

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เรื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม

Electricity from the wind



นายเกษตรศักดิ์ กุลบุตร

นายเตชิต กองจินดา

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 36849  
วัน, เดือน, ปี 29 ส.ค. 2543

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Electricity From The Wind

By

Mr.Kasetsak Kullabutr

Mr.Tachit Kongjinda

Project Report Submitted in Partial Fulfillment of the requirements for the Bachelor's

Degree

Collage of Industrial Technology

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร  
โดย

เครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม  
นายเกษตรศักดิ์ กุลบุตร รหัส 41012042  
นายเดชิต กองจินดา รหัส 41012055  
เทคโนโลยีโทรคมนาคม (เช้า)  
เทคนิคอุตสาหกรรม  
ศศ. วิชัย สุรพัฒน์

สาขาวิชา

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ  
ให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตร  
บัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตร

กรรมการ

..... ประธาน

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

..... กรรมการ

( )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อปริญญานิพนธ์

โดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

สาขาวิชา

ภาควิชา

ปีการศึกษา

เครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม

นายเกษตรศักดิ์ กุลบุตร

นายเชชิต กองจินดา

ผศ. วิชัย สุรพัฒน์

เทคโนโลยีโทรคมนาคม (เช้า)

เทคนิคอุตสาหกรรม

2542

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบและสร้างกังหันลมแกนนอนผลิตไฟฟ้า ได้เริ่มดำเนินการจากการเล็งเห็นถึงแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งมีราคาสูง จึงได้แนวคิดที่จะหาแหล่งอื่นมาทดแทน ด้วยเหตุนี้กังหันลมที่มีความเร็วรอบต่ำจึงได้ถูกสร้างเพื่อใช้ประโยชน์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการทดสอบได้ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Dinamo และส่งผ่านไปจัดเก็บที่ Battery โดยมีชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าคอยควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าและเมื่อบรรจุเต็ม ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ จะเริ่มผลิตกระแสไฟใน ความเร็วรอบที่ต่ำ และมีใบพัดทั้งหมดจำนวน 16 ใบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าความ สามารถที่จะเก็บกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ Battery ที่นำมา charge และเมื่อความเร็วรอบสูง ขึ้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นตาม

จากกังหันลมที่ได้สร้างขึ้นนี้ สามารถทำงานได้ดีในการจัดเก็บกระแสไฟฟ้าได้ใน ความเร็วลมที่ต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับภูมิภาคและสภาพแวดล้อมที่มีความเร็วลมที่ไม่ สูงนักและยังสามารถทำงานได้โดยใช้มอเตอร์หมุนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และนำไปที่จัด เก็บเป็นแหล่งสำรองพลังงานทดแทนอื่น ๆ ได้

(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Project Report**

**By**

**Department**

**Project Report Advisor**

**Academic Year**

**Electricity From The Wind**

**Mr. Kasetsak Kullabutr**

**Mr. Tachit Kongjinda**

**Telacommunication**

**Technology**

**Asst.Prof. Vichai Surapat**

**1999**

### **Abstract**

This thesis is design and construct the horizontal axis wind turbine which can produce electricity. Now the power resource is expensive so this project has an idea to find another power resources . For this reason wind turbine is selected to take advantage in produced electricity. The electricity is generated by dinamo and send to keep in a battery . The wind turbine generate the electric current in low speed it has 16 blades. By testing, the wind turbine can generate electricity current depend on the speed of turbine if the speed is higher, electricity current will be higher.

The wind turbine which is constructed, can get the electricity in the low wind speed. It suitable for any weather surrounding which the low wind speed. Which and can be used as a Power resource instate of another power resources in the future

## กิตติกรรมประกาศ

การที่โครงการเรื่องการออกแบบและสร้างกังหันลมแกนนอนตำเร็จลงได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ผศ. วิชัย ตูรพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และยังได้ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสถานที่หรืออุปกรณ์บางอย่างที่จำเป็นต้องใช้ในการทำโครงการ อาจารย์ประจำภาค วิชาเทคนิคอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการ และอาจารย์ประจำภาคอื่น ๆ ที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการ รวมถึงการให้ยืมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการทำโครงการครั้งนี้ด้วย

ขอกราบขอบคุณ บิดา-มารดา ที่สนับสนุนด้านทุนทรัพย์ และเพื่อนทุกคนที่ให้กำลังใจตลอดมา

คณะผู้จัดทำโครงการ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญรูปประกอบ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
ความหมายของสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 เนื้อหาเหตุผล	1
1.3 ความมุ่งหมายของการศึกษา	2
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกังหันลม	3
2.2 ชนิดต่าง ๆ ของกังหันลม	3
2.3 พลังงานจากลม	7
2.4 ทิศทางลม	8
2.5 กำลังงานลม	9
2.6 ทฤษฎีโมเมนตัม	11
2.7 พลังงานที่ได้จากกระแสลม	14
2.8 ทฤษฎีอิตีเมนต์ของใบ	14
2.9 การหมุนของเวค	15
2.10 การสูญเสียที่ปลายใบ	17
2.11 การรวมทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีอิตีเมนต์ของใบ	17
2.12 สัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูงสุดทางทฤษฎี	20
2.13 สัมประสิทธิ์ไร้มิติ	23
2.14 การคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลม	24
2.15 เปรียบตรง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 แรงพลวัต	27
2.17 ความเค้นในพื้นช่องเฟือง	28
2.18 การพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นเฟือง	30
2.19 สายพาน	32
2.20 สายพานลิ่ม	34
2.21 การคำนวณหาขนาดของสายพานลิ่ม	37
2.22 การออกแบบลิ่ม	38
<b>บทที่ 3 วิธีการคำนวณและออกแบบ</b>	
3.1 ข้อกำหนดที่ใช้ในการคำนวณ	41
3.2 การคำนวณหาแรงที่กระทำบนใบพัด	41
3.3 การหาค่าความปลอดภัยของคานรูปฉากที่ใช้ยึดโครง	44
3.4 การคำนวณหาขนาดของเพลลาของกังหันลม	46
3.5 การคำนวณหาขนาดของเบร็ง	48
3.6 การออกแบบหอคอย	53
3.7 การคำนวณหาระยะคานในกังหัน	57
3.8 การคำนวณหาขนาดสายพาน	58
3.9 การคำนวณกำลังงานที่ได้จากเฟืองคอกจอก	59
3.10 การหาระยะระหว่างเพลลาของกังหันและเพลลาทที่เหมาะสม	61
3.11 การคำนวณหาขนาดสายพานที่นำมาใช้	62
3.12 การคำนวณหาลิ่มที่ใช้งาน	63
<b>บทที่ 4 การทดลองและประเมินผล</b>	
4.1 การวัดจำนวนรอบ	67
4.2 ขั้นตอนการตรวจเช็คก่อนการทดลอง	67
4.3 การทดลองเพื่อหากระแสไฟฟ้า	67
4.4 การทดลอง	69
4.5 ผลการทดลอง	68
4.6 การทำงานของวงจรนับรอบ	71
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 ผลที่ได้จากการทดลองกังหันลมแกนนอน	72
5.2 ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น	72
5.3 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหา	72
5.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก ก. (รูปภาพประกอบ)	75
ภาคผนวก ข. (ตารางประกอบ)	79
ภาคผนวก ค.(แบบกึ่งหันลมแกนนอน)	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงค่า $C_p$ ของกังหันชนิดต่าง ๆ ที่แปรตาม $\lambda$	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะของกังหันลมแกนนอน	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะของกังหันลมแกนตั้ง	6
รูปที่ 2.4 ลักษณะของใบกังหันลม	6
รูปที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันชนิดต่าง ๆ ที่แปรตามค่า $\lambda$	7
รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของลม ณ จุดต่าง ๆ รอบโลก	8
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของจุดวัดทิศทางลม	9
รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่และปริมาตรการไหลต่อวินาที	10
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศก่อนเข้าและออก จากกังหันลมในแนวแกน	12
รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ของความเร็วลมและแรงที่เกิดขึ้นบนโปรไฟล์ใบ	14
รูปที่ 2.11 แสดงการเคลื่อนที่ของอากาศด้านหลังกังหันลมที่เกิดขึ้น เนื่องจากการหมุน	15
รูปที่ 2.12 ไคอะแกรมของความเร็วลมที่เกิดขึ้นบนโปรไฟล์ใบ	18
รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานของกังหันลมในอุดมคติ	21
รูปที่ 2.14 ผลกระทบของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์แรงผลักดันกับสัมประสิทธิ์ ของแรงยกสำหรับ กังหันลม	21
รูปที่ 2.15 ผลกระทบของจำนวนใบพัดที่มีอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ ของแรงผลักดันกับสัมประสิทธิ์ของ แรงยกเท่ากับ 0.005	22
รูปที่ 2.16 ขนาดของเฟืองมาตรฐาน	26
รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดความเค้นในฟันเฟือง	27
รูปที่ 2.18 แสดงโมเมนต์บิดบนฟันเฟือง	28
รูปที่ 2.19 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส Y	29
รูปที่ 2.20 แสดงค่า Geometry factor $J(a)$	31

(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21	แสดงค่า Geometry factor $J(b)$	31
รูปที่ 2.22	แสดงค่าตัวประกอบความเร็ว $K_v$	32
รูปที่ 2.23	ลักษณะการจับด้วยสายพาน	34
รูปที่ 2.24	หน้าตัดสายพานลิ่มและล้อสายพาน	36
รูปที่ 2.25	แสดงค่าตัวประกอบผิว	37
รูปที่ 2.26	แผนภูมิที่ใช้ในการเลือกขนาดหน้าตัดของสายพานลิ่ม	37
รูปที่ 2.27	แรงที่เกิดจากการสวมคัตลิมลงในร่องลิ่มและแรงที่เกิดจากการส่งกำลังผ่านลิ่ม ตามความยาวและความสูงของลิ่ม	38
รูปที่ 2.28	สมมติให้แรงที่เกิดขึ้นบนลิ่มกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งความยาวและความสูง	38
รูปที่ 2.29	แรงบนรอยต่อด้วยลิ่ม	39
รูปที่ 3.10	การหาระยะ $c$	61
รูปที่ 3.11	ภาคตัดขวางของลิ่ม	65
รูปที่ 4.1	บล็อกไดอะแกรมการทดลองโดยใช้มอเตอร์และใช้ลมธรรมชาติ	68
รูปที่ 4.2	แผนภูมิการผลิตไฟฟ้าของกังหัน	69
รูปที่ 4.3	วงจรของเครื่องนับรอบ	70
รูปที่ 1	ภาพโครงสร้างฐานของกังหัน	75
รูปที่ 2	ภาพใบทั้งหมดของกังหันทั้งหมดจำนวน 16 ใบ	75
รูปที่ 3	ภาพชุดหัวส่งกำลังของกังหันและก้านใบของกังหันเมื่อประกอบเสร็จแล้ว	76
รูปที่ 4	ภาพการประกอบชุดหาง	76
รูปที่ 5	ภาพการประกอบใบของกังหัน	77
รูปที่ 6	ภาพการประกอบชุดการผลิตไฟฟ้าบนแท่นรองรับ	77
รูปที่ 7	ภาพกังหันลมหลังจากประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน	78

(ญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีของกังหันลมแบบที่มีการหมุน ในแนวนอนกับกังหันลมแบบที่แกนหมุนในแนวตั้ง	4
ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกจำนวนใบพัด	22
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตัวประกอบเกินภาระ $K_o$	31
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าตัวประกอบการติดตั้ง	35
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าตัวประกอบความเชื่อมั่น $K_f$	35
ตารางที่ 2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ $d_p$ ของล้อสายพานลุ่ม	36
ตารางที่ 3.1 แสดงค่า $T$ กับ $m$ ของแต่ละ Section	42
ตารางที่ 3.2 แสดงค่า $r_{CG}$ กับ $m$ ของแต่ละ Section	42
ตารางที่ 3.3 แสดงค่า $F_{T,CG}$ , $F_{CG}$ และ $m$ ที่กระทำกับใบพัดแต่ละ Section	43
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง	
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและ เหล็กกล้าผสม	79
ตารางที่ 2.8 มิติมาตรฐานและแรงประเมินของโรลลิงแบร์ริง (Co,C เป็น KN)	80
ตารางที่ 2.9 มิติมาตรฐานและแรงประเมินของโรลลิงแบร์ริง (Co,C เป็น KN)	81
ตารางที่ 2.10 ขนาดของลุ่มมาตรฐานที่ใช้กับเพลขนาดต่าง ๆ	82
ตารางที่ 2.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อสายพานแบนตาม มาตรฐาน ISO 99-1975(E)	83
ตารางที่ 2.12 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส	84
ตารางที่ 2.13 มาตรฐานสายพานลุ่ม	85
ตารางที่ 2.14 มาตรฐานสลักเกลียว	86
ตารางที่ 2.15 มาตรฐานนัต	87
ตารางที่ 2.16 มาตรฐานลุ่มอัด, ลุ่มครึ่งวงกลม, ล้อสายพานแน	88
ตารางที่ 2.17 มาตรฐาน Y-bearing	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.18	มาตรฐาน Thrust ball bearing	90
ตารางที่ 2.19	มาตรฐาน Angular contact ball bearing	91
ตารางที่ 2.20	ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตลอดรอบปี	92
ตารางที่ 2.21	แสดงสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา ที่อยู่ทั่วประเทศ	93
ตารางที่ 4.1	ตารางบันทึกผลการทดลอง	69



## ความหมายของสัญลักษณ์

A	พื้นที่กวาดของใบพัด
$A_0$	พื้นที่กวาดของใบพัดที่รัศมีต่าง ๆ
B	จำนวนใบพัด
C	ความยาวคอร์ด
$C_A$	สัมประสิทธิ์ของแรงกระทำในทิศทางลม
$C_d$	สัมประสิทธิ์ของแรงดูด
$C_L$	สัมประสิทธิ์ของแรงยก
$C_N$	ความสามารถในการรับโหลดจลน์
$C_o$	ความสามารถในการรับโหลดสถิตย์
$C_p$	สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน
$C_q$	สัมประสิทธิ์ของแรงบิดเพลลา
D	แรงดูด
$D_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
$D_o$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
E	พลังงานจลน์
e	จุดศูนย์กลางถ่วงเยื้องแกนศูนย์
$e_r$	จุดศูนย์กลางถ่วงโรเตอร์เยื้องแกนศูนย์
$F_s$	แรงในแนวแกน
$F_s, C_g$	แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่จุด $c_g$
$F_r$	แรงในแนวรัศมี
$F_r, C_g$	แรงรุนที่จุด $c_g$
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
H	ความสูงของหอคอย
I	โมเมนต์แห่งความเฉื่อยของพื้นที่
L	แรงยก
$L_{10}$	อายุประเมินของแบร์ริง
M	โมเมนต์
m	น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N$	จำนวนรอบต่อนาที
$\eta$	ค่าความปลอดภัย
$P$	กำลังงาน
$P_{air}$	กำลังงานของลม
$P_{mech}$	กำลังงานของกล
$P_n$	โพลดจลน์
$P_o$	โพลดศักย์
$r$	รัศมีใด ๆ
$rcg$	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึง cg
$Re$	เรย์โนลด์สเบอร์
$Re_n$	ค่า $Re$ สำหรับ $B=C_L \Rightarrow v=1$
$S_z$	ความแข็งแรงที่จุดคลาก
$T$	แรงบิดเพลา
$U$	ความเร็วที่ปลายใบ
$U_{eg}$	ความเร็วที่ $c_g$
$V$	ความเร็วลม
$v$	ความเร็วของลม
$w$	ความเร็วสัมพันธ์ของลมเทียบกับใบพัด
$\alpha$	มุมปะทะ
$\phi$	มุมของอากาศ
$\beta$	มุมของใบพัด
$\sigma$	ความเค้น
$\Omega$	ความเร็วเชิงมุม
$\lambda$	อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ
$\lambda_r$	อัตราส่วนความเร็วที่รัศมีใด ๆ
$\phi_v$	ปริมาณลมต่อหน่วยเวลา
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ

(๓)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะความเป็นอยู่ในปัจจุบันนั้นถือว่าเป็นยุคของการสื่อสารไร้พรมแดนแต่ว่าในชนบทที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึงก็ไม่สามารถรับข่าวสารได้ ดังนั้นก็ควรจะมีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ให้แสงสว่าง ใ้รับข่าวสาร และอื่น ๆ แต่เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีทางกลส่วนใหญ่จะมีค่าใช้จ่ายของค่าเชื้อเพลิงค่อนข้างสูงและเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานจึงเห็นประโยชน์ของพลังงานธรรมชาติ เช่น พลังงานลม พลังแสงอาทิตย์ มาใช้เป็นพลังงานทดแทน

พลังงานลมเป็นพลังงานที่อยู่ทั่วไป ทุกแห่งบนโลกซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและสามารถเกิดได้ตลอดเวลา เราจึงสามารถนำพลังงานลมมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

กังหันลมแกนนอนเป็นเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกล และเป็นไฟฟ้าได้ในที่ที่ห่างไกลที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่ไม่มากนัก หรือแม้แต่ที่มีไฟฟ้าใช้อยู่แล้วก็จะใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง หรือเป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉิน โดยจัดเก็บไว้ในแบตเตอรี่ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและปลอดภัย

#### 1.2 เนื้อหาเหตุผล

ปัจจุบันมีการวิวัฒนาการรูปแบบของกังหันลมให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ที่ต่าง ๆ ส่วนในการติดตั้งนั้น นิยมติดตั้งไว้ในแถบชายฝั่งทะเลหรือแถบภูเขาที่โล่งแจ้งคาดว่าพลังงานลมนี้จะมีส่วนในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อย ๆ โดยภาครัฐได้มีการทดลองอยู่ตลอดเวลา และเป็นที่หวังว่า ในศตวรรษนี้ จะได้มีการนำมาผลิตกันอย่างจริงจัง

### 1.3 ความมุ่งหมายของการศึกษา

กังหันลมที่ได้พบได้ทำการวิจัยศึกษาภายในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นกังหันลมแบบแกนนอนซึ่งกังหันลมแบบนี้มักจะพบเห็นได้โดยทั่วไปตามบริเวณชายทะเล เพื่อใช้ในการปั้มน้ำ ดังนั้นผู้ทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างกังหันลมที่สามารถช่วยในการสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อช่วยในยามฉุกเฉินหรือใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง

1. เป็นกังหันลมที่ดูแลรักษาง่าย
2. มีระบบที่สามารถปรับเข้าหาทิศทางลม
3. สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้
4. เริ่มต้นหมุนได้ด้วยตนเอง ในขณะที่มีพลังงานลมพัดผ่าน

### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

สร้างกังหันพลังงานลมแกนนอนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

### 1.5 ขอบเขตของโครงการ

1. เพื่อสร้างกังหันลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 2.5 เมตร จำนวน 16 ใบ
2. โครงสร้าง จำนวน 4 ขา พร้อมชุดถ่ายกำลัง
3. ใช้สำหรับจัดเก็บกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อใช้ในแหล่งชนบทที่อยู่ห่างไกลและใกล้ ในยามฉุกเฉิน เพื่อใช้เป็นแหล่งงานไฟฟ้าสำหรับ หลอดไฟขนาดเล็ก หรือวิทยุ
2. นำพลังงานลมมาช่วยลดการสูญเสียของแหล่งพลังงานอื่น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกังหันลม

กังหันลมคือ เครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ มาเป็นพลังงานกลเพื่อวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ การสูบน้ำ และการผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนั้นในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ อีกมากมาย เช่น ความเร็วลม ความแปรปรวน และคุณสมบัติต่าง ๆ ของลม ในบริเวณที่จะติดตั้งกังหันลม เพื่อจะได้กำหนดขนาดและชนิดของกังหันลม

#### 2.2 ชนิดต่าง ๆ ของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติและลักษณะแตกต่างกัน การจำแนกชนิดของกังหันลมอาจกำหนดได้โดย

1. การจำแนกตามลักษณะการวางแนวการหมุนของกังหันลม ซึ่งมีแนวการหมุนอยู่ 2 แบบ คือ

1.1 กังหันลมที่มีแนวการหมุนในแนวนอน ได้แก่ กังหันลมแบบ Propeller กังหันลมแบบดัตช์ กังหันลมล้อจักรยาน กังหันลมหลายใบ เป็นต้น

1.2 กังหันลมที่มีแนวการหมุนในแนวตั้ง ได้แก่ กังหันลมแบบลูกถ้วย กังหันลมแบบซาโวนีเยส กังหันลมแบบโจโร-โรเตอร์ กังหันลมแบบคาร์เรียส เป็นต้น

2. จำแนกตามลักษณะการหมุนของกังหันลม ซึ่งมีหลักการหมุนอยู่ 3 ลักษณะ คือ

2.1 กังหันลมที่หมุนได้ด้วยแรงหน่วง (Drag force) ได้แก่ กังหันลมแบบลูกถ้วย

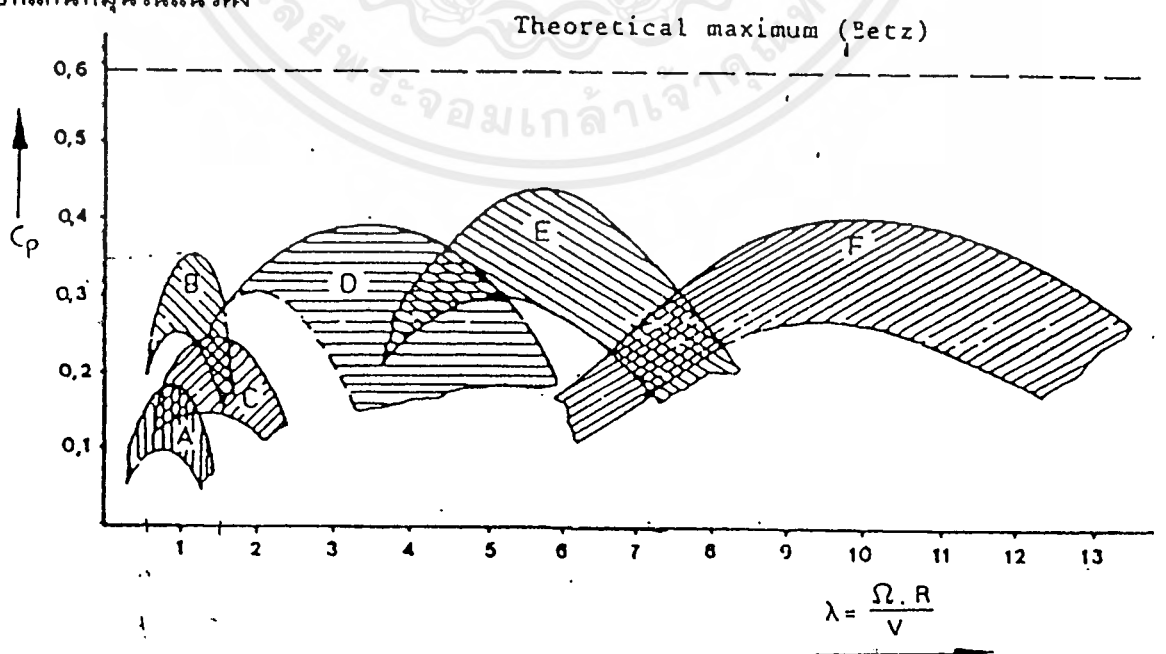
2.2 กังหันลมที่หมุนได้ด้วยแรงยก (Lift force) ได้แก่ กังหันลมแบบโจโร-โรเตอร์ กังหันลมแบบคาร์เรียส กังหันลมแบบดัตช์ กังหันลมหลายใบ เป็นต้น

2.3 กังหันลมแบบผสม คือ กังหันที่มีส่วนประกอบของกังหันลมที่หมุนได้ด้วยแรงหว่ง และกังหันลมที่หมุนได้ด้วยแรงยกอยู่ในตัวเดียวกัน เพื่อช่วยในการหมุน ซึ่งเป็นการเสริมลักษณะของกันและกัน กังหันลมแบบนี้ ได้แก่ กังหันลมแบบคาร์เรียส-ซาโวเนียส

สำหรับการเปรียบเทียบข้อดีของกังหันที่มีแกนหมุนในแนวนอน กับกังหันลมแบบที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง พอจะแยกกล่าวได้ดังตารางที่ 2.1

กังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวนอน	กังหันลมที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง
1. แรงบิดที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ	1. สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง
2. สามารถสร้างให้ได้เปรียบทางกลศาสตร์ได้ง่าย	2. ออกแบบใบและสร้างได้ง่ายและประหยัด
3. สามารถควบคุมกำลังของกังหันลมได้โดยการปรับใบ	3. สร้างเสาของกังหันลมได้ง่ายและประหยัด
	4. ต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบได้ง่าย
	5. การซ่อมบำรุงหรือควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ทำได้ง่าย เพราะสามารถติดตั้งกับพื้นดิน

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีของกังหันลมแบบที่มีการหมุนในแนวนอนกับกังหันลมแบบที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง

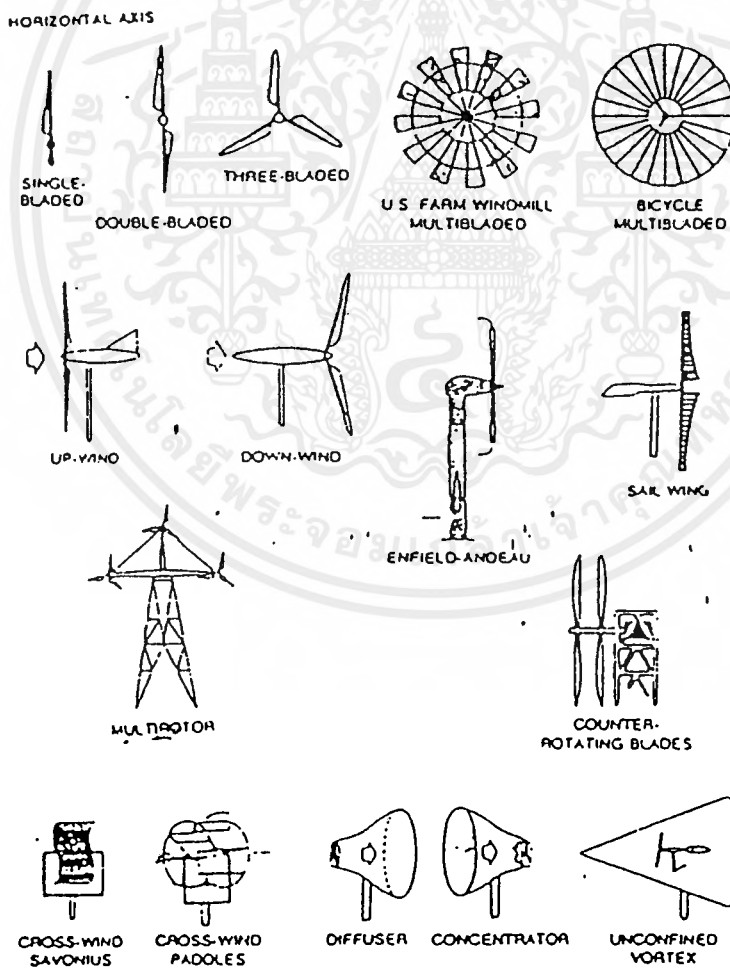


รูปที่ 2.1 แสดงค่า Cp ของกังหันชนิดต่างๆ ที่แปรตาม  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อคุณได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

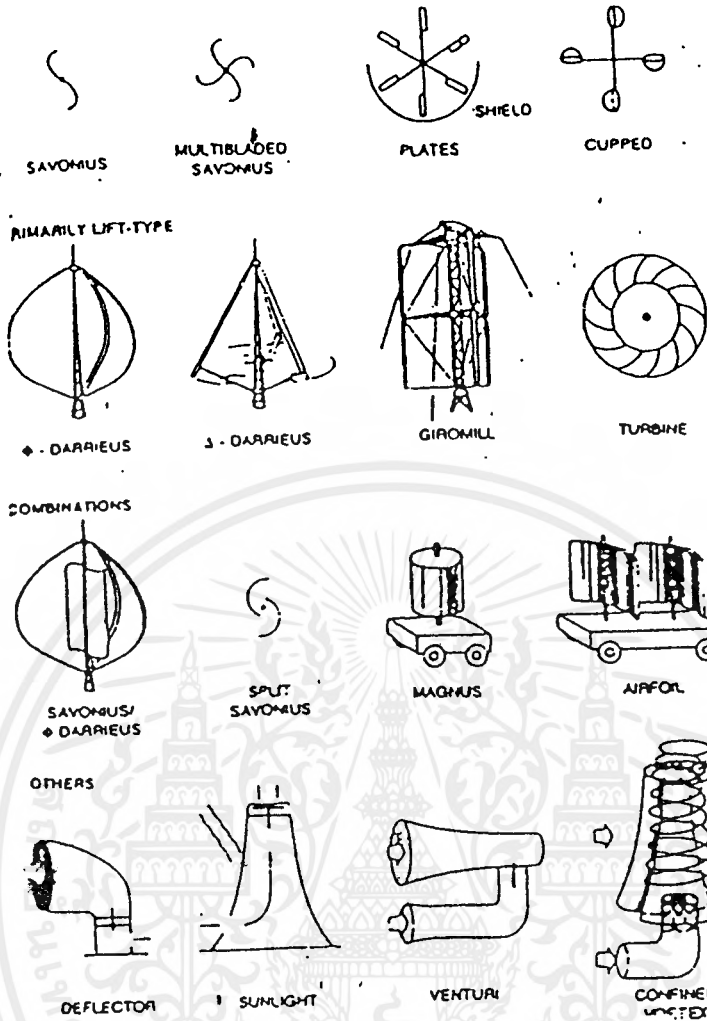
$C_p$	=	สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน
$\lambda$	=	อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ
$\Omega$	=	ความเร็วเชิงมุม
R	=	รัศมีใบ
V	=	ความเร็วลม

### 2.2.1 ลักษณะต่างๆ ของกังหันลม

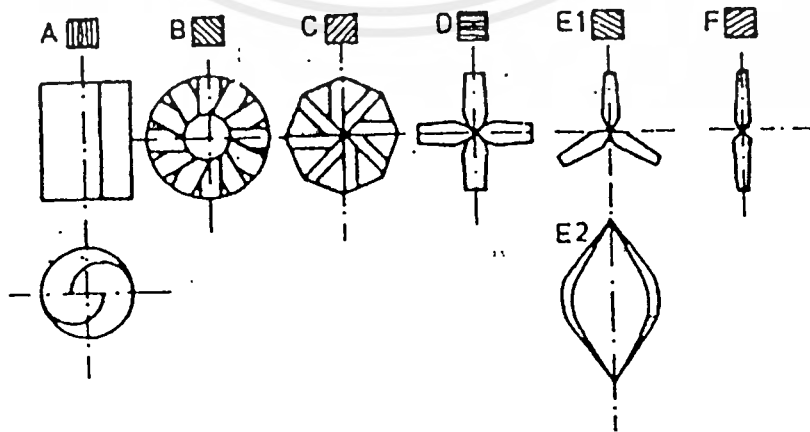


รูปที่ 2.2 ลักษณะของกังหันลมแกนนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

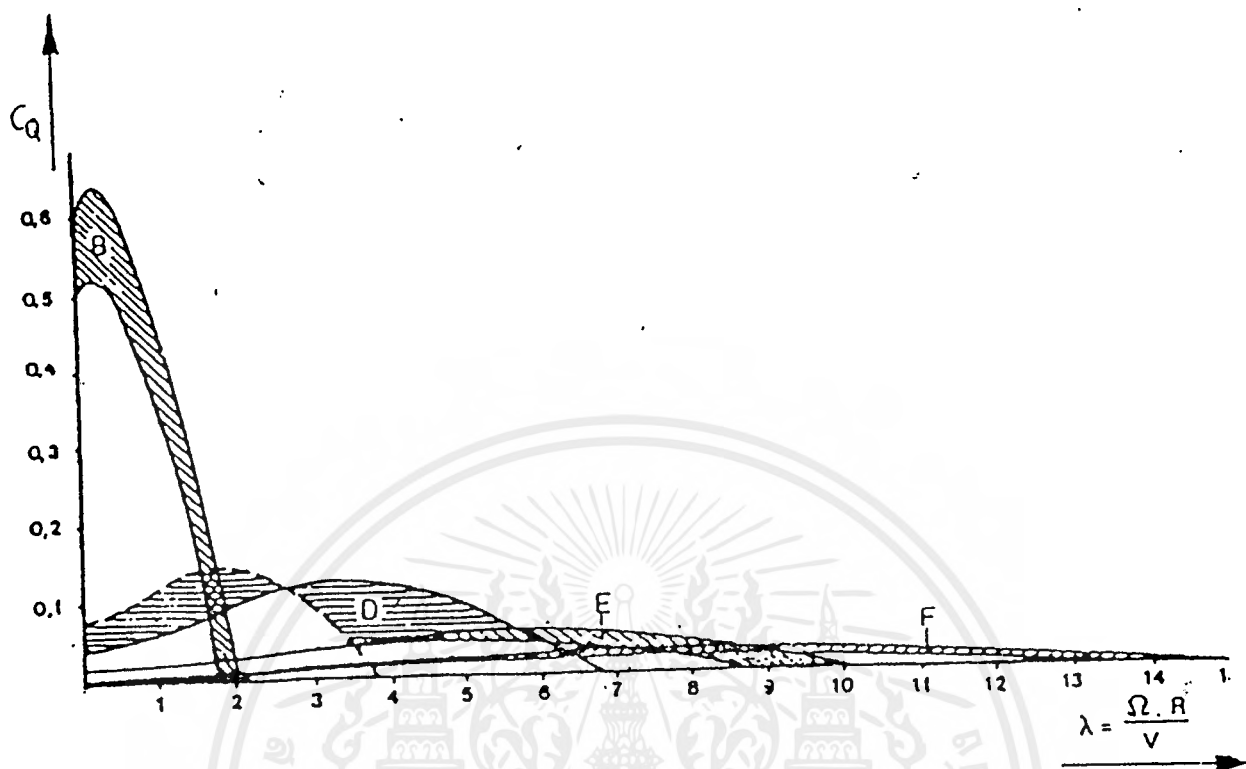


รูปที่ 2.3 ลักษณะของกังหันลมแกนตั้ง



รูปที่ 2.4 ลักษณะของใบกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

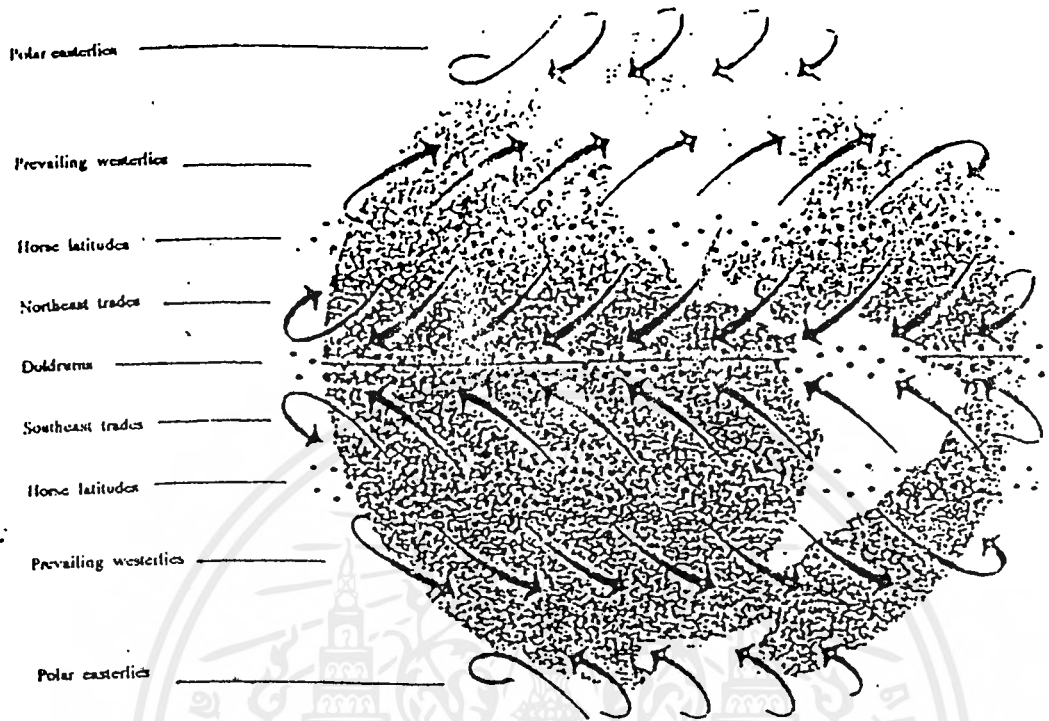


รูปที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมชนิดต่าง ๆ ที่แปรตามค่า  $\lambda$

### 2.3 พลังงานจากลม

อากาศที่อยู่รอบ ๆ ตัวเราจะมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งผลรวมของการเคลื่อนไหวนี้เรียกว่า "ลม" โดยกำหนดว่าจะต้องมีทิศทางและความเร็ว ลมเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุใหญ่ ๆ 2 อย่าง คือ

1. เกิดจากแสงอาทิตย์ ปกติบริเวณเส้นศูนย์สูตรจะร้อนกว่าบริเวณขั้วโลกเป็นสาเหตุทำให้เกิดลมเย็นพัดในระดับต่ำ จากบริเวณขั้วโลกเข้าสู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรซึ่งจะมีลมที่ร้อนกว่าลอยตัวสูงขึ้น และเคลื่อนเข้าสู่ขั้วโลก
2. เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของโลกมีผลทำให้บรรยากาศที่อยู่รอบเคลื่อนที่ตามไปด้วยแรงเหวี่ยง ทำให้อากาศในระดับต่ำเคลื่อนตัวไป

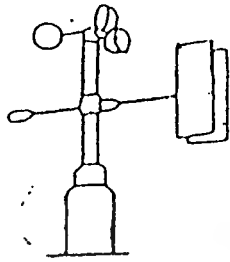


รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของลม ณ จุดต่าง ๆ รอบโลก

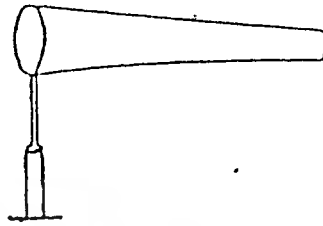
ทางทิศตะวันตก ในขณะที่อากาศในระดับสูงเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออก การหมุนรอบตัวเองของโลกนี้ยังเป็นเหตุให้เกิดลมในบริเวณความกดอากาศต่ำที่ขั้วโลก โดยที่ขั้วโลกเหนือจะมีลมทิศทาง ทวนเข็มนาฬิกาและที่ขั้วโลกใต้จะมีลมในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังในรูปที่ 2.6

#### 2.4 ทิศทางลม

ลมจะพัดจากบริเวณที่มีความกดอากาศสูง มายังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่าอยู่เสมอ การกำหนดทิศทางลมจะต้องกำหนดตามทิศทางที่พัดมา เช่น ลมที่พัดมาจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกจะเรียกว่า “ลมตะวันออก” เป็นต้น การกำหนดทิศทางของลมเราอาจสังเกตได้โดยการอาศัย ถุงวัดลม(Airport wind sack) ฝร (wind vane) หรือดูได้จากอาการพัดปริวของวัตถุหรือ ฝุ่นละออง



Wind direction  
and speed indicators.



Airport wind sock.

### รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของอุทกทิศทางลม

#### 2.5 กำลังงานลม

ลมเป็นอากาศที่เคลื่อนที่ได้มีน้ำหนักความหนาแน่นน้อย เมื่ออากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V$  พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นคือ

เมื่อ

$$E = \frac{1}{2} mv^2$$

$E$  = พลังงานจลน์

$m$  = มวลสาร

$v$  = ความเร็วลม

ถ้าอากาศมีความหนาแน่น พลังงานจลน์ต่อปริมาตรของอากาศที่ความเร็ว  $v$  จะเป็น

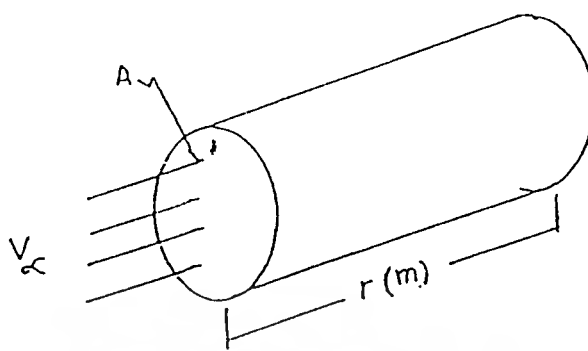
เมื่อ

$$Ev = \frac{1}{2} \rho v \alpha^2$$

$Ev$  = พลังงานจลน์ต่อปริมาตรของอากาศที่ความเร็ว  $v$

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ

$V$  = ความเร็วลม



รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่และปริมาตรการไหลต่อวินาที

พิจารณาพื้นที่  $A$  ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางลม ดังรูปที่ 2.8 ปริมาตรลมต่อหน่วยวินาทีที่ไหลผ่านพื้นที่นี้คือ

$$\phi v_\alpha = v_\alpha A \quad (2.5.3)$$

จากสมการที่ (2.5.2) และ (2.5.3) จะได้กำลังงานของลมเท่ากับ

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho v_\alpha^3 A \quad (2.5.4)$$

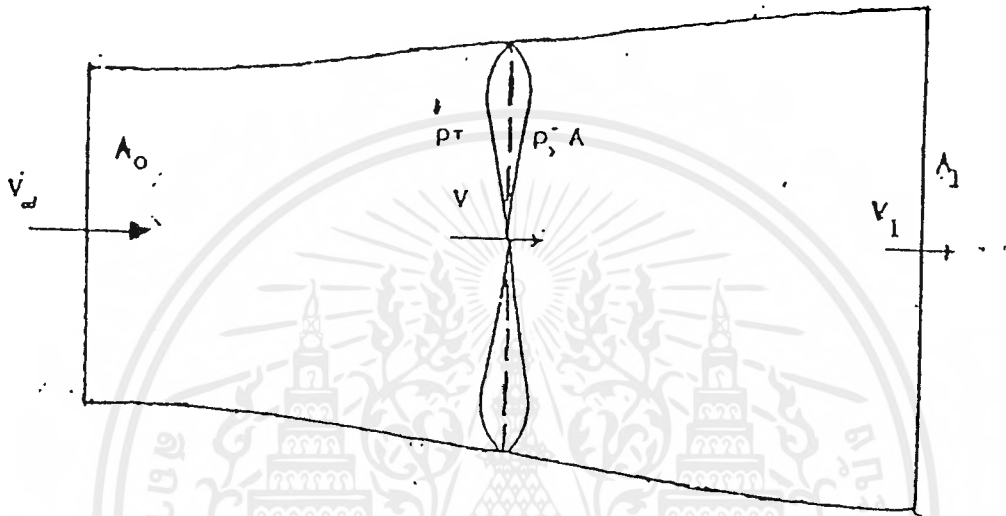
จะพิจารณาจากสมการที่ (2.5.4) จะได้ว่า

1. กำลังงานของลมเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น (สำหรับอุณหภูมิของอากาศ 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับน้ำทะเล  $\rho$  เท่ากับ  $1.172 \text{ kg/m}^3$ )
2. กรณีกังหันลมที่มีเพลลาจับวางอยู่ในแนวระดับ กำลังของลมจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่กวาดของใบพัด ( $A = \pi R^2$ ) โดย  $R$  เป็นรัศมีของใบพัดที่เลือกใช้ในการออกแบบ
3. กำลังงานของลมแปรเปลี่ยนตามกำลังสามของความเร็วลม

แรงรื้ศตบ้นกั้ห้ันลมเกิดจาก การเปลี่นเปลง โมเมนตัมของมวลของอากาศที่ไหลเข้า และออกผ่านกั้ห้ันลม

$$T = A V \alpha - A V \quad (2.6.1.2)$$

เมื่อ  $T =$  แรงรื้ศต



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ ก่อนเข้าและออกจากกั้ห้ันลมในแนวแกน (Axial flow)  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A$  เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของพลังงานลมที่เปลี่นเปลง ตลอดแนวแกน

แรงรื้ศตบ้นกั้ห้ันลมเกิดจาก การเปลี่นเปลง โมเมนตัมของมวลของอากาศที่ไหลเข้า และออกผ่านกั้ห้ันลม

$$T = \rho A_0 V \alpha^2 - \rho A_1 V_1^2 \quad (2.6.1.3)$$

เมื่อ  $T =$  แรงรื้ศต

แทนสมการที่ (2.6.1.2) ลงในสมการที่ (2.6.1.3) ได้

$$T = \rho A V (V \alpha - V_1) \quad (2.6.1.4)$$

แรงรื้ศตบ้นกั้ห้ันลม อาจอธิบายได้ในเทอมของความดันที่กระทำด้านหน้าและด้านหลังของลม

$$T = (P^+ - P^-) A \quad (2.6.1.5)$$

เมื่อนำสมการเบอร์นูลลี (Bernullis equation) มาพิจารณากับรูปที่ 2.6 โดยพิจารณาจากตำแหน่งไกลมากหน้ากึ่งหันลม จนตำแหน่งหน้ากึ่งหันลมได้

$$P + 1/2 \rho v \alpha^2 = P^- + 1/2 \rho v^2 \quad (2.6.1.6)$$

พิจารณาจากตำแหน่งหลังกึ่งหันลมจนถึงตำแหน่งไกลมากหลังกึ่งหันลม

$$P^- + 1/2 \rho v^2 = P + 1/2 \rho v_1^2 \quad (2.6.1.7)$$

จากสมการที่ (2.6.1.6) และ (2.6.1.7) ได้

$$P^+ - P^- = 1/2 \rho (v \alpha^2 - v_1^2) \quad (2.6.1.8)$$

แทนสมการที่ (2.6.1.8) ในสมการที่ (2.6.1.5)

$$T = 1/2 \rho A (v \alpha^2 - v_1^2) \quad (2.6.1.9)$$

จากสมการที่ (2.6.1.3) หาความสัมพันธ์ที่สำคัญได้

$$V = 1/2 (v \alpha^2 + v_1^2) \quad (2.6.1.10)$$

และ  $V = v \alpha (1-a) \quad (2.6.1.11)$

เมื่อ  $a$  เท่ากับ แฟกเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวแกน (Axial induction factor)

ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วด้านหน้าและด้านหลังกึ่งหันลมดังนี้

$$v_1 = v \alpha (1-2a) \quad (2.6.1.12)$$

$$T = 2a (1-a) \rho A v \alpha^2 \quad (2.6.1.13)$$

## 2.7 พลังงานที่ได้จากกระแสลม

ในการพิจารณาพลังงานที่กังหันลมได้รับจากกระแสลมในเชิงคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายพลังงานที่มีอยู่ในลมโดยการเขียนออกมาในรูปของพลังงานจลน์  $1/2V^2$  ได้เมื่อกำหนดให้ ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho\alpha$  เป็นอัตราเร็วของกระแสลมและอัตราของพลังงานที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสลม จะมีค่าเท่ากับ  $1/2 \rho V\alpha^2$  หรือ  $1/2\rho AV\alpha^3$  ในทางอุดมคติแล้ว กังหันลมสามารถดึงเอากำลังงาน (Power) ออกมาจากกระแสลมได้มากที่สุดเพียง 16/17 ของอัตราพลังงานที่มีอยู่ ( $1/2\rho AV\alpha^3$ ) แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถดึงกำลังงานออกไปใช้ได้มากที่สุดประมาณ  $5/27\rho AV\alpha^3$  เท่านั้น

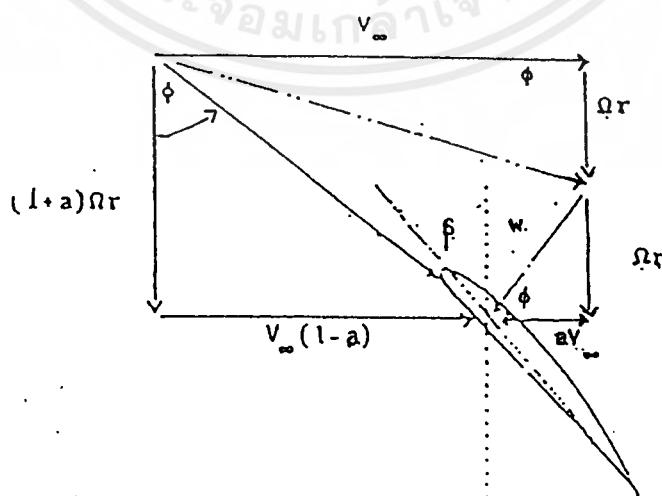
ส่วนที่สูญเสียไปนั้นเกิดจากการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ และการสูญเสียในเชิงประสิทธิภาพทางกลและทางไฟฟ้า

## 2.8 ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ (Blade element Theory)

ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ กล่าวถึงแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ใบกังหัน การนำทฤษฎีนี้มาใช้จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของกังหัน ได้แก่ ความกว้างของใบ ความยาวของใบ จำนวนใบ มุมตั้งของใบและข้อมูลของลม รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงหน่วงของใบ

สมมุติฐานของทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบมีดังนี้

1. ใบกังหันแต่ละใบ ถือว่ามีอิสระต่อกันไม่มีผลต่อกันจากใบข้างเคียง
2. แรงที่กระทำบนใบนั้นมี 2 แรง คือ แรงยก (Lift force) และแรงหน่วง (Drag force) ของภาคตัดของใบ



รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ของความเร็วลม และแรงที่เกิดขึ้นบนโปรไฟล์ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนชีวมวลเพื่อชุมชน โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงยกและแรงหน่วงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงยก} \quad , \quad d_L = C_L 1/2 W^2 C dr \quad (2.7.1)$$

$$\text{แรงหน่วง} \quad , \quad d_D = C_D 1/2 W^2 C dr \quad (2.7.2)$$

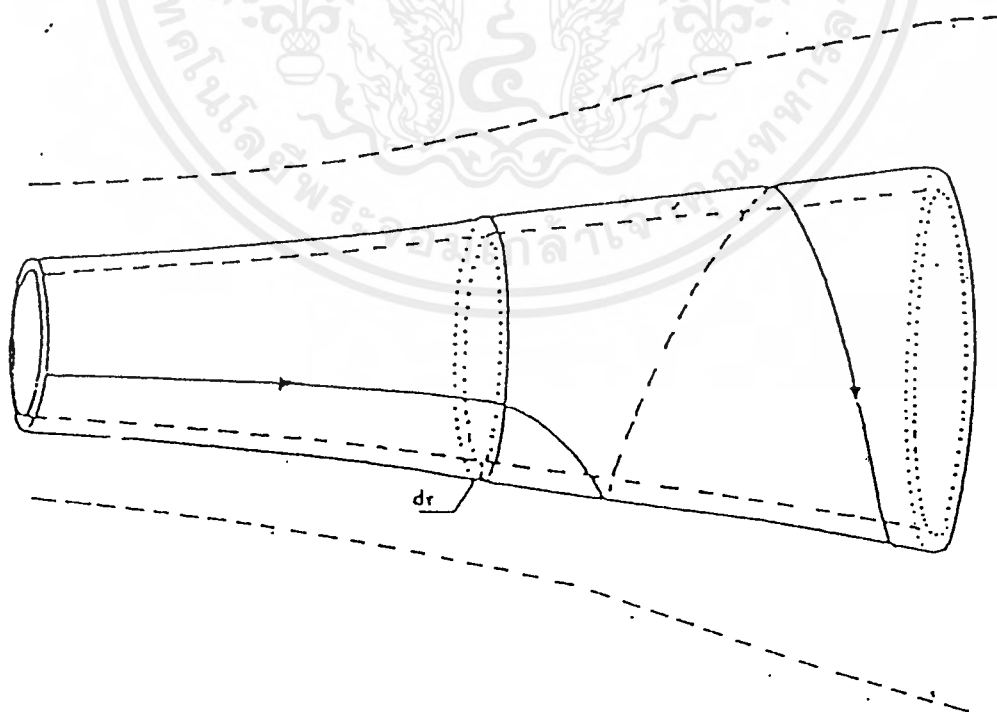
แรงรรัศต์และแรงบิดที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังนี้

$$\text{แรงรรัศต์} \quad , dT = 1/2 BC \rho W^2 (C_L \cos\theta + C_d \sin\theta) \quad (2.7.3)$$

$$\text{แรงบิด} \quad , dQ = 1/2 BC \rho W^2 (C_L \sin\theta + C_d \cos\theta) r dr \quad (2.7.4)$$

## 2.9 การหมุนของเวก (Wake Rotation)

ถ้าพิจารณาบริเวณด้านหลังของกังหันลมพบว่า การเคลื่อนที่ของอากาศมีการหมุนวนแสดงในรูปที่ 2.11 มีผลทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย ซึ่งมีค่ามากในกังหันลมประเภทที่มีอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำ ส่วนกังหันลมที่มีอัตราส่วนความเร็วปลายใบสูง ค่าการสูญเสียจะมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 2.11 แสดงการเคลื่อนที่ของอากาศด้านหลังกังหันลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของกังหันลม เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนเวสสำหรับกรเซงนเพื่อกรกรศกรศกรเทเอนน เมื่อนูญเตเหนนาเบเซประเยชนตในการค้ำไม่วกรณเเจจ ทั้งล้น อึกทั้งห้ำมมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า  $\Omega$  เป็นความเร็วรอบของกังหันลมและ  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของเวกเตอร์ คังนั้น เมื่อพิจารณาการหมุนของอากาศเทียบกับใบกังหันจะพบว่า ความเร็วเชิงมุมด้านหน้ากังหันลมมีค่า  $\Omega$  และ  $\omega$  ด้านหลังของกังหันลมมีค่า  $\Omega + \omega$

สมการที่วิเคราะห์จากสมการ เบลร์นูลลี ตามสมการ (2.14) จึงเปลี่ยนไปเป็น

$$P' - P = \frac{1}{2} (\Omega + \omega)^2 r^2 - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 - \rho (\Omega + \omega/2) \omega r^2 \quad (2.8.1)$$

แรงรัศที่ที่เกิดขึ้นเขียนได้เป็น

$$dT = \rho (\Omega + \omega/2) \omega r^2 2\pi r dr \quad (2.8.2)$$

ถ้า  $a'$  เป็นแฟคเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวสัมผัส (Tangential induction factor)

$$a' = \omega/2\Omega$$

คังนั้น

$$\begin{aligned} dT &= 4a' (1+a') \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 \pi r dr \\ &= 4a' \rho \pi \Omega^2 r^3 (1+a') dr \end{aligned} \quad (2.8.3)$$

แรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นบนกังหันลมสามารถวิเคราะห์จากกฎการทรง โมเมนตัมรอบแกนหมุน

$$\begin{aligned} dQ &= (dm) \cdot \omega r \cdot r = \rho v 2\pi r dr \cdot \omega r \cdot r \\ \text{หรือ} \quad dQ &= 4a' (1-a') \frac{1}{2} \rho v \alpha r^3 (1-a') dr \\ &= 4a' \rho \pi v \alpha \Omega r^3 (1-a') dr \end{aligned} \quad (2.8.4)$$

2.10 การสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการแตกต่างของความดันบริเวณด้านหลังใบ ซึ่งมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และด้านท้องใบซึ่งมีความดันสูงกว่าบรรยากาศ ดังนั้นบริเวณปลายใบพบว่าอากาศไหลวน จากความดันสูงไปหาความดันต่ำ ทำให้ความดันที่ปลายใบทั้งด้านหลังใบและท้องใบเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ มีผลทำให้แรงยกมีค่าต่ำลงเรียกผลที่เกิดขึ้นว่า “สูญเสียที่ปลายใบ”

เพรนทอลล์ (Prandtl) ได้ให้สมการสูญเสียปลายใบอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ F โดย

$$F = 2/\pi \arccos \exp(-1Br(R-r)/2\sin\theta) \quad (2.9.1)$$

เจนเซน (Jensen) ได้กล่าวถึง โมเดลของเพรนทอลล์ และได้อธิบายถึงการลดรูปของสมการที่ติดอยู่ในเทอมเอ็กโปเนนเชียลของรัศมี R และ r ให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ดังนี้

$$F = 1 - (1.386/B)\sin^2 \theta / 2 \quad (2.9.2)$$

วิลสัน และลิสซามัน (Wilson and Lissaman) สมมติว่า แฟคเตอร์เหนี่ยวนำ a และ a' ต้องคูณกับ F และสมมติว่า การสูญเสียปลายใบรวมอยู่ในสมการของทฤษฎีโมเมนตัมเท่านั้น ดังนั้น

$$dT = 4aF(1-aF)\rho V\alpha^2 \pi r dr \quad (2.9.3)$$

2.11 การรวมทฤษฎีโมเมนตัม และ ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบ

การรวมทฤษฎีโมเมนตัม และ ทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบเข้าด้วยกัน เพื่อนำผลที่ได้จากทั้ง 2 ทฤษฎี ไปใช้วิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลม

พิจารณาแรงรัศมี และ แรงบิดของทฤษฎีโมเมนตัมเปรียบเทียบกับทฤษฎีอีลีเมนต์ของใบทฤษฎีโมเมนตัม:

$$dT = 4a(1-a) 1/2 \rho V\alpha^2 2\pi r Dr$$

$$dT = 4a' (1+a') 1/2 \rho \Omega^2 r^2 2\pi r Dr$$

$$dQ = 4a' (1-a) 1/2 V\alpha \Omega r^2 2\pi r Dr$$



จากสมการที่ (2.7.3) และ สมการที่ (2.8.2) เมื่อแทนค่าของ  $w$  ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$4a'/1+a' = CL \cos\theta/\sin^2 \theta \quad (2.10.4)$$

ในการทำงานเดียวกันกับสมการที่ (2.8.3) กับสมการที่ (2.9.3) จะได้

$$4a' /1+a' = CL/\cos\theta \quad (2.10.5)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ อัตราส่วน โขถิกคิตี (Solidity ratio)

$$\lambda = BC/2\pi r$$

ดังนั้น เราสามารถหาค่าแรงบิดในรูปสัมพันธ์ของแรงบิดได้ดังนี้

$$CQ = Q/1/2\rho A v \alpha^2 \quad (2.10.6)$$

ดังนั้น

$$dCQ = (1+a') ((CL\sin\theta/\cos\theta)(1-CL\tan\theta))\lambda^2 r dr \quad (2.10.7)$$

หรือ

$$dCQ = 2X^2(\sin\theta + r\cos\theta)^2 (CL\sin\theta - Cd \cos\theta) \quad (2.10.8)$$

เมื่อ  $X$  คือ อัตราส่วนรัศมี (Radial ratio)

$$X = r/R$$

## 2.12 สัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูงสุดทางทฤษฎี

กังหันลมแต่ละชนิดไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลของลม ให้เป็นกำลังงานทางกลของกังหันลมได้หมด ค่าที่แสดงถึงความสามารถนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน จะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ความเร็วลม และรัศมีใบพัดแต่อย่างใด แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบสูง จะได้ค่าของสัมประสิทธิ์กำลังงานสูง

ในการหาค่าของสัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูงสุด จะอาศัยหลักการของ Axial momentum factor ซึ่งมีค่า

$$a = 1 - (V_{\infty} + V) / 2V$$

กำลังงานกลของกังหันลมหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจล ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned} P &= m \Delta KE \\ &= \rho A V ((V_{\infty}^2/2) - V^2/2) \end{aligned}$$

หรือ

$$P = 2\rho V_{\infty}^3 a(1-a^2) \quad (2.11.1)$$

การหาค่ากำลังงานสูงสุด โดยการ Differentiate สมการที่ (2.11.1) เทียบกับค่า a เพราะฉะนั้น

$$dP/dQ = 2\rho A V_{\infty}^3 (1 - 4a + 3a^2) = 0$$

เมื่อแก้สมการจะได้

$$a = 1, \quad a = 1/3$$

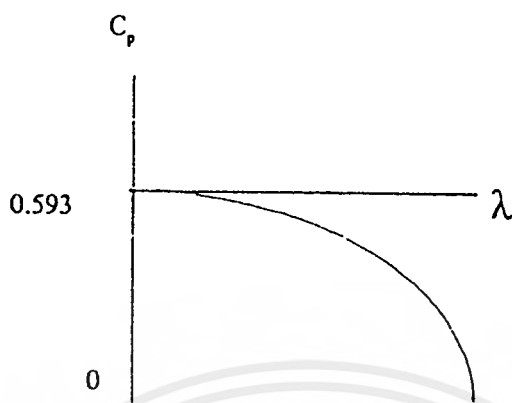
กำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นที่  $a = 1/3$

ดังนั้น

$$P_{\max} = 16/27 (1/2 \rho A V^3) \quad (2.11.2)$$

อย่างไรก็ตาม ค่านี้จะถูกต้องสำหรับการออกแบบที่ อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบสูง

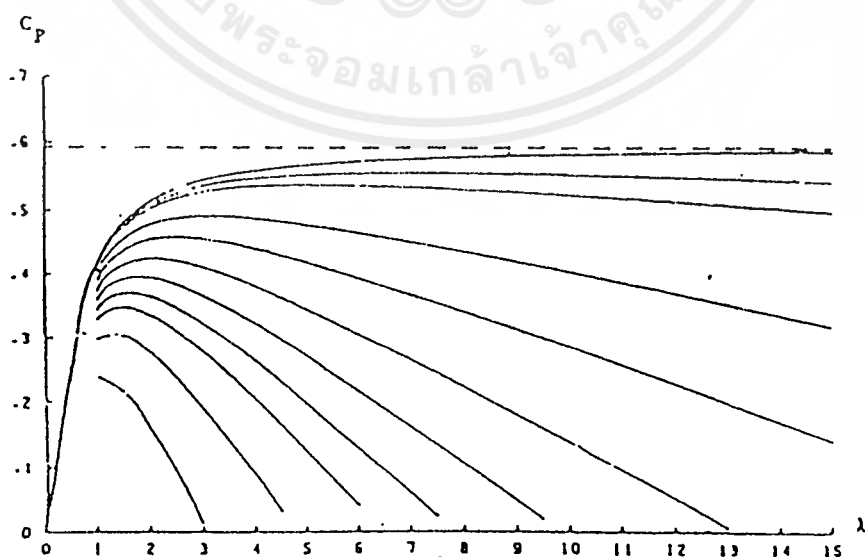
เอกสารฉบับนี้ไม่ได้จำกัดและมีแรงจูงใจเป็นศูนย์กลางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



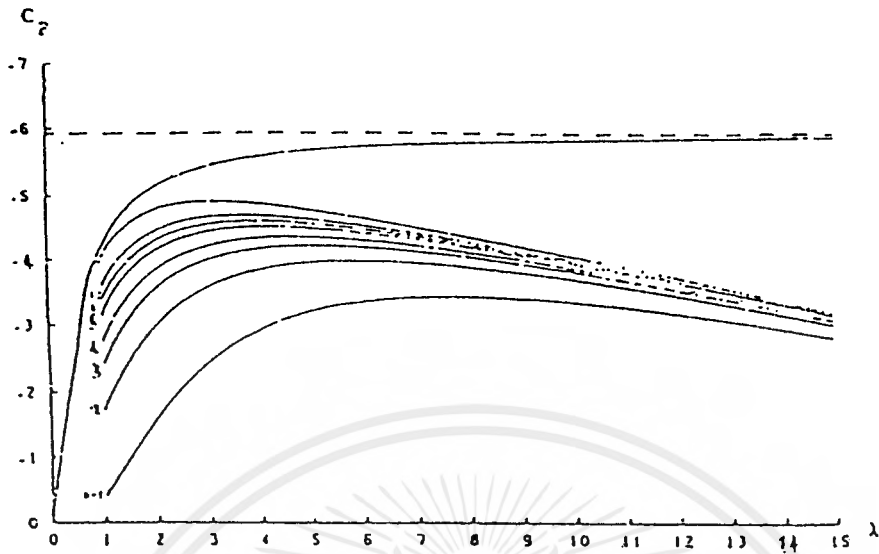
รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดประมาณ 0.593

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะได้ว่า สัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.593 ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถทำได้ ซึ่งผลกระทบที่มีต่อสัมประสิทธิ์ของกำลังงานคือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดูด กับสัมประสิทธิ์ของแรงยก และจำนวนใบพัดของกังหันลม

พิจารณารูปที่ 2.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบกังหันลมแบบ 32 ใบ จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดูดกับ สัมประสิทธิ์ของแรงยกค่าต่างๆ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูง



รูปที่ 2.14 ผลกระทบของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์แรงดูดกับสัมประสิทธิ์ของแรงยกสำหรับกังหันลม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ผลกระทบของจำนวนใบพัดที่มีอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดูดกับสัมประสิทธิ์ของแรงยกเท่ากับ 0.005

พิจารณารูปที่ 2.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน กับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ ที่อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดูด กับสัมประสิทธิ์ของแรงยกเท่ากับ 0.005 จะได้ว่า ที่อัตราส่วนความเร็วที่ปลายสูง จำนวนใบพัดจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานน้อยมาก แต่ที่อัตราส่วนที่ความเร็วปลายต่ำ ถ้าจำนวนใบพัดมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูง

ดังนั้นในการออกแบบกังหันลมถ้าต้องการให้มีสัมประสิทธิ์ของกำลังงานสูงจะต้องออกแบบที่อัตราส่วนความเร็วที่ปลายสูง จำนวนใบน้อย และอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดูดกับสัมประสิทธิ์ของแรงยกมีค่าต่ำในการเลือกจำนวนใบที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่างๆ สามารถหาได้จากตารางข้างล่างนี้

$\lambda$	จำนวนใบพัด
1	24-36
2	4-12
3	3-6
5-8	2-3

ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกจำนวนใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13 สัมประสิทธิ์ไร้มิติ

ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติ และคุณลักษณะของกังหันลมหลายแบบที่ออกแบบภายใต้ ภาวะลมต่าง ๆ สามารถเขียนค่ากำลังงานทางกล เทียบเท่ากับกำลังงานของลมคูณด้วยแฟคเตอร์ C

$$P_{mcch} = C_p \cdot P_{air} \quad (2.12.1)$$

$$P_{mcch} = T \Omega \quad (2.12.2)$$

ค่า C เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน และเป็นค่าที่ชี้ถึงความสามารถในการ เปลี่ยนกำลังของลมเป็นกำลังงานทางกล ของกังหันลมจากสมการ (2.6.1.4) กับสมการ (2.12.5)

$$C_p = P_{mcch} / (1/2 \rho A V \alpha^3) \quad (2.12.3)$$

อัตราส่วนระหว่างความเร็วปลายใบ  $V$  ที่รัศมี  $r$  กับความเร็วลม  $V$  เรียกว่า อัตรา ส่วนที่ความเร็วรัศมีใด ๆ และเขียนได้เป็น

$$\lambda_r = V / V \alpha = \Omega r / V \quad (2.12.4)$$

และอัตราส่วนความเร็วของใบพัดของกังหันลมที่รัศมี  $R$  เรียกว่า อัตราส่วน ความเร็วที่ปลายใบ เขียนได้เป็น

$$\lambda = \Omega R / V \quad (2.12.5)$$

เขียนได้เป็น

$$\lambda_r = (r/R) \lambda \quad (2.12.6)$$

จากสมการที่ (2.6.1.4) , (2.12.5) และสมการที่ (2.12.6) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด เทลา  $C_p$  ได้ดังนี้

$$C_p / \lambda = T / (1/2 \rho V \alpha^2 \pi r^3)$$

จะได้ว่า

$$C_q = T / (1/2 \rho V \alpha^3 \pi R) \quad (2.13.7)$$

และ

$$C_p = C_q \lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 การคำนวณหาสมรรถนะของกังหันลม

การคำนวณเพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลม มีหลายพารามิเตอร์ที่นำมาใช้คำนวณ โดยเฉพาะความกว้างของคอร์ด ความยาวของใบ มุมตั้งของใบ สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงดุดที่มุมปะทะต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบ วิธีการคำนวณเพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมมีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

### 2.14.1 การทำนายลักษณะของกังหันลมทางทฤษฎี

โดย คินเคอเรน และมีล (Kindiren and Meel) การคำนวณวิธีนี้จะคำนวณหาอัตราส่วนความเร็วปลายใบ และสัมประสิทธิ์คอร์ดที่รัศมีมีหนึ่ง ๆ ตั้งแต่ปลายใบถึงโคนใบ โดยการสมมุติมุมปะทะใบกังหันต่าง ๆ กัน ขึ้นตอนต่าง ๆ ในการคำนวณมีดังนี้

ก. เลือกค่า อัตราส่วนรัศมี ,  $X$  ทำให้รู้ค่าอัตราส่วนโวลิตคิลิตี , มุมระหว่างระนาบการหมุนกับความเร็วลมสัมพัทธ์ ,  $\theta$

1. กำหนดรัศมีภายนอก ( $R$ ) มุมปะทะ ( $\alpha$ ) สัมประสิทธิ์แรงยก ( $C_L$ ) สัมประสิทธิ์แรงหน่วง ( $C_d$ ) ความยาวคอร์ด ( $C$ ) มุมตั้งใบ ( $\beta$ ) จำนวนใบ ( $B$ )

2. เลือกค่ารัศมีภายใน ( $r$ )

3. คำนวณ

$$\alpha = BC/2\pi r \quad , \quad X = r/R$$

$$w/w = \alpha C_L / 4 \sin \theta$$

$$r = 1 - W \tan \theta / \tan \theta + (w/w)$$

$$= \lambda r / x$$

$$dc_Q = 2X^2 \lambda (\sin \theta + r \cos \theta)^2 (C_L \sin \theta - C_d \cos \theta)$$

4. เปลี่ยน  $\theta$  กลับไปคำนวณขั้นที่ 3 ใหม่

5. เปลี่ยนค่า  $r$  กลับไปคำนวณขั้นที่ 2 ใหม่

เมื่อทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 แล้วนำไปพล็อตกราฟระหว่าง  $dc_Q$  กับ  $dx$

ข. เปลี่ยนกราฟในข้อ ก ให้เป็น  $dc_Q/dx$  กับ  $X$

ค. รวมพื้นที่ใต้ส่วนโค้งในแต่ละ  $\lambda$  จะได้ค่า  $C$

ง. พล็อตกราฟระหว่าง  $C_p$  กับ  $\lambda$  โดยที่  $C_p = \lambda C_Q$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.14.2 การทำนายสมรรถนะของกังหันลมตามทฤษฎีโดยวิลสัน (Wilson)

การคำนวณวิธีนี้ จะสมมติค่า  $a$  และ  $a'$  แล้วนำค่านี้ไปคำนวณค่าต่าง ๆ และกลับค่า  $a^*$  และ  $a'^*$  แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่สมมติไว้เดิม ถ้าค่าทั้งสองเท่ากันจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหา  $dc_Q/d_x$  ขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

1. กำหนดรัศมีภายนอก  $R$  ความยาวคอร์ด  $C$  จำนวนใบ  $B$  มุมตั้งใบ  $\beta$
2. กำหนดอัตราส่วนความเร็วปลายใบ
3. เลือกค่ารัศมีภายใน  $r$
4. เลือกค่า  $a$  และ  $a'$
5. การคำนวณ

$$\begin{aligned}\lambda_r &= X \\ \theta &= BC/2\pi r \\ \alpha &= \theta - \beta\end{aligned}$$

6. หาค่า  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  จากกราฟ
7. คำนวณค่า  $a^*$  และ  $a'^*$  โดยที่

$$\begin{aligned}4a^*/1-a^* &= \alpha C_L \cos\theta / \sin\theta \\ 4a'^*/1+a'^* &= \alpha C_L / \cos\theta\end{aligned}$$

8. นำ  $a^*$  และ  $a'^*$  ไปเปรียบเทียบกับข้อที่ 4
9. ถ้า  $a^* > a$  และ  $a > a'^*$  ย้อนกลับไปเลือกที่ค่า  $a$  และ  $a'$  ใหม่ แล้วเริ่มคำนวณจากข้อที่ 5 ใหม่

$$dC_Q = (1+a')^2 \alpha C_L \sin\theta / \cos\theta ((1-(C_D/C_L \tan\theta))) \lambda r^2 r dr$$

10. เปลี่ยน  $r$  กลับไปทำขั้นที่ 3
11. เปลี่ยน  $\lambda$  กลับไปทำขั้นที่ 2

เมื่อรวมค่า  $dC_Q/d_x$  ที่  $r$  ต่าง ๆ จะได้ค่า  $C_Q$  นำไปพล็อตกราฟระหว่าง  $C_Q$  กับ  $\lambda$  และ  $C_p$  กับ  $\lambda$  โดยมีความสัมพันธ์  $C_p = \lambda C_Q$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.15 เฟืองตรง

เฟืองตรงเป็นชิ้นส่วนเครื่องกลหนึ่งที่พบอยู่ในเครื่องกลทั่วไป โดยใช้ทำหน้าที่ส่งกำลังหมุนจากเพลาหนึ่งไปยังอีกเพลาหนึ่งที่ขนานกัน ส่วนมากเพลาขับ (Driving gears) จะมีขนาดเล็กกว่าเฟืองตาม (Driver gear) และมีชื่อพิเศษว่าพิเนียน (Pinion) ส่วนเฟืองใหญ่เรียกว่าเฟือง (Gears) แต่การใช้งานในบางโอกาสก็อาจจะใช้เฟืองใหญ่เป็นเฟืองขับก็ได้



รูปที่ 2.16 ขนาดของเฟืองมาตรฐาน

วิธีการที่จะป้องกันมิให้เกิดการขัดกันขึ้น ทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. ใช้วิธีตัดเนื้อโลหะส่วนที่อยู่ต่ำกว่าวงกลมมาตรฐานออกบ้าง (Undercutting) ทั้งนี้มิให้มีการสัมผัสระหว่างฟันเฟืองในบริเวณนี้ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ทำให้อัตราการขบน้อยลง แลทำให้ฟันเฟืองบอบบางลง
2. ใช้วิธีตัดปลายฟันเฟืองให้มีขนาดสั้นลง (Stubbed teeth) ข้อเสียของวิธีนี้คือ ทำให้อัตราการขบลดน้อยลง
3. การเพิ่มมุมกด  $\phi$  จะลดขนาดของวงกลมฐาน วิธีนี้ทำให้ส่วนที่เป็นอินโวลูตเคฟของหันฟันเฟืองเพิ่มขึ้น จึงสามารถจำกัดการขัดกันได้ แต่การเพิ่มมุม  $\phi$  จะทำให้แรงปฏิกิริยา ณ ฟันเฟืองในแนวรัศมีของฟันเฟือง (Separateing force) เพิ่มขึ้น ทำให้การขบกันระหว่างฟันเฟืองมีความราบเรียบน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การใช้เฟืองที่ไม่เป็นมาตรฐาน (Non interchangeable) กล่าวคืออันเล็กมีแอนเดนคัมเพิ่มขึ้น (โดยการลดคิเดนคัม ตามส่วนที่เพิ่มขึ้น) และให้เฟืองอันใหญ่ลดลง ซึ่งทำให้มีราคาแพงขึ้น และไม่สามารถใช้จับเฟืองอื่นๆ ที่เป็นมาตรฐานได้

กล่าวโดยสรุปแล้ว การขจัดกันเป็นสิ่งที่จะต้องทำ แต่จะทำโดยวิธีไหนขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้เลือกใช้เฟือง ตลอดจนการนำไปใช้งานแต่ละชนิด

#### 2.16 แรงพลวัต (Gear force analysis)

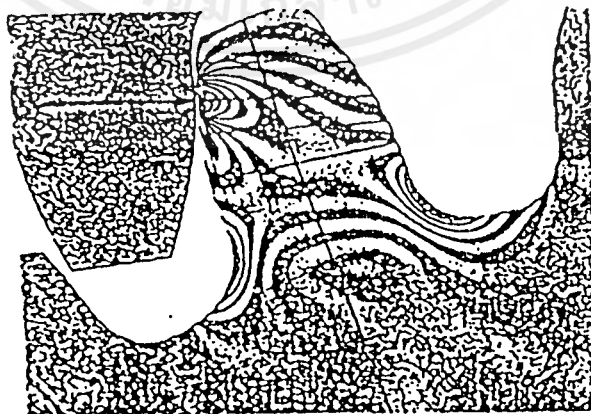
แรงที่เกิดจากการจับกันของเฟืองที่จุดพิชซึ่งจะสามารถแยกออกเป็นสองส่วนพิจารณาได้เป็น

1. แรงตามแนวสัมผัส (Tangential component)  $F$  เป็นแรงที่ใช้ในการส่งกำลัง
2. แรงตามแนวรัศมี (Radial component)  $F$  แรงนี้ไม่ทำให้เกิดงานแต่จะเป็นแรงผลักของ เฟืองแต่ละส่วน

#### 2.17 ความเค้นในฟันของเฟือง (Gear tooth strength)

แสดงความเค้นที่เกิดที่เฟืองโดยใช้ โฟโตอีลาสติคส์ (Photoelastic pattern) ในบริเวณที่แรงมากที่สุดคือบริเวณที่เกิดความเค้นมาก ซึ่งในที่นี้จะมีอยู่สองจุดคือ

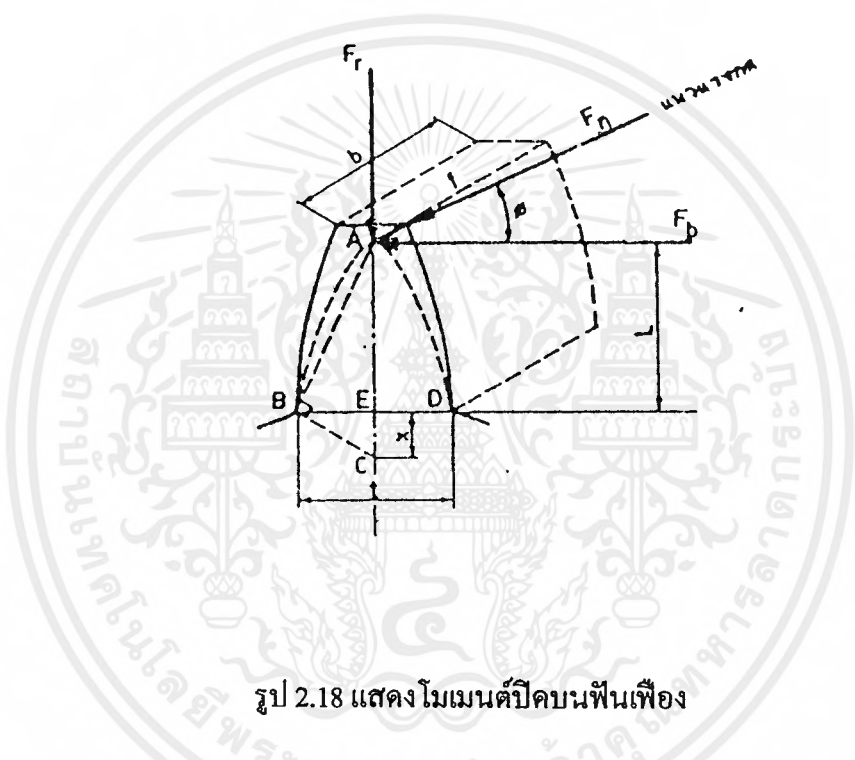
1. ที่บริเวณจุดสัมผัสของเฟือง ซึ่งมีแรง  $F$  กระทำอยู่ และ
2. บริเวณ โคนเฟือง



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดความเค้นในเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์ในเฟืองการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเฟืองเป็นปัญหาที่ค่อนข้างยาก ทั้งนี้เพราะการออกแบบขั้นตอนต้องกระทำแบบใช้การทดลองดู การออกแบบฟันเฟืองมีหลายวิธี ที่จะกล่าวไปนี้เป็นวิธีการใช้สมการของ ลูอิส (Lewis equation) ซึ่งเป็นการพิจารณาความเค้นบิดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองแบบพื้นฐาน (Basic analysis of Gear-Tooth-Bending stress)



รูป 2.18 แสดง โมเมนต์บิดบนฟันเฟือง

ลูอิสได้หาสมการสำหรับการคำนวณของฟันเฟือง โดยการตั้งสมมติฐานให้ฟันเฟืองมีลักษณะเป็นคานยื่น (cantilever beam) และรับแรงดังรูป 16 ถ้าคิดแรงกระทำที่หลายฟัน แรง F จะตั้งฉากกับผิวของฟันไปตามแนวแรงกดซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองแรง ตั้งฉากกันคือ Ft และ Ft สมมติให้แรงนี้กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของฟัน โดยที่ไม่คิดแรงในรัศมี Ft

จากสมการความเค้นในคาน

$$\sigma = Mc/I = 6F_t / bt^2 \tag{2.17.1}$$

จากสามเหลี่ยมคล้าย

$$t/2/x = h/t/2 \text{ หรือ } t^2/h = 4x \tag{2.17.2}$$

แทนค่าในสมการ

$$\sigma = 6Ft/4bx \tag{2.17.3}$$

กำหนดให้ คิวประกอบแบบลูอิส (Lewis form factor)

$$y = 2x / 3p \tag{2.17.4}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.17.3) ได้

$$\sigma = Ft / bpy \tag{2.17.5}$$

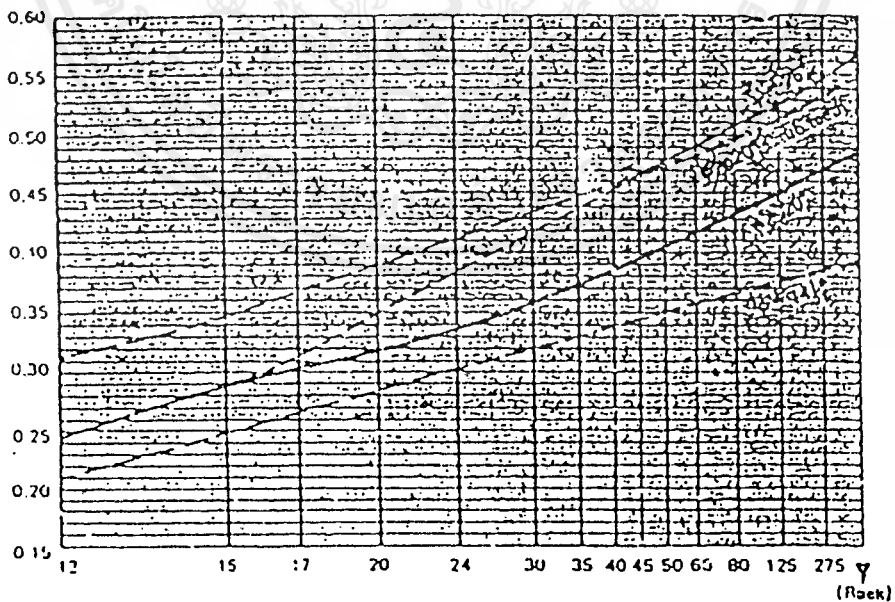
จาก  $p = \pi/P$

$$y = Y/\pi \tag{2.17.6}$$

ดังนั้น  $\sigma = Ft P / bY$  (2.17.7)

หรือ  $\sigma = Ft / mbY$  (2.17.8)

ค่า y และ Y นี้สามารถหาได้โดยคำนวณจากรูปร่างของฟันเฟือง หรือจากรูปที่ 2.19



รูป 2.19 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.18 การพิจารณาความเค้นบิดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟือง (Refine analysis of gear-tooth-bending stress : recommended procedure)

จากตัวประกอบที่มีต่อความเค้นบิดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองเมื่อแทนในสมการลูอิสจะได้

$$\sigma = (F_t P / b J) k_v k_o k_m \quad (2.17.1)$$

เมื่อ

$J$  = geometry factor หาได้จากรูปที่ 2.20

$K_v$  = ตัวประกอบความเร็ว (Velocity or dynamic factor)  
หาได้จากรูปที่ 2.21

$K_o$  = ตัวประกอบเกินภาระ (Overload factor) หาได้จากตารางที่ 2.3

$K_m$  = ตัวประกอบการติดตั้ง (Mounting factor) หาได้จากตารางที่ 2.4

เมื่อคำนวณค่าความเค้นบิดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองได้แล้วต้องนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นบิดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองที่อายุการใช้งานไม่จำกัด (Infinite factor) ซึ่งหาได้จาก

$$S_n = S_u C_L C_G C_s k_r k_t k_m s \quad (2.18.2)$$

เมื่อ

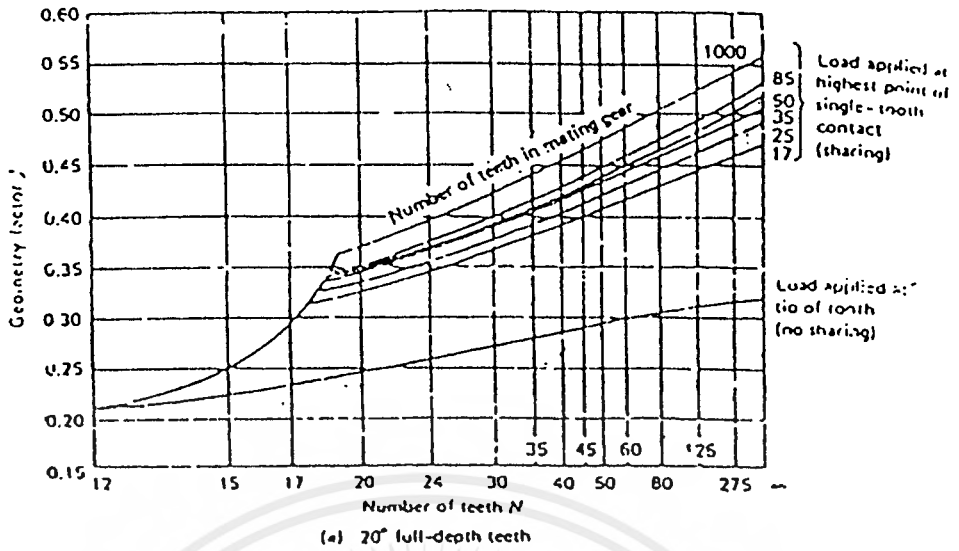
$$S_n = S_u / 2 = \text{standard R. R. Moore endurance limit}$$

$S_u$  = Tensile strength

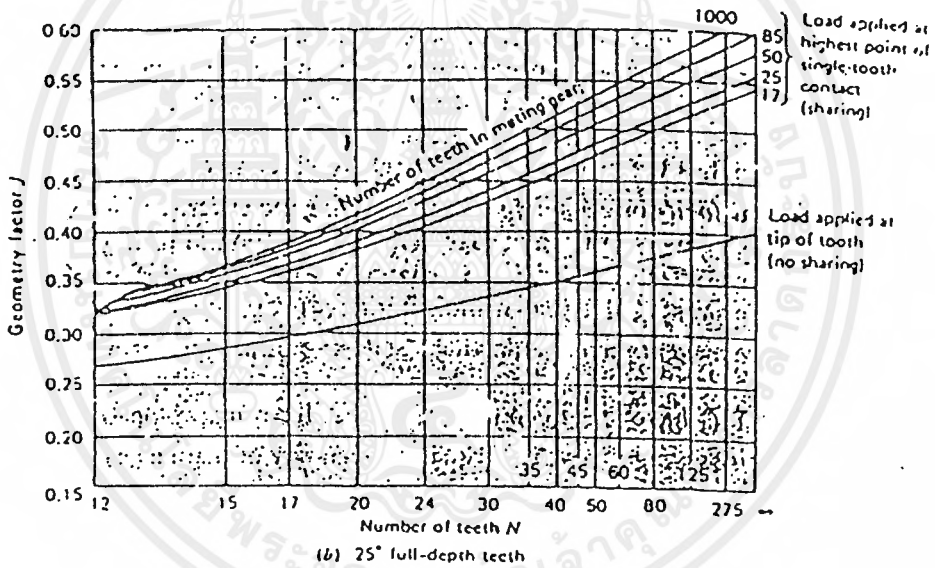
$C_L$  = ตัวประกอบภาระมีค่า = 1

$C_G$  = ตัวประกอบ gradient = 1 เมื่อ  $P > 5, 0.85$  เมื่อ  $P < 5$

$C_s$  = ตัวประกอบผิว (surface factor) หาค่าได้จากรูป 2.20



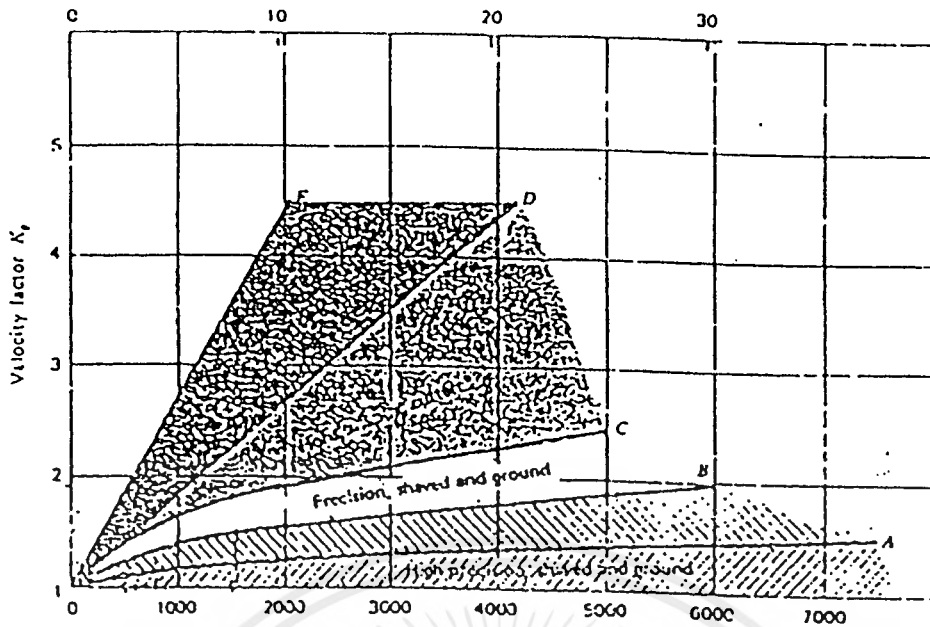
รูป 2.20 แสดงค่า Geometry factor J (a)



รูป 2.21 แสดงค่า Geometry factor J (b)

Driven Machinery			
Source of Power	Uniform	Moderate Shock	Heavy Shock
Uniform	1.00	1.25	1.75
Light shock	1.25	1.50	2.00
Medium shock	1.50	1.75	2.25

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตัวประกอบเกินภาระ  $k_o$  เวกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.22 แสดงค่าตัวประกอบความเร็ว  $k_v$

## 2.19 สายพาน

การส่งกำลังทางกลจากเพลานหนึ่งไปยังเพลานอีกอันหนึ่ง อาจทำได้สามวิธี คือ โดยใช้เฟือง ใช้สายพาน หรือใช้โซ่ การส่งกำลังโดยสายพานเป็นการส่งแบบอ่อนตัวได้ (Flexible) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียหลายประการหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งกำลังโดยใช้เฟือง ข้อดีก็คือ มีราคาถูกและใช้งานง่ายรับแรงกระตุกและการสั่นได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียงดัง เหมาะสำหรับการส่งกำลังระหว่างเพลานที่อยู่ห่างกันมาก ๆ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่า เป็นค่าน้อย แต่มีข้อเสียก็คือ อัตราทดไม่แน่นอนเนื่องจากการลื่น (Slip) และการกริพ (Creep) ของสายพาน และต้องมีการปรับปรุงระยะห่างระหว่างเพลานหรือปรับแรงตึงในสายพานระหว่างใช้งาน นอกจากนี้ยังไม่อาจใช้งาน ที่มีอัตราทดสูงมากได้ ซึ่งมักใช้กับอัตราทดไม่เกิน 5 เท่า

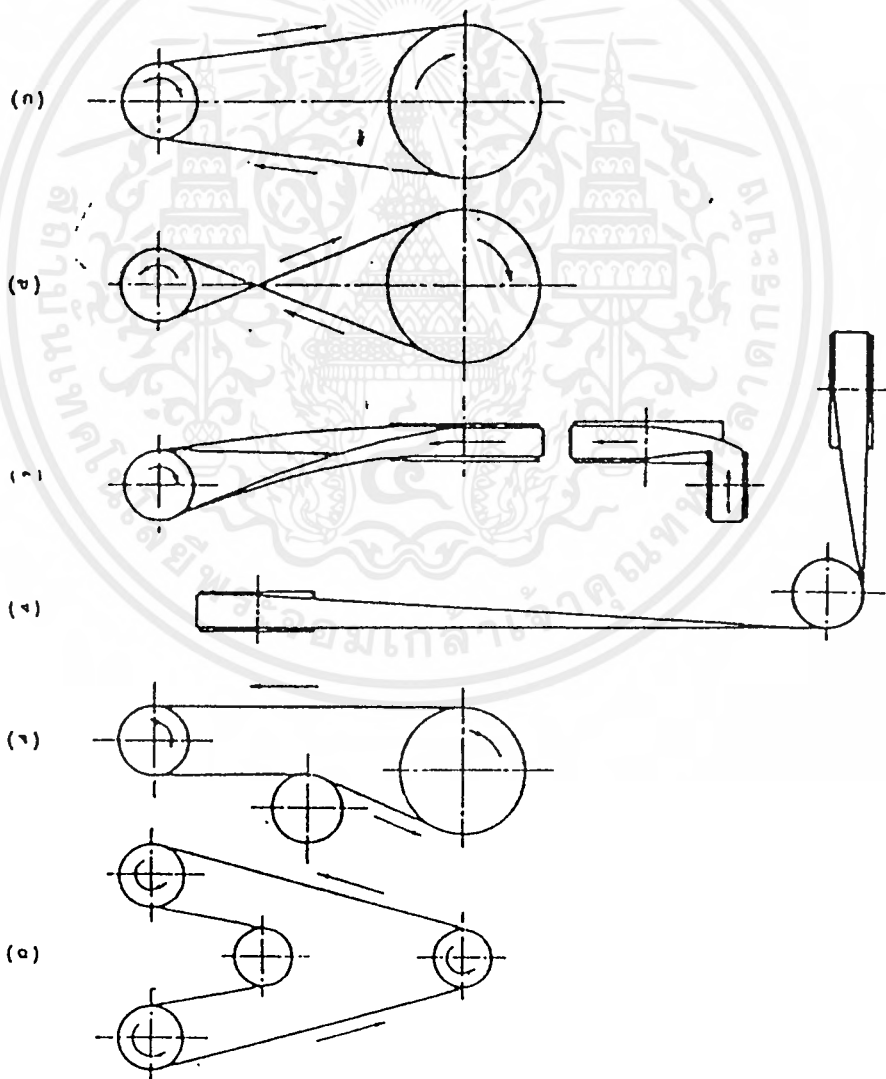
### 2.19.1 ลักษณะการขับเคลื่อนด้วยสายพาน

เนื่องจากคุณสมบัติในการอ่อนตัวของสายพาน จึงจัดลักษณะการขับเคลื่อนด้วยสายพานได้ต่าง ๆ กัน ลักษณะทั่วไปที่นิยมใช้ในการขับเคลื่อนด้วยสายพานดูได้จากรูป 2.23

เมื่อต้องการขับเคลื่อนเพลานที่อยู่ขนานกัน และต้องการให้เพลานทั้งสองหมุนในทิศทางเดียวกันก็จะได้ในลักษณะดังรูปที่ 2.23 (ก) ซึ่งเรียกว่า โอฟินไดรฟ์ (Open drive) และถ้าเพลานอยู่ห่างกันมาก ควรจะให้สายพานตึงแน่น (Tight) และค่านบนหย่อน (Slack) แต่ถ้าต้องการให้เพลานทั้งสองหมุนสวนทางกันก็ทำได้โดยใช้วิธีดังรูป 2.23 (ข) ซึ่งเรียกว่าครอสไดรฟ์ (Crossed drive) แต่การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อนี้ในลักษณะในลักษณะนี้จุดที่สายพานไขว้กันจะทำให้สายพานถูกัน ทำให้สายพานเกิดการสึกหรอมากเกินไป จึงควรจะให้จุดศูนย์กลางของล้อสายพานอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่าสิบเท่าของความกว้างของสายพานไม่เกิน 15 mm/s ลักษณะของสายพานมีดังนี้

- (ก) โอเพ่นไดรฟ์
- (ข) ครอสไดรฟ์
- (ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์
- (ง) มิวส์ไดรฟ์
- (จ) แสดงการขับใช้ล้อช่วย
- (ฉ) รีเวอร์สไดรฟ์



รูปที่ 2.23 ลักษณะการขับด้วยสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

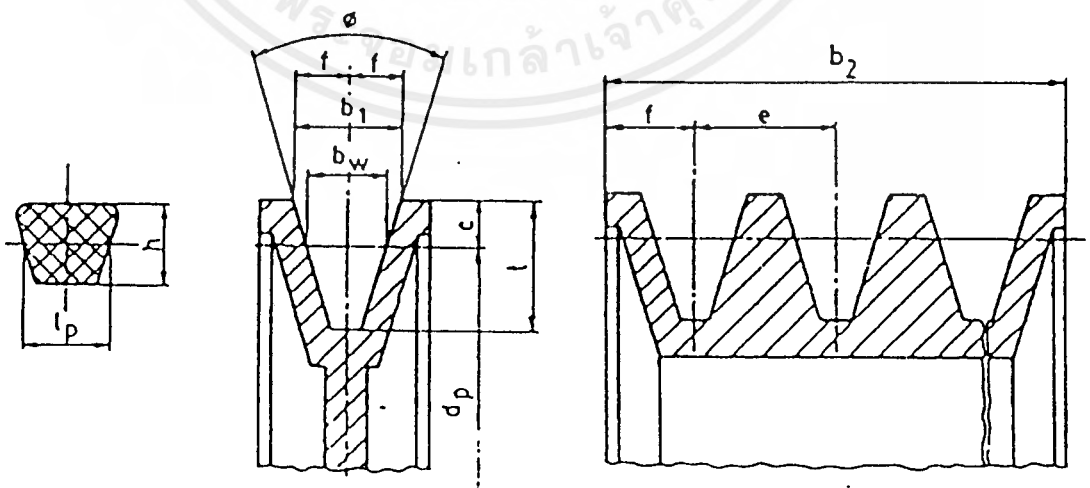
## 2.20 สายพานลิ้ม

สายพานลิ้มใช้ส่งได้ค่อนข้างมาก โดยต้องการแรงดึงขั้นต่ำในสายพาน ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้ เพราะผลจากการเกาะยึดตัวกันระหว่างด้านข้างของสายพานที่เรียว กับร่องรูปลิ้มของล้อสายพาน ทำให้เกิดแรงเสียดทานสูง ซึ่งเป็นผลให้สายพานทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพดีแม้ว่าจะมีส่วนโค้งงอเล็กน้อย และมีแรงดึงขั้นต่ำค่อนข้างต่ำ และเหมาะกับการใช้งานในกรณี ที่ระยะห่างระหว่างศูนย์ กลางน้อย ในการส่งกำลังจะส่งได้มากที่สุด เมื่อผิวด้านข้างของสายพานอัดแน่นกับร่องบนล้อสายพาน และในกรณีที่มีเหตุฉุกเฉิน ก็อาจใช้ผลจากการอัดแน่นนี้ทำหน้าที่เป็นเบรคได้ด้วย

การขับเคลื่อนสายพานลิ้ม มีข้อดีคือ เจริญ สะอาด และสามารถรับแรงกระตุกได้นอกจากนั้น ยังมีขนาดกระทัดรัด มีประสิทธิภาพดี และแบร็งของเพลาลังไม่ต้องรับแรงมากเกินไป จึงมักใช้ในการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งใช้สายพานขับได้โดยมีอัตราทดสูงประมาณ 7:1 หรืออาจใช้ได้สูงถึง 10:1

### 2.20.1 ขนาดสายพานและล้อสายพานลิ้ม

สายพานลิ้ม มีหน้าที่ตัดเป็นรูปลิ้ม ดังนั้นในการกำหนดขนาดจึงมักกำหนดโดย ใช้ความกว้างพิทช์ (Pitch width) และความหมายสายพานโดยใช้ตัวอักษรแทน ซึ่งแบ่งออกเป็นสายพานลิ้มแบบแคบ (Narrow V-belts) มีขนาด SPZ SPA SPB และ SPC และสายพานลิ้มแบบธรรมดา มีขนาด Y Z A B C D และ E ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสายพานลิ้มแบบธรรมดาเท่านั้น รูปร่างหน้าตัดของสายพานลิ้มและสายพาน ดูได้จากรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 หน้าตัดสายพานลิ้มและล้อสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- $Z$  = จำนวนเส้นของสายพานลิ่ม
  - $W_p$  = กำลังงานที่ต้องการส่ง
  - $N_s$  = ตัวประกอบใช้งาน
  - $N_a$  = ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งลิ่ม
  - $N_f$  = ตัวประกอบแก้ไขความยาวสายพาน (Belt length correction factors)
  - $P_R$  = กำลังที่สายพานลิ่มหนึ่งเส้นส่งได้

Characteristics of Support	Face Width (in.)			
	0 to 2	6	9	16 up
Accurate mountings, small bearing clearances, minimum deflection, precision gears	1.3	1.4	1.5	1.8
Less rigid mountings, less accurate gears, contact across the full face	1.6	1.7	1.8	2.2
Accuracy and mounting such that less than full-face contact exists			Over 2.2	

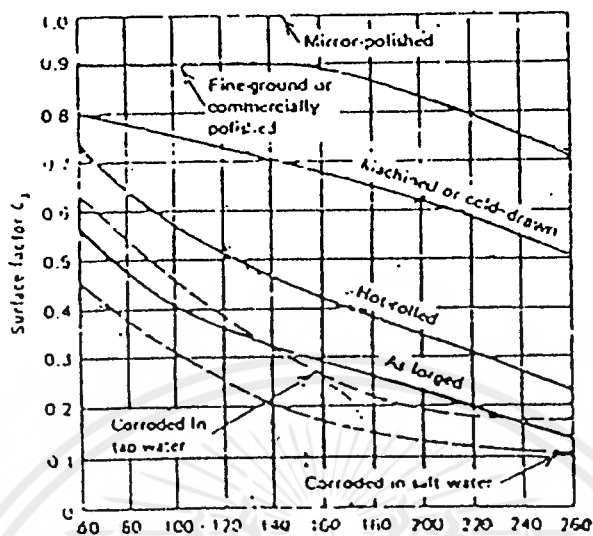
ตาราง 2.4 แสดงค่าตัวประกอบติดตั้ง

Reliability (%)	50	90	99	99.9	99.99	99.999
Factor $k_f$	1.000	0.897	0.814	0.753	0.702	0.659

ตาราง 2.5 แสดงค่าตัวประกอบการติดตั้ง

- $k_f$  = ตัวประกอบความเชื่อมั่น หาค่าได้จากตาราง 2.5
- $k_f$  = ตัวประกอบอุณหภูมิ = 1 เมื่อ  $T > 160/620/(460)$  เมื่อ  $T > 160$
- $k_f$  = ตัวประกอบ mean stress = 1 สำหรับเฟืองสะพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา = 1.4 สำหรับเฟืองขับและเฟืองตามขนด้านกรคาร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.25 แสดงค่าตัวประกอบผิว

25	60	100	170	280	500	900	1900
28	63	106	180	300	530	1000	2000
31.5	67	112	190	315	560	1060	2240
25.5	71	118	200	355	600	1120	2500
40	75	125	212	375	600	1250	
45	80	132	224	400	670	1400	
50	85	140	236	425	710	1500	
53	90	150	250	450	750	1600	
56	95	160	265	475	800	1800	

ขนาดเป็นมิลลิเมตร

ตาราง 2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์  $d_p$  ของล้อยาสายพานลิ้มตามมาตรฐาน ISO/R 52-1975(E) และ ISO/R 253-1962(E)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.21 การคำนวณห้ขนาดของสายพานลิ้ม

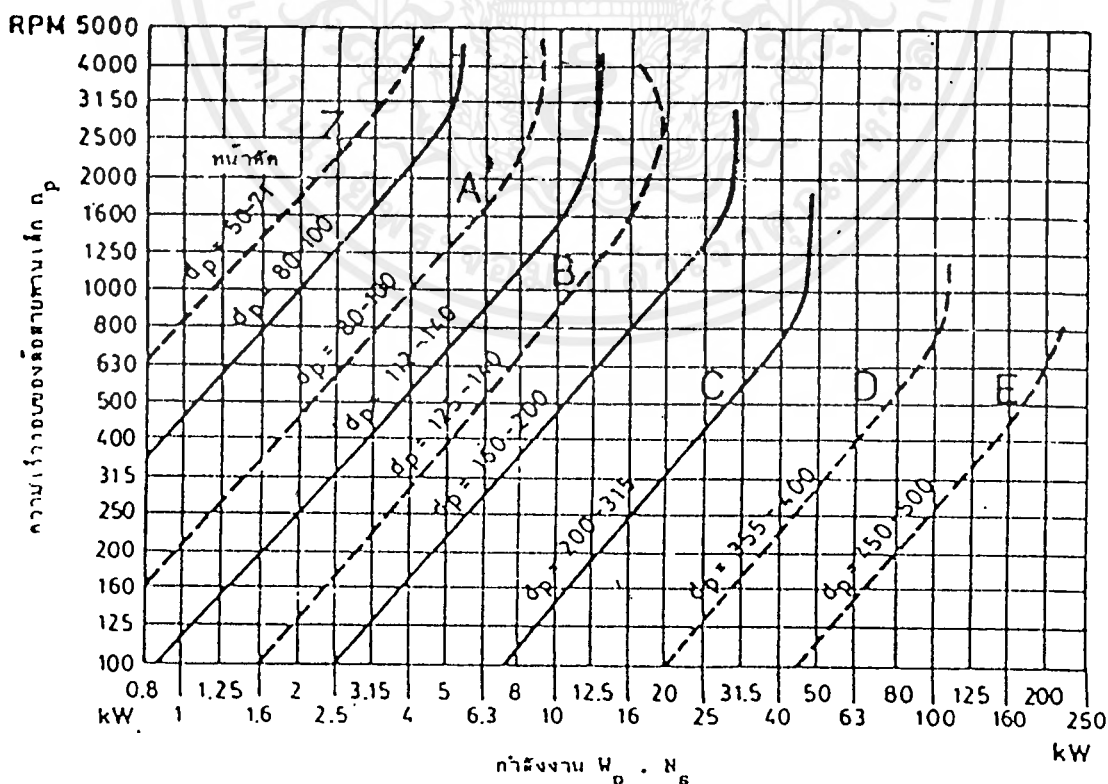
การคำนวณทางด้านการส่งกำลังโดยสายพานลิ้ม จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิศข์ของสายพาน dp เป็นพื้นฐาน และในที่นี้ก็จะแสดงวิธีการเลือกขนาดของสายพานลิ้ม ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เช่นเดียวกับในกรณีของสายพานแบน

ในการเลือกขนาดของสายพาน บริษัทผู้ผลิตได้แนะนำให้เลือกขนาดของล้อสายพานให้โตที่สุดเท่าที่จะทำได้ ขนาดล้อสายพานไม่ควรจะเล็กกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6 แต่ข้อควรระวังก็คือ ขณะใช้งานปกติความเร็วของสายพานไม่ควรสูงกว่า 30 m/s

การหาขนาดหน้าตัดโดยประมาณของสายพานลิ้มสำหรับการส่งกำลัง อาจทำได้โดยใช้รูปที่ 2.24 แต่กำลังที่ส่งได้จริงของสายพานจะต้องตรวจสอบจากตารางกำหนดสมรรถนะในการส่งกำลังของสายพานลิ้ม

การเลือกขนาดของสายพานลิ้มจะแตกต่างสายพานแบนเล็กน้อยคือ จะใช้วิธีการคำนวณหาจำนวนเส้นของสายพานลิ้มที่ต้องการใช้งานจากกำลังงานที่ต้องการขับและตัวประกอบที่ใช้แก้ไขต่าง ๆ จำนวนเส้นของสายพานลิ้มหาได้จากสมการ

$$Z = (W_p \cdot N_p) / (P_R \cdot N_s \cdot N_i) \tag{2.21.1}$$



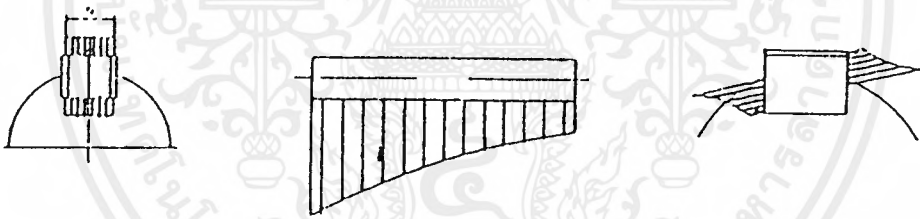
รูปที่ 2.26 แผนภูมิที่ใช้ในการเลือกขนาดหน้าตัดของสายพานลิ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

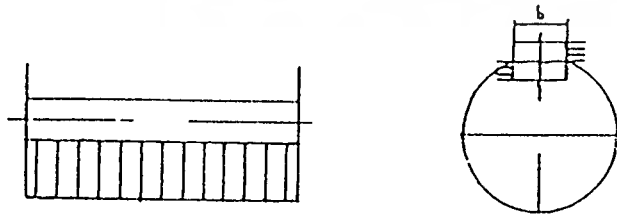
## 2.22 การออกแบบลิ้ม

เมื่อส่งกำลังจากคุมล้อเข้าสู่เพลางานก็จะเกิดความเค้นขึ้นในลิ้ม ซึ่งลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นแบบสามมิติ ไม่สามารถคำนวณหาขนาดได้ตรงตามลักษณะที่เกิดขึ้นจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นมีผลมาจากแรง 2 แหล่ง คือ

1. แรงที่เกิดจากการ สวมอัดลิ้มลงในร่องลิ้ม ทั้งนี้เนื่องจากผลของพิกัดงานสวมที่ไม่สามารถกำหนดให้มีระยะสวมเพียงค่าเดียวได้ และโดยเฉพาะแรงที่เกิดจากการคอกอัดของลิ้มแบบเร็วซึ่งแรงเหล่านี้ทำให้เกิดความเค้นอัดขึ้นในลิ้ม โดยผู้ที่ออกแบบไม่สามารถคำนวณหาค่าเค้นที่เกิดขึ้นได้อย่างเที่ยงตรง
2. แรงที่เกิดจากการส่งกำลังผ่านลิ้ม โดยจะเกิดแรงตั้งฉากกับรัศมีในขณะที่ส่งกำลังซึ่งจะทำกับลิ้มตลอดทั้งความยาวและความสูงลิ้ม แต่แรงเหล่านี้มิได้มีขนาดเท่ากันตลอดทั้งความยาวเพราะที่เพลามีความแข็งคิ่งไม่เท่ากันกับคุมล้อ ส่วนแรงที่เกิดขึ้นตามความสูงของลิ้มก็เช่นกัน จะกระจายไม่สม่ำเสมอทั้งเพล เพราะเกิดการพลิกตัวของลิ้ม



รูป 2.27 แรงที่เกิดจากการสวมอัดลิ้มลงในร่องลิ้ม แรงที่เกิดจากการส่งกำลังผ่านลิ้มตามความยาว ความสูงลิ้ม

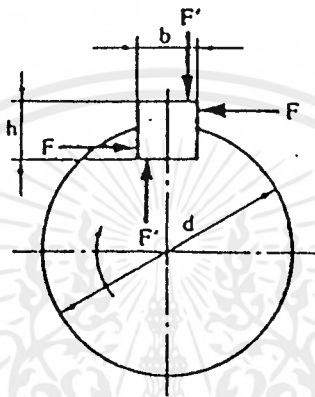


รูป 2.28 สมมุติให้แรงที่เกิดขึ้นบนลิ้มกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งความยาวและความสูง ดังนั้นเพื่อให้สะดวกในการคำนวณและมีสูตรทางด้านกลศาสตร์ต้องับการหาความเค้นที่

เกิดขึ้นในลิ้มจำกัดยังมีสมมุติฐานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สมมุติให้การสวมประกอบลิ้มเข้ากับคูล้อมเป็นแบบสวมคลอน ซึ่งไม่คิดแรงที่เกิดจากการสวมลิ้มเข้าไปที่งาน
2. สมมุติให้แรงที่เกิดขึ้นบนลิ้มกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งด้านความยาวและความสูงจากสมมุติฐานดังกล่าวทำให้คำนวณหาขนาดของลิ้มได้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติการคำนวณหาความยาวของลิ้มเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากลิ้มมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็นมาตรฐาน



รูปที่ 2.29 แรงบนรอยต่อด้วยลิ้ม

พิจารณารอยต่อด้วยลิ้มดังรูป ให้  $F$  เป็นแรงที่กระทำกับลิ้ม เนื่องจากโมเมนต์บิดและ  $F$  เป็นแรงที่กดลิ้มไว้ไม่ให้ลิ้มเอียง โมเมนต์บิดบนเพลลาทำให้คูล้อมมีแรงต้านทาน  $F$  เกิดขึ้นซึ่งกระทำในแนวตั้งฉากกับลิ้ม สมมุติว่าแรงนี้กระทำที่จุดกึ่งกลางของลิ้มส่วนที่โผล่พ้นจากเพลลา ดังนั้นจึงหาแรง  $F$  ได้จากสมการ

$$T = F(d/2 + h/4) \approx Fd/2 \quad (2.22.1)$$

จากข้อสมมุติฐานที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อคิดว่าลิ้มขาดเนื่องจากแรงเฉือน ฉะนั้น

$$T = Fd/2 = bl \approx d/2 \quad (2.22.2)$$

เมื่อ  $T =$  โมเมนต์บิดบนเพลลา

$F =$  แรงที่กระทำกับลิ้ม

$d =$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา

$$\begin{aligned}
 b &= \text{ความกว้างของลิ่ม} \\
 l &= \text{ความยาวของลิ่ม} \\
 T &= \text{ความเค้นเฉือนบนลิ่ม}
 \end{aligned}$$

แต่เมื่อคิดว่าลิ่ม โค่นอัดแตก

$$T = Fd/2 \quad hl \quad \sigma_{cd}/4 \quad (2.22.3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 h &= \text{ความสูงของของลิ่ม} \\
 \sigma_c &= \text{ความเค้นอัดบนลิ่มหรือเพลลาหรือคุมลื้อ}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากโมเมนต์บิดบนเพลลามีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากสมการลิ่มขาดเนื่องจากแรงเฉือนและสมการและสมการลิ่ม โค่นอัดแตก

$$bl \quad Td/2 = hl \quad \sigma_{cd}/4 \quad (2.22.4)$$

จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ค่าความเค้นที่วัสดุรับได้จะมีค่าประมาณของความเค้นอัดที่วัสดุรับได้นั้นคือ  $T = 0.5 \sigma_c$  เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$b = h$$

ในกรณีที่ลิ่ม เพลลา และคุมลื้อทำจากวัสดุชนิดต่างกัน ให้ทำการคำนวณจากสมการเมื่อคิดว่าลิ่ม โค่นอัดแตก โดยใช้ค่าความเค้นอัดของวัสดุที่มีแรงอัดน้อยที่สุด

ถ้าลิ่มและเพลลาทำงวัสดุชนิดเดียวกัน ก็สามารถจะหาความยาวของลิ่ม โดยถือว่าลิ่มและเพลลารับ โมเมนต์บิดเท่ากัน ดังนั้น

$$T = bl \quad Td/2 = \pi d^3 T/16 \quad (2.22.5)$$

เพราะฉะนั้น

$$l = \pi d^2/8b$$

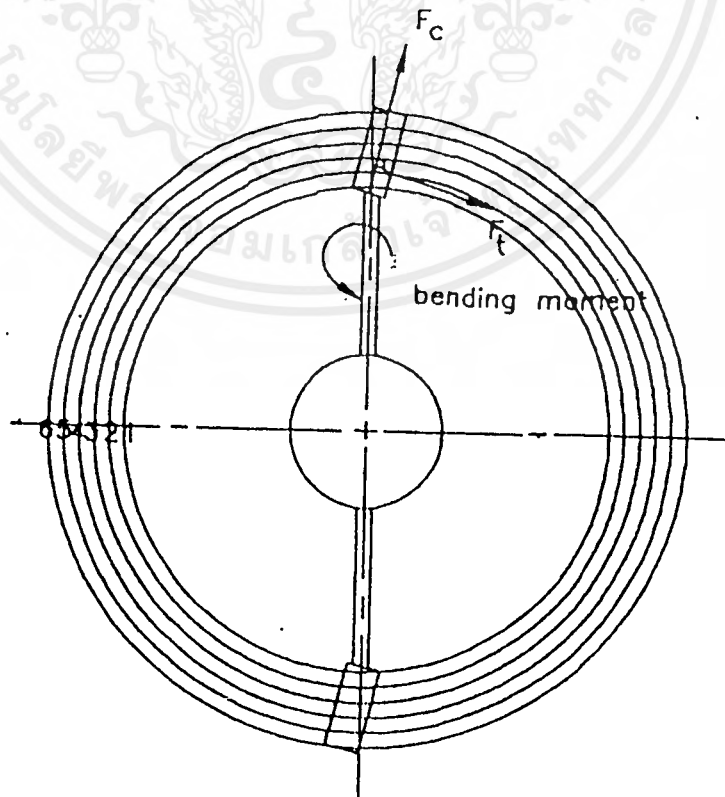
### บทที่ 3

#### วิธีการคำนวณและการออกแบบ

##### 3.1 ข้อกำหนดที่ใช้ในการคำนวณ

เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	1	เมตร
จำนวนใบพัด	16	ใบ (จากตารางที่ 2.2)
น้ำหนักโดยประมาณของกังหันลม	100	กิโลกรัม
ความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ	5	เมตร/วินาที(จากภาคผนวก ข.) (ตารางที่ 2.20)
อัตราส่วนความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ	1.5	(จากรูปที่ 2.1)
สัมประสิทธิ์ของกำลังงาน	0.35	(จากรูปที่ 2.1)
สัมประสิทธิ์ของแรงยกที่ใช้ออกแบบ	1	(จากตารางที่ 2.2)
ความสูงของหอคอย	2.5	เมตร

##### 3.2 การคำนวณหาแรงที่กระทำบนใบพัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาแรงที่กระทำกับใบพัดที่จุดศูนย์กลางมวล

$$F_{T,CG} = (1/2 \times C \times V \times A/B) \times A_p/A$$

หาแรงหนีศูนย์กลางของใบพัดที่จุดศูนย์กลาง

$$F_{T,CG} = m u_{CG}^2 / r_{CG}$$

$$U_{CG} = (V \times \lambda \times r_{CG}) / R$$

หาโมเมนต์คัตที่กระทำกับใบพัด

$$M = F_{T,CG} \times R_{cg}$$

ตารางแสดงระยะจากจุดศูนย์กลางใบพัดถึงจุดศูนย์กลางมวลและน้ำหนักของใบพัดแต่ละส่วน ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ส่วนตารางขนาดของแรงต่างๆ ที่กระทำกับใบพัดแต่ละส่วน แสดงในตารางที่ 3.3

section	$R_{CG}$ (cm)	m (kg)
1-2	10	0.127
2-3	20	0.141
3-4	30	0.155
4-5	40	0.166
5-6	50	0.177

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า T กับ m ของแต่ละ section

section	$R_{CG}$ (cm)	m (kg)
1-6	141	1.672
2-6	131	1.66
3-6	121	1.65
4-6	111	1.630
5-6	101	1.615

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า  $r_{CG}$  กับ m ของแต่ละ section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Section	$U_{CG}(cm)$	$A_o(m^2)$	$F_{T,CG}(N)$	$F_{C,CG}(N)$	M (N-m)
1-2	0.5	1.1	12.38	0.003	123
2-3	1	1.2	13.50	0.007	270
3-4	1.5	1.3	14.63	0.01	438
4-5	2	1.4	15.75	0.02	630
5-6	2.5	1.5	16.88	0.03	844
Section	$U_{CG}(cm)$	$A_o(m^2)$	$F_{T,CG}(N)$	$F_{C,CG}(N)$	M (N-m)
1-6	7.05	6.5	73.13	0.59	10311
2-6	6.55	5.5	61.88	0.54	8106
3-6	6.05	4.5	50.63	0.50	6126
4-6	5.55	3.5	39.38	0.45	4317
5-6	5.05	2.5	28.13	0.40	2841

ตารางที่ 3.3 แสดงค่า  $F_{T,CG}$ ,  $F_{C,CG}$  และ  $m$  ที่กระทำกับใบพัดแต่ละ Section

ตัวอย่างการคำนวณคิดส่วนที่ 2-3

หาแรงในแนวแกนที่กระทำกับใบพัดที่จุดศูนย์กลางมวล

$$\begin{aligned}
 F_{T,CG} &= (1/2 \times 1 \times 5 \times (12)^2) 1.2/32 \\
 &= 13.50 \text{ N}
 \end{aligned}$$

หาแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับใบพัดที่จุดศูนย์กลางมวล

$$\begin{aligned}
 U_{CG} &= (5 \times 1.5 \times 20) / 150 \\
 &= 1 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

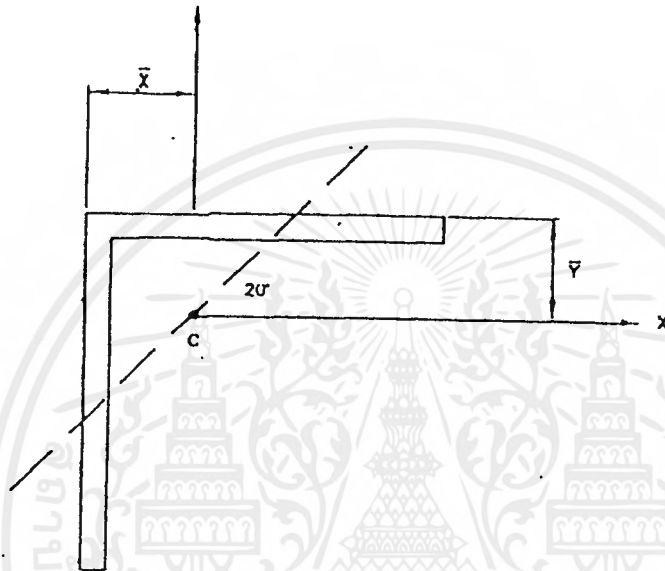
$$\begin{aligned}
 F_{C,CG} &= (0.141(1)^2)/20 \\
 &= 0.007 \text{ N}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาโมเมนต์ตัด

$$\begin{aligned} M &= 13.50 \times 20 \\ &= 270 \text{ N-m} \end{aligned}$$

### 3.3 หาคความปลอดภัยของคานรูปฉาก (L) ที่ใช้ยึดโครง



จากหัวข้อ 2.4 ใช้ในการหาข้อสมรรถนะของกึ่งหันลมทฤษฎี kindoren and meel กำหนดมุมประ  
ทะ

$$\beta = 20^\circ$$

การหาค่าแห่งของ centroid C

$$\begin{aligned} x &= \frac{((19 \times 1) + (19 \times 2) \times 9.5)}{((19+19) \times 2)} \\ &= 5.25 \text{ m.m.} \\ y &= \frac{((19 \times 9.5) + (19 \times 2) \times 1)}{((19+19) \times 2)} \\ &= 5.25 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

การหาค่าแรง moment of inertia

$$I_y = I_x = \frac{1}{12} \times 2 \times 19^3 + (2 \times 19) \times x^2 + \frac{1}{2} \times 19 \times 2^3 + (19 \times 2) \times y^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 5468.045 \text{ m.m.}^4$$

$$= 5.468 \times 10^3 \text{ m.m.}^4$$

$$I_{xy} = ((19 \times 2) \times (-2) \times (-1) + (19 \times 2) \times (3) \times (9.5))$$

$$= 3.249 \text{ m.m.}^4$$

$$= 3.249 \times 10^3 \text{ m.m.}^4$$

ค่า bending moment

$$M_{xy} = 1855.56 \times 900$$

$$= 1669.950 \text{ N/m.m.}$$

$$M_y = 0$$

การหาตำแหน่งของ neutral axis

สมการของ neutral axis คือ

$$x(M_y I_x - M_x I_y) + y(M_x I_y - M_y I_x) = 0$$

เพราะฉะนั้น

$$x(0 - 1.67 \times 10^6 \times 3.249) + y(1.67 \times 10^6 \times 5.468 \times 10^3 - 0) = 0$$

$$\text{ได้ } y = 0.549x$$

Slope ของเส้น  $N_A$  ทำมุม 20 องศา กับแกน  $C_x$

Maximum Tensile Stress เกิดขึ้นที่ a ซึ่งมีค่า

$$x_a = -5.25 \text{ m.m.}$$

$$y_a = 5.25 \text{ m.m.}$$

จากสมการ

$$\rho = \frac{(x(M_y I_x - M_x I_y) + y(M_x I_y - M_y I_x)) / (I_x I_y - I_{xy}^2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$\tau = \frac{(-5.25(-1.67 \times 10^6 \times 3.249 \times 10^3) + 5.25(1.67 \times 10^6 \times 3.249 \times 10^3)) / (29.6 \times 10^6 - 10.55 \times 10^6)}{}$$

$$\tau = \frac{2.249 \times 10^3}{\text{MN/m}^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{1/2(\rho) + \tau_{xy}}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{1/2(2.945 \times 10^3)}$$

$$= 38.37 \text{ MN/m}^2$$

ค่าใช้วัสดุ AISI 4620 = 85 kpsi

$$= 5.85 \times 10^8 \text{ N/M}^2$$

หาค่าความปลอดภัย  $n = \frac{S_y(2 \times \tau_{\max})}{}$

$$= \frac{(5.85 \times 10^8)}{(2 \times 38.37 \times 10^6)}$$

$$= 7.62$$

### 3.4 การคำนวณหาขนาดของเพลลาของกึ่งหันลม

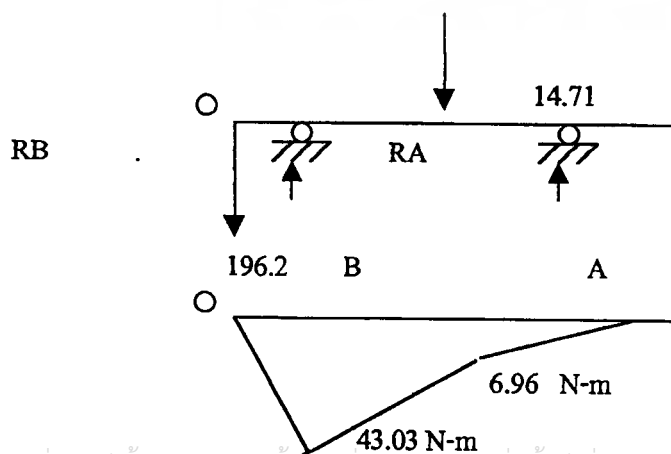
เพลลาของกึ่งหันมีน้ำหนัก = 1.5 kg

$$= 14.715 \text{ N}$$

น้ำหนักของใบพัด = 20 kg

$$= 196.2 \text{ N}$$

เพลลา กึ่งหันยาว = 420 mm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \sum M_A &= 0 \\
 R_B \times 240 &= (196.2 \times 370) + (14.715 \times 130) \\
 &= 74506.95 / 260 \\
 R_B &= 286.565 \text{ N} \\
 \sum F_A &= 0 \\
 R_A &= 286.565 - 196.2 - 14.715 \\
 &= 75.65 \text{ N}
 \end{aligned}$$

หาค่ากำลังที่ได้จากเพลากังหันลม

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} C_p \rho A V_\infty^3 \\
 V_\infty &= 12 \text{ m/s} \\
 P &= \frac{1}{2} \times 0.35 \times 1.17 \times \pi \times (0.5)^2 \times (12)^3 \\
 &= 277.88 \text{ W} \approx 300 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

หาความเร็วของกังหันลม

$$\begin{aligned}
 \lambda &= U / V_\infty \\
 &= ((2\pi n) / 60) \times (R / v) \\
 n &= (60 \lambda V_\infty) / (R / V) \\
 &= (60 \times 6 \times 12) / (2 \times \pi \times 0.5) \\
 &= 1375.099 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

หาแรงบิดที่เพลากังหันลม

$$\begin{aligned}
 T &= P / \Omega \\
 \Omega &= v \lambda / R \\
 T &= (P R) / (v \lambda) \\
 &= (2136.5 \times 0.5) / (12 \times 6) \\
 &= 14.837 \text{ N-m}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีความเสียหายของ Distortion Energy Theory

$$S_y/n = \frac{(32\sqrt{(m)^2+1/4(3T)^2})/\pi(D_o^3(1-(D_o/D_i)^4))}{16}$$

จุดพิจารณา คือ จุด B เพราะฉะนั้น

$$M = 43.03 \text{ N-m}$$

$$T = 44.51 \text{ N-m}$$

$$D_o = 25 \text{ m.m.}$$

$$= 0.025 \text{ m}$$

$$D_i = 0 \text{ m.m.}$$

วัสดุที่ใช้ AISI 4130 มี  $S_y = 87 \text{ kpsi}$

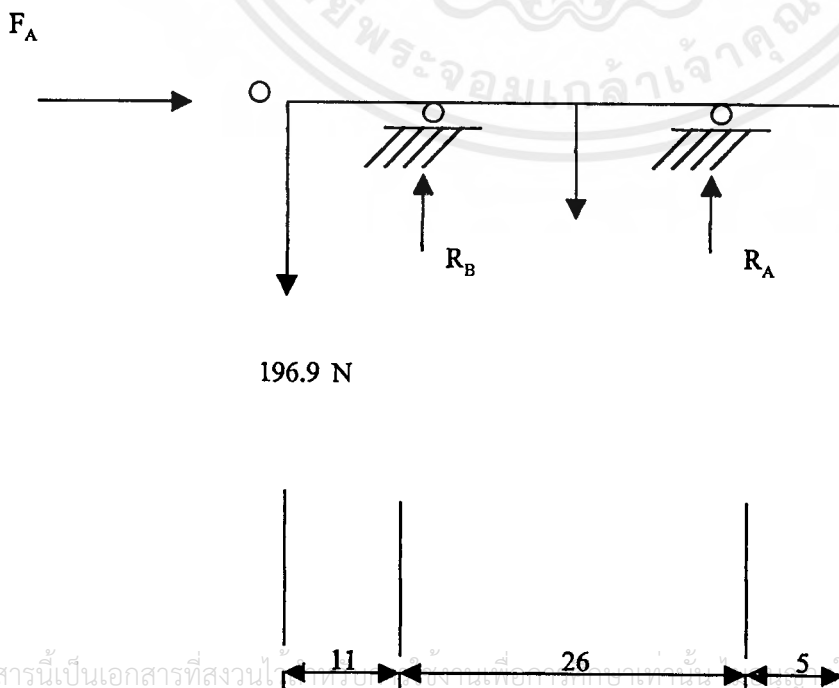
$$= 599.843 \text{ N/m}^2$$

$$(599.843 \times 10^6) \text{ n} = \frac{(16\sqrt{(43.03)^2+1/4(3 \times 44.51)^2})/\pi(0.025)^3}{16}$$

$$\text{n} = 302.67 \times 10^{-6}$$

### 3.5 การคำนวณหาขนาดแบริ่ง

#### 3.5.1 แบริ่งที่ใช้กับเพลาทั้งหันลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ใช้น้ำหนักเพลลา} &= 14.715 \text{ N} \\
 \text{น้ำหนักใบพัด} &= 196.2 \text{ N} \\
 \text{อายุประมาณของแบริ่ง} &= 8760 \text{ hr} \\
 \text{จำนวนรอบที่หมุน} &= 459 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum MA &= 0 \\
 R_B &= (196.2 \times 370) + (14.715 \times 130) \\
 &= 286.565 \text{ N} \\
 \sum F &= 286.565 - 196.2 - 14.751 \\
 R_A &= 75.65 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\text{แรงในแบริ่งที่กระทำกับแบริ่งที่ A} = 75.65 \text{ N} = 17.038 \text{ lb}$$

$$\text{แรงในแบริ่งที่กระทำกับแบริ่งที่ B} = 286.565 \text{ N} = 64.542 \text{ lb}$$

หาแรงในแนวแกนที่กระทำกับแบริ่งที่ A และ B

แรงที่กระทำต่อกังหันลม

$$\begin{aligned}
 F_A &= \frac{1}{2} C_A \rho_A V \alpha^2 \\
 \text{ให้ } C_A &= 1, \quad V = 12 \text{ m/s} \\
 F_A &= \frac{1}{2} \times 1 \times 1.17 \times (0.5)^2 \times \pi \times (12)^2 \\
 &= 66.128 \text{ N} \\
 &= 14.893 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

$$\text{หาแรงในแนวแกนที่กระทำกับแบริ่งที่ A และ B} = 14.893 \text{ lb}$$

ที่จุด B ใช้ทแเปอร์โลเลอร์แบริ่ง No.30210 ,มีค่า  $C_N = 14300 \text{ lb}, C_O = 11600 \text{ lb}, e = 0.44,$   
 $y_o = 0.8$

หาค่าโหลดจลย์เทียบเท่า

$$P_N = xFr + yFa$$

หาค่าโหลดศักย์เทียบเท่า

$$P_o = 0.6Fr + 0.5Fa$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_r/F_r = 14.893/64.542 = 0.23 > c$$

ดังนั้น  $x = 0.23, y = 1$

$$P_N = (0.23 \times 64.542) + (1 \times 14.893)$$

$$= 29.738 \text{ lb}$$

$$P_O = (0.23 \times 64.542) + (0.5 \times 14.893)$$

$$= 22.291 \text{ lb}$$

เลือกใช้ค่า  $P = 29.738 \text{ lb}$

หาความสามารถในการรับโหลดจลน์

$$L_{10} = (10^6 \times 60n) \times (C_N / P)^b$$

สำหรับโรลเบริง

$$b = 10/3$$

$$8760 = ((10^6) / (60 \times 459)) \times (C_N / 29.738)^{10/3}$$

$$C_N = 154.88 \text{ lb}$$

แต่ความสามารถในการรับโหลดจลน์ของเบริงที่ใช้ เท่ากับ 14300 lb

หาค่าความปลอดภัย

$$n = 14300 / 154.88$$

$$= 92.32$$

ที่จุด B ใช้ทแยงโรลเลอร์เบริง No.6210, มีค่า  $C_N = 6100 \text{ lb}, C_O = 4400 \text{ lb}$

หาค่าโหลดจลย์เท่า

$$P_N = xF_r + yF_a$$

หาค่าโหลดศกย์เท่า

$$P_O = 0.6F_r + 0.5F_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} F_s/C_o &= 14.893/4400 \\ &= 0.03 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 2.8 ภาคผนวก ข. อ่านค่า  $c$  ได้เท่ากับ 0.24

$$\begin{aligned} F_s/F_r &= 14.893/17.038 \\ &= 0.87 > c \end{aligned}$$

จากตารางที่ 2.8 ภาคผนวก ข. อ่านค่า  $x = 0.87, y = 1.8$

$$\begin{aligned} P_N &= (0.8 \times 17.038) + (1 \times 14.893) \\ &= 28.523 \text{ lb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_o &= (0.9 \times 17.038) + (0.8 \times 14.893) \\ &= 27.249 \text{ lb} \end{aligned}$$

เลือกใช้ค่า

$$P = 28.523 \text{ lb}$$

หาความสามารถในการรับโหลดจลน์

$$L_{10} = (10^6 \times 60n) \times (C_N/P)^b$$

สำหรับโรลแบร์ริง

$$b = 10/3$$

$$8760 = ((10^6)/(60 \times 459)) \times (C_N/28.523)^{10/3}$$

$$C_N = 147.888 \text{ lb}$$

แต่ความสามารถในการรับโหลดจลน์ของแบร์ริงที่ใช้ เท่ากับ 14300 lb

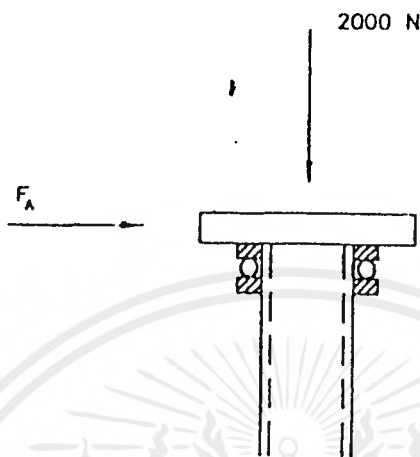
หาค่าความปลอดภัย

$$n = 14300/147.888$$

$$= 96.69$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 แบร้งที่ใช้กับเพลลาของแท่นหมุน



ใช้เพลลาที่เป็นเพลลาถวง มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 76.2 มม. และ เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 50.2 มม. น้ำหนักที่กดลงบนแท่นหมุน เท่ากับ 2000 นิวตัน จากรูปให้แบร้ง A รับแรงในแนวแกนทั้งหมด และ แบร้ง B รับแรงในแนวรัศมีทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{แบร้ง A รับแรงในแนวแกน} &= 2000 \text{ N} \\ &= 8880 \text{ lb} \end{aligned}$$

หาแรงในแนวรัศมี

แรงที่กระทำต่อกึ่งหันลม เท่ากับ 14.893

ที่จุด A เลือกใช้ ทรัสต์บอลล์แบร้ง No.51218 ค่า  $C_N = 20000 \text{ lb}$ ,  $C_o = 60000 \text{ lb}$

หาค่าโหลดจลน์เทียบเท่า

$$P_N = F_s = 8880 \text{ lb}$$

หาค่าความสามารถในการรับโหลดจลน์

$$L_{10} = (C_N/P)^p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้  $L_{10} = 100$  revolution

สำหรับบอลล์เบริงค่า  $b = 3$

$$100 = (C_N/8880)^3$$

$$C_N = 41217.30 \text{ lb}$$

แต่ความสามารถในการรับโหลดโกลน์ของเบริงที่ใช้ เท่ากับ 20000 lb

$$\begin{aligned} \text{หาค่าความปลอดภัย } n &= 20000/41217.30 \\ &= 0.485 \end{aligned}$$

ที่จุด B เลือกใช้ ทรัสต์บอลล์เบริง No.6018 ค่า  $C_N = 10000$  lb,  $C_o = 86000$  lb

หาค่าโหลดจลน์เทียบเท่า

$$P = F_r = 14.893 \text{ lb}$$

หาค่าความสามารถในการรับโหลดจลน์

$$L_{10} = (C_N/P)$$

ให้  $L_{10} = 100$  revolution

สำหรับบอลล์เบริงค่า  $b = 3$

$$100 = (C_N/14.893)^3$$

$$C_N = 69.127 \text{ lb}$$

แต่ความสามารถในการรับโหลดโกลน์ของเบริงที่ใช้ เท่ากับ 20000 lb

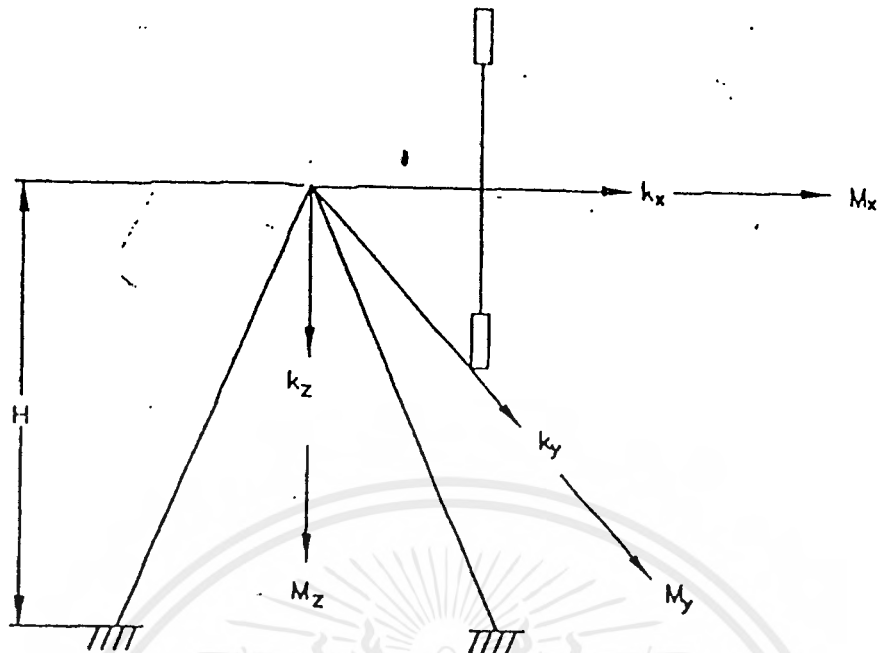
$$\begin{aligned} \text{หาค่าความปลอดภัย } n &= 20000/69.127 \\ &= 209.321 \end{aligned}$$

### 3.6 การออกแบบหอคอย

#### 3.6.1 Loading on Rotor

#### 3.6.2 Normal condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Drag

$$\begin{aligned}
 k_x &= 4/9 \rho v_{\infty}^2 \pi R^2 \\
 &= 4/9 \times 1.17 \times (5)^2 \times \pi \times (0.5)^2 \\
 &= 10.210 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Gyroforce

$$\begin{aligned}
 k_x &= -c w^2 m \quad (\text{ถ้า } w = 0.5 \text{ rad/sec}) \\
 K_x &= -1 \times (0.5)^2 \times 200 \\
 &= -50 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Unbalance Load

$$\begin{aligned}
 k_y &= m e_r \Omega^2 \\
 \Omega &= (v_{\infty} \lambda) / R \\
 K_y &= (200 \times 0.05) \times ((5 \times 6) / 0.5)^2 \\
 &= 36000 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Frequency

$$\begin{aligned}
 f &= \Omega / 2\pi \\
 &= ((5 \times 6) / 0.5) / 2\pi \\
 &= 9.549 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Wind Shift

$$k_y = 4/9 \times \rho \times v_{\infty}^2 \times \pi \times R^2 \sin \delta \cos \delta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 4/9 \times 1.17 \times 5^2 \times \pi \times 0.5^2 \times \sin 30 \times \cos 30$$

$$= 4.421 \text{ N}$$

Gravity

$$= mg$$

$$= 200 \times 9.18$$

$$= 1962 \text{ N}$$

Unbalance Load

$$k_z = k_y = 4000 \text{ N}$$

Torque

$$M_x = (8/27) \times ((\rho V \omega^2 \pi R^3) / \lambda)$$

$$= (8/27) \times ((1.17 \times 5^2 \times \pi \times 0.5^3) / 6)$$

$$= 0.567 \text{ N-m}$$

Non-Uniform wind Velocity

$$M_y = (4/27) (\rho / \beta) \pi R^3 (V_1^2 - V_2^2)$$

LET  $V_1 = 5 \text{ m/s}$ ,  $V_2 = 4 \text{ m/s}$

$$M_y = (4/27) \times (1.17/2) \times \pi \times 0.5^3 (5^2 - 4^2)$$

$$= 0.306 \text{ N-m}$$

Frequency

$$f = \beta \Omega / 2\pi$$

$$= (2 \times (5 \times 6) / 0.5) / 2\pi$$

$$= 19.098 \text{ Hz}$$

Yawing

$$M_z = (4/9) \rho V \omega^2 \pi R^2 e \sin \delta \cos \delta$$

$$= (4/9) \times 1.17 \times 5^2 \times \pi \times 0.5^2 \times 1 \times \sin 30 \times \cos 30$$

$$= 4.42 \text{ N-m}$$

Eccentricity

$$M_y = mge$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 200 \times 9.81 \times 1$$

$$= 1962 \text{ N-m}$$

### 3.6.1.2 Storm Condition

$$\text{Drag } k_x = C_t \times (1/2 \rho V_{\infty \text{ storm}}^2) \times A_{R \text{ proj}} \times Y_1$$

$$L_{ct} \quad C_t = 1.6, V_{\infty \text{ storm}} = 12 \text{ m/s}$$

$$Y_1 = 1, A_{R \text{ proj}} = 0.4 \pi R^2$$

$$K_x = 1.6 \times (1/2 \times 1.17 \times (12^2)) \times 0.4 \times \pi \times 0.5^2 \times 1$$

$$= 42.343 \text{ N}$$

$$K_z = mg_x$$

$$= 200 \times 9.81$$

$$= 1962 \text{ N}$$

$$M_x = C_Q(0) (1/2 \rho V_{\infty \text{ storm}}^2) \pi R^3$$

$$\text{Bct } C_Q(0) = 0.6/\lambda^2$$

$$M_x = (0.6^2/6^2) (1/2 \times 1.17 \times 12^2) \pi \times 1.5^3$$

$$M_z = C_t \times (1/2 \rho V_{\infty \text{ storm}}^2) \times A_{R \text{ proj}} \times e \times \sin \delta \times \cos \delta$$

$$= 1.6 \times (1/2 \times 1.17 \times (12^2)) \times 0.4 \times \pi \times 0.5^2 \times \sin 30^\circ \times \cos 30^\circ$$

$$= 18.335 \text{ N-m}$$

### 3.6.2 Wind Load on Tower

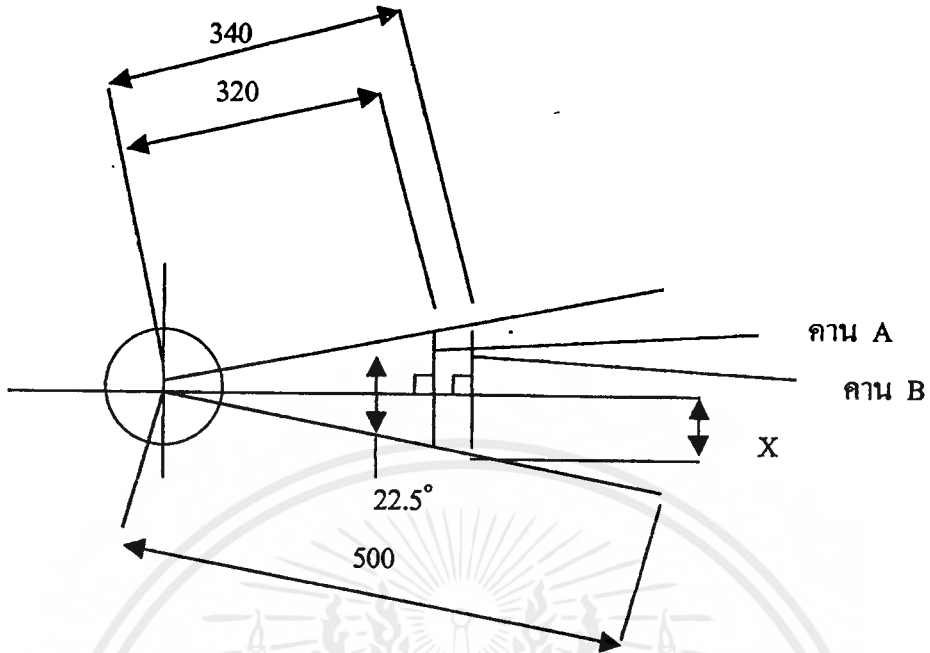
$$F_w = C_t \times (1/2 \rho V_{\infty \text{ storm}}^2) \times A_{R \text{ proj}} \times Y_1$$

$$A_T = 2 \text{ m}^2$$

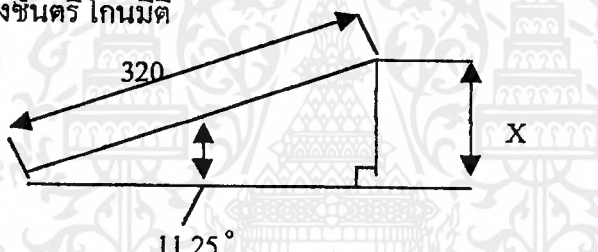
$$F_w = 1.6 \times (1/2 \times 1.17 \times (12^2)) \times 2 \times 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 269.57 N ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การคำนวณหาระยะกานในกึ่งหัน



หาค่ากาน A ใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

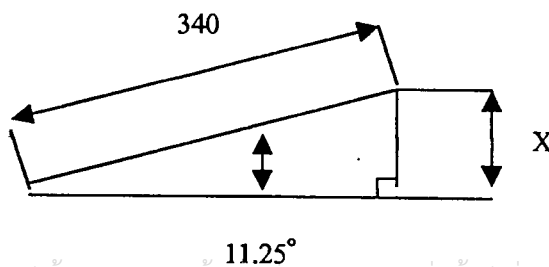


$$\begin{aligned} \sin 11.25 &= X/320 \\ X &= \sin 11.25 \times 320 \\ X &= 62.429 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

ฉะนั้นความยาวกานทั้งหมด

$$\begin{aligned} &= 62.429 \times 2 \\ &= 124.858 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

หาค่า B ใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติ



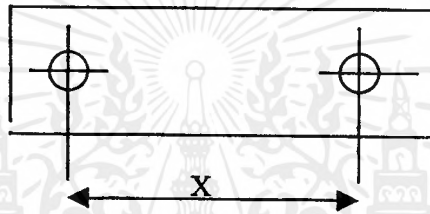
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\sin 11.25 &= x/340 \\ X &= \sin 11.25/340 \\ &= 66.331 \text{ m.m.}\end{aligned}$$

ฉะนั้นความยาวคานทั้งหมด

$$\begin{aligned}&= 66.331 \times 2 \\ &= 132.661 \text{ m.m.}\end{aligned}$$

คานกึ่งหันยึดก้านใบที่ต้องเจาะรู



	A	B
X	124.858	132.661

### 3.8 การคำนวณหาขนาดสายพาน

$$\begin{aligned}\text{กำลังงานที่ส่งผ่าน } (W_p) \text{ 2500 W} &= 2.5 \text{ kw} \\ \text{ผลต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อสายพาน 300-60} &= 240 \text{ m.m} \\ \text{ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้งสัมผัส } (N_s) &= 0.99 \\ \text{ตัวประกอบใช้งาน } (N_f) &= 1.2\end{aligned}$$

หากำลังงาน

$$\begin{aligned}P &= W_p \times N_f \times 1/N_s \\ &= 2.5(1.2)(1/0.99) \\ &= 3.03 \text{ kw}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้สายพานสามชั้นกำลังส่งได้

$$P_o = 5.31/25\text{m.m.}$$

หาความกว้างของสายพาน

$$\begin{aligned} b &= 25P/P_o \\ &= (25(3.03))/5.31 \\ &= 14.27 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

เลือกใช้สายพานกว้าง 10 มิลลิเมตร (ภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.13)

### 3.8.1 การหามุมสัมผัส

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \pi - 2\sin^{-1}(300-60/2(500)) \\ &= 2.65 \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \pi + 2\sin^{-1}(300-60/2(500)) \\ &= 3.63 \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= (0.3-0.06)^2/2 + (0.5(0.5)^2 + 1/2(0.3(2.65) + \\ &0.06(3.63)) \\ &= 0.6935 \end{aligned}$$

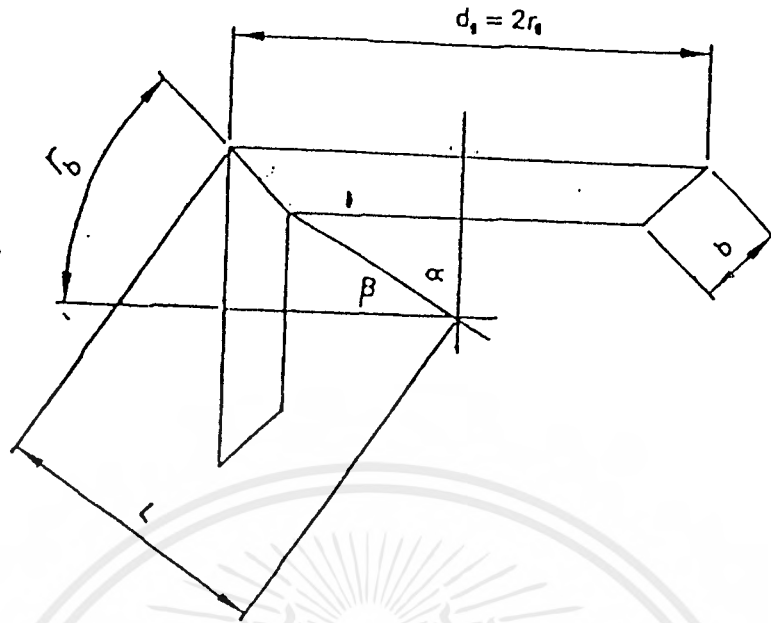
ดังนั้นใช้สายพาน

ยาว	=	0.6935 m
หนา	=	3 ชั้น
กว้าง	=	10 m.m.

### 3.9 การคำนวณหาพลังงานที่ได้จากเฟืองคอกจอก

แกนหมุนของกังหัน	60	รอบต่อนาที
จำนวนฟันจับ	20	ฟัน
จำนวนฟันตาม	20	ฟัน
โมดูล	4	
ความกว้างฟันเฟือง	25	m.m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วัสดุเฟืองเป็นเหล็กผสม SAL 3145 มีค่า  $\sigma$  เท่ากับ 365 N/m.m. (จากตารางที่ 2.4)  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์

$$2 r_p = d_p = N_p m = 20(4) = 80 \text{ m.m.}$$

$$2 r_g = d_g = N_g m = 20(4) = 80 \text{ m.m.}$$

$$\begin{aligned} L &= (r_p^2 + r_g^2)^{1/2} \\ &= (40^2 + 40^2)^{1/2} \\ &= 56.569 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{cp} &= d_p L / m r_g \\ &= 80(56.569) / 4(40) \\ &= 28.19 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{cg} &= d_g L / m r_p \\ &= 80(56.569) / 4(16) \\ &= 70.711 \end{aligned}$$

แรงกระทำที่ปลายฟัน

$$Y = 0.393 \text{ (ภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.12)}$$

$$\begin{aligned} F_b &= (\sigma b Y_m / K_p) \times (1 - (b/L)) \\ &= (365(25)(0.393)(4) / 1.4) \times (1 - \\ &= (25/56.569) \end{aligned}$$

$$= 5368.754 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วพิศซ์ของพินเนียน

$$\begin{aligned} V &= \pi d_p n \\ &= \pi(80/1000)(60/60) \\ &= 0.25 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ตัวประกอบความเร็ว

$$\begin{aligned} K_v &= 3+V/3 \\ &= 3+0.25/3 \\ &= 3.083 \end{aligned}$$

แรงพลวัต

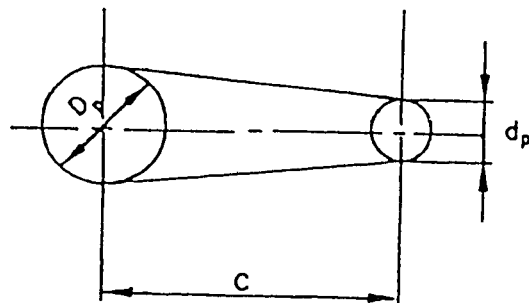
แต่

ดังนั้น

กำลังที่ส่งได้

$$\begin{aligned} F_d &= K_v F_t \\ &= 1.56 F_t \\ F_b &= N_s F_d \\ 5368.754 &= (1.2)(1.56 F_t) \\ F_t &= 2867.924 \text{ N} \\ W_p &= F_t V \\ &= 2867.924(0.25) \\ &= 716.981 \text{ W} \end{aligned}$$

### 3.10 การหาระยะระหว่างเพลลาของกึ่งหันลมและเพลลาทดที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 การหาระยะ  $c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคู่มือแนะนำของบริษัทผู้ผลิตสายพานโดยทั่ว ๆ ไป

$$\begin{aligned} C_{\max} &= 2(dp+Dp) \\ &= 2(60+300) \\ &= 720 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\min} &= 0.7(dp+Dp) \\ &= 0.7(60+300) \\ &= 252 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

เพื่อให้ชุดส่งกำลังมีขนาดกะทัดรัดเท่าที่จะทำได้ การเลือกค่า C จึงเลือกให้ใกล้กับค่าที่มีค่าน้อยไว้ก่อน เลือกค่า C คือ 400 ความยาว Pitch ของสายพานโดยประมาณมีค่าคือ 2

$$\begin{aligned} L_p &= 2C+1.57(Dp+dp)+(Dp+dp)^2/4C \\ &= 2(400)+1.57(300-60)+(300-60)^2/4(400) \\ &= 36.736 \text{ m.m.} \end{aligned}$$

### 3.11 การคำนวณหาขนาดของสายพานที่นำมาใช้

$$\text{จาก } z = (W_p N_s) / (P_r H_s N_1)$$

โดยที่ Z = จำนวนเส้นของสายพานลิ้ม

$W_p$  = กำลังงานที่ต้องการส่ง

$N_s$  = ตัวประกอบใช้งาน

$N_2$  = ตัวประกอบแก้ไขส่วน โค้งสัมผัส

$N_1$  = ตัวประกอบแก้ไขความยาวสายพาน (Belt length correction factors)

$P_R$  = กำลังที่สายพานลิ้มหนึ่งเส้นส่งได้

หา  $N_s$  จากค่า

$$(Dp - dp)/c = (300-60)/400$$

$$= 0.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้ } N \approx 0.6$$

หา  $N_a$  เลือกลักษณะงานปานกลาง มีชั่วโมงการทำงานมากกว่า 16 ชั่วโมง/วันจากตารางที่ 2.12  
จะได้

$$N_s = 1.4$$

หา  $N_1$  ได้จากตารางที่ 2.12 มีความยาวสายพานประมาณ 900 มิลลิเมตรจะได้

$$N_1 = 0.81$$

### 3.12 การคำนวณหาลิมิตแบน

#### 3.12.1 ลิมิตแบน

วัสดุลิม AISI C 1020 CD (จากตารางภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.7)

$$\begin{aligned} \sigma_y &= 66 \text{ ksi} \\ &= 66 \times 6.895 \\ &= 455.07 \text{ N/m.m.}^2 \end{aligned}$$

วัสดุเพลลา AISI C 1020 CD (จากตารางภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.7)

$$\begin{aligned} \sigma_y &= 90 \text{ ksi} \\ &= 66 \times 6.895 \\ &= 620.5 \text{ N/m.m.}^2 \end{aligned}$$

สำหรับกรกระตุกเล็กน้อยเลือกใช้  
ดังนั้น

$$N_y = 2.5$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cd} &= 455.07 \\ &= 182.03 \text{ N/m.m.}^2 \end{aligned}$$

จากภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.16 เพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 m.m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ลิ้ม ISO 3912 - 6×9

$$\begin{aligned}
 \text{สมการ} \quad L_c &= (4T)/dh\sigma_{cd} \\
 &= (4 \times 44.151 \times 1000)/(20 \times 9 \times 18.03) \\
 &= 5.144 \text{ m.m.}
 \end{aligned}$$

ตรวจสอบความเค้นเฉือนบนลิ้ม

$$\begin{aligned}
 \text{สมการ} \quad T &= (2T)/(bld) \\
 &= (2 \times 44.151 \times 1000)/(9 \times 5.144 \times 20) \\
 &= 90.91 \text{ m.m.}^2
 \end{aligned}$$

ค่าความเค้นเฉือนที่ใช้งาน

$$\begin{aligned}
 T_d &= 0.6\sigma_{cd} \\
 &= 0.6 \times 182.03 \\
 &= 109.82 \text{ N/m.m.}^2
 \end{aligned}$$

ฉะนั้นที่เลือกใช้จึงใช้งานได้ตามต้องการ

### 3.12.2 ลิ้มวงเดือน

ลิ้มวงเดือน ISO 3912 - 8×11×28

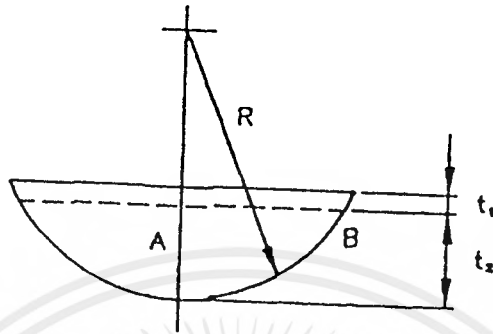
ลิ้มทำจากวัสดุ AISI C 1020 CD (จากภาคผนวก ข. ตารางที่ 2.7)

ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3

$$\begin{aligned}
 \text{AISI C 1020 CD} \quad \sigma_y &= 66 \text{ ksi} \\
 &= 66 \times 6.895 \\
 &= 455.07 \text{ N/m.m.}^2 \\
 &= 0.6 \times \sigma_y \\
 &= 273.042 \text{ N/m.m.}^2 \\
 \text{ความเค้นอัดใช้งาน} \quad \sigma_{cd} &= (455.070)/3 \\
 &= 151.69 \text{ N/m.m.}^2
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ความเค้นอัดใช้งาน} \quad T_d &= 0.6 \times \sigma_{cd} \\
 &= 91.014 \text{ N/m.m.}^2
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 B &= 8 \text{ m.m.}, h_1 = 11 \text{ m.m.}, R = 28 \text{ m.m.} \\
 t_1 &= 8 \text{ m.m.}, t_2 = 3.3 \text{ m.m.}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 3.11 ภาคตัดขวางของกิม

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาว} \quad AB &= (R^2 - (R - t_1)^2)^{1/2} \\
 &= (28^2 - (28 - 8)^2)^{1/2} \\
 \text{ฉะนั้นพื้นที่รับแรงเฉือน} &= 2 \times 19.6 \times 8 \\
 &= 313.6 \text{ m.m.}^2
 \end{aligned}$$

พื้นที่รับแรงอัดระหว่างกิมกับคุมมีค่าประมาณ

$$\begin{aligned}
 &= 2 \times 19.6 \times t_2 \\
 &= 2 \times 19.6 \times 3.3 \\
 &= 129.4 \text{ m.m.}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{สำหรับการเฉือน} \quad T &= (T_d Ad)/2 \\
 &= (91.041 \times 313.6 \times 40) / (2 \times 1000) \\
 &= 570.84 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{สำหรับการเฉือน} \quad T &= (\sigma_{cd} Ad)/2 \\
 &= (151.69 \times 313.6 \times 40) / (2 \times 1000) \\
 &= 951.4 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

ฉะนั้นเพลาคควรจะรับ โมเมนต์บิด 570.84 Nm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและประเมินผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง ในการทำงานของกังหันลมแกนนอนขณะทำงานในความเร็วลมต่าง ๆ กัน ซึ่งการหมุนนั้นสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของ Dinamo และขนาดความจุของแบตเตอรี่ อุปกรณ์ในการตรวจสอบ ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

#### 4.1 การวัดจำนวนรอบ

การวัดจำนวนรอบของกังหันลม จะใช้วงจรวัดรอบโดยจะใช้ตัว Sensor เป็นแบบใช้แสง โดยจะตรวจจับกับแผ่นจานรูปทรงกลม ซึ่งเจาะรูไว้ 10 รู ต่อบรอบและจะแสดงผลออกมาเป็นรอบต่อนาที ซึ่งใช้ในการตรวจสอบการทำงานของกังหันลม

#### 4.2 ขั้นตอนการตรวจเช็คก่อนการทดลอง

1. ตรวจสอบความพร้อมของกังหันลม และอุปกรณ์ทดลองให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
2. ตรวจสอบความพร้อมของเครื่องมือวัดต่าง ๆ
3. ทดสอบการหมุนของกังหัน และสังเกตความพร้อม
4. ตรวจสอบจุดที่มีการหล่อลื่นต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพที่พร้อม

#### 4.3 การทดลองเพื่อหาค่าของกระแสไฟฟ้า

1. ยึดก้านใบกังหัน ไม่ให้หมุนตามแรงเหวี่ยงของมอเตอร์
2. ตรวจสอบสายพานที่ต่อกับ Pulley ให้มีความตึงพอดี
3. สับ Switch มอเตอร์ ให้ไปจับ Dinamo
4. ตรวจสอบวัดค่าแรงดันและกระแส
5. เปลี่ยนระดับความเร็วของมอเตอร์ เพื่อตรวจวัดระดับแรงไฟหลาย ๆ ระดับ

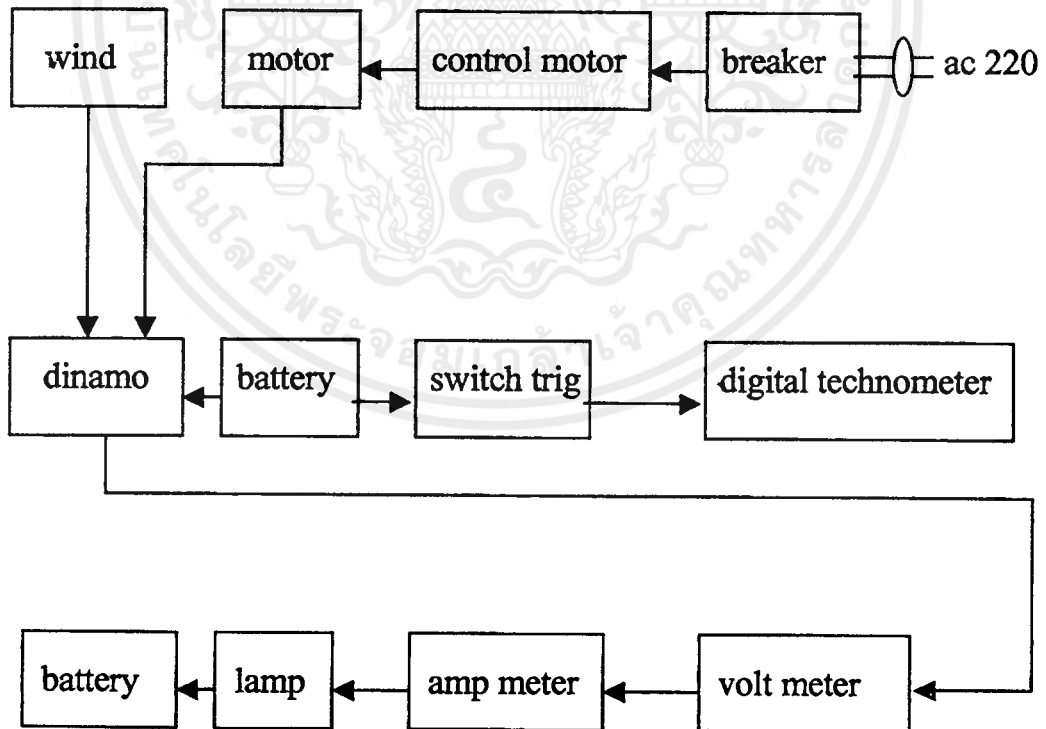
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลอง

สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ

1. ทดลองด้วยพลังลมจริง โดยในทางปฏิบัติจริงแล้ว ควรจะใช้อุโมงค์ลมในการทดสอบ แต่ว่าเนื่องราคาที่ย่อมแพงสูงมาก จึงไม่สามารถทำได้ โดยในการทดสอบกึ่งหั่นลมตัวนี้ จึงนำไปทดสอบที่คาบฟ้าตึกเรียน ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตนนทบุรี ซึ่งจะสามารถวัดได้ในความเร็วกึ่งหั่นลมที่ต่ำ เพราะว่า กึ่งหั่นลมชนิดนี้ต้องการพลังงานลมที่ย่อมแพงสูง และประกอบกับใช้ Dinamo รถยนต์ ซึ่งมีความหนักสูง จึงเป็นตัวค้ำกึ่งหั่นลมให้ต้องใช้แรงลมมากกว่าปกติ และช่วงเวลาในการทดสอบ จะใช้ช่วง 16.00 – 19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีลมแรงกว่าช่วงอื่น

2. ทดลองด้วยพลังงานกล ทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนเพลาส่งกำลัง และใช้แกนเพลาส่งกำลังให้Dinamoช่วยสายพานต่ออีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะสามารถลดหรือเพิ่มความเร็วรอบของ Dinamo ได้ด้วย การลดความเร็วมอเตอร์



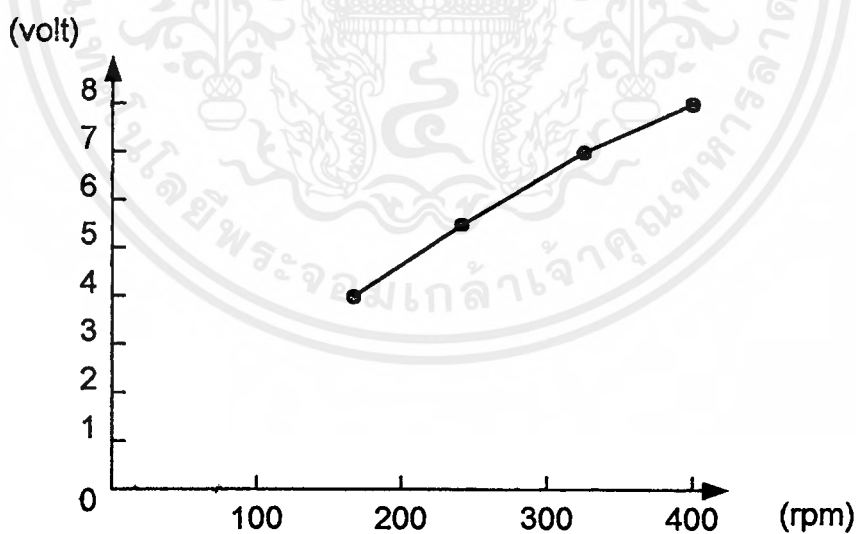
รูปที่ 4.1 บล็อกไออะแกรมการทดลองโดยใช้มอเตอร์และใช้ถมธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้มอเตอร์ป้อน โดยค่าที่วัดออกมาเป็นกระแส และ แรงดันสูงสุด

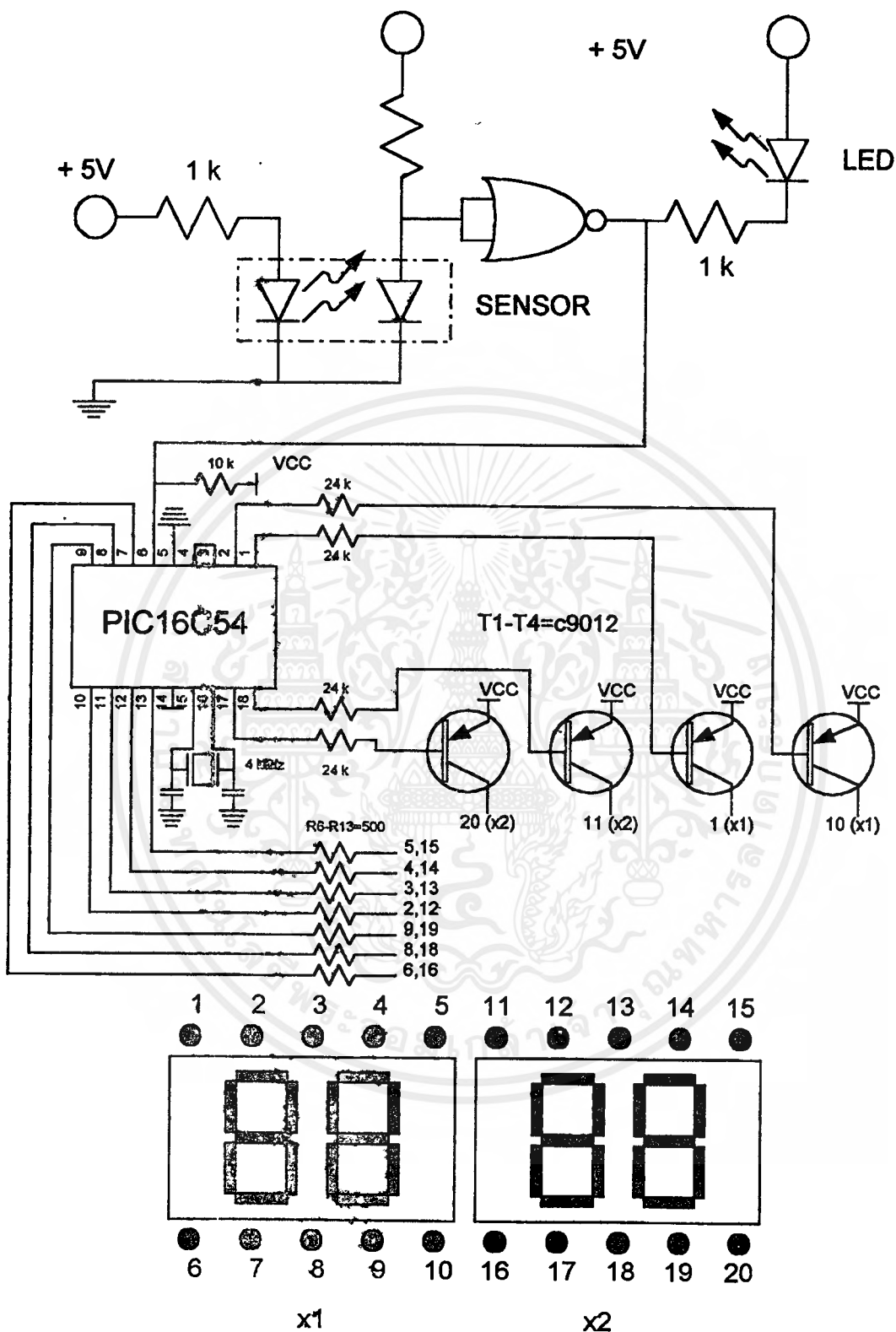
จำนวนรอบใบพัด (rpm)	จำนวนรอบDinamo (rpm)	กระแสไฟฟ้า (Amp)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)
165	371	10	4
235	528	11.2	5.5
326	733	12	7
392	882	16	8



ตาราง 4.1 ตารางผลการทดลอง

#### รูปที่ 4.2 แผนภูมิในการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LTD 4601G

รูปที่ 4.3 วงจรของเครื่องนับรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การทำงานของวงจรรับรอบ

ส่วนที่เป็นหัวใจของเครื่อง คือ IC 1 ไมโครโพรเซสเซอร์เบอร์ PIC16C54 การทำงานของ IC นี้ คือ จะนับค่าจาก Input แล้วนำมาเปรียบเทียบกับฐานเวลา 4MHz ทุก ๆ 1 วินาที นับได้เท่าใด จะแสดงผล 6 เท่า ต่อนาที RPM และหลักหน่วยไม่แสดงผล เช่น ถ้าวัดที่ความถี่ 50 Hz จะแสดงผล 300 RPM ซึ่งก็คือ 3000รอบต่อนาที เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการให้แสดงผลหลักหน่วยด้วย ใน 1 รอบที่กั้นหั่นหมุนจะต้องตรวจจับสัญญาณได้ 10 Pulse เครื่องก็จะแสดงผลตรงตามจำนวนรอบจริง



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ผลที่ได้จากการทดลองกังหันลมแกนนอน

1. กังหันลมแกนนอนสามารถหมุนได้ด้วยพลังงานลมโดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วยหมุนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตรงตามวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา
2. ในการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ที่ความเร็วรอบของ Dinamo 883 รอบต่อนาที ซึ่งจะทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ 8 โวลท์
3. มุมของใบกังหันลม ( $\beta$ ) มีผลต่อความเร็วของกังหัน ถ้ามุม  $\beta$  เท่ากับ 35 องศาจะทำให้ความเร็วในการหมุนของกังหันลมช้า แต่จะได้แรงบิดสูง และถ้ามุม  $\beta$  เท่ากับ 20 องศา จะทำให้กังหันลมหมุนเร็วขึ้น ความเร็วรอบที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

#### 5.2 ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

1. เนื่องจากใช้เวลาในการสร้างกังหันลมเป็นเวลานาน เวลาในการจัดเก็บข้อมูลน้อยจึงน้อยตามไปด้วยอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สมบูรณ์
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ จำพวกเครื่องมือวัดต่าง ๆ นั้นค่อนข้างหามาได้ยาก จึงทำให้เกิดการล่าช้าขึ้นโดยไม่จำเป็น
3. ในการทดลองจริงจะเกิดปัญหาจากความหนักของ Dinamo จึงทำให้การกำหนดขนาดของ Pulley ให้แน่นอนภายในครั้งแรกนั้นเป็นไปได้ยาก
4. ในการทำชุดใบกังหันในครั้งแรกนั้นเราสร้างโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากจนกินน้ำหนักจึงมากตามด้วย แล้วเมื่อนำมาทดสอบกับลมจริงจึงทำให้ใบกังหันหมุนได้ด้วยความหนักสูง

#### 5.3 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหา

1. ในเรื่องความหนักของ Dinamo นั้น เราทำการแก้ไขโดย เปลี่ยน Dinamo ที่มีการจ่ายกระแสต่ำลงจาก 60 A. เป็น 45 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในเรื่องน้ำหนักของกังหันลมนั้น เราทำการตัดแผ่นงานยี่ครูปวงแหวนออก ซึ่งตรงจุดที่ตัดออกนี้ จะมีผลกับความแข็งแรงในการยึดก้านใบน้อย เมื่อตัดออกแล้วกังหันลมจึงมีน้ำหนักเบาลงอีก

#### 5.4 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ควรมีการเปรียบเทียบกับจำนวนใบของกังหันและชนิดของใบของกังหันที่ต่าง ๆ กันเพื่อจะได้รู้ว่าชนิดใดให้ความเร็วสูงสุด ซึ่งแม้จะเสียเวลาในการทดสอบ และราคาที่สูง แต่ก็จะทำให้ได้กังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
2. กังหันลมชนิดนี้ควรเลือกติดตั้งในบริเวณที่เป็นที่โล่ง

## เอกสารอ้างอิง

1. วัลลภ พุทธรักษา , เอกชัย ตินรัตน์ภักดี และ อติเทพ อนันต์สวัสดิ์ “การออกแบบและการสร้างกั้นลมแบบไบอ่อนเพื่อใช้ในการสูบน้ำ” ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
2. ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากร และ รศ. ชาญ ถนัดงาน “การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1-2”  
กรุงเทพมหานคร : บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2534
3. บันเทิง สุวรรณตระกูล “ทฤษฎีการออกแบบกั้นลมเบื้องต้น”  
กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น, 2521
4. พงศ์ธร มนูญพัฒน์พงศ์ “การออกแบบและทดสอบกั้นลมไบอ่อนแกนคิงประสิทธิภาพสูง”  
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต



**ภาคผนวก ก.**

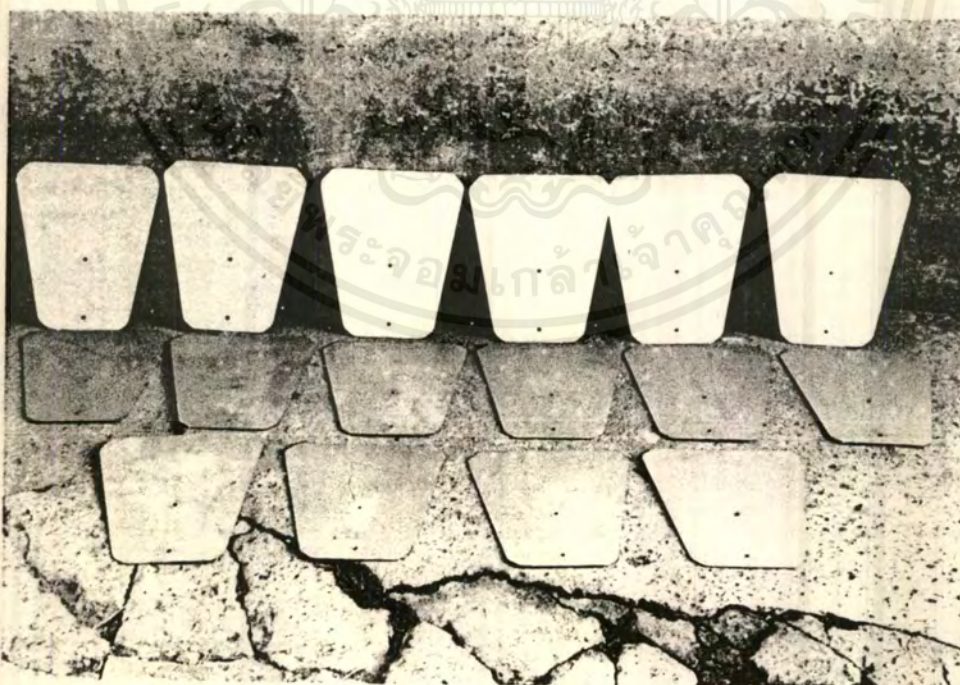
**รูปภาพประกอบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพการประกอบกันและชิ้นส่วนต่างๆ

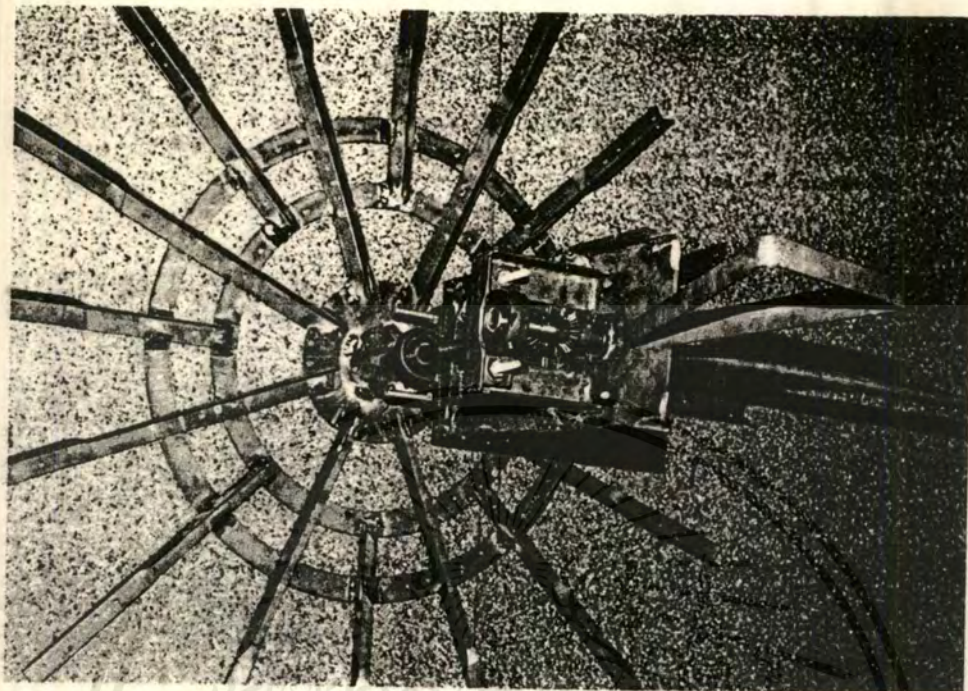


รูปที่ 1 ภาพโครงสร้างฐานของกังหัน

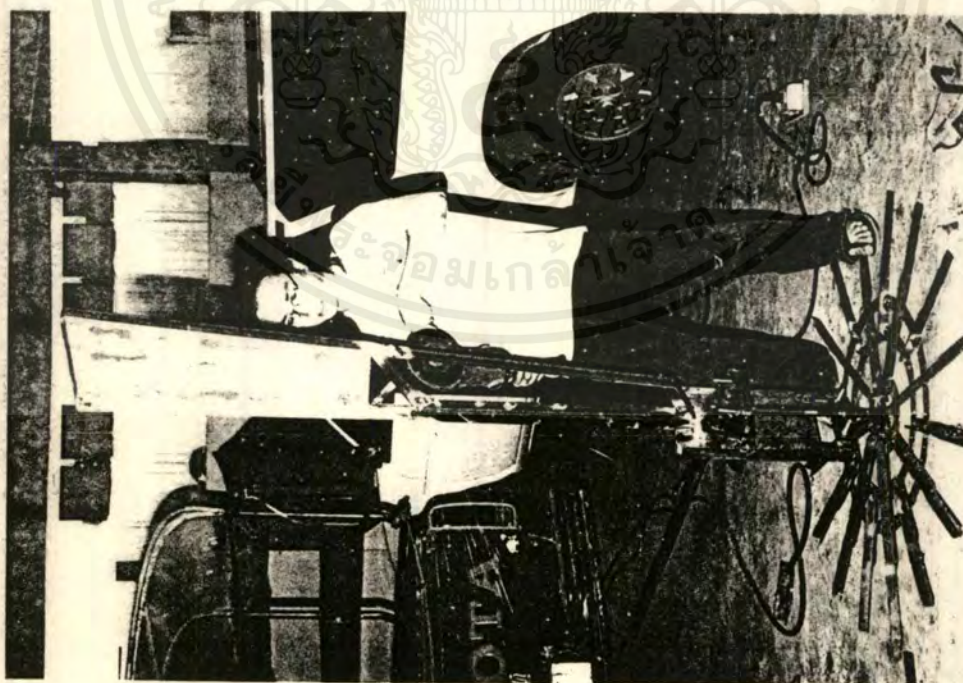


รูปที่ 2 ภาพใบทั้งหมดของกังหันจำนวน 16 ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

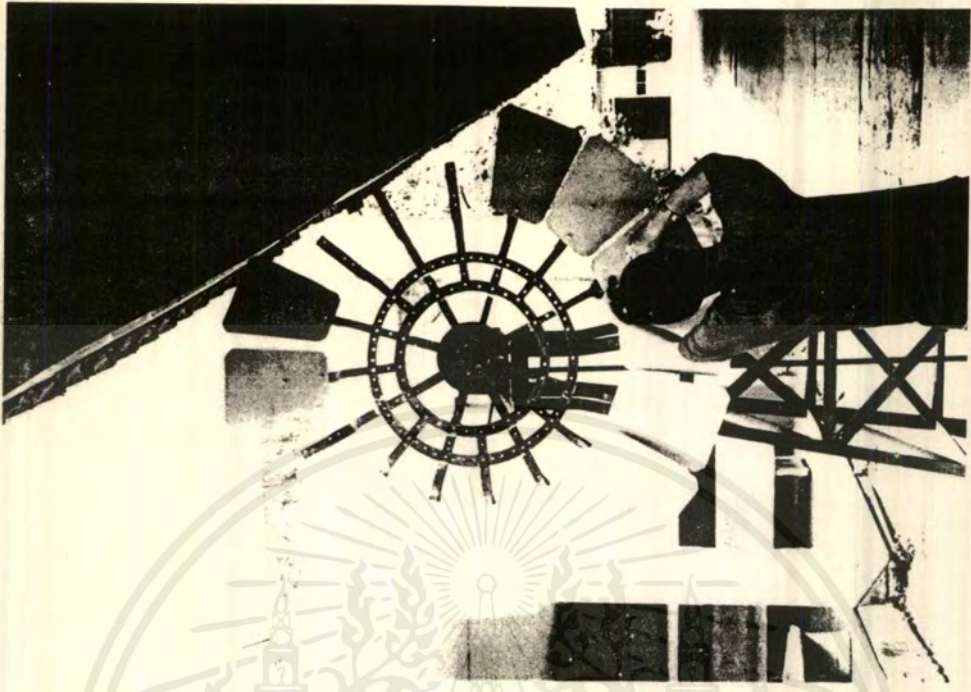


รูปที่ 3 ภาพชุดหัวส่งกำลังของกั๊กันและก้านใบของกั๊กันเมื่อประกอบเสร็จแล้ว



รูปที่ 4 ภาพการประกอบชุดหาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

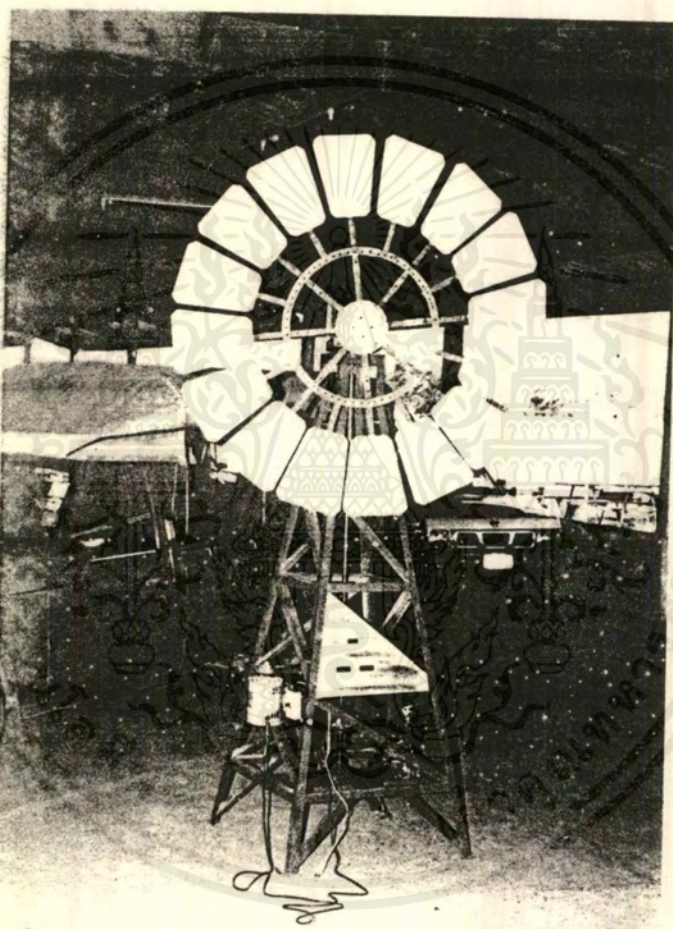


รูปที่ 5 ภาพการประกอบใบของกังหัน



รูปที่ 6 ภาพการประกอบชุดการผลิตไฟฟ้าบนแท่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ภาพกังหันลมหลังจากประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม (mechanical properties of plain carbon and alloy steels) (จีนทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm)

AISI Type	Condition	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongat. in 2 in., %	Reduction in Area, %	Hardness, BHN	Machinability (Based on 1112 = 100)
1010	HR	64	42	28	67	107	45
	CD	78	68	16	63	129	55
	CD A	64	48	28	65	131	55
1020	HR	65	43	36	59	143	50
	CD	78	66	20	55	156	65
	A	57	32	37	66	111	90
	N	64	50	36	68	131	75
1030	HR & turned	72	44	31	63	140	-
	CD	84	76	16	57	177	65
	A	67	50	31	58	126	-
	N	76	51	32	61	149	-
1040	HR	91	58	27	50	201	63
	CD	100	88	17	42	207	65
	A	75	51	30	57	149	-
	N	85	50	28	55	170	60
1045	HR	98	59	24	45	212	56
	CD	103	90	14	40	217	60
	A	90	55	27	54	174	60
	N	99	61	25	49	207	-
1050	HR	105	67	15	-	-	-
	CD	114	104	9	-	-	54
	A	92	43	24	40	187	-
	N	109	62	20	39	217	-
1095	HR	142	83	18	38	295	-
	A	95	38	13	21	192	-
	N	147	73	10	14	293	-
1118	HR	75	50	35	55	140	-
	CD	85	75	25	55	170	80
	A	65	41	35	67	131	80
	N	69	46	34	66	143	80
2330	CD	105	90	20	50	212	50
	A	86	61	28	58	179	50
	N	100	68	26	56	207	-
3140	CD	107	92	17	50	212	55
	A	100	61	25	61	197	55
	N	129	87	20	58	262	-
4130	HRA	86	56	29	57	183	65
	CD A	98	87	21	52	201	70
	N	97	63	26	60	197	50
4140	HRA	90	63	27	58	187	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 มิติมาตรฐานและแรงประเมินของโรลลิงแบริ่ง (Co, C เป็น KN)

ขนาด d mm	O.D. D mm	ประเภท 02										ประเภท 22			ประเภท 32		
		Self-aligning Ball Bearing		Single-Row Deep-Groove Ball Bearing		Angular Contact Ball Bearing		Angular Contact Steep Angle Ball Bearing		Cylindrical Roller Bearing		Spherical Roller Bearing		ความหนา mm		ความหนา mm	
		Co	C	Co	C	Co	C	Co	C	Co	C	Co	C	Co	C	Co	C
4	13	-	-	0.57	1.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	16	-	-	0.94	1.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	19	0.53	1.94	1.35	2.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	22	0.66	2.05	1.35	2.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	0.66	2.05	1.35	2.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	26	0.93	2.07	1.96	3.49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	30	1.34	4.23	1.96	3.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	32	1.48	4.20	3.05	5.25	3.27	5.52	-	-	-	-	-	-	-	14.3	3.56	5.52
15	35	2.01	5.74	3.51	5.87	4.09	6.54	-	-	-	-	-	-	-	15.9	5.56	8.10
17	40	2.43	6.10	4.45	7.34	5.25	8.19	-	-	-	-	-	-	-	15.9	6.36	9.03
20	47	3.18	7.61	6.18	9.83	7.25	11.00	-	-	-	-	-	-	-	17.5	8.19	11.30
25	52	4.03	9.34	6.94	10.77	8.72	12.55	7.70	11.39	7.21	13.26	-	-	-	20.6	11.30	15.17
30	62	5.43	12.06	10.00	14.97	12.55	17.34	11.08	15.80	9.88	17.67	-	-	-	20.6	12.73	16.46
35	72	6.68	12.19	13.66	19.76	17.09	22.96	15.08	20.87	15.35	26.25	-	-	-	23.6	18.33	22.87
40	80	8.59	14.82	15.66	27.43	21.27	27.41	18.64	24.74	20.74	34.13	23	43.92	65.52	27.0	24.92	30.57
45	85	9.61	16.82	17.84	25.19	24.21	30.79	21.23	27.72	22.29	35.91	23	50.28	63.19	30.2	28.61	34.17
50	90	10.55	17.49	19.80	27.01	26.03	35.31	22.74	28.79	23.90	37.56	23	53.40	65.41	30.2	32.37	38.36
55	100	13.40	20.60	25.05	33.38	32.97	39.96	28.79	35.64	29.86	45.84	25	66.75	81.43	33.3	36.18	41.03
60	110	15.53	23.14	30.94	40.36	40.72	48.50	35.55	43.16	37.65	56.07	28	83.21	99.23	36.5	45.83	50.73
65	120	17.22	23.85	34.13	44.03	44.93	52.51	41.83	48.95	45.39	66.30	31	99.68	116.60	38.1	56.51	61.41
70	125	18.78	26.65	37.42	48.06	49.40	57.40	45.84	53.40	45.39	74.76	31	105.91	121.00	39.7	62.50	66.75
75	130	21.40	29.86	41.16	50.73	56.51	62.30	48.95	54.73	56.96	81.00	31	111.70	125.50	41.3	68.33	72.53
80	140	23.54	30.35	44.50	56.07	62.74	69.86	54.73	61.85	60.96	87.22	33	129.00	143.70	44.4	81.45	85.00
85	150	28.43	37.82	53.40	64.08	72.53	78.76	62.74	68.97	70.75	99.68	36	169.50	164.40	48.2	86.77	87.66
90	160	31.77	43.79	60.52	73.87	85.44	92.56	74.31	82.32	91.67	127.27	40	179.80	193.80	52.4	98.34	100.60
95	170	36.85	48.95	69.42	83.66	91.67	100.00	77.87	87.66	101.46	139.73	43	221.10	235.80	55.6	127.30	127.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 มิติมาตรฐานและแรงประเมนของโรลลิงแบร์ริง (CO, C เป็น KN)

No	ขนาด 10		ขนาด 30		O.D. D mm	Type	ขนาด 30	ขนาด 30	ขนาด 30		
	O.D. D mm	Type	Single-row Deep-Groove Ball Bearing	Angular Contact Small-hole Ball Bearing						Cylindrical Roller Bearing	Spherical Roller Bearing
4											
5											
6	19	0.30	-	1.51							
7	22	0.30	-	2.51							
8	24	0.30	-	2.60							
9	26	0.30	1.96	3.51							
10	28	0.30	2.22	3.92							
12	32	0.30	2.51	4.29							
13	35	0.30	2.78	4.63							
17	42	0.60	4.45	7.21							
20	47	0.60	4.94	7.74			18	10.88	16.42		
23	55	1	6.90	10.19			19	14.06	20.51		
30	62	1	8.50	12.28	10.90		20	19.62	27.01		
35	68	1	9.30	12.90	12.37	13.53	21	24.07	32.31		
40	75	1	12.15	16.15	14.95	19.42	23	28.97	37.96		
45	80	1	13.08	16.78	14.73	19.62	23	31.86	40.27		
50	88	1	17.00	21.76	22.12	25.81	26	42.45	52.51		
55	95	1	18.29	22.85	23.36	26.43	26	45.28	55.62		
60	100	1	19.62	23.50	25.81	27.99	26	50.78	58.74		
65	110	1	24.39	29.28	31.04	34.18	30	61.75	75.65		
70	115	1	26.12	30.29	34.35	36.22	30	66.75	75.20		
75	125	1	31.28	36.67	42.01	44.28	34	82.77	92.56		
80	130	1	33.55	38.09	44.10	45.39	34	89.44	97.01		
85	140	1.50	39.11	44.50	52.51	54.29	37	103.68	113.03		
90	145	1.50	41.87	46.72	55.18	55.62	37	111.25	118.81		
95	150	1.50	41.87	46.72	57.85	56.96	37	119.76	124.15		
100											

\* สำหรับ spherical roller 30 องศา, ในตารางนี้ 20 mm  
 \* สำหรับ spherical roller 31 องศา, ในตารางนี้ 110 mm  
 † ในแถว a หมายความว่า 30° ใช้สำหรับในมุม small angle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 ขนาดลิ้มมาตรฐานที่ใช้กับเพลลา ขนาดต่าง ๆ

ขนาด เพลลา(d) mm	ลิ้มสี่เหลี่ยมผืนผ้า ลิ้มสี่เหลี่ยมจัตุรัส ISO/R 773 ISO/R 774 b×h	ลิ้มแบน ISO 2491 ISO 2492 b×h	ขนาดเด็คกีบ DIN 6881 b×h	ลิ้มวงเคียน ISO 3912		
				b×h <sub>1</sub> ×R	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
3-4				1.0×1.40×4	1.0	0.6
4-5				1.5×2.60×7	2.0	0.8
5-6				2.0×2.60×7	1.8	1.0
6-7	2×2			2.0×3.70×10	2.9	1.0
7-8	2×2			2.5×3.70×10	2.7	1.2
8-10	3×3			3.0×5.00×13	3.8	1.4
10-12	4×4			3.0×6.50×16	5.3	1.4
12-14	5×5	5×3		4.0×6.50×16	5.0	1.8
14-16	5×5	5×3		4.0×7.50×19	6.0	1.8
16-18	5×5	6×4		5.0×6.50×16	4.0	2.3
18-20	6×6	6×4		5.0×7.50×19	5.5	2.3
20-22	6×6	6×4		5.0×9.00×22	7.0	2.3
22-25	8×7	8×5	8×3.5	6.0×9.00×22	6.5	2.8
25-28	8×7	8×5	8×3.5	6.0×10.0×25	7.5	2.8
28-32	8×7	8×5	8×3.5	8.0×11.0×28	8.0	3.3
32-38	10×8	10×6	10×4.0	10.0×13.0×32	10.0	3.3
38-44	12×8	12×6	12×4.0			
44-50	14×9	14×6	14×4.5			
50-58	16×10	16×7	16×5.0			
58-65	18×11	18×7	18×5.0			
65-75	20×12	20×8	20×6.0			
78-85	22×14	22×9	22×7.0			
85-95	25×14	25×9	25×7.0			
95-110	28×16	28×10	28×7.5			
110-130	32×18	32×11	32×8.5			
130-150	36×20	36×12	36×9.0			
150-170	40×22	40×14				
170-200	45×25	45×16				
200-230	50×28	50×18				
230-260	56×32					
260-290	63×32					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อสายพานเบนตามมาตรฐาน ISO 99-1975 (E)

ขนาดระบุ		ขนาดในศึกัก			
mm	in	เล็กสุด mm	ใหญ่สุด mm	เล็กสุด in	ใหญ่สุด in
40	1.6	39.5	40.5	1.56	1.60
45	1.8	44.4	45.6	1.75	1.80
50	2	49.4	50.6	1.95	2.00
56	2.24	55.2	56.8	2.17	2.24
63	2.5	62.2	63.8	2.45	2.51
71	2.8	70	72	2.76	2.84
80	3.15	79	81	3.11	3.19
90	3.55	88.8	91.2	3.50	3.59
100	4	98.8	101.2	3.88	3.98
112	4.5	110.8	113.2	4.36	4.46
125	5	123.4	126.6	4.86	4.98
140	5.6	138.4	141.6	5.45	5.58
160	6.3	158	162	6.22	6.38
180	7.1	178	182	7.01	7.17
200	8	198	202	7.80	7.95
224	9	221.5	226.5	8.72	8.92
250	10	247.5	252.5	9.74	9.94
280	11.2	276.8	283.2	10.90	11.15
315	12.5	311.8	318.2	12.28	12.53
355	14	351.8	358.2	13.85	14.10
400	16	396	404	15.59	15.91
450	18	446	454	17.56	17.87
500	20	496	504	19.53	19.84
560	22.4	555	565	21.85	22.24
630	25	625	635	24.61	25.00
710	28	705	715	27.75	28.15
800	31.5	793.7	806.3	31.25	31.74
900	35.5	893.7	906.3	35.18	35.68
1000	40	993.7	1006.3	39.12	39.62
1120	45	1112	1128	43.78	44.41
1250	50	1242	1258	48.90	49.53
1400	56	1392	1408	54.80	55.43
1600	63	1590	1610	62.60	63.39
1800	71	1790	1810	70.48	71.26
2000	80	1990	2010	78.35	79.13

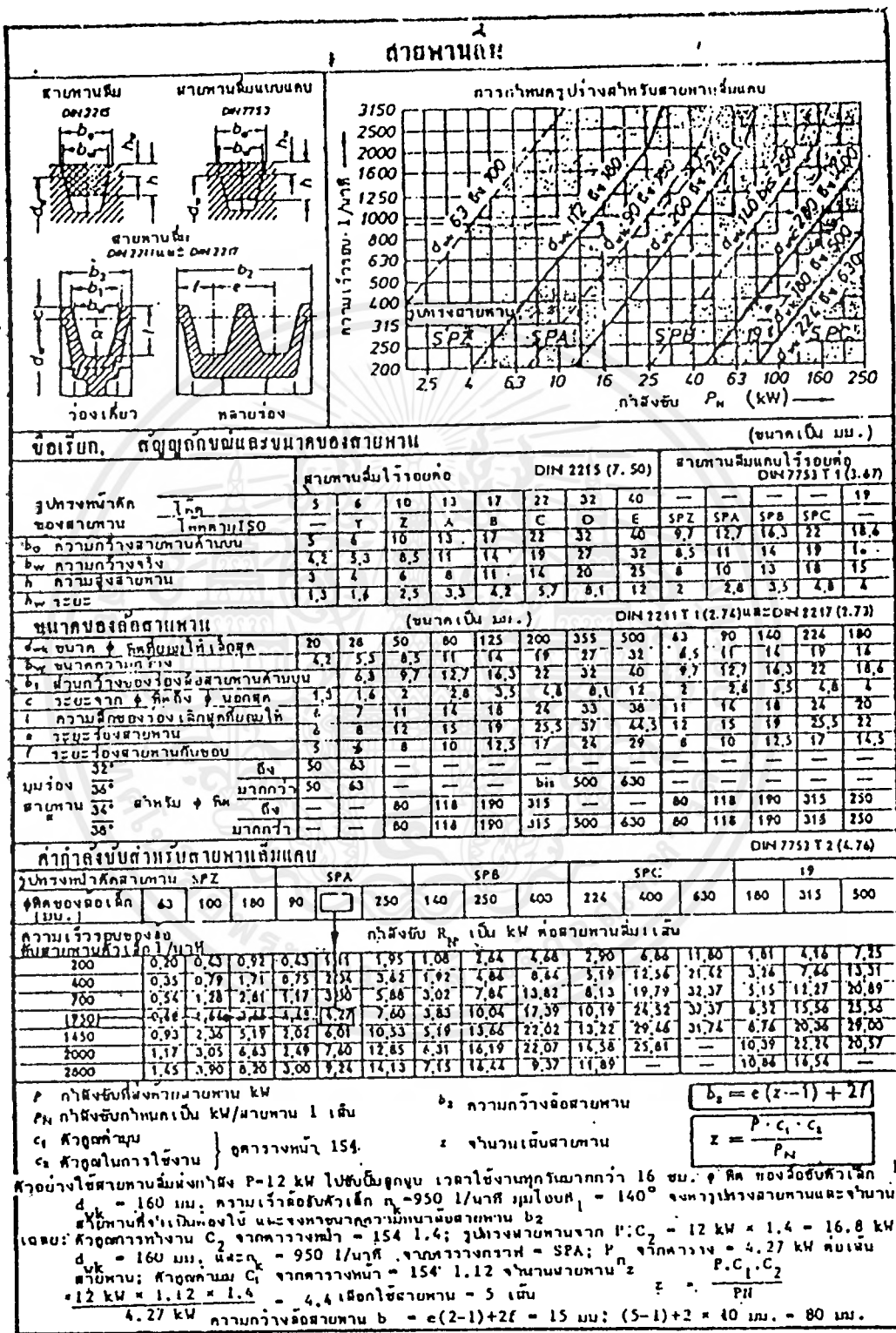
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

จำนวน คน	แนวเกาะท่าที่ปลาย								แนวเกาะท่าใกล้ฝั่งกลาง			
	14 $^{\circ}$ FD		20 $^{\circ}$ FD		20 $^{\circ}$ Scub		25 $^{\circ}$		14 $^{\circ}$ FD		20 $^{\circ}$ FD	
	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y
10	0.176	0.056	0.201	0.064	0.261	0.083						
11	0.192	0.061	0.225	0.072	0.289	0.092						
12	0.210	0.067	0.245	0.078	0.311	0.099	0.242	0.077	0.355	0.113	0.415	0.133
13	0.223	0.071	0.264	0.083	0.324	0.103	0.258	0.082	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.075	0.276	0.088	0.339	0.108	0.270	0.086	0.399	0.127	0.468	0.149
15	0.245	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.286	0.091	0.415	0.133	0.490	0.156
16	0.255	0.081	0.295	0.094	0.360	0.115	0.298	0.095	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.311	0.099	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.324	0.103	0.459	0.146	0.522	0.167
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.336	0.107	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.125	0.349	0.111	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.365	0.116	0.490	0.156	0.553	0.177
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.377	0.120	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.132	0.403	0.128	0.509	0.162	0.572	0.183
25	0.305	0.097	0.340	0.108	0.416	0.133	0.415	0.132	0.515	0.164	0.580	0.184
26	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.135	0.428	0.136	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.441	0.133	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.409	0.130	0.534	0.170	0.592	0.189
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.412	0.131	0.537	0.171	0.599	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.418	0.133	0.540	0.172	0.605	0.193
31	0.320	0.101	0.361	0.115	0.440	0.140	0.421	0.134	0.554	0.173	0.611	0.195
32	0.322	0.101	0.364	0.116	0.443	0.141	0.428	0.136	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.445	0.142	0.430	0.137	0.550	0.175	0.623	0.198
34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.434	0.138	0.553	0.177	0.628	0.200
35	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.437	0.139	0.556	0.177	0.633	0.201
36	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.443	0.141	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.144	0.446	0.142	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.455	0.145	0.450	0.143	0.565	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.457	0.146	0.454	0.144	0.568	0.181	0.655	0.209
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.459	0.146	0.460	0.146	0.570	0.182	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.467	0.147	0.463	0.147	0.574	0.183	0.668	0.212
45	0.340	0.108	0.399	0.127	0.468	0.149	0.469	0.149	0.579	0.184	0.678	0.214
50	0.346	0.110	0.408	0.130	0.474	0.151	0.478	0.152	0.588	0.187	0.694	0.221
55	0.352	0.112	0.415	0.132	0.480	0.153	0.485	0.154	0.596	0.190	0.704	0.224
60	0.355	0.113	0.421	0.134	0.484	0.154	0.490	0.156	0.603	0.192	0.713	0.227
65	0.358	0.114	0.425	0.135	0.488	0.155	0.496	0.158	0.607	0.193	0.721	0.229
70	0.360	0.115	0.429	0.136	0.493	0.157	0.502	0.160	0.610	0.194	0.728	0.231
75	0.361	0.115	0.433	0.138	0.496	0.158	0.508	0.161	0.613	0.195	0.735	0.233
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.499	0.159	0.510	0.162	0.615	0.196	0.739	0.235
90	0.366	0.117	0.442	0.141	0.503	0.160	0.516	0.164	0.619	0.197	0.747	0.237
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.506	0.161	0.521	0.166	0.622	0.198	0.755	0.240

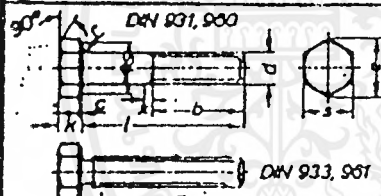
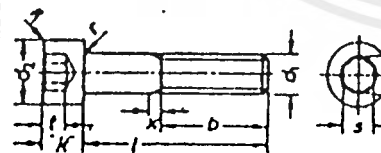
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 มาตรฐานสายพานลิ่ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.14 มาตรฐานสติกเกลียว

สติกเกลียว																																																																																																																																																
คุณสมบัติความแข็งแรงของสติกเกลียวจากเหล็กโพลีเอทหรือเหล็กผสม																																																																																																																																																
DIN 247, T 4 (10, 67)																																																																																																																																																
ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง	3.4	4.5	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	6.9	8 c	10.9	12.9	14.9																																																																																																																																				
ความแข็งแรงดึงค่าพหุ $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	340	450	480	500	580	600	600	690	800	1000	1300	1400																																																																																																																																				
ค่าความแข็งแรงดึงค่าพหุ $R_m$ $\cdot 10^{-10}$	4	4	8	4	8	4	8	9	8	9	9	9																																																																																																																																				
ค่าความแข็งแรงดึงค่าพหุ $R_m$	= 10x ค่าของค่าความแข็งแรงดึงค่าพหุ																																																																																																																																															
อัตรายืดตัวค่าพหุ $\sigma_{0.2}$	25	25	14	20	10	16	8	12	12	9	8	7																																																																																																																																				
สำหรับเหล็กเกลียวจากโพลีเอทที่ไม่ใช่เหล็กที่ค่าหนึ่งขึ้นความแข็งแรงดึงค่าพหุจะเป็นการคูณกับค่าที่ระบุ ตัวอย่าง: การเขียนกำหนดสติกเกลียว 6 เหล็กผสม จาก CuZn มผสม (ทองเหลือง) ใช้สติก "๒" สติกเกลียว M 12 x 50 DIN 931 ๒ CuZn																																																																																																																																																
ความนิยมของสติกเกลียวในอุตสาหกรรมที่ไม่เจาะทะลุ																																																																																																																																																
คุณสมบัติความแข็งแรง						ความยาวเกลียวไกลถึงหัว																																																																																																																																										
คุณสมบัติความแข็งแรง						8.8	8.8	10.9	10.9																																																																																																																																							
ความละเอียดของเกลียว $\frac{d}{p}$						< 9	≥ 9	< 9	≥ 9																																																																																																																																							
วัสดุ	Al มผสมแข็งเช่น AlCuMg 1 P 40					1,1 · d	1,4 · d			—																																																																																																																																						
	เหล็กหล่อชนิดคาร์บอนในปริมาณสูง GG-25					1,0 · d	1,25 · d			1,4 · d																																																																																																																																						
	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเช่น SC. 37 C 15 H					1,0 · d	1,25 · d			1,4 · d																																																																																																																																						
	เหล็กกล้าความแข็งแรงปานกลางเช่น SC. 50 C 35 H					0,9 · d	1,0 · d			1,2 · d																																																																																																																																						
เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง $R_m > 800$ N/mm <sup>2</sup>					0,8 · d	0,9 · d			1,0 · d																																																																																																																																							
สำหรับเกลียวสติกเกลียวชนิดพิเศษจะเขียนเพิ่ม DIN ในไปตามหลังชื่อ; ตัวอย่าง: สติกเกลียวโพลีเอท: DIN 935 - H 30 - 3 ๒.																																																																																																																																																
สติกเกลียวหัวหกเหลี่ยม																																																																																																																																																
DIN 931 (11, 70), 933 (12, 70), 960 (11, 70), 961 (11, 70)																																																																																																																																																
 <p>ช่วงสติกเกลียว x ตาม DIN 76 ความยาวเกลียว ๒ ถึง M12 ๒๘ ความยาวความแข็งแรง 5,6,6,8,10,9 การกำหนดขนาด: สติกเกลียว DIN 931 เป็นขนาดเกลียว M12 ยาว 1-80 ความแข็งแรง 8,8, ๑ สติกเกลียวหัวหกเหลี่ยม M12x80 DIN 931-8,8 ถ้าเป็นเกลียวหรือยูนิตขนาดเกลียวยาวถึงหัว (DIN 933) และไม่มีโพลีเอท (To): สติกเกลียวหัวหกเหลี่ยม M12x80 To DIN 933-8,8</p>	<p>DIN 931, 961</p> <p>DIN 931, 960</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>d</th> <th>M3</th> <th>M4</th> <th>M5</th> <th>M6</th> <th>M8</th> <th>M10</th> <th>M12</th> <th>M16</th> <th>M20</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>b</td> <td colspan="11">ความยาวเกลียวถึงปากหัว</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>16</td> <td>18</td> <td>22</td> <td>26</td> <td>30</td> <td>34</td> <td>38</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>60</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>2</td> <td>2,8</td> <td>3,5</td> <td>4</td> <td>5,5</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>13</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>e</td> <td>3,5</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>13</td> <td>17</td> <td>19</td> <td>24</td> <td>30</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>6,1</td> <td>7,7</td> <td>8,9</td> <td>11</td> <td>14,4</td> <td>18,9</td> <td>21,1</td> <td>26,8</td> <td>33,5</td> <td>40,8</td> </tr> <tr> <td>r_min</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> <td>0,25</td> <td>0,4</td> <td>0,4</td> <td>0,4</td> <td>0,4</td> <td>0,6</td> <td>0,8</td> </tr> </tbody> </table>											d	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	b	ความยาวเกลียวถึงปากหัว											หัว, จากหัวถึง	4	5	6	6	8	8	10	12	14	16	หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	50	60	70	หัว, จากหัวถึง	12	14	16	18	22	26	30	34	38	44	หัว, จากหัวถึง	20	25	30	30	35	40	45	50	60	70	หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	50	60	70	k	2	2,8	3,5	4	5,5	7	8	10	13	16	e	3,5	7	8	10	13	17	19	24	30	36	c	6,1	7,7	8,9	11	14,4	18,9	21,1	26,8	33,5	40,8	r_min	0,1	0,2	0,2	0,25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8											
		d	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20																																																																																																																																					
b	ความยาวเกลียวถึงปากหัว																																																																																																																																															
หัว, จากหัวถึง	4	5	6	6	8	8	10	12	14	16																																																																																																																																						
หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	50	60	70																																																																																																																																						
หัว, จากหัวถึง	12	14	16	18	22	26	30	34	38	44																																																																																																																																						
หัว, จากหัวถึง	20	25	30	30	35	40	45	50	60	70																																																																																																																																						
หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	50	60	70																																																																																																																																						
k	2	2,8	3,5	4	5,5	7	8	10	13	16																																																																																																																																						
e	3,5	7	8	10	13	17	19	24	30	36																																																																																																																																						
c	6,1	7,7	8,9	11	14,4	18,9	21,1	26,8	33,5	40,8																																																																																																																																						
r_min	0,1	0,2	0,2	0,25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8																																																																																																																																						
ความยาวปกติ L: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45 จนถึง 80 โทเคิลคือ 5 มม. จาก 80 ถึง 220 โทเคิลคือ 10 มม. DIN 931, 933 เป็นเกลียวมาตรฐาน DIN 960, 961 เป็นเกลียวมาตรฐานพิเศษ																																																																																																																																																
เกลียวทรงกระบอกหัวสี่																																																																																																																																																
DIN 912, T 1 (11, 70)																																																																																																																																																
 <p>มีในตารางของเกลียวหัวหกเหลี่ยม ตาม DIN 76 เกลียว ๒ เกรดความแข็งแรง: 6.9, 8.8, 10.9, 12.9 การเขียนกำหนดขนาด M 10 x 50 DIN 912 - 8.8</p>	<p>DIN 912, T 1</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>d<sub>1</sub></th> <th>M3</th> <th>M4</th> <th>M5</th> <th>M6</th> <th>M8</th> <th>M10</th> <th>M12</th> <th>M16</th> <th>M20</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>b</td> <td colspan="11">ความยาวเกลียวถึงปากหัว</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>20</td> <td>30</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>16</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>50</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>16</td> <td>18</td> <td>22</td> <td>26</td> <td>30</td> <td>38</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>60</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>หัว, จากหัวถึง</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>60</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>d<sub>1</sub></td> <td>5,5</td> <td>7</td> <td>8,5</td> <td>10</td> <td>13</td> <td>16</td> <td>18</td> <td>24</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>16</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>e</td> <td>2,5</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>14</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>2,9</td> <td>3,6</td> <td>4,7</td> <td>5,9</td> <td>7</td> <td>9,4</td> <td>11,7</td> <td>16,3</td> <td>19,8</td> </tr> <tr> <td>r_max</td> <td>1,7</td> <td>2,4</td> <td>3,1</td> <td>3,78</td> <td>4,79</td> <td>6,25</td> <td>7,5</td> <td>9,7</td> <td>11,8</td> </tr> <tr> <td>r<sub>1</sub></td> <td>0,2</td> <td>0,4</td> <td>0,4</td> <td>0,5</td> <td>0,8</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>											d <sub>1</sub>	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	b	ความยาวเกลียวถึงปากหัว											หัว, จากหัวถึง	3	6	10	10	16	16	20	30	40	หัว, จากหัวถึง	16	20	25	25	30	35	40	50	60	หัว, จากหัวถึง	12	14	16	18	22	26	30	38	44	หัว, จากหัวถึง	20	25	30	30	35	40	45	60	70	หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	60	70	d <sub>1</sub>	5,5	7	8,5	10	13	16	18	24	30	k	3	4	5	6	8	10	12	16	20	e	2,5	3	4	5	6	8	10	14	17	c	2,9	3,6	4,7	5,9	7	9,4	11,7	16,3	19,8	r_max	1,7	2,4	3,1	3,78	4,79	6,25	7,5	9,7	11,8	r <sub>1</sub>	0,2	0,4	0,4	0,5	0,8	1	1	2	2
		d <sub>1</sub>	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20																																																																																																																																					
b	ความยาวเกลียวถึงปากหัว																																																																																																																																															
หัว, จากหัวถึง	3	6	10	10	16	16	20	30	40																																																																																																																																							
หัว, จากหัวถึง	16	20	25	25	30	35	40	50	60																																																																																																																																							
หัว, จากหัวถึง	12	14	16	18	22	26	30	38	44																																																																																																																																							
หัว, จากหัวถึง	20	25	30	30	35	40	45	60	70																																																																																																																																							
หัว, จากหัวถึง	25	30	30	30	35	40	45	60	70																																																																																																																																							
d <sub>1</sub>	5,5	7	8,5	10	13	16	18	24	30																																																																																																																																							
k	3	4	5	6	8	10	12	16	20																																																																																																																																							
e	2,5	3	4	5	6	8	10	14	17																																																																																																																																							
c	2,9	3,6	4,7	5,9	7	9,4	11,7	16,3	19,8																																																																																																																																							
r_max	1,7	2,4	3,1	3,78	4,79	6,25	7,5	9,7	11,8																																																																																																																																							
r <sub>1</sub>	0,2	0,4	0,4	0,5	0,8	1	1	2	2																																																																																																																																							
ความยาวปกติ L: 3, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 30 ถึง 50 จากขนาด 50 มม. ถึง 100 โทเคิลคือ 5 มม. จาก 100 ถึง 200 มม. โทเคิลคือ 10 มม.																																																																																																																																																

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.15 มาตรฐานนัท

นัท														
<b>เกรดความแข็งแรง</b>											DIN 934 TA (10.7)			
ความแข็งแรงของนัทจากเหล็กไม้นิ่มหรือเหล็กเปราะชนิดที่ 4 มี $d = 39$ มม. และความสูงที่ทน $= 0.8d$ ขึ้นกับ ความแข็งแรงที่จุดของเกลียวนัท ซึ่งจะใช้มีดสว่าน เกรดของความแข็งแรงของนัทจึงเหมือนกับเกรดความแข็งแรง ของสติกเกลียวนัท														
เกรดความแข็งแรงของนัท	5	6	8	10	12	14								
ความเค้นตรวจสอบ $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	300	400	500	1000	1200	1400								
เกรดความแข็งแรงของสติกเกลียว นัทที่เฉพาะ	3.6, 4.6 4.8, 5.6 5.8	4.6 6.8 6.9	8.8	10.9	12.9	14.9								
สำหรับนัทจากโลหะที่ไม่ใช่เหล็กความแข็งแรงขึ้นอยู่กับวัสดุ														
<b>นัทหกเหลี่ยม</b>														
นัทหกเหลี่ยม DIN 934														
นัทหกเหลี่ยม DIN 934														
นัทหกเหลี่ยม: DIN 934 (12.72)														
$d_1$	M3	M4	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36			
$d_2$ min	7.1	9	11.7	15.3	17.1	21.6	27	32.4	41.4	49.5				
$d$ min	6.43	10.89	14.2	18.72	20.84	26.17	32.95	39.55	50.85	60.79				
๒ และ ๓ เหมือน DIN 934														
สำหรับนัท g : เกรดคุณภาพ 5 ศิวอักษรการเขียนกำหนดขนาด : นัทหกเหลี่ยม H 10 DIN 934														
นัทหกเหลี่ยม DIN 439														
นัทหกเหลี่ยม DIN 439														
$d_1$	M2	M2.5	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20			
$d_2$ min	4.2	5.4	6	7.6	8.7	11	14.3	18.6	21.1	26.8	33.5			
$d$ min	4	5	5.5	7	8	10	13	17	19	24	30			
$m$	1.2	1.6	1.8	2.2	2.7	3.2	4	5	6	8	10			
นัท ๒ : เกรดความแข็งแรง $\sigma_b$ สำหรับนัทการจะกัด การกำหนดขนาดนัทหกเหลี่ยมชนิดนี้: ๑ : เกรดความแข็งแรง 04 : นัทหกเหลี่ยม A M6 DIN 39-U4														
<b>นัทหกเหลี่ยม DIN 934 (4.8)</b>														
$d_1$	M2	M2.5	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36
$d_2$ min	3.6	4.3	4.95	6.3	7.2	9	11.7	15.3	17.1	21.6	27	32.4	41.4	49.5
$d$ min	4.4	5.3	6.1	7.7	8.8	11.0	14.3	18.0	21.0	26.5	33.2	39.8	51.1	61.1
$m$	4	5	5.5	7	8	10	13	17	19	24	30	36	46	55
	1.6	2	2.4	3.2	4	5	6.5	8	10	13	16	19	24	29
ประเภท H 4, สูงนัท H 4 หรือ Hg (ชนิดที่ทน) : เกรดความแข็งแรง 5, 6, 8, 12 สติกเกลียว นัทหกเหลี่ยม H 12, ประเภท ๓ หรือ ๓g, เกรดความแข็งแรง 8 : นัทหกเหลี่ยม H 12 DIN 934-B														
<b>นัทร่องทรงแปดเหลี่ยม DIN 935 (4.77)</b>														
นัท ๒ (สำหรับเกลียวทรงแปดเหลี่ยม Hg และ H) เกรดความแข็งแรง 5, 6, 8, 10 (สำหรับ Hg และ g เฉพาะ 5) หัวนัทการเขียนกำหนดขนาด : นัทหัวนัท H 12 DIN 935-B														
<b>นัทร่อง DIN 1804 (3.71)</b>														
นัท : ๒ ไม่ชุบแข็งและไม่เงา h ชุบแข็ง (นอกจากเกลียว) การกำหนดขนาดนัทร่อง H 50 x 1.5 ชุบแข็ง : นัทร่อง H 50 x 1.5 DIN 1804-h														
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$h$	$f$	$e$	ขนาด								
M30 x 1.5	50	43	7	10	3	0.5	4							
M32 x 1.5	52	45	7	11	3	0.5	4							
M35 x 1.5	55	48	7	11	3	0.5	4							
M38 x 1.5	58	50	8	11	3.5	0.5	4							
M40 x 1.5	62	54	8	12	3.5	0.5	4							
M42 x 1.5	64	56	8	12	3.5	0.5	4							
M45 x 1.5	68	60	8	12	3.5	0.5	6							
M48 x 1.5	75	67	8	13	3.5	0.5	6							
M52 x 1.5	80	70	10	13	4	0.5	6							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.16 มาตรฐาน ลิ่มอัด, ลิ่มครึ่งวงกลม, ล้อยสายพานแบน

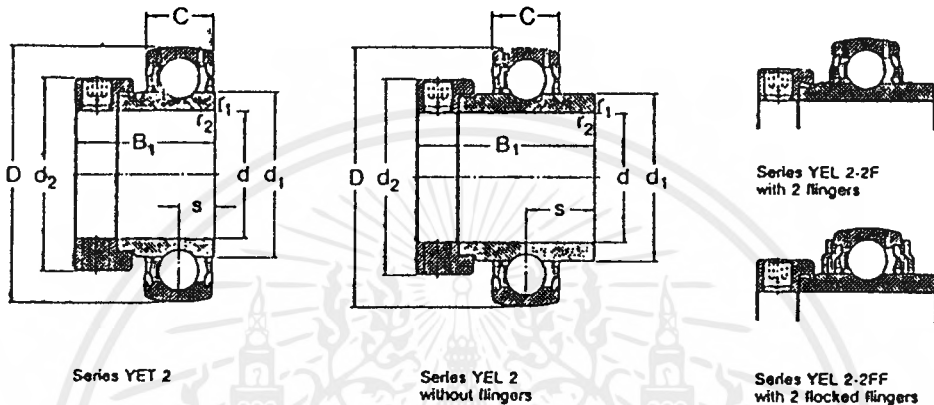
ลิ่มอัด		ลิ่มครึ่งวงกลม		ล้อยสายพานแบน														
DIN 6805 T1 (8.68)																		
				<p>ความกว้างของนิ้มที่หน้า b</p> <p>ความกว้างของนิ้มที่โคน b</p> <p>ความลึกของร่องที่หน้า</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน</p>														
				<p>ความกว้างของนิ้มที่หน้า b</p> <p>ความกว้างของนิ้มที่โคน b</p>	<p>ความลึกของร่องที่หน้า</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน</p>													
				<p>ความลึกของร่องที่หน้า: ขนาดความลึกของร่องที่หน้า +0,1...-0,2</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน: ขนาดความลึกของร่องที่โคน +0,1...-0,2</p>														
ความสูงของหน้า	d <sub>1</sub> สูงหน้า	4	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95	110	
ความสูงของโคน	d <sub>2</sub> สูงโคน	4	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95	110	
ความกว้างของหน้า	b	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32
ความกว้างของโคน	b	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32
ความลึกของร่องที่หน้า	r <sub>1</sub>	1,2	1,8	2,5	3	3,5	4	5	6	6,5	7	7,5	8	9	10	11	12	14
ความลึกของร่องที่โคน	r <sub>2</sub>	0,5	0,9	1,2	1,7	2,2	2,4	2,4	2,4	2,9	3,4	3,4	3,9	4,4	4,4	5,4	6,4	7,4
ความยาวของนิ้ม	l	4	6	8	10	14	18	20	28	36	45	50	58	63	70	80	90	110
<p>การเขียนกำหนดขนาดลิ่มอัดรูป A ซึ่งกว้าง b = 12 มม. ความสูง h = 8 มม. และความยาว l = 56 มม.</p> <p>ลิ่มอัด A 12 x 8 x 56 DIN 6805</p>																		
DIN 6808 (8.64)																		
				<p>ความกว้างของนิ้มที่หน้า b</p> <p>ความกว้างของนิ้มที่โคน b</p> <p>ความลึกของร่องที่หน้า</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน</p>														
				<p>ความกว้างของนิ้มที่หน้า b</p> <p>ความกว้างของนิ้มที่โคน b</p>	<p>ความลึกของร่องที่หน้า</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน</p>													
				<p>ความลึกของร่องที่หน้า: ขนาดความลึกของร่องที่หน้า +0,1...-0,2</p> <p>ความลึกของร่องที่โคน: ขนาดความลึกของร่องที่โคน +0,1...-0,2</p>														
				<p>ความยาวของนิ้ม l</p> <p>ขนาดความยาวของนิ้ม l</p>														
ความยาวของนิ้ม	d <sub>1</sub> สูงหน้า	3	4	6	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95
ความยาวของนิ้ม	d <sub>2</sub> สูงโคน	3	4	6	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	95
ความกว้างของหน้า	b	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	6,5	7,5	8	9	10	11	12	14
ความกว้างของโคน	b	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	6,5	7,5	8	9	10	11	12	14
ความลึกของร่องที่หน้า	r <sub>1</sub>	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,4	1,7	2,2	2,6	3,0	3,4	3,9	4,4	4,4	5,4	6,4	7,4
ความลึกของร่องที่โคน	r <sub>2</sub>	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,4	1,7	2,2	2,6	3,0	3,4	3,9	4,4	4,4	5,4	6,4	7,4
<p>ขนาด 1 เป็นลิ่มครึ่งวงกลมเหมือนกับลิ่มอัด</p> <p>ขนาด 2 เป็นลิ่มครึ่งวงกลมที่มีมุมแหลมที่โคน (เป็นลิ่มครึ่งวงกลม)</p> <p>การเขียนกำหนดขนาด ลิ่มครึ่งวงกลมมีความกว้าง b = 6 มม. ความสูง h = 9 มม. : ลิ่มครึ่งวงกลม 6 x 9 DIN 6808</p>																		
DIN 111 (9.72)																		
				<p>ความกว้างของสายพาน</p> <p>ความกว้างของสายพานที่หน้า</p> <p>ความกว้างของสายพานที่โคน</p> <p>ความสูงของสายพาน</p> <p>ความสูงของสายพานที่หน้า</p> <p>ความสูงของสายพานที่โคน</p>														
				<p>ความกว้างของสายพาน</p> <p>ความกว้างของสายพานที่หน้า</p> <p>ความกว้างของสายพานที่โคน</p>	<p>ความสูงของสายพาน</p> <p>ความสูงของสายพานที่หน้า</p> <p>ความสูงของสายพานที่โคน</p>													
				<p>ความยาวของสายพาน l</p> <p>ขนาดความยาวของสายพาน l</p>														
ความยาวของสายพาน	d <sub>1</sub> สูงหน้า	40	63	100	160	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
ความยาวของสายพาน	d <sub>2</sub> สูงโคน	40	63	100	160	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
ความกว้างของสายพาน	b	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความกว้างของสายพาน	b	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความสูงของสายพาน	h	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความสูงของสายพาน	h	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความยาวของสายพาน	l	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
ความยาวของสายพาน	l	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
ความกว้างของสายพาน	b	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความกว้างของสายพาน	b	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความสูงของสายพาน	h	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
ความสูงของสายพาน	h	20	32	50	90	110	150	190	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590
<p>d<sub>1</sub> = (1,8 ถึง 1,6) · d<sub>2</sub> สำหรับ CI - 25</p> <p>การเขียนกำหนดขนาดล้อยสายพานแบนเป็นเส้นเดียว (1T) มีขอบค้ำห่างทางกระบอก (Z) มีขนาดกำหนด d<sub>1</sub> = 500 มม.</p> <p>ความกว้างของสายพาน b = 250 มม. รูปร่างของสายพาน d<sub>2</sub> = 80 มม. หรือร่องค้ำที่รับนิ้ม (PI)</p> <p>ล้อยสายพาน: 1T x 300 x 250 PM DIN 111</p>																		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.17 มาตรฐาน Y – bearing

Y-bearings with eccentric locking collar  
d 12–60 mm

ตลับลูกปืนนวมพร้อมแหวนล็อกเยื้องศูนย์กลาง  
– d 12–60 มม.



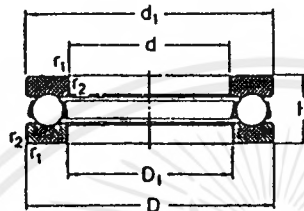
Dimensions									Basic load ratings		Fatigue load limit	Mass Bearing	Designations		
d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	D	B <sub>1</sub>	C	s	r <sub>1,2</sub> mm	dynamic C <sub>10</sub>	static C <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	kg	Bearings without flingers	with 2 flingers	with 2 locked flingers	
mm									N	H		-			
12	24,2	28,6	40	28,6	12	6,5	0,3	7 350	4 750	140	0,13	YET 203/12	-	-	
15	24,2	28,6	40	28,6	12	6,5	0,3	7 350	4 750	140	0,12	YET 203/15	-	-	
17	24,2	28,8	40	28,6	12	6,5	0,3	7 350	4 750	140	0,11	YET 203	-	-	
	24,2	28,6	40	37,3	12	13,9	0,3	7 350	4 750	140	0,13	YEL 203	YEL 203-2F	YEL 203-2FF	
20	28,2	33	47	31	14	7,5	0,8	9 800	6 550	196	0,16	YET 204	-	-	
	28,2	33	47	43,7	14	17,1	0,6	9 800	6 550	196	0,19	YEL 204	YEL 204-2F	YEL 204-2FF	
25	33,7	37,4	62	31	15	7,5	0,6	10 800	7 800	232	0,18	YET 205	-	-	
	33,7	37,4	62	44,4	15	17,5	0,6	10 800	7 800	232	0,23	YEL 205	YEL 205-2F	YEL 205-2FF	
30	39,7	44,2	62	35,7	18	9	0,6	15 000	11 200	335	0,30	YET 206	-	-	
	39,7	44,2	62	48,4	18	18,3	0,6	15 000	11 200	335	0,36	YEL 206	YEL 206-2F	YEL 206-2FF	
35	46,1	55,8	72	38,9	19	9,5	1	19 600	15 300	455	0,49	YET 207	-	-	
	46,1	55,8	72	51,1	19	18,8	1	19 600	15 300	455	0,55	YEL 207	YEL 207-2F	YEL 207-2FF	
40	51,8	60,3	80	43,7	21	11	1	23 600	19 000	560	0,62	YET 208	-	-	
	51,8	60,3	80	56,3	21	21,4	1	23 600	19 000	560	0,70	YEL 208	YEL 208-2F	YEL 208-2FF	
45	58,8	63,5	85	43,7	22	11	1	25 500	21 600	640	0,65	YET 209	-	-	
	58,8	63,5	85	56,3	22	21,4	1	25 500	21 600	640	0,74	YEL 209	YEL 209-2F	YEL 209-2FF	
50	62,5	69,9	90	43,7	22	11	1	27 000	23 200	695	0,73	YET 210	-	-	
	62,5	69,9	90	62,7	22	24,6	1	27 000	23 200	695	0,89	YEL 210	YEL 210-2F	YEL 210-2FF	
55	69,1	76,2	100	48,4	25	12	1	33 500	29 000	865	0,98	YET 211	-	-	
	69,1	76,2	100	71,4	25	27,8	1	33 500	29 000	865	1,20	YEL 211	YEL 211-2F	YEL 211-2FF	
60	75,8	83,7	110	77,8	26	31	1,5	40 500	36 000	1 060	1,60	YEL 212	YEL 212-2F	YEL 212-2FF	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.18 มาตรฐาน Thrust ball bearing

Thrust ball bearings  
single direction  
d 50-85 mm

ตลับลูกปืนกันรุนเม็ดกลมรับแรง  
ทิศทางเดียว  
d 50-85 มม.



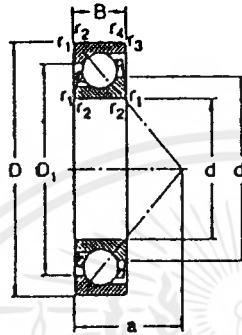
Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit $P_u$	Minimum load factor A	Speed ratings		Mass	Designation
d	D	H	C	$C_0$			Lubrication grease	oil		
mm			N		N	-	r/min	kg	-	
50	70	14	25 500	83 000	2 550	20	3 200	4 300	0,16	51110
	78	22	49 400	106 000	4 300	58	2 400	3 400	0,37	51210
	95	31	88 400	173 000	6 950	160	1 800	2 600	0,94	51310
	110	43	159 000	310 000	12 500	500	1 500	2 000	2,00	51410
55	78	16	30 700	78 000	3 100	31	2 800	3 800	0,23	51111
	90	25	61 800	134 000	5 400	93	1 900	2 800	0,59	51211
	105	35	104 000	208 000	8 300	220	1 600	2 200	1,30	51311
	120	48	178 000	360 000	14 300	670	1 300	1 800	2,55	51411
60	85	17	36 400	93 000	3 800	44	2 600	3 600	0,20	51112
	95	26	62 400	140 000	5 600	100	1 900	2 800	0,65	51212
	110	35	101 000	208 000	8 300	220	1 600	2 200	1,35	51312
	130	51	199 000	400 000	16 000	830	1 100	1 600	3,10	51412
65	90	18	37 100	98 000	4 000	49	2 400	3 400	0,33	51113
	100	27	63 700	150 000	6 000	120	1 800	2 600	0,78	51213
	115	36	106 000	220 000	8 800	250	1 500	2 000	1,50	51313
	140	56	216 000	450 000	18 000	1 100	1 000	1 500	4,00	51413
70	95	18	37 700	104 000	4 150	56	2 400	3 400	0,35	51114
	105	27	65 000	160 000	8 400	130	1 800	2 600	0,79	51214
	125	40	135 000	300 000	11 800	470	1 400	1 900	2,00	51314
	150	60	234 000	500 000	19 300	1 300	950	1 400	5,00	51414
75	100	19	44 200	137 000	5 500	97	2 200	3 200	0,40	51115
	110	27	67 600	170 000	6 800	150	1 700	2 400	0,83	51215
	135	44	163 000	360 000	14 000	670	1 200	1 700	2,60	51315
	160	65	251 000	560 000	20 800	1 600	900	1 300	6,75	51415
80	105	19	44 900	140 000	5 700	100	2 000	3 000	0,42	51116
	115	28	76 100	190 000	7 650	190	1 700	2 400	0,91	51216
	140	44	159 000	360 000	13 700	670	1 200	1 700	2,70	51316
	170	68	270 000	620 000	22 400	2 000	850	1 200	7,95	51416
85	110	19	46 200	150 000	6 000	120	2 000	3 000	0,44	51117
	125	31	97 500	250 000	9 800	330	1 600	2 200	1,20	51217
	150	49	190 000	425 000	16 000	940	1 100	1 600	3,55	51317
	180	72	286 000	680 000	24 000	2 400	850	1 200	9,45	51417

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.19 มาตรฐาน Angular contact ball bearings

Angular contact ball bearings  
single row  
d 10–65 mm

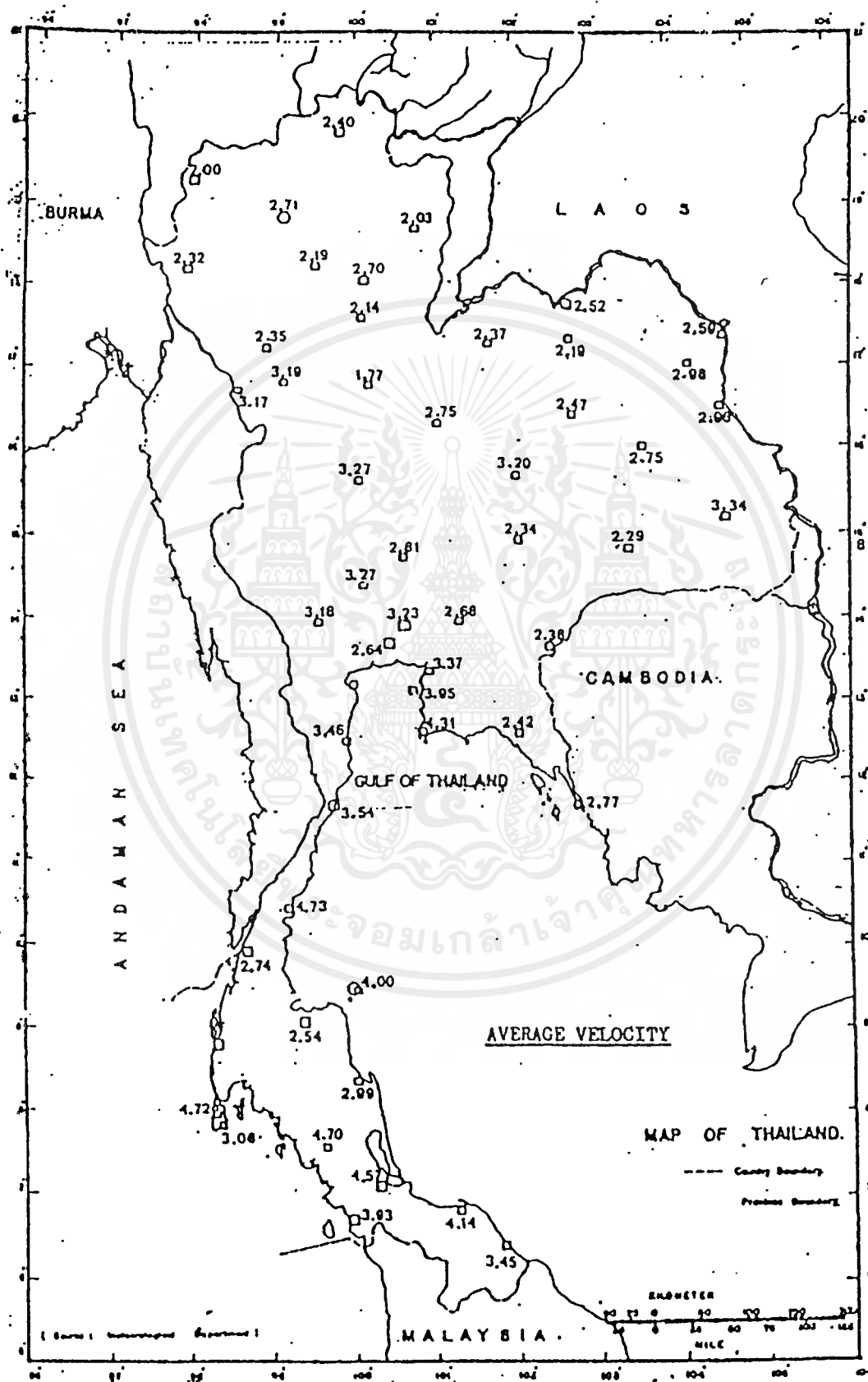
ตลับลูกปืนสัมผัสเชิงมุม  
แถวเดียว  
d 10-65 มม.



Principal dimensions		Basic load ratings		Fatigue load limit $P_u$	Speed ratings		Mass	Designation	
d	D	B	C		$C_0$	Lubrication grease			oil
mm		N		N	r/min		kg	-	
10	30	9	7 020	3 350	140	19 000	28 000	0,030	7200 BE
12	32	10	7 610	3 800	160	18 000	26 000	0,036	7201 BE
	37	12	10 600	5 000	208	17 000	24 000	0,060	7301 BE
15	35	11	8 840	4 800	204	17 000	24 000	0,045	7202 BE
	42	13	13 000	6 700	280	15 000	20 000	0,080	7302 BE
17	40	12	11 100	6 100	260	15 000	20 000	0,065	7203 BE
	47	14	15 900	8 300	355	13 000	18 000	0,11	7303 BE
20	47	14	14 000	8 300	355	12 000	17 000	0,11	7204 BE
	52	15	19 000	10 400	440	11 000	16 000	0,14	7304 BE
25	52	15	15 600	10 200	430	10 000	15 000	0,13	7206 BE
	62	17	28 000	15 600	655	9 000	13 000	0,23	7305 BE
30	62	16	23 800	15 600	655	8 500	12 000	0,20	7206 BE
	72	19	34 500	21 200	900	8 000	11 000	0,34	7306 BE
35	72	17	30 700	20 800	880	8 000	11 000	0,28	7207 BE
	80	21	39 000	24 500	1 040	7 500	10 000	0,45	7307 BE
40	80	18	36 400	26 000	1 100	7 000	9 500	0,37	7208 BE
	90	23	49 400	33 500	1 400	6 700	9 000	0,63	7308 BE
45	85	19	37 700	28 000	1 200	6 700	9 000	0,42	7209 BE
	100	25	60 500	41 500	1 730	6 000	8 000	0,85	7309 BE
50	90	20	39 000	30 500	1 290	6 000	8 000	0,47	7210 BE
	110	27	74 100	51 000	2 200	5 300	7 000	1,10	7310 BE
55	100	21	48 800	38 000	1 630	5 600	7 500	0,62	7211 BE
	120	29	85 200	60 000	2 550	4 800	6 300	1,40	7311 BE
60	110	22	57 200	45 500	1 830	5 000	6 700	0,80	7212 BE
	130	31	95 500	69 500	3 000	4 500	6 000	1,75	7312 BE
65	120	23	66 300	54 000	2 280	4 500	6 000	1,00	7213 BE
	140	33	108 000	80 000	3 350	4 300	5 600	2,15	7313 BE

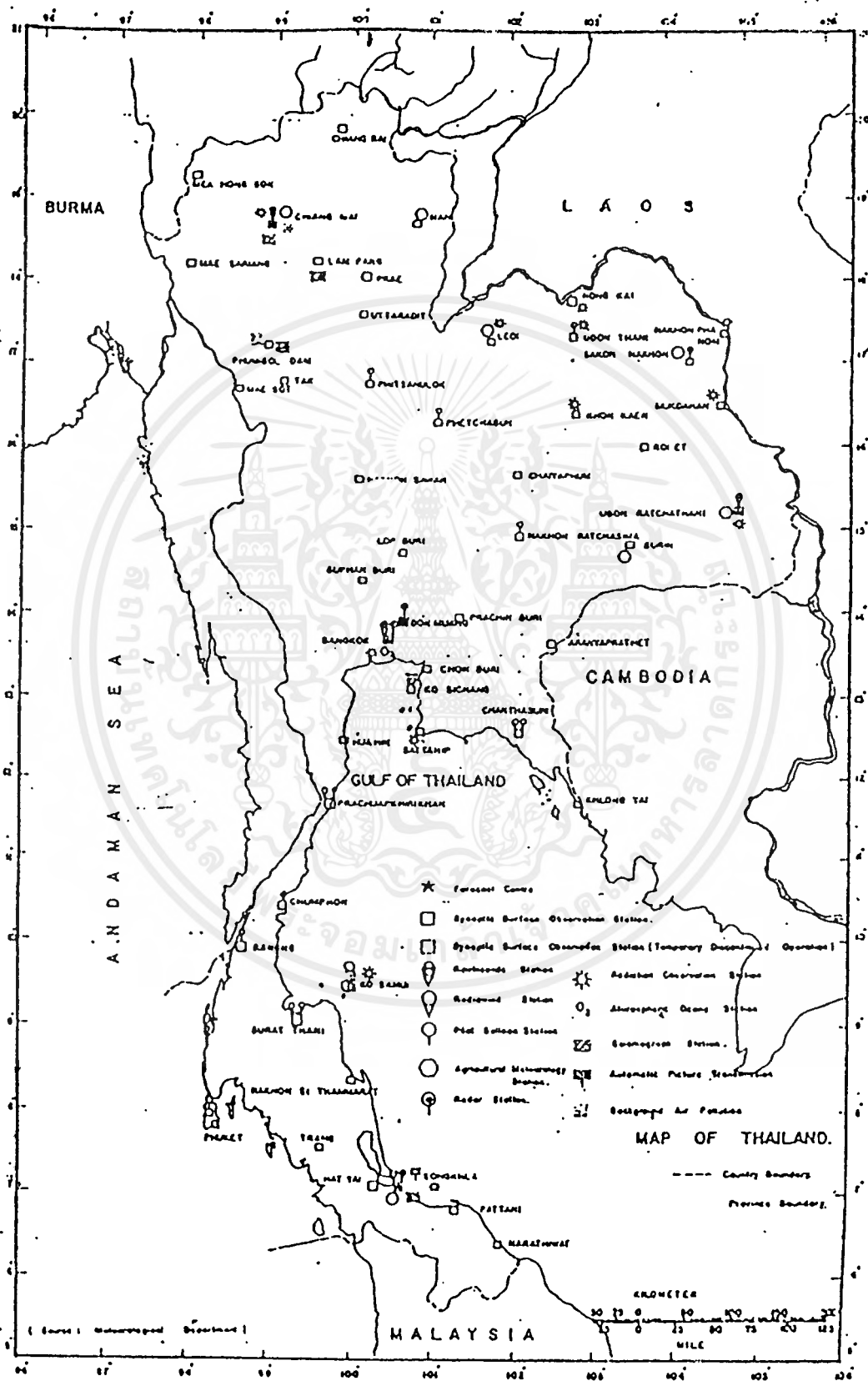
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.20 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตลอดรอบปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมอุตุนิยมวิทยา หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต อาจก่อให้เกิดความเสียหายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

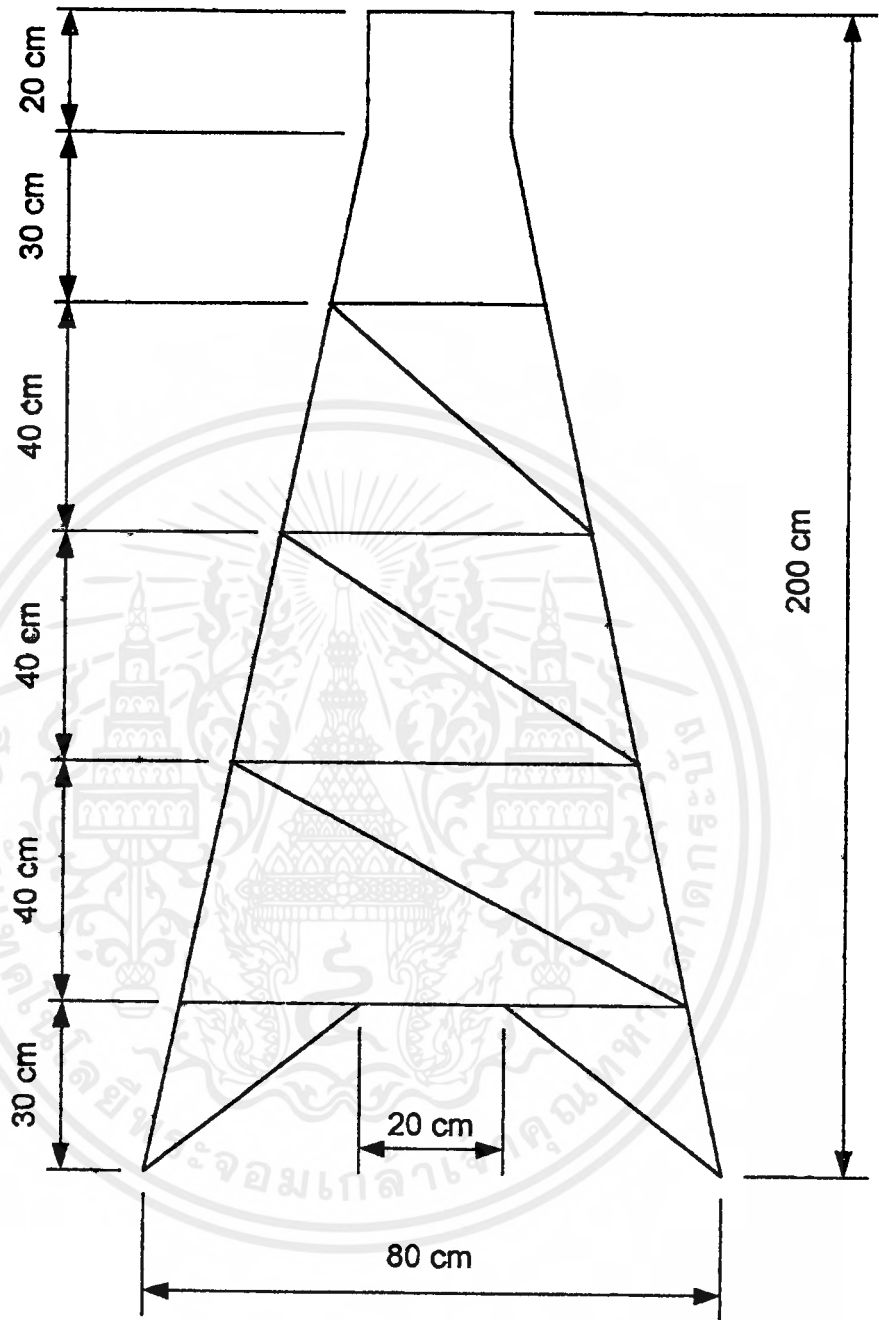
ตารางที่ 2.21 แสดงสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่กระจายอยู่ทั่ว ประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



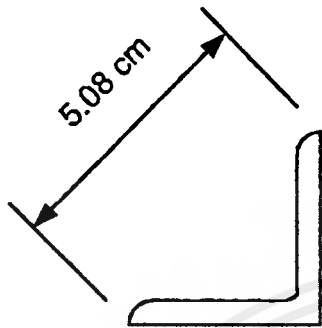
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



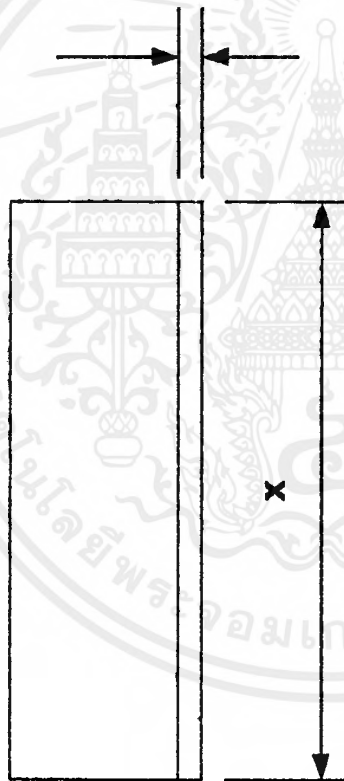
### โครงสร้างฐานกึ่งหั่นลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



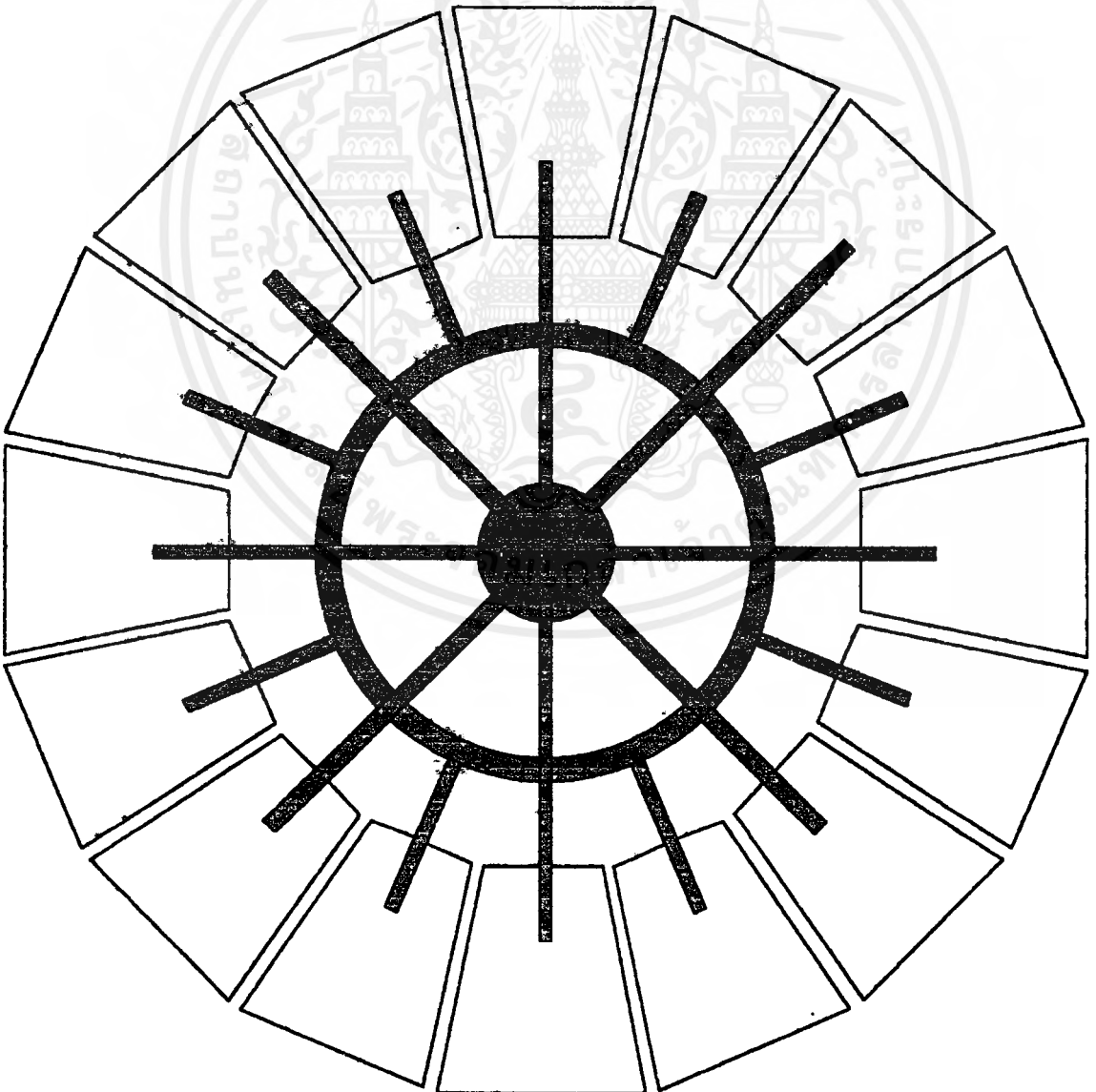
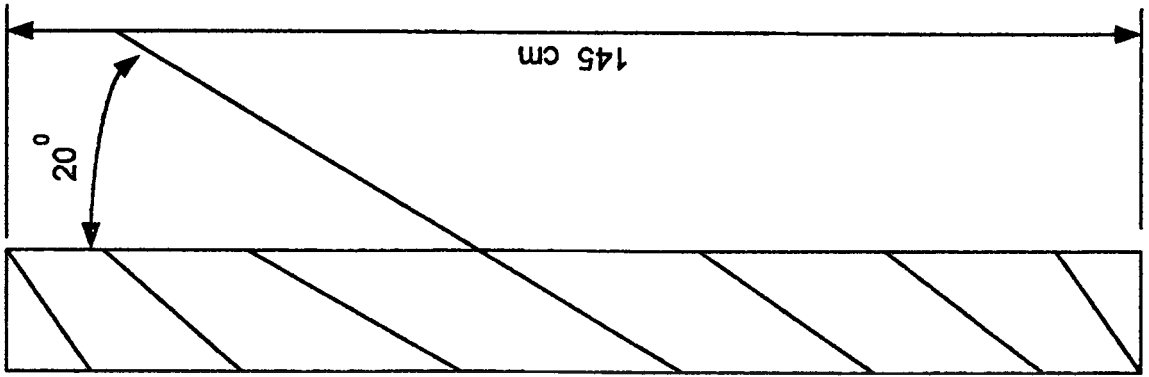


3 mm



$x$	จำนวน
31 cm	4
41 cm	4
55 cm	4
67 cm	4

### กานยึดฐาน

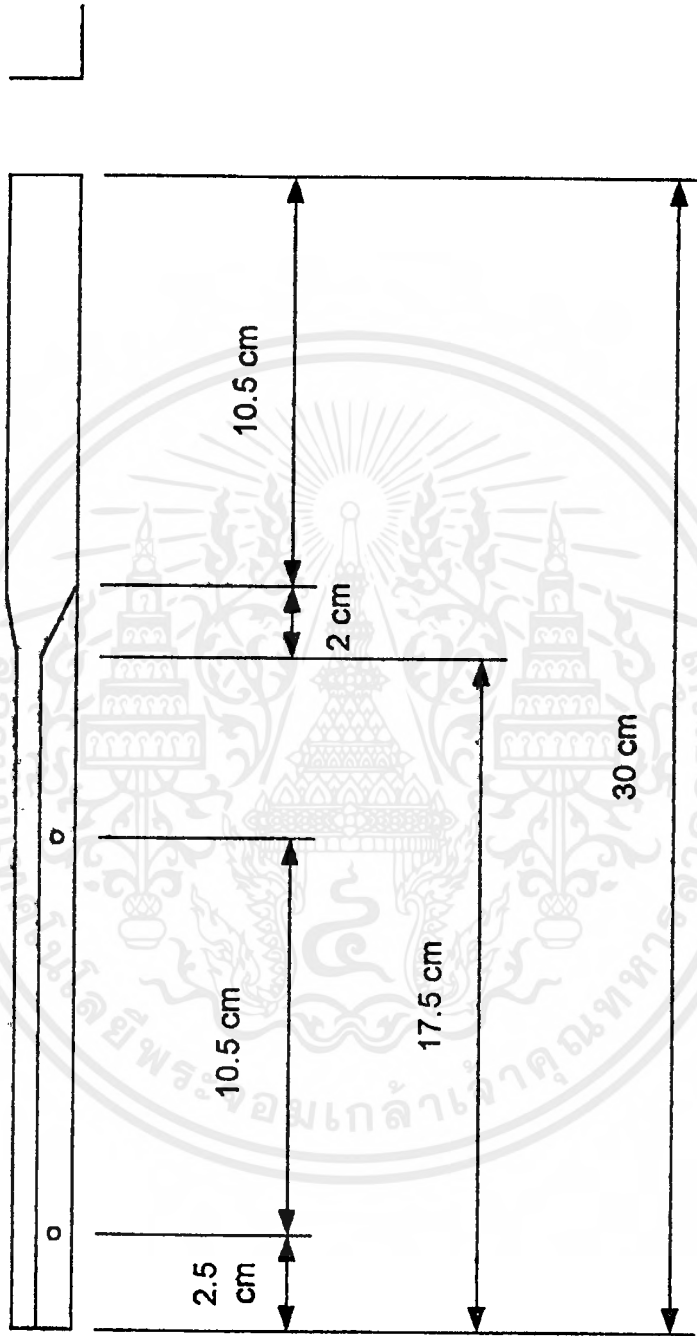
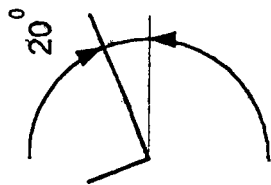


ชุดใบกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

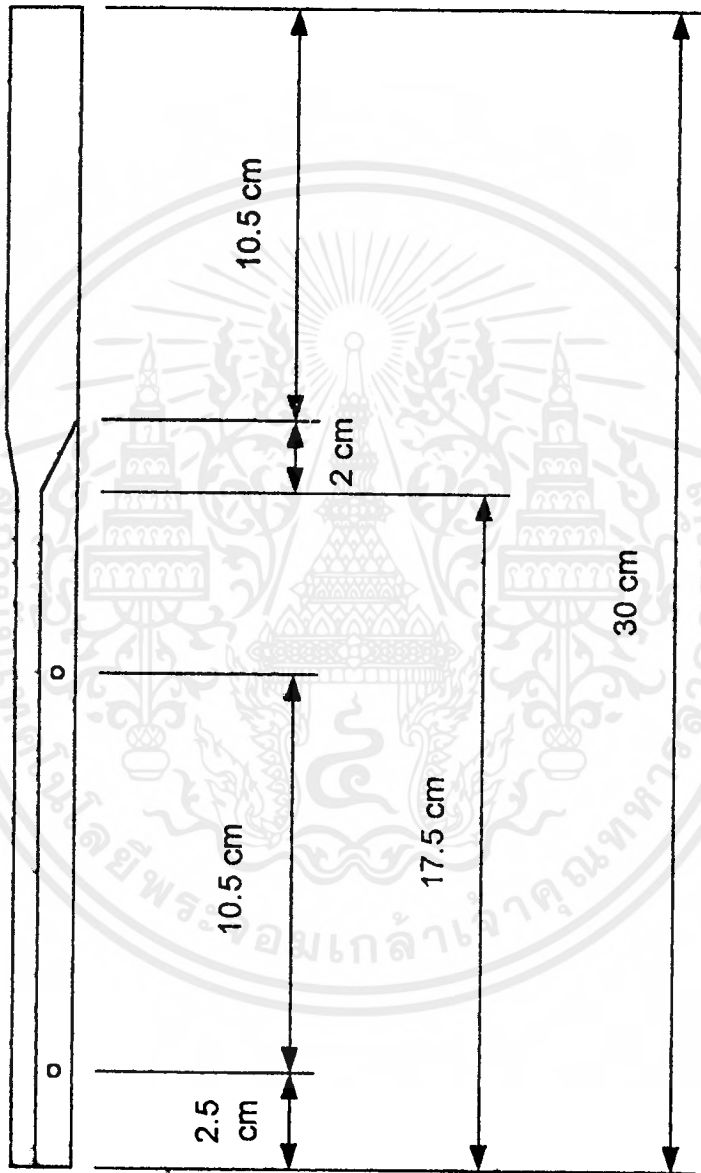
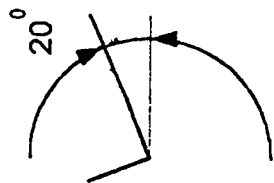


แผ่นจานยึดก้านใบ



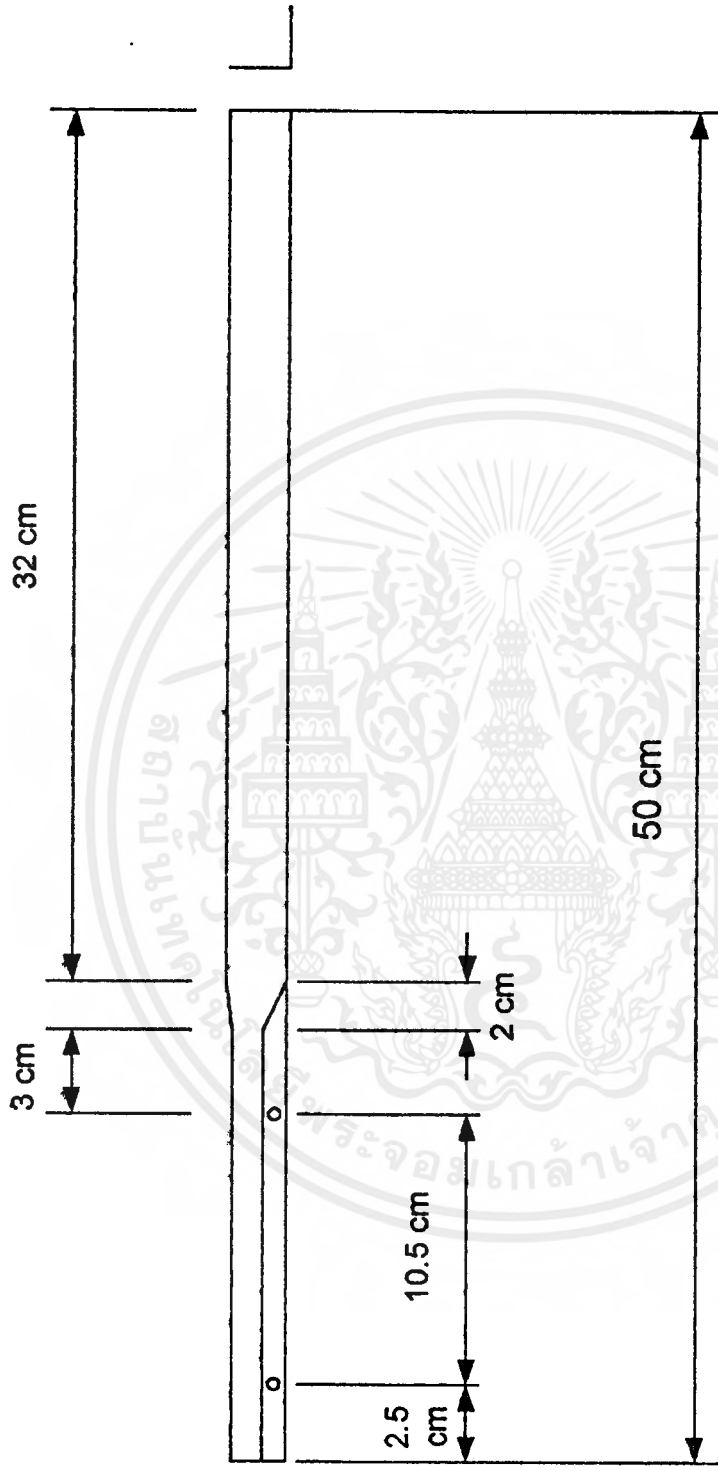
กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

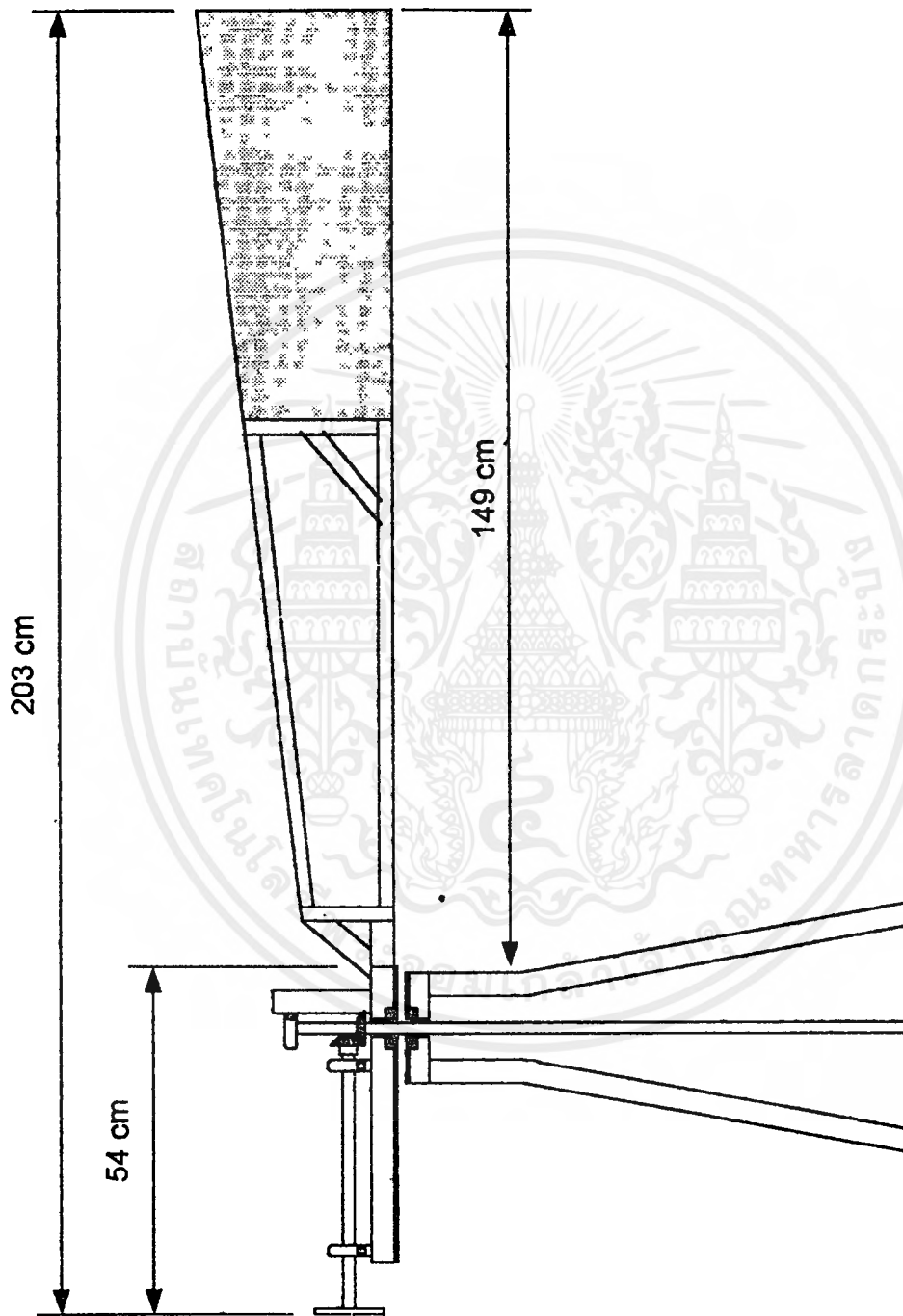


กำหนดใบต้น

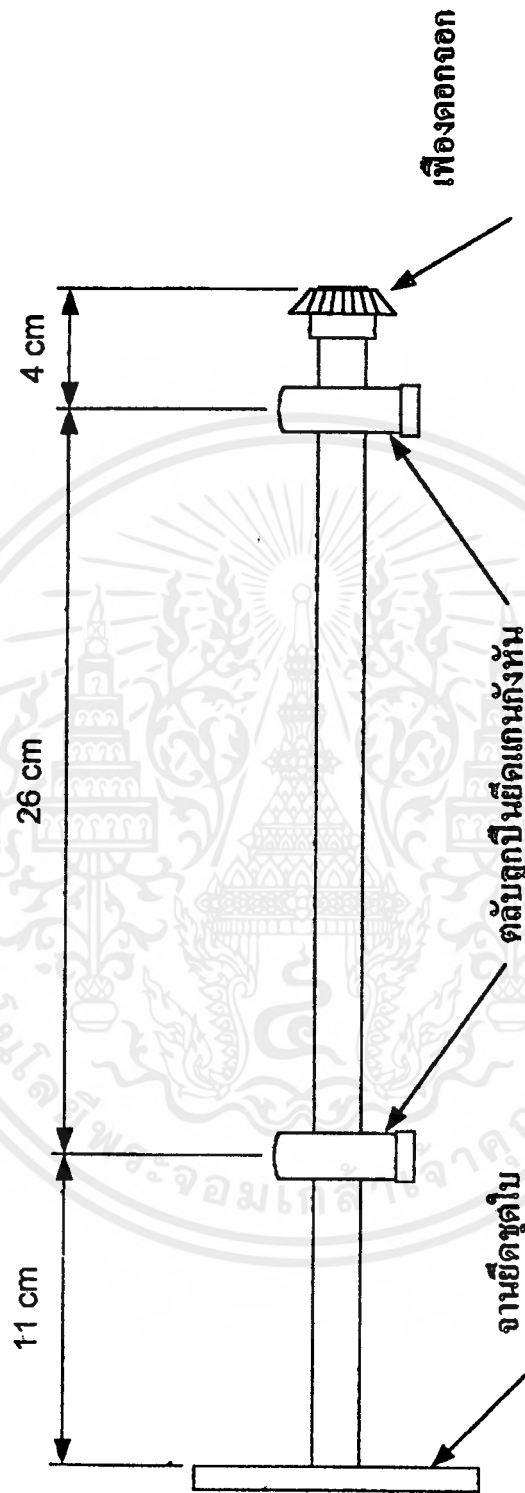
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กำนยัดใบยาว

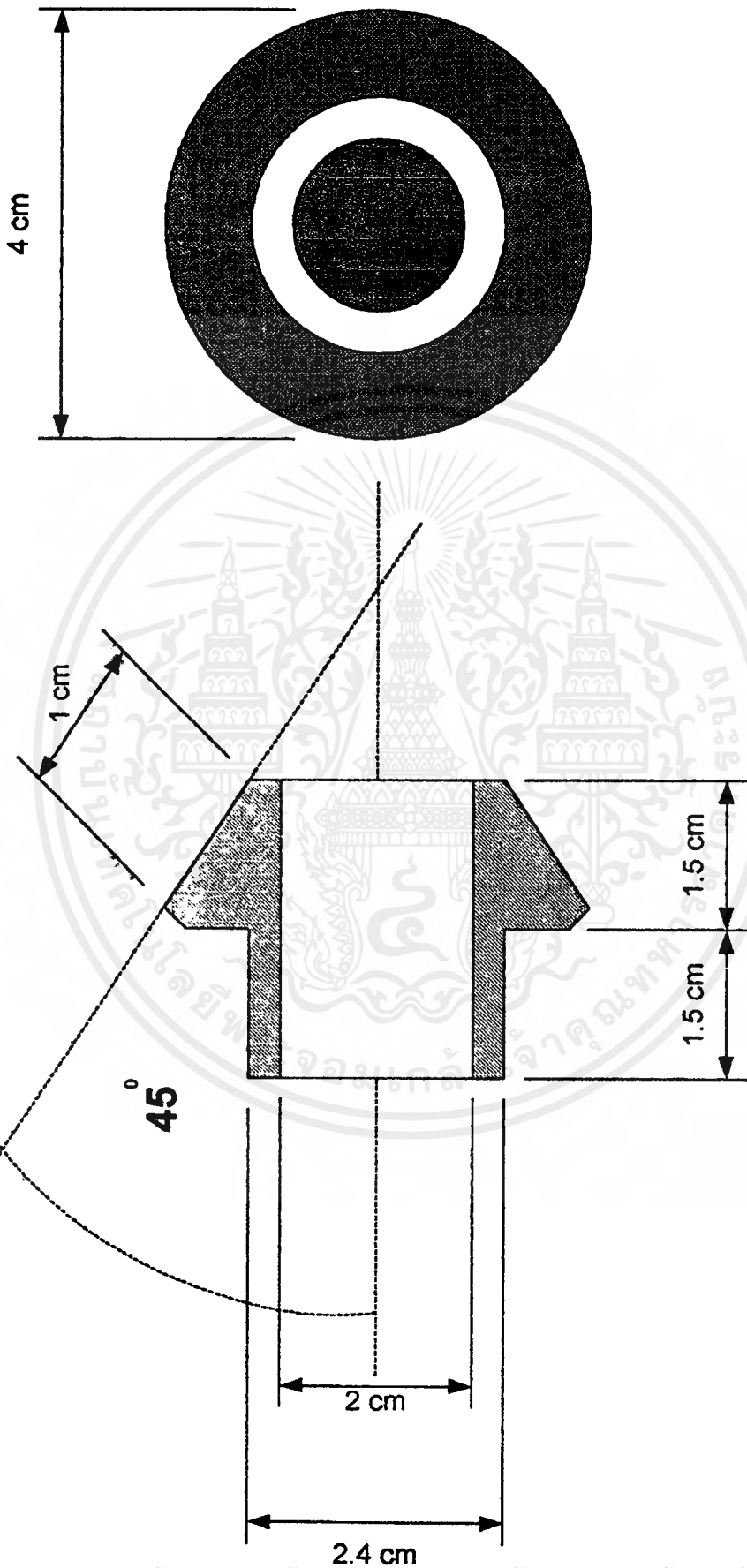


ชุดหัวถังหันลม



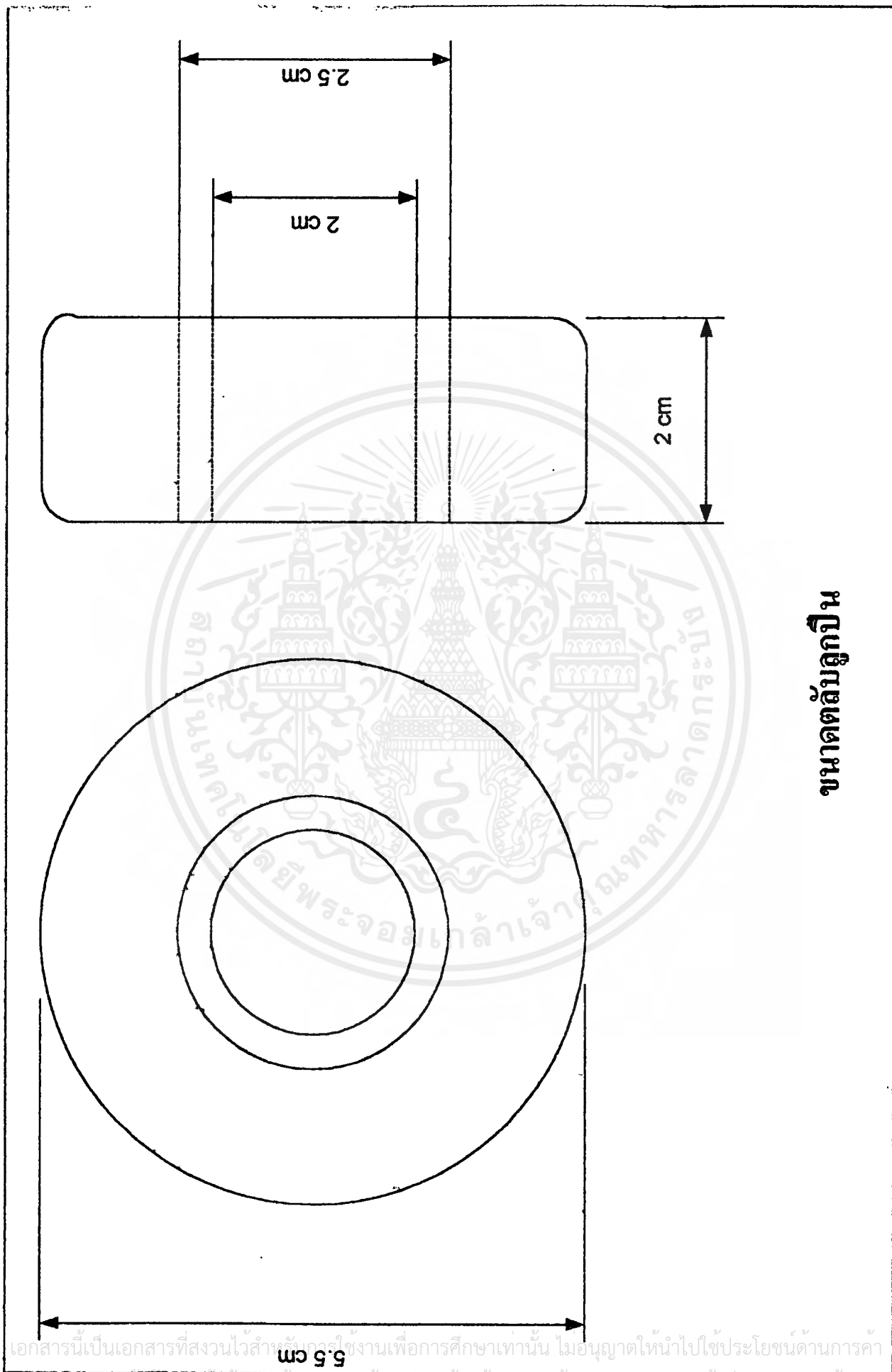
แกนกึ่งหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เฟืองส่งกำลังแบบดอกจอก

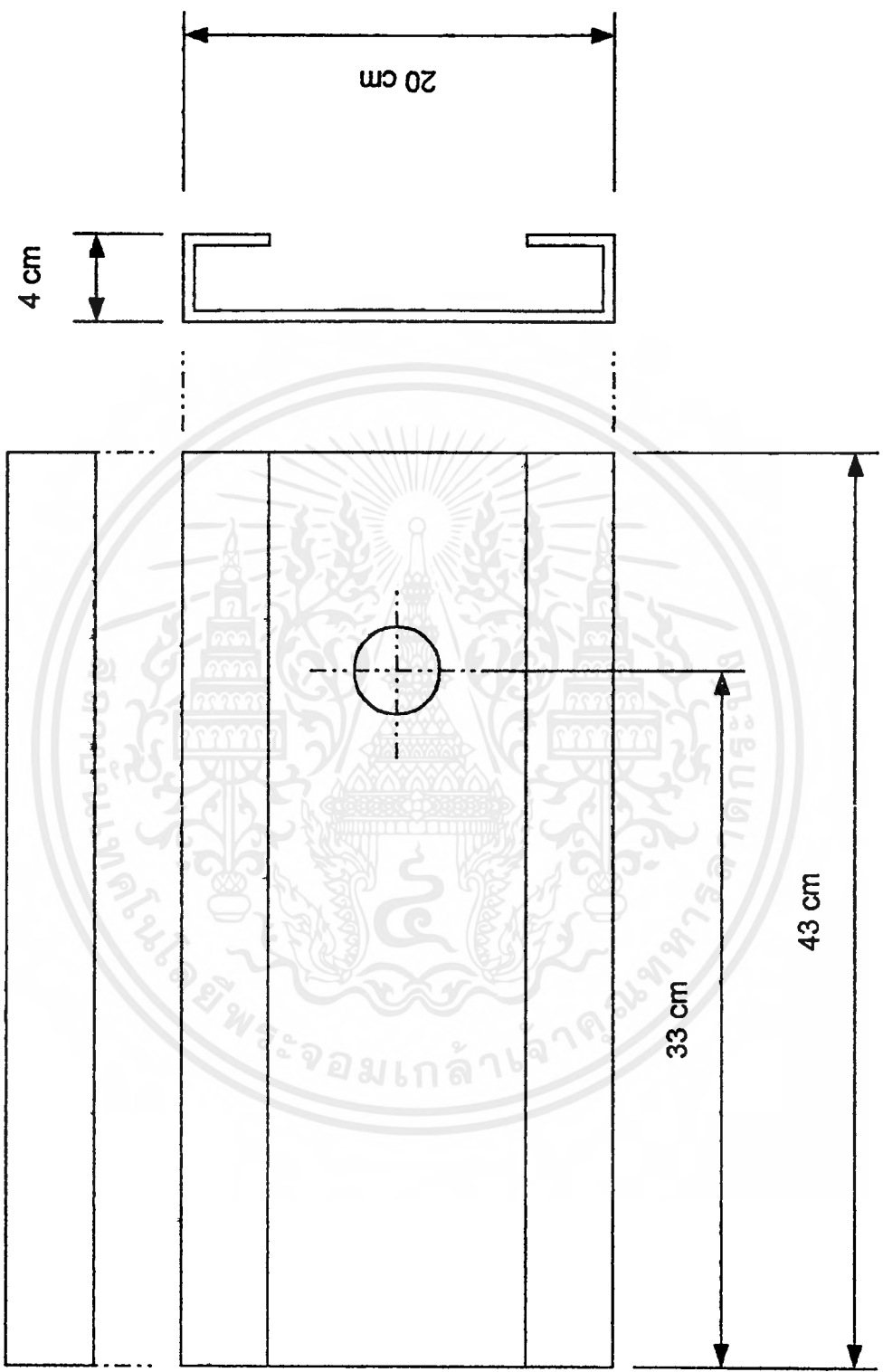
ทศ 1:1 2 ชั้น 20 ฟัน



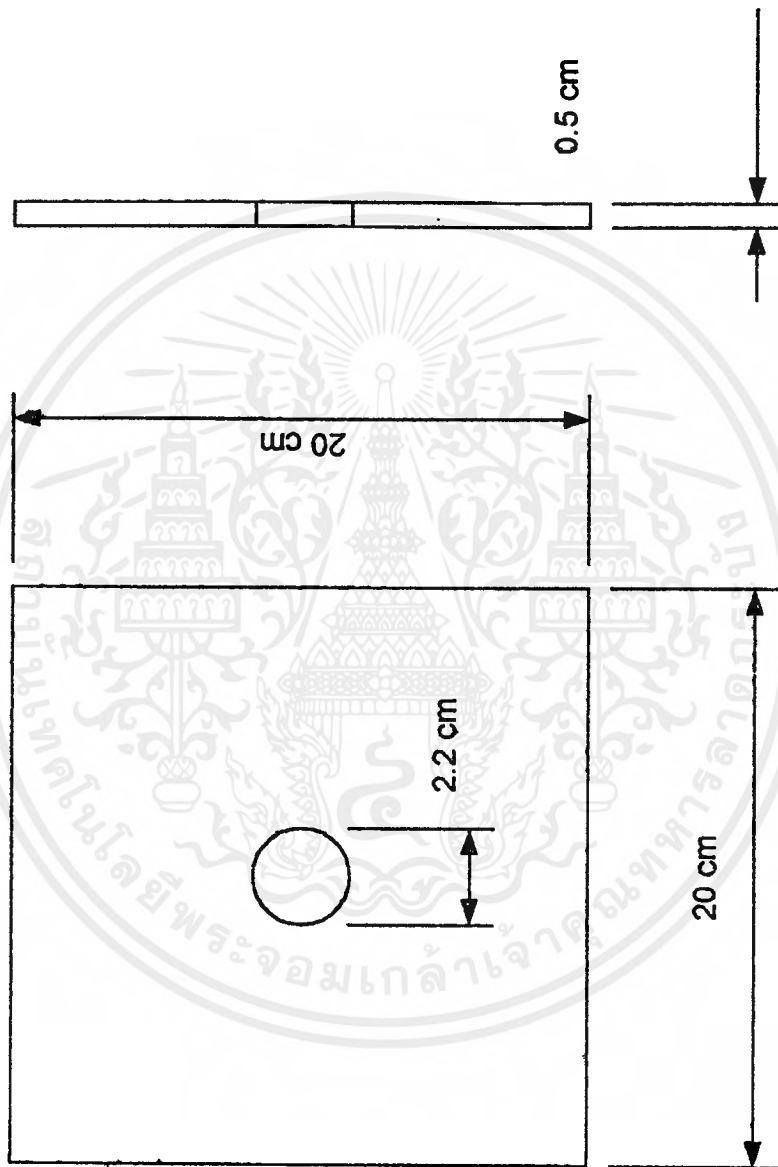
ขนาดลับถูกป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

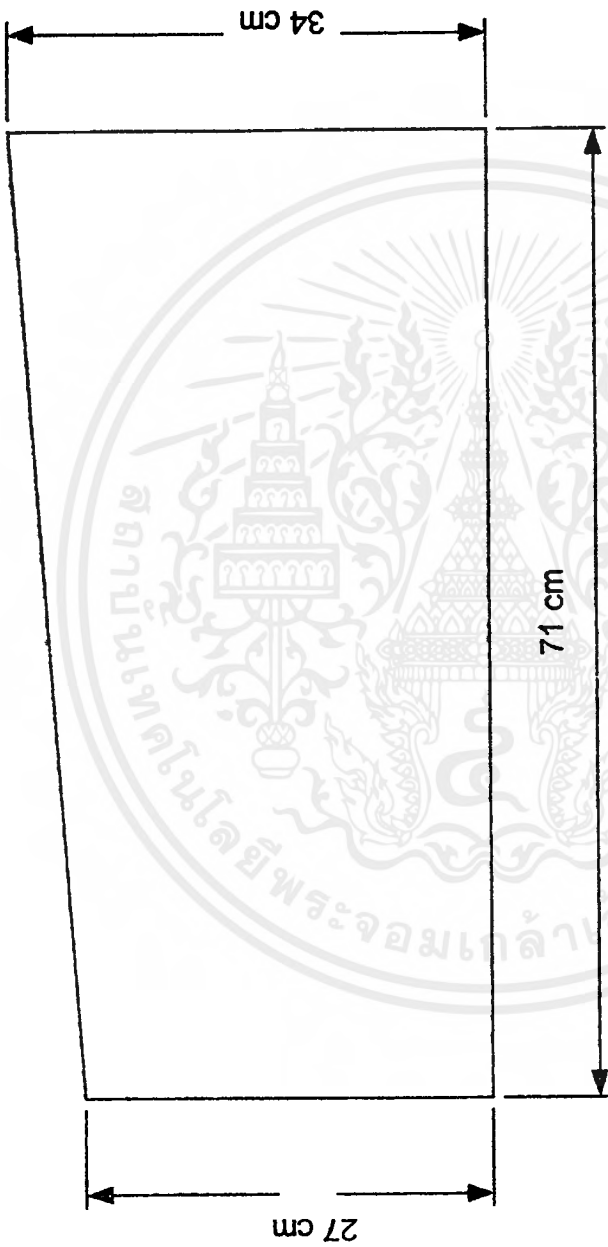
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



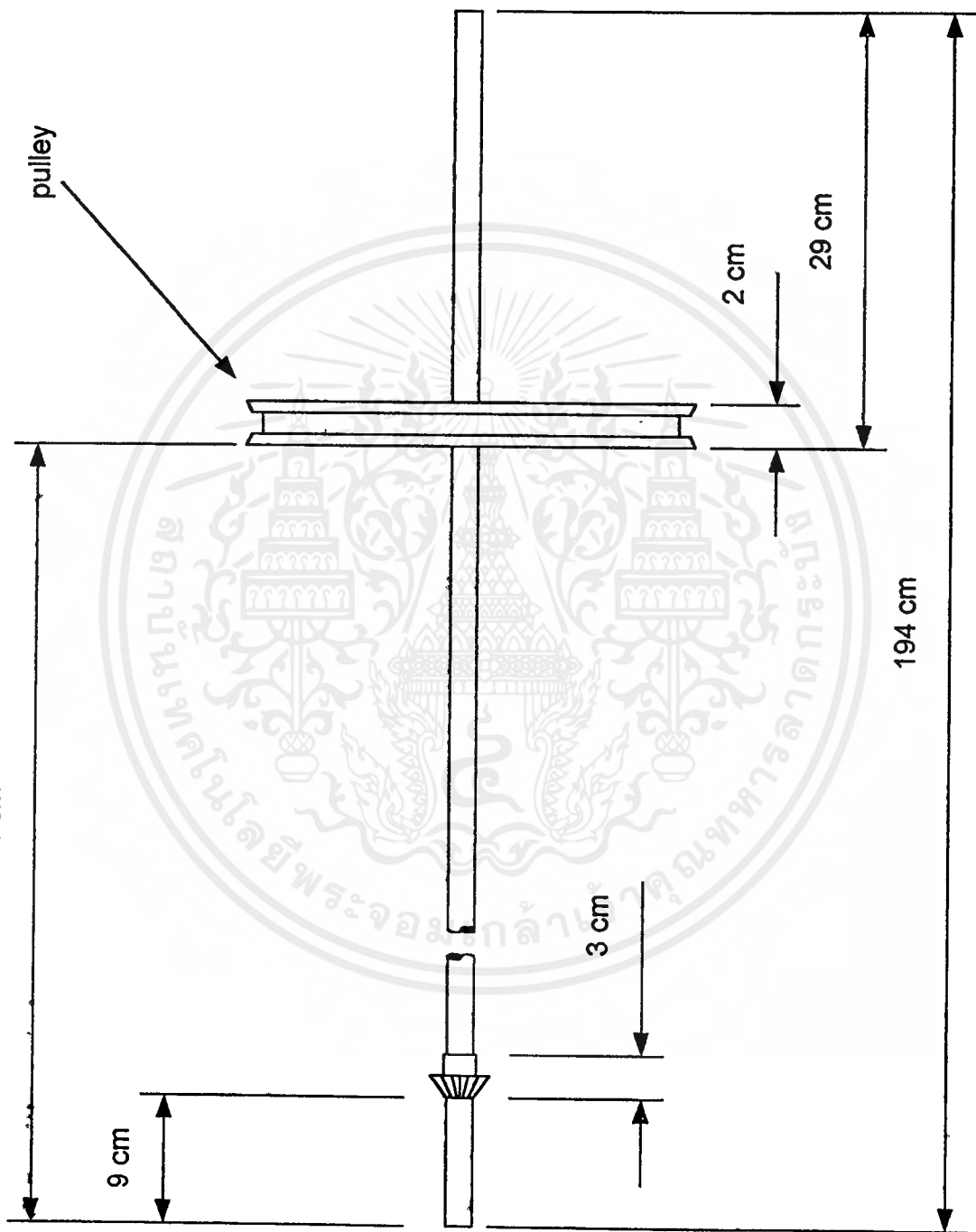
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผ่นรองหัวฐาน



ใบทางเสือ



เพลาสั่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้