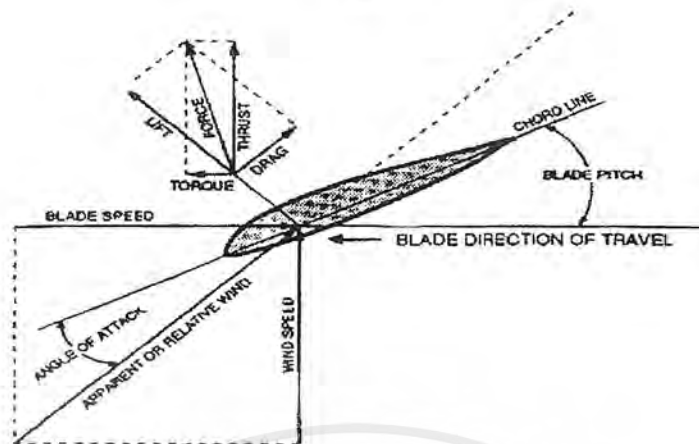
$$\begin{aligned} \rho v (v_1 - v_4) &= \frac{\rho v_1^2}{2} - \frac{\rho v_4^2}{2} \\ v (v_1 - v_4) &= \frac{v_1^2 - v_4^2}{2} \\ v &= \frac{v_1^2 - v_4^2}{2(v_1 - v_4)} \\ v &= \frac{v_1 + v_4}{2} \end{aligned} \quad (7.12)$$

$$\text{Input Power} = F_x v_1 = \rho Q (v_1 - v_4) v_1 \quad (7.13)$$

$$\text{Output Power} = F_x v = \rho Q (v_1 - v_4) \left( \frac{v_1 + v_4}{2} \right) \quad (7.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Efficiency} = \frac{v_1 + v_4}{2v_1} \quad (7.15)$$



รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะและแรงที่กระทำที่แอร์ฟอยล์

## 7.2 Power ที่ได้จากการคำนวณ

ความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ 10 miles/hr

ความเร็วลมที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา 6 miles/hr

$$\begin{aligned} 10 \text{ miles/hr} &= (10 \text{ mile/hr}) \times (1.6) \left(\frac{5}{18}\right) \\ &= 4.44 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 6 \text{ miles/hr} &= (6 \text{ miles/hr}) \times (1.6) \left(\frac{5}{18}\right) \\ &= 2.67 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ความเร็วรอบที่ต้องการ = 60 รอบต่อนาที

$$\begin{aligned} v_r &= \frac{\pi D N}{60} \\ &= \frac{\pi(3)(60)}{60} \\ &= 3\pi \\ &= 9.424 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (7.16)$$

## 7.3 การคำนวณ output จากการออกแบบ

ความเร็วลมที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของ air foil

$$\begin{aligned} v_A &= \sqrt{v_w^2 + v_r^2} \\ &= \sqrt{4.44^2 + 9.424^2} \end{aligned} \quad (7.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sqrt{108.54}$$

$$v_A = 10.42 \text{ m/s}$$

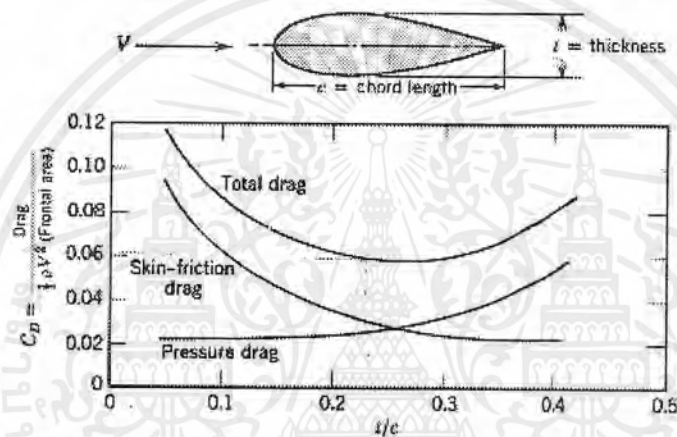
จาก

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (7.18)$$

และ

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (7.19)$$

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าความสัมพัทธ์สัมประสิทธิ์  $C_D$  กับอัตราส่วนของคอร์ด



จากตารางที่ 7.1

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

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

จะได้  $C_D = 0.065$

แทนค่าในสมการ(7.18)

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

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

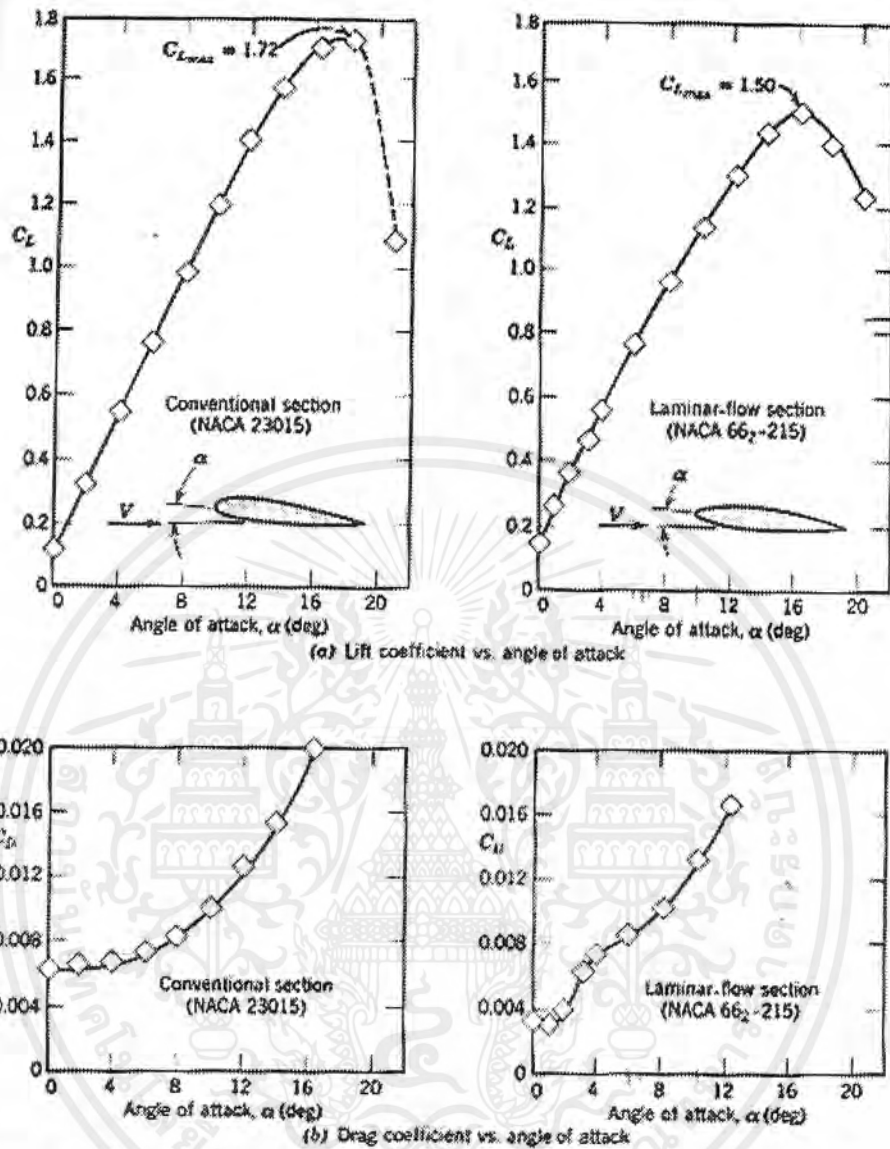
$$A = 6.9498 \text{ m}^2$$

$$0.065 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} (1.23) (10.42)^2 (6.9498)}$$

$$\therefore F_D = 30.16 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 ค่าความสัมพัทธ์ของมุมปะทะกับค่าสัมประสิทธิ์  $C_D, C_L$



จากตารางที่ 7.2

Angle of attack =  $15^\circ$  (NACA 4412)

$$C_L = 1.6$$

แทนค่าในสมการ(7.19)

$$1.6 = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}$$

$$F_L = 1.6 \times 0.5 \times 1.23 \times 10.42^2 \times 6.9498$$

$$\therefore F_L = 742.51 \text{ N}$$

$$F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (7.20)$$

$$= \sqrt{742.51^2 + 30.16^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = 743.12 \text{ N}$$

แรงที่กระทำต่อใบพัด = 743.12 N

$$\begin{aligned} \text{Wind Angle} &= \cos^{-1} \left( \frac{\text{Blade speed}}{\text{Relative Wind}} \right) \\ &= \cos^{-1} \left( \frac{9.44}{10.42} \right) \\ &= 25.23^\circ \end{aligned} \quad (7.21)$$

$$\text{Torque} = F \times R \quad (7.22)$$

$$= 2 F \sin 10.23 \times 0.75$$

$$= 2 (743.12) \times (0.178) \times (0.75)$$

$$= 198 \text{ N}\cdot\text{m}$$

จะได้แรงบิด = 198 นิวตันเมตร



## บทที่ 8

### สรุป และ วิจารณ์

ในการออกแบบสร้างกังหันลมนั้น ส่วนที่สำคัญที่สุด คือ การสร้างใบ ให้ได้ตามหลักทางอากาศพลศาสตร์ ตามที่เราต้องการ ซึ่งการสร้างทำได้ยากมาก จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และเทคโนโลยีอย่างมากเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ

การสร้างกังหันลมในกรณีนี้คือ กังหันลมแบบ 2 ใบเป็น กังหันลมชนิดที่แกนหมุนอยู่ในแนวนอน มีประสิทธิภาพสูง แรงบิดรอบแกนสูงกว่ากังหันแบบแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง จึงได้สร้างเพื่อการผลิตไฟฟ้า และ การสร้างใบพัดที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำตามขั้นตอน ของ SWD

( STEERING COMMITTEE FOR WIND ENERGY IN DEVELOPING COUNTRIES ) ซึ่งมีสำนักงานอยู่ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ ( NETHERLAND ) โดยกำหนดความต้องการ และออกแบบโดยอาศัยกราฟที่ได้จากการทดลองของ SWD ( จากตารางที่ 4.1 )

จากการทดลองสร้างใบพัดของจริง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร และทำการทดลอง เราได้ผลสรุปดังนี้

- 5.1 ความเร็วของลม การที่กังหันจะสามารถหมุนได้นั้นต้องอาศัยลมที่มีกำลังแรงพอประมาณ และ จะต้องมีส่วนสม่ำเสมอ ณ จุดที่จะตั้งกังหันลมควรต้องมีการศึกษาถึงลักษณะความเร็วของลม และปริมาณของลมที่เกิดขึ้น เป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ปี เสียก่อน แล้วนำค่าเฉลี่ยความเร็วของลมที่วัดจากเครื่องวัดความเร็วลมหรือแอนิโมมิเตอร์ ไปใช้ในการออกแบบกังหันลมให้เหมาะสม โดย ณ ที่นี้ความเร็วลมที่วัดได้จากกรมอุตุนิยมวิทยามีความเร็วลมประมาณ 4-10 ไมล์ / ชม. ซึ่งเราใช้ในการคำนวณหาใบพัดของกังหันลม
- 5.2 ลักษณะของใบ ตามลักษณะของ Airfoil ซึ่งได้มาจากคำนวณและออกแบบ ( แสดงไว้ในบทที่ 4 ) รวมทั้งมุมปะทะของใบ ค่าความเร็วปลายของใบพัดเป็นค่าที่ได้จากการทดลองหรือทำงานควรมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ แต่จากการสร้างใบพัดที่ใช้ในการทดลอง มุมบิดของใบอาจสร้างได้ไม่เท่ากันตามทฤษฎี ดังนั้นเมื่อทดลองความเร็วของใบพัดจึงไม่ได้เต็มที่นัก ค่าความเร็วปลายที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่ทฤษฎี ดังนั้นการสร้างใบพัดควรจะต้องมีประสบการณ์ทางด้านพลศาสตร์และอากาศพลศาสตร์เป็นอย่างดี
- 5.3 ความสูงของเสาตั้ง การที่จะให้กังหันลมหมุนด้วยความเร็วรอบสูงขึ้นจะต้องมีลมแรงพอสมควรเนื่องจากผลของความเร็วลมที่ความสูงต่าง ๆ ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น 3 เท่า เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น 1 เท่า ดังนั้นเสาที่ตั้งควรจะต้องตั้งอยู่บนที่สูงพอประมาณ ซึ่งจริง ๆ แล้วไม่ควรต่ำกว่า 10 เมตร นับจากพื้นดิน , ไม่มีสิ่งกีดขวางในรัศมี 25 เมตรโดยรอบ และต้องตั้งอยู่ในที่ที่มีทำเลเหมาะสม ( อ้างอิงได้จากบทที่ 2 )

## เอกสารอ้างอิง

1. Jack Park , **Simplified Wind Power System For Experiment**
2. Barnes W. McCormick , **Aerodynamics , Aeronautics and flight Mechanics**
3. นิทัศน์ นวชาติโมยิต และ นิमित ชมพนาวิ้ง , “ กังหันลมหมุนในแนวตั้งขนาดเล็กเพื่อการผลิตไฟฟ้า ” ปรินูญานิพนธ์ ปี 2535 ของภาควิชาเทคโนโลยีการวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. เหมธี หมั่นทำการ และ ก่อเกียรติ บุญชูกุล , **กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตยศาสตร์**
5. Robert W.Fox , Alan T. McDonald , **Introduction to Fluid Mechanics**

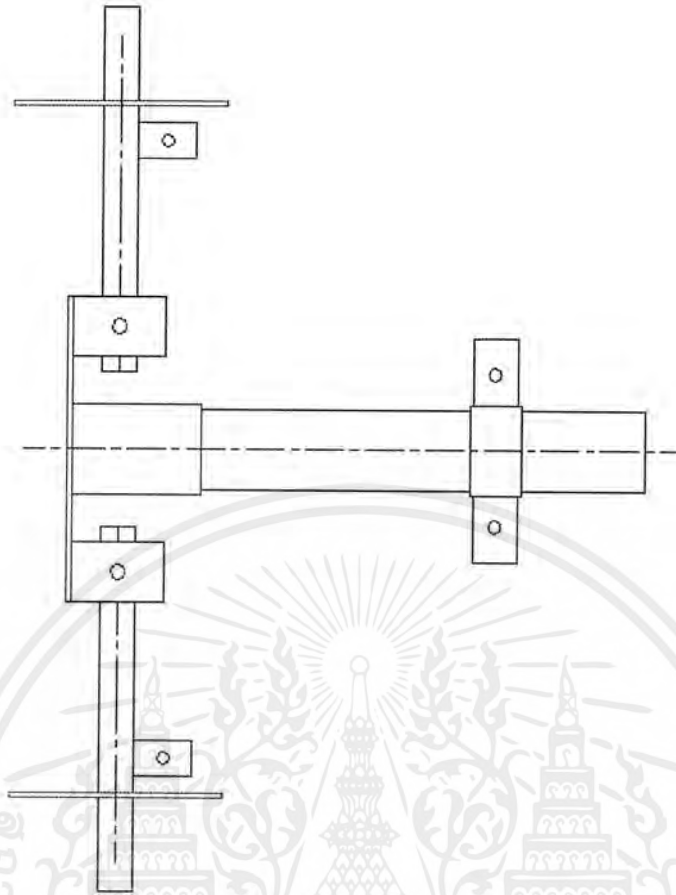


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

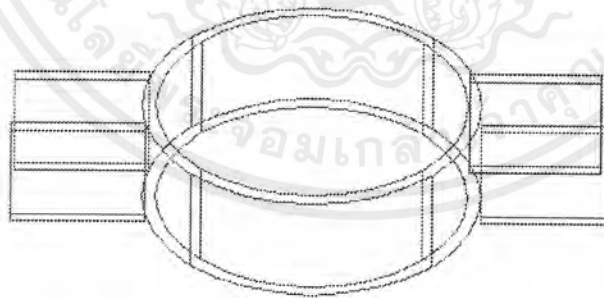
## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

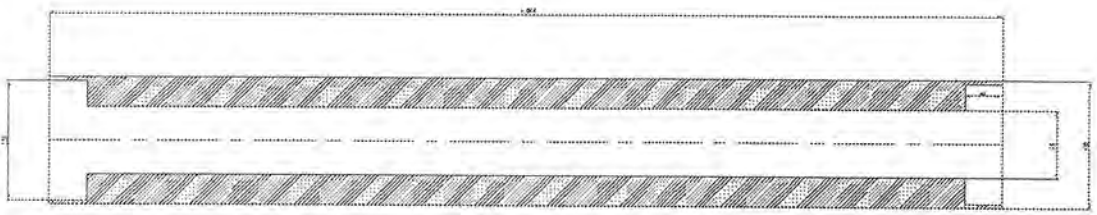


รูปที่1. ส่วนแกนกลางยึดใบพัด



รูปที่2. ส่วนยึดแกนกลาง

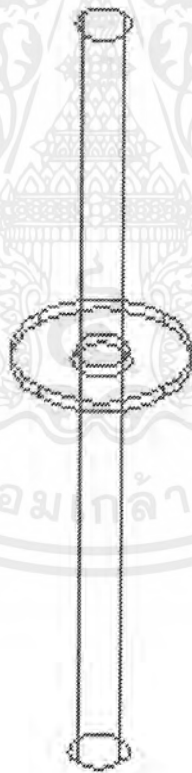
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3. ท่อเพลานอก

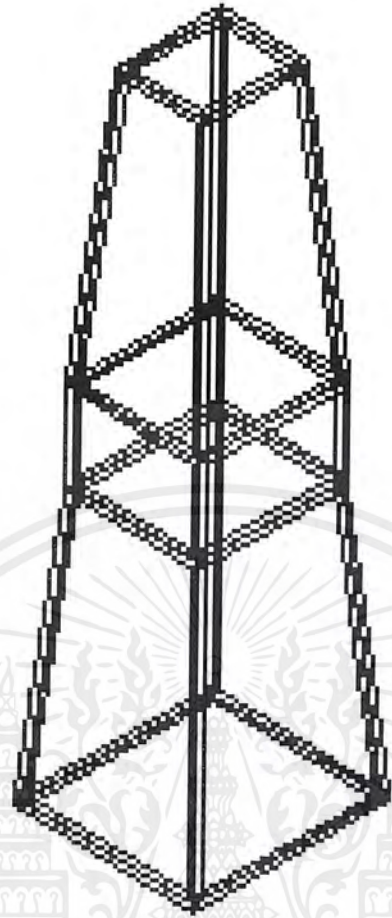


รูปที่4. ท่อเพลานใน



รูปที่5. เพลายึดแกนกลางใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6. โครงถัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้