หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 4

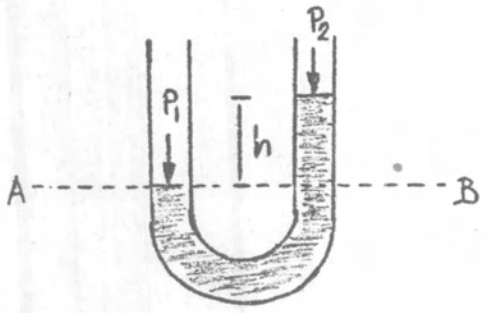
การวัดปริมาณของการไหล

ในการศึกษาการไหลของของไหลเราจะต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับการไหลเพื่อนำมาวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นจะได้จากการวัด (measurement) ในบทนี้จะได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดความดันและความเร็วของการไหล ซึ่งความดันและความเร็วเป็นปริมาณที่สำคัญในการศึกษาการไหล

4.1 แมโนมิเตอร์ (manometer)

แมโนมิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความดันหรือวัดผลต่างของความดัน ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 แบบคือ แบบรูปตัว U (U - tube manometer) และแบบเอียง (inclined manometer) ซึ่งทั้ง 2 แบบจะทำด้วยท่อแก้วบรรจุด้วยของเหลวที่ทราบความหนาแน่น

4.1.1 แมโนมิเตอร์รูปตัว U



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของแมโนมิเตอร์แบบรูปตัว U

i 17759043

ให้ a เป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อแก้ว

ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลวที่บรรจุในท่อแก้ว

g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

h เป็นผลต่างของความสูงของระดับของเหลว

ใช้หลักที่ว่า ความดันที่ระดับเดียวกันย่อมเท่ากัน จากรูปที่ 4.1 ความดันที่ระดับ AB ของท่อข้างซ้ายและขวาจะเท่ากัน

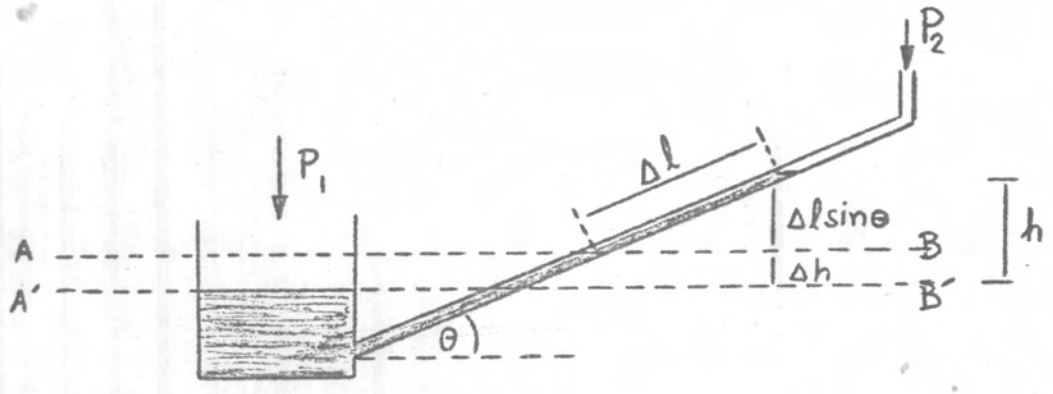
$$P_1 = P_2 + \frac{\rho ahg}{a} \qquad (4.1)$$

$$P_1 = P_2 + \rho gh \qquad (4.2)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho gh \qquad (4.3)$$

4.1.2 <u>แมโนมิเตอร์แบบเอียง</u>(5)

เป็นแมโนมิเตอร์ที่มีความไวมากที่สุด เหมาะสำหรับวัดความดันที่ต่างกันน้อย ๆ ขาข้างหนึ่งจะทำเป็นกระเปาะใหญ่ และขาอีกข้างหนึ่งเป็นท่อแก้วต่อกับกระเปาะอยู่อย่างเอียง ๆ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของแมโนมิเตอร์แบบเอียง

ให้ a_1 และ a_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของกระเปาะและท่อแก้วตามลำดับ

ρ' เป็นความหนาแน่นของของเหลวที่บรรจุ

θ เป็นมุมที่ท่อแก้วเอียงทำมุมกับแนวระดับ

เมื่อความดัน P_1 กระทำต่อของเหลวด้านกระเปาะ จะทำให้ระดับของเหลวลดลง Δh หรือปริมาตรของเหลวจะลดลง $a_1\Delta h$ อันเป็นผลให้ลำของเหลวในท่อแก้วเพิ่มขึ้น Δl หรือปริมาตรเพิ่มขึ้น $a_2\Delta l$

$$a_1\Delta h = a_2\Delta l \tag{4.4}$$

$$\Delta h = \frac{a_2}{a_1}\Delta l \tag{4.5}$$

ที่ระดับ A'B' ระดับของเหลวในกระเปาะและท่อแก้วเอียงต่างกันตามแนวดิ่งเป็น h

$$h = \Delta h + \Delta l \sin\theta \tag{4.6}$$

จาก (4.5) และ (4.6) จะได้

$$h = \Delta l \left(\sin\theta + \frac{a_2}{a_1}\right) \tag{4.7}$$

เมื่อคิดความดันที่ระดับ A'B' จะได้

$$P_1 = P_2 + \rho' g\, \Delta l \left(\sin\theta + \frac{a_2}{a_1}\right) \tag{4.8}$$

เนื่องจากว่า $a_1 >> a_2$ จะได้ $\frac{a_2}{a_1} << 1$ และถ้ามุม θ มีค่าน้อย ๆ จะได้ $\sin\theta \approx \tan\theta$ ดังนั้น (4.8) จึงเขียนเป็น

$$P_1 \approx P_2 + \rho' g\, \Delta l \tan\theta \tag{4.9}$$

$$P_1 - P_2 \approx \rho' g\, \Delta l \tan\theta \tag{4.10}$$

เพื่อให้แมโนมิเตอร์แบบเอียงมีความไวมากขึ้น ของเหลวที่ใช้บรรจุจะต้องมีความหนาแน่นน้อย และไม่ติดผิวแก้ว ในที่นี้ใช้น้ำมันก๊าดซึ่งมีค่าความหนาแน่น 772 kg/m^3 และ g มีค่า 9.8 m/s^2 ดังนั้น (4.10) จึงเขียนเป็น

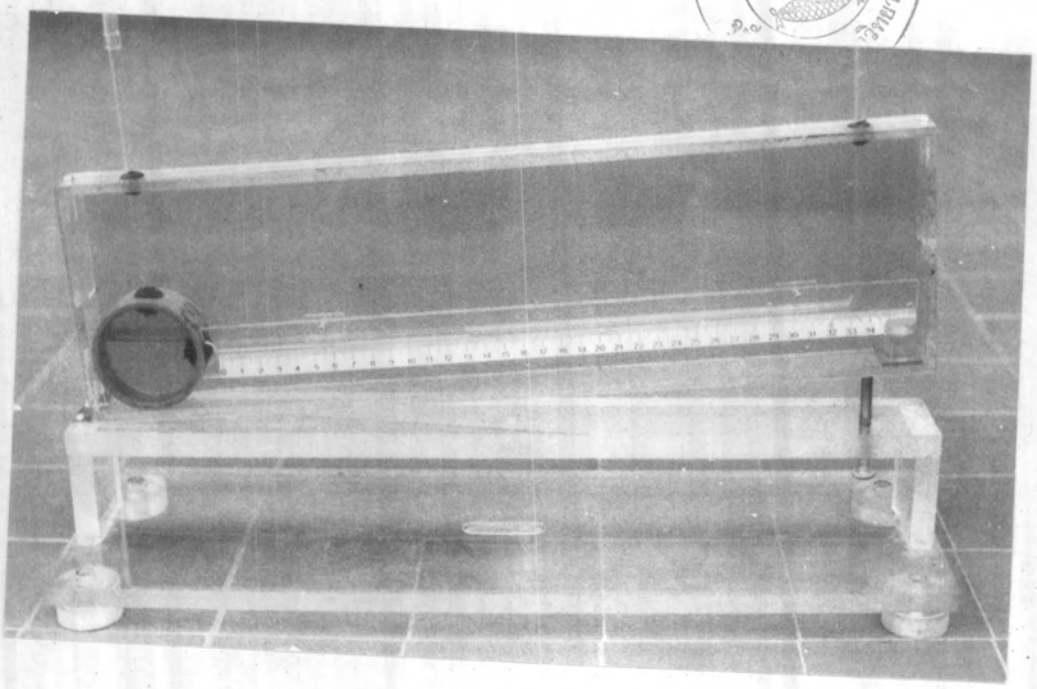
$$P_1 - P_2 = 772 \times 9.8 \times \Delta l \tan \theta \qquad (4.11)$$

ถ้า P_1 เป็นความดันรวม และ P_2 เป็นความดันสถิต (4.11)จะเขียนเป็น

$$P_{st} - P = 7565.6 \times \Delta l \tan \theta \qquad (4.12)$$

รูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่ายของแมโนมิเตอร์แบบเอียงที่ได้สร้างขึ้น กระเปาะทำด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 cm ยาว 3.0 cm ปิดด้านหน้าและหลังด้วยแผ่นพีวีซีเจาะรู 2 รูบนผิวท่อห่างกัน $\frac{1}{4}$ ของเส้นรอบวงของท่อ เพื่อเสียบท่อแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.4 cm ที่รูทั้ง 2 จะใส่แหวนยางไว้เพื่อกันไม่ให้น้ำมันก๊าดซึมออกมา ท่อแก้วแท่งสั้นให้เสียบไว้ในแนวดิ่ง ส่วนท่อแก้วแท่งยาวที่ดัดงอเสียบไว้ในแนวเกือบราบ บรรจุน้ำมันก๊าดในกระเปาะประมาณ $\frac{3}{4}$ ของปริมาตรของกระเปาะ ที่ท่อแก้วดัดงอส่วนแนวเกือบราบจะมีแผ่นสเกลบอกความยาวของน้ำมันก๊าดในท่อแก้วเป็น cm บรรจุกระเปาะพร้อมแท่งแก้วที่บรรจุน้ำมันก๊าดแล้วในกรอบพีวีซีใสขนาด 13.0 x 45.0 x 3.2 cm^3 โดยที่กรอบนี้ตั้งบนฐาน ขอบกรอบข้างหนึ่งด้านติดกับฐานจะยึดติดกันไว้ด้วยบานพับขนาดเล็ก และอีกด้านหนึ่งของฐานจะมีสกรูสำหรับปรับยกกรอบเพื่อท่อแก้วที่ดัดงอส่วนแนวเกือบราบจะได้เอียงทำมุมกับแนวราบได้ตามที่ต้องการ ก่อนที่จะนำแมโนมิเตอร์แบบเอียงไปใช้จะต้องปรับให้ฐานอยู่ในแนวระดับราบก่อนเสมอ โดยการหมุนปุ่มปรับระดับที่ฐาน และใช้เครื่องวัดระดับช่วยในการปรับระดับ

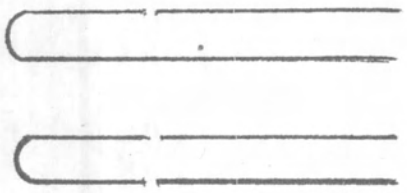
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแมโนมิเตอร์แบบเอียงที่สร้าง

4.2 ความดันสถิต (static pressure)

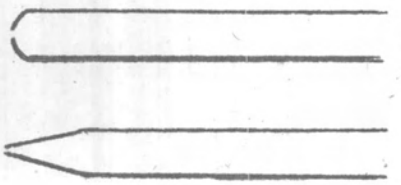
ความดันสถิตเป็นความดันที่กระทำบนพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว ความดันสถิต ณ จุด ๆ หนึ่งที่มีของไหลไหลผ่าน สามารถวัดได้โดยใช้ท่อทรงกระบอกกลวงเล็ก ๆ เจาะรูบนผิวทรงกระบอกปลายข้างหนึ่งปิดอีกข้างหนึ่งเปิด โดยวางในทางเดินของของไหลให้แนวแกนท่อขนานกับทิศของการไหล โดยเอาด้านปิดชี้ไปทางทิศที่ของไหลไหลเข้า ต่อปลายเปิดเข้ากับเครื่องวัดความดัน ค่าที่ได้จะเป็นค่าความดันสถิต



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของท่อวัดความดันสถิต (ก) เจาะรูเดียว (ข) เจาะ 2 รู

4.3 ความดันรวม (total pressure)

ความดันรวมเป็นความดัน ณ จุดนึ่ง ความดันรวมนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความดันนึ่ง ความดันรวมสามารถวัดได้โดยใช้ท่อทรงกระบอกกลวงเล็ก ๆ ปลายข้างหนึ่งปิดมีลักษณะมน และที่ตรงกลางปลายด้านปิดนี้จะเจาะรูเล็ก ๆ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเปิด โดยวางในทางเดินของไหลให้แกนท่อขนานกับทิศของการไหล โดยเอาด้านที่เจาะรูชี้ไปทางทิศที่ของไหลไหลเข้า ต่อปลายเปิดเข้ากับเครื่องวัดความดัน ค่าที่ได้จะเป็นค่าความดันรวม

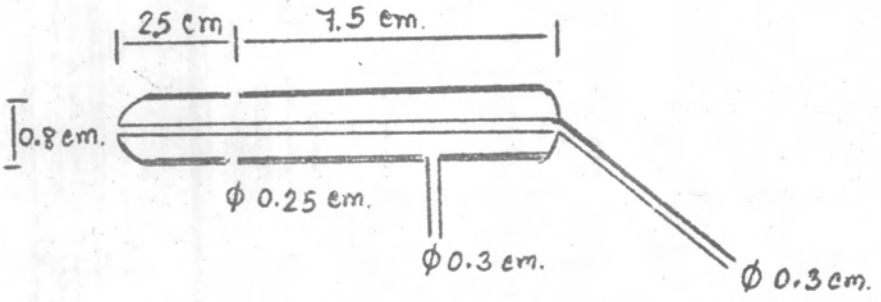


รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของท่อวัดความดันรวม (ก) ปลายมน (ข) ปลายแหลม

เมื่อของไหลไหลปะทะด้านปิดที่เจาะรู ความเร็วของของไหล ณ ที่รูจะถือว่าเป็นศูนย์ ซึ่งตรงรูนี้เองจะเป็นจุดนิ่ง ดังนั้น ความดันตรงรูนี้จึงเป็นค่าความดันรวม

4.4 ท่อปิตอต-สแตติก (Pitot - static tube)

เป็นท่อที่สามารถวัดทั้งความดันสถิตและความดันรวมได้พร้อมกัน โดยนำเอาท่อที่วัดความดันสถิตและความดันรวมมารวมอยู่ด้วยกัน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเล็ก 2 ท่อ ซ้อนกันอยู่ ดังรูปที่ 4.6



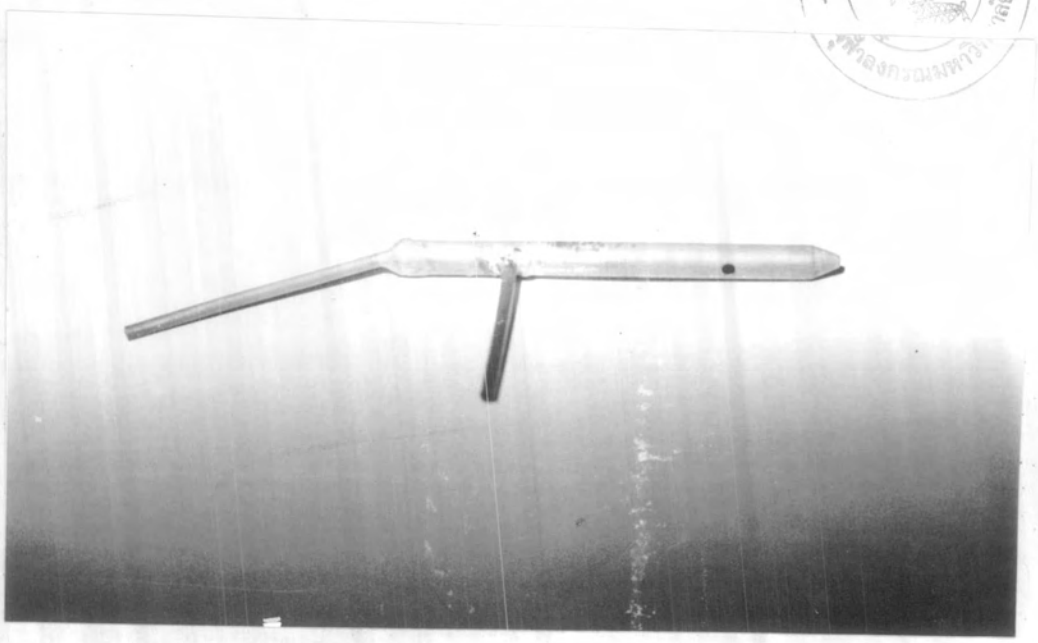
รูปที่ 4.6 แสดงขนาดของท่อปิตอต-สแตติกที่สร้าง

ท่ออันนอกจะเจาะรูที่ผิวซึ่งจะทำหน้าที่วัดความดันสถิต ส่วนท่ออันในจะมีรูเล็กที่ปลายทำหน้าที่วัดความดันรวม โดยการนำท่อปิตอต-สแตติกไปวางในทางเดินของของไหล จัดให้แนวแกนท่อขนานกับทิศของการไหล โดยเอาด้านที่เจาะรูเล็กที่ปลายชี้ไปทางทิศที่ของไหลไหลเข้า และต่อปลายของท่อที่เหลือทั้ง 2 เข้ากับแมโนมิเตอร์แบบเอียง ก็จะได้ผลต่างของความดันรวมกับความดันสถิต ซึ่งจากนี้เองสามารถนำไปหาอัตราเร็วของของไหลได้จาก (3.43) และ (4.10) จะได้

$$V = \left[151.3 \frac{\Delta l \tan \theta}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (4.14)$$

อัตราเร็วที่ได้จาก (4.14) มีหน่วยเป็น m/s และ Δl เป็น cm รูปที่ 4.7 เป็นท่อปีตอต-สแตติกสร้างด้วยท่อทองแดง

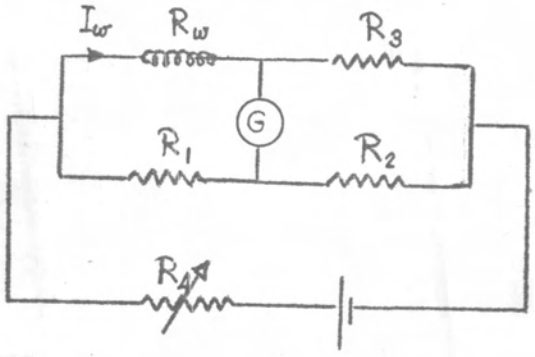
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายท่อปีตอต-สแตติกที่สร้างขึ้น

4.5 แอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อน[6] (hot - wire anemometer)

แอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อนนี้เป็นแอนิโมมิเตอร์อีกแบบหนึ่งที่ใช้วัดอัตราเร็วของลมที่มีค่าไม่มากนัก โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อนำเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางในทางเดินของลม อันจะเป็นผลให้เส้นลวดนั้นเย็นลงทำให้ความต้านทานของเส้นลวดเปลี่ยนไป ลวดที่ใช้ต้องเป็นลวดขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 - 0.5 cm ต่อในวงจรวีตสโตน บริดจ์ (Wheatstone bridge circuit) ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงเส้นลวดร้อนในวงจรวีตสโตนบริดจ์

แอโนมิเตอร์เส้นลวดร้อนที่ใช้กันมี 2 แบบคือ วงจรแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (constant-voltage circuit) และวงจรแบบความต้านทานคงที่ (constant-resistance circuit) ทั้ง 2 แบบจะใช้หลักการเหมือนกันจะต่างกันเฉพาะวิธีการทำเท่านั้น ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะแบบความต้านทานคงที่ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด วิธีนี้จะรักษาอุณหภูมิของเส้นลวดร้อนให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นผลให้ความต้านทานของเส้นลวดร้อนคงที่ตลอดเวลา ในตอนแรกจะให้มีกระแสไหลผ่านเส้นลวดร้อนค่าหนึ่ง และปรับให้วงจรบริดจ์สมดุลขณะไม่มีลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน ต่อมาให้กระแสลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน อันจะเป็นผลให้อุณหภูมิของเส้นลวดร้อนลดลง นั่นคือความต้านทานของเส้นลวดร้อนจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้วงจรบริดจ์เสียสมดุล และจะทำให้วงจรบริดจ์สมดุลอีกครั้งหนึ่งโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวดร้อน นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดร้อนใหม่นี้ไปหาค่าอัตราเร็วลมที่พัดเส้นลวดร้อนจากกราฟเทียบค่า (calibration curve)

ให้ I_w เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดร้อน แล้วทำให้วงจรบริดจ์สมดุลเมื่อมีลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน

R_w เป็นความต้านทานของเส้นลวดร้อน ซึ่งจะคงที่ตลอดเวลา

อัตราการเกิดความร้อนบนเส้นลวดร้อน = $I_w^2 R_w$ (4.15)

เมื่อมีลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน และจัดให้วงจรบริดจ์สมดุลจะได้ อัตราการเกิดความร้อนบนเส้นลวดร้อนเท่ากับอัตราการส่งผ่านความร้อนระหว่างเส้นลวดร้อนกับกระแสลม

จากสมการของคิง[7] (King's equation) จะได้อัตราการส่งผ่านความร้อนขณะวงจรบริดจ์สมดุลมีค่า

$$Q = (a + b\sqrt{v})(T_w - T_f) \tag{4.16}$$

Q เป็นอัตราการส่งผ่านความร้อน

v เป็นอัตราเร็วของลมที่พัดผ่านเส้นลวดร้อน

T_w เป็นอุณหภูมิของเส้นลวดร้อนขณะมีกระแสไฟฟ้า I_w ไหลผ่าน

T_f เป็นอุณหภูมิของกระแสลม , a และ b เป็นค่าคงที่

$$I_w^2 R_w = (a + b\sqrt{v})(T_w - T_f) \tag{4.17}$$

$$I_w^2 R_w = \frac{(a + b\sqrt{v})(T_w - T_f)}{R_w} \tag{4.18}$$

(4.18) อาจเขียนเป็น

$$I_w^2 = A + B\sqrt{v} \tag{4.19}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่าง I_w^2 กับ $\sqrt{v}$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 4.9 (ก)

จาก (4.17) สามารถเขียนได้อีกแบบหนึ่งว่า

$$\frac{V_w^2}{R_w} = (a + b\sqrt{v})\ (T_w - T_f) \tag{4.20}$$

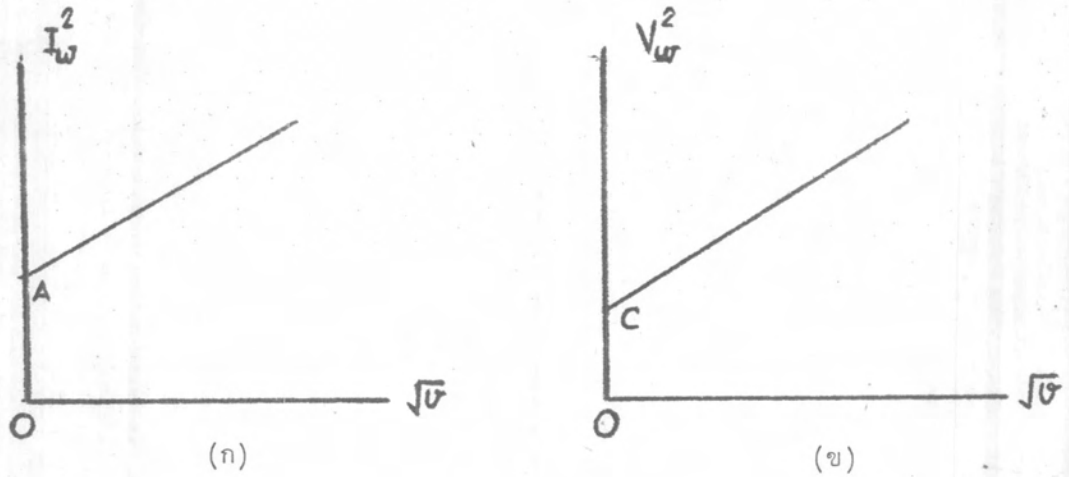
เมื่อ V_w เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมเส้นลวดร้อนขณะมีกระแส I_w ไหลผ่าน

$$V_w^2 = R_w (a + b\sqrt{v})(T_w - T_f) \qquad (4.21)$$

(4.21) อาจเขียนเป็น

$$V_w^2 = C + D\sqrt{v} \qquad (4.22)$$

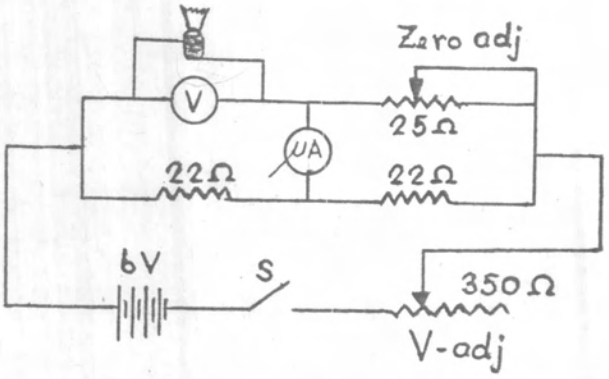
เมื่อ C และ D เป็นค่าคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่าง V_w^2 กับ $\sqrt{v}$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 4.9 (ข)



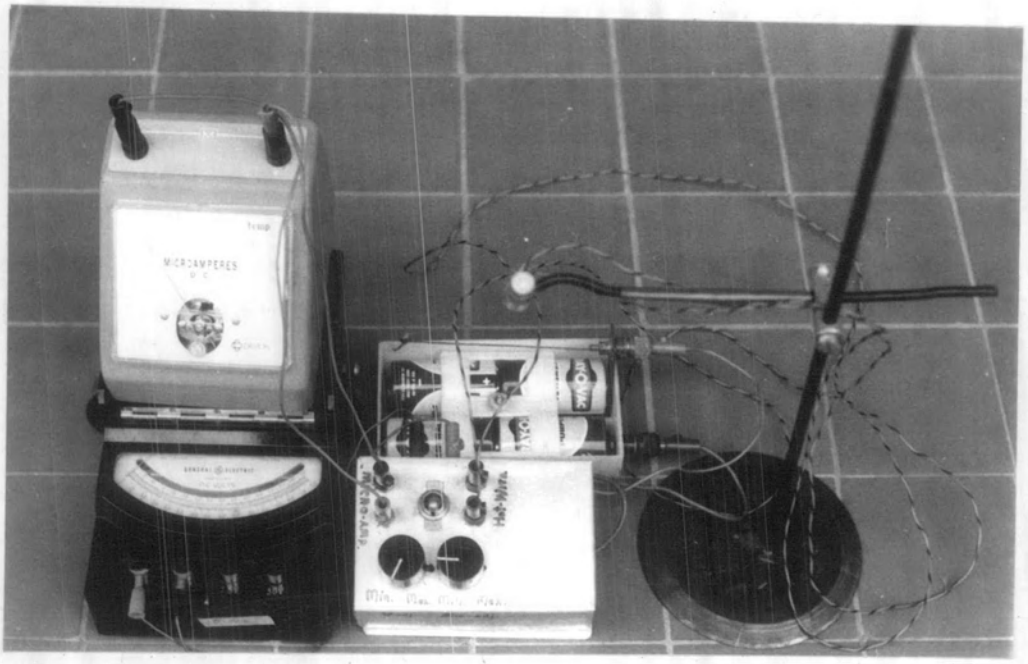
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟเทียบค่า (ก) ระหว่าง I_w^2 กับ $\sqrt{v}$
(ข) ระหว่าง V_w^2 กับ $\sqrt{v}$

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายเส้นลวดร้อนที่ทำจากไส้หลอดไฟฉาย

ในการสร้างแอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อนอย่างง่าย ๆ จะใช้เส้นลวดทังสเตน (tungsten) จากหลอดไฟฉาย 2.2 โวลต์ โดยการทุบเอาแก้วที่ครอบออก แล้วใช้เทียนไขอุดช่องว่างที่โคนไส้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอากาศหมุนวนขณะให้ลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน ดังรูปที่ 4.10 สำหรับวงจรที่ใช้จะเป็นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรสร้างแอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อนอย่างง่ายแบบความต้านทานคงที่



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายแอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อนที่สร้างขึ้น

วิธีการใช้แอนิโมมิเตอร์เส้นลวดร้อนแบบความต้านทานคงที่ที่สร้างขึ้นดังวงจร รูปที่ 4.11 ก่อนเปิดสวิตช์ (switch) จะต้องบิดปุ่มปรับความต่างศักย์ (V-adj.) และปุ่มปรับศูนย์ (Zero adj.)ไปที่ขีดต่ำสุด (Min.) ก่อน เมื่อเปิดสวิตช์แล้วให้ปรับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเส้นลวดร้อน โดยอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ความต่างศักย์นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวบอกความไว (sensitivity) ของเส้นลวดร้อน คือถ้าความต่างศักย์ยิ่งมากความไวก็จะยิ่งมาก แต่ความต่างศักย์ที่ใช้จะต้องไม่มากกว่า 1.0 โวลต์ เพราะจะทำให้เส้นลวดร้อนขาด เมื่อปรับความไวตามที่ต้องการได้แล้วก็ปรับศูนย์ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านกัลวาโนมิเตอร์เป็นศูนย์ คือทำให้วงจรบริดจ์สมดุล วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นจะต้องกระทำเมื่อไม่มีลมพัดผ่านเส้นลวดร้อน เมื่อต้องการจะวัดอัตราเร็วลม ก็นำเส้นลวดร้อนซึ่งปรับไว้แล้วข้างต้นไปวางให้ลมพัดผ่านตั้งฉากกับความยาวของเส้นลวดร้อน ซึ่งขณะนี้วงจรบริดจ์จะเสียสมดุล จะต้องทำให้วงจรบริดจ์สมดุล

อีกครั้งโดยการเพิ่มความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเส้นลวดร้อนให้มากขึ้นที่ปุ่มปรับความต่างศักย์เท่านั้น เมื่อปรับความต่างศักย์จนวงจรบริดจ์สมดุลได้แล้ว ก็นำค่าความต่างศักย์ครั้งหลังนี้ไปหาอัตราเร็วลมได้จากกราฟเทียบค่าซึ่งเป็นกราฟระหว่าง V_w^2 กับ $\sqrt{v}$