

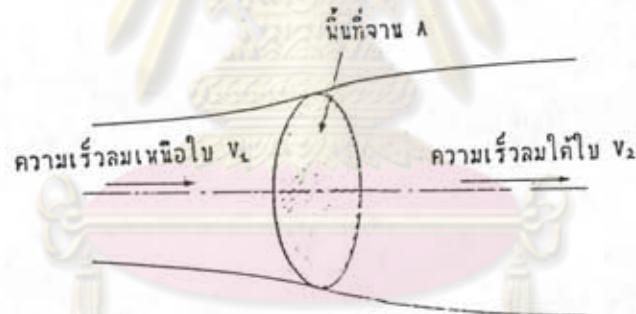


บทที่ 2

ทฤษฎีของกังหันลม

2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

เมื่อประมาณ 100 ปีมาแล้ว ได้มีการพัฒนา แบบจำลองกังหันลมพื้นฐานโดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมเพื่อจะใช้ในการออกแบบใบพัดเรือ (Ship's propellers) ไบเลอ(Bilau) 1925 และ เบตซ์(Betz) 1927 ได้ปรับปรุงทฤษฎีในยุคแรกๆ ด้วยการแสดงกังหันลมเป็นรูปของจาน เมื่อเส้นแรงลม ไหลผ่าน จะเกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันขึ้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการไหลของลมผ่านจาน

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมและพลังงาน ใช้กลศาสตร์ของนิวตัน

(Newtonian mechanics) เป็นหลักในการคำนวณ

รูปที่ 2.1 ความเร็วเฉลี่ยที่จานกำหนดให้เป็น v

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \tag{2.1}$$

กำลังงาน P ที่ได้จากจาน (Disc) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการไหลมาเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

$$P = \frac{1}{2} \rho A V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.2)$$

$\rho A V$ = อัตราการไหลของมวล (Mass flow rate) ที่ผ่านจาน

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

A = พื้นที่ของจาน

ความเร็วมีความสัมพันธ์กับ ตัวแปรทางแนวแกน (Axial interference factor) a

$$V = V_1 (1 - a) \quad (2.3)$$

ดังนั้น

$$V_2 = V_1 (1 - 2a) \quad (2.4)$$

แทนค่า V และ V_2 จากสมการ (2.3) และ (2.4) ลงใน (2.2) กำลังงานแสดงอยู่ในเทอมของลมที่อยู่เหนือจาน (Upstream) V_1

$$P = \frac{1}{2} [4a(1-a)^2] \rho A V_1^3 \quad (2.5)$$

[$4a(1-a)^2$] กำหนดให้เป็น ตัวประกอบกำลังงาน (Power coefficient)

C_p คืออัตราส่วน ของพลังงานจริงที่ถูกส่งถ่ายไปให้จาน กับ พลังงานทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่นั้น ถ้าตัวประกอบทางแนวแกน a เป็น 1, C_p ก็จะเป็น 0 แสดงถึงพลังงานไม่มีการส่งผ่าน ถ้า $a = 0.5$, ความเร็วหลังจาน (Downstream) $V_2 = 0$ เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ที่พลังงานจะถูกส่งถ่ายจนหมดสิ้น พลังงานสูงสุดที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ตามทฤษฎีพื้นฐานเกิดที่ $a = \frac{1}{3}$ และ

$$C_{Tmax} = \frac{16}{27} \quad (2.6)$$

แรงตามแนวแกน (Axial trust) T

$$T = \frac{1}{2} [4a(1-a)] \rho A V_1^2 \quad (2.7)$$

[4a(1-a)] เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ตัวประกอบแรงขับ (Trust coefficient) C_T C_T จะสูงสุดเมื่อ $a = 0.5$ และ $V_2 = 0$ สำหรับพลังงานจะสูงสุดเมื่อ $a = 0.3$ $C_T \approx 8/9$ ของค่าสูงสุด

การสูญเสียต่างๆเมื่อรวมกัน จะลดกำลังงานที่ได้รับในทฤษฎี ตัวประกอบกำลัง (Power coefficient) ในทางปฏิบัติวัดได้ประมาณ 0.46 ถึง 0.47 ค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นมาตรฐานได้ แต่ก็พอจะเป็นพื้นฐานนำไปใช้คำนวณต่อไปได้บ้าง

ความพยายามที่จะให้ $C_{pmax} = \frac{16}{27}$ ในการปฏิบัติไม่ใช่ของง่าย ดังนั้น C_{pmax} ในรายงานนี้ จึงกำหนดว่าเป็นขีดจำกัดบน (Upper limit) ของการปฏิบัติ

ได้มีการแก้ไขทางทฤษฎีหลายครั้ง ยกตัวอย่างเช่น วิลสัน (Wilson) และ ลิสซัมแมน (Lissaman) 1974 ได้รวมเอาการเคลื่อนที่เชิงมุมเข้าไปในการคำนวณด้วย และยังสามารถคาดการณ์เกี่ยวกับตัวประกอบกำลังงาน ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

สังเกตสมการ (2.5) ว่ากำลัง เป็นสัดส่วนกับกำลังสามของความเร็วลม แต่ว่าลมธรรมชาติไม่มีความแน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แม้ว่าในพื้นที่เล็กๆ ก็ยังไม่มี ความแน่นอนกำลังและพลังงานจึงขึ้นอยู่กับการติดตั้งกังหันลม ในสภาพพื้นที่ต่างๆ โดยการออกแบบใช้ C_p เป็นหลัก ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



2.2 กฎเกณฑ์ของกังหันลม

ทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น ใช้สำหรับอธิบายกังหันลม แรง ตัวประกอบ หาได้มาจากการประมาณค่าจากผลการทดลอง และการคำนวณทางสถิติ แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะการดัดแปลง การพัฒนากังหันลมทำกันมาหลายปีแล้ว ค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการเมื่อนำมาใช้ในการปฏิบัติ ใช้ได้กับกังหันลมบางชนิด และสภาพการใช้งานที่สามารถควบคุมได้เท่านั้น ดังนั้นทฤษฎีจึงต้องเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบ และ ชนิดของกังหันลม รวมไปถึงถึงสภาพการใช้งาน

ขอกล่าวถึงชนิดใหญ่ๆของกังหันลมก่อน กังหันลมแบบแนวแกนหรือกังหันลมแกนนอน (Wind axis turbine) เช่น กังหันลมที่ใช้ในการสีข้าวโพด และ กังหันลมหลายใบ (Multiple blade turbine) ส่วนกลุ่มหลังเรียกว่า กังหันลมแบบแกนตั้ง หรือ มีแกนขวางกับทิศทางลม (Crosswind-axis turbines) มีมากมายหลายชนิด จากจีนโบราณและเครื่องจักรกลของ อาฟเกน (Afghen) อัตราการหมุนเร็วกว่าแบบแกนนอนโดยมีหน้าตัดเหมือนปีกเครื่องบิน หน้าที่การทำงานของ กังหันลมแกนนอนและแกนตั้งแตกต่างกันไปตามรูปร่างของการสร้าง จะกล่าวต่อไปภายหลัง

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) ใช้ในการคำนวณและอธิบายประสิทธิภาพของกังหันลม

λ คืออัตราส่วนของความเร็ววงรอบ (Turbine peripheral speed) ต่อความเร็วลม V_1

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_1} \quad (2.8)$$

Ω = ความเร็วเชิงมุม

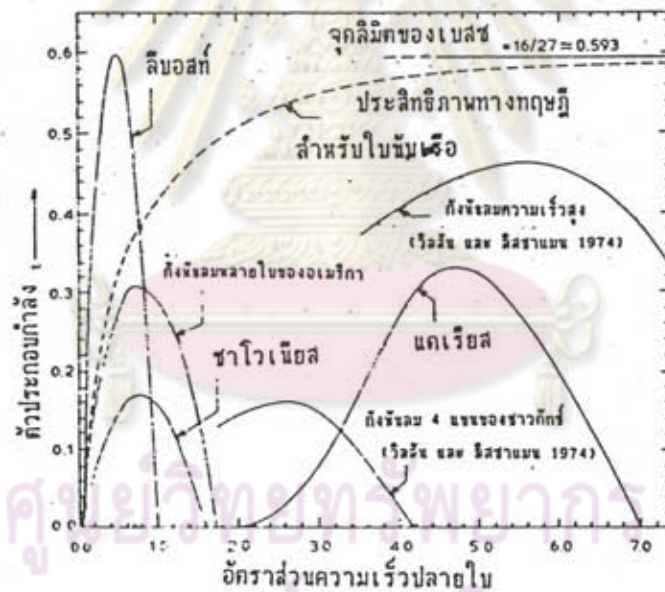
r = รัศมีของแขนใบ

กังหันลมแบบแกนนอน ส่วนมากใช้ในการสูบน้ำ มีใบที่ทำด้วยโลหะเบา ชนิดของกังหันลมทำงานโดยอาศัยหลักของแรงยก (Lift force) หลังจากที่มีการค้นพบแรงยกในศตวรรษที่ 18 ในยุคแรกโครงสร้างของกังหันลมหนัก การควบคุม แรงบิด (torque) และ

กำลังงาน การออกแบบให้เกินกว่าจุดจำกัดในกรณีนี้เป็นไปได้ยาก การแทรกสอด ของลมระหว่างใบ มีมาก ที่ความเร็วลมสูง ทำให้ แรง และ กำลังที่ได้ถูกจำกัดหมด กังหันลมเหล่านี้ทำงานที่ความเร็วลมต่ำ λ โดยทั่วไปน้อยกว่า 2

ตัวประกอบกำลังยังมีค่ามากซึ่งมีประสิทธิภาพสูง กังหันลมสมัยใหม่ใบมีรูปร่างคล้ายหน้าตัดของ ปีกเครื่องบิน (Aerofoil) ซึ่งเพิ่มแรงยกและลดแรงลาก (Drag force) และ ใช้จำนวนใบที่น้อยกว่า ดังนั้นการคำนวณตัวแปร และ ตัวประกอบต้องคำนึงถึงการรบกวนของลม ที่เกิดจากใบข้างเคียง ค่าคงที่ของกังหันลมจึงขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันลม อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) ยิ่งสูงขึ้นเท่าไรตัวประกอบกำลังก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น

λ และ C_p แสดงความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวประกอบกำลัง พลังงานกับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ สำหรับกังหันลมแกนตั้ง และ แกนนอน

กังหันลมแกนตั้งหรือ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า พานโมเนส (Panemones) แบ่งออกเป็น

2 ชนิด

1. ความแข็งแกร่งสูง (High Solidity)
2. ความแข็งแกร่งต่ำ (Low Solidity)

ชนิดที่ 1 มีหลายชนิดให้เลือก ความเร็วปลายใบต่ำกว่าความเร็วลมที่ไหลผ่าน λ ทั้งหมดน้อยกว่า 1

ย้อนหลังกลับไปประมาณ 1000 ปี กังหันลมยุคแรก การออกแบบมุ่งที่การลด แรงลาก ซึ่งเป็นตัวหน่วงการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นบนตัวใบ เห็นได้ทั่วไปก็คือ ถ้วย 3 ถ้วยตั้งอยู่บนแกนเพลลาหมุนได้อย่างอิสระ อุปกรณ์นี้ชื่อว่า แอนนิโมมิเตอร์ (Anemometer) แสดงไว้อีกหลายแบบดังรูป 2.3



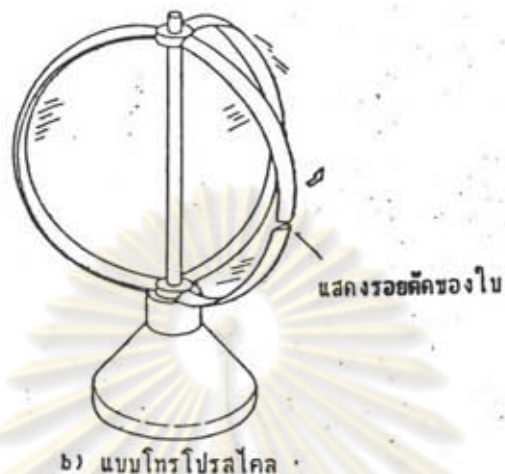
รูปที่ 2.3 ชนิดต่างของกังหันลมแบบพานิโมนี

รวมทั้งกังหันลมที่มีชื่อเสียงอย่างมากสร้าง ในปี 1931 พัฒนาขึ้นโดย ซาโวเนียส (Savonius) หลังสงครามโลกครั้งที่ 1 การประดิษฐ์กังหันลมรุ่นที่ 2 รุ่นความแข็งแรงต่ำ

(Low solidity) ซึ่ง ก้าวหน้ามากทางด้านวิชาพลศาสตร์ (Aerodynamic) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4. ใบตัดเป็นส่วนโค้งเรียกชื่อว่า โทโปรสโคล (Troposkien) ง่ายต่อการสร้างและทนต่อแรงดึงได้สูง (Tensile stresses) ส่วนรูปทรงกระบอก (Squirrel-cage) มีข้อดีที่ว่าผลิตง่ายและถูก แต่มีแรงบิด โมเมนต์ที่สูง เสนอขึ้นครั้งแรกโดย แดเวียส (Darrieus) 1931 แต่ว่าการพัฒนาทางด้านนี้ก้าวไปได้ช้า (ยกเว้นชาวฝรั่งเศส ในช่วง ค.ศ.1950) จนกระทั่งปลายปี 1960 มีการออกแบบเพิ่มขึ้นอีกหลายชนิด และ กังหันลมแนวนี้ อีกหลายแนวถือกำเนิดขึ้น ได้รับการพัฒนารูปร่างของใบเมื่อได้รับลมสามารถที่จะเริ่มต้นหมุนเองได้ (Self-starting) กังหันลมบางชนิด ยังสามารถปรับใบได้ อย่างอัตโนมัติเพื่อรับลม แต่ข้อเสียก็คือ เมื่อลมแรงขึ้น ใบเหล่านี้จะถูกแรงหนีศูนย์กลาง เหวี่ยงออกไปทำให้ แรง และ กำลังที่ได้ลดน้อยลงการแก้ไข การตัดแปลง และ เพิ่มประสิทธิภาพ ของกังหันลมชนิดนี้จะกล่าว ในตอนต่อไป



๑) แบบทรงกระบอก



รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนตั้ง ทรงกระบอก และ โทรโปรสโคป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

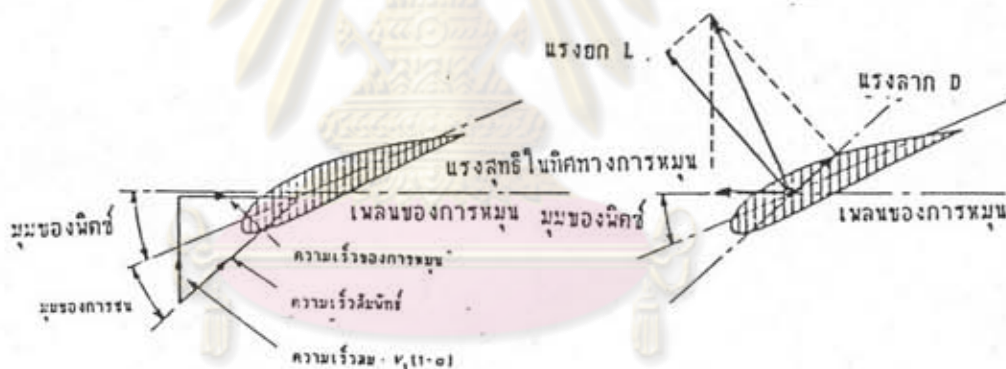
2.3 แรงยก (Lift force) และ แรงลาก (Drag force) การออกแบบ และ การคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและละเอียดยิ่งขึ้น จำเป็นที่จะต้อง เปลี่ยนแปลงการคำนวณบางอย่างภายใต้หัวข้อ 2.1 ผลที่เกิดจากการไหลของอากาศรอบๆใบ สัดส่วนของใบ ประสิทธิภาพต่างๆ ฯลฯ นำมาพิจารณาพร้อมกัน

(มีการวิจัยรูปร่างของใบอย่างมากมายในอเมริกา)

แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นบนใบประกอบด้วยแนวแรง 2 แรง ได้แก่ แรงยก (Lift) และ แรงลาก (Drag)

แรงลากจะมีทิศทางเดียวกับ ผลรวมทางเวกเตอร์ ของ ความเร็วลม กับ ความเร็วใบ ส่วนแรงยกจะมีทิศทางตั้งฉากกับแรงลาก

เวกเตอร์ของความเร็วและแรง แสดงอย่างง่ายในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 a). เวกเตอร์ความเร็ว และ b). เวกเตอร์ของแรง
แรงยก และ แรงลาก ออก่าณส่วนตัดของใบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงยก และ แรงลาก แทนด้วย L และ D เป็นสัดส่วนกับ

- ρ = ความหนาแน่นของอากาศ
- S = พื้นที่ของใบ
- V = ความเร็วสัมพัทธ์
- C_L = ตัวประกอบแรงยก
- C_D = ตัวประกอบแรงลาก

พิสูจน์ได้ว่า

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (2.9)$$

และ

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (2.10)$$

แสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 แรงยกและแรงลาก พิจารณาเมื่อใบตั้งฉาก และ ชิดติดกับ แกนของกังหันลม (Fix blades) คำนวณแรงได้ดังนี้

$$F_N = L \cos \phi - D \sin \phi \quad (2.11)$$

$$F_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (2.12)$$

F_T = แรงที่อยู่ในทิศทางของการหมุน ที่เกิดขึ้นบนใบของกังหันลม

F_N = แรงที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับการหมุน ที่เกิดขึ้นบนใบของกังหันลม

การหาสัดส่วนของ C_L และ C_D ขึ้นกับตัวแปรหลายตัว ตัวแปรเหล่านี้สามารถวัดได้ในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel) มีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของใบ และรูปทรงของใบ ขนาดใบที่นิยมกันมากที่สุดคือ อนุกรมของ นาคา (NACA) ทดลองและ รวบรวมโดย แอบบอต (Abbott) วอน ดอนฮอฟ (Von Doenhoff) และ สตีเวอส์ (Stivers) 1945 C_L และ C_D ขึ้นอยู่กับมุมของการชน (Angle of attack) α แสดงในรูป (2.5) สำหรับ ชนิดและรูปร่างใบ โดยทั่วไป C_L จะถึงค่าสูงสุด เมื่อ $\alpha = 10^\circ - 15^\circ$ มุมนี้เรียกชื่อว่า มุมสตอล (The angle of stall) หลังจากนั้น C_L จะลดลง ตัวประกอบแรงลากยากที่จะประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง เพราะขึ้นอยู่กับความเร็ว แรงเสียดทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ ฯลฯ

ตัวประกอบทั้งคู่สามารถอธิบายด้วยค่าๆหนึ่งใน กลศาสตร์ของของไหล (Fluid mechanics) ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ (Reynold number) R (ไม่มีหน่วย)

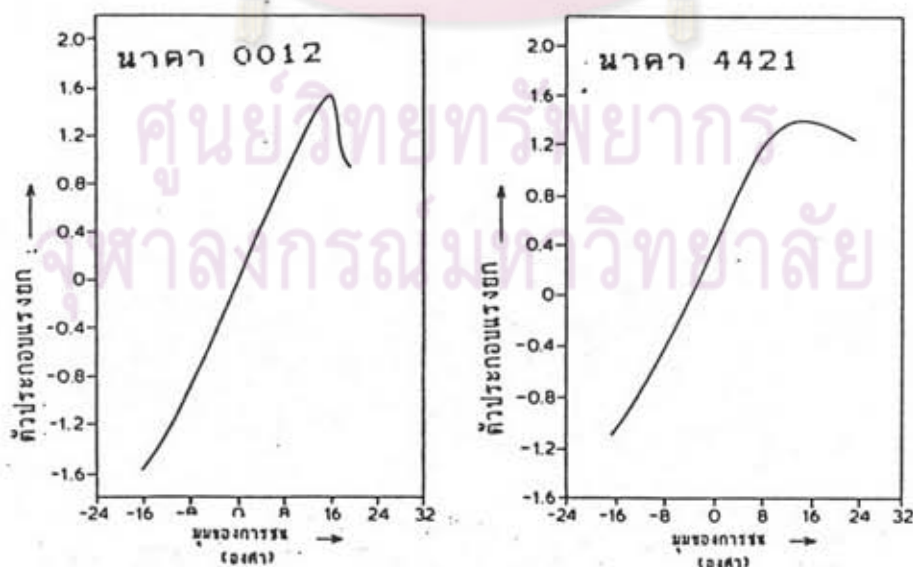
$$R = \rho \frac{VI}{\mu} \quad (2.13)$$

μ = ความหนืดทางพลวัตของอากาศ (Air Dynamic Viscosity)

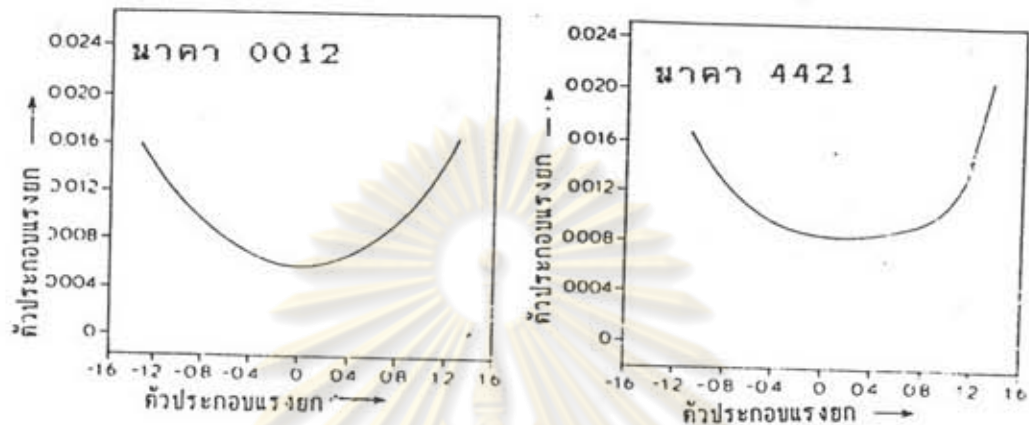
l = ความยาวคอर्ड (Characteristic Length)

เลขเรย์โนลด์ ที่ใช้ในการอธิบาย มีค่าอยู่ระหว่าง 10^5 ถึง 10^7 ดัดแปลงไปใช้ได้กับ ปีก และ ใบขับ (Propeller) ต่างๆ กังหันลมบางชนิดใช้งานที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ การออกแบบและการคำนวณจะต้องระวังการผิดพลาดอย่างมาก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกังหันลมมีขนาดเล็ก)

มีรูปตัวอย่าง ของ NACA 4421 และ NACA 0012 (ใช้ในการออกแบบทำโมเดล และการคำนวณเป็นส่วนใหญ่) ขนาดต่างๆ รูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7 แสดงถึงตัวประกอบแรงยกเมื่อพล็อตเทียบกับมุมของการชน



รูปที่ 2.6 ตัวประกอบกำลัง กับ มุมของการชน สำหรับ NACA 0012 และ 4421

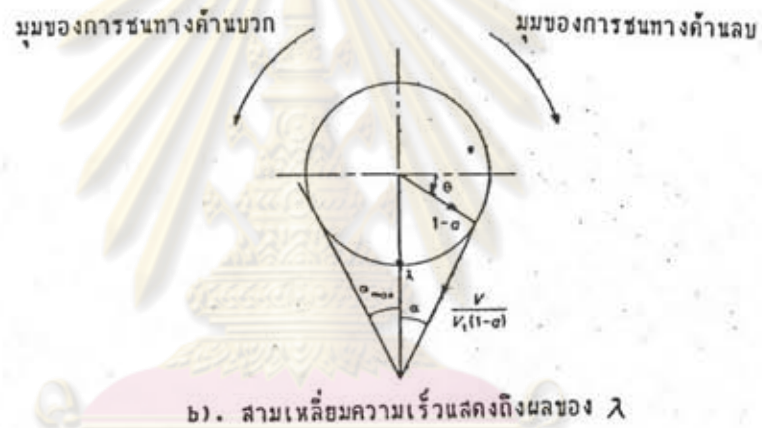


รูปที่ 2.7 ค่าประจกอบแรงลาก และ ค่าประจกอบแรงยก
สำหรับ NACA 0012 และ 4421

ด้วยการใช้ข้อมูลเหล่านี้ สามารถที่จะคำนวณ แรงที่ใช้ในการหมุนได้ แต่อย่างไรก็ตาม สัดส่วนที่แตกต่างกัน ของกังหันลม มุมของการชนระหว่างคอร์ด์กับใบ การไหลของอากาศ ที่คิดในแนวสัมผัส และความเร็วในแนวตั้งฉากกับใบ (Tangential Speed) ทำให้แรงเกิดขึ้นในตำแหน่งของใบ ไม่เท่ากัน เพื่อที่จะหาค่ามุมของการชนที่สัมพันธ์กับสัดส่วนของแรงยก และแรงลากสูงสุดจึงต้องคำนวณจากทุกตำแหน่งของใบ

การวิเคราะห์อากาศศาสตร์ ที่เป็นส่วนๆ (Block) รวมแรงหมุนและแรงตามแนวแกน จากค่าต่างๆที่แยกเป็นส่วนย่อยบนตำแหน่งต่างๆของใบ

กังหันลมแกนตั้ง การคำนวณหาค่าแรงยกและแรงลากใช้หลักการคล้ายกับหลักการของกังหันลมแบบแกนนอน แต่ว่ากฎพื้นฐานบางอย่างแตกต่างกัน กังหันลมแบบแกนนอนรูปร่างของใบแต่ละใบมีมุมชนที่คงที่ตลอดเวลา ระหว่างการหมุน ขณะที่กังหันลมแบบแกนตั้งมุมของการชนเปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนแต่ละครั้ง รูปที่ 2.8 แสดงรูปร่างของกังหันลม



รูปที่ 2.8 เวกเตอร์การไหลของอากาศที่ใบ

สำหรับกังหันลมแกดตั้งความเร็วสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามเหลี่ยมความเร็วแสดงไว้ในรูปที่ 2.8a เพื่อที่จะชี้ให้เห็นมุมของการชน
สามเหลี่ยมเหล่านี้จัดรูปใหม่แสดงในรูปที่ 2.8b เมื่อกังหันลมหมุนครบ 1 รอบ จะเห็นว่า

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \frac{1-a}{\lambda}$$

(2.14)

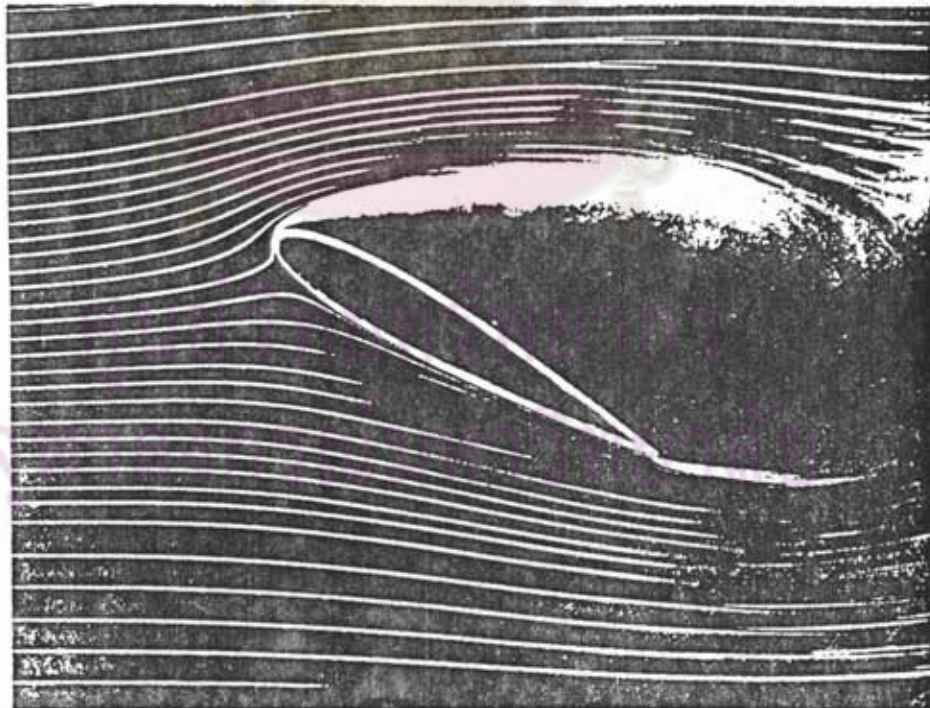
ยกตัวอย่างเช่น มุมของการสตอล (Angle of Stall) มีค่าประมาณ 12° ตัวประกอบการหน่วงตามแนวแกน (Axial Retardation Factor) = $1/3$ (C_p สูงสุด) และ $\lambda > 3.2$ แรงแยกเกิดขึ้นที่ทุกๆจุด (ยกเว้นที่ $\alpha = 0$)

α_{\max} = มุมของการสตอล

α = ตัวประกอบการหน่วงตามแนวแกน

สิ่งเหล่านี้เมื่อมีเงื่อนไขโดยมีการไหลแบบคงที่ (Steady) และไม่สามารถเริ่มหมุนตัวเองได้ (Self Start) การคาดประมาณประสิทธิภาพโดยใช้คุณสมบัติ ของแรงยกและแรงลากสามารถนำไปใช้อธิบายกังหันลมแบบแกนนอนได้เช่นกัน ส่วนสำคัญของการคำนวณคือการเข้าใจที่พอสำหรับ การไหลของลมที่อยู่เหนือใบ (Upstream Flow) ลมที่อยู่ใต้ใบด้วย (Downstream Flow) ที่มีผลต่อแรงต่างๆ บนตัวใบ

จากรูปตัวอย่างที่ถ่ายได้ในอุโมงค์ลม



รูปที่ 2.10

รูปตัวอย่าง ทดสอบในอุโมงค์ลม โดยใช้ควันเพื่อให้เห็นเส้นการไหลอย่างชัดเจน ที่มุมประทะสูงจะเกิดการสตอลขึ้น บริเวณด้านบนของใบ

2.4 ประสิทธิภาพและการตัดแปลงไปใช้งาน

กำลังงานของเพลาส่งถ่ายโดยกังหันลม ใช้ในการขับเครื่องจักรกล การส่งถ่ายทอร์คขณะที่กังหันลมรับภาระอยู่ (Load) ส่วนนี้เป็นส่วนที่มักออกแบบต้องคำนวณได้อย่างแม่นยำ โดยคำนึงถึงอัตราการส่งถ่าย (Transmission Ratio) การเปลี่ยนแปลงชนิดของกังหันลม (เฉพาะกังหันลมแบบแกนนอน) สภาพการใช้งาน เช่น ใช้ในการขับเครื่องสูบน้ำ (Pump) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เวลาคำนวณออกแบบต้องคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ โดยรวม

คุณสมบัติของกังหันลมสามารถแสดงได้ด้วยกราฟของ

ตัวประกอบกำลัง/อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

จากสมการที่ 2.5

$$\text{Torque} = \frac{1}{\Omega} \times \text{Power} = \frac{1}{\Omega} \times \frac{1}{2} C_p \rho A V^3$$

i.e.

$$\text{Torque} = \frac{\pi r^2 \rho}{2} \times \frac{1}{\lambda} \times C_p \times V^2$$

(2.15)

แทนค่าจากสมการที่ (2.8)

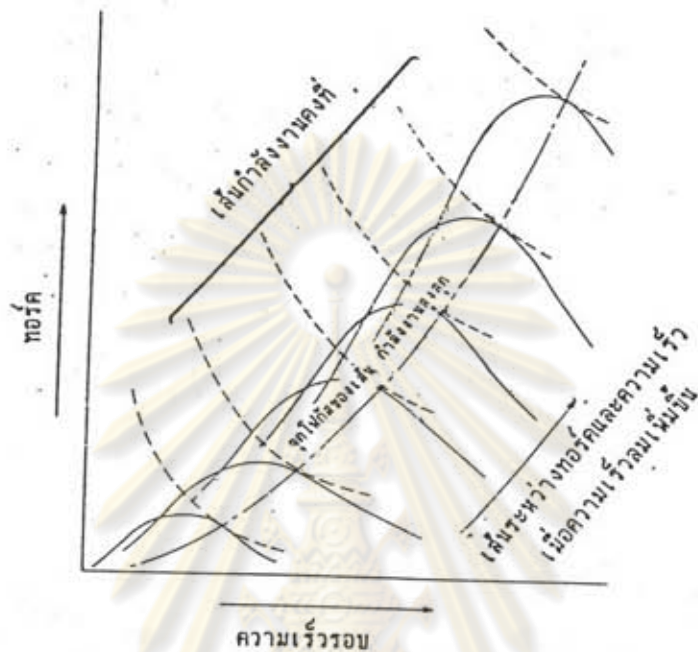
ค่าของทอร์ค พล็อต กับ ความเร็วรอบ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2

ข้อมูล รูปที่ 2.2 ใช้ร่วมกับสมการที่ 2.15 ได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 2.9 ใช้สำหรับกังหันลมที่มีพิชต์คงที่ เส้นกราฟที่ลากผ่านค่ากำลังงานสูงสุด

แสดงถึงค่าของกำลังงานสูงสุดที่ค่าความเร็วลมต่างๆ ใช้สำหรับการออกแบบได้เป็นอย่างดี

เส้นกราฟเรียกชื่อว่า เส้นภาระ (Load Line) ในกรณีของเครื่องจักรกล อัตราการส่งถ่าย (Transmission Ratio) มีผลอย่างมากต่อเส้นภาระนี้ จากกราฟเมื่ออัตราการส่งถ่ายเพิ่มขึ้น 50% ทอร์คจะลดลง 50% เช่นกัน กำลังงานที่ส่งถ่ายออกแบบโดยคำนึงถึงอัตราส่วนการส่งถ่าย เส้นแรงเหล่านี้ขึ้นกับ



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟระหว่าง ทอร์ค และ ความเร็ว
สำหรับกังหันลมที่มีชนิดคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปรหลายตัว เช่นค่าความดันในเครื่องสูบน้ำ ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ทางกล
เส้นโค้งเหล่านี้ได้มาจากกังหันลมที่มีชนิดคงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำต่อกังหันลม
การเปลี่ยนแปลงชนิดได้จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า ในกังหันลมที่มีขนาดไม่โตนัก การเปลี่ยนแปลง
ชนิดอาศัยกลไกชนิดหนึ่งเรียกว่า ตัวควบคุมด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Governor)
โดยการใช้น้ำหนักถ่วง ไกล่คุมล้อการเปลี่ยนแปลงชนิดสามารถปรับเส้นโค้งเหล่านี้ให้เรียบได้