

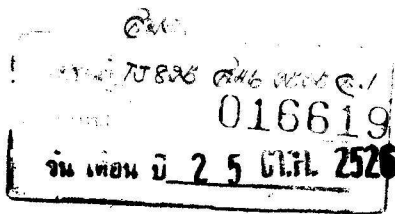


กำหนดลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

โดย

นาย สมาน เสนงาม

2525



คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



งานวิจัยเรื่อง "กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก"

โดย นาย ส้มาน เล่นงาม

เสนอใน การประชุมทางวิชาการ เรื่อง "ปัญหาพลังงานและการแก้ไข"

จัดโดย วสท. ภาควิชา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น

ระหว่าง วันที่ 2-4 กรกฎาคม 2524

ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

หัวข้องานวิจัย

กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ชื่อผู้วิจัย

นายสมาน เสงี่ยม วศ.ม.

สถานที่ทำงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นโครงการออกแบบ สร้างเพื่อทดสอบสมรรถนะต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ต้นแบบที่สร้างขึ้นเป็นกังหันลมแกนราบ แบบ ๓ ใบพัด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓.๓๖ เมตร ใบพัดทำด้วยไม้สัก เป็นรูปแผนอากาศ หมายเลข NACA ๒๓๑๒ ทำมุมใบเฉลี่ย ๖ องศา สำหรับความเร็วลม ๔ เมตร/วินาที ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของกังหันให้ทำงานที่ความเร็วคงที่ ๒๐๐ รอบ/นาที ใช้สายพานและล้อสายพาน ๒ ชุด หดรอบความเร็วขึ้นเป็น ๑๖๐๐ รอบ/นาที สำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ดัดแปลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของรถยนต์

ผลจากการทดลองติดตั้งและทดสอบ ปรากฏว่า อุปกรณ์ควบคุมความเร็วทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถเก็บข้อมูลทางด้านสมรรถนะของกังหันลมได้สมบูรณ์ เนื่องจากมีปัญหาบางประการ กล่าวคือ ต้นแบบที่สร้างเป็นกังหันลมแบบความเร็วสูง การทำสมดุลและความประณีตในการสร้างไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน จนทำให้แกนใบพัดอันหนึ่งเกิดเสียหาย เนื่องจากความล้า หลังจากทำงานไปประมาณ ๓๖๐ ชั่วโมง สรุปได้ว่า ปัญหาและจุดอ่อนในการสร้างกังหันลมความเร็วสูง มีหลายประการที่จำเป็นมากประการแรกคือ การทำสมดุล ประการที่สอง ฝีมือ ความประณีตในการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ประการที่สาม ความเสถียรภาพ และแข็งแรงของโครงสร้าง ประการที่สี่ การสูญเสียเนื่องจากความฝืดควรร้อยที่สุด ดังนั้น จากข้อเสนอแนะเหล่านี้ การออกแบบและสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานอย่างแท้จริง ก็สามารถทำอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพตลอดจนมีอายุใช้งานได้คุ้มค่าตามต้องการ

คำนำ

ผลงานวิจัยเรื่องกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กรุ่นนี้ ข้าพเจ้าได้รวบรวมขึ้นมาใหม่ ประกอบด้วยสาระที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นผลงานวิจัยโดยสรุปที่ใช้ประกอบการบรรยาย ในการเล่นต่อที่ประชุมทางวิชาการเรื่อง "ปัญหาพลังงานและการแก้ไข" วันที่ 2-4 ก.ค. 2524 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งจัดขึ้นโดย วสท.ภาคใต้, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, และสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น และส่วนที่สอง เป็นภาคผนวกสำหรับแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเฉพาะส่วนที่สำคัญ สำหรับบุคคลที่สนใจแต่ ไม่ได้มีโอกาสเข้าร่วมประชุมในครั้งนั้น ทั้งนี้โดยตั้งสมมุติฐานว่าท่านที่สนใจงานวิจัยเรื่องนี้ คงมีพื้นฐานทางด้านทฤษฎีพอสมควรจึงจะไม่แสดงบททฤษฎีเอาไว้ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากมีข้อผิดพลาดประการใด หรือท่านใดมีข้อเสนอแนะ ปรึกษาหารือ กับข้าพเจ้าในเรื่องนี้ทั้งใน ส่วนของผลงานวิจัยและปัญหาอื่นๆในด้านพลังงานลม ข้าพเจ้ายินดีน้อมรับเป็นอย่างยิ่ง

สัมาน เสนงาม

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	
บทคัดย่อ	SN-1
บทนำ	SN-2
ต้นแบบ	SN-2
ผลการศึกษาทดสอบ	SN-4
สรุป	SN-5
เอกสารอ้างอิง	SN-6

ภาคผนวกที่ 1

รายละเอียด การคำนวณออกแบบ สร้างและทดสอบ

ข้อมูลทางเทคนิค	1
การออกแบบใบพัด	2
การสร้างใบพัด	11
การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ	14
การตัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	23
ระบบถ่ายทอดกำลัง	36
การทดลองใช้งาน	38

ภาคผนวกที่ 2

ชนิด คุณสมบัติและข้อแนะนำของกังหันลม

ชนิด คุณสมบัติ และข้อแนะนำของกังหันลม	43
---	----

สัญลักษณ์และความหมาย

พื้นที่กวาดของใบพัด	α	มุมปะทะของใบพัด
ความกว้างของคอรัค	β	มุมบิกของใบพัด
สัมประสิทธิ์ แรงในแนวแกน	δ	ระยะนิวของแพนอากาศ
สัมประสิทธิ์ แรงดุก	λ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ
สัมประสิทธิ์ แรงยก	λ_r	อัตราส่วนความเร็วตำแหน่งใดๆ
สัมประสิทธิ์ แรงบิก	ψ	มุมสัมพัทธ์ของลมกับระนาบการหมุน
สัมประสิทธิ์ กำลัง	ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
แรงในแนวแกน	σ	ตัวประกอบความหนาแน่นของใบพัด
แรงหนีศูนย์กลาง	ω	ความเร็วเชิงมุมของกังหัน
แรงจากสปริง		
แรงเสียดทาน		
ค่าคงที่ของสปริง		
แรงบิก		
โมเมนต์เนื่องจากความดัน		
มวล		
กำลัง		
กำลังของกระแสลม		
รัศมีของกังหัน		
เลขเรโนลด์ส์		
ระยะรัศมี		
ความหนาของแพนอากาศ		
ความเร็วลมสัมบูรณ์		
ความเร็วลมสัมพัทธ์		

กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

บทนำ

วิกฤตการณ์ด้านพลังงานของโลกปัจจุบัน ทำให้ประเทศต่าง ๆ จำเป็นต้องเสาะแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น พลังงานลมจัดว่าเป็นรูปแบบพลังงานที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง สามารถนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้กังหันลม แต่เนื่องจากลักษณะกระจายของความเร็วและทิศทางลมไม่สม่ำเสมอแน่นอน ทำให้การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงหลายสาขาประกอบกัน

งานวิจัยในขั้นแรกนี้ ต้องการศึกษาระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม โดยใช้ต้นแบบขนาดเล็กเป็นตัวอย่างในการศึกษา ขั้วมุด และปัญหาต่าง ๆ ตั้งแต่การออกแบบ การสร้าง การปรับแต่ง และการติดตั้งใช้งาน ตลอดจนการดูแลบำรุงรักษา ต้นแบบที่ใช้เป็นกังหันลมแกนราบ ๓ ใบพัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓.๓๖ เมตร ออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าได้ ๑๐๐ วัตต์ ที่ความเร็วลม ๔ เมตร/วินาที

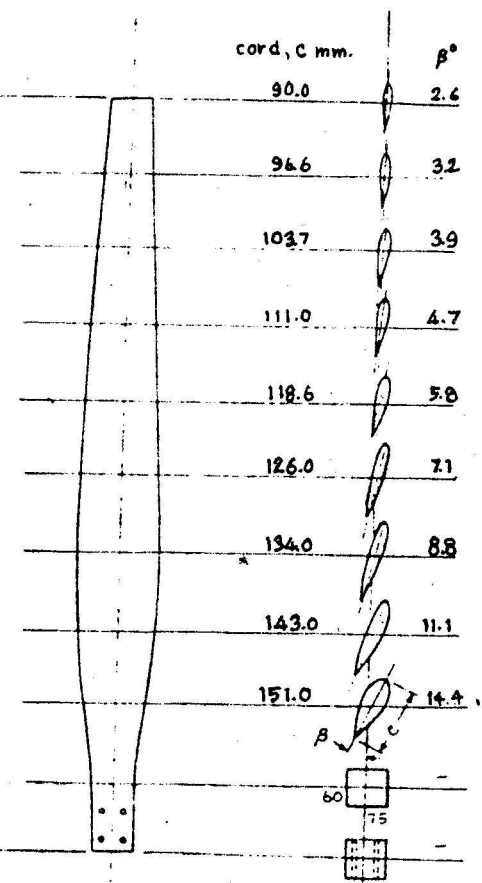
ต้นแบบ มีส่วนประกอบที่สำคัญ ๕ ส่วน คือ

๑. ตัวกังหัน
๒. อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ
๓. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
๔. ชุดสายพานทดรอบ
๕. หอคอย

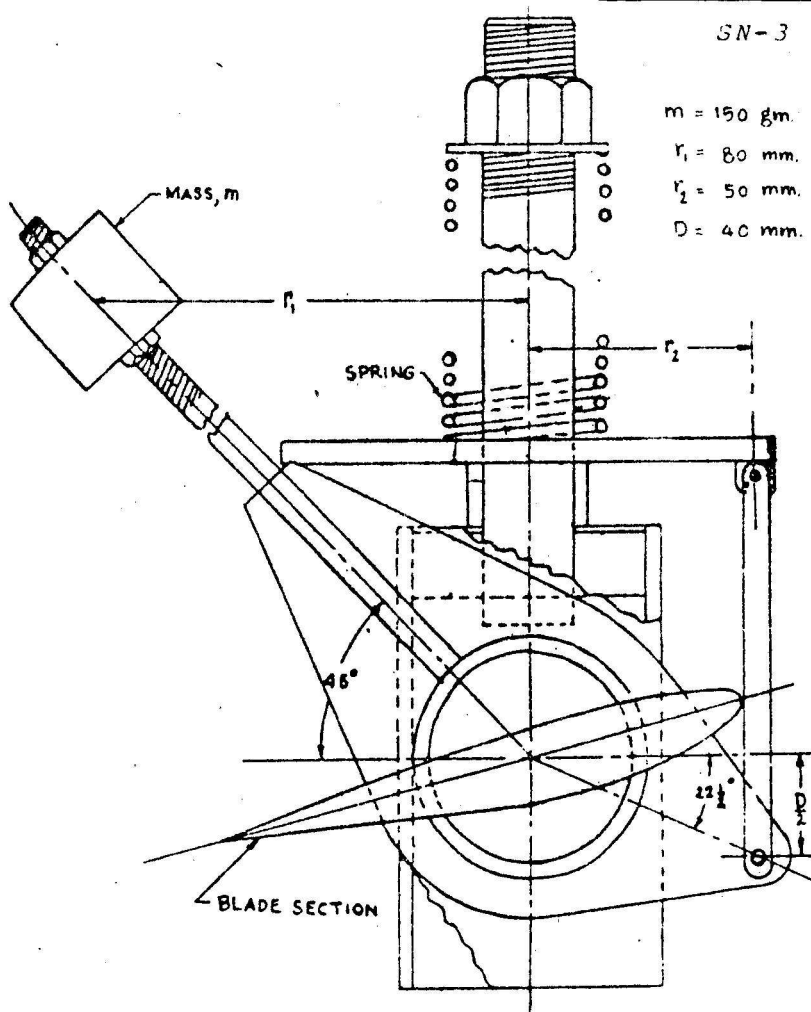
๑. ตัวกังหัน ประกอบขึ้นด้วย

๑.๑ ใบพัด จำนวน ๓ ใบ ทำจากไม้สนยา อบแห้ง แต่งเป็นรูปเพนอากาศ หมายเลข NACA ๒๓๑๒ โคนใบพัดทำมุมปัด ๑๔.๔° ความยาวคอรีด ๑๕๑.๐ มม. ปลายใบทำมุมปัด ๒.๖° ความยาวคอรีด ๔๐.๐ มม. เคลือบผิวไม้ด้วยสีกันน้ำ

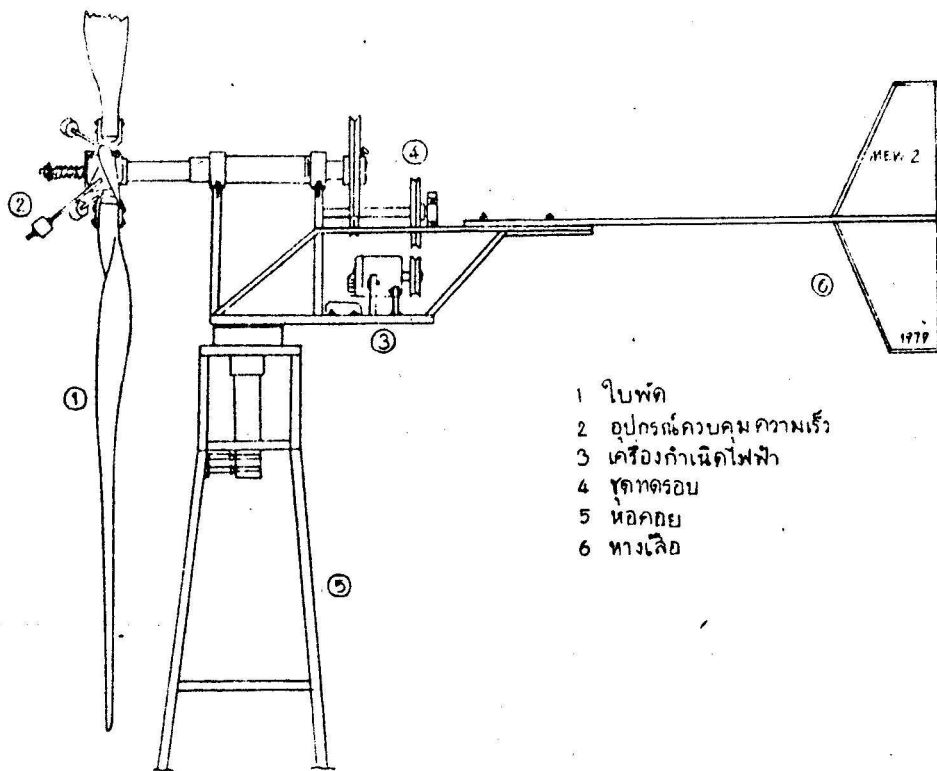
๑.๒ คุมล้อและเพลลา เชื่อมประกอบจากเหล็กกล้า ติดตั้งลูกปืนและที่ยึดจารบี ที่จับยึดใบพัดสามารถหมุนปรับมุมใบพัดได้ พร้อม ๆ กันด้วยกลไกข้อต่อ



รูปที่ 1 รูปทรงของใบพัด



รูปที่ 2 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ



- 1 ใบพัด
- 2 อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว
- 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4 ชุดทดสอบ
- 5 หอคอย
- 6 ทางลัด

รูปที่ 3 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

๒. อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ มีลักษณะดังรูปที่ ๒ คู่มือหน้าปกทั้ง ๓ ติดตั้งบนแขนที่จับยึดใบพัด สามารถปรับระยะรัศมีที่ติดตั้งได้ มีสปริง ๑ ตัวสำหรับทำงานร่วมกัน โดยเป็นตัวยึดใบพัดกลับตำแหน่งปกติ อุปกรณ์ชุดนี้จะทำงานพร้อม ๆ กันเนื่องจากมีข้อต่อทำให้รวมเป็นชุดเดียวกัน
๓. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หักแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเก่าสำหรับใช้กับรถยนต์ ซึ่งปกติทำงานที่ความเร็วประมาณ ≥ ๓๖๐๐ รอบ/นาที หลังจากทดสอบสมรรถนะแล้ว ต้องพันขดลวด armature ใหม่ จำนวนรอบเป็น ๖ เท่าของเดิม หลังจากนั้นทดสอบได้ว่า ที่ความเร็ว ๑๖๐๐ รอบต่อนาที สามารถให้ศักดาไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อภาระ เป็น ๑๕ โวลต์ ใช้กับงานประจุแบตเตอรี่ขนาด ๑๒ โวลต์ได้
๔. ชุดสายพานทดรอบ ใช้สำหรับเพิ่มความเร็วรอบที่ได้จากกังหันลมให้สูงขึ้น เป็น ๑๖๐๐ รอบ/นาที สำหรับขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้สายพานรูปตัว V และล้อสายพาน ๒ ชุด
๕. หอคอย เชื่อมประกอบจากเหล็กฉาก ขนาด $๔๐ \times ๔๐ \times ๔$ มม. และ $๒๕ \times ๒๕ \times ๔$ มม. เป็นแบบ ๔ เสา สูง ๓.๖ เมตร ฐานกว้าง ๑.๓๔ เมตร

ผลการศึกษาทดสอบ

หลังจากได้ทดลองติดตั้งนอกสถานที่ประมาณ ๓ เดือน คิดเป็นชั่วโมงทำงานประมาณ

๓๖๐ ชั่วโมง ประสบปัญหาและผลที่น่าสนใจดังนี้

๑. ตัวกังหัน

- เนื่องจากน้ำหนักใบพัดไม่เท่ากันทั้ง ๓ ใบ การทำสมดุล ไม่ละเอียดพอ เมื่อทำงานที่ความเร็วสูงเกิดการสั่นสะเทือน
- สมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ใกล้เคียงที่ออกแบบ เมื่อไม่มีภาระจะเริ่มหมุนที่ความเร็ว ๒.๔ เมตร/วินาที และเพิ่มความเร็วเป็น ๑๔๐ รอบ/นาที ที่ความเร็วลม ๔ เมตร/วินาที
- แกนใบพัดอันหนึ่งหัก เนื่องจากความล้า ต้องถอดประกอบเพื่อซ่อมแซม

๒. อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

- ทำงานอย่างได้ผล

๓. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- ทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีลักษณะเสื่อมสภาพ เนื่องจากเป็นของเก่า

๔. ชุดสายพานทศรอบ

- มีความสูญเสียเนื่องจากความฝืดมาก สังเกตได้จากแรงบิดที่ใช้ในการเริ่มหมุนของ
กังหันกังมี

- สายพาน ๑ ชุด ต้องใช้แรงบิดเริ่มหมุนประมาณ ๑ นิวตัน-เมตร

- สายพาน ๒ ชุด ต้องใช้แรงบิดเริ่มหมุนประมาณ ๓.๗ นิวตัน-เมตร

จะเห็นได้ว่า การทศรอบให้สูงขึ้นโดยใช้สายพานหรือกลไกอื่น ทำให้มีผลต่อการสูญเสีย

พลังงานของระบบ และการเริ่มหมุนของกังหันลมต้องใช้ลมที่มีความเร็วสูง ซึ่งในกรณีนี้ต้องใช้ลมที่มี
ความเร็วถึง ๖ เมตร/วินาที

๕. หอคอย หลังจากติดตั้งทดสอบช่วงแรก พบว่า โครงสร้างของหอคอยยังไม่แข็งแรง

เกร็งพอ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนทั้งระบบ ภายหลังได้แก้ไขเปลี่ยนแปลงจากหอคอยที่มีเสาตั้ง ๔

ท่อนมุมฉากเชิงในแนวตั้ง ๖.๕° ตลอด ให้เป็นหอคอยที่มี ๒ ชั้น ชั้นบนท่อนมุมฉาก ๖.๕° เท่าเดิม

เพื่อเปิดระยะให้ใบพัดชั้นล่างขยายฐานให้กว้างขึ้น เป็น ๑.๓๕ เมตร ทำให้เสาเชิงเป็นมุม ๑๒°

ผลการแก้ไขปรากฏว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

สรุปและเสนอแนะ

แม้ว่าข้อมูลทางสมรรถนะของกังหันลมจะไม่สมบูรณ์ แต่ก็ได้สิ่งที่น่าสนใจ ดังนี้

๑. ปัญหาและจุดอ่อนในการสร้างกังหันลม

๑.๑ การทำสมมูลย์ ต้องละเอียดถูกต้อง

๑.๒ มีมือความประณีตในการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญ

๑.๓ การออกแบบต้องคำนึงถึงเสถียรภาพ ความแข็งแรงของโครงสร้าง

โดยให้มีน้ำหนักเบาด้วย

๑.๔ ต้องพยายามลดการสั่นสะเทือนให้มากที่สุด

๒. ข้อเสนอแนะในการสร้างส่วนประกอบ

๒.๑ ใบพัดควรมีรูปร่างที่ถูกต้องและเหมือนกันทุกใบ

๒.๒ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรเลือกหรือออกแบบที่ใช้งานที่ความเร็วต่ำได้ดี

๒.๓ การทศรอบความเร็ว ไม่ควรใช้เกิน ๒ ชุด โดยเฉพาะในกังหันขนาดเล็ก

๒.๔ หอคอยต้องแน่นหนาและฐานกว้างพอสมควร

เอกสารอ้างอิง

๑. ณัฐ กาญจนโชติ และคณะ, "กังหันลมขนาดใหญ่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า", รายงานหมายเลข ๔/๒๕๒๑, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๒.
๒. สุรวัฒน์ อภิรักษ์ชัยกุล, "การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก", รายงานหมายเลข ๒/๒๕๒๓, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๓.
๓. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ ๑ "โครงการวิจัยและพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม" คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๓.
๔. Jansen, W.A.M. and Smulders, P.T. "Rotor Design for Horizontal Axis Windwills." S.W.D., Netherlands; 1977.
๕. United Nations. "Proceedings of the Meeting of the Expert Working Group on the Use of Solar and Wind Energy." United Nations, New York; 1976.

ข้อมูลทางเทคนิคในการออกแบบของกังหันลม

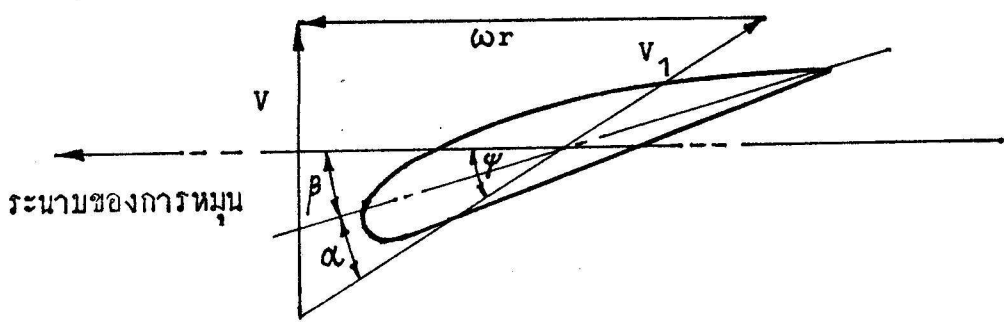
Power Output (mech.)	120 W. at 4.16 m/s wind speed
Rotor Diameter	3.0 m. (3.36)*
No. of Blades	3
Type of Rotor	propeller
Blade Profile	NACA 2312
Tip Speed Ratio	5.75
Solidity	7.6% (5.7)*
Power Coefficient	0.4
Estimated RPM	200 (190)*

* ค่าที่เป็นจริงหลังการสร้าง

การออกแบบใบพัด

การออกแบบใบพัดของกังหันลมแบบ propeller นั้นต้องอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองค้นคว้าของผู้อื่นที่ได้ทำมาก่อน ในที่นี้จะใช้ตามเอกสารอ้างอิง (5) ดังแสดงรูปภาพเสนอแนะไว้ในภาคผนวกที่ ๒ อันได้แก่ ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบที่เหมาะสม, ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของใบพัดที่เหมาะสม, ส.ป.ส.กำลังที่จะได้จากกังหันชนิดต่างๆ เหล่านี้เป็นค่นส่วนรูปแบบ และข้อมูลของแผนอากาศใช้ตามเอกสารอ้างอิง (6)

ก่อนอื่นพิจารณา เวกเตอร์ของความเร็วค่าต่างๆที่เกิดขึ้นบนใบพัด ดังนี้



รูป ก. แสดงถึง เวกเตอร์ความเร็วบนใบพัด

ในที่นี้

- v = ความเร็วลมก่อนปะทะใบพัด
- ωr = ความเร็วของใบพัดในระนาบของการหมุน
- v_1 = ความเร็วสัมพัทธ์ของลมที่ปรากฏต่อใบพัด
- α = มุมปะทะ
- β = มุมใบพัด

สำหรับคามุมปะทะนั้นจะออกแบบที่ค่า $(\frac{C_L}{C_D})_{min}$ ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับแผนอากาศแต่ละแบบ ดังนั้นสำหรับใบพัดแบบกังหันแกนนอน ค่าความเร็วที่เปลี่ยนไปตามระยะรัศมี โดยมีความเร็วต่ำสุดที่โคนใบ และสูงสุดที่ปลายใบนั้นจำเป็นต้องมีมุมใบพัดแปรตามไปด้วย ในการออกแบบนั้นก็สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น โดยใช้กราฟจากเอกสารอ้างอิง (4) ดังในภาคผนวกที่ ๒ และสมการต่อไปนี้⁽⁴⁾

$$\lambda_r = \frac{\sin \psi (2\cos \psi - 1)}{(1 - \cos \psi)(2\cos \psi + 1)} \dots \dots (\eta - 1)$$

$$= \frac{r}{R} \cdot \lambda$$

Blade angle, $\beta = \psi - \alpha \dots \dots \dots \dots (\eta - 2)$

การคำนวณหารูปร่าง profile ของใบพัด

การกำหนดขนาดของใบพัดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรที่ออกแบบนี้ ได้จากข้อแนะนำที่เสนอไว้ในหนังสืออ้างอิง(5) ดังแสดงในภาคผนวกที่ ๒ โดยสังเกตจาก

- รูปที่ ๑ ลักษณะพื้นฐานของกังหันลมแบบต่างๆ
- รูปที่ ๒ สัมประสิทธิ์กำลังที่แปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ
- รูปที่ ๓ สัมประสิทธิ์แรงบิดที่แปรตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบ
- และรูปที่ ๕ อัตราความแน่นของใบพัดที่เหมาะสม

จะเห็นได้ว่า กังหันลมแบบpropeller ๓ ใบพัดนั้นจะมีประสิทธิภาพที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบ, λ มีค่า ๕ - ๑๐ ในที่นี้จึงเลือกออกแบบที่ค่า $\lambda = 5.75$

จากรูปที่ ๒ ได้ค่า ส.ป.ส.กำลัง ประมาณ ๐.๔

ดังนั้นถ้าต้องการกำลังการผลิต ประมาณ ๑๒๐ วัตต์

จะต้องใช้ลมที่มีกำลัง $= \frac{120}{0.4} = 300$ วัตต์

จากสมการ พลังงานจลน์ของอากาศ มีค่าเป็น

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

เมื่อค่าความเร็วลมเฉลี่ยในจังหวัดสงขลา มีค่าเป็น ๔.๑๖ เมตร/วินาที..(1)

แทนค่า สมการได้

$$300 = \frac{1}{2} (1.225)(A)(4.16)^3$$

$$A = 6.8 \quad \text{ตารางเมตร}$$

นั่นคือกังหันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง = 2.94 เมตร

ในที่นี้จะใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของกังหันเป็น 3 เมตร

ส่วนขนาดของใบพัดแต่ละใบหาได้จาก

$$\text{พ.ท.ใบพัด } \bullet \text{ ใบ} = \frac{1}{4} \pi D^2 (r) / 3$$

นั่นคือ เมื่อใบพัดมีความยาว ๑.๕ เมตร จะมีความกว้างเฉลี่ย ๑๒๐ มม.

รูปร่างหน้าตัดที่เป็นรูปแพนอากาศนั้น ในงานครั้งนี้เลือกใช้แพนอากาศหมายเลข NACA 2312 โดยใช้ค่ามุมปะทะเป็น ๔ องศา(รายละเอียดเพิ่มเติมดูได้จากเอกสารอ้างอิง 6)

ผลการคำนวณหารูปร่างของใบพัดสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

STATION	r (m)	λ_r	ψ (degree)	β (degree)	chord (mm)
0	0	-	-	-	60x75 □
1	0.125	-	-	-	60x75 □
2	0.250	0.958	30.9	26.9	147.0
3	0.375	1.437	23.29	19.29	158.4
4	0.500	1.916	18.42	14.42	151.0
5	0.625	2.395	15.14	11.14	143.0
6	0.750	2.874	12.81	8.81	134.0

STATION	r (m)	λ_r	ψ (degree)	β (degree)	chord (mm)
7	0.875	3.353	11.08	7.08	126.0
8	1.000	3.832	9.76	5.76	118.6
9	1.125	4.311	8.71	4.71	111.0
10	1.250	4.790	7.86	3.86	103.7
11	1.375	5.269	7.17	3.17	96.6
12	1.500	5.750	6.58	2.58	90.0

หมายเหตุ ที่ STATION 0 และ 1 นั้นเป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดหน้าตัด 50 x ๙๕ มม. เป็นบริเวณสำหรับยึดจับกับกุ่มล่อของกังหัน

ในการสร้างใบพัดนี้จะใช้แผนอากาศหมายเลข NACA 2312 เป็นหลัก นอกจากบริเวณใกล้โคนใบพัดจำเป็นต้องใช้หมายเลขที่หนาขึ้นเพื่อรับแรงค้ำที่เกินขึ้นมากบริเวณนี้ ดังนี้

STATION	AIRFOIL NO.
2	NACA 0040
3	NACA 2330
4	NACA 2320
5	NACA 2316
6-12	NACA 2312

การเขียนAirfoil Profile

ก่อนอื่นต้องออกแนวความกว้างคอร์ดก่อนตามขนาดพื้นที่ใบพัดที่คำนวณได้ ในขั้นนี้ได้ออกแนวขนาดความกว้างคอร์ดดังในรูป ข. ใช้ความกว้างคอร์ดของแต่ละ station มาคำนวณหารูปร่างแผนอากาศได้ดังนี้

ขั้นที่ ๑ เขียนเส้น camber โดยใช้สมการ (6)

$$y = \frac{y_A}{x_A^2} (x)(2x_A - x) \quad \dots \text{for } 0 \leq x \leq x_A$$

$$y = \frac{y_A}{(c-x_A)^2} (c-x)(c+x-2x_A) \quad \dots \text{for } x_A \leq x \leq c$$

ขั้นที่ ๒ จากเส้น camber เขียนเส้นนิวบนและนิวล่างของแพนอากาศโดยใช้ค่า δ จากสมการ (6)

$$\delta = \pm t \left[1.4845 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.6300 \frac{x}{c} - 1.7580 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 1.4215 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.5075 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right]$$

เมื่อ x เป็นระยะบนเส้นคอร์ด วัดจากขอบนำ (ด้านหน้า)
สรุปค่าที่คำนวณได้สำหรับรูปร่างของใบพัดที่ station ต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

STATION 0; Rectangle 60 x 75 mm.

STATION 1; Rectangle 60 x 75 mm.

STATION 2; NACA 0040 chord length, $c = 147$ mm
thickness, $t = 58.8$ mm

NO camber

$x(\text{mm})$	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140
$\delta(\text{mm})$	14.74	19.8	23.1	24.54	28.2	29.3	28.3	24.47	18.9	12.0	3.83

STATION 3; NACA 2330 chord length, $c = 158.4$ mm
thickness, $t = 47.52$ mm

$$x_A = 47.52 \text{ mm}$$

$$y_A = 3.17 \text{ mm}$$

$x(\text{mm})$	5	10	15	20	30	40	50	70	90	110	130	150
$y(\text{mm})$	6.3	1.19	1.68	2.05	2.73	3.1	3.17	3.04	2.7	2.16	1.42	0.46
$\delta(\text{mm})$	11.5	15.5	18.2	20.1	22.5	23.55	23.7	22.26	19.1	14.72	9.48	3.36

STATION 4; NACA 2320

$$c = 151 \text{ mm}$$

$$t = 30.2 \text{ mm}$$

$$x_A = 45.3 \text{ mm}$$

$$y_A = 3.02 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	140
y(mm)	0.63	1.19	1.67	2.08	2.67	2.97	3.01	2.96	2.69	2.21	1.51	0.6
δ (mm)	7.46	10.1	11.76	13.0	14.4	15.0	15.0	14.63	12.83	10.2	6.74	2.8

STATION 5; NACA 2316

$$c = 143 \text{ mm}$$

$$t = 22.88 \text{ mm}$$

$$x_A = 42.9 \text{ mm}$$

$$y_A = 2.86 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	140
y(mm)	0.63	1.17	1.63	2.0	2.6	2.85	2.84	2.77	2.47	1.93	1.16	0.17
δ (mm)	5.8	7.8	9.1	10.0	11.04	11.4	11.35	10.9	9.3	7.0	4.16	0.8

STATION 6; NACA 2312

$$c = 134 \text{ mm}$$

$$t = 16.08 \text{ mm}$$

$$x_A = 40.2 \text{ mm}$$

$$y_A = 2.68 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	40	50	70	90	110	120
y(mm)	0.62	1.17	1.63	2.0	2.63	2.66	2.41	1.92	1.20	0.22
δ (mm)	4.2	5.63	6.53	7.13	8.0	7.9	6.9	5.27	3.2	0.7

STATION 7; NACA 2312

$$c = 126 \text{ mm}$$

$$t = 15.12 \text{ mm}$$

$$x_A = 37.8 \text{ mm}$$

$$y_A = 2.52 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120
y(mm)	0.62	1.15	1.6	1.96	2.41	2.52	2.36	1.94	1.26	0.33
δ (mm)	4.05	5.41	6.23	6.84	7.44	7.56	6.85	5.37	3.4	0.97

STATION 8; NACA 2312

$$c = 118.6 \text{ mm}$$

$$t = 14.23 \text{ mm}$$

$$x_A = 35.58 \text{ mm}$$

$$y_A = 2.37 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	30	40	50	70	90	110
y(mm)	0.62	1.14	1.57	1.91	2.31	2.36	2.3	1.96	1.35	0.46
δ (mm)	3.92	5.21	6.02	6.56	7.05	7.09	6.79	5.5	3.64	1.31

STATION 9; NACA 2312

$$c = 111.0 \text{ mm}$$

$$t = 13.32 \text{ mm}$$

$$x_A = 33.3 \text{ mm}$$

$$y_A = 2.22 \text{ mm}$$

x(mm)	5	10	15	20	30	40	60	80	100
y(mm)	0.62	0.2	1.55	1.86	2.19	2.20	1.96	1.42	0.58
δ (mm)	3.77	5.0	5.75	6.79	6.64	6.58	5.57	3.84	1.61

STATION 10; NACA 2312

$c = 103.7$ mm
 $t = 12.44$ mm
 $x_A = 31.11$ mm
 $y_A = 2.074$ mm

$x(mm)$	5	10	15	20	30	40	60	80	100
$y(mm)$	0.62	1.12	1.52	1.81	2.07	2.04	1.75	1.13	0.25
$\delta(mm)$	3.63	4.78	4.41	5.91	6.22	6.07	4.91	3.04	0.54

STATION 11; NACA 2312

$c = 96.6$ mm
 $t = 11.59$ mm
 $x_A = 29.0$ mm
 $y_A = 1.93$ mm

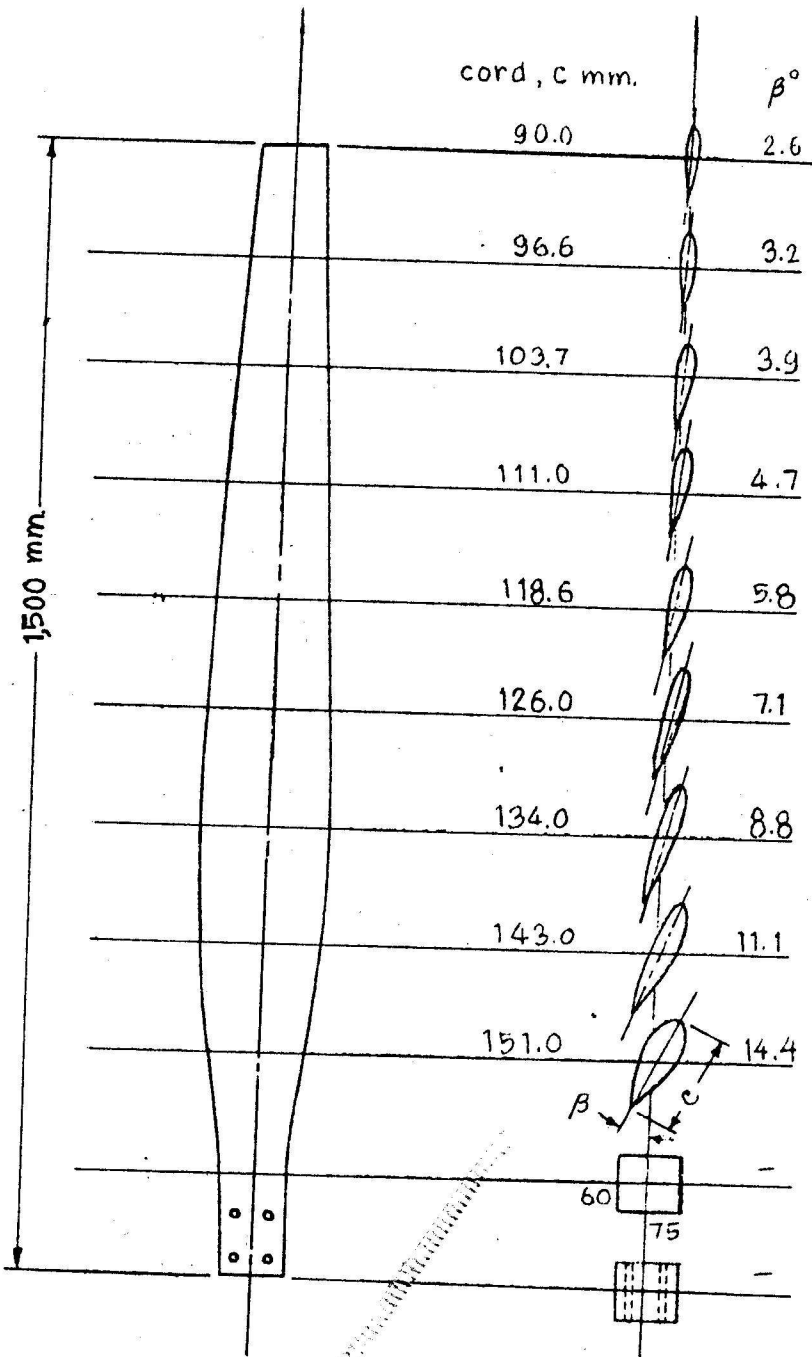
$x(mm)$	5	10	15	20	30	40	50	70	90
$y(mm)$	0.61	1.10	1.48	1.75	1.93	1.88	1.75	1.22	0.36
$\delta(mm)$	3.48	4.18	5.21	5.58	5.79	5.55	5.0	3.31	1.0

STATION 12; NACA 2312

$c = 90$ mm
 $t = 10.8$ mm
 $x_A = 10.8$ mm
 $y_A = 1.80$ mm

$x(mm)$	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	85
$y(mm)$	0.61	1.09	1.44	1.68	1.8	1.72	1.56	1.31	0.96	0.53	0.27
$\delta(mm)$	3.35	4.37	4.95	5.26	5.38	5.05	4.42	3.58	2.58	1.43	0.8

จากนั้นนำค่าต่างๆไปเขียนเป็นรูปแทนอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ลักษณะดังรูป ข. ซึ่ง
 เป็นรูปแบบใบพัดที่ออกแบบไว้



รูป ข. รูปร่างของใบพัด

การสร้างใบพัดกังหันลม

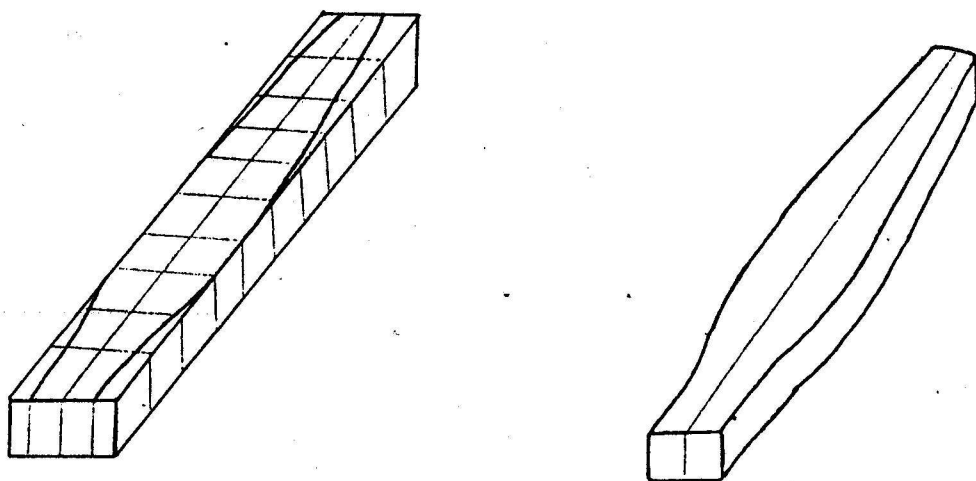
จะเห็นได้ว่า จาก เรืองการออกแบบใบพัดนั้นลักษณะ propeller ที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นต้องมีค่า Blade angle (β) ค่าหนึ่งสำหรับ local speed ratio (λ_r) ค่าหนึ่ง

ในการสร้างใบพัดจึงต้องสร้างให้มีบริเวณโคนใบพัด ซึ่งมี local speed ratio ค่ามีค่า Blade angle มาก และค่อย ๆ ลดลงไปทางปลายใบซึ่งมีค่า local speed ratio สูงขึ้นข้อ ข่งยากในการสร้างใบพัด ก็คือต้องสร้างให้รูป profile ที่ section หนึ่ง ๆ ถูกต้องและมี Blade angle ถูกต้องด้วยจึงจะได้ใบพัดที่ถูกต้องตามทฤษฎี

ขั้นตอนการสร้าง Blade

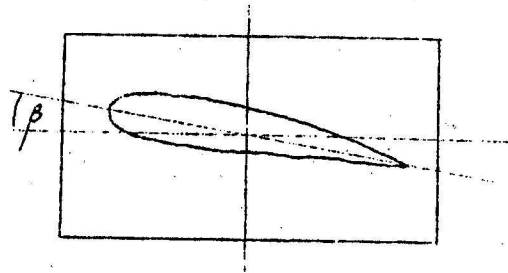
วัสดุที่ใช้ในการทำใบพัด เป็นไม้สยา ขนาดหน้าตัด ๓" x ๖" ยาว ๑.๕ เมตร จำนวน ๓ ท่อน สำหรับใบพัด ๓ ใบ เพื่อป้องกันการบิดตัวของใบพัดในภายหลังก่อนสร้างต้องนำไปอบให้แห้งสนิทเสียก่อน จะขอกล่าวถึงวิธีสร้างใบพัดเรียงตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

เริ่มโดยเขียนรูป project ของใบพัดที่มองจากด้านหน้าในแบบที่เขียนไว้ลงบนค้ำนกว้างของท่อนไม้ที่ใช้ทำใบพัดแล้วตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกดังรูป ค.

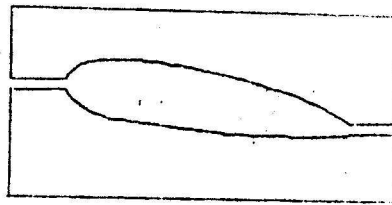


รูป ค.

จากนั้นตากเอาไม้บริเวณที่ไม่ได้เป็นตัวใบพัดออกขณะที่ตากไม้ออกก็ต้องใช้รูปแบบ blade profile ซึ่งตัดจากกระดาษแข็ง pattern มาทาบคูดูอยู่เสมอคอยระวังไม่ให้ตากเอาไม้ส่วนที่เป็นตัวใบออกแต่แง้ไม้ออกจนทั้ง ๑๐ section ที่แบ่งมีรูป profile ถูกต้องและมีค่า Blade angle ถูกต้อง คึงแสดงด้วยรูปภาพนี้จะทำให้เข้าใจวิธีสร้างใบพัดง่ายขึ้น

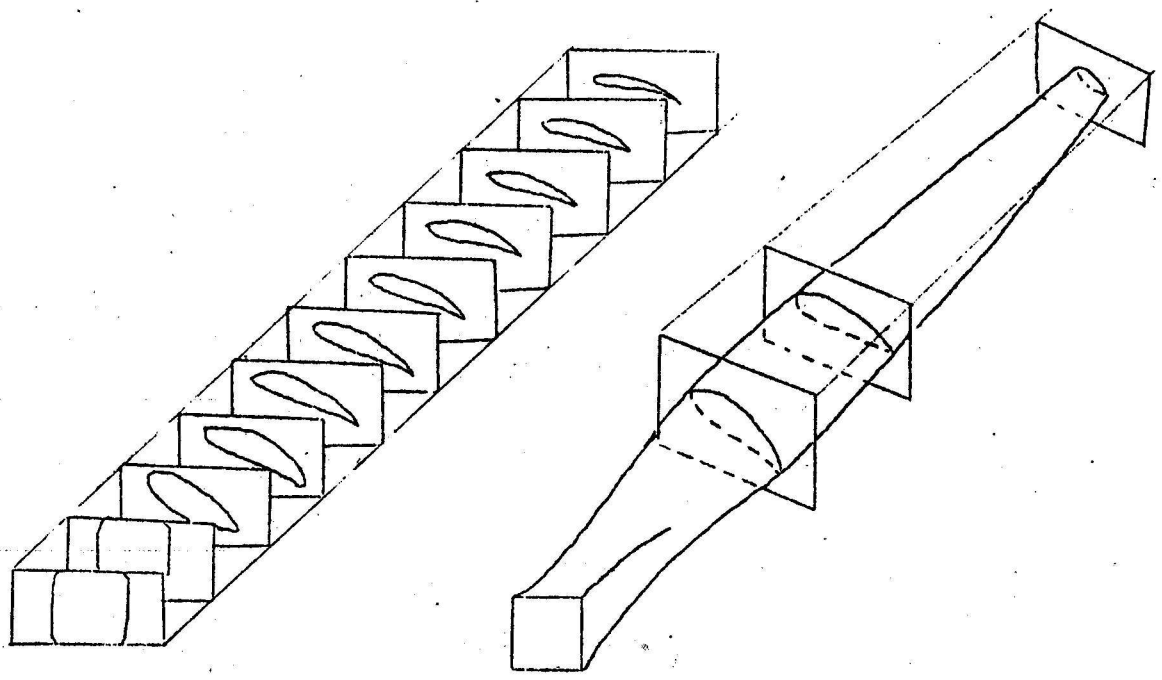


รูป ง. แสดงลักษณะของ pattern ที่ใช้ทาบขณะแต่งไม้ทำใบพัด



รูป จ. แสดงลักษณะ pattern ที่ใช้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน เพื่อความสะดวกเมื่อนำมาทาบขณะแต่งไม้ทำใบพัด

ขณะเหลาใบพัตนั้นเมื่อนำ pattern มาทาบต้องให้ขอบล่างของ pattern วางอยู่บน
 พื้นี่ราบเรียบ เพื่อให้ได้ Blade angle ที่ถูกต้อง ลักษณะการวาง pattern ดังรูป
 ฉ.



รูป ฉ.

เมื่อตากไม้และเหลาจนได้รูปรอยตัดและมุมของใบพัตถูกต้องแล้ว ก็ใช้กระดาษทราย
 ชักแต่งผิวไม้ให้เรียบแล้วทาเคลือบด้วยสีทาภายนอกที่สามารถทนความชื้นและแสงแดดได้ดี ก็
 จะได้ใบพัตที่พร้อมจะใช้งานได้

การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ

ในกังหันลมผลิตไฟฟ้า ควรมีการควบคุมความเร็วรอบของกังหัน ให้มีความเร็วคงที่ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการช่วยป้องกันความเสียหายของกังหันลมเมื่อเกิดลมแรงได้ด้วย การควบคุมส่วนใหญ่เป็นแบบกล โดยอาศัย แรงหนีศูนย์กลางของมวล และแรงจากสปริง โดยที่

แรงหนีศูนย์กลาง, $F_m = m \omega^2 r$

แรงจากสปริง, $F_s = kX$

จะเห็นได้ว่า แรง F_m เปลี่ยนไปตามความเร็ว ยกกำลังสอง ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น

ก. แบบ Air brake อาศัยแรงหนีศูนย์กลาง ที่เพิ่มขึ้น ดึงแผ่นโลหะที่ติดอยู่กับกังหัน ให้บิดออกไปด้านอากาศ ทำให้กังหันหมุนเร็วขึ้นอีกไม่ได้

ข. แบบจานเบรก อาศัยแรงหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ไปทำให้เบรกที่ติดอยู่กับเพลากังหัน ทำงาน ทำให้กังหันหมุนเร็วขึ้นอีกไม่ได้

ค. แบบปรับมุมใบพัด อาศัยแรงหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นไปปรับใบพัด ให้ attack angle เปลี่ยนแปลงไป เกิด drag force มากขึ้น กังหันลมก็จะหมุนช้าลง

ระบบเหล่านี้ อาศัย แรงหนีศูนย์กลางเริ่มทำงาน แล้วอาศัยแรงสปริงเป็นตัวคืนกลับค่าแห่งเดิม นอกจากนี้ยังมีระบบอื่นๆ อีกหลายระบบ

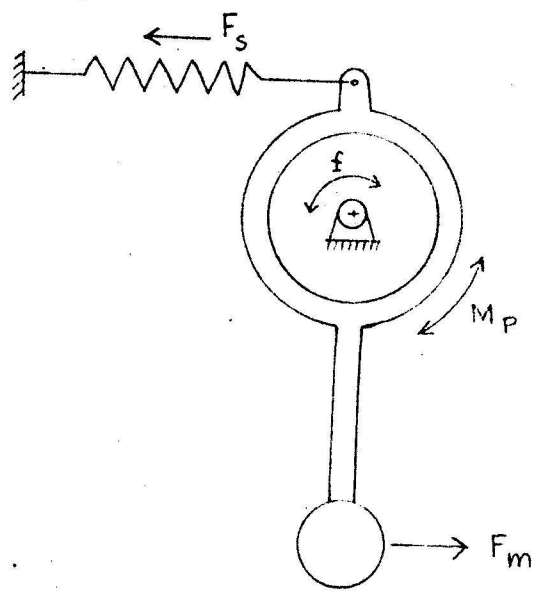
สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้แบบ ปรับมุมใบพัด โดยพิจารณาจากแรงต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

๑ แรงหนีศูนย์กลาง $F_m = m \omega^2 r$

๒ แรงจากสปริง $F_s = kX$

๓ แรงเสียดทาน, f ที่เกิดขึ้นใน bearings

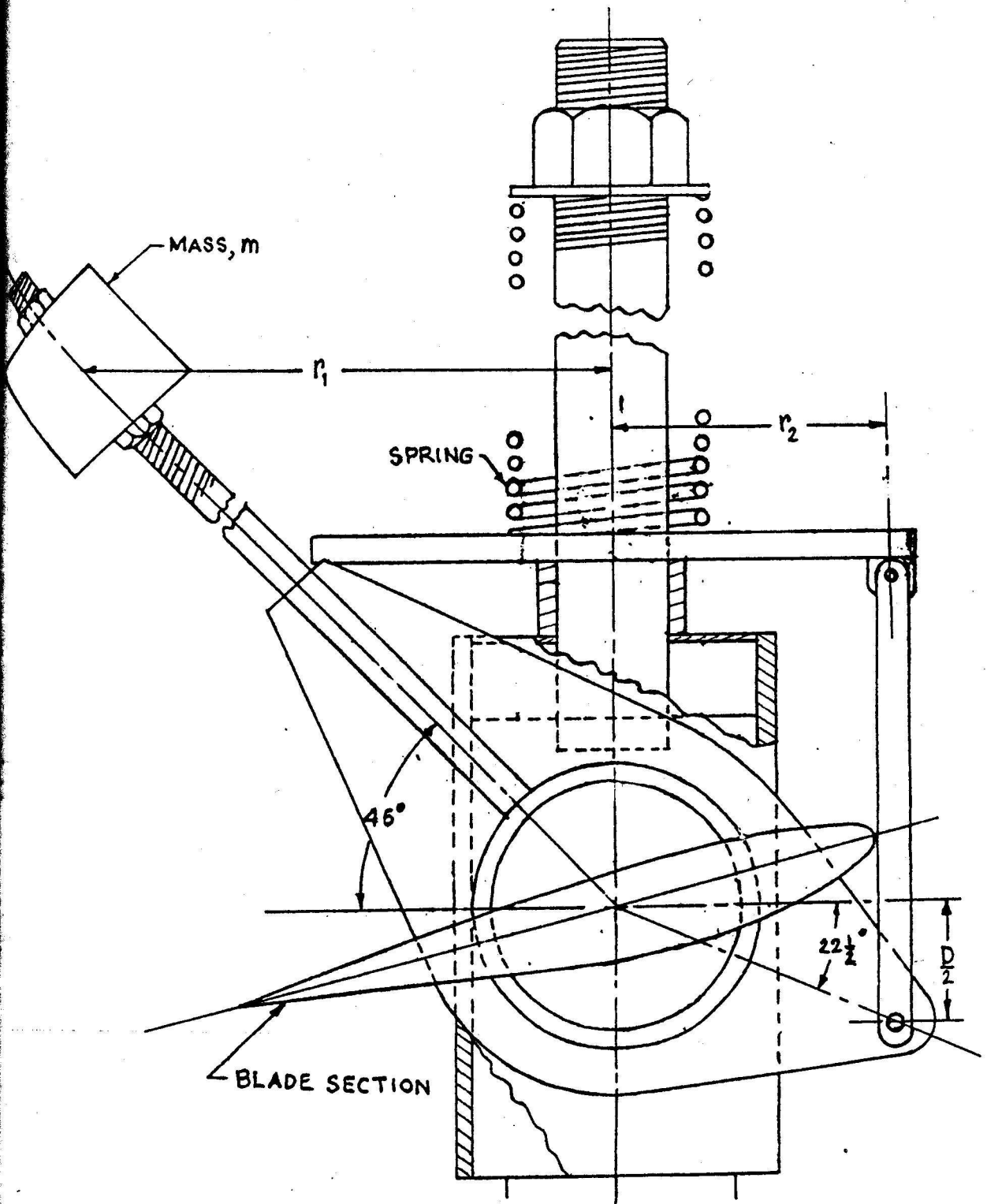
๔ โมเมนต์ของแรงเนื่องจาก การกระจายของความดันบนใบพัด ที่ไม่สมคุลย์ ระหว่าง leading edge และ trailing edge ที่ attack angle ต่างๆกัน



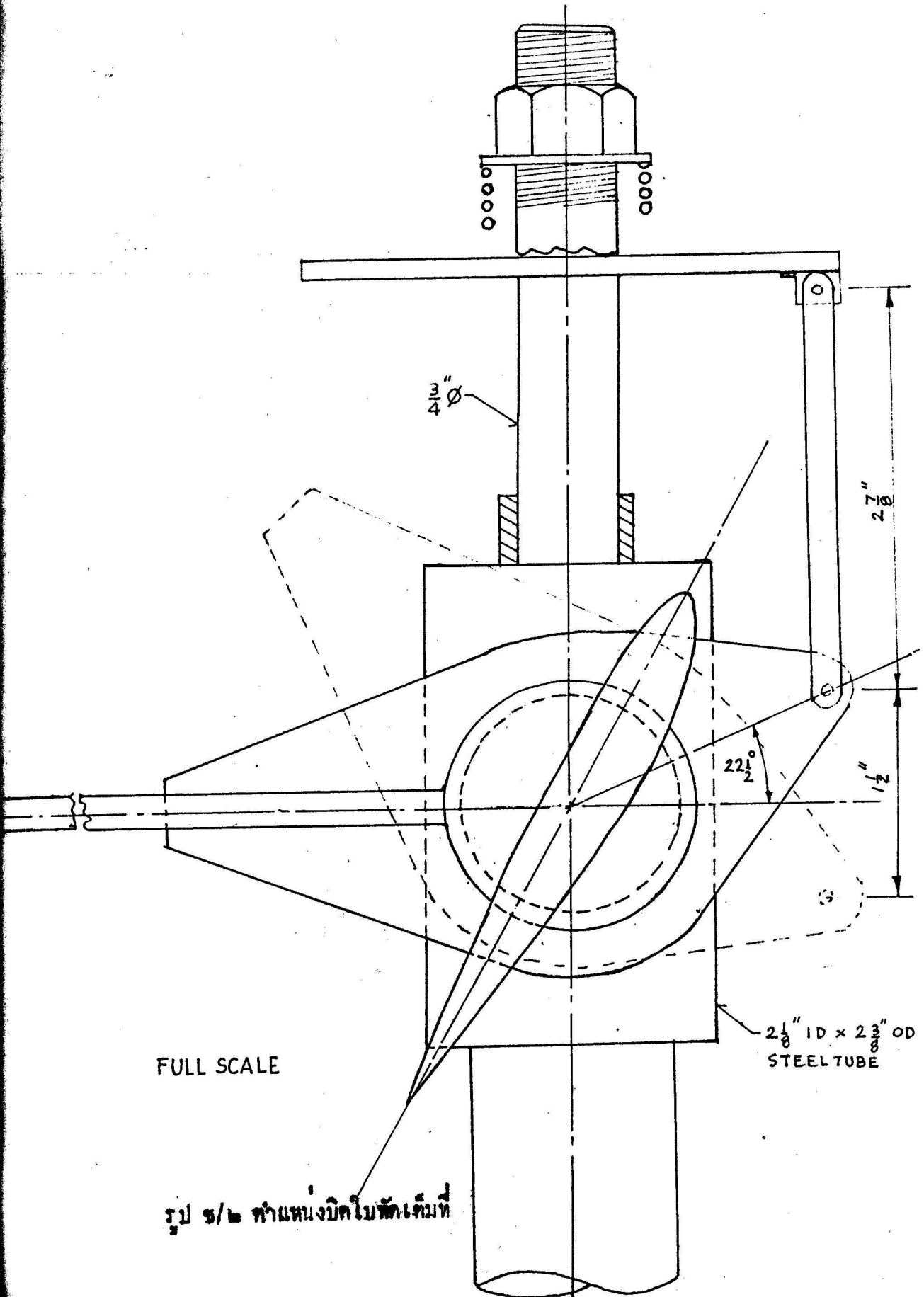
จะเห็นได้ว่า การคำนวณออกแบบ จะทำได้ยาก เนื่องจากไม่ทราบค่าต่างๆ โดยเฉพาะ ค่าแรงเสียดทาน และโมเมนต์ของความต้าน ดังนั้นเพื่อความสะดวก จึงออกแบบให้กลไก สามารถปรับแต่งเพิ่มเติมได้ โดยที่เปลี่ยนแรงหนีศูนย์กลาง ได้โดยการเปลี่ยนมวล m หรือปรับแขน r_1 และแรงจากสปริงเปลี่ยนโดยการใช้ สปริงขนาดต่างๆ นอกจากนี้ ยังต้องปรับ preload สำหรับ สปริง เพื่อให้กลไกเริ่มทำงาน ที่ความเร็วที่ควบคุม ในที่นี้ คือ ๒๐๐ รอบ/นาที ดังแสดงประกอบไว้ในรูป

รูป ๗/๑ แสดงลักษณะ และส่วนประกอบ ของตัวควบคุมความเร็ว ขณะที่ยังไม่เริ่มทำงาน กลไกต่างๆ จะอยู่ในตำแหน่งดังรูป

รูป ๗/๒ แสดงลักษณะการทำงาน ที่ตำแหน่ง บิคไบพัต ไปเต็มที่ ๔๕°



รูป ๗/๑ ชุดกรงควบคุมความเร็วรอบ

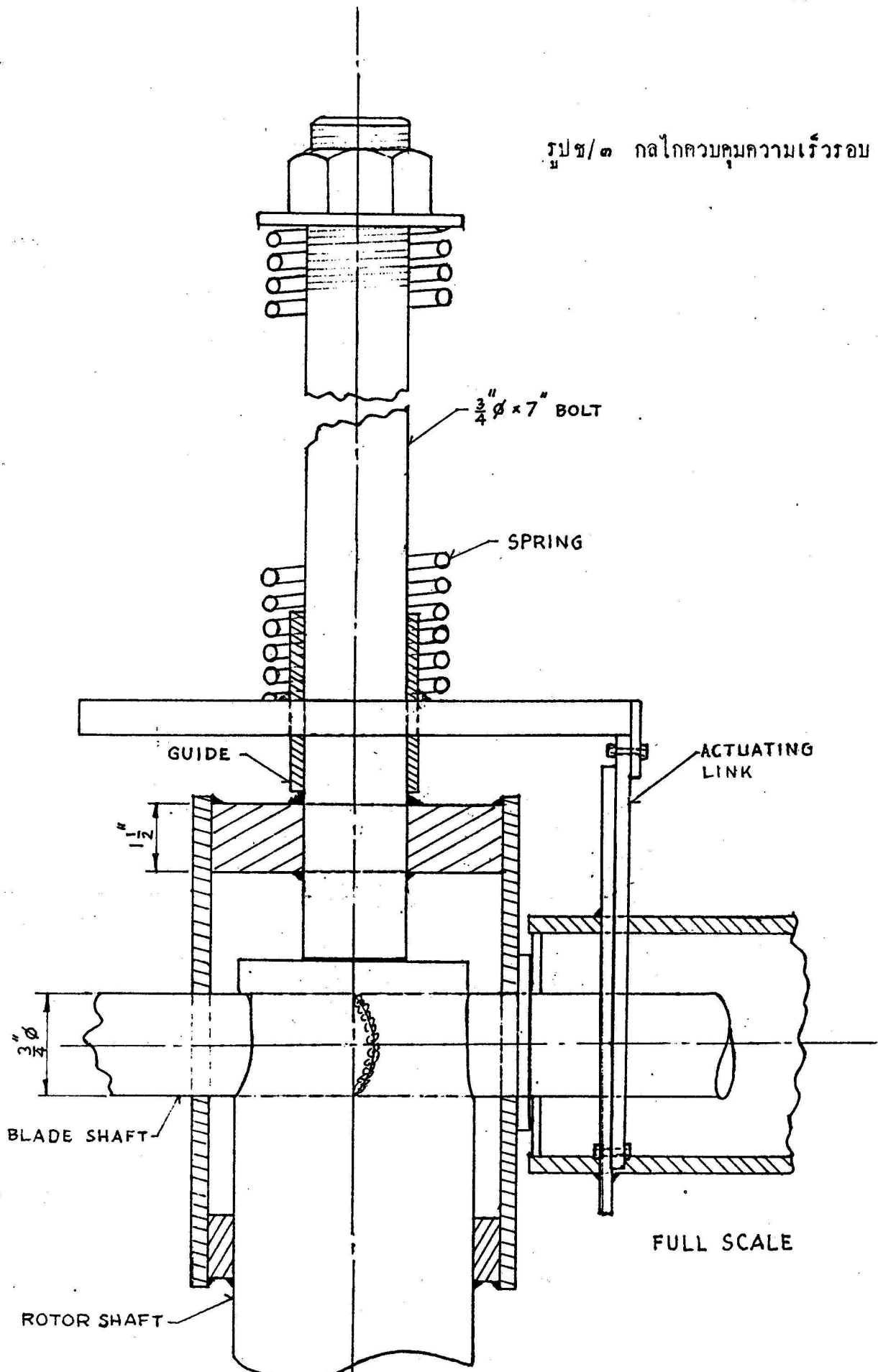


FULL SCALE

$2\frac{1}{8}$ " ID x $2\frac{3}{8}$ " OD
STEEL TUBE

รูป ๘/๒ ตำแหน่งยึดโยกตัวเดิมที่

รูปข/๓ กลไกควบคุมความเร็วรอบ



COTTER PIN

$1\frac{1}{8}"$ ID x $1\frac{1}{2}"$ OD

Central Library
Prince of Songkhla University

$\frac{3}{4}"$ ϕ ID x $1\frac{3}{8}"$ ϕ OD
CYLINDRICAL TAPERED
ROLLER BEARING

SPACER TUBE

BUSHING

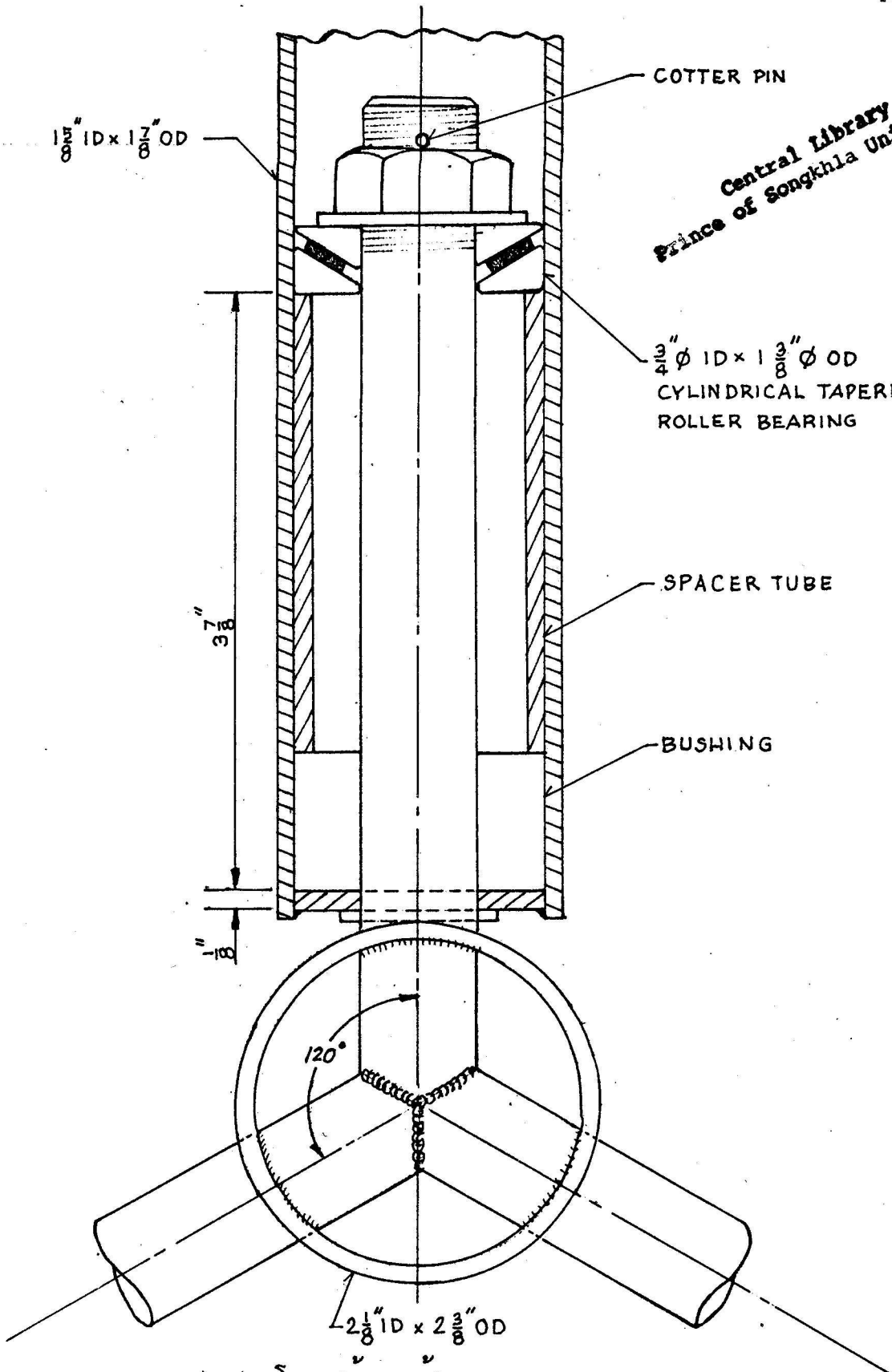
$3\frac{7}{8}"$

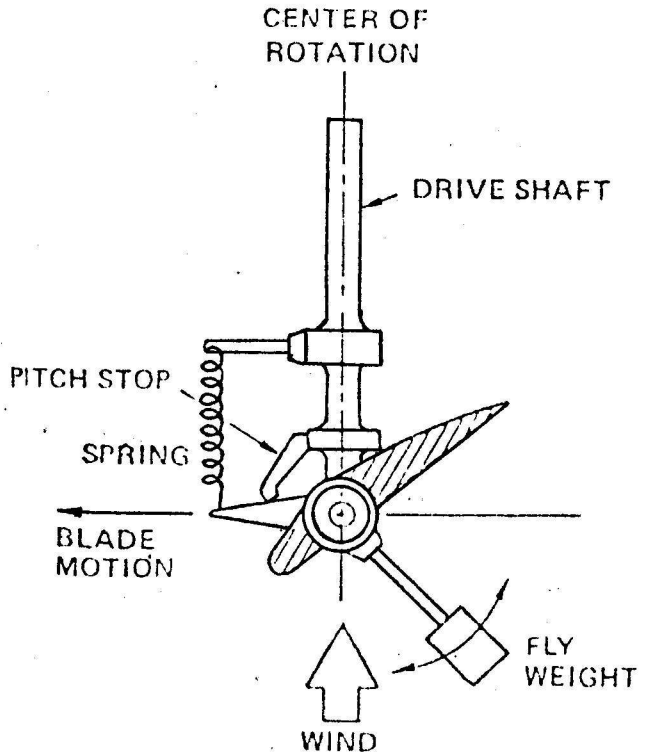
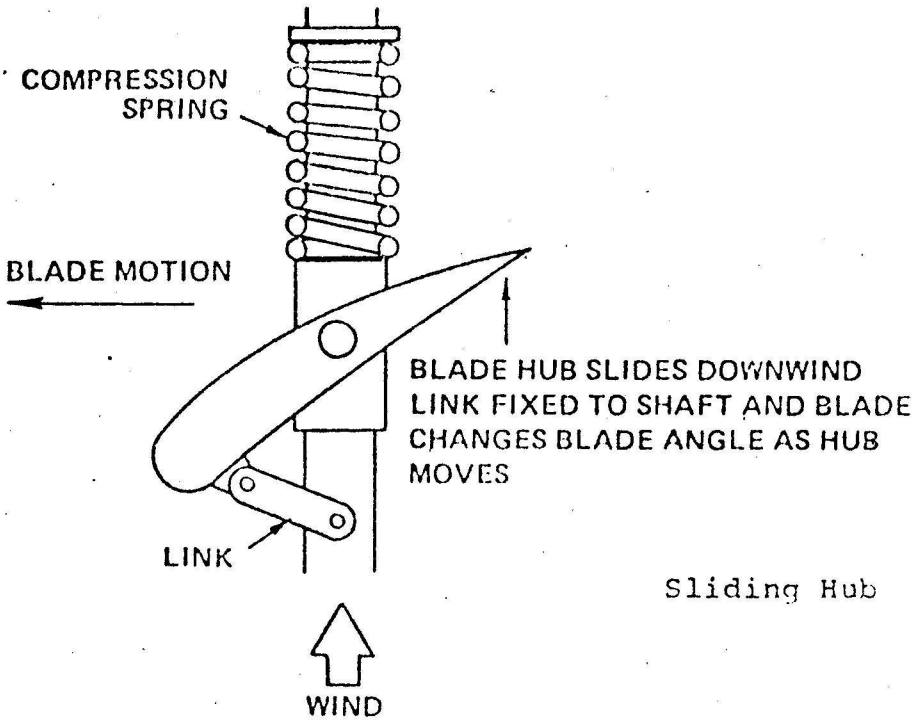
$1\frac{1}{8}"$

120°

$2\frac{1}{8}"$ ID x $2\frac{3}{8}"$ OD

รูป ๒/๔ โครงสร้างค้อนล้อ

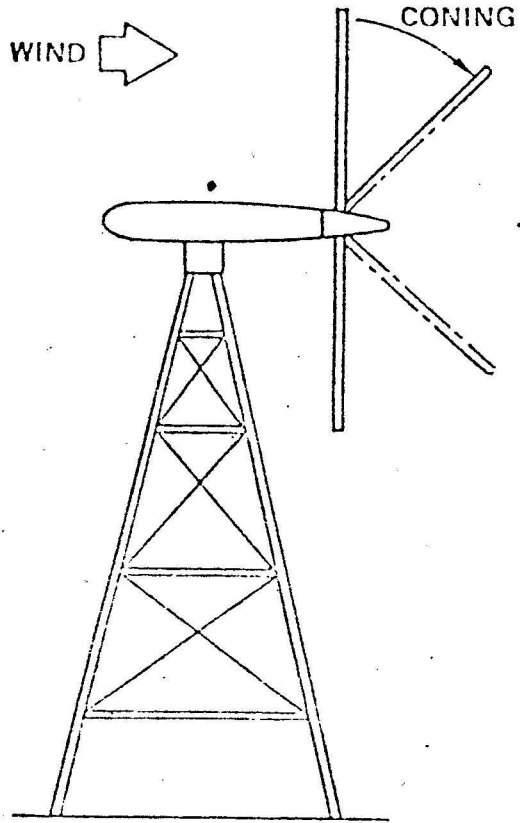




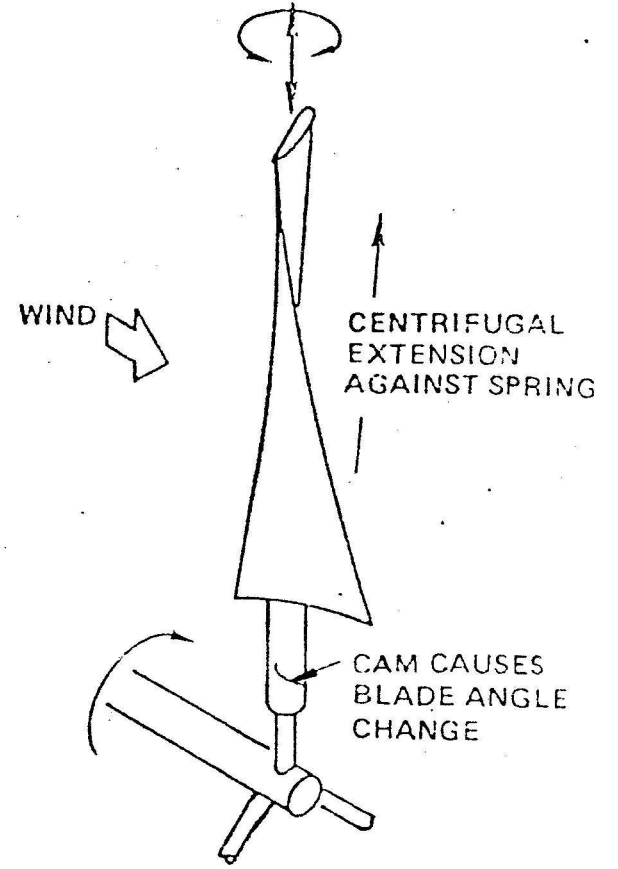
Flyweight Control

รูป ๓/๕ ตัวอย่างการควบคุมวิธีต่างๆ (7)

7) การควบคุมมุมใบพัด (7)



Windmill Coning



Sliding Blade Control

การดัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ใช้กับกังหันลมตัวนี้ ได้ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของรถยนต์ แบบ alternator ยี่ห้อ LUCAS ซึ่งเป็นของเก่าที่ใช้แล้ว เพื่อความประหยัด โดยการนำมาพันขดลวด stator ใหม่มีจำนวนรอบมากขึ้น ก็จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วต่ำๆ สำหรับประจุ แบตเตอรี่ขนาด ๑๒ โวลต์ แต่เนื่องจากกังหันลมตัวนี้ ทำงานที่ความเร็วต่ำมาก เมื่อเทียบกับความเร็วของเครื่องยนต์ในรถยนต์ คือประมาณ ๒๐๐ รอบ/นาที ดังนั้นจึงใช้การประนีประนอม ให้ทำงานที่ ประมาณ ๑๐๐๐ รอบ/นาที โดยการใช้ ระบบทดความเร็วรอบกังหันลมช่วย

อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก alternator ตัวที่ใช้นี้เก่ามาก สมรรถนะจึงค่อยไปบ้าง จากผลการทดสอบ หลังการดัดแปลง พบว่า จำเป็นต้องให้ทำงานที่ความเร็วสูงกว่า ที่ออกแบบไว้ ในที่นี้เลือกใช้ ๑๖๐๐ รอบ/นาที จึงจะสามารถผลิตไฟฟ้าสำหรับเลี้ยง field coil และประจุแบตเตอรี่ได้ ดังรูป กราฟ ผ. ในการดัดแปลงพันขดลวด stator ใหม่ นั้น ใช้การคำนวณอย่างง่าย ๆ ดังนี้

ตัวอย่างเช่น ที่ความเร็ว ๒๐๐ รอบ/นาที ก่อนการดัดแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ out put ๒ โวลต์ ถ้าต้องการ เพิ่ม out put ให้เป็น ๑๒ โวลต์ ต้องพันขดลวด stator เพิ่มขึ้นเป็น ๖ เท่า จากของเดิม และต้องใช้ ขนาดลวดเล็กกว่าเดิมด้วย เนื่องจาก slot มีขนาดจำกัด จึงทำให้ กำลังผลิตสูงสุดลดลงด้วย

ขั้นตอนการดัดแปลง

เริ่มโดยการถอดสายระหว่าง ขดลวดของ stator กับ rectifier ออก, ถอด rectifier ออก, ถอดชุด slip ring ออก จากนั้นก็ถอด rotor ออกแล้ว ตรวจสอบในแต่ละชุดของขดลวดนั้น มีจำนวนกี่รอบ ลักษณะการพันเป็นอย่างไร และลำดับขั้วของลวดที่ถอดจาก rectifier ด้วย ซึ่งของเดิมเป็นดังนี้

จำนวนรอบ/ชดวาก * ชุก = ๑๐ รอบ

ขนาดลวดทองแดงอาบน้ำยา เบอร์ 19 S.W.G.

จำนวนของ slot = ๓๖ ของ

การหาจำนวนรอบและขนาดของชดวากที่จะพันใหม่

จากผลการทดลองโดยการคิดทั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเครื่องยนต์ของรถยนต์ เมื่อ plot ระหว่าง Output voltage กับความเร็วรอบต่อนาทีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ความสัมพันธ์ดังในรูป ข. ซึ่งสังเกตได้ว่าถ้าให้เครื่องกำเนิดทำงานที่ ๑๐๐๐ รอบต่อนาที จะให้ค่า ความต่างศักย์ ออกมาเพียง ๒ โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำมาก เมื่อทำการทดสอบใหม่โดยใช้มอเตอร์ที่รับความเร็วได้ ทบว่าที่ความเร็ว ๑๐๐๐ รอบ/นาทีนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะให้ ค่าความต่างศักย์ประมาณ ๕ โวลต์ จึงหันมาใช้การทดสอบ ครั้งหลังนี้เป็นหลักในการออกแบบ เนื่องจากข้อมูลที่ได้นี้ในระหว่างการทดสอบนั้นการวัดค่าได้สะดวกและแม่นยำกว่าจึงน่าเชื่อถือกว่า อย่างไรก็ตามหลังการคิดแปลงแล้วจะมีการทดสอบสมรรถนะอีกครั้ง

จากสมการอย่างง่าย

$$\text{New turn} = \frac{\text{New voltage}}{\text{Original voltage}} \times \text{Orig. turns/coil} \quad (1)$$

$$\text{และ New C.M. area} = \frac{\text{Original voltage}}{\text{New vlotage}} \times \text{Orig.C.M. area} \quad (2)$$

กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องทำงานที่ความเร็ว ๑๐๐๐ รอบ/นาที โดยที่ มีความต่างศักย์สำหรับ ประจุ แมกเตอร์ ๑๓ โวลต์

$$\text{New voltage} = 13 \text{ V}$$

แทนค่าใน (1)

$$\begin{aligned} \text{New turn} &= \frac{13}{5} \times 10 \\ &= 26 \text{ turns/coil} \end{aligned}$$

จากตารางขนาดเส้นลวด, ลวด 19 S.W.G. มีขนาด C.M. = 1575 C.M.

orig. C.M. area = 1575 C.M.

new C.M. area = $\frac{5}{13} \times 1575$
= 605.77 C.M.

จาก wire gauge table สำหรับ C.M.=605.77 ตรงกับ S.W.G. 23 และจาก copper wire table, S.W.G. 23 จะทนกระแสได้ ๐.๘๑๘ แอมแปร์ ซึ่งพอใช้งานได้เนื่องจากโอกาสที่จะต้องรับกระแสดังนี้มีไม่มากนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดทองแดง S.W.G. 23 ในการพัน stator coil มีจำนวนรอบการพันเป็น ๒๖ รอบ/ขด

การพันขดลวด

ลักษณะการพันเป็นไปตามรูป ๗. โดยพันให้ลวด ๒ ขดต่อกันอย่างอนุกรมและมีทิศทางเดียวกัน เสร็จแล้วพันอีกสองเส้นในลักษณะเดียวกัน ลวดที่ใช้เป็น enamelled copper wire ส่วนทิศทางการพันนั้นจะเลือกใช้ตามเข็มนาฬิกา ลักษณะขดลวดที่ได้ดังในรูป ๗. จะเหมือนกันกับก่อนการคิกแปง เพียงแต่มีจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จากนั้นนำขดลวดที่ได้ไปใส่ลงในช่องบน stator ดังในรูป ๘. แล้วใช้ลิ่มไม้ยึดให้แน่น เมื่อใส่ขดลวดทั้งสามชุดลงในช่องของ stator เรียบร้อยแล้วนำปลายสามเส้นในมาต่อกันโดยการมัดกรี (ขดลวดจะวางตัวเป็นแบบ Y) แล้วเคลื่อนขดลวดด้วยนิ้วขวามือ หรือ แคลเล็กก็ได้ จากนั้นนำไปอบประมาณ ๒๔ ชั่วโมง

การต่อปลายลวดกับชุด Rectifier

วงจรของ rectifier นั้นเป็นดังรูป ๘. ซึ่งใช้ชุดเกาของ alternator ประกอบด้วย diode ๔ ตัว การต่อก็ใช้ลักษณะเดิม คือนำปลายขดลวดทั้งสามปลาย มาต่อกับ diode ปลายละชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมี diode ๓ ตัว และ diode แต่ละตัวจะติดตั้งอยู่บนแผ่นเหล็กระบายความร้อนหนึ่งแผ่นดังรูป ๘. การต่อกระแสออกไปใช้งานนั้น ขั้วบวก ต่อกับแผ่นทองแดง

ที่ไม่ได้ออกจาก rectifier ส่วนขั้วลบต่อเข้ากับ ground

เมื่อพัน Armature coil ใหม่เสร็จแล้วต้องตรวจสอบความมีการลัดวงจรเกิดขึ้นหรือไม่โดยการวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้ว ถ้าความต้านทานเป็นศูนย์แสดงว่าเกิดลัดวงจรต้องพัน coil ใหม่

ผลการทดลองหา out put voltage ของ Alternator หลังจากตัดแปลงแล้ว

ความเร็วรอบ/นาที	โวลต์ที่ได้
๒๐๐	๓
๔๐๐	๖.๓
๖๐๐	๙.๕
๘๐๐	๑๓.๕
๑๐๐๐	๑๖.๕
๑๑๐๐	๑๘.๕
๑๒๐๐	๒๐
๑๕๐๐	๒๕.๕

จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อนำมา plot ระหว่าง โวลต์ ที่ได้กับความเร็วยรอบ/นาที จะได้ออกกราฟดังรูป ร. จะเห็นว่า โวลต์ที่ได้จะสูงกว่าเมื่อยังไม่ได้ตัดแปลงพัน armature coil ใหม่

การทดลองหากระแสที่จ่ายออกจาก Alternator เมื่อต่อกับ Battery

เนื่องจากตัวการที่จะทำให้ out put ของ Alternator สูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของ Alternator ดังนั้นกระแสที่จะมาป้อนเข้าไปใน field coil จึงมีความสำคัญมากจากการทดลอง โดยปรับค่าของกระแสที่เข้าไปใน field coil นั้น out put จะให้ออกมาไม่เท่ากัน การต่อวงจรดังรูป ข.

ความต้านทาน field winding = 4.50 Ω

จากการวัดความต้านทานของแปรงถ่าน + ความต้านทานสัมผัสระหว่างแปรงถ่านกับ

slip ring = 3.5 Ω

ความต้านทานรวม = 8 Ω

ถ้า supply เข้าไป 12 Volts

กระแสที่เข้าสูงสุด (I_f) = $\frac{12}{8} = 1.5$ amp.

นั่นคือ จะเพิ่มค่ากระแสที่เข้า field coil ใ้สูงสุด = 1.5 amp.

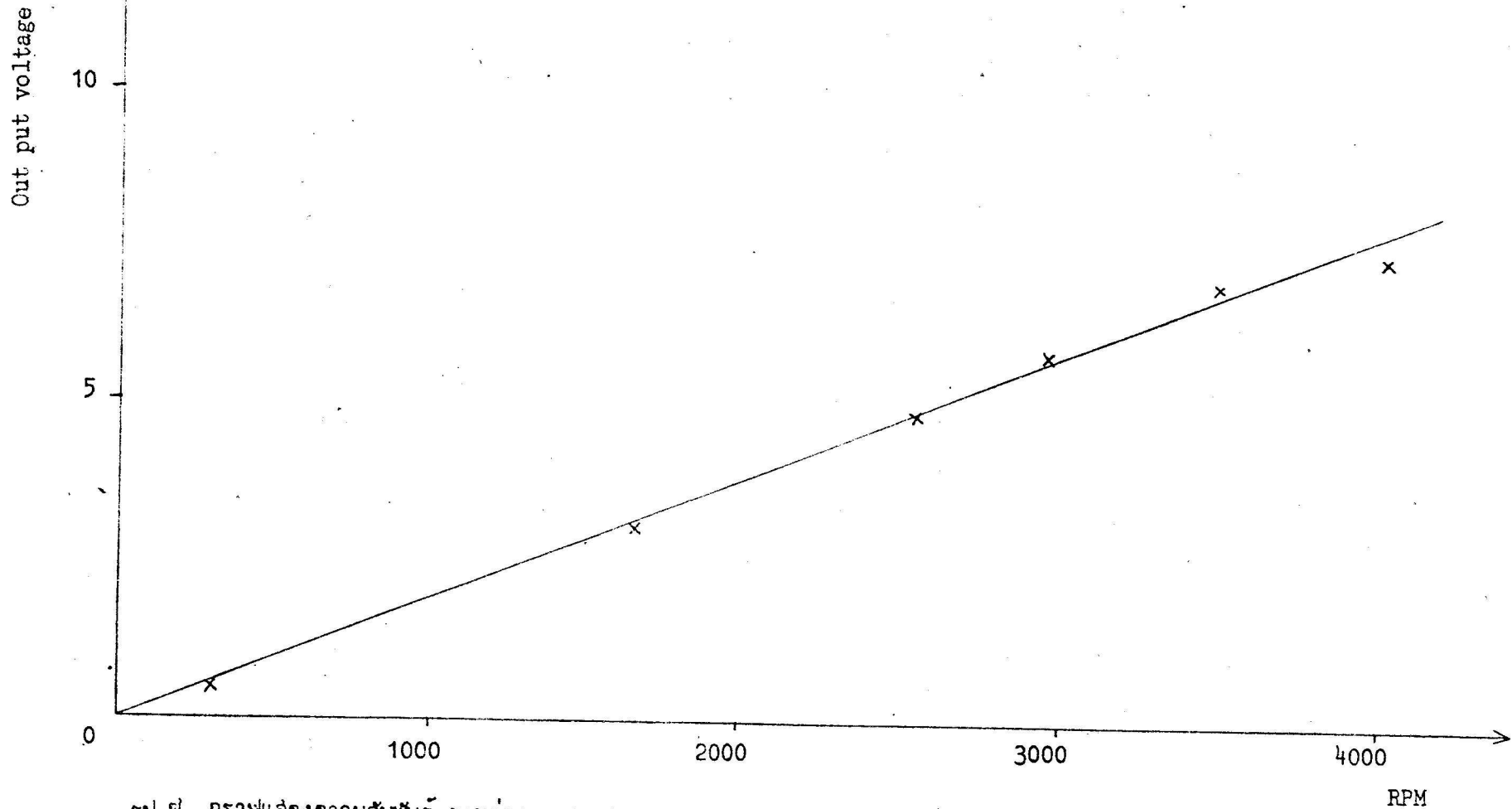
จากการทดลองปรากฏผล ดังนี้

Speed(R.P.M.)	I_f (amp.)	I_t (amp)	V_t (Volt)	V_{noload} (Volt)
0	1.5	-0.5	5.5	0
200	0.5	-0.5	5.5	0
	1	-0.2	5.5	0
	1.5	-0.2	5.5	0
7000	0.5	-0.5	5.5	0
	1	-0.5	5.5	0.15
	1.5	+0.3	90	99
9200	0.5	-0.5	5.5	0
	1	0	5.5	0
	1.5			
9600	0.5	-0.5	5.5	0
	1	+0.5	12.2	96.5
9700	0.5	-0.5	90	0
9800	1	+0.5	12.2	96.5
9900	0.5	+0.5	12.2	96.5
10000	0.5	+0.5	12.2	96.5
10100	0.5	+0.5	12.2	96.5

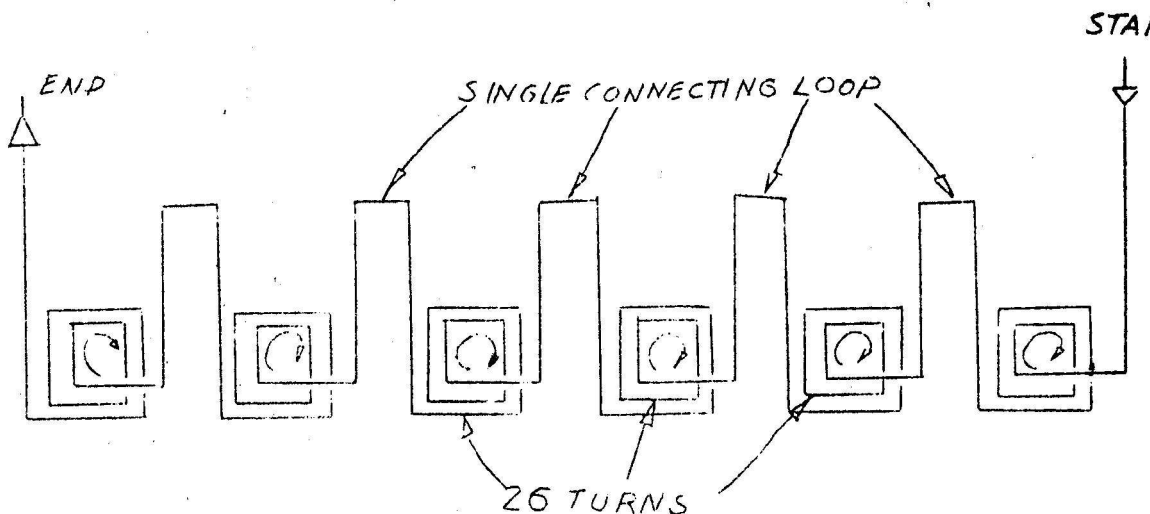
Vnoload หมายถึง Voltage ขณะ switch off เป็น V out put ของ Generator ซึ่งสามารถใช้กระแสจากตัวมันเองป้อนเข้า field coil โดยไม่ต้องอาศัย แบตเตอรี่ และช่วงนี้แสดงว่า สามารถจะ charge แบตเตอรี่ ได้ กรณี I_t ที่วัดได้นั้นถ้า เป็นลบแสดงว่าไฟจากแบตเตอรี่ถูกจ่ายออกไปให้ตัว Alternator แต่ถ้ามักเป็น บวก แสดงว่าไฟจาก Alternator จ่ายให้กับแบตเตอรี่ เพราะฉะนั้น จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อ plot curve ระหว่าง I_t กับความเร็วรอบ/นาที จะเห็นว่า ที่ค่า I_f สูง I_t ที่ได้ จะสูง ส่วน I_f น้อย I_t จะน้อย นั่นคือ ถ้า supply I_f สูงสุด ๑.๕ amp. จะได้ out put มากที่สุด เนื่องจาก Motor ที่ใช้ขับ Alternator มี torque น้อยที่ $I_f = ๑.๕$ จึงทดสอบได้เพียง ๒ ค่าเท่านั้น ในกรณี v_t ก็เช่นเดียวกัน ถ้า v_t มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่า สามารถ charge เข้า battery ได้ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับ I_t เพราะฉะนั้น เมื่อดูจากกราฟแล้วที่ speed 1200 r.p.m. Generator ตัวนี้สามารถจะ charge battery ได้ประมาณหนึ่งแอมป์กว่า

สรุปผล

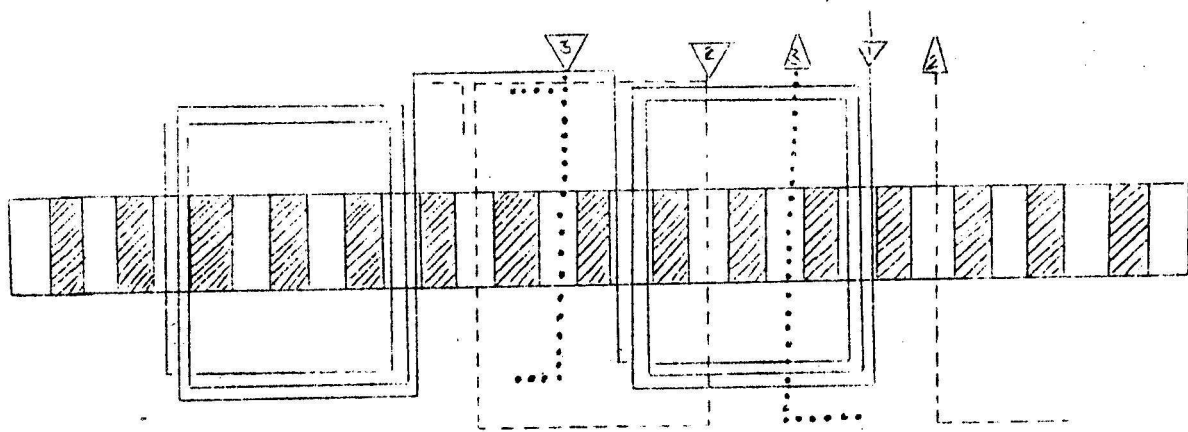
- จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวน Turn/Coil จะสามารถเพิ่ม Out put Voltage ให้สูงขึ้นได้โดยเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกัน
- การเพิ่มกระแสใน field coil สามารถจะเพิ่ม Out put Voltage ได้เช่นเดียวกัน โดยเมื่อ I_f ยิ่งมาก out put ที่ได้ก็จะมากขึ้นด้วยโดยเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเท่ากัน
- การเพิ่มจำนวนรอบจะทำให้ out put ที่ได้เพิ่มขึ้นด้วย



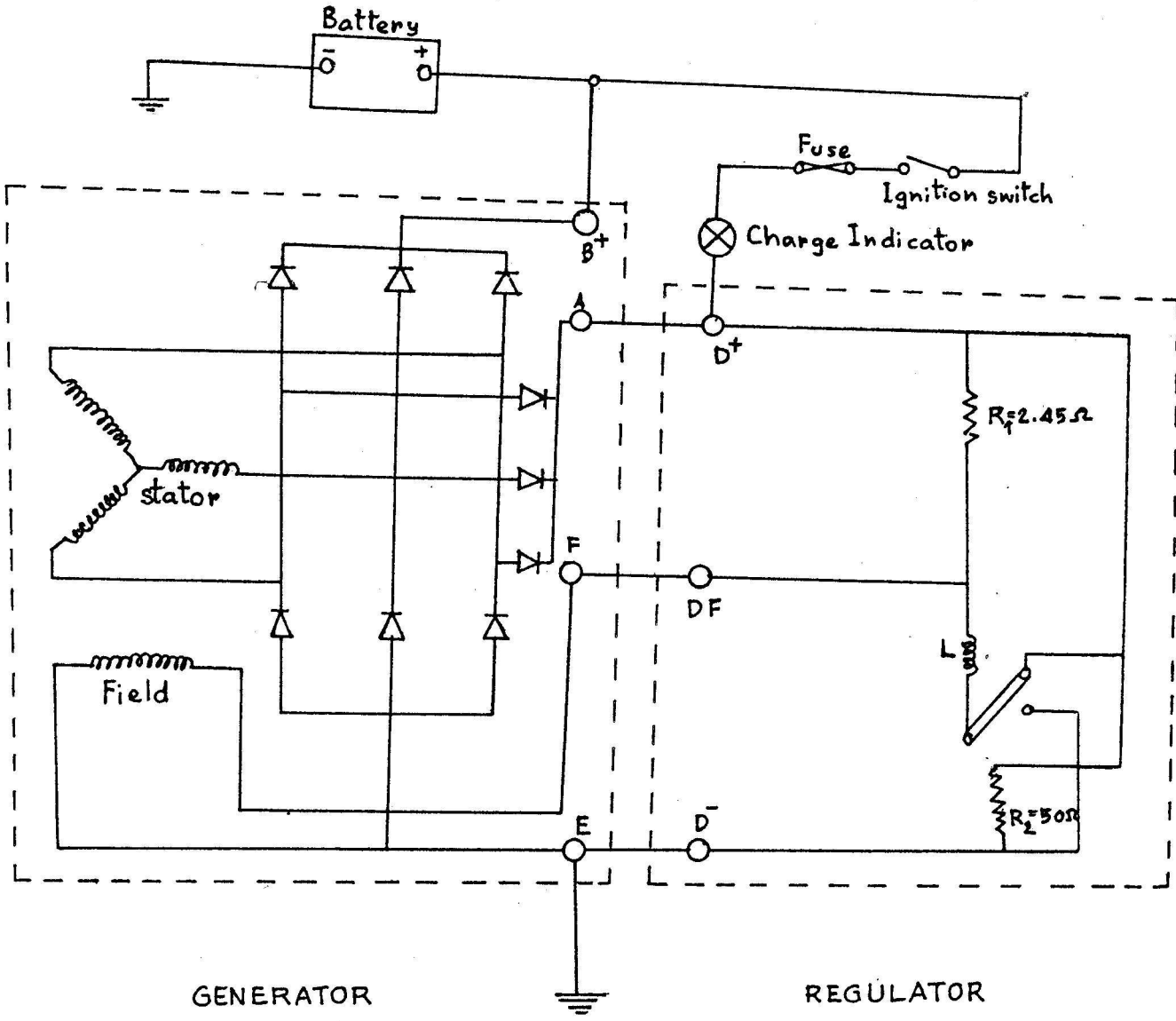
รูป ๒. กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง output voltage กับ ความเร็วรอบ ที่สภาวะ no load ก่อนการตัดแปลง



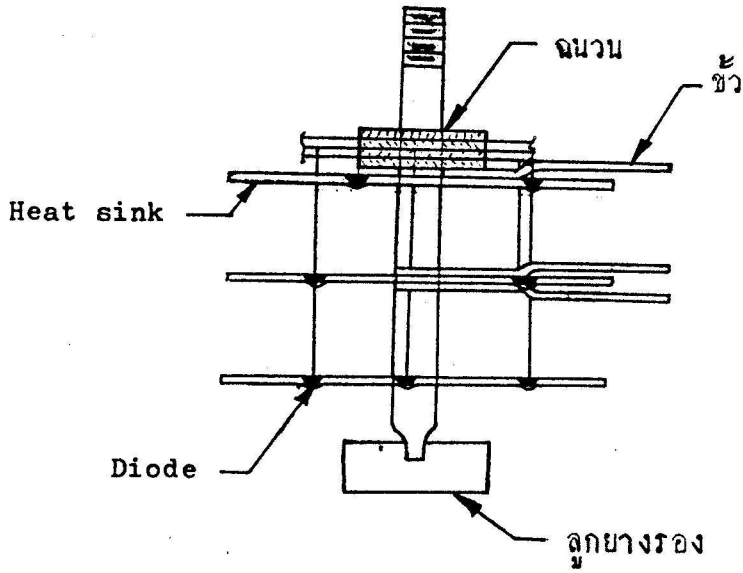
รูป ฉ. แสดงการพันขดลวดแต่ละขดละมี 26 รอบ มีอยู่ 6 ขด ต่อกันอย่างอนุกรม ก่อนการตัดแปลง



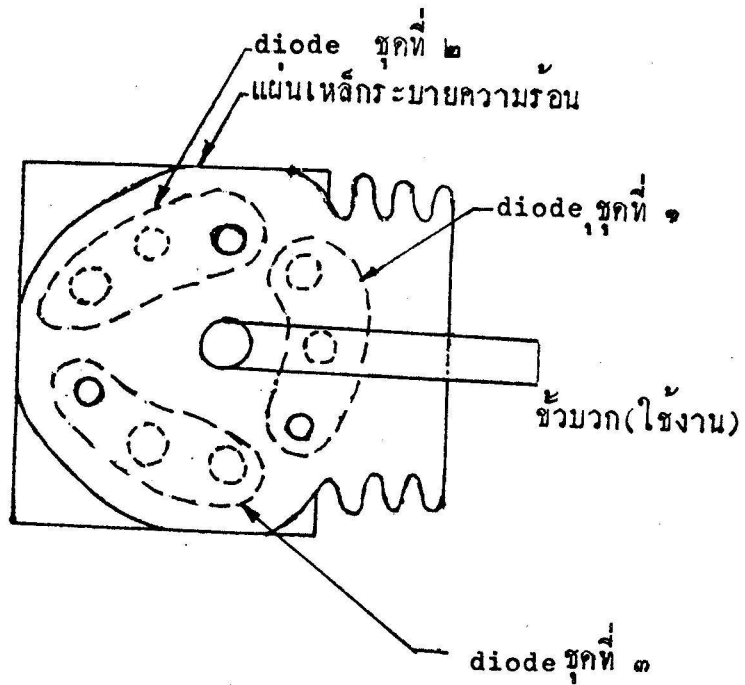
รูป ฉ. แสดงการใส่เรียงขดลวด แต่ละขดลงใน slot ของ stator มีขดลวด 6 ขด ต่ออนุกรม กันอยู่ ใน 36 slots



รูป ๓ แสดงการต่อวงจรภายในตัว Alternator และวงจรของ Regulator

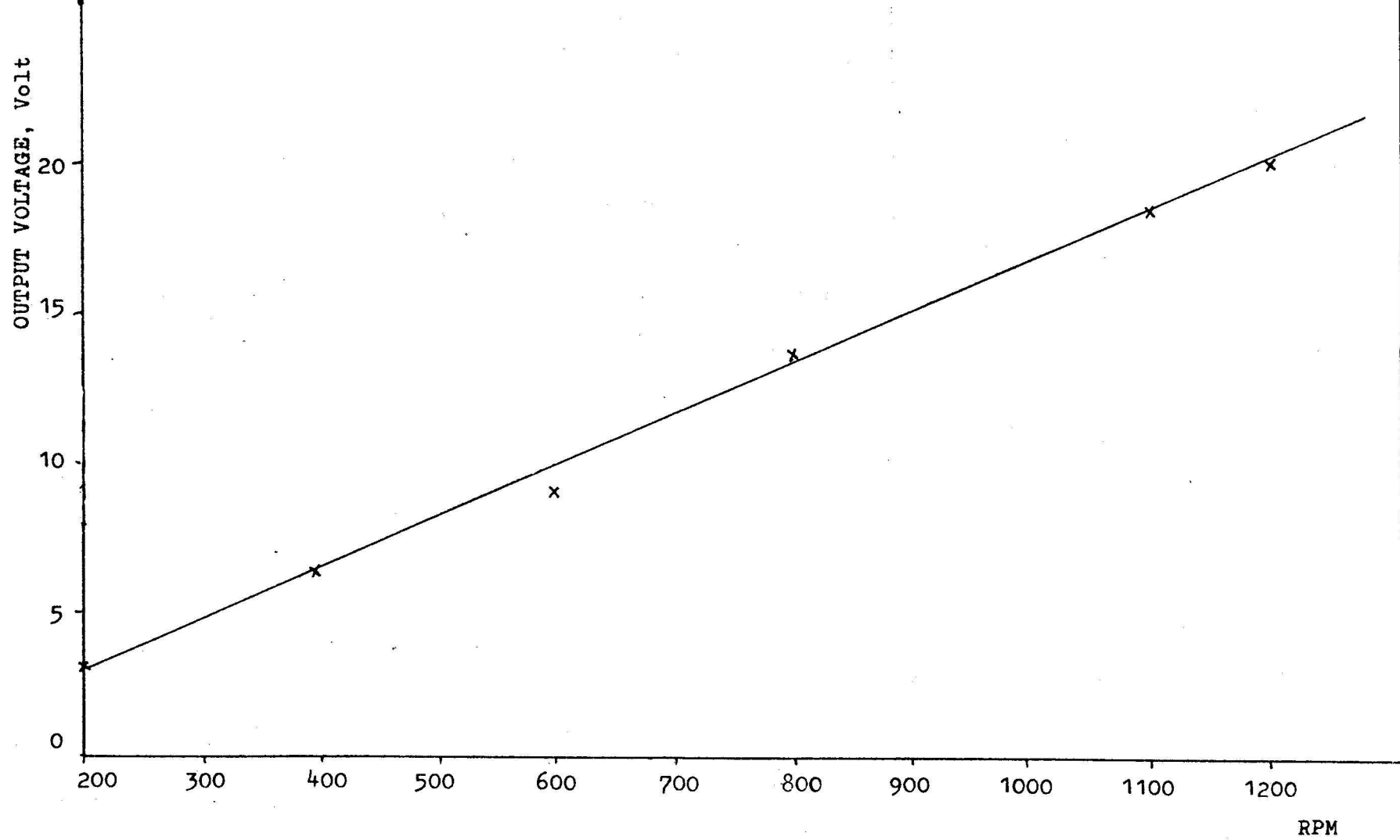


FRONT VIEW

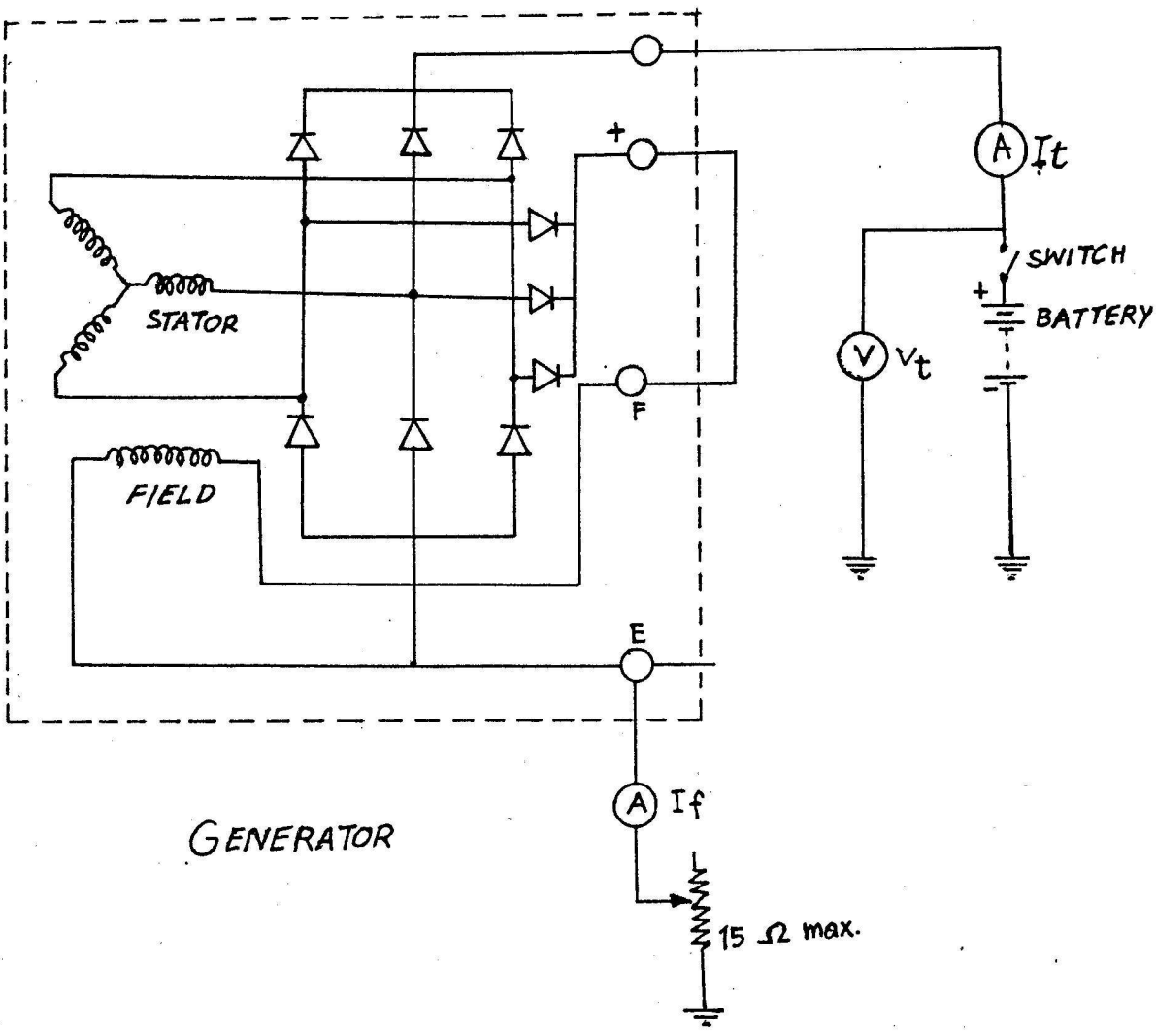


TOP VIEW

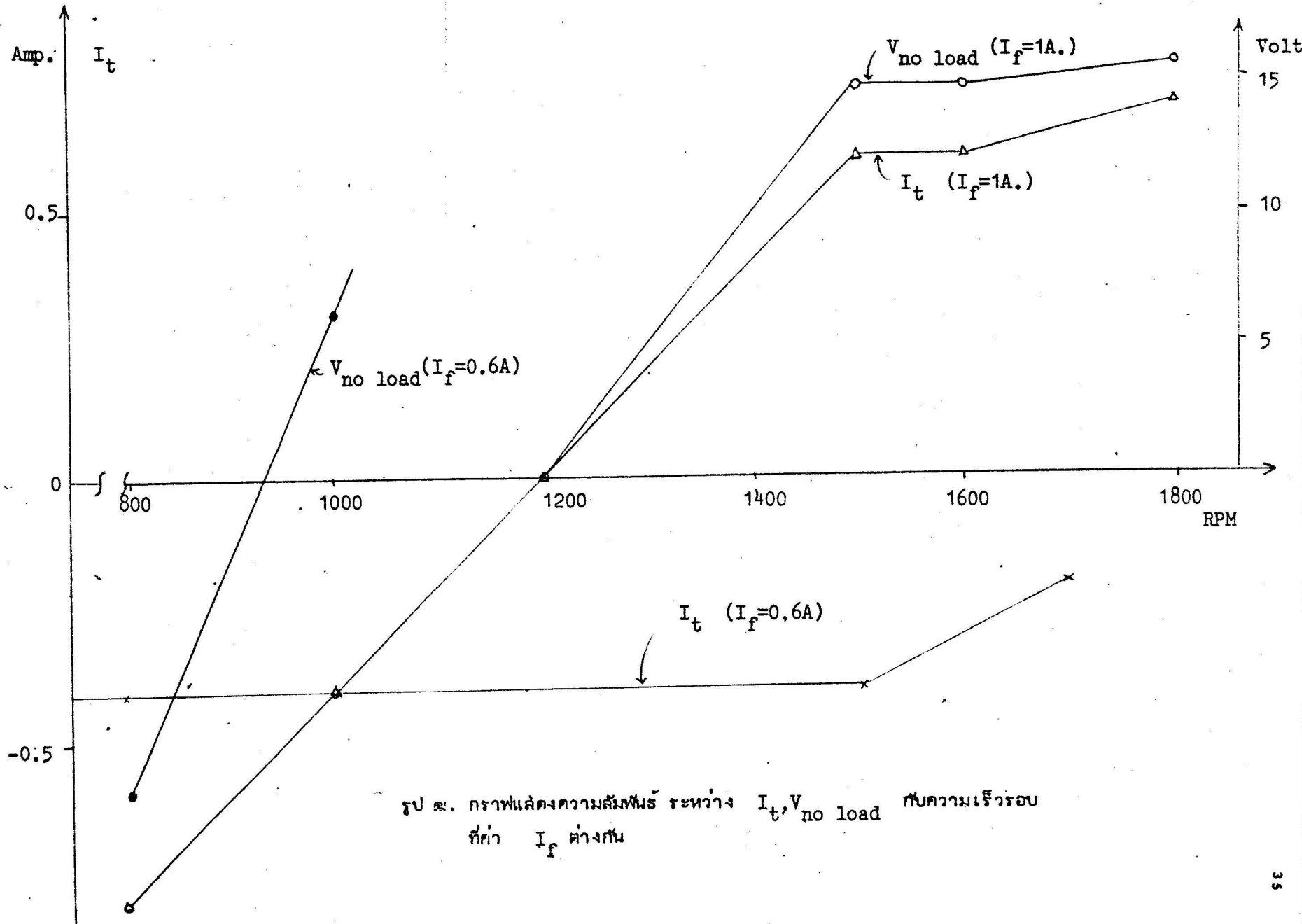
รูป ๕. แสดงส่วนประกอบของ Rectifier



รูป ๓. กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง out put V กับความเร็วรอบ
ที่สถานะ no load หลังการตัดแปลง



รูป ท. แสดงการต่อวงจรเพื่อหาผลของ I_f ต่อ out put voltage



รูป ๕. กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง $I_t, V_{no\ load}$ กับความเร็วรอบ ที่ค่า I_f ต่างกัน

ระบบถายทอดกำลัง

การถายทอดกำลังจากกังหัน ไปสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั้น ต้องเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมด้วย เนื่องจากกังหันลมทำงานที่ความเร็วประมาณ ๒๐๐ รอบ/นาที ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำงานที่ความเร็วประมาณ ๑๖๐๐ รอบ/นาที (ดูรายละเอียดในตอนการตัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ดังนั้นจึงต้องใช้กลไกการทดรอบ ซึ่งในครั้งนี้ได้เลือกใช้ ระบบสายพาน และมีได้ เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

๑. การติดตั้งทำได้ง่าย ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก ทำให้การประกอบในสนามสะดวกกว่าวิธีอื่น ๆ
๒. ราคาถูก
๓. หาซื้อได้ง่าย
๔. มีให้เลือกหลายขนาด

$$\begin{aligned}
 \text{ในกรณีนี้ อัตราทดที่ต้องใช้} &= \frac{\text{ความเร็วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า}}{\text{ความเร็วกังหัน}} \\
 &= \frac{๑๖๐๐}{๒๐๐} \\
 &= ๘ : ๑
 \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากความเร็วกังหันที่วัดได้จริงจากการทดสอบ มีค่าประมาณ ๑๕๐ รอบ/นาที

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นอัตราทด} &= \frac{๑๖๐๐}{๑๕๐} \\
 &= ๘.๘ : ๑
 \end{aligned}$$

เลือกขนาดมู่เฒ่าที่ใกล้เคียงที่สุดได้ดังนี้

$$P_1 = 10.5'' \text{ } \varnothing$$

$$P_2 = 3.5'' \text{ } \varnothing$$

$$P_3 = 8.5'' \text{ } \varnothing$$

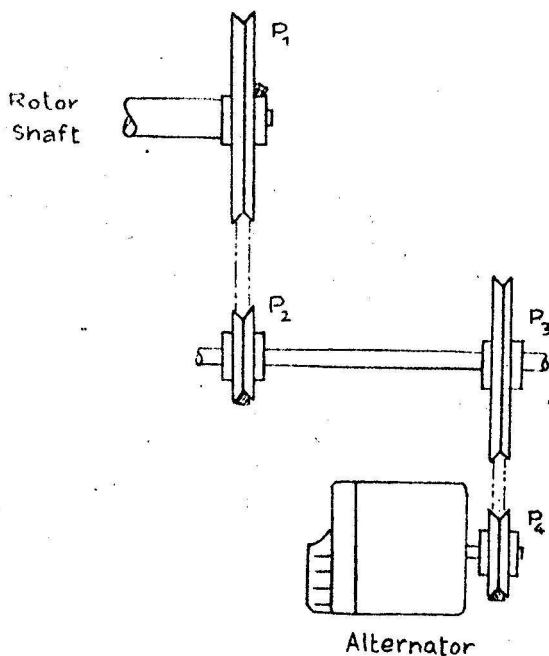
$$P_4 = 3.0'' \text{ } \varnothing$$

$$\begin{aligned} \text{กึ่งน้ออัตราทดของมู่เฒ่า} &= \frac{10.5}{3.5} \quad \frac{2.5}{3} \\ &= 2.5 : 1 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานที่ความเร็วสูงขึ้นไปอีกเล็กน้อย

ประมาณ ๑,๖๑๔ รอบ/นาที

อนึ่งเนื่องจากเห็นว่า การเลือกมู่เฒ่าและสายพานจากท้องตลาดมีราคาถูกกว่า ออกแบบเอง และมีค่า safety factor สูงมาก ในงานนี้ จึงไม่ได้แสดงการคำนวณเอาไว้



การทดลองใช้งาน

ก่อนการติดตั้งทดสอบ กังหันลมในสนามจริงๆ ต้องมีการปรับแต่งบางส่วน คือ การทำสมดุล และการปรับแต่ง อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ

การทำสมดุล

ทำในท้องปฏิบัติการโดยวิธี trial & error โดยทดลองหา ตำแหน่งที่หยุคในสภาพที่ขาดสมดุล แล้วทดลองเติม น้ำหนัก ที่ปลายใบพัดทั้งสาม ซึ่งมีชั้นคอนกรีตนี้

ก. ติดตั้งกังหัน บนหอคอยที่จับยึดไว้แน่น ในท้องปฏิบัติการ บริเวณที่ลมสงบ คลับลูกปืนของเพลากังหัน ต้องสะอาด ยังไม่ฉีกรจารบี

ข. ทดลองหมุนกังหัน หากตำแหน่งที่ไม่สมดุล

ค. ทดลองเติมน้ำหนัก ที่ปลายใบพัด ที่เบาเกินไป

ง. ทำซ้ำ จนกังหัน อยู่ในสภาพที่สมดุล คือ สามารถหยุดนิ่งที่ตำแหน่งใดๆ ก็ได้

จ. ใช้สว่านเจาะ ที่ปลายใบพัด ให้เป็นรูขนาดพอเหมาะ ในที่นี้ใช้ขนาด ๑/๘"

ฉ. คำนวณ กลึง แท่งตะกั่ว ที่จะนำไปใช้ถ่วง เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑/๘" ติด

เป็นแท่ง ที่มีน้ำหนัก มากกว่าที่จะต้องใช้เล็กน้อย

ช. นำตะกั่วไปยึดติดไว้ ที่ปลายใบพัด

ซ. ทดลองทำสมดุลอีกครั้ง โดยใช้สว่าน ค่อย ๆ ตัดน้ำหนัก ตะกั่วส่วนเกินออก

การปรับอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

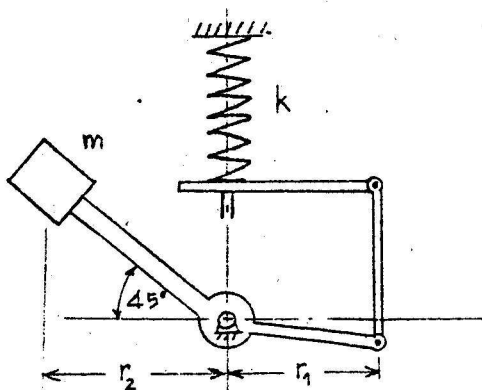
นำกังหันลม ไปติดตั้งในสนาม แล้วทดลอง เปลี่ยนค่า สปริง, และระยะทาง ของคัมน้ำหนัก โดยมีใช้คัมน้ำหนัก ขนาดเดิมก่อน คือ ๑๕๐ กรัม ซึ่งโดยผลการทดลอง ดังนี้

ก. สปริง, ค่าคงที่ k = ๖.๒๕ นิวตัน/ซม.

 preload = ๒๕.๒๖ นิวตัน

ข. คัมน้ำหนัก, มวล, m = ๑๕๐ กรัม

 ระยะทาง, r₁ = ๔๐ มม.



ค. การคำนวณ ที่ ๒๐๐ รอบ/นาที

โมเมนต์จากน้ำหนัก = โมเมนต์จากสปริง

$$3 m \omega^2 r_2^2 = k x_1 r_2$$

$$3 \times 0.15 \times (20.944)^2 \times (0.08)^2 = 6.25 \times 100 \times X_1 \times 0.05$$

$$X_1 = 0.04 \quad \text{m.}$$

$$= 4.0 \quad \text{cm.}$$

$$\text{หรือ preload} = kX_1 = 25.26 \text{ นิวตัน}$$

ทดสอบการทำงาน

หลังจากได้ปรับแต่ง อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบแล้ว ขั้นตอนต่อไปได้แก่ การทดสอบสมรรถนะของกังหันลม ซึ่งในระหว่างการทำงานนี้ การทดสอบส่วนใหญ่ใช้ไปในการปรับแต่ง ชุดควบคุมความเร็ว และการหาอัตราทดที่เหมาะสม สำหรับระบบทรอบก่อนใช้มัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากใช้เวลาไปมากพอสมควร โดยที่ยังไม่ได้มีการทดสอบ กำลังการผลิตไฟฟ้า ปรากฏว่า แกนใบพัดอันหนึ่งของกังหันลมหัก เนื่องจาก การสั่นสะเทือน ที่เกิดขึ้นบนใบพัดเอง และที่ตกเหนี่ยวมาจากแท่นหมุน ที่โยกเนื่องจาก gyro effect ทำให้ เกิดความล้า และหักไปในที่สุด อย่างไรก็ตาม หลังจากได้ซ่อมแซมเรียบร้อยแล้ว ท่อมาปรากฏว่า เหลากกลางรองแท่นหมุนหัก เนื่องจากแรงโยกคังกล่าว ทำให้ชุดกังหันเสียหายเกินกว่าจะซ่อมแซมได้

อย่างไรก็ตาม หอสรุปข้อมูล บางประการที่ ทำการทดสอบได้ดังนี้

ก. ทดลองครั้งแรก (ระหว่าง มีนาคม ๒๕๒๒ - พฤษภาคม ๒๕๒๒)

-ปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

-กังหันเริ่มทำงานที่ความเร็วลม ๒.๕ เมตร/วินาที เมื่อไม่มีภาระ

-ความเร็ว ๑๕๐ รอบ/นาที ที่ความเร็วลม ๔ เมตร/วินาที

ข. การทดลองครั้งที่สอง (ระหว่าง กันยายน ๒๕๒๓ - พฤศจิกายน ๒๕๒๓)

-การติดตั้งระบบทรอบที่เหมาะสม

-กังหันลมเริ่มทำงานที่ความเร็วลม ๓.๐ เมตร/วินาที เมื่อใช้สายพาน ๑ ชุด หรือใช้แรงบิดเริ่มต้น ประมาณ ๑ นิวตัน-เมตร

-กังหันลมเริ่มทำงานที่ความเร็วลม ๖ เมตร/วินาที เมื่อใช้สายพาน ๒ ชุด หรือใช้แรงบิดเริ่มต้น ประมาณ ๑.๕ นิวตัน-เมตร

ค. การซ่อม

-ครั้งแรก แกนใบพัดหัก

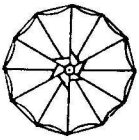
-ครั้งที่สอง เหลากกลางแท่นหมุนขาด -กังหันเสียหายมากซ่อมไม่ได้

รวมเวลาที่ใช้งาน ของกังหันลม หลังจากปรับแต่งเรียบร้อยแล้ว ประมาณ ๓๖๐ ชั่วโมง

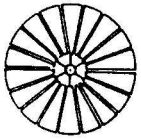
เอกสารอ้างอิง

1. วัชร กาญจนโชติ และคณะ, "กังหันสมขนาดใหญ่อีกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า", รายงานหมายเลข ๔/๒๕๒๑, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๒.
2. สุริยันต์ อภิรักษ์สัตยากุล, "การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก", รายงานหมายเลข ๒/๒๕๒๓, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๓.
3. สมาน เสนงาม และคณะ, รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ ๑, "โครงการวิจัยและพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าควยกังหันลม", คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ๒๕๒๓.
4. Jansen, W.A.M. and Smulders, P.T. "Rotor Design for Horizontal Axis Wind mills.", S.W.D., Netherlands; 1977.
5. United Nations. "Proceeding of the Meeting of the Expert Working Group on the Use of Solar and Wind Energy." United Nations, New York; 1976.
6. von Mises, R. "The Theory of Flight.", Dover Publication, New York; 1959.
7. Park, J. "Simplified Wind Power Systems for Experimenters." Helion, California; 1975.

1. Slow-speed
λ up to 2



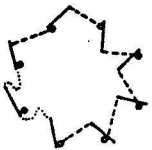
1a. Greek sail rotor



1b. Multi-vane rotor

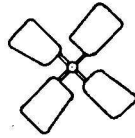


1c. Savonius rotor

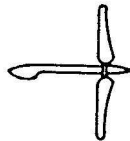


1d. Chinese vertical-axis rotor

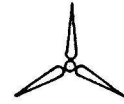
2. Medium-speed
λ 2 - 5



2a. 4-blade cambered metal plate rotor



2b. Princeton sail-wing rotor



3a. 3-blade rotor



3b. Darrius rotor

4. Very-high-speed
λ above 10



4a. 2-blade rotor



4b. 1-blade rotor

- A = Swept area
- C = Chord length
- C_A = Axial force coefficient
- C_D = Drag coefficient
- C_L = Lift coefficient
- C_M = Torque coefficient
- C_P = Power coefficient
- F_A = Axial force
- M = Torque
- P = Power
- R = Radius of rotor
- Re = Reynolds number
- ν_k = Kinematic viscosity

- n = Rev/sec
- u = Tip speed
- v = Wind velocity
- v_{rel} = Relative air velocity
- λ = Tip speed ratio
- ρ = Air density
- σ = Solidity factor

Units - m, kg, sec, kW

Tip speed ratio

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{2\pi n R}{v}$$

$$Re = \frac{v_{rel} C}{\nu_k}$$

Power coefficient

$$C_P = \frac{2P}{\rho v^3 A}$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

Torque coefficient

$$C_M = \frac{2M}{\rho v^2 R A} = \frac{C_P}{\lambda}$$

$$\nu_k = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

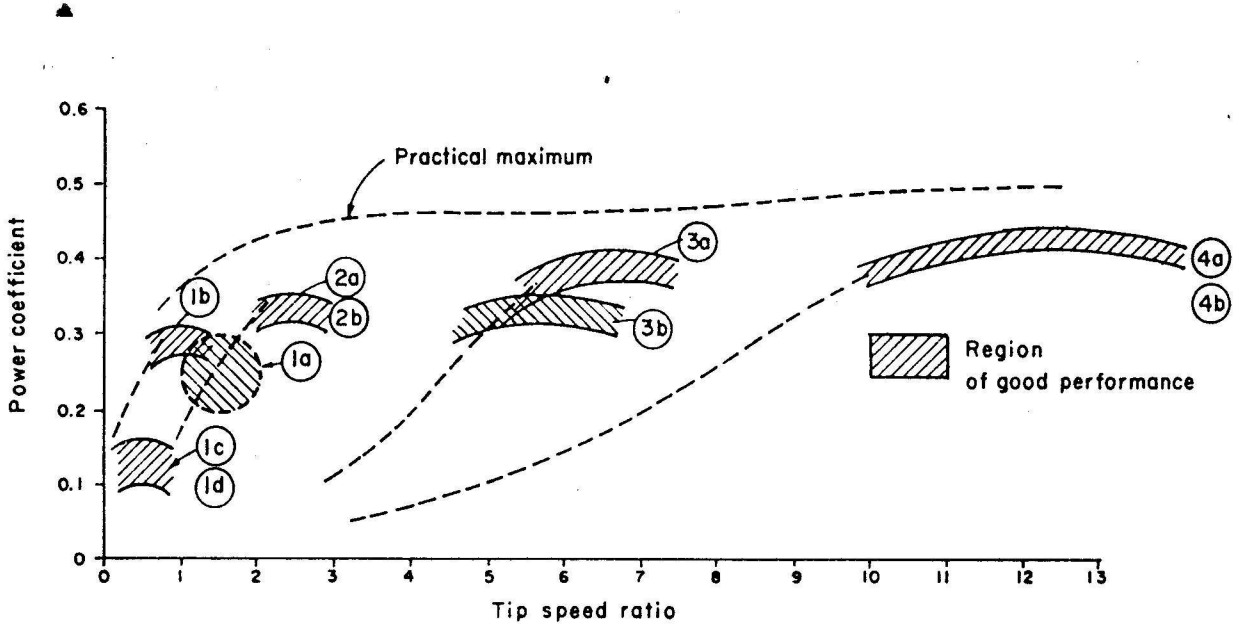
Axial force coefficient

$$C_A = \frac{2F_A}{\rho v^2 A}$$

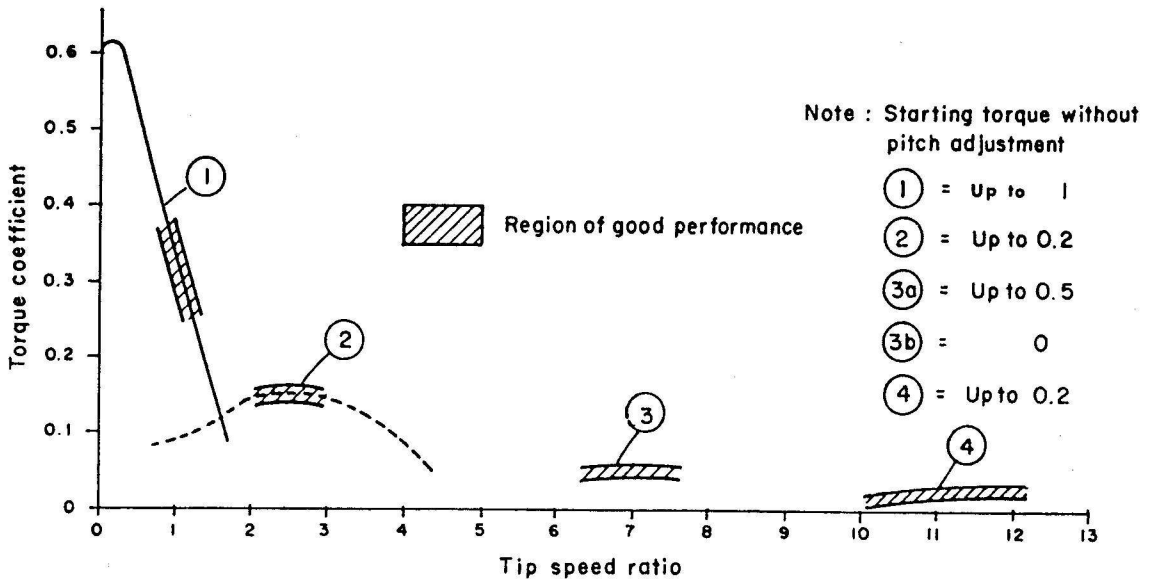
$$A = \text{Frontal blade area measured along chord}$$

$$M = \frac{P}{2\pi n}$$

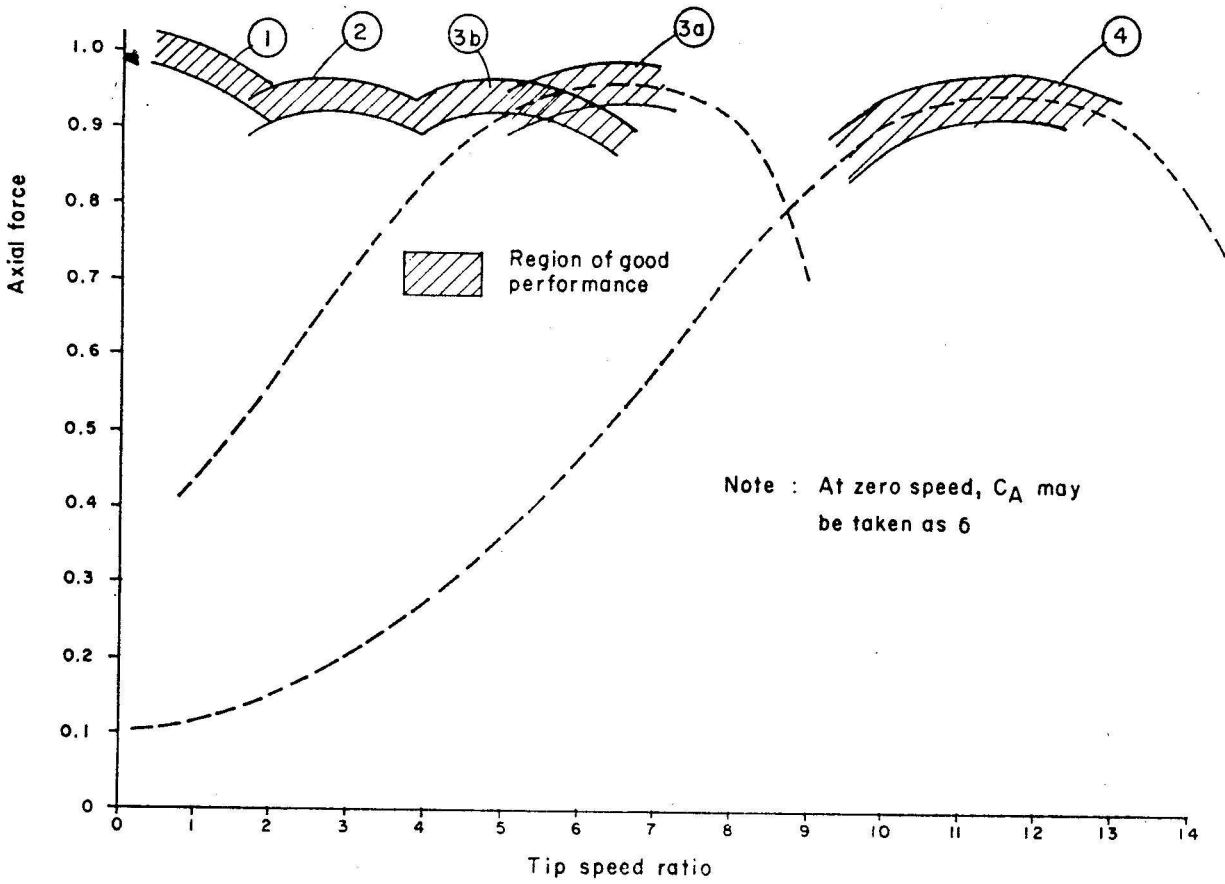
รูปที่ ๑ ลักษณะพื้นฐานของกังหัน (5)



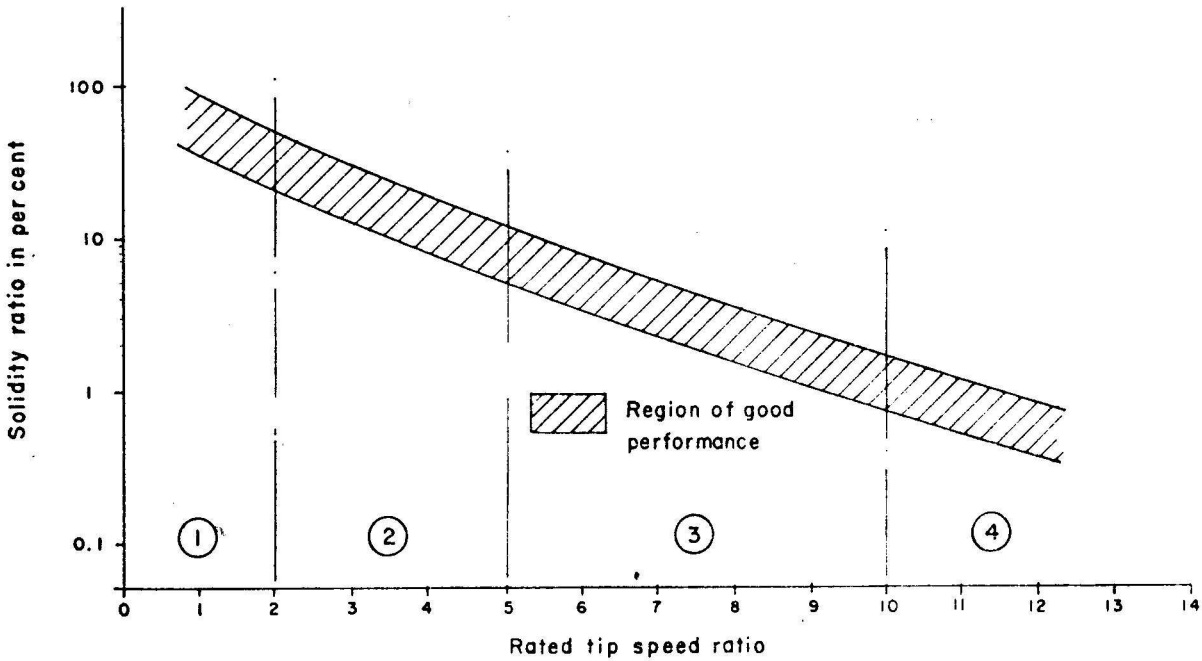
รูปที่ ๒ สัมประสิทธิ์กำลัง (5)



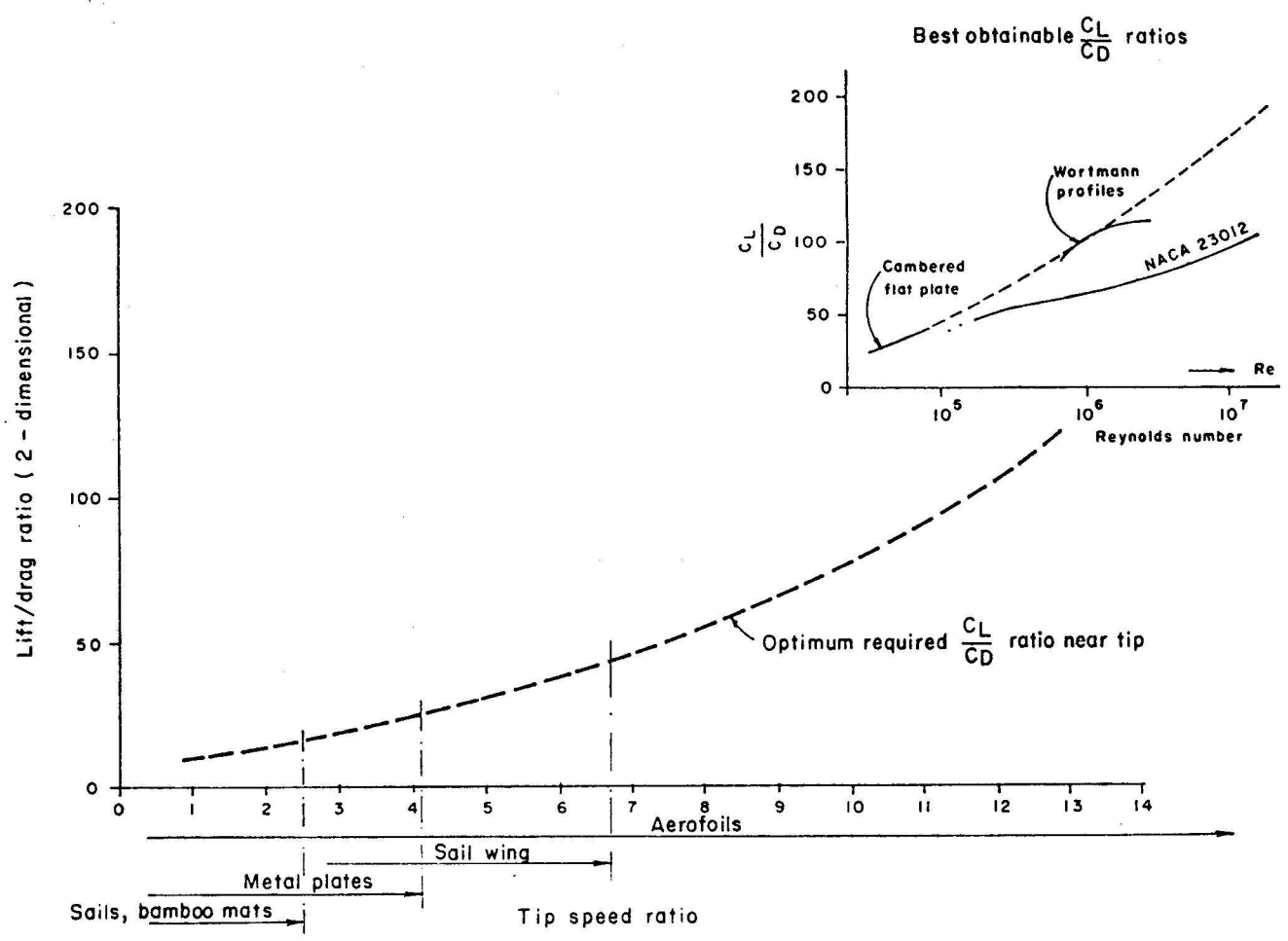
รูปที่ ๓ สัมประสิทธิ์แรงบิด (5)



รูปที่ ๔ แรงในแนวแกนของกังหันขณะหมุน (5)



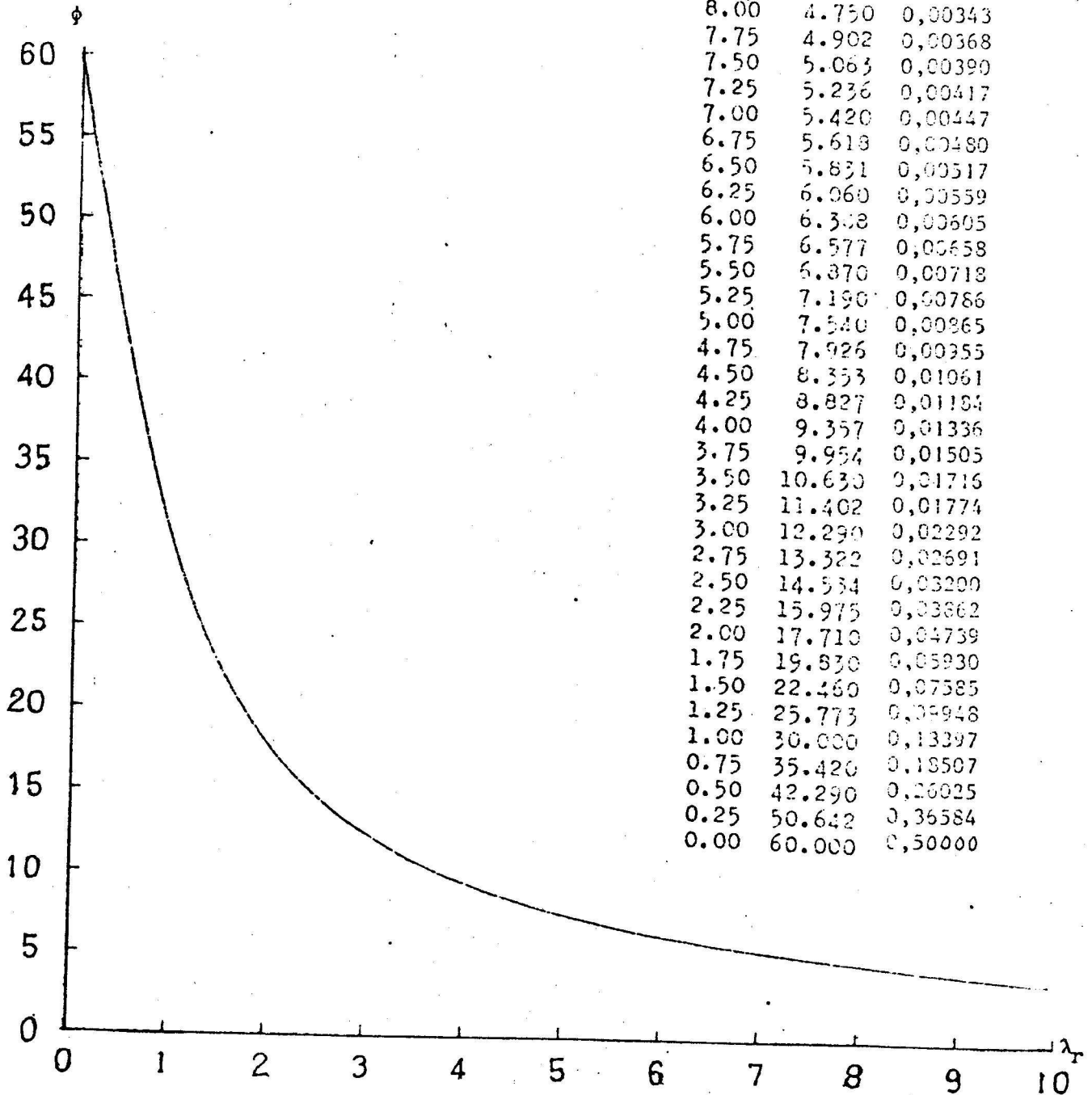
รูปที่ ๕ อัตราส่วนความแน่นของใบพัดที่เหมาะสม (5)



รูปที่ ๖ อัตราส่วนแรงยก/แรงฉุด (5)

λ_r ϕ $(1-\cos\phi)$

$$\lambda_r = \frac{\sin\phi(2\cos\phi-1)}{(1-\cos\phi)(2\cos\phi+1)}$$



รูปที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างมุม ψ กับอัตราส่วนความเร็วที่ระยะ r ของใบพัด
สำหรับกังหันในอุดมคติ⁽⁴⁾