

การประยุกต์ใช้หัววัดอาร์ทีดีสำหรับวัดอัตราการไหล

THE APPLICATION OF RTD SENSOR FOR FLOW RATE MEASUREMENT

สุรัชชัย ไจวรรณะ

โปรแกรมวิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

เดช ดำรงค์ศักดิ์

ณัฐ วรยศ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศในท่อที่มีการไหลภายในแบบไม่อัดตัว หัววัดที่สร้างขึ้นประกอบด้วยหัววัดอาร์ทีดีและฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลักการของเครื่องวัดความเร็วการไหลแบบลวดความร้อน ชนิดกระแสคงที่ สามารถประมวลผลและแสดงผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งหัววัดที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอน ค่าปรับแก้ และช่วงความเร็วที่วัดได้ จากผลการสร้างและทดสอบ หัววัดพบว่าหัววัดที่ 1 มีช่วงวัดความเร็วการไหล 0 m/s ถึง 7.82 m/s ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $+50^{\circ}\text{C}$ และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของความเร็ว $\pm 7.60\%$ หัววัดที่ 2 มีช่วงวัดความเร็วการไหล 0 m/s ถึง 8.02 m/s ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $+50^{\circ}\text{C}$ และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของความเร็ว $\pm 6.01\%$ หัววัดที่ 3 มีช่วงวัดความเร็วการไหล 0 m/s ถึง 8.36 m/s ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $+50^{\circ}\text{C}$ และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของความเร็ว $\pm 5.40\%$ เมื่อนำหัววัดทั้งสามหัววัดไปทดสอบวัดค่าอัตราการไหลในอุโมงค์ลม ค่าอัตราการไหลที่คำนวณได้จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด $\pm 7.13\%$

Abstract

The objective of this thesis is to construct the air flow meter for incompressible fluid flow in duct. The computer based measuring device is assembled from RTD and heater using the principle of the constant current hot wire anemometer. All constructed transducers are put to the test to analyze the uncertainty, correction factor and the range of measured velocity. From the experiments, it is found that the first transducer has the range of measuring air flow velocity from 0 m/s to 7.82 m/s and the working temperature from -20°C to 50°C . Its maximum error is $\pm 7.60\%$. The second one has the range of measuring air flow velocity from 0 m/s to 8.02 m/s and the working temperature from -20°C to 50°C . Its maximum error is $\pm 6.01\%$. The last one has the range of measuring air flow velocity from 0 m/s to 8.36 m/s and the working temperature from -20°C to 50°C . Its maximum error is $\pm 5.40\%$. With the use of all three flow meters together for the flow rate measurement in the wind tunnel, it is found that the measured flow rate has the overall maximum error within $\pm 7.13\%$.

1. บทนำ

ในงานอุตสาหกรรมหรือในงานที่มีอากาศหรือก๊าซ เป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิต การควบคุมและการตรวจสอบการไหลเป็นสิ่งสำคัญที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ซึ่งตัวแปรต่างๆในกระบวนการผลิต จะสัมพันธ์กับการไหลเกือบทั้งสิ้น นอกจากนี้จะส่งผลโดยตรงกับ การเลือกขนาดอุปกรณ์ในระบบเช่น วาล์วควบคุม แดมเปอร์ และอื่นๆ การควบคุมอัตราการไหลใน

ระบบ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการอย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงจำเป็นต้องมีระบบการวัด การตรวจสอบที่ดี ในปัจจุบันวิธีการและเครื่องมือวัดการไหลมีหลายชนิด และแต่ละวิธีก็จะมีหลักการที่แตกต่างกันออกไป แต่ส่วนใหญ่ไม่เป็นการวัดการไหลโดยตรงแต่จะวัดหาความเร็วของการไหล แล้วคำนวณออกมาเป็น อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume Flow Rate) เช่น วิธีการหาค่าความดันแตกต่าง อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัดที่สามารถวัดปริมาตร

ได้โดย ตรงก็มีใช้คือ แบบใช้การแทนที่ (Positive Displacement Method) [3] ซึ่งค่าความเร็วเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลจากสมการ

$$Q = \int_{Area} u dA \quad \text{หรือ} \quad Q = \bar{V} A \quad (1)$$

เมื่อ

Q	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร
u	คือ ความเร็วย่อย ณ พื้นที่ใดๆ
\bar{V}	คือ ความเร็วเฉลี่ย
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ตามสมการที่กล่าวมาข้างต้น จะต้องมีการวัดหาค่าความเร็วย่อย (u) หลายๆจุดตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อแล้วนำมาหาค่าความเร็วเฉลี่ย (\bar{V}) ซึ่งความเร็วย่อยนี้จะต้องเป็นความเร็วย่อย ณ เวลาเดียวกัน แต่จากเครื่องมือวัดที่กล่าวมาทั้งหมดในขั้นต้น ส่วนใหญ่จะใช้วัดเพียงจุดเดียว หรือใช้วิธีย้ายตำแหน่งหัววัดทีละจุด ตลอดพื้นที่หน้าตัดท่อซึ่งทำให้ไม่สะดวก ถ้าหากอากาศหรือก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วฉับพลัน ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งการวัด ค่าที่ได้ในแต่ละตำแหน่งอาจเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง และการที่ไม่สามารถติดตั้งเครื่องวัดหลายตัวในการวัดหลายจุด ตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากเครื่องวัดมีราคาสูง และขนาดของหัววัดอาจสร้างการรบกวนต่อการไหลได้

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการวัดความเร็วการไหลและอัตราการไหลแบบลวดความร้อนดังนี้ Laghouche et al. (2004) [7] ได้ศึกษาการใช้ ลวดความร้อนซิลิคอน ในการวัดความเร็วลมโดยสร้างหัววัดจากการเติมโพลีคริสตอลไลน์ลงในชั้นของซิลิคอน โดยใช้เทคนิคอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Electromechanical) สามารถทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้พลังงาน 10 mW เมื่อเทียบกับลวดความร้อนที่มาจากแพลทตินัม การวัดการทดลองนี้เป็นแบบกระแสคงที่ Al – salaymeh et al. (2003) [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำลวดความร้อน 3 เส้น มาใช้วัดความเร็วของการไหลแบบสองทิศทางโดยนำไปประยุกต์ใช้ในวงการแพทย์ ตรวจการหายใจของคนและสัตว์ Viswanathan et al. (2002) [9] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลเชิงมวลความร้อน (Thermal Mass Flow Meter) สำหรับก๊าซที่มีความดันสูงแบบเสถียร วิเคราะห์และประมวลผลด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ เครื่องแรกมีช่วงวัด 90 กรัมต่อวินาที และเครื่องที่สองมีช่วงวัด 15 กรัมต่อวินาที โดยทำงานที่ความดัน 18 บาร์และ 19.5 บาร์ตามลำดับ Castaner et al. (1997) [5] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำที่มีต้นทุนการสร้างต่ำ ซึ่งเครื่องนี้ใช้หลักการของการวัดอัตราการไหลแบบลวดความร้อนโดยหัววัดที่จากสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ใช้เทคโนโลยีซิลิคอนไบโพลาร์ Otakane et al. (2003) [8] ศึกษาข้อ

ได้เปรียบของเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบความร้อน (Thermal Flow Meter) ในการวัดก๊าซ เพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอื่น ๆ ที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่น

จากที่กล่าวมาข้างต้น หลักการของการวัดอัตราการไหลแบบลวดความร้อนเริ่มมีใช้กันเพิ่มมากขึ้นและมีข้อดีหลายประการ [8] ประกอบกับมีความเป็นไปได้ ที่จะใช้หลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัย ที่ต้องการเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่มีค่าความถูกต้องสูง หัววัดที่ติดตั้งนี้ต้องไม่รบกวนการไหลในท่อ ไม่ต้องขยับหรือเลื่อนหัววัดตลอดการวัด ราคาอุปกรณ์ที่ประกอบเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลต้องไม่แพง และสามารถบันทึกผลที่วัดได้ในคอมพิวเตอร์สะดวกในการเรียกดูข้อมูลซ้ำ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศหรือก๊าซในท่อ โดยใช้หลักการของเครื่องวัดความเร็วการไหลแบบลวดความร้อนชนิดกระแสคงที่ ซึ่งประยุกต์ใช้หัววัดอาร์ทีดีและฮีตเตอร์ประกอบร่วมกันแทนลวดความร้อนฮอตไวร์ หรือ ฟิล์มความร้อน ที่มีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และใช้โปรแกรมแล็บวิววิเคราะห์, ประมวลผล, เก็บข้อมูล ซึ่งโปรแกรมแล็บวิว สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างฮาร์ดแวร์ในการประมวลผลการวัด อีกทั้งโปรแกรมยังง่ายต่อการศึกษาและเขียนคำสั่งต่างๆ เพื่อให้ได้ผลของการวัดอัตราการไหลที่มีความถูกต้องสูง ในงานวิจัยนี้จะกำหนดตำแหน่งการวัดในท่อ 3 จุด เพื่อนำความเร็วย่อยแต่ละจุดมาคำนวณหาอัตราการไหล ซึ่งจะช่วยให้สะดวกในการวัดและลดข้อผิดพลาดเนื่องจากการที่ต้องเลื่อนตำแหน่งหัววัดทีละจุดเพื่อหาความเร็วย่อย หัววัดทั้งสามนี้จะไม่รบกวนการไหลของระบบ และมีราคาถูกกว่าหัววัดแบบลวดความร้อนฮอตไวร์

2. หลักการทำงานของเครื่องวัดความเร็วการไหลแบบลวดความร้อน

เมื่อป้อนกระแสไหลผ่านลวดความร้อน จะเกิดความร้อนค่าหนึ่งซึ่งคงที่ ในสภาวะสมดุล กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับลวดความร้อน จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convective Heat Transfer) สามารถเขียนสมมูลย์พลังงานของลวดความร้อนดังนี้

$$I^2 R_w = h \cdot A_w (T_w - T_f) \quad (2)$$

เมื่อ	I	คือ กระแสไฟฟ้า
	R_w	คือ ความต้านทานของฮอตไวร์
	T_w	คือ อุณหภูมิของ ฮอตไวร์
	T_f	คือ อุณหภูมิของไหล
	A_w	คือ พื้นที่ผิวของฮอตไวร์
	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของลวดความร้อน

พิจารณาความต้านทานของฮอตไวร์ (R_w) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังนี้

$$R_w = R_{ref} \{1 + \alpha (T_w - T_{ref})\} \quad (3)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานลวดความร้อน R_{ref} คือ ความต้านทานลวดความร้อน ณ อุณหภูมิอ้างอิง T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง

พิจารณาสมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) เป็นฟังก์ชันของความเร็วของไหล หรือเรียกว่า Kings Law จะได้

$$h = C_0 + C_1 \sqrt{V} \quad (4)$$

เมื่อ C_0, C_1 คือ Coefficient ที่ได้จากการคำนวณจาก สมการ (2) พิจารณาว่า h จะได้

$$h = \frac{I^2 R_w}{A_w (T_w - T_f)} \quad (5)$$

สมการ (4) = สมการ (5) จะได้

$$C_0 + C_1 \sqrt{V} = \frac{I^2 R_w}{A_w (T_w - T_f)} = \frac{I^2 R_{ref} [1 + \alpha (T_w - T_{ref})]}{A_w (T_w - T_f)} \therefore V = \left\{ \frac{\left[\frac{I^2 R_{ref} (1 + \alpha (T_w - T_{ref}))}{A_w (T_w - T_f)} \right] - C_0}{C_1} \right\}^2 \quad (6)$$

จากสมการ (6) เมื่อพิจารณาการวัดเป็นแบบกระแสจะได้ T_w และ T_f เป็นตัวแปรซึ่งสามารถหาได้จากการวัด ส่วนค่าอื่นถือเป็นค่าคงที่หาได้จากการทดลอง ดังนั้นฟังก์ชันจะถูกลดรูปตั้งสมการ (7)

$$f(V) = g(T_w, T_f)$$

(7)

3. ทฤษฎีการไหลภายในแบบไม่อัดตัว (Internal Incompressible Viscous Flow)

การไหลภายในแบบไม่อัดตัว จะมีสภาพการไหลแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งสภาวะการไหลทั้งสองแบบ จะมีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของไหล มิติตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดสภาวะการไหล คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynold's Number) [6] สามารถเขียนสมการดังนี้

$$R_{eD} = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$$

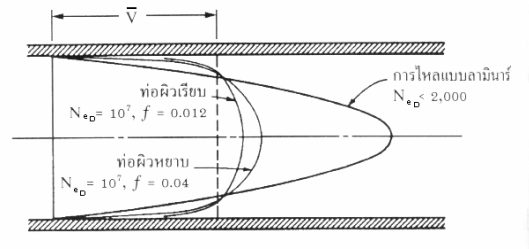
(8)

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของไหล

\bar{V} = ความเร็วเฉลี่ย,

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ,

μ = ความหนืดของไหล



รูปที่ 1 เส้นแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวการไหลแบบราบเรียบกับแบบปั่นป่วนเมื่อมีอัตราการไหลเท่ากัน[1]

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า การกระจายตัวการไหลของการไหลทั้งสองแบบต่างกัน สมการในการหา \bar{V} จึงต่างกันด้วย ดังนั้นการวัดความเร็วการไหลเพียงแค่จุดเดียวเพื่อนำมาหาค่า \bar{V} อาจได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง หรือเป็นเรื่องยุ่งยากที่จะต้องทราบ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ก่อนเพื่อจำแนกรูปแบบการไหลแล้วจึงหา \bar{V} เพราะต้องหาค่าตัวแปรเพิ่มอีกหลายตัว ดังนั้นการวัดความเร็วตำแหน่งต่างๆหลายจุด จึงมีความสำคัญในการวัดที่ได้ความถูกต้องของความเร็วเฉลี่ย เพื่อนำไปสู่การหาค่าอัตราการไหลที่ต้องต่อไป

4. การทดลองและวิเคราะห์การทดลอง

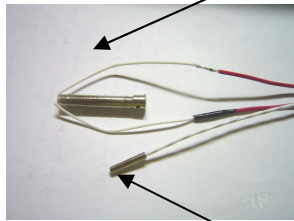
การที่ทำให้หัววัดสามารถนำไปวัดอัตราการไหลได้นั้น ชั้นแรกจะต้องสร้างและประกอบหัววัด ชั้นที่สองนำหัววัดที่ได้ไปทดลองหาค่าตัวแปรต่างๆของหัววัดซึ่งประกอบไปด้วยการทดลองหลายส่วนด้วยกัน ผลจากการทดลองค่าตัวแปรต่างๆถูกนำไปป้อนในโปรแกรมแล็บวิว เพื่อวิเคราะห์ แสดงผล บันทึกข้อมูล ชั้นที่สามนำหัววัดและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นมาทดลองวัดความเร็วการไหล จนขั้นสุดท้ายเป็นการทดสอบเครื่องมือวัดอัตราการไหลในอุโมงค์ลม อุปกรณ์และการทดลองสามารถอธิบายในสำคัญดังนี้

4.1 การสร้างและประกอบหัววัด

หัววัดที่ถูกสร้างขึ้นมาในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ อาร์ทีดีและฮีตเตอร์ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ ส่วนแรกฮีตเตอร์เป็นการประยุกต์นำลวดความร้อนของหัวแร้งบัดกรี ซึ่งทำมาจากลวดนิโครมขนาดพิคตแรนดั้น 220 โวลท์ 30 วัตต์ จำนวนสามตัว กลึงคว้านรูกลางของฮีตเตอร์ให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม. ส่วนที่สองหัววัดอาร์ทีดี PT100 แบบ 3 สาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ความยาวปลอก 25 มม. อุณหภูมิใช้งาน 0 ถึง 400°C ภาพฮีตเตอร์และหัววัดอาร์ทีดีก่อนประกอบเข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่

2 หลังจากนั้นนำหัววัดอาร์ทีดีและฮีตเตอร์สอดประกบติดเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3 จากนั้นนำไปทดลองหาตัวแปรต่างๆของหัววัด

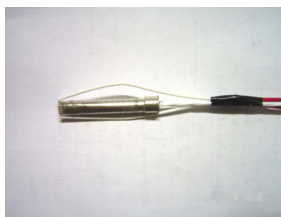
ฮีตเตอร์



หัววัด

อาร์ทีดี

รูปที่ 2 ฮีตเตอร์และอาร์ทีดี ก่อนประกอบเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3 ฮีตเตอร์และอาร์ทีดี หลังประกอบเข้าด้วยกัน

การทดลองหาตัวแปรต่างๆของหัววัดมีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบค่าตัวแปรต่างๆของหัววัด แต่ละตัว ผลการทดลองหาตัวแปรต่างๆของหัววัดแสดงดังตารางที่ 1 ตัวแปรต่างๆที่ได้นี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าในสมการที่ (2), (3), (5), (6) ต่อไป

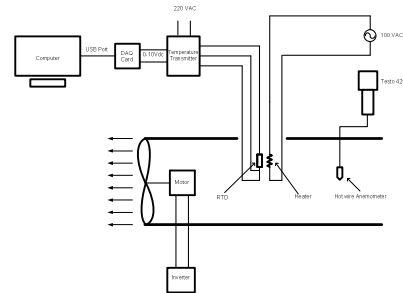
ตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองหาตัวแปรของหัววัด

รายการ	หัววัดที่ 1	หัววัดที่ 2	หัววัดที่ 3	หน่วย
I	0.120	0.110	0.116	Amp.
A_w	0.00207 9	0.00207 9	0.00207 9	Sq.m
α	0.0004	0.0004	0.0004	$\Omega/^\circ C$
T_{ref}	27.5	27.5	27.5	$^\circ C$
R_{ref}	800	880	842	Ω
Respond Time (max.)	10	10	10	Min.

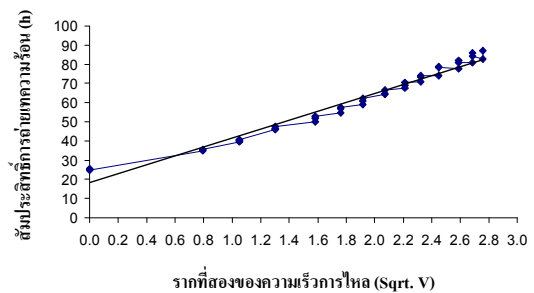
4.2 การทดลองหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัววัด

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ของหัววัดมีจุดประสงค์เพื่อ หาค่าคงที่ C_0 และ C_1 ซึ่งค่าคงที่ C_0 และ C_1 ที่ได้นี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความ เร็วการไหลตามสมการที่ (6) เริ่มการทดลองโดยต่ออุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 4 จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 โวลท์ให้กับหัววัด ปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ที่ค่าจาก 0 ถึง 63 เฮิร์ตซ์ เพิ่มขึ้นทีละ 10 เฮิร์ตซ์ วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของหัววัดจากโปรแกรม จากนั้นวัดและบันทึกค่าความเร็วลมจากเครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ

testo 425 ต่อไปคำนวณหาค่า h จากสมการที่ (4) ทำการทดลองครั้งละ 1 หัววัด หัววัดละ 3 ครั้ง นำค่า h และค่า \sqrt{V} ที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้งมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

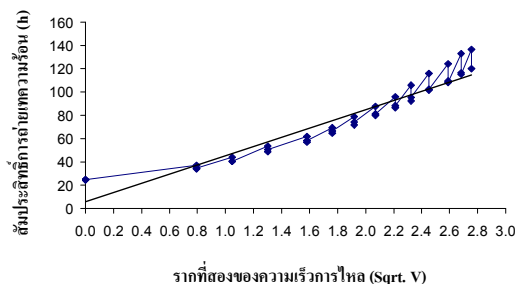


รูปที่ 4 การต่ออุปกรณ์ทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัววัด



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหล หัววัดที่ 1

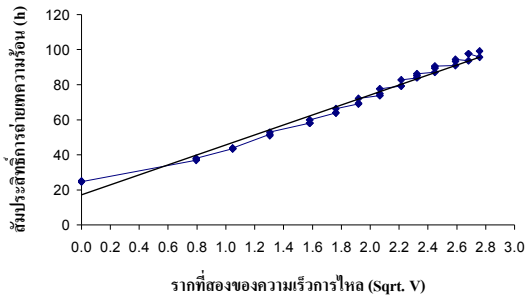
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหลหัววัดที่ 1 ได้สมการคณิตศาสตร์คือ $h = 18.423 + 23.141\sqrt{V}$ วิเคราะห์การถดถอยสมการเชิงเส้น $R^2 = 0.9703$ สมการที่ได้จะสัมพันธ์กับสมการ ที่ (4) จึงสรุปได้ว่าหัววัดที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ $C_0 = 18.423$ และสัมประสิทธิ์ $C_1 = 23.141$



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหล หัววัดที่ 2

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหลหัววัดที่ 2 ได้สมการคณิตศาสตร์คือ $h = 6.1397 + 39.412\sqrt{V}$ วิเคราะห์การถดถอยสมการเชิงเส้น $R^2 = 0.9111$ สมการที่ได้จะสัมพันธ์กับสมการ ที่

(4) จึงสรุปได้ว่าหัววัดที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ $C_0 = 6.1397$ และสัมประสิทธิ์ $C_1 = 39.412$



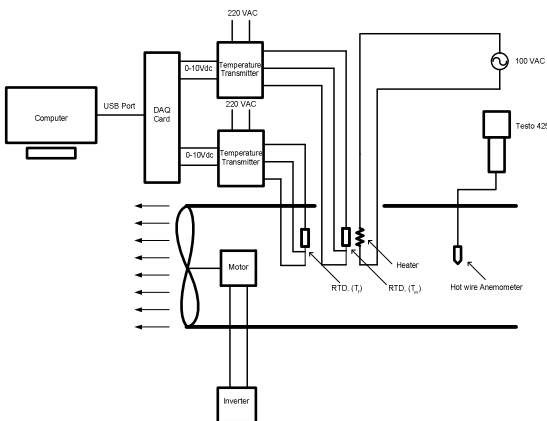
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่วงเท ความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหล หัววัดที่ 3

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่วงเท ความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหล หัววัดที่ 3 ได้สมการคณิตศาสตร์คือ $h = 17.208 + 28.513\sqrt{V}$ วิเคราะห์การถ่วงโดยสมการเชิงเส้น $R^2 = 0.9783$ สมการที่ได้จะสัมพันธ์กับสมการที่ (4) จึงสรุปได้ว่าหัววัดที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ $C_0 = 17.208$ และสัมประสิทธิ์ $C_1 = 28.513$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่วงเท ความร้อนกับรากที่สองของความเร็วการไหล ทั้งสามหัววัด มีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้นแต่ยังคงวิเคราะห์เป็นเชิงเส้นตามกฎของคิงส์ เนื่องจากที่ความเร็วการไหลสูงขึ้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดและความไม่แน่นอนสูงในการวัดสูงขึ้นไปนั้นกราฟสัมประสิทธิ์การถ่วงเทความร้อนกับจึงมีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้น

4.3 การทดลองวัดความเร็วการไหล ของหัววัด

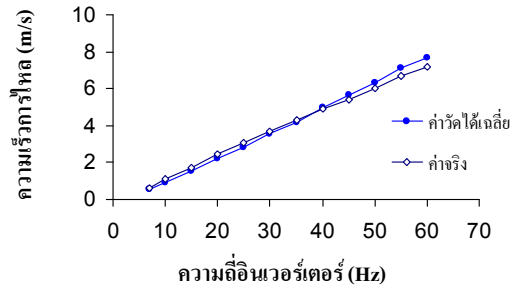
จุดประสงค์การทดลองวัดความเร็วการไหล เพื่อวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนของการวัด กำหนดช่วงการวัด และหาค่าปรับแก้ในการนำหัววัดแต่ละหัวมาทดลองวัดความเร็วการไหล



รูปที่ 8 การต่ออุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดความเร็วการไหลของหัววัด

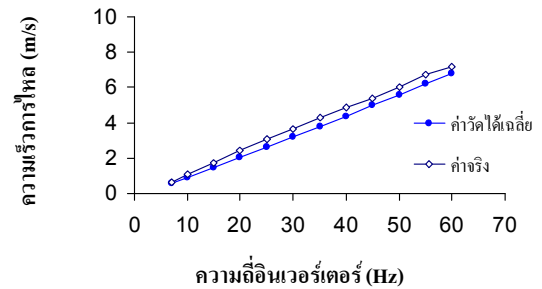
การทดลองเริ่มโดยต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 8 นำหัววัดติดตั้งในอุโมงค์ลมทดลองครั้งละ 1 ตัว ปรับความเร็วจากอินเวอร์เตอร์

เพิ่มขึ้นเป็นช่วงๆ วัดค่าความเร็วแต่ละช่วง จากนั้นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วการไหล มาตรฐานที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งแต่ละหัววัดทำการทดลอง 6 ครั้ง



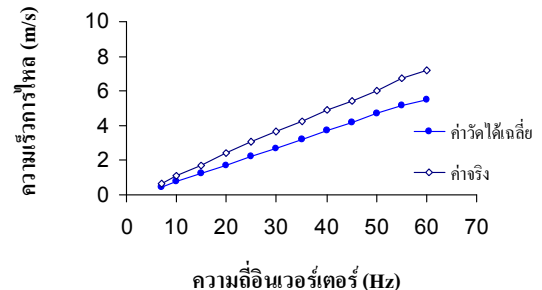
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบความเร็วจริงกับความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ย หัววัดที่ 1

ผลการทดลองวัดความเร็วการไหล หัววัดที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.8 สรุปได้ว่าค่าที่วัดได้มีการกระจายค่าไปจากค่าจริงเล็กน้อยโดยช่วง 0-3.68 m/s ค่าที่วัดได้ต่ำกว่าค่าจริง ช่วง 3.68-4.90 m/s ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าจริง และช่วง 4.90-7.20 m/s ค่าที่วัดได้สูงกว่าค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบความเร็วจริงกับความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ย หัววัดที่ 2

ผลการทดลองวัดความเร็วการไหล หัววัดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 10 สรุปได้ว่าค่าที่วัดได้มีการกระจายค่าไปจากค่าจริงเล็กน้อยโดยตลอดช่วง 0-7.20 m/s มีค่าต่ำกว่าค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญ



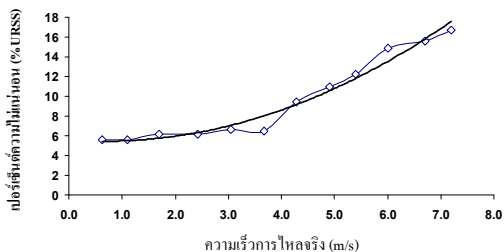
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความเร็วจริงกับความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ย หัววัดที่ 3

ผลการทดลองวัดความเร็วการไหล หัววัดที่ 3 แสดงดังรูปที่ 11 สรุปได้ว่าค่าที่วัดได้มีการกระจายค่าไปจากค่าจริงเล็กน้อยโดยตลอดช่วง 0-7.20 m/s มีค่าต่ำกว่าค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.1 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

จากการนำหัววัดทั้งสามตัวทดลองวัดความเร็วการไหล ผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์หาความไม่แน่นอนโดยใช้วิธีทางสถิติเข้ามาช่วย โดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความไม่แน่นอนของการวัด จะเกิดจากความไม่แน่นอนแบบระบบ กับความไม่แน่นอนแบบสุ่ม [2] เมื่อพิจารณาที่ความไม่แน่นอนแบบระบบของหัววัด จะเกิดจากความไม่แน่นอนของการวัดตัวแปรต่างๆ จาก 2 สมการคือ สมการความต้านทานของหัววัด สมการที่ (3) กับสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัววัด สมการที่ (5) วิเคราะห์แล้วความไม่แน่นอนแบบระบบของสมการความต้านทานของหัววัดเท่ากับ $\pm 1.94\%$ หรือประมาณ $\pm 2\%$ ซึ่งเท่ากันทั้งสามหัววัด และความไม่แน่นอนแบบระบบ ของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัววัดที่ 1, 2, และ 3 คือ $\pm 4.18\%$, $\pm 4.15\%$, และ $\pm 4.15\%$ ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่า หัววัดทั้งสามมีความไม่แน่นอนแบบระบบ ของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ $\pm 4.2\%$ จากนั้นรวมความไม่แน่นอนแบบระบบทั้งสองตัวเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีการประมาณการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก จะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบระบบของทั้งสามหัววัด เท่ากับ $\pm 5.37\%$ ในบรรดาตัวแปรทั้งหมดจากการวิเคราะห์ ตัวแปรที่มีผลต่อความไม่แน่นอนสูงที่สุด คือ กระแสไฟฟ้า ดังนั้นในการวัดจะต้องรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่เสมอตลอดการวัด ส่วนความไม่แน่นอนแบบสุ่มหาโดยทดลองวัดค่าความเร็วการไหล 6 ครั้ง แล้วนำค่าทั้งหมดมาคำนวณด้วยวิธีทางสถิติ สรุปได้ว่า ผลที่ได้ทั้งสามหัววัดจะคล้ายกันแบบมีนัยสำคัญคือ ที่ความเร็วลมต่ำค่าความความไม่แน่นอนแบบสุ่มจะมีค่าน้อยเริ่มต้นที่ประมาณ 1% และเพิ่มขึ้นไปเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่าความความไม่แน่นอนแบบสุ่มสูงสุดจะเท่ากับ 16% ที่ความเร็วการไหล 7.20 m/s

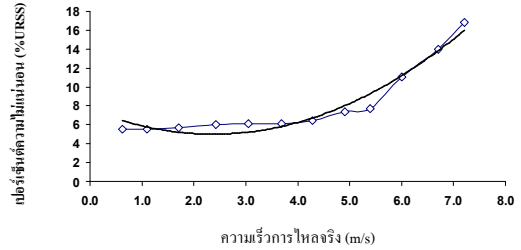
หลังจากที่ได้ค่าความไม่แน่นอนแบบระบบและความไม่แน่นอนแบบสุ่มของทั้งสามหัววัดแล้ว นำค่าทั้งสองมารวมกันด้วยวิธีการที่สองของผลรวมกำลังสอง สรุปได้ดังนี้



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วจการไหลจริงหัววัดที่ 1

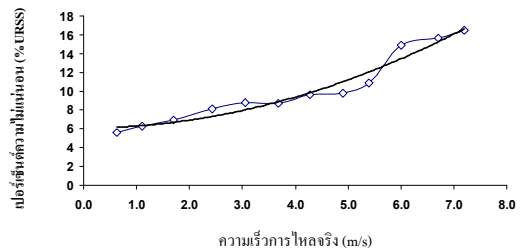
เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนทั้งหมดของหัววัดที่ 1 มีค่าต่ำสุดคือ $\pm 5.57\%$ ที่ความเร็วลม 0.63 m/s และมีค่าสูงสุดคือ

$\pm 16.74\%$ ที่ความเร็วลม 7.20 m/s เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วการไหลจริงตามรูปที่ 12 ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ความไม่แน่นอนหัววัดที่ 1 คือ $\%U_{RSS} = 0.2861V^2 - 0.3938V + 5.5997$ มีค่าการถดถอย $R^2 = 0.9703$



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วจการไหลจริงของหัววัดที่ 2

เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนทั้งหมดของหัววัดที่ 2 มีค่าต่ำสุดคือ $\pm 5.56\%$ ที่ความเร็วลม 0.63 m/s และมีค่าสูงสุดคือ $\pm 16.84\%$ ที่ความเร็วลม 7.20 m/s เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับค่าความเร็วการไหลจริง ตามรูปที่ 13 ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ความไม่แน่นอนหัววัดที่ 2 คือ $\%U_{RSS} = 0.4702V^2 - 2.2323V + 7.6549$ มีค่าการถดถอย $R^2 = 0.9557$



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วจการไหลจริงของหัววัดที่ 3

เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนทั้งหมดของหัววัดที่ 3 มีค่าต่ำสุดคือ $\pm 5.59\%$ ที่ความเร็วลม 0.63 m/s และมีค่าสูงสุดคือ $\pm 16.46\%$ ที่ความเร็วลม 7.20 m/s เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วการไหลจริง ตามรูปที่ 14 ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ความไม่แน่นอนหัววัดที่ 3 คือ $\%U_{RSS} = 0.2013V^2 + 0.0206V + 6.0831$ มีค่าการถดถอย $R^2 = 0.9541$

4.3.2 การหาช่วงการวัด

ช่วงการวัดของหัววัดจะกำหนดจากสมมุติฐานว่า ค่าที่วัดได้มีเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนไม่เกิน $\pm 20\%$ แต่เนื่องจากการทดลอง

ทุกหัววัดช่วงการวัดมีเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนไม่ถึง $\pm 20\%$ จึงต้องนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนกับความเร็วการไหลจริงหาช่วงการวัดดังนี้หัววัดที่

1 แบบจำลองคณิตศาสตร์คือ

$$\%U_{RSS} = 0.2861V^2 - 0.3938V + 5.5997 \text{ แทนค่า}$$

$$\%U_{RSS} = 20 \text{ แก้สมการหาค่า } V \text{ ได้ } V = 7.82 \text{ ดังนั้นจะได้}$$

ช่วงการวัดความเร็วการไหลของหัววัดที่ 1 คือ 0-7.82 m/s

หัววัดที่ 2 แบบจำลองคณิตศาสตร์คือ

$$\%U_{RSS} = 0.4702V^2 - 2.2323V + 7.6549 \text{ แทนค่า}$$

$$\%U_{RSS} = 20 \text{ แก้สมการหาค่า } V \text{ ได้ } V = 8.02 \text{ ดังนั้นจะได้ช่วง}$$

วัดความเร็วการไหลของหัววัดที่ 2 คือ 0-8.02 m/s หัววัดที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์คือ

$$\%U_{RSS} = 0.2013V^2 - 0.0206V + 6.0831 \text{ แทนค่า}$$

$$\%U_{RSS} = 20 \text{ แก้สมการหาค่า } V \text{ ได้ } V = 8.36 \text{ ดังนั้นจะได้}$$

ช่วงวัดความเร็วการไหลของหัววัดที่ 3 คือ 0-8.36 m/s แต่ใน

การวัดอัตราการไหลต้องใช้หัววัดทั้งสามร่วมกัน จึงเลือกใช้ค่าช่วง

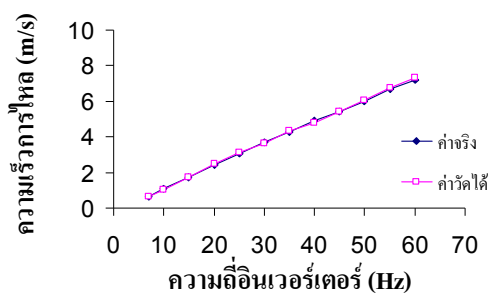
วัดที่ต่ำสุดเป็นเกณฑ์ คือ ช่วงวัดของหัววัดที่ 1 สรุปได้ว่าช่วงวัด

ความเร็วการไหลทั้งสามหัววัด คือ 0-7.82 m/s

4.3.3 การหาค่าปรับแก้

ค่าปรับแก้หาได้จากการนำค่าความเร็วการไหลที่วัดได้จากการทดลอง 6 ครั้งของแต่ละหัววัดมาหาค่าเฉลี่ย เขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ยกับค่าความเร็วการไหลจริง จากนั้นหาค่าปรับแก้จากสมการ ค่าปรับแก้ = ค่าจริง/ค่าที่วัดได้

หัววัดที่ 1 จากรูปที่ 9 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดช่วงการวัดคือ -17.27% ถึง +6.90% เนื่องจากกราฟความเร็วการไหลช่วง 0-3.35 m/s ค่าความเร็วที่วัดได้เฉลี่ย มีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วจริง ช่วงความเร็วการไหล 3.36-4.59 m/s ค่าความเร็วที่วัดได้เฉลี่ย มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วจริง และช่วงค่าความเร็วการไหล 4.60-7.53 m/s ค่าที่วัดได้เฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วจริง จึงต้องแบ่งค่าปรับแก้เป็นช่วงๆ สรุปได้ว่าหัววัดที่ 1 ช่วงความเร็วการไหล 0-3.35 m/s ใช้ค่าปรับแก้ = 1.117 ช่วงความเร็วการไหล 3.36-4.59 m/s ใช้ค่าปรับแก้ = 1.034 ช่วงความเร็วการไหล 4.60-7.53 m/s ใช้ค่าปรับแก้ = 0.954

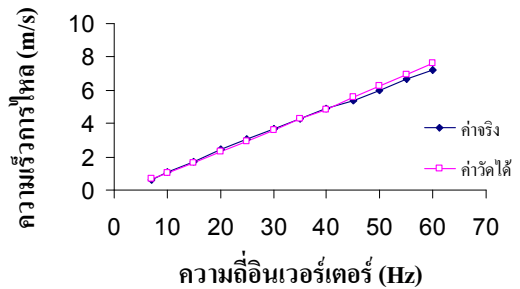


รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วการไหลวัดได้เฉลี่ยกับค่าความเร็วการไหลจริงของหัววัดที่ 1 หลังคูณค่าปรับแก้

จากรูปที่ 15 ผลการนำค่าปรับแก้คูณค่าที่วัดได้ทำให้หัววัดที่ 1 ผลการวัดมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงจากเดิม -17.27% ถึง +6.90% เป็น -7.60% ถึง +2.83%

หัววัดที่ 2 จากรูปที่ 10 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดช่วงการวัดคือ -16.08% ถึง -5.42% เนื่องจากกราฟความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ยน้อยกว่าค่าความเร็วการไหลจริงตลอดช่วงการวัด และมีช่วงห่างของค่าปรับแก้ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดช่วงของการวัดทั้งหมด จึงไม่ต้องแบ่งค่าปรับแก้ เป็นช่วงๆ สรุปได้ว่า ตลอดช่วงความเร็วการไหล 0-8.02 m/s ใช้ค่าปรับแก้ = 1.121

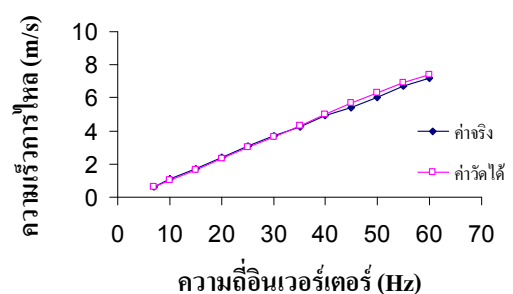
จากรูปที่ 16 ผลการนำค่าปรับแก้คูณค่าที่วัดได้ทำให้หัววัดที่ 2 ผลการวัดมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงจากเดิม -16.08% ถึง -5.42% เป็น -5.92% ถึง +6.01%



รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วการไหลวัดได้เฉลี่ยกับค่าความเร็วการไหลจริงของหัววัดที่ 2 หลังคูณค่าปรับแก้

หัววัดที่ 3 จากรูปที่ 11 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดช่วงการวัดคือ -31.06% ถึง -22.11% เนื่องจากกราฟความเร็วการไหลที่วัดได้เฉลี่ยน้อยกว่าค่าความเร็วการไหลจริงตลอดช่วงการวัด และมีช่วงห่างของค่าปรับแก้ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดช่วงของการวัดทั้งหมด จึงไม่ต้องแบ่งค่าปรับแก้ เป็นช่วงๆ สรุปได้ว่า ตลอดช่วงความเร็วการไหล 0-8.36 m/s ใช้ค่าปรับแก้ = 1.349

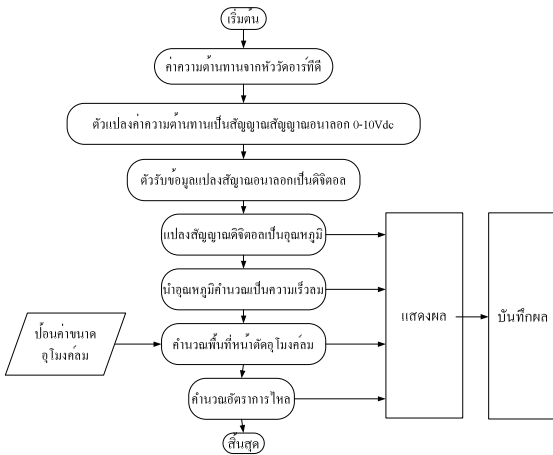
จากรูปที่ 20 ผลการนำค่าปรับแก้คูณค่าที่วัดได้ ทำให้หัววัดที่ 3 ผลการวัดมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงจากเดิม -31.06% ถึง -22.11% เป็น -4.08% ถึง +5.04%



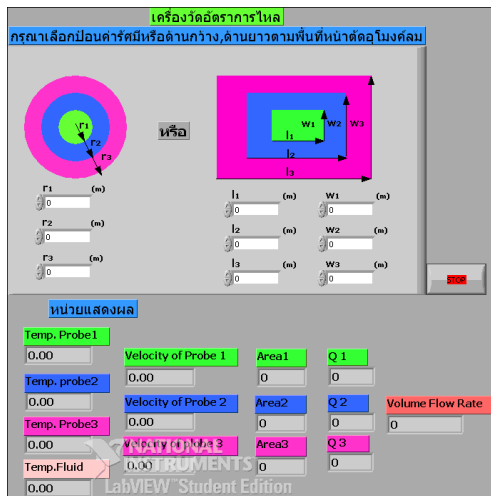
รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วการไหลวัดได้เฉลี่ย กับค่าความเร็วการไหลจริงของหัววัดที่ 3 หลังคุณค่าปรับแก้

4.4 การทดสอบเครื่องมือวัดอัตราการไหลในอุโมงค์ลม

การทดสอบเครื่องมือวัดอัตราการไหลในอุโมงค์ลมมีจุดประสงค์เพื่อ วิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดในการวัดอัตราการไหล

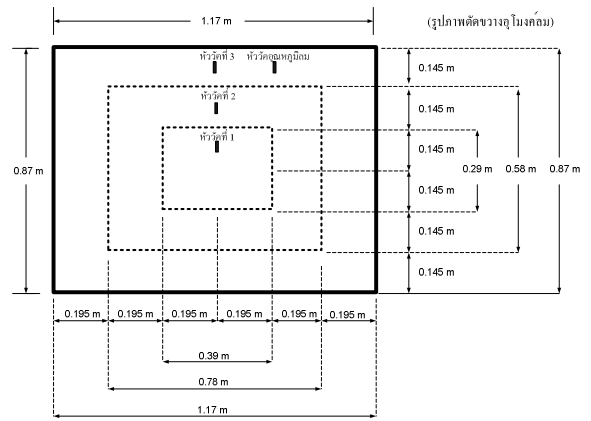


รูปที่ 18 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 19 แสดง Front Panel ของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

โปรแกรมวิเคราะห์ แสดงผล บันทึกข้อมูลอัตราการไหล ที่เขียนขึ้นมาจะใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ จากสมการ (6) แผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 18 และ Front Panel ของโปรแกรม แสดงดังรูป ที่ 19



รูปแสดงการวางตำแหน่งหัววัดในอุโมงค์ลม

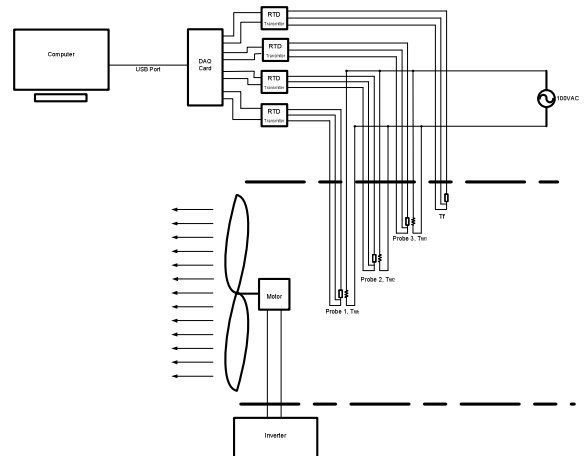
รูปที่ 20 การวางตำแหน่งหัววัดในอุโมงค์ลม

ความเร็วการไหลที่คุณค่าปรับแก้จากการทดลองครั้งก่อนจะถูกคูณกับพื้นที่หน้า ตัดอุโมงค์ลมแต่ละส่วน เพื่อหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร จากสมการ

$$Q = (V_1 A_1) + (V_2 A_2) + (V_3 A_3)$$

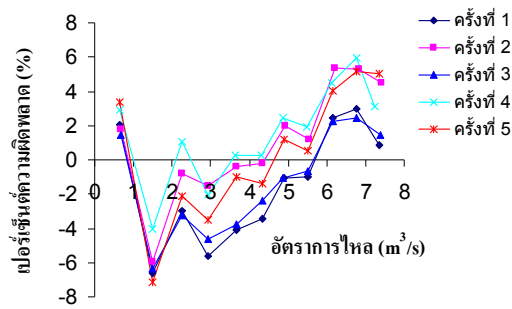
(8)

ขนาดอุโมงค์ลมทดสอบและตำแหน่งการติดตั้งหัววัดทั้งสามตัว จะแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 21 แสดงการต่ออุปกรณ์ทดสอบเครื่องมือวัดอัตราการไหลในอุโมงค์ลม

เริ่มการทดลองโดยต้องจตามรูปที่ 21 จากนั้น ปรับความเร็วการไหล โดยการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ทีละค่า จาก 0 ถึง 22 เฮิรตซ์ เพิ่มขึ้นทีละ 2 เฮิรตซ์ วัดและบันทึกค่าอัตราการไหลจากโปรแกรม ระหว่างนี้วัดและบันทึกค่าความเร็วการไหลจากเครื่องวัดความเร็วลม เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการไหล และอัตราการไหลนี้และจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่แสดงผลจากโปรแกรม เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำการทดลองและเปรียบเทียบจะทั้งหมด 5 ครั้ง



รูปที่ 22 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดอัตราการไหล

จากการทดลอง 5 ครั้งได้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดอัตราการไหล $\pm 6.59\%$, $\pm 5.92\%$, $\pm 6.36\%$, $\pm 5.97\%$, $\pm 7.13\%$ ตามลำดับ เราถือว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สูงที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของเครื่องวัด ดังนั้นสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตลอดช่วงการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลคือ $\pm 7.13\%$ หรือประมาณได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตลอดช่วงการวัดมีค่าไม่เกิน $\pm 10\%$

5. สรุปผลการศึกษา

จากการสร้างและทดสอบเครื่องมือวัดอัตราการไหลสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1.) เครื่องมือวัดจะมีความแม่นยำสูงเมื่อนำไปวัดที่ความเร็วการไหลต่ำๆ และจะมีความผิดพลาดสูงเมื่อนำไปวัดที่ความเร็วการไหลสูงๆ เนื่องจากที่ความเร็วการไหลต่ำลักษณะการกระจายตัวการไหลจะเป็นแบบราบเรียบทำให้อากาศไหลโอบผ่านหัววัดช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนได้ดี ส่วนที่ความเร็วการไหลสูงๆ ลักษณะการกระจายตัวการไหลเป็นแบบปั่นป่วนอากาศที่ผ่านหัววัดจะเกิดกระแสวน ทำให้การพาความร้อนที่หัววัดลดลง

2.) ความผิดพลาดที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วการไหลสูงขึ้นมีสาเหตุมาจากที่ความเร็วการไหลสูงๆ จะทำให้อุณหภูมิหัววัดลดลงมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิอากาศ ความไวในการวัดจะสูงขึ้น เมื่อตัวแปรอุณหภูมิเกิดค่าความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อความผิดพลาดรวมในการวัดสูงมากขึ้นตาม

3.) เมื่อใช้หัววัดทั้งสามตัววัดอัตราการไหลช่วงวัดอัตราการไหลที่ดีที่สุดคือ 2 ถึง 6 m/s

เอกสารอ้างอิง

- [1]. สุนันท์ ศรัณยนิติย์. กลศาสตร์ของไหล (*Fluid Mechanics*). กรุงเทพฯ : บริษัท ประชาชน จำกัด, 2545.
- [2]. สมนึก บุญพาไสว. การวัดและเครื่องมือวัด. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, 2545.
- [3]. สมศักดิ์ กิระดิวินิเศรษฐ์. หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2546.

- [4]. Al – Salaymeh, A., Jovanovic, J., Durst, F : Bi – directional flow sensor with a wide dynamic range for medical application. *Medical Engineering & Physic*, 26 : 623 – 637, 2004.
- [5]. Castaner, L., Jimenez, V., Dominguez, M., Masana, F., Rodriguez, A. : Design and fabrication of a low cost water flowmeter. *IEEE Transducers*, 97: 159-162, 1997.
- [6]. Fox, R.W. and McDonald, T. *Introduction to Fluid Mechanics*. 5th ed. New York : John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [7]. Laghrouche, M., Adane, A., Boussey, J., Ameer, S., Meunier, D., Tardu, S : A miniature silicon hot wire sensor for automatic wind speed measurements. *Renewable Energy*, 21 : 1-16, 2005.
- [8]. Otakane, K., Sakai, K., Seto, M : Development of the thermal flow meter. *IEEE SICE Annual Conference in Fukui*, 21 : 3080 – 3083, 2003.
- [9]. Viswanathan, M., Rajesh, R., Kandaswamy, A : Design and development of thermal mass flowmeters for high pressure applications. *Flow Measurement and Instruction*, 13 : 95 – 102, 2002.

