บทที่ 3

การทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องกังหันไอขนาดเล็กนี้ ประกอบด้วยการออกแบบและสร้างเครื่องกังหันเป็นแบบแรงผลักชนิดรวมความเร็วที่มี 2 ขั้นความเร็วสร้างอุปกรณ์ที่ใช้วัดทดสอบเครื่องกังหัน พร้อมทั้งศึกษาสมรรถนะของเครื่องกังหันแบบแรงผลักชนิด 1 ขั้นความเร็ว และชนิดไหลเข้าตามแนวรัศมีที่มีอยู่แล้ว (27, 28) เพื่อศึกษาแนวโน้มของสมรรถนะของเครื่องกังหันแต่ละชนิด ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้

3.1 การสร้างเครื่องกังหัน

การสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกังหันยึดหลัก ใช้วัสดุที่หาได้ง่าย ไม่เป็นสนิม และสามารถทำได้ง่าย ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างเครื่องกังหันแบบแรงผลักชนิด 2 ขั้นความเร็วทั้งหมด 2 เครื่อง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงล้อใบกังหันเฉลี่ยต่างกันเล็กน้อยและออกแบบต่างกัน การสร้างเครื่องกังหันมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 การคำนวณออกแบบเครื่องกังหัน

การคำนวณออกแบบนี้กระทำเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการสร้างใบกังหัน เลือกกำหนดจำนวนใบกังหันในแต่ละแถว และการสร้างหัวฉีด เพื่อให้ได้แรงบิดและกำลังงานตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากในการสร้างจริงย่อมมีการคลาดเคลื่อนไปบ้างและบางครั้งอาจจะต้องมีการปรับแต่งหรือดัดแปลงให้ต่างไปจากค่าที่คำนวณได้ เพื่อให้สามารถกระทำได้ง่ายในทางปฏิบัติ ก่อนที่จะทำการคำนวณออกใบกังหัน จะต้องกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงล้อใบกังหันเฉลี่ยเสียก่อน เนื่องจากในการสร้างตัวถังกังหัน (turbine case) นี้ ใช้ท่อโลหะทองเหลืองที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งมีขนาดต่าง ๆ ให้เลือกไม่มากนักโดยเฉพาะท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในโตกว่า 5 นิ้ว นอกจากนี้จะต้องทราบขนาดของแหล่งพลังงานความดัน

คือ ทราบอัตราส่วนความดันที่สามารถจะหาได้เพื่อใช้ผลิตลำไอความเร็วสูง ซึ่งจะสามารถคำนวณความเร็วของลำไอได้ แล้วดำเนินการคำนวณออกแบบตามขั้นตอนต่าง ๆ ในหัวข้อ 2.4

อนึ่งในการคำนวณออกแบบนี้ ใช้ข้อมูลเบื้องต้นที่คาดว่าจะมีได้สำหรับสารฟรีออน 113 ($C_2Cl_3F_3$) หรือเขียนแทนด้วย F 113 ซึ่งมีจุดเดือดที่ความดันบรรยากาศเท่ากับ 47.6 °C และมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคลี่อื่นดังแสดงในตารางที่ ก.1 โดยสมมุติว่า F 113 เป็นกาซสัมบูรณ์และคาดว่าแหล่งความร้อนที่จะใช้ในการทำให้ F 113 กลายเป็นไอมีอุณหภูมิประมาณ 80° c จากตารางที่ ก.2 ที่อุณหภูมิ 180°F หรือ 82.2°c F 113 จะมีความดันไอสัมบูรณ์เท่ากับ 41.22 ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือเท่ากับ 2.898 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สมมุติว่า F 113 ขยายตัวจากความดันนี้ผ่านหัวฉีดออกที่ความดันระดับความดันบรรยากาศ กล่าวคือสมมุติให้ความดันที่ทางออกของหัวฉีดเท่ากับ 1.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ความดัน 1 บรรยากาศ มาตรฐาน = 1.03323 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ค่าดัชนีการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิค n ของ F 113 หาได้จากการคำนวณโดยประมาณว่าสถานะเริ่มและสิ้นสุดของการขยายตัวอยู่ที่อุณหภูมิ 180°F และ 120°F ในตารางที่ ก.2 กล่าวคือ ประมาณว่า F 113 ขยายตัวจากความดันไอสัมบูรณ์ $p_1 = 2.84202 \times 10^5$ นิวตันต่อตารางเมตร (41.22 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีปริมาตรจำเพาะ $v_1 = 0.051128$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (0.819 ลูกบาศก์ฟุตต่อปอนด์) สู่ความดันสัมบูรณ์ $p_2 = 1.06179 \times 10^5$ นิวตันต่อตารางเมตร (15.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีปริมาตรจำเพาะ $v_2 = 0.129725$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (2.078 ลูกบาศก์ฟุตต่อปอนด์) จากสมการ (2.77) คำนวณหาค่า n ได้เท่ากับ 1.057 ในที่นี้เลือกใช้ค่า n = 1.06 สำหรับการคำนวณหาความเร็วไอของ F 113 ที่ออกจากหัวฉีด จากสมการ (2.79) ถ้ามี $p_1 = 2.84202 \times 10^5$ นิวตันต่อตารางเมตร, $v_1 = 0.051128$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม และ $p_2 = 1.01989 \times 10^5$ นิวตันต่อตารางเมตร จะได้ความเร็วที่ออกจากหัวฉีด $C_{k_2} = 170.1$ เมตรต่อวินาที นั่นคือ $C_{k_2} \simeq 170$ เมตรต่อวินาที จากสมการ (2.77) สามารถคำนวณหาปริมาตรจำเพาะ v_2 ของไอที่ออกจากหัวฉีดได้ $v_2 = 0.134378$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม

ก. สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 การคำนวณออกแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวงล้อใบกังหัน = 136 มิลลิเมตร และอัตราเร็วรอบหมุน = 6000 รอบต่อนาที คือจะมีอัตราเร็วใบกังหัน U = 42.72 เมตรต่อวินาที จะได้ว่า

อัตราส่วนความเร็ว $\frac{U}{C_1} = \frac{42.72}{170} = 0.251$

จากสมการ (2.40) จะเห็นว่าอัตราส่วนความเร็วมีค่าสูงไปและเป็นไปไม่ได้ ทำการเลือกกำหนดค่าอัตราส่วนความเร็วใหม่ โดยการเลือกใช้มุมของหัวฉีด $\alpha_1 = 15^\circ$ และจากสมการ (2.40) จะได้อัตราส่วนความเร็วที่เหมาะสม $\frac{U}{C_1} = 0.241$ และมีอัตราเร็วใบกังหัน U = 40.97 เมตรต่อวินาที นั่นคือ จะมีอัตราหมุนที่เหมาะสมหรือทำให้มีประสิทธิภาพไดอะแกรมสูงสุด ประมาณ 5750 รอบต่อนาที จากนั้นทำการคำนวณมุมเข้าและมุมออกของใบกังหันในแต่ละแถวเพื่อนำไปใช้ในการสร้างใบกังหันในแต่ละแถวได้ดังนี้

ในการคำนวณออกแบบนี้จะใช้ใบกังหันเป็นแบบสมมาตรคือ มีมุมออกและมุมเข้าเท่ากัน เพื่อความง่ายในการสร้าง และสมมุติว่าเป็นกรณีที่ใบกังหันไม่มีความเสียดทานต่อการไหล

สำหรับใบกังหันแถวที่ 1 (แถวหมุนแถวที่ 1)

คำนวณหามุมเข้าและมุมออกของใบกังหัน, ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าและออก, มุมและความเร็วสัมบูรณ์ที่ออกจากใบกังหัน ได้ดังนี้

จากสมการ (2.56) จะได้มุมเข้าใบกังหัน $\beta_1 = 20^\circ$

จากสมการ (2.57) จะได้ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่ใบกังหัน $V_1 = 131.15$ เมตร/วินาที

เนื่องจากเป็นกรณีที่ใบกังหันเป็นแบบสมมาตรและไม่มีความเสียดทานต่อการไหล ดังนั้นจะได้ว่า $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$ และ $V_1 = V_2 = 131.15$ เมตร/วินาที

จากสมการ (2.58) จะได้มุมที่ความเร็วสัมบูรณ์ออกจากใบกังหัน $\alpha_2 = 29^\circ$

จากสมการ (2.59) จะได้ความเร็วสัมบูรณ์ที่ออกจากใบกังหัน C_2 = 94.06 เมตร/วินาที

สำหรับใบกังหันแถวที่ 2 (แถวที่อยู่นิ่ง)

เนื่องจากเป็นใบที่ทำหน้าที่กลับทิศการไหลของไอเท่านั้น และจากเงื่อนไขที่สมมุติดังกล่าวข้างต้น จะได้ว่า

มุมเข้าและมุมออกของใบกังหัน = α_2 = 29^o

ความเร็วสัมบูรณ์ที่ออกจากใบกังหัน $C_3 = C_2$ = 94.06 เมตร/วินาที

สำหรับใบกังหันแถวที่ 3 (แถวหมุนแถวที่ 2)

จะคำนวณได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

จากสมการ (2.60) จะได้มุมเข้าของใบกังหัน $\beta_3 = 48^o$

จากสมการที่ (2.61) จะได้ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่ใบกังหัน V_3 = 61.72 เมตร/วินาที

เนื่องจากใบกังหันเป็นแบบสมมาตรและไม่มีความเสียดทานต่อการไหล ดังนั้น $\beta_3 = \beta_4 = 48^o$

และ $V_3 = V_4$ = 61.72 เมตร/วินาที

จากสมการ (2.62) จะได้มุมออกของความเร็วสัมบูรณ์ $\alpha_4 = 89.6^o$

จากสมการ (2.63) จะได้ความเร็วสัมบูรณ์ที่ออกจากใบกังหัน C_4 = 47.09 เมตร/วินาที

จากมุมและความเร็วต่าง ๆ ที่คำนวณได้ สามารถคำนวณหาอัตราการทำงานของไอที่กระทำบนใบกังหันได้จากความเร็วหมุนมัวนที่เปลี่ยนไปดังนี้

จากสมการ (2.65) ความเร็วหมุนม้วนที่เปลี่ยนไปสำหรับแถวหมุนแถวที่ 1

ΔV_{w1} = 246.48 เมตร/วินาที

จากสมการ (2.67) ความเร็วหมุนม้วนที่เปลี่ยนไปสำหรับแถวหมุนแถวที่ 2

ΔV_{w2} = 82.59 เมตร/วินาที

ความเร็วหมุนม้วนที่เปลี่ยนไปทั้งหมด ΔV_w = 246.48 + 82.59 = 329.07 เมตร/วินาที

จากสมการ (2.69) จะได้ว่ากำลังงานที่ไอกระทำได้บนใบกังหันจากอัตราไหลของมวล 1 กิโลกรัม/วินาที

$P = 329.07 \times 40.97 = 13482$ วัตต์/อัตราไหลของมวล 1 กิโลกรัม

จากสมการ (2.70) จะได้ประสิทธิภาพไดอะแกรม

$$\eta_d = \frac{13482}{\frac{1}{2}(170)^2} = 0.933 = 93.3\ \%$$

2. ถ้าทราบปริมาณการสูญเสียต่าง ๆ ในเครื่องกังหัน ก็จะสามารถหากำลังงานที่เพลาที่เครื่องกังหันกระทำได้ ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณอัตราไหลของมวลสำหรับขนาดกำลังงานที่ต้องการใช้งานได้ เมื่อทราบปริมาณอัตราไหลของมวลก็จะสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนลำคอของหัวฉีดได้

แต่ในการออกแบบนี้กำหนดให้เครื่องกังหันเป็นแบบที่ให้ลำไอออกจากหัวฉีดเข้าสู่ใบกังหันแต่เพียงบางส่วน คือ กำหนดให้มีจำนวนหัวฉีด 4 หัว และสามารถเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนลำคอของหัวฉีดได้ 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.59, 2.0 และ 2.38 มิลลิเมตร หัวฉีดที่ใช้นี้เป็นชนิดเรียวและให้อยู่ในตำแหน่งห่างเท่า ๆ กัน คืออยู่บนเส้นผ่าศูนย์กลางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางล้อกังหันเท่ากัน

3. เมื่อทราบปริมาณอัตราไหลของมวลก็จะสามารถหาขนาดและจำนวนใบกังหันในแต่ละแถวได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดให้เครื่องกังหันที่สร้างขึ้นเป็นแบบที่ให้ลำไอเข้าสู่ใบกังหันแต่เพียงบางส่วน จึงมีอิสระในการกำหนดจำนวนใบกังหันในแต่ละแถว ในที่นี้ใช้การประมาณจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดขนาด 2.0 มิลลิเมตร โดยการกำหนดเงื่อนไขว่าให้ลำไอที่ออกจากหัวฉีด 1 หัว เข้าสู่ทางผ่านระหว่างใบกังหันอย่างน้อย 1 ช่อง

ถ้ากำหนดให้ลำไอออกจากหัวฉีด 1 หัว เข้าสู่ 1 ช่องทางผ่านระหว่างใบกังหันพอดี (สมมุติว่าลำไอที่ออกจากหัวฉีดไม่มีการขยายตัวอีก) ความกว้างของช่องทางผ่านระหว่างใบกังหันจะต้องเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด จากการคำนวณจะได้จำนวนและขนาดใบกังหันในแต่ละแถวเป็นดังนี้ (รายละเอียดวิธีคำนวณดูในภาคผนวก ข.1)

แถวที่	จำนวนใบกังหันในแถว (ใบ)	รัศมีความโค้งของผิวด้านหน้า (มิลลิเมตร)	ความกว้างของใบกังหัน (มิลลิเมตร)	ความหนาของใบกังหัน (มิลลิเมตร)
1	64	5.92	11.13	4.67
2	90	4.52	7.91	2.75
3	138	3.85	5.16	1.09

จะเห็นว่าจำนวนใบกังหันในแต่ละแถวมีมากและมีขนาดเล็กมากโดยเฉพาะในแถวที่ 3 ซึ่งในทางปฏิบัติกระทำได้ยากหรืออาจจะไม่สามารถกระทำได้เลย ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงจำนวนและขนาดของใบกังหันในแต่ละแถวให้เหมาะสมสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งจากการเลือกกำหนดจำนวนใบกังหันในแถวที่ 1 ให้เท่ากับ 45 ใบ แล้วคำนวณจำนวนและขนาดใบกังหันในแถวที่ 2 และที่ 3 โดยยึดหลักให้มีความกว้างของช่องทางผ่านระหว่างใบกังหันเท่า ๆ กัน เพื่อความง่ายในทางปฏิบัติจะทำการปรับจำนวนใบกังหันที่คำนวณได้ในแต่ละแถวให้เป็นจำนวนที่ลงตัว

และจากสมการ (2.53) จะเห็นว่า เราสามารถปรับรัศมีความโค้งของผิวด้านหน้าซึ่งจะทำให้ความกว้างเปลี่ยนไปโดยที่มุมเข้ามุมออกของใบกังหันคงเดิม ในการสร้างเครื่องกังหันนี้จำนวนและขนาดใบกังหันใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

แถวที่	จำนวนใบกังหันในแถว (ใบ)	รัศมีความโค้งของผิวด้านหน้า (มิลลิเมตร)	ความกว้างของใบกังหัน (มิลลิเมตร)	ความหนาของใบกังหัน (มิลลิเมตร)
1	45	5.9	11.1	1.4
2	60	6.0	10.5	0.7
3	60	7.9	10.6	1.4

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 การคำนวณและออกแบบมีรายละเอียด ดังนี้

1. กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวงล้อใบกังหัน = 152 มิลลิเมตร และกำหนดอัตราหมุน = 5000 รอบต่อนาที หรือมีอัตราเร็วใบกังหัน U = 39.79 เมตรต่อวินาที โดยมีความเร็วของลำไอที่ออกจากหัวฉีด C_1 = 170 เมตรต่อวินาที จะได้ว่า

$$\text{อัตราส่วนความเร็ว} \quad \frac{U}{C_1} = \frac{39.79}{170} = 0.234$$

จากสมการ (2.40) จะได้ว่ามุมของหัวฉีด α_1 ที่ทำให้มีประสิทธิภาพไดอะแกรมสูงสุด = 20.6° ในที่นี้เลือกใช้มุม $\alpha_1 = 14^\circ$ จะได้ว่าอัตราส่วนความเร็วที่เหมาะสม $\frac{U}{C_1} = 0.242$ หรือมีอัตราเร็วใบกังหัน U = 41.14 เมตรต่อวินาที นั่นคือ จะมีอัตราหมุนที่ทำให้มีประสิทธิภาพไดอะแกรมสูงสุดประมาณ 5170 รอบต่อนาที ก็จะสามารถคำนวณหามุมเข้าและมุมออกของใบกังหันในแต่ละแถวได้ ในที่นี้กำหนดให้ใบกังหันเป็นแบบสมมาตร และในการคำนวณให้ถือว่าเป็นกรณีที่ใบกังหันไม่มีความเสียดทานต่อการไหล ทำการคำนวณค่าต่าง ๆ ด้วยวิธีเดียวกับที่ใช้สำหรับเครื่องที่ 1 ซึ่งได้ผลดังนี้

สำหรับใบกังหันแถวที่ 1 (แถวหมุนแถวที่ 1)

มุมเข้าของใบกังหัน $\beta_1 = 18^\circ$

ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่ใบกังหัน V_1 = 130.07 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากใบกังหันเป็นแบบสมมาตรและไม่มีความเสียดทานต่อการไหลจะได้มุม $\beta_1 = \beta_2 = 18^\circ$ และความเร็วสัมพัทธ์ $V_1 = V_2$ = 130.07 เมตรต่อวินาที

ความเร็วสัมบูรณ์ออกจากใบกังหันด้วยมุม $\alpha_2 = 26^\circ$

และความเร็วสัมบูรณ์ C_2 = 91.75 เมตรต่อวินาที

สำหรับใบกังหันแถวที่ 2 (แถวที่อยู่นิ่ง)

มุมเข้าและมุมออกของใบกังหัน $\alpha_2 = \alpha_3 = 26^\circ$

ความเร็วที่ออกจากใบกังหัน $C_3 = C_2$ = 91.75 เมตรต่อวินาที

สำหรับใบกังหันแถวที่ 3 (แถวหมุนแถวที่ 2)

มุมเข้าของใบกังหัน $\beta_3 = 45^o$

ความเร็วสัมพัทธ์ที่เข้าสู่ใบกังหัน $V_3 = 58.3$ เมตรต่อวินาที

มุม $\beta_3 = \beta_4 = 45^o$ และความสัมพัทธ์ $V_3 = V_4 = 58.3$ เมตรต่อวินาที

มุมที่ความเร็วสัมบูรณ์ออกจากใบกังหัน $\alpha_4 = 90.02^o$

ความเร็วสัมบูรณ์ที่ออกจากใบกังหัน $C_4 = 44.9$ เมตรต่อวินาที

จากมุมและความเร็วต่าง ๆ ที่คำนวณได้ สามารถคำนวณหาอัตราการทำงานของไอที่กระทำบนใบกังหันได้ สำหรับการไหลของไอที่มีอัตราไหลของมวล 1 กิโลกรัมต่อวินาที กำลังงานที่ไอกระทำบนใบกังหัน

$$P = 329.87 \times 41.14 = 13570 \text{ วัตต์ต่ออัตราไหลของมวล 1 กิโลกรัม}$$

และมีประสิทธิภาพไดอะแกรม $\eta_d = \dfrac{13570}{\frac{1}{2}(170)^2} = 0.939 = 93.9\ \%$

2. กำหนดให้เครื่องกังหันเป็นแบบที่ให้ลำไอจากหัวฉีดเข้าสู่ใบกังหันแต่เพียงบางส่วน โดยกำหนดให้มีจำนวนหัวฉีด 4 หัว และสามารถเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนลำคอของหัวฉีดได้ 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร เป็นหัวฉีดชนิดเรียว ให้อยู่ในตำแหน่งบนเส้นผ่าศูนย์กลางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางล้อกังหันเท่ากัน

3. การหาจำนวนและขนาดของใบกังหันใช้หลักการและวิธีการเดียวกับที่ใช้สำหรับเครื่องที่ 1 โดยใช้การประมาณจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดขนาด 2.0 มิลลิเมตร จากการคำนวณจะได้จำนวนและขนาดของใบกังหันดังนี้ (รายละเอียดวิธีคำนวณ ดูในภาคผนวก ข.2)

แถวที่	จำนวนใบกังหันในแถว	รัศมีความโค้งของผิวด้านหน้า (มิลลิเมตร)	ความกว้างของใบกังหัน (มิลลิเมตร)	ความหนาของใบกังหัน (มิลลิเมตร)
1	64	6.54	12.44	5.46
2	91	5.31	9.54	3.25
3	146	4.21	5.95	1.27

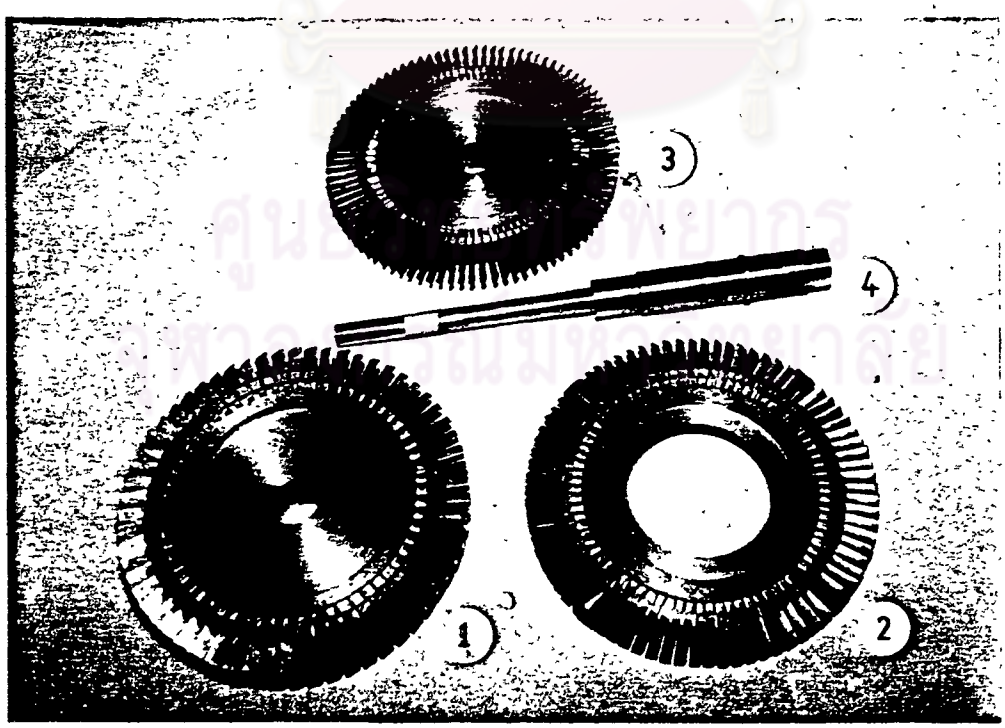
จากการปรับปรุงจำนวนและขนาดของใบกังหันในแต่ละแถวให้เหมาะสม โดยการเลือกกำหนดจำนวนใบกังหันในแถวที่ 1 ให้เท่ากับ 60 ใบ แล้วคำนวณหาจำนวนและขนาดของใบกังหันในแถวที่ 2 และที่ 3 โดยยึดหลักให้มีความกว้างของช่องทางผ่านระหว่างใบกังหันเท่า ๆ กันและให้มีจำนวนที่เหมาะสม นอกจากนี้เพื่อความง่ายในการสร้างใบกังหัน ยังสามารถปรับรัศมีความโค้งของผิวด้านหน้า และความกว้างโดยที่มุมเข้าและมุมออกมีค่าคงเดิมโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2.53) ในการสร้างเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 นี้ กำหนดใช้จำนวนและขนาดของใบกังหันในแต่ละแถวดังต่อไปนี้

แถวที่	จำนวนใบกังหันในแถว	รัศมีความโค้งของผิวด้านหน้า (มิลลิเมตร)	ความกว้างของใบกังหัน (มิลลิเมตร)	ความหนาของใบกังหัน (มิลลิเมตร)
1	60	6.35	12.1	3.0
2	80	6.05	10.9	1.4
3	90	6.9	9.8	0.8

3.1.2 การสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกังหัน

เครื่องกังหันประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ล้อกังหัน ใบกังหัน เพลา หัวฉีด ตัวถังกังหัน ทางเข้าและออกของไอ และแบริ่งรองรับเพลากังหันการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

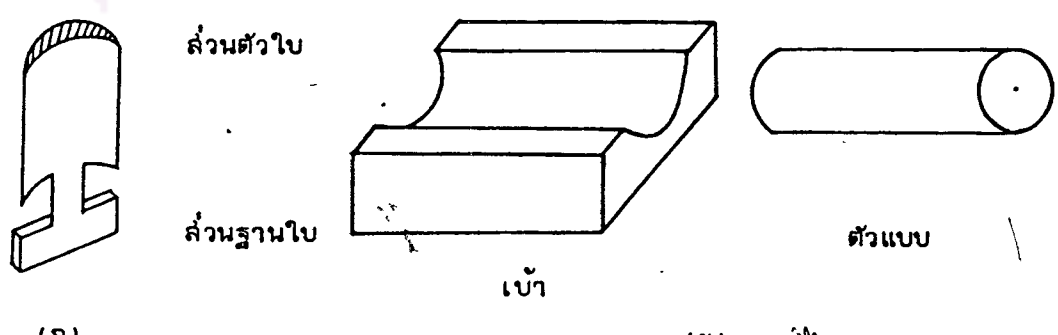
1. ล้อกังหัน ทำด้วยโลหะอลูมิเนียมโดยกลึงจากยิ้นอลูมิเนียมกลมตันให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาตามที่ออกแบบไว้ ที่ขอบล้อบากให้เป็นร่องสำหรับเสียบใบกังหันติดไว้ตามจำนวนใบที่กำหนด สำหรับล้อกังหันวงล้อที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นล้อหมุนนั้นส่วนตรงศูนย์กลางเจาะเป็นรูไว้สำหรับส่วมยึดติดกับเพลา ส่วนวงล้อที่ 2 ซึ่งเป็นวงล้อที่อยู่นิ่งกับที่จะมีส่วนสำหรับยึดติดกับตัวถังกังหัน ล้อกังหันสำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ซึ่งวงล้อที่ 1, 2 และ 3 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงล้อเท่ากับ 138, 134 และ 130 มิลลิเมตร ตามลำดับ ล้อกังหันสำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 ก็มีลักษณะคล้ายกันแต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 123 มิลลิเมตร เท่ากันทั้ง 3 วง ส่วนความหนาของขอบล้อนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของใบกังหันในแต่ละแถว



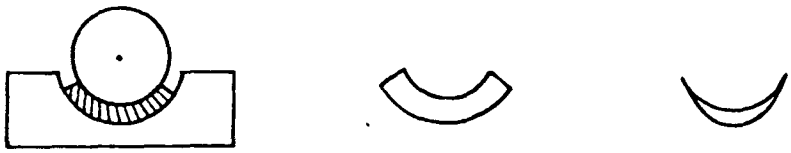
รูปที่ 3.1 แสดงล้อกังหันที่ติดใบกังหันแล้ว สำหรับวงล้อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับหมายเลข และเพลากังหันหมายเลข 4 สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2

2. ใบกังหัน ใช้แผ่นโลหะดัดโค้งให้มีรัศมีความโค้งของผิวด้านหน้าตามที่ออกแบบไว้แล้วในหัวข้อ 3.1.1 โดยมีส่วนฐานของใบสำหรับฝังลงไปยึดติดกับขอบล้อกังหันดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก. สำหรับความหนาของใบกังหันนั้นเพื่อความง่ายในการทำจะไม่คำนึงถึงมากนักและจะใช้ความหนาของแผ่นโลหะเป็นเกณฑ์สำหรับความหนาของใบกังหันตามความเอื้ออำนวยของวัสดุที่มีอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความดันต่ำ (ความเร็วต่ำ) ใบกังหันแบบแผ่นโลหะดัดโค้งธรรมดากับแบบที่มีความหนาที่ส่วนตรงกลางใบดังแสดงในรูปที่ 2.10 ไม่ปรากฏว่ามีสมรรถนะต่างกัน (19) สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 1 ใบกังหันทำด้วยแผ่นโลหะอลูมิเนียมทั้งหมด โดยที่แถวที่ 1 และที่ 3 ใช้แผ่นโลหะอลูมิเนียมหนา 1.4 มิลลิเมตร ส่วนแถวที่ 2 ใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 0.7 มิลลิเมตร ความสูงของใบกังหันในแต่ละแถวสูงประมาณ 125 มิลลิเมตรเท่า ๆ กัน สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ในแถวที่ 1 และ 2 ใบกังหันทำด้วยแผ่นโลหะอลูมิเนียม โดยแถวที่ 1 ใช้ความหนา 3.0 มิลลิเมตร แถวที่ 2 ใช้ความหนา 1.4 มิลลิเมตร ส่วนใบกังหันในแถวที่ 3 ทำด้วยแผ่นโลหะสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร ความสูงของใบกังหันมีดังนี้ แถวที่ 1 สูงประมาณ 13.0 มิลลิเมตร แถวที่ 2 สูงประมาณ 16.8 มิลลิเมตร และแถวที่ 3 สูงประมาณ 17.2 มิลลิเมตร

วิธีดัดโค้งใบกังหันกระทำโดยใช้แบบเหล็กที่สร้างขึ้นซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ข. โดยส่วนที่เป็นตัวแบบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามรัศมีความโค้งที่ต้องการดัด สำหรับส่วนที่เป็นเบ้าจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่าตัวแบบตามความหนาของแผ่นโลหะที่จะดัดโค้ง การดัดโค้งก็ใช้วิธีบีบอัดเข้าด้วยกัน แล้วแต่งขอบใบกังหันให้บาง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใบกังหันเมื่อยึดติดกับล้อกังหันแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 (ก) แสดงรูปร่างใบกังหันที่ดัดโค้งและแต่งแล้วพร้อมด้วยส่วนฐานใบที่ใช้ยึดติดกับล้อกังหัน
(ข) แสดงแบบเหล็กที่ใช้ดัดใบกังหัน



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.3 (ก) แสดงการตัดโค้งใบกังหัน

(ข) ใบกังหันที่ตัดโค้งแล้ว

(ค) ใบกังหันที่แต่งขอบแล้ว

3. เพลา เพลาของเครื่องกังหันทำด้วยแท่งเหล็กสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว (25.4 มิลลิเมตร) นำมากลึงให้มีขนาดของส่วนต่าง ๆ ตามต้องการ สำหรับให้ล้อกังหันและแบริ่งมาส่วมติดไว้ มีลักษณะดังที่เห็นในรูปที่ 3.1 หมายเลข 4 ส่วนปลายเพลาที่ยื่นออกนอกเครื่องสำหรับใช้งานนั้นมีขนาดเล็กกว่าส่วนที่ติดล้อกังหัน ซึ่งส่วนปลายเพลานี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 มิลลิเมตร

4. หัวฉีด หัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันทั้งสองเครื่องนี้เป็นหัวฉีดชนิดเรียว ตัวหัวฉีดทำด้วยโลหะทองเหลืองแต่ลำร้างแตกต่างกัน หัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันตัวที่ 1 ทำเป็นตัวเดี่ยว ๆ 4 ตัว ยึดติดไว้กับฝาปิดด้านหลังซึ่งมีรูสำหรับให้กาซหรือไอเข้าสู่หัวฉีด หัวฉีดนี้จะเอียงทำมุมกับระนาบของฝาปิดประมาณ 15 องศา มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 (ก) ส่วนลำคอยของหัวฉีดสามารถถอดเปลี่ยนขนาดได้ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาดคือ 1.59, 2.0 และ 2.38 มิลลิเมตร สำหรับหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องที่ 2 ตัวหัวฉีดทำเป็นวงแผ่นทองเหลือง มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ทางด้านออกเจาะรูขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร โดยมีขนาดละ 4 รู แต่ละขนาดจะอยู่ที่ตำแหน่งบนเส้นผ่าศูนย์กลางของวงหัวฉีดที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันโดยอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันด้วยระยะห่าง 76 มิลลิเมตร และเอียงทำมุมกับระนาบของวงหัวฉีดประมาณ 14 องศา นอกจาก

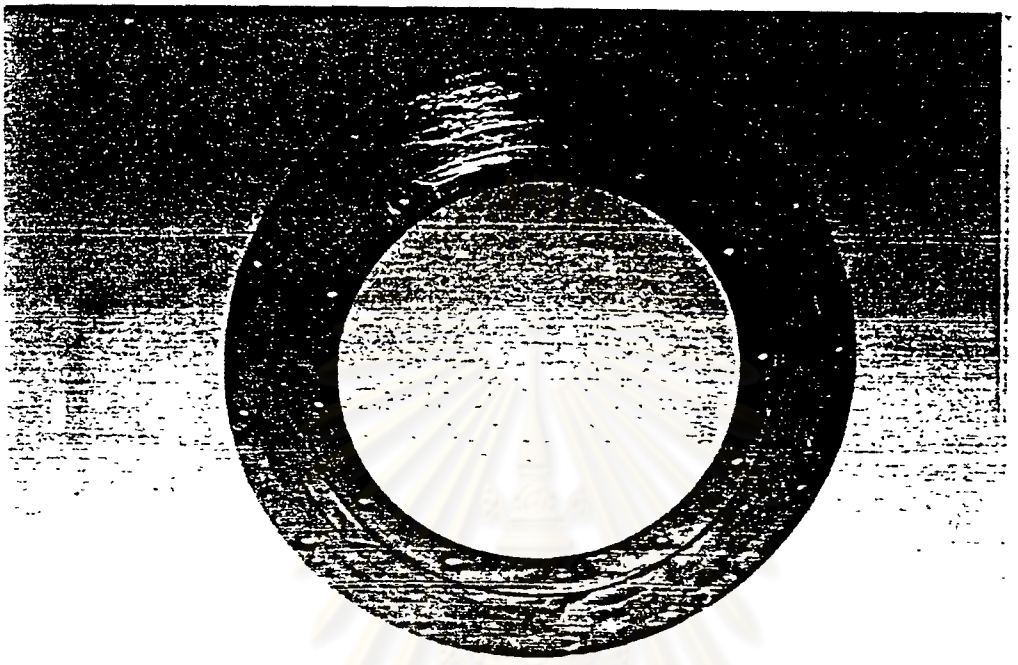
จากนี้แต่ละรูหัวฉีดยังอยู่ห่างเท่า ๆ กันทำให้สามารถเลือกใช้ขนาดหัวฉีดต่าง ๆ ได้โดยการหมุนวงหัวฉีดเลื่อนไปให้ตรงกับขนาดที่ต้องการได้ ส่วนทางด้านเข้าเจาะเป็นรู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{7}{16}$ นิ้ว (11.11 มิลลิเมตร) ภาพด้านข้างของหัวฉีดแบบนี้จะเป็นดังรูปที่ 3.4 (ข)

(ก) (ข)

รูปที่ 3.4 (ก) แสดงภาพด้านข้างของหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันเครื่องที่ 1

(ข) แสดงภาพด้านข้างของหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันเครื่องที่ 2

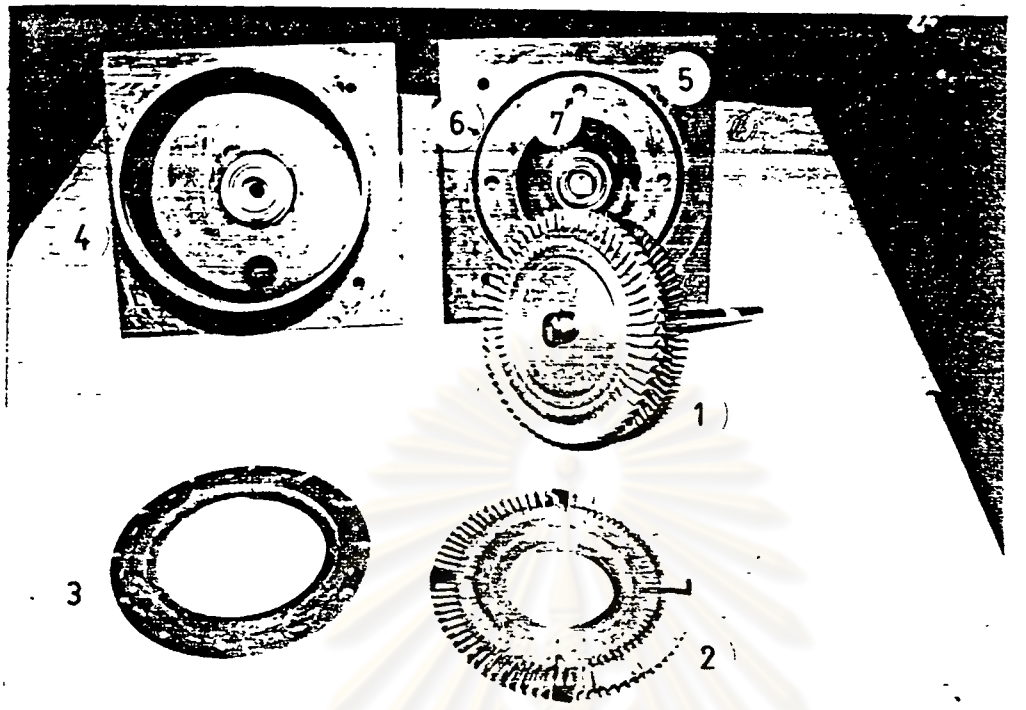
5. ตัวถังเครื่องกังหัน ทำด้วยโลหะทองเหลืองทั้งหมดประกอบด้วย 3 ชิ้นส่วนคือ ส่วนลำตัวทำด้วยท่อทองเหลือง ฝาปิดด้านหน้าและฝาปิดด้านหลังทำด้วยแผ่นทองเหลือง ฝาปิดด้านหลังจะกลึงเป็นร่องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความกว้างของร่องเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของส่วนลำตัวสำหรับใส่ โอริง (O-ring) กันรั่วเมื่อประกอบกันเข้าเป็นเครื่องกังหัน ฝาปิดด้านหน้าเชื่อมติดอยู่กับส่วนลำตัวและที่ส่วนตรงกลางจะมีที่รองรับแบริ่งที่รองรับเพลากังหันและมีรูสำหรับให้เพลากังหันยื่นออกไป นอกจากนี้ยังมีช่องสำหรับให้ไอผ่านออกจากเครื่องกังหัน ส่วนฝาปิดด้านหลังก็มีส่วนที่รองรับแบริ่งของเพลากังหันอยู่ตรงกลาง และมีรูสำหรับให้ไอผ่านเข้าสู่หัวฉีด 4 รู ตามจำนวนหัวฉีดที่ใช้และมีตำแหน่งอยู่บนเส้นผ่าศูนย์กลางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของเพลาเครื่องกังหันเท่ากัน ทางด้านหลังของฝาปิดด้านหลังทำเป็นกล่องสำหรับไอ



รูปที่ 3.5 แสดงวงหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันเครื่องที่ 2

ที่ผ่านเข้าสู่เครื่องกังหันก่อนที่จะผ่านเข้าสู่หัวฉีดทั้ง 4 หัว สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 ส่วนลำตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 168 มิลลิเมตร ($6\frac{5}{8}$ นิ้ว) ยาว 122 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องที่ 1 ส่วนลำตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 152 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ยาว 100 มิลลิเมตร

6. <u>ทางเข้าและทางออกของไอ</u> ทางเข้าเป็นท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19 มิลลิเมตร ($\frac{3}{4}$ นิ้ว) สำหรับให้ไอเข้าสู่กล่องที่อยู่ด้านหลังของหัวฉีด และมีเกจวัดความดัน (pressure gauge) ติดอยู่สำหรับวัดความดันของไอที่เข้าสู่หัวฉีด สำหรับทางออกมีท่อเชื่อมต่ออยู่กับช่องทางออกของไอ ดังที่เห็นในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2

1) วงล้อใบกังหันแถวที่ 1 และ 3 ติดอยู่กับเพลา

2) วงล้อใบกังหันแถวที่ 2

3) วงหัวฉีด

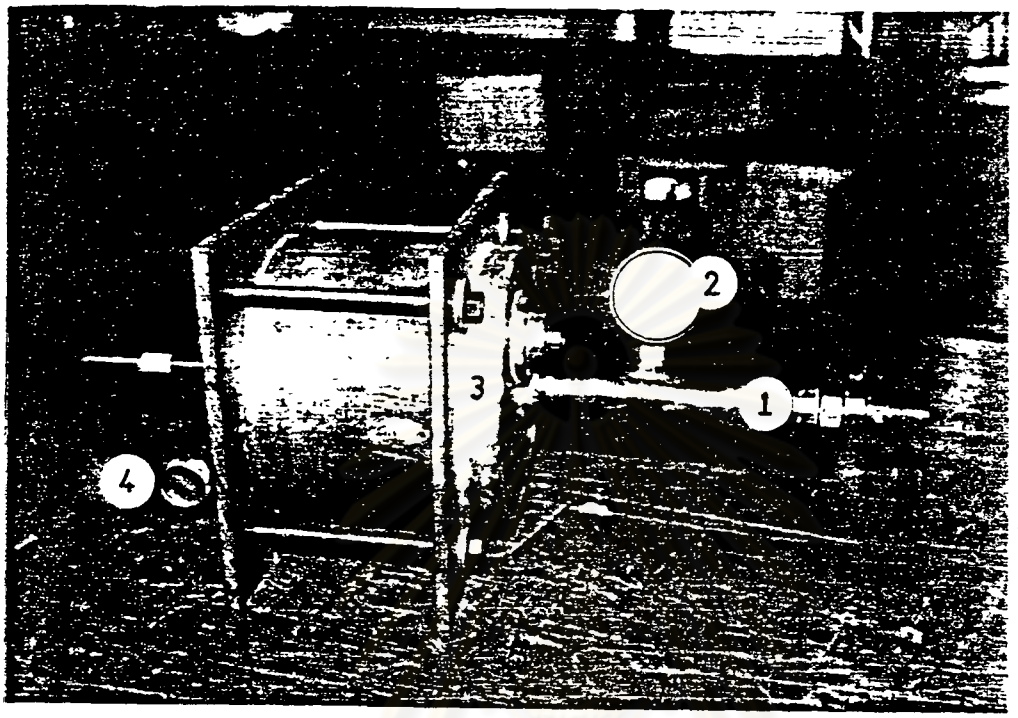
4) ฝาด้านหน้าเชื่อมติดอยู่กับส่วนลำตัว

5) ฝาปิดด้านหลัง

6) ร่องสำหรับใส่โอริง

7) รูสำหรับให้ไอผ่านเข้าสู่หัวฉีด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อประกอบเสร็จแล้ว

1) ท่อสำหรับไอเข้า

2) เกจวัดความดัน

3) กล่องด้านหลังหัวฉีด

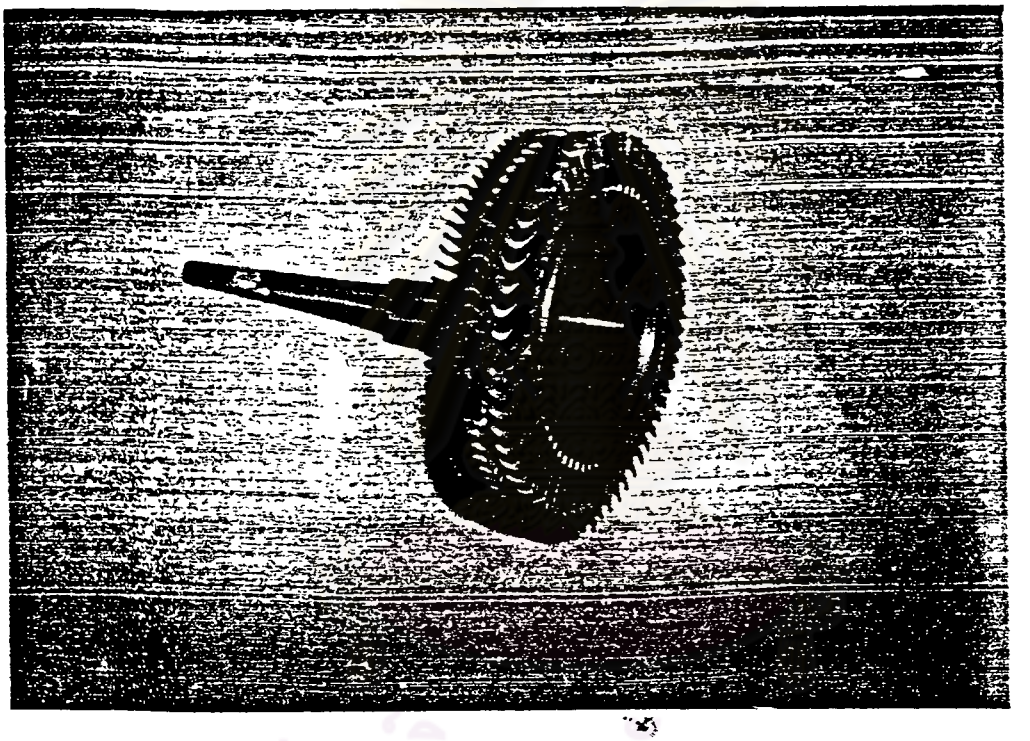
4) ท่อสำหรับไอออก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 การประกอบเครื่องกังหัน

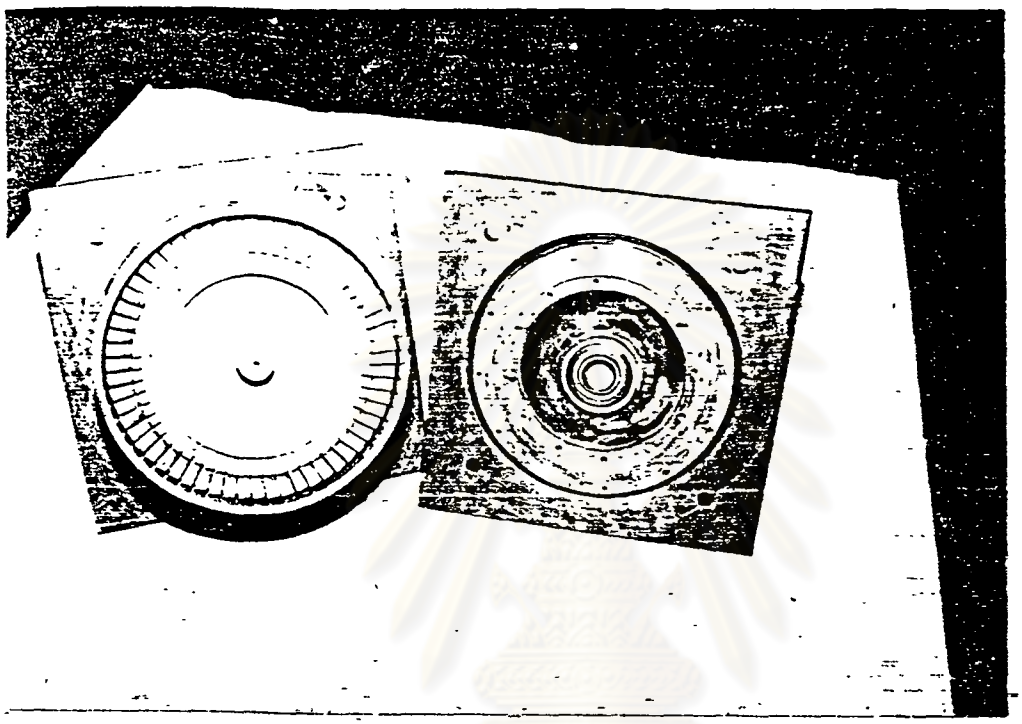
เครื่องกังหันประกอบขึ้นจากส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อประกอบเสร็จแล้วจะเป็นดังรูปที่ 3.7 การประกอบเครื่องกังหันต้องประกอบวงล้อใบกังหันเข้ากับเพลากังหันก่อน ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นจึงประกอบแบริ่งเข้ากับเพลา แล้วจึงประกอบเข้ากับตัวถังเครื่องกังหันโดยยึดวงล้อที่ 2

ติดกับตัวถังเครื่องกังหันด้วยน๊อตทองเหลืองในตำแหน่งที่จัดระยะห่างระหว่างใบกังหันไว้แล้ว ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างแถวใบกังหันประมาณ 2.5 มิลลิเมตร แล้วประกอบฝาปิดด้านหลังที่ติดแผ่นวงหัวฉีดเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.9 โดยยึดฝาปิดด้านหลังไว้กับฝาปิดด้านหน้าด้วยน๊อต 4 ตัว



รูปที่ 3.8 แสดงวงล้อใบกังหันที่ประกอบเข้ากับเพลาทั้ง 3 วง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แสดงฝาด้านหน้าที่ประกอบล้อกังหันแล้ว และฝาด้านหลังที่ติดวงหัวฉีดแล้ว

3.2 การวัดแรงบิดและกำลังงาน (Torque and power measurement)

การวัดแรงบิดมักจะเกี่ยวข้องอยู่กับการหากำลังงานเชิงกลที่เครื่องจักรหรือเครื่องยนต์สามารถให้ออกมาได้หรือสามารถทำงานได้ โดยทั่วไปแล้วการทดสอบสมรรถนะของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ก็กระทำโดยการวัดแรงบิดเพื่อจะได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องเมื่อมีภาระขนาดต่าง ๆ กัน เครื่องมือที่ใช้วัดแรงบิดหรือกำลังงาน เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) การวัดแรงบิดและกำลังงานเชิงกลนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท (29, 30) คือ ไดนาโมมิเตอร์แบบดูดกลืน (absorption dynamometer) และไดนาโมมิเตอร์แบบส่งผ่านกำลัง (transmission dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์แบบดูดกลืน แบบนี้กำลังงานเชิงกลที่วัดได้จะถูกดูดกลืนไว้แล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่น ๆ เช่นความร้อนหรือไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดออกมาเป็นแรงบิดได้ และเมื่อทราบอัตราหมุนก็สามารถคำนวณกำลังงานได้

ไดนาโมมิเตอร์แบบส่งผ่านกำลัง แบบนี้กำลังงานจะถูกส่งผ่านไปโดยไม่ถูกดูดกลืนหรือเปลี่ยนแปลงเลย ไดนาโมมิเตอร์แบบนี้ทำงานบนหลักการที่ว่า เมื่อมีแรงบิดกระทำที่เพลาเครื่องและถูกต้านทานด้วยแรงบิดขนาดเท่ากันในทิศตรงกันข้าม จะทำให้เพลานั้นเกิดการบิดตัวไปด้วยมุมเล็ก ๆ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับแรงบิดที่กระทำต่อเพลา เมื่อทราบอัตราหมุนของเพลาและแรงบิดซึ่งสามารถคำนวณได้จากมุมของการบิดตัวของเพลาแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหากำลังงานที่ถูกส่งผ่านไปได้

การจะเลือกใช้ไดนาโมมิเตอร์ประเภทใดและวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของขนาดกำลังและอัตราเร็วรอบหมุนของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่จะวัด ในการทดลองนี้เลือกใช้ไดนาโมมิเตอร์ประเภทดูดกลืน ซึ่งจะได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการต่อไป

3.2.1 <u>หลักการวัดแรงบิดและกำลังงาน</u> (29, 30, 31)

การใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดกำลังงานโดยทั่วไปแล้วอัตราหมุนจะวัดแยกต่างห่างจากไดนาโมมิเตอร์ กล่าวคือไดนาโมมิเตอร์จะทำหน้าที่วัดแรงบิดโดยการวัดจากแรงที่กระทำในทิศตรงกันข้ามกับแรงบิดของเครื่อง เมื่อทราบระยะห่างตั้งฉากของแนวแรงกับจุดศูนย์กลางของการหมุนก็จะสามารถหาแรงบิดได้จากความสัมพันธ์

$$\tau = Fr \qquad (3.1)$$

โดยที่ τ = แรงบิด หน่วย นิวตัน-เมตร

F = แรงที่กระทำ หน่วย นิวตัน

r = แขนของโมเมนต์หน่วย เมตร

เมื่อทราบอัตราหมุน N รอบต่อนาที นั่นคือทราบอัตราเร็วเชิงมุม ω เรเดียนต่อวินาที ก็จะสามารถหากำลังงานที่เพลาเครื่อง P ได้จากความสัมพันธ์

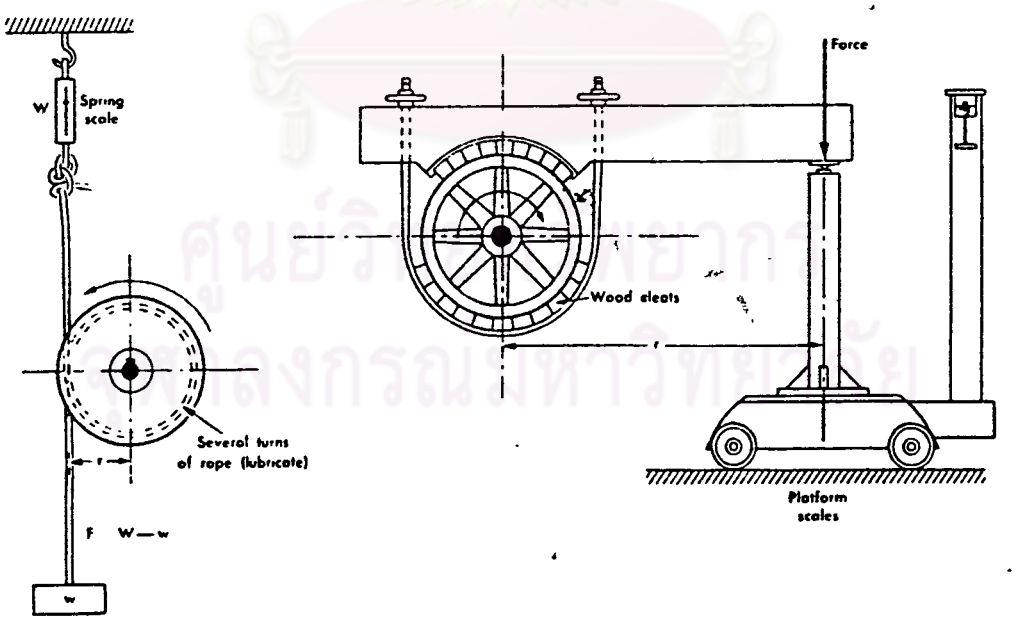
$$P = \omega\tau \quad (3.2)$$

$$= \frac{2\pi N\tau}{60} \quad (3.3)$$

กำลังงานที่ได้จะมีหน่วยเป็นวัตต์

ไดนาโมมิเตอร์ประเภทดูดกลืนอาจเรียกได้ว่าเป็นวิธีของเบรค ยังแบ่งออกเป็นวิธีใหญ่ ๆ ได้ 3 วิธีคือ 1) วิธีทางเชิงกล (mechanical methods) 2) วิธีทางไฮดรอลิคส์ (hydraulic methods) และ 3) วิธีทางไฟฟ้า (electrical methods) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีทางเชิงกล และวิธีทางไฟฟ้าเท่านั้น

วิธีทางเชิงกล เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด อาศัยความเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างเบรคกับเพลาหรือล้อหมุนในการวัดแรงบิด วิธีนี้ได้แก่ วิธีเบรคเชือก (rope brake) ซึ่งอาจมีลักษณะดังรูป 3.10 (ก) และโพรนีเบรค (prony brake) มีลักษณะดังรูปที่ 3.10 (ข)



รูปที่ 3.10 (ก) แสดงวิธีเบรคเชือก

รูปที่ 3.10 (ข) แสดงวิธีโพรนีเบรค

ในกรณีของเบรคเชือกจากรูปที่ 3.10 (ก) ใช้เชือกพันรอบแกนเพลาหรือล้อหมุนปลายหนึ่งแขวนไว้กับเครื่องชั่งส่วนปลายอีกปลายหนึ่งมีมวลแขวนไว้ เมื่อล้อหรือเพลาหมุนไปก็จะเกิดแรงเสียดทานยื้นทำให้น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งส่วนลดลง แรงบิดที่กระทำต่อล้อหมุนหรือเพลาจะเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำบนล้อหรือเพลาคูณด้วยแขนของโมเมน ดังความสัมพันธ์

$$\tau = \tfrac{1}{2} D (mg - S) \qquad (3.4)$$

โดยที่ τ = แรงบิด หน่วย นิวตัน-เมตร

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อหรือเพลา หน่วยเมตร

mg = แรงเนื่องจากมวล m หน่วยนิวตัน

S = แรงที่อ่านได้จากเครื่องชั่งส่วน หน่วยนิวตัน

และกำลังงานของเครื่องหาได้โดยการคูณแรงบิดด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω ดังสมการ 3.2 นั่นคือ

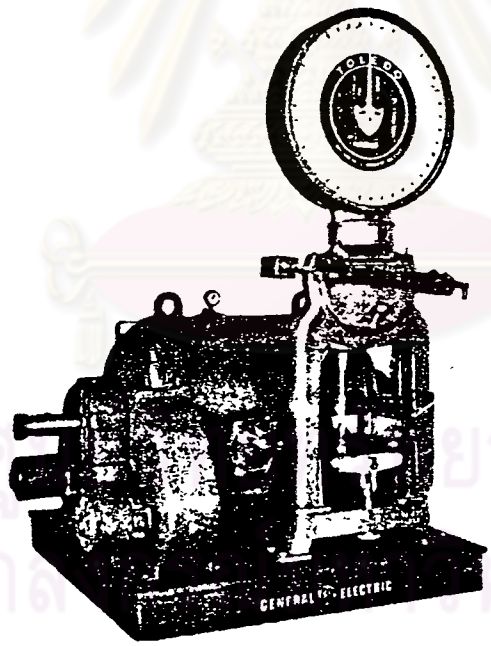
$$P = \tau\omega = \tfrac{1}{2} D (mg - S) \frac{2\pi N}{60}$$

$$= \frac{\pi DN}{60} (mg-S) \qquad (3.5)$$

กำลังงานที่วัดได้นี้เรียกว่า กำลังงานเพลา (shaft power) หรือกำลังงานเบรค (brake power) ความจริงแล้ววิธีเบรคเชือกก็เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีโพรนีเบรค เป็นวิธีที่ง่ายและใช้ได้สำหรับกรณีที่กำลังงานและอัตราเร็วไม่สูงนักทั้งนี้เพราะยึดจำกัดของวิธีนี้อยู่ที่การผันแปรของค่าสัมประสิทธิของความเสียดทานระหว่างเบรคกับล้อหรือเพลาเมื่อเกิดความร้อนขึ้น

วิธีทางไฟฟ้า คือวิธีของไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้า (electric dynamometers) ซึ่งอาจจะเรียกว่าเป็นวิธีเบรคไฟฟ้า (electric brake) วิธีนี้มีอยู่ 2 แบบ คือไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้า แบบกระแสเอ็ดดี (eddy current dynamometer) และไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าแบบไดนาโม (all-electric dynamometer) ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักและวิธีการเฉพาะของแบบไดนาโมเท่านั้น เนื่องจากในการทดลองใช้วิธีนี้ ซึ่งประกอบด้วย ไดนาโมที่ส่วนสเตเตอร์

(stator) หรือตัวถังติดตั้งอยู่บนแบริ่งสามารถหมุนได้อย่างอิสระ และส่วนตัวถังนี้จะต่ออยู่กับเครื่องชั่งหรือระบบการวัดแรงมีลักษณะดังรูปที่ 3.11 เวลาใช้จะต่อเพลาของไดนาโมเข้ากับเพลาของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่จะวัดโดยตรง ปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างของขดลวดอาร์เมเจอร์กับของขดลวดสเตเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดระหว่างอาร์เมเจอร์กับสเตเตอร์ เนื่องจากอาร์เมเจอร์จะพยายามดึงให้สเตเตอร์หมุนตามไปด้วย แต่สเตเตอร์ถูกยึดไว้ด้วยแรงที่เท่ากันในทิศตรงกันข้ามซึ่งอ่านค่าได้จากเครื่องชั่ง จากแรงที่วัดได้คูณกับความยาวของแขนหมุน (แขนโมเมน) ก็จะได้แรงบิดตามสมการ (3.1) และถ้าทราบจำนวนรอบหมุนต่อนาที ก็สามารถคำนวณกำลังงานได้จากสมการ (3.3) ได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของไดนาโม



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าแบบไดนาโม (29)

ตามปกติแล้วไดนาโมที่ใช้จะเป็นไดนาโมกระแสตรงและเป็นแบบขดลวดสนามแยกกับขดลวดอาร์เมเจอร์ (separately excited)ทำการควบคุมหรือเปลี่ยนขนาดภาระของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่ทดสอบได้โดยวิธีควบคุมหรือเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าของไดนาโม หรือโดยการ

เปลี่ยนความแรงของสนามแม่เหล็ก (field strength) ในขดสนาม ทำให้สามารถวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์เมื่อมีภาระขนาดต่าง ๆ กันได้

3.2.2 วิธีวัดแรงบิดและกำลังงาน

ในการทดลองนี้ใช้ไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าแบบไดนาโมในการวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องกังหัน ไดนาโมที่ใช้เป็นไดนาโมกระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกับขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งดัดแปลงมาจากมอเตอร์กระแสตรงและสร้างส่วนประกอบสำหรับติดและยึดแบริ่งเพื่อทำให้ตัวถัง (ขดลวดสเตเตอร์) ของไดนาโมสามารถหมุนได้อิสระในขณะใช้งาน ดังรูปที่ 3.12 ที่ด้านท้ายของไดนาโมจะมีจานล้อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่สร้างยึนติดไว้สำหรับใช้วัดแรงบิดและติดแบริ่ง ในการวัดแรงบิดจะนำไดนาโมนี้ต่อเข้ากับเพลาของเครื่องกังหันโดยตรง ตัวไดนาโมถูกติดตั้งไว้บนแบริ่งที่ด้านหน้าและด้านหลัง ปรับระดับและแนวแกนของไดนาโมให้ได้ศูนย์กลางและแนวเดียวกันกับเพลาของเครื่องกังหัน ที่จานล้อด้านหลังมีเชือกผูกคล้องไว้อีกปลายหนึ่งผูกไว้กับเครื่องชั่งสปริงที่แขวนไว้ในแนวดิ่ง สำหรับวัดแรงที่เกิดจากแรงบิดของเครื่องกังหัน มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 การวัดแรงนี้ควรจัดตำแหน่งของเครื่องชั่งสปริงให้อยู่ในแนวดิ่งเดียวกันกับแนวดิ่งของเส้นสัมผัสจานล้อเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าแรง

วิธีวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องกังหัน

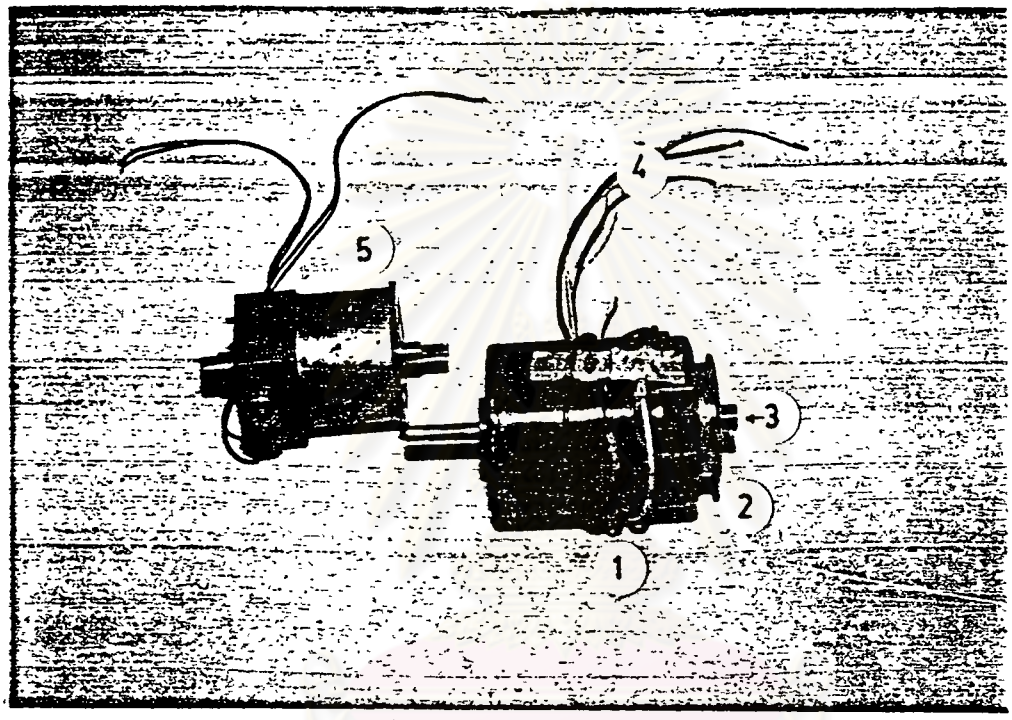
1. จ่ายกระแสไฟตรงให้กับขดลวดสนามด้วยแรงดัน 12 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ส่วนขดลวดอาเมเจอร์ต่ออยู่กับความต้านทานไฟฟ้าซึ่งใช้รีโอสแตท (rheostat) เมื่อไดนาโมหมุนไปกับเครื่องกังหันก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามกับขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งอ่านค่าแรงได้จากเครื่องชั่งสปริง

2. คำนวณแรงบิดโดยการคูณแรงที่วัดได้ด้วยรัศมีของจานล้อซึ่งก็คือแขนของโมเมน

3. วัดจำนวนรอบหมุนต่อนาทีของเครื่องกังหันด้วยเครื่องวัดรอบ (tachometer) ชนิดใช้แสงสะท้อน (phototachometer) ดังรูปที่ 3.14

4. คำนวณกำลังงานที่เพลาของเครื่องกังหันจากสมการ (3.3)

5. เพิ่มขนาดของภาระแก่เครื่องกังหัน ด้วยการลดค่าความต้านทานไฟฟ้าของรีโอสแตทลงให้มีค่าต่าง ๆ ที่แต่ละค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปก็จะวัดค่าแรงและจำนวนรอบหมุนต่อนาทีได้ค่าต่าง ๆ กัน แล้วคำนวณหาแรงบิดและกำลังงาน ทำให้ทราบลักษณะการทำงานของเครื่องกังหันที่แปรเปลี่ยนไปตามขนาดของภาระ



รูปที่ 3.12 แสดงไดนาโมกระแสตรงที่ใช้ในการวัดแรงบิด

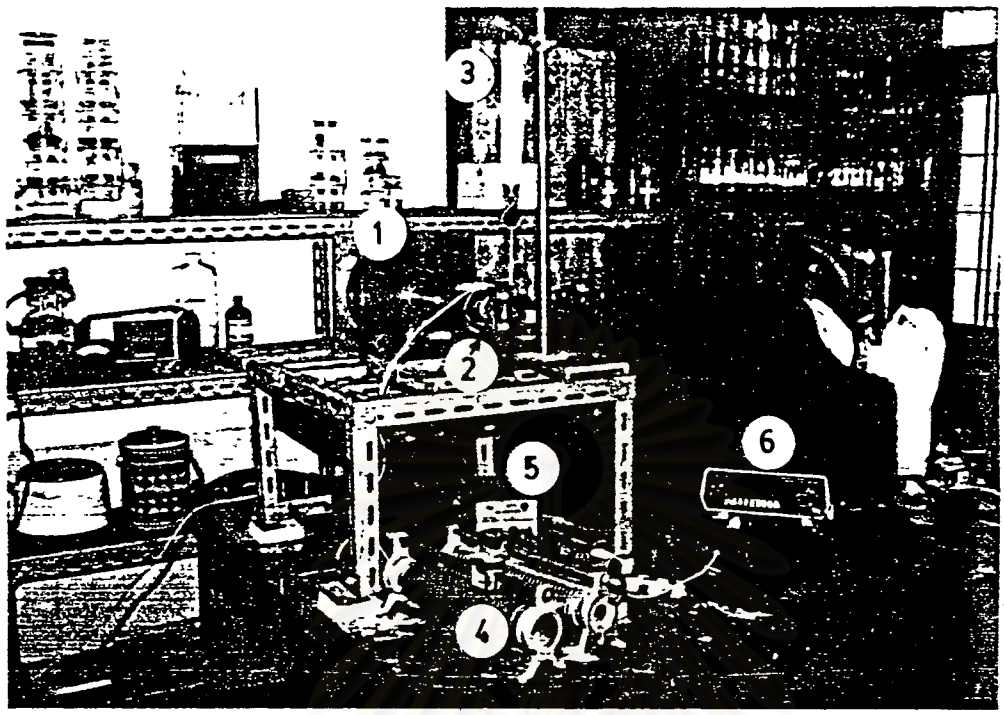
1) ไดนาโมตัวที่ 1

2) จานล้อสำหรับวัดแรงบิด

3) ที่ติดแบริ่ง

4) สายไฟของขดลวดสนามและอาเมเจอร์

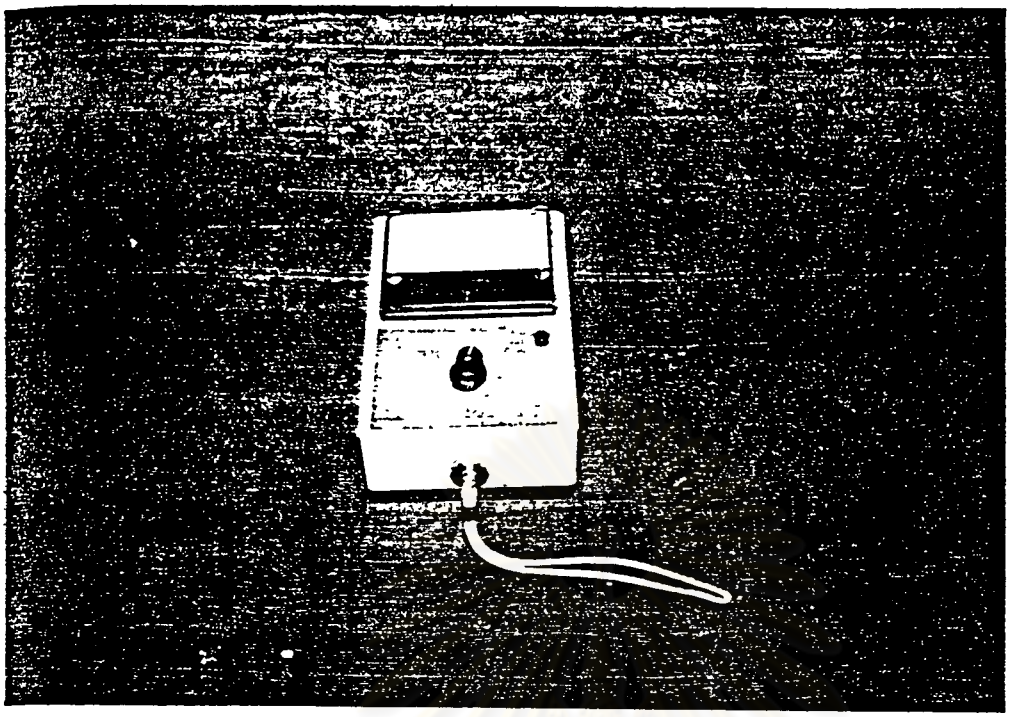
5) ไดนาโมตัวที่ 2 ใช้สนามแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3.13 แสดงการใช้ไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าในการวัดแรงบิด

1) เครื่องกังหัน
2) ไดนาโม
3) เครื่องชั่งสปริงแบบแขวน
4) รีโอสแตท
5) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
6) ดิจิตอลโวลท์มิเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดรอบชนิดใช้แสงสะท้อน (photo tachometer)

3.3 การวัดอัตราไหล

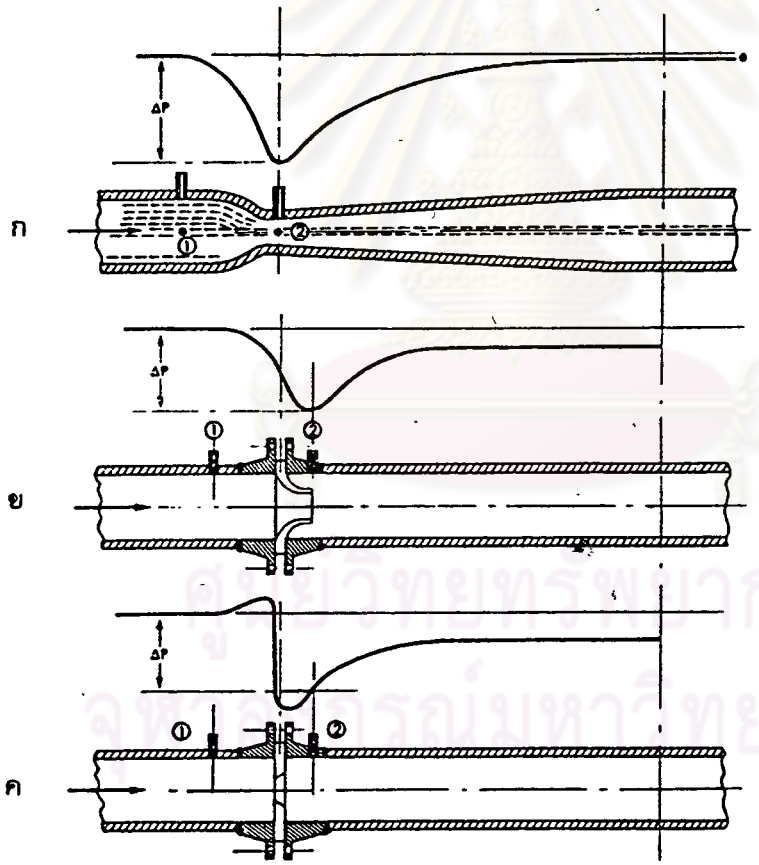
ในการวัดอัตราไหลของของไหล ถ้าการวัดจากน้ำหนักหรือปริมาตรของของไหลโดยตรงเป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้หรือไม่สะดวก ก็อาจจะใช้วิธีทางอ้อมคือ วัดจากความเร็วของการไหลแทน ในทางปฏิบัติมีเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราของการไหลอยู่หลายชนิดด้วยกันและที่มีใช้กันอยู่ส่วนมากจะเป็นประเภทที่มีส่วนคอด (contriction - type) ซึ่งเป็นการวัดจากค่าความดันที่ต่างกันเมื่อของไหลไหลผ่านส่วนคอดแล้วคำนวณเป็นความเร็ว เครื่องมือเหล่านี้ได้แก่ ท่อเวนทูรี่ (venturi tube) หัวฉีด(nozzle) และออริฟิซ (orifice) ส่วนเครื่องมือวัดการไหลอีกประเภทหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นเครื่องวัดความเร็วของของไหลโดยตรง เช่น ท่อปีตอตสแตติก (pitot static tube) นอกจากนี้ยังมีชนิดอื่น ๆ อีกหลายชนิด (29, 30, 31)

3.3.1 หลักการวัดอัตราไหล

หลักของการวัดอัตราไหลจะแตกต่างกันตามประเภทของเครื่องวัด เนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้ท่อเวนทูรีและท่อปีตอตสแตติกในการวัดอัตราการไหล ในที่นี้จึงจะได้กล่าวถึง

หลักการของมาตรวัดการไหลแบบคอคอด (constriction flowmeter) และหลักการของท่อนิตอต ตามลำดับ นอกจากนี้ในการวัดอัตราไหลต้องประกอบด้วยเครื่องวัดความดันซึ่งในการทดลองนี้ใช้แมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียงและจะได้กล่าวถึงในหลักการต่อไป

1. มาตรวัดการไหลแบบคอคอด (29, 30, 31) แบบนี้ใช้หลักของการวัดผลต่างของความดันสถิตย์ขณะที่ของไหลไหลผ่านท่อที่มีขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางต่างกัน มาตรวัดประเภทนี้มีอยู่ 3 ชนิดคือ ชนิดท่อเวนทูรี ชนิดหัวฉีด และชนิดออริฟิซ แบบธรรมดาของมาตรวัดทั้ง 3 ชนิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.15

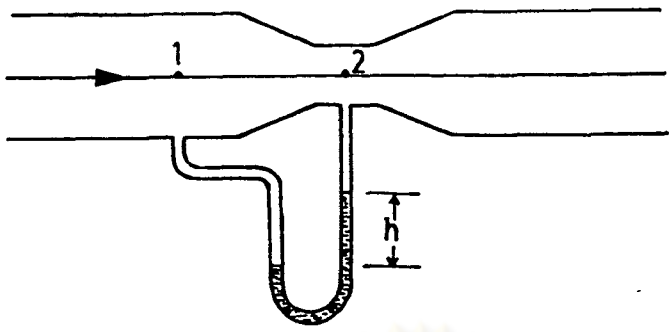


รูปที่ 3.15 แสดงมาตรวัดการไหลแบบคอคอด 3 ชนิด

ก) ท่อเวนทูรี

ข) หัวฉีด

ค) ออริฟิซ (29)



รูปที่ 3.16 แสดงการไหลของของไหลผ่านท่อที่มีส่วนคอด

จากการพิจารณาการไหลของของไหลผ่านท่อที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 ความเร็วของการไหลจะเพิ่มขึ้นขณะที่ผ่านเข้าสู่ส่วนคอดและจะมีความเร็วสูงสุดในระนาบที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางน้อยที่สุดที่ตำแหน่ง 2 ขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้นความดันของของไหลก็จะลดลงและเมื่อของไหลมีความเร็วสูงสุดก็จะมีความดันต่ำสุด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นถ้าพลังงานรวมทั้งหมดของของไหลยังมีค่าคงที่แล้วก็จะต้องมีการลดลงของพลังงานศักย์และความดันของของไหล ถ้าสมมุติว่าการไหลผ่านท่อที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 เป็นการไหลแบบราบเรียบ (streamline flow) ของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) ที่ระนาบ 1 มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A_1 และของไหลมีความเร็ว V_1 เมื่อไหลผ่านส่วนคอดที่ระนาบ 2 มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A_2 และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น V_2 ทำให้มีความดันสถิตย์ลดลง จากการใช้สมการของเบอร์นูลี (Bernoulli's equation) กับการไหลนี้จะได้ว่า

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \qquad (3.6)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) \qquad (3.7)$$

จากสมการของความต่อเนื่อง อัตราไหลของปริมาตร $\dot{Q} = A_1V_1 = A_2V_2$

นั่นคือ $$V_1 = \frac{A_2V_2}{A_1} \qquad (3.8)$$

แทนค่า V_1 ลงในสมการ (3.7) จะหาค่า V_2 ได้ดังนี้

$$V_2 = \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho\left\{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right\}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.9)$$

วัดความดัน $(P_1 - P_2)$ ด้วยแมนอมิเตอร์ของเหลว

ดังนั้น $$P_1 - P_2 = \rho_m g h_m \qquad (3.10)$$

โดยที่ ρ_m = ความหนาแน่นของของเหลวในแมนอมิเตอร์

h_m = ความสูง (pressure head) ของของเหลวในแมนอมิเตอร์

แทนค่า $(P_1 - P_2)$ จากสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.9) จะได้ความเร็วของของไหลที่ส่วนคอด

$$V_2 = \left[\frac{2g\,\rho_m\,h_m}{\rho\left\{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right\}}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.11)$$

ให้ $E = \left[\frac{1}{1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}}$ เรียกเทอมนี้ว่า velocity of approach factor

สามารถหาอัตราไหลของปริมาตรของของไหลได้จาก

$$\dot{Q} = A_2V_2 = A_2E\sqrt{2g\,\rho_m\,h_{m/\rho}} \qquad (3.12)$$

และอัตราไหลของมวลของของไหล (mass flow rate) โดยการคูณสมการ (3.12) ด้วยความหนาแน่นของของไหล นั่นคือ

$$\dot{m} = \rho A_2 E\sqrt{2g\,\rho_m h_m/\rho} = A_2 E\sqrt{2g\,\rho_m \rho h_m} \qquad (3.13)$$

อัตราไหลของปริมาตร $\dot{Q}$ และของมวล $\dot{m}$ ที่คำนวณได้ จากสมการ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับนั้นเป็นค่าในอุดมคติคือ เป็นค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี ซึ่งอัตราไหลจริงจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้ ดังนั้นอัตราไหลจริงของปริมาตร (Q_{actual})

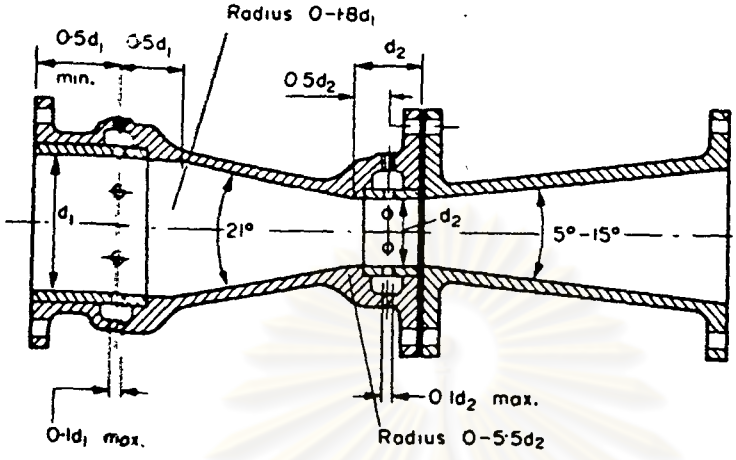
$$Q_{actual} = C_d Q_{ideal} = C_d A_2 E\sqrt{2g\,\rho_m h_m/\rho} \qquad (3.14)$$

โดยที่ C_d = สัมประสิทธิของการถ่าย (discharge coefficient) นิยามดังนี้

$$C_d = \frac{\text{อัตราไหลจริงของปริมาตร}}{\text{อัตราไหลของปริมาตรในทางทฤษฎี}}$$

$$= \frac{Q_{actual}}{Q_{ideal}}$$

ค่าสัมประสิทธิของการถ่าย C_d สำหรับท่อเวนทูรีจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.9 ถึง 0.97 ซึ่งค่าของ C_d จะแปรตามเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ส่วนปากนิดหัวฉีดและออริฟิซนั้น C_d จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.65 (30, 32) จะเห็นว่าท่อเวนทูรีมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้การสูญเสียความดันในการไหลผ่านมีน้อย กล่าวคือจะมีการสูญเสียความดันประมาณ 10% ของ (P_1-P_2) เมื่อใช้มุมของกรวยด้านออก (outlet cone) ขนาด 5° - 7° และและประมาณ 18% สำหรับมุมขนาด 14° - 15° โดยที่กรวยด้านเข้าตามปกติจะมีมุมขนาด $21^\circ \pm 2^\circ$ ตามมาตรฐานของอังกฤษ (32, 33) ซึ่งสัดส่วนของท่อเวนทูรีตามแบบมาตรฐานของอังกฤษจะเป็นดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของท่อเวนทูรี่ตามแบบมาตรฐานของอังกฤษ (33)

ถึงแม้ว่าสมการสำหรับคำนวณอัตราไหลของของไหลดังกล่าวข้างต้น ใช้สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ แต่ก็สามารถนำมาใช้กับการไหลของอากาศ หรือก๊าซอื่น ๆ ที่ความเร็วต่ำ ๆ โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ (32) เช่น กรณีของอากาศเมื่อการไหลมีความเร็วต่ำกว่า 60 เมตรต่อวินาที ก็สามารถใช้ได้ดี (33) กล่าวคือสามารถถือได้ว่าการไหลของอากาศหรือก๊าซนั้นเป็นการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้

2. ท่อปิตอต (32, 34) ใช้หลักของการวัดผลต่างของความดันรวมกับความดันสถิตย์ของของไหล พิจารณาจากรูปที่ 3.18 (ก) ท่อปิตอตถูกวางอยู่ภายในท่อยนานกับทิศทางของการไหลที่ปลายท่อเป็นรูเปิด ที่ผนังท่อมีรูเปิดสำหรับวัดความดันสถิตย์อยู่ที่ตำแหน่ง 1 สมมุติว่าของไหลมีความเร็วเริ่มต้นที่ตำแหน่ง 1 เป็น V_1 และมีความดันสถิตย์เป็น P_1 ของไหลนี้จะถูกทำให้หยุดนิ่งที่ปลายท่อปิตอตที่ตำแหน่ง 2 ด้วยความดัน P_2 จากการใช้สมการของเบอร์นูลีกับการไหลนี้จะได้ว่า

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} \qquad (3.15)$$

โดยที่ P_1 = ความดันสถิตย์ (static pressure)

P_2 = ความดันรวม (total pressure or stagnation pressure)

V_1 = ความเร็วของของไหล

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

g = ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

จากนี้จะได้

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\ (P_2 - P_1)}{\rho}} \qquad (3.16)$$

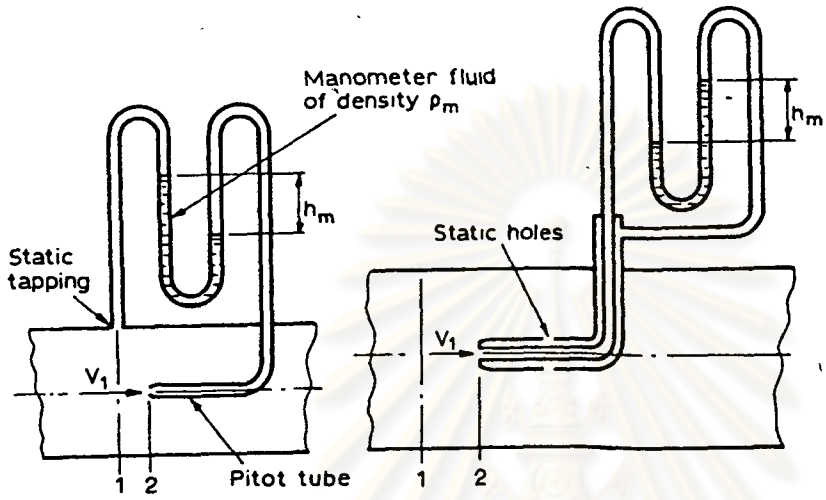
ซึ่งจะเห็นว่าเราสามารถคำนวณหาความเร็วได้อย่างง่ายดายโดยการวัดผลต่างระหว่างความดันนี้ด้วยแมนอมิเตอร์ได้เท่ากับความสูง h_m ของของเหลวในแมนอมิเตอร์ที่มีความหนาแน่น ρ_m นั่นคือ

$$P_2 - P_1 = g\rho_m h_m \qquad (3.17)$$

แทนค่าลงในสมการ (3.16) จะได้

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gh_m\rho_m}{\rho}} \qquad (3.18)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



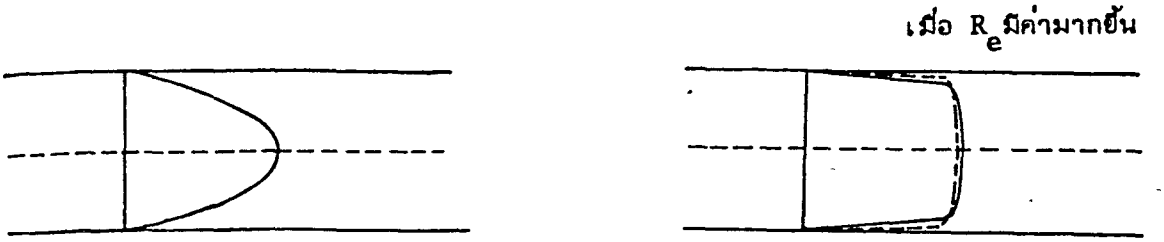
(ก) (ข)

รูปที่ 3.18 แสดงวิธีวัดความเร็ว

ก) แบบท่อปีตอตแยกกับท่อสแตติกส์

ข) แบบรวมท่อปีตอต-สแตติกส์ (32)

ท่อปีตอตกับสแตติกส์อาจรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นท่อที่มีผนัง 2 ชั้น ดังรูปที่ 3.18 (ข) ซึ่งเป็นท่อปีตอตสแตติกส์ที่ใช้ได้สะดวกกว่า โดยมีรูสำหรับวัดความดันสถิตย์อยู่ผนังท่อชั้นนอกซึ่งอยู่ใกล้จุดที่วัดความเร็วมากกว่าในแบบท่อปีตอตกับท่อสแตติกส์แยกกัน ส่วนหลักของการวัดนั้นเหมือนกัน ตามปกติแล้วการไหลของของไหลผ่านท่อจะมีชั้นบาง ๆ ของของไหลที่อยู่นิ่งกับผนังท่อ และความเร็วของการไหลจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของท่อ การแจกแจงความเร็วของการไหลในท่อจะแปรตามลักษณะของการไหล ซึ่งจะบ่งชี้ด้วยค่าของเลขเรย์โนลด์ (Re) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.19 ดังนั้นเพื่อความแม่นยำของการวัด จะต้องทำการวัดความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในพื้นที่หน้าตัดแล้วหาค่าความเร็วเฉลี่ย จากนั้นก็สามารถหาอัตราไหลของปริมาตรโดยการคูณความเร็วเฉลี่ยด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อ



(ก) (ข)

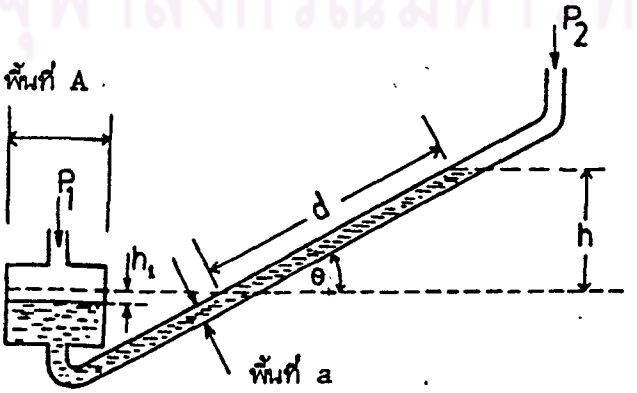
รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะการแจกแจงความเร็วภายในท่อ

ก) การไหลแบบราบเรียบ Re < 2000

ข) การไหลแบบปั่นป่วน Re < 3000

สำหรับท่อขนาดเล็กวิธีที่สะดวกสำหรับการหาค่าความเร็วเฉลี่ย คือการใช้หัวฉีดติดเข้ากับท่อแล้ววัดความเร็วของของไหลด้วยท่อปิตอตเพียงครั้งเดียวที่ตำแหน่งศูนย์กลางของหัวฉีดในระนาบทางออก (34) และเมื่อคูณค่าความเร็วนี้ด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางของลำคอหัวฉีดก็จะก็จะได้อัตราไหลของปริมาตร ถ้าหัวฉีดติดอยู่ที่ปลายทางออกของท่อ ความดันสถิตย์ของของไหลก็จะเท่ากับความดันของบรรยากาศรอบ ๆ นั่นคือไม่จำเป็นต้องวัดความดันสถิตย์ของของไหลที่ทางออกของหัวฉีดแต่อย่างใด สำหรับในการคำนวณความเร็วจากสมการเมื่อวัดความดันด้วยแมนนอมิเตอร์

3. แมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียง



รูปที่ 3.20 แสดงแมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียง

แมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียงเป็นแบบที่ปรับปรุงมาจากแบบหลอดรูปตัวยู (U-tube manometer) ข้อดีของแบบหลอดเอียงก็คือจะให้ความยาวของลำเกลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบหลอดรูปตัวยูธรรมดาสำหรับความดันเท่ากัน ลักษณะของแมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียงจะเป็นดังรูปที่ 3.20 แขนข้างหนึ่งของแมนอมิเตอร์จะประกอบด้วยหลอดแก้วเอียงทำมุมกับแนวราบ และแขนอีกข้างหนึ่งจะเป็นกระเปาะขนาดใหญ่มีของเหลวบรรจุอยู่ ที่หลอดแก้วเอียงมีสเกลติดอยู่ สมมุติให้กระเปาะใหญ่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A หลอดเอียงมีพื้นที่ภาคตัดขวาง a และเอียงทำมุมกับแนวราบด้วยมุม θ ถ้าทางด้านกระเปาะใหญ่มีความดันเท่ากับ P_1 ทำให้ระดับของเหลวลดลงเท่ากับ h_1 ทางด้านหลอดเอียงมีความดัน P_2 และระดับของเหลวในหลอดเอียงเพิ่มขึ้นยาวเท่ากับ d หรือสูงจากระดับเดิมของของเหลวเท่ากับ h ของเหลวที่มีความหนาแน่นเท่ากับ ρ จะได้ว่าผลต่างของความดัน

$$P_1 - P_2 = \rho g(h_1 + d \sin\theta) \qquad (3.19)$$

แต่เนื่องจาก $A_1 h_1 = ad$ (3.20)

นั่นคือ $h_1 = \frac{a}{A} d$ (3.21)

แทนค่า h_1 ในสมการ (3.19) จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho g d\left(\frac{a}{A} + \sin\theta\right) \qquad (3.22)$$

ถ้า $A >> a$ อัตราส่วน $\frac{a}{A}$ ก็สามารถตัดทิ้งได้

ดังนั้น $P_1 - P_2 = \rho g d \sin\theta$ (3.23)

โดยที่ $h = d\sin\theta$ (3.24)

เมื่อ h เป็นความสูงของลำของเหลวที่ควรจะเป็นถ้าเป็นแมนอมิเตอร์แบบหลอดตัวยูธรรมดา

3.3.2 วิธีวัดอัตราไหล

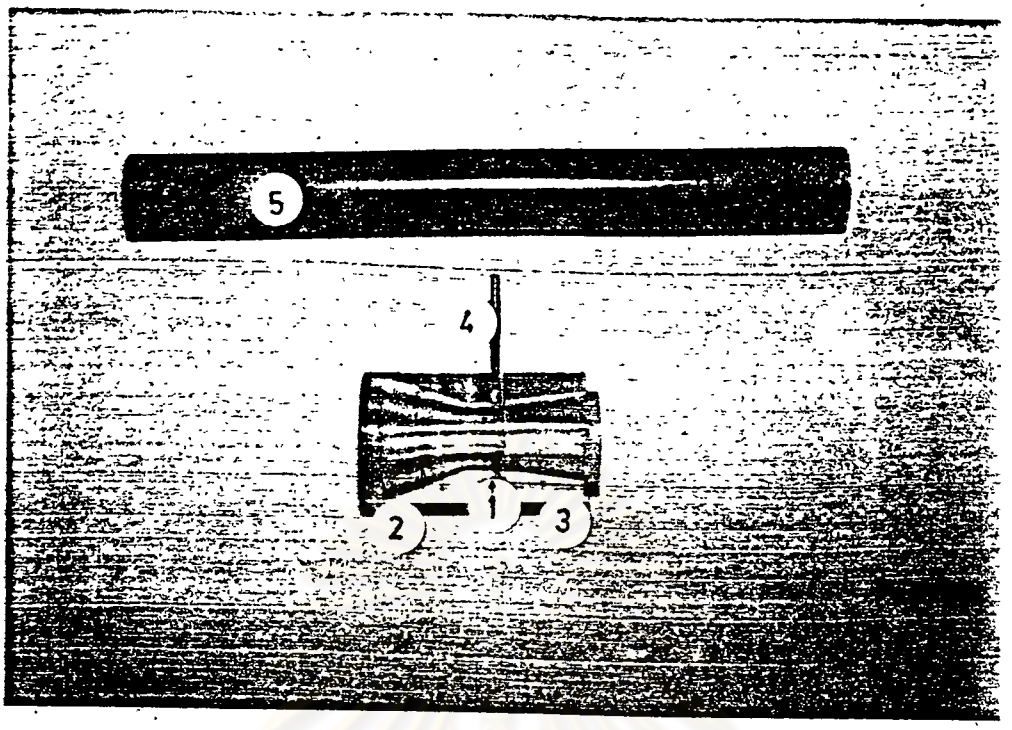
ในการทดลองนี้ทำการวัดอัตราไหลของอากาศที่ใช้หมุนเครื่องกังหันโดยการวัดจากอากาศที่ไหลออกจากเครื่องกังหันที่ท่อทางออกด้วยวิธีวัด 2 วิธีคือ วิธีของท่อเวนทูรี และวิธีของท่อปิตอต ซึ่งวัดความดันด้วยแมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียงที่สร้างขึ้น

ท่อเวนทูรีที่ใช้ทำจากแท่งอาคริลิค (acrylics) โดยการกลึงให้เป็นรูปท่อเวนทูรีอันที่ 1 มีลักษณะดังรูปที่ 3.21 (ก) มีสัดส่วนดังนี้คือ มีมุมของกรวยทางเข้า 22° และมุมของกรวยทางออก 11° ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนลำคอ 17.3 มิลลิเมตร โดยใช้กับท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 31.8 มิลลิเมตร สำหรับอันที่ 2 มีลักษณะดังรูปที่ 3.21 (ข) มีสัดส่วนดังนี้คือ มีมุมของกรวยทางเข้า 22° มุมของกรวยทางออก 14° ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนลำคอ 14.3 มิลลิเมตร โดยใช้กับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 19.05 มิลลิเมตร ($\frac{3}{4}$ นิ้ว) ท่อเวนทูรีทั้งสองอันจะเจาะรูด้านข้าง 1 รูที่กึ่งกลางความยาวของส่วนลำคอสำหรับวัดความดันสถิตย์

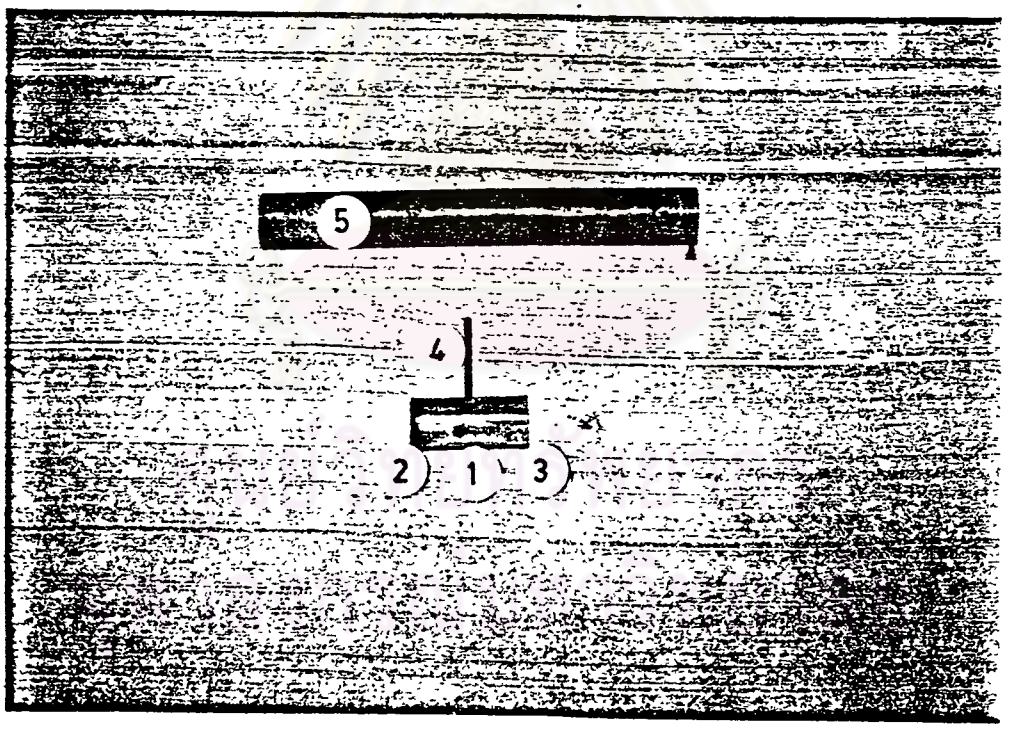
ท่อปิตอตที่ใช้เป็นหัววัดความดันรวมนั้น ใช้หลอดโลหะใส้ปากกาลูกลื่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2.3 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ยาว 93 มิลลิเมตร ส่วนท่อวัดความดันสถิตย์ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3.18 มิลลิเมตร ($\frac{1}{8}$ นิ้ว) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 2.0 มิลลิเมตร

แมนอมิเตอร์แบบหลอดเอียงที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.22 โดยใช้โลหะอลูมิเนียมทำเป็นโครง สามารถปรับความเอียงได้ มีขนาดความยาวของหลอดเอียง 700 มิลลิเมตร โดยใช้หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3.6 มิลลิเมตร และภายนอก 5.0 มิลลิเมตร กระเปาะทำด้วยแผ่นอาคริลิคเป็นกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 50 × 50 ตารางมิลลิเมตร มีความสูงประมาณ 27 มิลลิเมตร ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวสำหรับแมนอมิเตอร์ โดยใส่น้ำมันก๊าดในกระเปาะประมาณ $\frac{1}{2}$ ของความสูงของกระเปาะ น้ำมันก๊าดที่ใช้นี้มีความหนาแน่น ρ = 765.82 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ก่อนจะใช้แมนอมิเตอร์จะต้องทำการปรับระดับของแมนอมิเตอร์โดยใช้ระดับน้ำ เพื่อให้แมนอมิเตอร์อยู่ในระดับแนวราบ

สำหรับการวัดอัตราไหลด้วยวิธีของท่อเวนทูรี จะนำท่อเวนทูรีมาต่อกับท่อทางออกของเครื่องกังหัน และใช้สายยางเชื่อมต่อท่อวัดความดันสถิตย์เข้ากับแมนอมิเตอร์มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.22 โดยต่อท่อวัดความดันสถิตย์ที่ส่วนลำคอเข้ากับทางด้านหลอดเอียง และต่อท่อวัดความดันสถิตย์ที่ผนังท่อเข้ากับทางด้านกระเปาะ เมื่อมีอากาศไหลผ่านท่อเวนทูรี ความดันสถิตย์ที่ผนังท่อจะสูงกว่าความดันสถิตย์ที่ส่วนลำคอ และจะกดดันให้น้ำมันก๊าดในกระเปาะไหลขึ้นไปตามหลอดเอียง



(ก)



(ข)

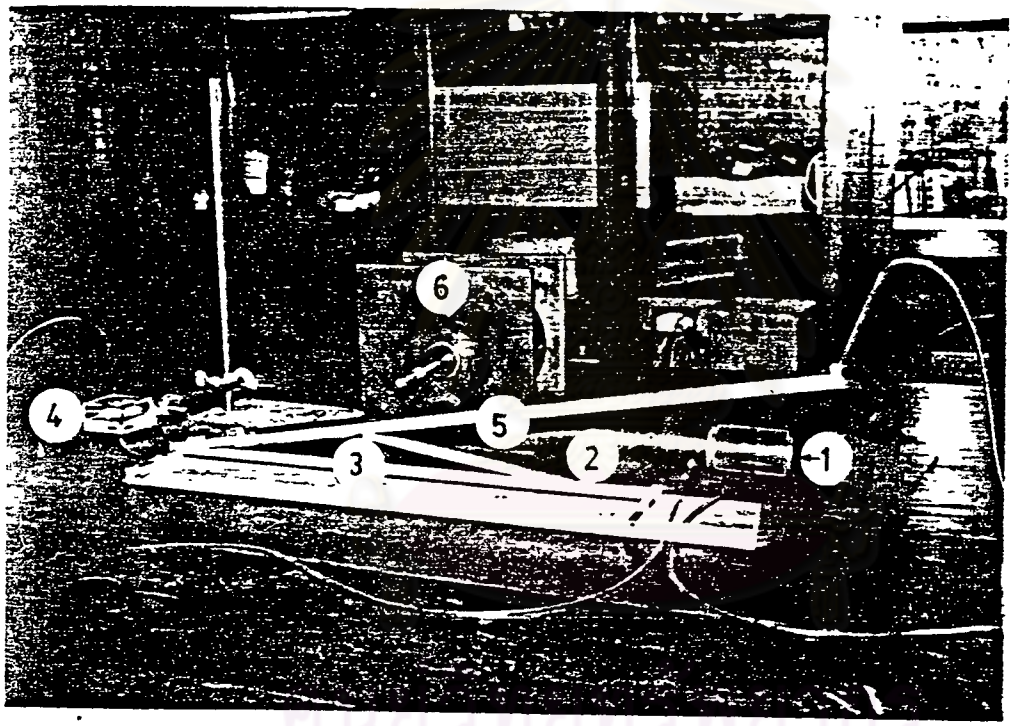
รูปที่ 3.21 (ก) แสดงท่อเวนทูรีอันที่ 1

(ข) แสดงท่อเวนทูรีอันที่ 2

1) ส่วนลำคอ 2) กรวยทางเข้า 3) กรวยทางออก

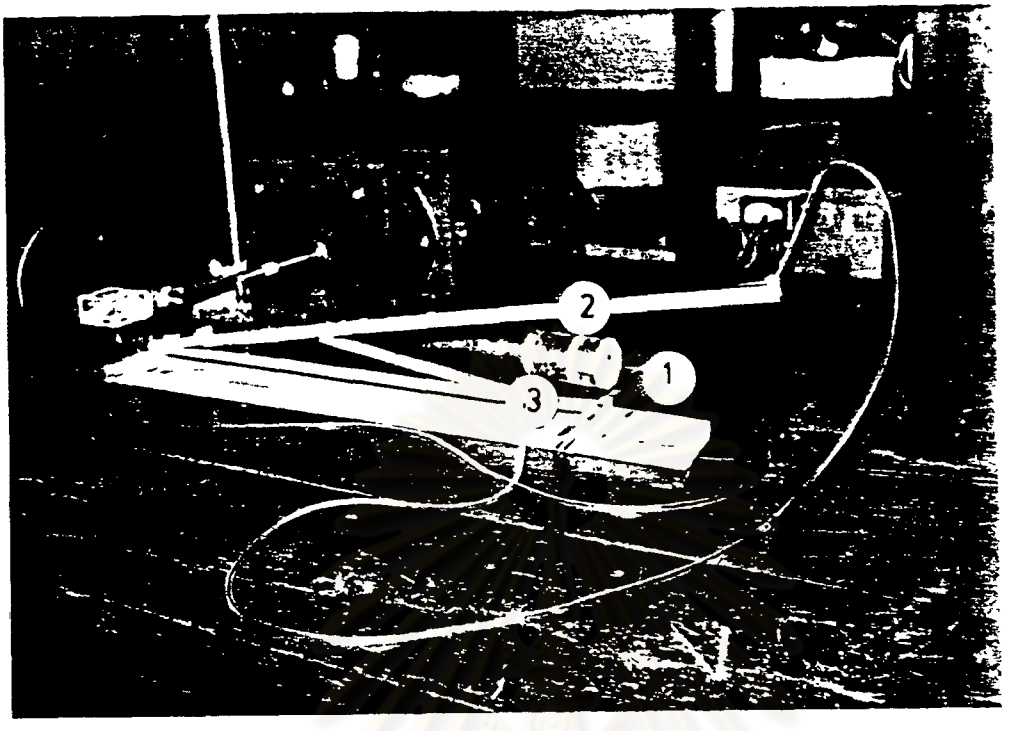
4) ท่อวัดความดันสถิตย์ 5) ท่อทองเหลืองที่ใช้ต่อกับท่อเวนทูรี

จากการอ่านระดับเริ่มต้นและระดับสุดท้ายของน้ำมันก๊าดในหลอดเอียง ก็จะทราบความยาวที่เพิ่มขึ้นของระดับน้ำมันก๊าดในหลอด และเมื่อทราบมุมเอียงของหลอดเอียง ก็สามารถคำนวณผลต่างของความดันได้จากสมการ (3.23) จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อและของส่วนลำคอที่ทราบ และเมื่อทราบความหนาแน่นของอากาศ ก็สามารถคำนวณความเร็วของอากาศที่ส่วนลำคอของท่อเวนทูรีได้จากสมการ (3.9) คำนวณอัตราไหลของปริมตรของอากาศได้จากสมการ (3.12) และคำนวณอัตราไหลของมวลของอากาศได้จากสมการ (3.13)



รูปที่ 3.22 แสดงการใช้ท่อเวนทูรีในการวัดอัตราไหล

1. ท่อเวนทูรี
2. ท่อทางออกของเครื่องกังหัน
3. แมนอมิเตอร์
4. กระเปาะน้ำมันก๊าด
5. หลอดเอียง
6. เครื่องกังหัน



รูปที่ 3.23 แสดงการใช้ท่อปีตอตกับท่อเวนทูรีในการวัดอัตราไหล

1. ท่อปีตอต 2. ท่อเวนทูรี 3. ท่อวัดความดันสถิตย์

สำหรับการวัดอัตราไหลด้วยวิธียองท่อปีตอต ในการทดลองนี้ใช้วิธีวัดความเร็วที่จุดศูนย์กลางของส่วนลำคอของท่อเวนทูรี โดยวางท่อปีตอตไว้ในแนวแกนของท่อเวนทูรีและให้ปลายเปิดของท่อปีตอตอยู่ตรงทางออกของส่วนลำคอ ดังรูปที่ 3.23 ท่อปีตอตต่ออยู่กับแมนอมิเตอร์ทางด้านกระเปาะ ส่วนท่อความดันสถิตย์ที่ส่วนลำคอของท่อเวนทูรีต่ออยู่กับแมนอมิเตอร์ทางด้านหลอดเลียง เมื่อมีอากาศไหลผ่านความดันรวมจากท่อปีตอตที่สูงกว่าความดันสถิตย์จะกดดันให้น้ำมันก๊าดไหลขึ้นไปตามหลอดเอียง จากความยาวที่เพิ่มขึ้นของระดับน้ำมันก๊าดในหลอดเอียงและมุมเอียงของหลอด ก็สามารถคำนวณผลต่างของความดันได้จากสมการ (3.23) และเมื่อทราบความหนาแน่นของอากาศก็จะสามารถคำนวณความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านลำคอของท่อเวนทูรีได้จากสมการ (3.16) เมื่อคูณความเร็วที่คำนวณได้ด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนลำคอก็จะได้อัตราไหลของปริมาตร และเมื่อคูณอัตราไหลของปริมาตรด้วยความหนาแน่นของอากาศ ก็จะได้อัตราไหลของมวลของอากาศ

3.4 วิธีทำการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการทดลองเครื่องกังหันโดยใช้อากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศในการหมุนเครื่องกังหัน การทดลองนี้ประกอบด้วย 1) การวัดแรงบิดและกำลังของเครื่องกังหัน 2) การวัดอัตราไหลของอากาศผ่านเครื่องกังหัน เพื่อศึกษาลักษณะของการทำงานของเครื่องกังหัน โดยการให้พลังงานจลน์แก่เครื่องกังหันด้วยขนาดต่าง ๆ (นั่นคือ ขนาดของอัตราไหลของมวล และความเร็วของอากาศที่เข้าสู่เครื่องกังหัน) การเปลี่ยนขนาดอัตราไหลของมวลของอากาศที่ให้แก่เครื่องกังหัน กระทำโดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดหรือโดยการเปลี่ยนขนาดความดันของอากาศที่เข้าสู่หัวฉีด ซึ่งเครื่องกังหันมีหัวฉีด 2 ชั้น ความเร็วที่สร้างขึ้นมีจำนวนหัวฉีด 4 รู และสามารถเปลี่ยนขนาดของหัวฉีดได้ 3 ขนาด ทั้งสองเครื่อง

การวัดแรงบิดใช้วิธีไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้าแบบไดนาโม โดยใช้ไดนาโมกระแสตรงตัวที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 การต่อควบไดนาโมเข้ากับเครื่องกังหันและจัดอุปกรณ์ในการวัดดังลักษณะในรูปที่ 3.13 วิธีวัดกระทำตามวิธีที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.2.2 สำหรับการวัดอัตราไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องกังหัน จัดอุปกรณ์การวัดในลักษณะดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 สำหรับการวัดด้วยวิธีท่อเวนทูรีและวิธีท่อปีตอต ตามลำดับรายละเอียดในวิธีทำการทดลองมีดังนี้

1. ทำการทดลองวัดอัตราหมุนของเครื่องกังหันขณะที่ไม่มีภาระ ที่ขนาดความดันอากาศอัดต่าง ๆ เมื่อใช้หัวฉีดขนาดต่าง ๆ กัน

2. สำหรับหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องกังหันขนาดหนึ่ง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด) จะทำการทดลองวัดแรงบิดและอัตราไหลของอากาศที่ความดันอากาศอัดขนาดต่าง ๆ ที่ให้แก่เครื่องกังหัน ที่ความดันอากาศอัดค่าหนึ่ง ทำการวัดแรงบิดที่อัตราหมุนต่าง ๆ ด้วยการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นภาระของไดนาโมให้มีค่าต่าง ๆ หลาย ๆ ค่าประมาณ 7-10 ค่า โดยบิดหลักให้ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ครอบคลุมจุดที่เครื่องกังหันให้กำลังงานได้สูงสุด สำหรับการวัดอัตราไหลกระทำ 2 วิธีคือ วิธีของท่อเวนทูรีและวิธีของท่อปีตอตที่ใช้กับท่อเวนทูรี ในการวัดอัตราไหลจะวัดอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านท่อเวนทูรีออกมาด้วยเทอร์โมมิเตอร์

3. เปลี่ยนขนาดของหัวฉีดทั้ง 4 หัว แล้วทำการวัดแรงบิดและอัตราไหลด้วยวิธีการอย่างเดียวกัน โดยที่เครื่องกังหันเครื่องที่ 1 ขนาดหัวฉีดที่ใช้มี 3 ขนาด คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.59,2.0 และ 2.38 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องที่ 2 มี 3 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร

4. ขนาดของความดันอากาศอัดที่ใช้ทดลองจะอยู่ในช่วง 0.5-3.0 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร การเปลี่ยนขนาดความดันของอากาศอัดจะเพิ่มครั้งละ 0.5 หรือ 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5. สำหรับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ทำการทดลองลดขนาดอัตราไหลของอากาศโดยการลดจำนวนหัวฉีดลงเหลือ 2 รู สำหรับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 และ 2.5 มิลลิเมตร แล้วทำการวัดแรงบิดและอัตราไหลของอากาศตามวิธีการในข้อ 1

6. ทำการทดลองวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 เมื่อใช้ใบหมุนแถวแรกเพียงแถวเดียว และใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู

7. ทำการทดลองวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องกังหันแบบแรงผลักชนิด 1 ขั้นความเร็วที่มีอยู่แล้ว ที่ขนาดของความดันอากาศอัดต่าง ๆ ตามวิธีการเดิม เครื่องหังกันนี้มีจำนวนหัวฉีด 2 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

8. ทำการทดลองวัดแรงบิดและกำลังงานของเครื่องกังหันแบบแรงผลักชนิดไหลเข้าตามแนวรัศมี มีใบกังหัน 1 แถวที่มีอยู่แล้ว ตามวิธีการเดิม เครื่องกังหันนี้มีจำนวนหัวฉีด 2 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.38 มิลลิเมตร

9. ทำการทดลองวัดแรงบิดและกำลังงานด้วยวิธีเบรคเชือก เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ด้วย วิธีไดนาโมมิเตอร์ไฟฟ้า โดยทำการทดลองกับเครื่องกังหันเครื่องที่ 2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร จำนวนหัวฉีด 4 รู ที่ความดันอากาศอัดขนาด 1.0 และ 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร