

CST-64

วิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้งมาตรวัดน้ำที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นโดยเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of oversized water meter using finite element method

ศุภกิจ ครัวเครือ^{1*}, ชีระ เกียรติพงษ์กุล¹ และ อนันต์ สืบสำราญ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัด ปทุมธานี 12120

² ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

*ติดต่อ: boy-mtn-49@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวัดปริมาตรน้ำของมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ ที่มีขนาด ($\varnothing 2"$) 50mm ที่ใช้ในงานทางด้านประปา และวิศวกรรมทั่วไป เนื่องจากมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ มีปัจจัยเสี่ยงในกระบวนการวัดที่อาจก่อให้เกิดการวัดผลที่ผิดพลาดได้และอาจจะส่งผลเสีย หายให้กับผู้ประกอบการในการจัดเก็บค่าใช้น้ำที่ อ่านได้น้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางนักวิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำที่ไหล ผ่านภายในมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับใบพัดที่อยู่ในตัวมาตร วัดน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีการทดลองลักษณะช่วงอัตราการไหลของน้ำอยู่ 4 ช่วงอัตราการไหล 1.ช่วงอัตราการไหลต่ำ (Minimum Flow Rate, Q_{min}) 2. ช่วงอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง (Transitional Flow Rate, Q_t) 3.ช่วงอัตราการไหลปกติ (Nominal Flow Rate, Q_n) และ 4.ช่วงอัตราการไหลสูงสุด (Maximums Peak Flow Rate, Q_{max}) ในมาตรวัดน้ำ ตามลำดับแล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน เพื่อศึกษาหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดของมาตรวัดน้ำที่มีขนาดใหญ่ ที่เกิดขึ้นมาจากอัตราการไหลของน้ำในแต่ละช่วง และคำนึงถึงปริมาณของน้ำที่สูญเสียไปอันเนื่องมาจาก กระบวนการวัด ค่าที่ผิดพลาด เป็นต้น

คำหลัก: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, มาตรวัดน้ำ, อัตราการไหล

Abstract

This research study aims to measure the volume of the oversized water meter (with diameter of $\varnothing 2"$) 50mm used in waterwork, and general engineering. Due to these water meters have many risky factors concern with the measurement process that may causes errors in measurement reading, consequently result in invalid cost calculation performed by the operator. Therefore, researchers had chosen to study the behaviors of water flowing through the oversized water meter. The analysis method consists of using a Finite Element (Finite Element Analysis, FEA) method to determine impacts occurred on the turbine of the studied water meter. There will be experiments on 4 different types of the flow rate of water as following; 1.Minimum Flow Rate (Q_{min}), 2.Transitional Flow Rate (Q_t), 3. Nominal Flow Rate (Q_n), and 4. Maximums Peak Flow Rate (Q_{max}), The results of the analysis by the computer program are compared with experimental results obtained from the laboratory. To determine errors during the

CST-64

measurement process in case of oversized water meter, results of the flow rate of water in each period are taking into account to calculate the amount of water lost due to the measurement errors and so on.

Keywords: Finite Element, Water Meter, flow rate

1. บทนำ

ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นชัดเจนในการคำนวณชิ้นงาน และโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาวิเคราะห์กับงานทางด้านวิศวกรรมได้หลากหลายแขนง อาทิเช่น การจำลองการไหลของน้ำภายในท่อผ่านวาล์วเปิด-ปิดแบบต่างๆที่มีความซับซ้อน [1,2] การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ และการจำลองทางด้านการถ่ายเทความร้อน

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวัดปริมาณน้ำของมาตรวัดน้ำที่มีขนาดใหญ่ มีหลายปัจจัยตั้งแต่การติดตั้งที่ไม่ถูกต้องเกินความจำเป็น ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาปัญหาความผิดพลาดจากการวัดปริมาณน้ำของมาตรวัดน้ำ ขนาดใหญ่ขนาด ($\varnothing 2$) 50mm ที่ใช้ในงานประปา เนื่องจากมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ มีปัจจัยเสี่ยงในกระบวนการวัดที่อาจจะก่อให้เกิดการวัดผลที่คลาดเคลื่อน และอาจจะส่งผลเสียให้กับผู้ประกอบการ ในการจัดเก็บค่าใช้น้ำที่ไม่ถูกต้อง มากหรือน้อยตามความเป็นจริง [3] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำที่ไหลผ่านมาตรน้ำขนาดใหญ่ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับใบพัดที่อยู่ภายในตัวมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีการทดลองลักษณะการไหลอยู่ 4 ช่วงอัตราการไหล 1.ช่วงอัตราการไหลต่ำ (Minimum Flow Rate, Q_{min}) 2.ช่วงอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง (Transitional Flow Rate, Q_t) 3.ช่วงอัตราการไหลปกติ (Nominal Flow Rate, Q_n) และ 4.ช่วงอัตราการไหลสูงสุด (Maximums Peak Flow Rate, Q_{max}) ในมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ขนาด $\varnothing 2$ นิ้วตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ

ภายในห้องปฏิบัติการที่ได้รับรองมาตรฐาน [4] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมาตรวัดน้ำกับอัตราการไหลในช่วงต่างๆได้อย่างถูกต้อง

2. ที่มาและปัญหา

การติดตั้งมาตรวัดน้ำที่มีขนาดไม่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการของการใช้น้ำเช่น การติดตั้งมาตรวัดน้ำที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นขนาดตั้งแต่ $\varnothing 2$ นิ้วขึ้นไปจะทำให้มาตรวัดน้ำไม่สามารถวัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวมาตรวัดน้ำที่แท้จริงได้ หากน้ำที่ไหลผ่านมาตรวัดน้ำมีอัตราการไหลต่ำกว่าอัตราการไหลเริ่มต้นที่มาตรวัดน้ำขนาดนั้นๆ จะสามารถตรวจวัดได้ก็จะทำให้เกิดการอ่านที่ผิดพลาดส่งผลให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในทันที



รูปที่ 1 ภาพมาตรวัดน้ำขนาด 2 นิ้ว

2.1 การติดตั้งมาตรวัดน้ำ

การติดตั้งมาตรวัดน้ำจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ที่ถูกต้องควรติดตั้งท่อน้ำระยะหน้ามาตรเป็น 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรวัดน้ำและระยะหลังมาตรต้องเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรวัดน้ำ ถ้าการติดตั้งมาตรวัดน้ำไม่ถูกต้องอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านของมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ขึ้นได้ [5]

CST-64

3. ทฤษฎี และสมการพื้นฐาน

ในการคำนวณหาลักษณะของการไหลโดยทั่วไปแล้ว
จะใช้สมการเริ่มต้น 3 สมการดังนี้ [6,7]
สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial (\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$0 + \rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

โดย ρ แทนความหนาแน่น (mass density)
 t แทนเวลา (time)
 U และ v แทนความเร็วของของไหลตาม
แนวแกน x และ y

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \cdot \rho f_x \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \cdot \rho f_y \quad (5)$$

โดย P แทนความดัน(Pressure)
 f แทนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลต่อ
มวลหนึ่งหน่วย

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงาน

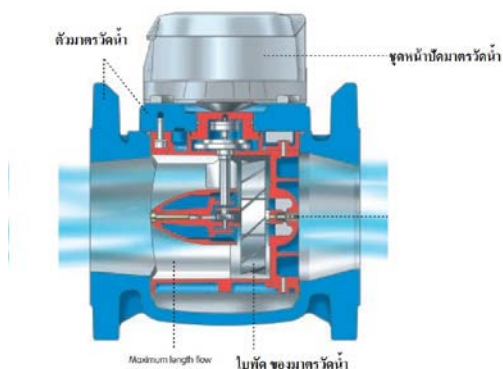
$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) + P \vec{\nabla} \cdot \vec{V} - Q \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \phi \end{aligned} \quad (6)$$

โดย e แทนพลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย
 k แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 T แทนค่าอุณหภูมิ
 Φ แทนค่าฟังก์ชันการกระจายความหนืด
 σ แทนค่าความเค้น

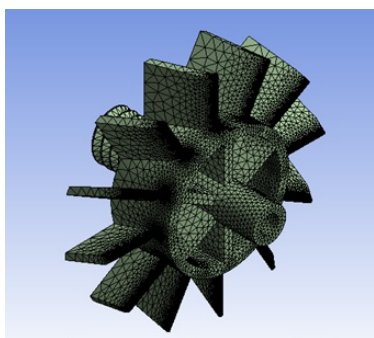
4. วิธีการวิจัย

มาตรวัดน้ำชนิดใบพัด (Turbine type water meter) ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วตามมาตรฐานชั้นคุณภาพ Class B ISO4064-3 [8] ภายในโครงสร้างเป็นใบพัดทำมุมเฉียงกับทิศทางการไหลขณะที่น้ำไหลผ่านจะทำให้ใบพัดหมุนไปตามอัตราการไหล โดยปกติลักษณะการไหล ของน้ำผ่านใบพัด จะมีความซับซ้อนอย่างมากเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์การไหลคือ Computational Fluid Dynamics (CFD) การศึกษาครั้งนี้ใช้ โปรแกรม สำเร็จรูป CFX ช่วยในการ วิเคราะห์แก้ไขปัญหา แล้วทำการการสร้างแบบจำลอง Computer aided design (CAD) เป็นการสร้างรูปร่างแบบจำลองใน 3 มิติของมาตร วัดน้ำในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Solid Work โดยจะทำการแบ่งโดเมนออกเป็นส่วนๆ ประกอบไปด้วย โดเมนของน้ำที่ไหลผ่านมาตรวัดน้ำ โดเมน Straightening vanes และ โดเมนของใบพัดโดยจะกำหนดให้โดเมน น้ำกับโดเมน Straightening vanes อยู่กับที่ส่วนโดเมนของใบพัดจะปล่อยให้เคลื่อนที่ได้ ตามรูปที่ 4 ต่อไปเป็นการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ให้กับตัวมาตรวัดน้ำเป็นชนิดเหล็กหล่อและใบพัดเป็น พลาสติก

CST-64



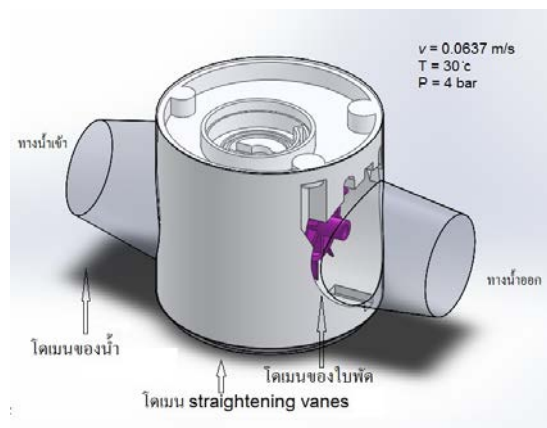
รูปที่ 2 ภาพส่วนประกอบมาตรวัดน้ำขนาด 2 นิ้ว
ทำการสร้าง Mesh หลักการไฟในเอลิเมนต์
จะใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ (Numerical Technique)
ในการวิเคราะห์แก้ปัญหา โดยที่โปรแกรมจะสร้าง
โมเดลและทำการแบ่งโมเดลเป็นเส้นย่อยๆจน
โครงสร้างเรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์
จะถูกเชื่อมต่อกันเป็นจุดๆเรียงกันเรียกว่า(Node) โดย
เลือกใช้วิธีการแบบ Tetra Mesh จำนวน 2,177,974
Mesh 374,130 Node ซึ่งใบพัดมีความซับซ้อนมาก
เลยต้องปรับค่าความละเอียดสำหรับการวิเคราะห์มาก
ขึ้นตรงบริเวณส่วนโค้งของใบพัด [9] ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพแสดง Mesh มาตรวัดน้ำขนาด 2 นิ้ว

ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา
กำหนดอัตราการไหลที่ทางเข้า โดยเริ่มทดสอบที่ช่วง
อัตราการไหล ต่ำสุด $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ อัตราการไหล
เปลี่ยนแปลง $3 \text{ m}^3/\text{h}$ อัตราการไหล ปกติ $15 \text{ m}^3/\text{h}$
อัตราการไหล สูงสุด $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ตามลำดับด้วย
ความเร็วในการไหลเริ่มต้น $v = 0.0637 \text{ m/s}$
อุณหภูมิคงที่ $T = 30^\circ\text{C}$ ความดันคงที่ $P = 4 \text{ bar}$
ตามรูปที่ 4 การที่จะให้ผลคำตอบ ใกล้เคียง ความ
ถูกต้องแม่นยำมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับการสร้าง

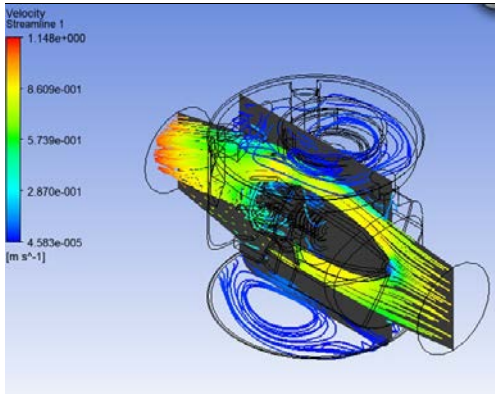
Mesh ขึ้นมา ยิ่งมีขนาดเล็กๆ ความละเอียดสูงๆจะ
ได้ผลคำตอบที่ใกล้เคียงความถูกต้องแม่นยำมากกว่า
ขนาดที่ใหญ่ และจะมีข้อเสียตามมาอีกด้วยยังต้องใช้
ประสิทธิภาพ คอมพิวเตอร์สูงขึ้นตามไปด้วยและอาจ
ใช้เวลาในการ คำนวณมากขึ้นไปตามลำดับ โดย
เลือกใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ เข้ามา
ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาโดยสมมุติฐานเบื้องต้นว่า
มาตรวัดน้ำจะไม่สามารถทำงานได้อย่างมี
ประสิทธิภาพเมื่อต้องวัดปริมาณน้ำในช่วงอัตราการ
ไหลต่ำ



รูปที่ 4 ภาพแสดงโดเมนของน้ำกับใบพัด

หลังจากที่ทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ
กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ทำ
การสร้าง Mesh เริ่มกระบวนการแก้ปัญหา เพื่อที่จะ
พิสูจน์หาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดปริมาณของ
น้ำ ทางขาออกในแต่ละช่วงอัตราการไหล ให้ตรงกับ
ผลของหน้าปัดมาตรวัดน้ำที่อ่านได้จากความเป็นจริง
โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งในแต่ละช่วงอัตรา
การไหล เราต้องการทราบว่ามีปริมาณน้ำ 1 ลูกบาศก์
เมตร ใบพัดจะหมุนไปด้วยความเร็ว กี่รอบต่อนาที ที่
ได้มาจากการจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

CST-64



รูปที่ 5 พฤติกรรมการไหลของน้ำที่กระทำกับใบพัด

จากรูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำที่ไหลผ่านมาตรวัด ความเร็วก็จะลดลงและเกิดการไหลหมุนวนตรงบริเวณด้านบนและด้านล่างภายในห้องวัด ส่วนที่อยู่ด้านหน้าก็จะไหลผ่านใบพัดด้วยความเร็วที่สูง เมื่อรู้ความเร็วรอบของใบพัดที่หมุนตามแนวแกน ก็จะนำมาคำนวณชุดเฟืองทดรอบ จากการทดสอบ ก็ได้ผลว่าเมื่อใบพัดหมุนไป 1400 รอบต่อนาที ก็จะได้ปริมาณน้ำ 1 ลบ.ม. เมื่อทำการคำนวณหาปริมาณน้ำในแต่ละช่วงอัตราการการไหลจาก โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการต่อมาเพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าความถูกต้องจากการทดลองจึง นำผลไปเปรียบเทียบกับผล ที่ได้ จาก แท่น ทด สอบมาตรวัดน้ำภายในห้องปฏิบัติการที่ได้รับมาตรฐาน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบที่อัตราการไหลปกติ

ปริมาณน้ำ 3,000 ลิตร			
อัตราการไหล 250 ลิตร/นาที			ความคลาดเคลื่อน ±2 %
ทดสอบ	ผลทดสอบ ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	ผลจากCFX ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	
1	3.0820	3.0903	1.7%
2	3.0760	3.0844	1.7%
3	3.0836	3.0919	1.7%
4	3.0823	3.0906	1.7%
5	3.0736	3.0821	1.7%

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ช่วงอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

ปริมาณน้ำ 1,000 ลิตร			
อัตราการไหล 50 ลิตร/นาที			ความคลาดเคลื่อน ±2 %
ทดสอบ	ผลทดสอบ ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	ผลจากCFX ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	
1	0.9915	0.9919	1.9%
2	0.9810	0.9819	1.9%
3	0.9891	0.9887	2.0%
4	0.9875	0.9881	1.9%
5	0.9914	0.9918	1.9%

เมื่อนำผลจากแท่นทดสอบมาตรวัดน้ำ ที่ช่วงอัตราการไหลปกติและช่วงอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือ ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 2% ในตารางที่ 1 กับ 2 ผลเป็นไปตามมาตรฐานชั้นคุณภาพ Class B ส่วนผลช่วงอัตราการไหลขั้นต่ำ ในตารางที่ 3 มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือ ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า ± 5%เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง เพราะ ว่ามาตรวัดน้ำจะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อต้องวัดปริมาณน้ำในช่วงอัตราการไหลต่ำ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบที่ช่วงอัตราการต่ำ

ปริมาณน้ำ 500 ลิตร			
อัตราการไหล 20 ลิตร/นาที			ความคลาดเคลื่อน ±5 %
ทดสอบ	ผลทดสอบ ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	ผลจากCFX ปริมาณน้ำ (ลบ.ม.)	
1	0.5080	0.5034	5.9%
2	0.5080	0.5039	5.8%
3	0.5090	0.5038	6.0%

CST-64

4	0.5070	0.5023	5.9%
5	0.5074	0.5031	5.8%

5. สรุปผล

จากการศึกษาพบว่าความ คลาดเคลื่อนการวัดของมาตรวัดน้ำที่เกิดขึ้นในช่วงอัตราไหลขั้นต่ำ (Minimum Flow Rate, Q_{min}) ของตัวมาตรวัดน้ำเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำขณะที่น้ำไหลไม่เต็มท่อจะทำให้เกิดแรงที่กระทำต่อใบพัด น้อยกว่าปกติ เป็นผลให้ใบพัดเกิดการหมุนช้า หรืออาจไม่หมุน ในขณะที่มีน้ำไหลผ่านท่ออยู่ตลอดเวลา ทำให้ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด มิเตอร์วัดน้ำเกิดความ คลาดเคลื่อนมากหรือน้อยตามอัตราการไหล ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำ ดังนั้นการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ช่วงอัตราการไหลปกติ และช่วงอัตราการไหลเปลี่ยนแปลง โดยได้ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 2\%$ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และช่วงอัตราการไหลต่ำมีค่ามากกว่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ เป็นการช่วยให้สามารถทำนายพฤติกรรมผลการไหลของน้ำได้ และเลือกใช้มาตรวัดที่เหมาะสมสำหรับแต่ละงานได้เป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานและบุคลากรทุกท่านในฝ่ายมาตรวัดน้ำ การประปานครหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล สถานที่ มาตรวัดน้ำและ อุปกรณ์ในการทำการวิจัย พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Yoon-Suk Chang, Sun-Hye Kim, Hyuk-Soo Chang. (2009). *Fluid effects on structural integrity of pipes with an orifice and elbows with a wall-thinned part*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 22, pp. 854-859.

[2] Qin Yang. (2011). *Numerical Simulation of Fluid Flow inside the Valve*. Procedia Engineering, vol. 23, pp. 543-550.

[3] ชีระ เจียศิริพงษ์กุล, สปิปปันท์ เอกอำพน, ธวัชชัย บุญเหลือ, รังสรรค์ วรรณภพ, ธนธรรม สองสี (2555). *โครงการศึกษาผลกระทบของการติดตั้งมาตรวัดน้ำที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น*.

[4] Chutharat Suthatat, Thira Jearsiripongkul (2013). *Technical Analysis of Oversize Water Meters in Metropolitan Waterworks Authority*. The 3rd International Symposium on Engineering, Energy and Environments.

[5] กลุ่มนักปฏิบัติ "ทดสอบมาตรวัดน้ำ" การประปานครหลวง (2555). *ความคลาดเคลื่อนมาตรวัดน้ำขนาดใหญ่ที่ติดตั้งไม่ได้มาตรฐาน กปน*. Knowledge Management and Learning Organization 2555.

[6] ปราโมทย์ เตชะอำไพ (2547). *ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*

[7] ปราโมทย์ เตชะอำไพ (2555). *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*

[8] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4064-3 (2005) *Measurement of water flow in fully charged closed conduits- Meters for cold potable water and hot water-Part 3: Test methods and equipment*.

[9] ยอดชาย เตียเป็น, นพพงศ์ ศรีตระกูล, อุดมเกียรติ นนทแก้ว และ ประโมทย์ ฉมามัทธนา (2550). *การทดสอบและการจำลองเครื่องกังหันน้ำขนาดเล็ก*. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 21. ชลบุรี.