

การวัดความเร็วของอากาศโดยใช้เทอร์มิสเตอร์ Air Velocity Measurement Using Thermistor

สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทร. 0-2549-3430 , โทรสาร 0-2549-3432 , E-mail : siripong@rit.ac.th

Siripong Eamchaimongkol

Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering , Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Klonghok Thanyaburi Phatumthani 12110

Tel : 0-2549-3430 , Fax 0-2549-3432 , E-mail : siripong@rit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์นำเอาเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำมาใช้ในการวัดความเร็วของอากาศ โดยอาศัยหลักการพาความร้อน (heat convection) เช่นเดียวกันกับวิธีการวัดความเร็วของอากาศแบบลวดความร้อน (hot wire anemometer) ทั้งนี้เนื่องจากเทอร์มิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย ราคาถูก และมีความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับลวดความร้อน อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความเร็วของของไหลชนิดอื่นได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC (negative temperature coefficient) เพื่อใช้เป็นตัวรับรู้ (sensor) โดยให้วงจรทำงานแบบอุณหภูมิคงที่ (constant temperature) ผลการทดลองพบว่าเครื่องวัดความเร็วอากาศที่ทดลองสามารถวัดความเร็วของอากาศได้ในช่วงระหว่าง 1 m/s ถึง 10 m/s ที่อุณหภูมิ 25 °C , 27 °C และ 29 °C โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ของช่วงการวัด และมีการตอบสนอง(response)ที่ไว หากแต่การวัดด้วยวิธีดังกล่าวอุณหภูมิของอากาศจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อการวัดเป็นอย่างมาก

คำสำคัญ : เทอร์มิสเตอร์ การวัดความเร็วของอากาศ เครื่องวัดความเร็วอากาศแบบลวดความร้อน

Abstract

The objective of this paper was to study the feasibility of the application of thermistor in measuring air flow . The principle of measuring based on the heat convection principle that was the same principle as hot wire anemometer . Because thermistor was much cheaper , more durable , higher sensitivity than hot wire sensor and also can be applied to measure other fluid flow .Thus , the NTC

(negative temperature coefficient) was used as the sensor by operated in the constant temperature mode . The results were shown that the flow meter can measure the air flow in the range of 1 m/s to 10 m/s at the temperature of 25 °C , 27 °C and 29 °C , respectively . The error of the flow meter was less than 4 percent of measurable range with fast response.

However , The flow meter is strongly depend upon the fluid temperature .

Keywords : thermistor , air flow measurement ,hot wire anemometer .

บทนำ

ในการวัดความเร็วของอากาศนั้นมีเครื่องมือวัดอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่นเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศแบบใบพัด (vane anemometer) หรือเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศแบบอาศัยหลักการพาความร้อน (thermal anemometer) อันได้แก่เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศแบบลวดความร้อน (hot wire anemometer) ซึ่งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทนั้นมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน และช่วงการวัด สำหรับเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศแบบลวดความร้อนนั้นมีข้อดีคือ มีความไว (sensitivity) สูง และมีผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) ที่ไว จึงเหมาะที่จะนำไปใช้วัดความเร็วของอากาศที่การไหลที่ความเร็วต่ำ ๆ และต้องการผลตอบสนองแบบทันที (instantaneous) หากแต่เครื่องมือวัดดังกล่าวมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่น ลวดความร้อนที่ใช้มีขนาดเล็ก ทำให้ชำรุดง่ายหากนำไปใช้วัดอากาศที่มีอนุภาค (particle) เจือปนอยู่ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือเมื่อต้องการใช้วัดความเร็วของอากาศที่มีค่าต่ำ ๆ นั้น จำเป็นที่จะต้องให้อุณหภูมิของ

ลวดความร้อนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศมากพอสมควร ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วของก๊าซบางชนิดที่สามารถที่จะติดไฟได้ง่าย เช่นการวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าสู่เครื่องยนต์ในเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนอาจไม่เหมาะสมเพราะอาจทำให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนี้เครื่องวัดความเร็วของอากาศแบบลวดความร้อนนั้นยังมีราคาที่สูง และยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดของไหลชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นนำเอาเทอร์มิสเตอร์มาใช้ในการวัดความเร็วของของไหลเช่น การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล [1] หรือการนำเอาเทอร์มิสเตอร์มาใช้ในการวัดความเร็วของอากาศ [2] , [3] โดยใช้เทอร์มิสเตอร์ขนาดเล็กและใช้การประมวลผลแบบ pulse width modulate (PWM) มาช่วยในการประมวลผลสัญญาณซึ่งใช้ได้ผลดี หากแต่เทอร์มิสเตอร์ดังกล่าวค่อนข้างหาได้ยากในท้องตลาดเนื่องจากมีขนาดเล็ก และใช้การประมวลผลสัญญาณที่ซับซ้อน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำเอาเทอร์มิสเตอร์ธรรมดาที่มีขายอยู่ในท้องตลาดซึ่งมีราคาไม่แพงมาใช้เป็นตัวรับรู้ (sensor) แทนตัวรับรู้แบบลวดความร้อน และใช้วงจรขยายสัญญาณ (differential amplifier) ในการประมวลผลสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการวัดความเร็วของอากาศหรือของไหลชนิดอื่นที่มีการไหลน้อย ๆ เช่นกัน

หลักการของการวัดความเร็วของอากาศโดยใช้เทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์คือสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งซึ่งมีความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แบ่งออกเป็นสองชนิดคือชนิดที่ความต้านทานเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม หรือ PTC (positive temperature coefficient) และชนิดที่ความต้านทานลดเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม หรือ NTC (negative temperature coefficient) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1 [4]

$$R = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

โดยที่ R คือความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิใด ๆ มีหน่วยเป็น Ω , R_0 คือความต้านทานที่อุณหภูมิที่จุดอ้างอิงมีหน่วยเป็น Ω , T คืออุณหภูมิใด ๆ มีหน่วยเป็น K (Kelvin) , T_0 คืออุณหภูมิที่จุดอ้างอิง มีหน่วยเป็น K และ β คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์ มีหน่วยเป็น K เช่นกัน จากสมการที่ 1 หากเปรียบเทียบกับสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน กับอุณหภูมิของลวดความร้อนซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2 [5]

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad (2)$$

จะเห็นว่าสมการทั้งสองมีความแตกต่างกัน กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์นั้นค่อนข้างที่จะมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) สูงซึ่งเป็นข้อเสียประการหนึ่งของ

เทอร์มิสเตอร์ โดยความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 นั้นสามารถที่จะหาได้จากการทดลองซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

สำหรับทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเครื่องวัดความเร็วของอากาศโดยใช้เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวรับรู้ นั้น จะอาศัยหลักการของการพาความร้อนเช่นเดียวกันกับเครื่องวัดความเร็วของอากาศแบบลวดความร้อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรไฟฟ้าทำงานแบบอุณหภูมิคงที่ (constant temperature) เพื่อรักษาอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ให้คงที่ตลอดเวลา เมื่อของไหลซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ไหลผ่าน ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกพาไปจากเทอร์มิสเตอร์ โดยอาศัยหลักการสมดุลทางความร้อน สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3 [5]

$$\frac{dE}{dt} = P - Q \quad (3)$$

โดยที่ E คือความร้อนสะสมในตัวของเทอร์มิสเตอร์ , P คืออัตราความร้อนที่ตัวเทอร์มิสเตอร์ได้จากวงจร , Q คืออัตราความร้อนที่ถูกของไหลที่มากกระทบพาไป หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังสมการที่ 4

$$\frac{d(c_t T_t)}{dt} = I^2 R_t - hA(T_t - T_f) \quad (4)$$

โดยที่ c_t คือค่าความจุความร้อนของเทอร์มิสเตอร์ , I คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าสู่ตัวเทอร์มิสเตอร์เพื่อให้เทอร์มิสเตอร์มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ R_t คือความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ , T_t คืออุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ , T_f คืออุณหภูมิของของไหลที่กระทบกับเทอร์มิสเตอร์ , A คือพื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลผ่าน และ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็ว และอุณหภูมิของของไหลที่มากกระทบหรือ $h(v, T_f)$ จากสมการที่ 4 หากต้องการให้เทอร์มิสเตอร์ทำงานแบบอุณหภูมิคงที่ และสมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนของเทอร์มิสเตอร์ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 5 ซึ่งสมการนี้จะใช้

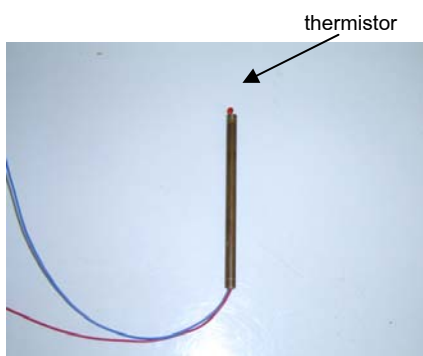
$$I^2 R_t = h(v, T_f) A(T_t - T_f) \quad (5)$$

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าแบบอุณหภูมิคงที่ภายใต้สมมติฐานดังนี้คือ

- สมมติคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์มีค่าคงที่
- สมมติให้การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน (heat radiation) และการนำความร้อน (heat conduction) ของเทอร์มิสเตอร์สู่โพรบมีค่าน้อยมาก
- สมมติให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์มีค่าเท่ากันตลอด และอุณหภูมิของของไหลที่มากกระทบเทอร์มิสเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากันตลอดเช่นกัน

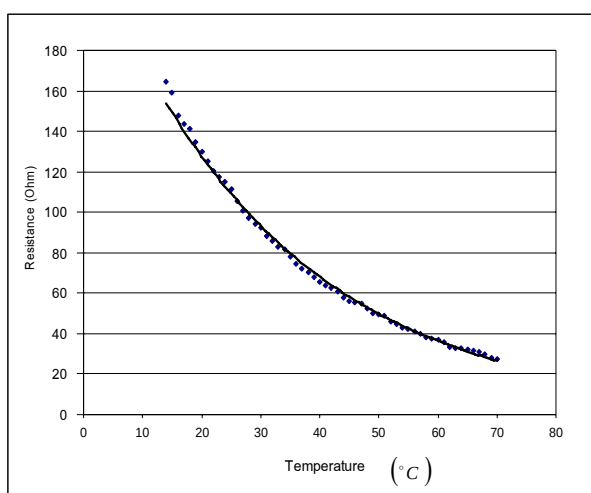
การออกแบบวงจรและวิธีการทดลอง

สำหรับเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้เทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC ซึ่งรูปร่างเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ติดเข้ากับโพรบและต่อสายสัญญาณเข้าสู่วงจรต่อไปดังแสดงในรูปที่ 1 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์



รูปที่ 1 แสดงเทอร์มิสเตอร์เมื่อติดอยู่กับโพรบ

จากการทดลองพบว่า เป็นไปตามกราฟดังแสดงในกราฟรูปที่ 2 ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์เช่น

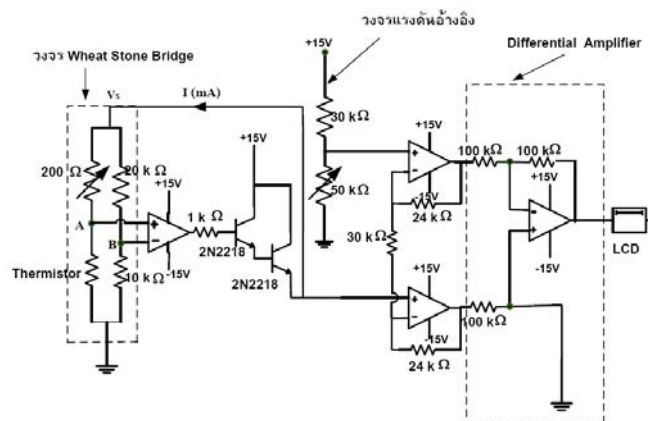


รูปที่ 2 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน กับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์

เดียวกันกับสมการที่ 1 โดยให้อุณหภูมิที่จุดอ้างอิงที่ 25 °C หรือที่ 298.15 K ได้ดังสมการที่ 6

$$R = 110 \exp \left[3180 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (6)$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ 6 นี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3



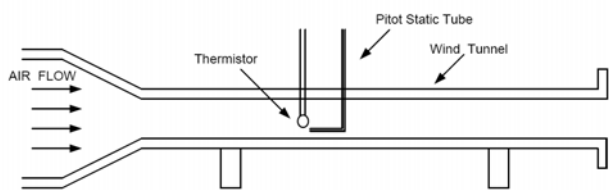
รูปที่ 3 วงจรควบคุมอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ให้คงที่

วงจรในรูปที่ 3 จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ 1 ส่วนที่เป็นวงจรเพื่อรักษาอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ให้คงที่ โดยการนำเทอร์มิสเตอร์ผ่านวงจรวีธสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge) เพื่อให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์มีค่าสูงกว่าของไหลที่ต้องการวัดเล็กน้อยคือ จะอยู่ที่ประมาณ 31 °C ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้เข้าสู่ตัวเทอร์มิสเตอร์ และจากกราฟรูปที่ 2 ความต้านทานที่อุณหภูมิดังกล่าวจะอยู่ที่ประมาณ 90 Ω เทอร์มิสเตอร์จึงจะถูกควบคุมให้อุณหภูมิคงที่คือ 31 °C หรือ 90 Ω ตลอดเวลา ดังนั้นหากของไหลไหลผ่านเทอร์มิสเตอร์ของไหลนั้นจะพาเอาความร้อนไปส่วนหนึ่ง ทำให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ลดลง และส่งผลทำให้เทอร์มิสเตอร์มีความต้านทานเพิ่มขึ้น บริดจ์จะอยู่ในสภาวะไม่สมดุล และเกิดความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ จุด B ขึ้น ความต่างศักย์นี้จะผ่านเข้าสู่ วงจรขยายเชิงดำเนินการ (operation amplifier) เพื่อส่งสัญญาณไปยังทรานซิสเตอร์ซึ่งต่อกันแบบดาร์ลิงตัน(Darlington) ส่งกระแสไปยังเทอร์มิสเตอร์ให้เทอร์มิสเตอร์มีความร้อนเพิ่มมากขึ้น จากหลักการดังกล่าว จะเห็นว่าหากของไหลที่มากกระทบนั้นมีความเร็วมาก กระแสไฟฟ้า I ที่ออกจากทรานซิสเตอร์เพื่อไปยังเทอร์มิสเตอร์จะมากตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เทอร์มิสเตอร์ หรือศักย์ไฟฟ้าที่จุด V_s ก็จะสามารถวัดความเร็วของอากาศที่มากกระทบได้

สำหรับวงจรในส่วนที่สองนั้นคือวงจรขยายสัญญาณ (differential amplifier) วงจรนี้จะทำหน้าที่ขยายขนาดความแตกต่างของสัญญาณที่ได้จากวงจรรักษาอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ เทียบกับแรงดันอ้างอิง ซึ่งทำหน้าที่เหมือนการปรับค่าศูนย์ (adjust zero) ในเครื่องมือวัดทั่วไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการขยายสัญญาณที่ได้ให้มีค่าสูงพอที่จะอ่านได้จากหน้าจอแสดงผลต่อไป

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเทอร์มิสเตอร์นั้นจะใช้อุโมงค์ลม (wind tunnel) ขนาดเล็ก และวัดความเร็วลมด้วยไปทอ สแตติกทิวบ์ (pitot static tube) ซึ่งจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับโพรบของเทอร์มิสเตอร์

ดังแสดงในรูปที่ 4 ความแตกต่างของความดันของไบโทท สเตติกทิวบ์สามารถอ่านได้จากมาโนมิเตอร์แบบเอียง (incline manometer)

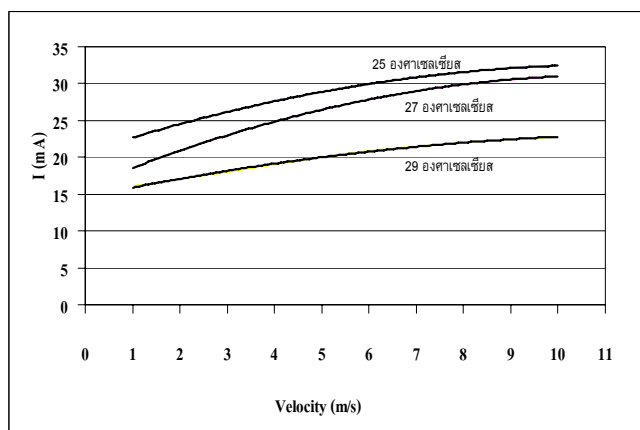


รูปที่ 4 แผนภาพแสดงวิธีการทดลอง

จากสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นนอกจากจะขึ้นกับความเร็วของของไหลที่มากระทบแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของอากาศ โดยการทดลองนี้จะควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านเข้าอุโมงค์ที่อุณหภูมิ 25°C , 27°C และ 29°C ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่าช่วงความเร็วของอากาศที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1 m/s ถึง 10 m/s และมีการตอบสนองที่ไวโดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เทอร์มิสเตอร์นั้นแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เทอร์มิสเตอร์

จากกราฟรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับเทอร์มิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศ โดยเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่วงจรจะต้องป้อนให้กับเทอร์มิสเตอร์จะต้องมากขึ้นด้วย โดยจะอยู่ในช่วงระหว่าง 15 mA ถึง 35 mA ที่ช่วงความเร็วของอากาศระหว่าง 1 m/s ถึง 10 m/s นอกจากนั้นยังพบว่าอุณหภูมิของอากาศนั้นมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เทอร์มิสเตอร์ด้วย กล่าวคือที่ความเร็วของอากาศเดียวกัน อุณหภูมิของอากาศที่มีค่าน้อยเช่นที่

25°C จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เทอร์มิสเตอร์มีอุณหภูมิคงที่มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิ 27°C และ 29°C ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วของอากาศและอุณหภูมิของของไหล

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการฟลูปที่ 5 กับงานวิจัยการวัดอัตราการไหลโดยใช้เทอร์มิสเตอร์ [2],[3] ซึ่งเป็นการวัดความเร็วของอากาศโดยใช้เทอร์มิสเตอร์เช่นกัน พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ความเร็วของอากาศเดียวกันอุณหภูมิของอากาศที่มีค่าน้อยจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้เทอร์มิสเตอร์มีอุณหภูมิคงที่มากกว่าที่อุณหภูมิสูง หากแต่อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องให้สูงกว่าอุณหภูมิของของไหลมาก คืออุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์จะอยู่ที่ประมาณ 31°C เท่านั้นซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วงจรขยายสัญญาณ (differential amplifier) ที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) ได้ดีทำให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนมากพอที่จะประมวลผลได้โดยไม่ต้องให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์สูงมากสำหรับความถูกต้อง (accuracy) ของเครื่องมือวัดนั้นจากการทดลองพบว่าเครื่องมือวัดดังกล่าวมีความผิดพลาดไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ในช่วงการวัดอีกทั้งยังมีค่าความไว (sensitivity) ที่สูงด้วย และด้วยข้อดีนี้เองจึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์กับการไหลชนิดอื่นโดยเฉพาะของไหลที่ติดไฟได้ง่าย ดังเช่นงานวิจัยการวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่าวิธีการวัดความเร็วของอากาศมีข้อดีในแง่ของความไว (sensitivity) ซึ่งเกิดจากการขยายสัญญาณ มีการตอบสนองที่ไว ตัวรับรู้คือเทอร์มิสเตอร์มีความคงทนต่ออากาศที่อาจมีอนุภาคเจือปนอยู่ และที่สำคัญคือมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับตัวรับรู้แบบลวดความร้อน และหากพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้วัดกับของเหลวชนิดอื่น เช่น น้ำ หรือน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีอัตราการไหลน้อย ๆ นั้นจึงมีความเป็นไปได้ นอกจากนี้วิธีการวัดดังกล่าวยังมีประโยชน์ต่อระบบกระบวนการควบคุมที่ต้องการสัญญาณจากเครื่องวัดอัตราการไหลเพื่อไปใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับในระบบ การควบคุมได้อีกด้วย สำหรับวิธีการวัดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิของของไหลที่วัด เนื่องจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการวัดอันจะส่งผลต่อความผิดพลาดของการวัดได้เช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.W. Baier , and K.F. Bonnet , “ PTC – Resistor Probe for the Measurement of the Instantaneous Fuel Consumption in Motor Vehicles “ , Flow Measurement of Fluids , H.H.Dijatebergen , E.A. Speacer , 1978 , pp. 455-459 .
- [2] Ken Okamoto , Tadahiko Ohhashi , Masahiro Asakura , and Kenzo Watanabe, Fellow , IEEE , “A Digital Anemometer “ , IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement , Vol. 43 ,No. 2 ,APRIL 1994.

- [3] Hiroyuki Fujita , Tadahiko Ohhashi , Masahiro Asakura ,
Mitsushiro Yamada ,and Kenzo Watanabe , Fellow , IEEE ,
“A Thermistor Anemometer for Low-Flow-Rate Measurements “,
IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements ,Vol. 44,
No.3 , JUNE 1995 , pp. 779-782 .
- [4] Thomas G.Beckwith , Roy D. Marangoni , and John H.
Lienhard V *Mechanical Measurements* Addison – Wesley ,
1995 , pp.673.
- [5] P.C.Stainack and K.A Nagabushana , “Review of Hot-Wire
Anemometry Techniques and the Range of Their Applicability
for Various Flows “, Electronic Journal of Fluids Engineering,
Transactions of the ASME.