การสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน

Generation of Calibration Chart for Horizontal Cylindrical Fuel Tank

สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต กรุงเทพฯ 10510
Satit Rungrudesombatkit
Industrial Engineering Technology, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Bangkok, 10510
Corresponding author Email: satit.run@kbu.ac.th
(Received: September 1, 2021; Revised: November 11, 2021; Accepted: January 4, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพการสอบเทียบถังบรรจุน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบเปียกของถังบรรจุน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอนขนาด 1,300 ลิตร มีฝาปิดหัวท้ายเป็นแผ่นเรียบ โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสอบเทียบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ 1) การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งการเติมน้ำ 2) การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้ง 3) การเตรียมแบบมาตราและอุปกรณ์ 4) การเติมน้ำเข้าถังพร้อมกับวัดระดับความสูงของน้ำ 5) การนำเสนอข้อมูลต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่า แผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันในแนวนอนที่ได้จากความสัมพันธ์ในรูปตัวแบบคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำสามารถนำไปอ้างอิงในการสร้างสเกลวัดปริมาตรได้ โดยมีค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ตกลงกันได้ระหว่างบริษัทฯกับลูกค้า

คำสำคัญ: แผนภาพการสอบเทียบ ถังบรรจุน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน ค่าความผิดพลาด ความไม่แน่นอนในการวัด

ABSTRACT

This research aimed to create a calibration chart for a horizontal cylindrical fuel tank with the wet calibration method of a 1,300-liter horizontal cylindrical fuel tank that was covered with flat sheets at the ends by using water as a medium for calibration. The calibration had the following steps: 1) establishing criteria for water filling in stages 2) development of a filling steps schedule 3) setting up standards and equipment 4) filling the tank with water to the desired height; and 5) continuous information presentation. The finding revealed that the calibration chart of a horizontal fuel tank, which is derived from the mathematical model between the volume and height of water, can be referenced to create a volumetric scale. The errors and uncertainty in volumetric interpolation were in accordance with the criteria agreed between the company and the customer.

Keyword: Calibration chart, horizontal cylindrical fuel tank, errors, measurement uncertainty.

1. บทนำ

บริษัท พี.เค.วอเตอร์ปั๊มซิสเท่ม จำกัด เป็นผู้ประกอบกิจการจำหน่ายอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในระบบปั๊มน้ำ ซ่อมบำรุงปั๊มน้ำ และติดตั้งระบบปั๊มดับเพลิงโดยมีถังบรรจุน้ำมันดีเซลเป็นอุปกรณ์เสริม ประสบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับค่าขีดขั้นหมายมาตราหรือสเกลวัดปริมาตรถังน้ำมัน ณ

ระดับต่างๆ ไม่สอดคล้องกับปริมาตรของน้ำมันที่ใส่ลงไปในถัง จึงทำให้เกิดข้อโต้เถียงกันระหว่างบริษัทฯกับลูกค้า ทำให้ไม่สามารถส่งมอบถังบรรจุน้ำมันให้กับลูกค้าได้

โดยก่อนที่จะส่งมอบถังบรรจุน้ำมันนั้น บริษัทฯจะทำการสอบเทียบแบบเปียก โดยหาความสอดคล้องระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของของเหลวที่ใส่ลงไปในถัง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการสอบเทียบ ขณะที่ในปัจจุบันจะนิยมใช้กล้องส่องเลเซอร์ 3 มิติ (3D Laser Scanning) ซึ่งเป็นการสอบเทียบแบบแห้ง (Dry Calibration) หรือการสอบเทียบด้วยวิธีเรขาคณิต (Geometrical Method) [1] เพื่อหาระยะความกว้าง ความสูงและระดับของเหลวภายในถังแล้วนำไปประมวลผล สรุปผลด้วยคอมพิวเตอร์ออกมาเป็นตารางสอบเทียบประจำถัง (Tank Calibration Table) ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรของเหลวภายในถังก็สามารถทำได้โดยการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) จากตารางสอบเทียบประจำถัง อย่างไรก็ตามบริษัทฯเลือกที่จะใช้วิธีการสอบเทียบแบบเปียกแทนการใช้กล้องส่องเลเซอร์ 3 มิติ เนื่องด้วยมีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายและมองว่าเกินความจำเป็น เพราะบริษัทฯมิได้มีวัตถุประสงค์ในการวัดปริมาตรเพื่อการซื้อขายหรือคำนวณภาษีอากร แต่เป็นการวัดปริมาตรเพื่อการสำรองน้ำมันไว้ใช้สำหรับระบบต้นกำลังของปั๊มดับเพลิงในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น

จากการสอบถามถึงขั้นตอนต่างๆของการสอบเทียบแบบเปียกจากพนักงาน พบว่า หลังจากสอบเทียบถังบรรจุน้ำมันที่บริษัทฯแล้ว จึงได้ทำการขนย้ายไปติดตั้ง ณ สถานที่ตั้งของลูกค้า โดยก่อนที่จะดำเนินการส่งมอบพนักงานจะสอบเทียบถังบรรจุน้ำมันอีกครั้ง โดยเติมน้ำจากภาชนะที่ทราบค่าปริมาตรลงในถังบรรจุ แล้วเปรียบเทียบกับระดับปริมาตรบนหลอดมองระดับ (Sight Glass) โดยมิได้คำนึงถึงค่าความเอียงของถังบรรจุน้ำมันก่อนและหลังการสอบเทียบ จึงคาดว่าความเอียงของถังน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาค่าปริมาตรที่เติมลงไปแล้วไม่สอดคล้องกับปริมาตรที่อ่านจากสเกลวัดปริมาตรดังกล่าวข้างต้น

โดยนิยามแล้ว การสอบเทียบ หมายถึง วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับแบบมาตราภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดชัดเจน (Specific Conditions) [2] ดังนั้น หากการสอบเทียบมิได้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่นในกรณีที่มีการขนย้ายถังบรรจุดังกล่าวแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตำแหน่งและการเอียงของถัง จะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบอย่างมาก [3]

การสอบเทียบอาจแสดงโดยประพจน์ ฟังก์ชันการสอบเทียบ แผนภาพการสอบเทียบ เส้นกราฟการสอบเทียบหรือตารางการสอบเทียบ ในบางกรณีอาจประกอบด้วยค่าตรวจแก้ที่เพิ่มหรือคูณเข้าไปกับค่าบ่งชี้ ซึ่งมาพร้อมกับความไม่แน่นอนในการวัดที่เกี่ยวข้อง [4] การบรรจุของเหลวที่ถูกต้องเหมาะสมจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อผ่านการสร้างแผนภาพการสอบเทียบให้กับถังบรรจุ [5]

Aguilar และ Villegas [6] ได้เสนอขั้นตอนการสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังบรรจุในแนวนอนที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงรี เพื่อปรับค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรให้เหมาะสม การสอบเทียบใช้วิธีตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method) ด้วยข้อมูลจำนวน 21 คู่ แต่จะมีข้อมูลอยู่ 11 คู่ที่นำมาใช้ในการกำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชบีเชฟ (Chebyshev Nodes) เพื่อลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วง (Interpolation Function) ของค่าปริมาตรของเหลวในถังบรรจุให้มีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Permissible Errors: MPE) และทำให้ผลต่างระหว่างปริมาตรจากการสอบเทียบกับปริมาตรจากฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงมีค่าต่ำกว่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (Expanded Uncertainty: U)

การกำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชบีเชฟ (Chebyshev Nodes) จะทำให้ได้คู่ข้อมูลที่ระดับความสูงเป็นช่วงๆ ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรที่ค่าความสูงที่ตกระหว่างข้อมูลค่าความสูง 2 ค่า จำเป็นจะต้องทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดจากการประมาณในช่วง จึงต้องเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างค่าระดับความสูงแต่ละค่าด้วยการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องจากฟังก์ชันต่างๆ เช่น

ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) และฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์ในรูปตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับความสูงภายในถังบรรจุแนวนอน (Mathematical Model of the Relationship between Volume and Height of Horizontal Storage Tank) [6] เป็นต้น

หลังจากสอบถามและสำรวจสภาพทั่วไปเสร็จสิ้นแล้ว จึงได้แจ้งให้บริษัทฯทราบถึงสาเหตุที่คาดว่าจะก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการสอบเทียบ และขอดำเนินการสอบเทียบใหม่อีกครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพการสอบเทียบประจำถังบรรจุน้ำมันทรงกระบอกแนวนอนขนาด 1,300 ลิตรที่มีฝาปิดหัวท้ายเป็นแผ่นเรียบด้วยวิธีการสอบเทียบแบบเปียก เพื่อนำแผนภาพการสอบเทียบไปใช้ในการประมาณค่าปริมาตรและอ้างอิงในการสร้างสเกลวัดปริมาตร โดยมีค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรภายใต้เงื่อนไขที่ตกลงกันได้ระหว่างบริษัทฯกับลูกค้า

2. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

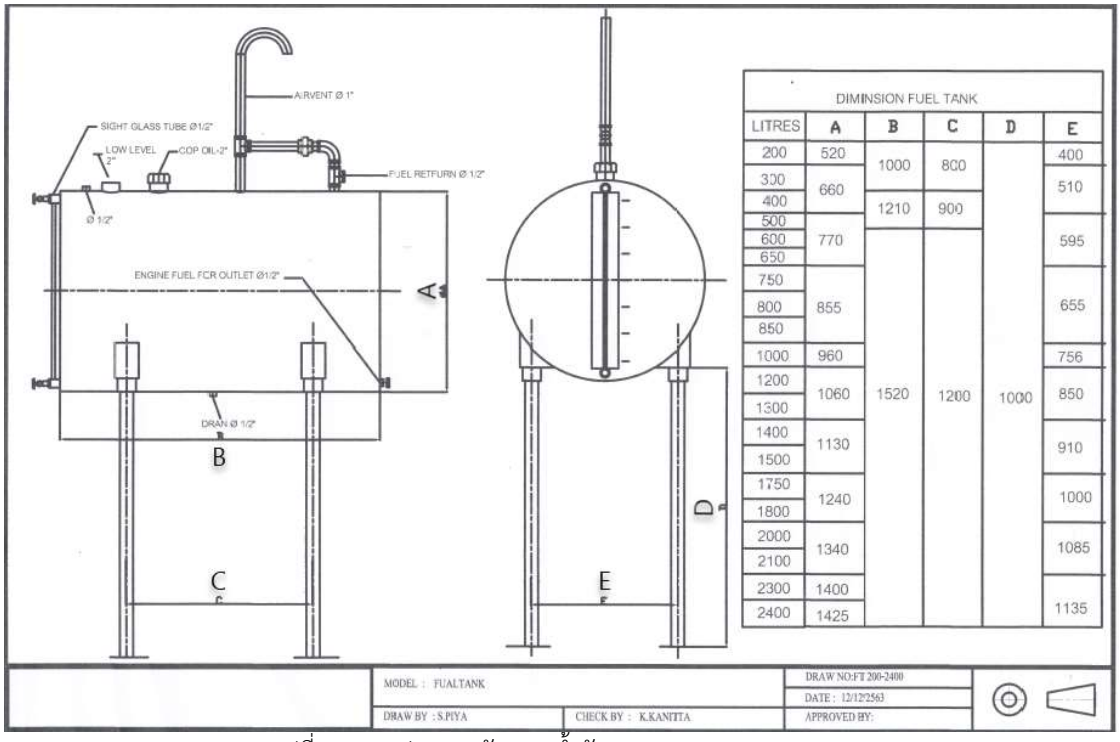
2.1 แบบแปลนของถังบรรจุน้ำมัน

แบบแปลนจะช่วยให้ทราบถึงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ประจำถังที่อาจมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบ เช่น ตำแหน่งติดตั้งของหลอดมองระดับปริมาตร ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งติดตั้งของหลอดมองระดับปริมาตรอยู่ที่ปลายถังซึ่งจะมีผลทำให้ความเอียงของถัง (Inclination) มีอิทธิพลต่อการอ่านค่าปริมาตร [3] นอกจากนี้ ขนาดและระยะต่างๆของถังบรรจุ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของถัง ล้วนเป็นข้อมูลที่จำเป็นเบื้องต้นในการคำนวณหาขีดขั้นหมายมาตราหรือขีดสเกล (Scale Interval) เพื่อใช้ในการสอบเทียบในขั้นตอนต่อไป

2.2 เครื่องวัดความสูงของของเหลวภายในถัง

เครื่องวัดความสูงของของเหลวภายในถังอยู่ในรูปของหลอดมองระดับของเหลว (Sight Glass Tube) ติดตั้งถาวรกับผนังถังบรรจุมีขีดขั้นหมายมาตราทำจากโลหะและสามารถนำไปใช้ในการสอบเทียบได้ทันที



DIMINSION FUEL TANK

LITRES	A	B	C	D	E
200	520	1000	800	1000	400
300	660				510
400		1210	900		
500					595
600	770	1520	1200		
650					
750	855				655
800					
850					756
1000	960				
1200	1060				850
1300					
1400	1130				910
1500					
1750	1240				1000
1800					
2000	1340				1085
2100					
2300	1400				1135
2400	1425				

รูปที่ 1 แบบแปลนของถังบรรจุน้ำมัน (Fuel Tank Drawing)

2.3 ถังบรรจุของเหลว

ถังบรรจุที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปทรงกระบอกแนวนอนทำด้วยโลหะเชื่อมปิดหัวท้ายทั้งสองด้านด้วยแผ่นโลหะเรียบ มีปริมาตรบรรจุสูงสุดใช้งานเท่ากับ 1,300 ลิตร ติดตั้งอยู่ภายในอาคารทางด้านทิศเหนือซึ่งได้รับแสงแดดน้อย และอาจติดตั้งให้เอียงได้เล็กน้อยเพื่อสะดวกในการถ่ายน้ำออกจากน้ำมัน โดยก่อนที่จะทำการสอบเทียบจะต้องดำเนินการตรวจสอบสภาพทั่วไป เช่น ตรวจสอบการโค้งแอ่นของถัง ตรวจสอบการเอียงของถัง ตรวจสอบการรั่วไหลของถัง วาล์ว ข้อต่อและรอยเชื่อมต่างๆ โดยเติมของเหลวลงในถังให้เต็มตามปริมาตรสูงสุดใช้งานเป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง [7]

2.4 วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆ

วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็นในการวิจัย ได้แก่

1) เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดหน้าจอแอลซีดี ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส

2) เครื่องวัดความเอียงดิจิทัล(Digital Inclinometer) ความละเอียด 0.05 องศา

3) มาตรวัดน้ำอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Water Meter) เนื่องด้วยส่วนแสดงค่าของมาตรวัดน้ำ ควรแสดงปริมาตรได้ละเอียดอย่างน้อยเท่ากับ 0.5% ของปริมาตรของเหลวภายในถังบรรจุในแนวนอนที่มีพื้นที่หน้าตัดมากที่สุดด้วยความสูงของเหลวเท่ากับ 10 มม. [3] สำหรับงานวิจัยนี้ ถังบรรจุของเหลวมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 1.06 ม. ความยาว (L) 1.52 ม. ดังนั้นจึงควรเลือกมาตรวัดน้ำที่สามารถแสดงปริมาตรด้วยค่าความละเอียดอย่างน้อยเท่ากับ 0.5%x1.06x1.52x0.01x1000 = 0.08 ล. หรือเท่ากับ 0.08 ลิตร ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จึงเลือกมาตรวัดน้ำซึ่งมีสมรรถนะการใช้งานตามมาตรฐาน ISO 4064 ความละเอียด 0.01 ลิตร

4) เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกวิธีการชั่งน้ำหนักของเหลวที่ผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวแทนการวัดด้วยถังตวงแบบมาตรา (Prover Tank) ซึ่งจะทำให้ผลการสอบเทียบมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ [2] กระทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เพียงพอกับเงินที่ลงทุนไป

หลักการเลือกเครื่องมือตามมาตรฐาน ISO 10012-1 กล่าวไว้ว่า เครื่องมือมาตรฐานที่นำมาเพื่อให้เครื่องมือวัดอื่น ๆ ได้ใช้ในการเปรียบเทียบ จะต้องมีความถูกต้องสูงกว่าความถูกต้องของเครื่องมือที่รับการสอบเทียบ 3 เท่าขึ้นไป [8] ดังนั้น อย่างน้อยที่สุดเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ควรมีความละเอียด (d) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$d \leq 1/3 \times MPE \qquad (1)$$

เมื่อ MPE = ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ของปริมาตรที่ต้องการทดสอบ (%)

d = ความละเอียดของเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

กรณีของการสอบเทียบถังบรรจุของเหลวในแนวนอนจะไม่มีการกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Possible Error: MPE) ดังนั้น การกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ จึงต้องอาศัยค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าปริมาตรของเหลวภายในถังด้วยการใช้ค่าตัวเลขจากการอ่านค่าสเกล สำหรับการตรวจสอบให้คำรับรองชั้นแรกค่าความไม่แน่นอนในการวัดต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5% เทียบกับปริมาตร [3] ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ของมาตรวัด ควรแสดงค่าด้วยความละเอียดอย่างน้อย = 0.5%x1.06x1.52x0.01x1000 = 0.08 ลิตร

นั่นคือ MPE จะมีค่าเท่ากับ 0.08 ล. แทนค่า MPE ในสมการที่ 1 จะได้ d ≤ 1/3(0.08) ล. = 0.027 ล. ในที่นี้ ให้ d = 0.01 ล. หรือประมาณ 0.01 กก. (ความหนาแน่นของน้ำมีค่าประมาณ 1 กิโลกรัม/ลิตร) ดังนั้น เครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบควรมีความละเอียด (d) เท่ากับ 0.01 กก.

5) ของเหลวสำหรับการสอบเทียบแบบเปียก ในที่นี้ได้เลือกน้ำเป็นตัวกลางแทนน้ำมันสำหรับการสอบเทียบ เพราะหากใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะทำให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรไปประมาณ 5 เท่า เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำ หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีค่าเท่ากัน [3]

3. วิธีการวิจัย

ทำการสอบเทียบแบบเปียก โดยประยุกต์จากเอกสารของสำนักงานกลางชั่งตวงวัด [3] ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.1 การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ

การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำเข้าไปในถัง จะต้องกำหนดค่าขั้นหมายมาตรา (Interval Scale: S) หรือค่าความละเอียด (Resolution) [2] ให้อยู่ในช่วง (0.004ม.)DL ≤ S (ม^3) ≤ (0.01ม.)DL [3] ในที่นี้ D = 1.06 ม., L= 1.52 ม.จะได้ 0.006 ม^3 ≤ S (ม^3) ≤ 0.016 m^3 ดังนั้นจึงให้ S = 0.01 ม^3 (10 ลิตร)

ส่วนค่าปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมแต่ละครั้ง (Maximum Filling Step Volume) ที่ส่วนหัว/ท้าย (Fore/end Section) และกึ่งกลางถัง (Middle Section) คำนวณได้ด้วยสมการที่ 2 และ 3 [3] ตามลำดับดังนี้

Fore/end $$\Delta V \leq \frac{0.85944}{D}\left(1+\frac{0.21173}{D^{2/3}}\right) \quad (2)$$

Middle $$\Delta V \leq \left(\frac{0.7382}{D^{1/3}}\right) \quad (3)$$

เมื่อ ΔV = ค่าปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมแต่แต่ละครั้ง

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง

ตารางที่ 1 การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง

	Filling Range (l.)	Filling Step Volume (% of Tank Volume)	Filling Step Volume (Adjusted:S=10 l.)	No. of Filling Steps	Adjusted Filling Steps	Filling Volume	Filling Step Volume(%)	Cumulative Volume(%)
1	0 to 13	<= 1% = 6.5 l.	10	>= 2	2	20	2%	2%
2	13 to 65	<= 1% = 13 l.	10	>= 4	4	40	3%	5%
3	65 to 195	<= 2% = 26 l.	20	>= 5	6	120	9%	14%
4	195 to 390	<= 4% = 52 l.	50	>= 3	4	200	15%	29%
5	390 to 910	<= 8% = 104 l.	90	>= 4	6	540	42%	71%
6	910 to 1105	<= 4% = 52 l.	50	>= 3	4	200	15%	86%
7	1105 to 1235	<= 2% = 26 l.	20	>= 5	6	120	9%	95%
8	1235 to 1287	<= 1% = 13 l.	10	>= 4	4	40	3%	98%
9	1287 to 1300	<= 1% = 6.5 l.	10	>= 2	2	20	2%	100%

เมื่อปริมาตรถัง (Tank Volume) = 1,300 ล., D=106 ซม. ที่ส่วนหัว/ท้ายΔV = 0.008 ที่กึ่งกลางถัง ΔV = 0.156 เมื่อคิดเป็นค่าปริมาตรจะได้ ΔV = 0.008(1,300) =10.64 ล. และ ΔV = 0.156(1,300) =202.78 ล.

3.2 การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง

ถังบรรจุของเหลวในแนวนอน ตามมาตรฐาน DIN 6608 sheet 1 [3] จะมีตารางขั้นตอนการเติมของเหลวในแต่ละครั้งแบบสำเร็จรูปจำนวน 15 ขนาดมาตรฐาน

แต่เนื่องจากถังของบริษัทฯ ไม่เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าว จึงอ้างอิงตารางของ PTB Testing Instructions [3] มาปรับใช้ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำลงในถังบรรจุขนาด 1,300 ลิตร ซึ่งจะทำให้ได้การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง (Filling Step Schedule) ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าการกำหนดขั้นตอนการเติมน้ำ เป็นการกำหนดปริมาตรน้ำก่อนเติมลงถังในแต่ละครั้งให้เป็นจำนวนเท่าของค่าขั้นหมายมาตรา (S) ห่างกันเป็นช่วงๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาความไม่แน่นอนในการวัดระดับความสูงของน้ำ ลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และยังเป็นการลดเวลาในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้อีกด้วย

การเติมน้ำจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยเติมด้วยจำนวนน้อยๆบริเวณก้นถัง แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อถึงบริเวณ

กึ่งกลางถัง และเติมเป็นจำนวนน้อยๆอีกครั้งเมื่อใกล้เต็มความจุของถัง ทั้งนี้จะต้องไม่เกินค่าปริมาตรสูงสุดของการเติมน้ำ ซึ่งที่บริเวณก้นถังและบริเวณใกล้เต็มความจุถัง จะเติมในแต่ละครั้งด้วยปริมาตร 10 ลิตร และที่กึ่งกลางถังจะเติมในแต่ละครั้งด้วยปริมาตร 90 ลิตร ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ปริมาตรที่เติมแต่ละครั้งมีค่าไม่เกินปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ตามสมการที่ 2 และ 3 ในหัวข้อที่ 3.1 คือ 10.64 และ 202.78 ลิตร ตามลำดับ และสอดคล้องกับค่า ΔV ที่อ่านจากกราฟแสดงค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้ของปริมาตรที่เติมแต่ละครั้งสัมพัทธ์ (Permissible Maximum of the Relative Filling Step Volume) [3]

3.3 การเตรียมแบบมาตราและอุปกรณ์

การเตรียมแบบมาตรา (Standard) เป็นการจัดลำดับความสำคัญจากระดับต่ำไประดับสูง แบบมาตราใช้งาน (Working Standards) จัดเป็นลำดับความสำคัญที่ต่ำที่สุด แบบมาตราใช้งานที่ได้รับความนิยมคือ อุปกรณ์มาตรวัด (Metering Equipment) โดยก่อนที่จะนำมาตรวัดไปใช้งาน จะต้องสอบเทียบกับมาตราอ้างอิง (Reference Standard) ที่มีลำดับความสำคัญที่สูงกว่าเสียก่อน ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์มาทำการสอบเทียบมาตรวัดน้ำด้วยวิธีชั่งน้ำหนักทางอ้อม [2]

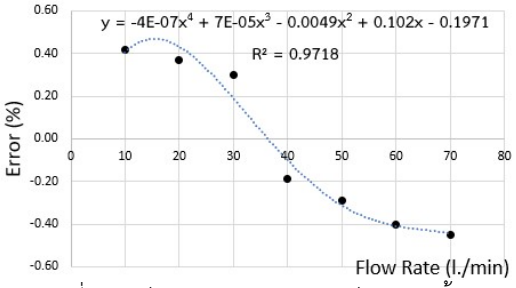
ทั้งนี้ Suttanarak และ Shusuwan [2] ได้นำภาชนะรองรับน้ำจากมาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบไปชั่งน้ำหนัก โดยในที่นี้ ได้เลือกเครื่องชั่งที่มีขั้นหมายมาตราที่อ่านได้ละเอียด 0.01 กก. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1/3 ของค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ดังที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2.4 จากนั้นจึงทดสอบมาตรวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 7 อัตราการไหล โดยทำซ้ำ 2 ครั้งที่แต่ละอัตราการไหลและทำการบันทึกอุณหภูมิน้ำในภาชนะและค่าปริมาตรจากมาตรวัดโดยอ่านน้ำหนักจากภาชนะรองรับน้ำบนเครื่องชั่ง ตัวอย่างเช่น อ่านจากเครื่องชั่งได้ 49.84 กก. (หักน้ำหนักภาชนะแล้ว) ให้บันทึกค่า 49.84 ล. ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาดของมาตรวัดในแต่ละอัตราการไหล

Flowrate Range	Indication of Meter	Indication of Tranfer Tank	Temperature of Transfer Tank	Correction Factor for the Effect of	Correction Volume	Measured Deviation after Correction $\%Error(@T_0, Patm) = \frac{(Vm - Vop)}{Vop} \times 100\%$		
(l/min)	Vm (l)	Vp (l)	(°C)	Temp. on Steel	Vop (l)	Vm-Vop	(%)	Mean Value (%)
10	50	49.84	34.5	1.00015075	49.832488	0.1675122	0.34%	0.42%
	50	49.76	34.5	1.00015075	49.752500	0.2475002	0.50%	
20	50	49.73	34.4	1.00014740	49.722671	0.2773291	0.56%	0.37%
	50	49.92	34.4	1.00014740	49.912643	0.0873571	0.18%	
30	50	49.79	34.5	1.00015075	49.782495	0.2175047	0.44%	0.30%
	50	49.93	34.5	1.00015075	49.922474	0.0775258	0.16%	
40	50	49.98	34.5	1.00015075	49.972467	0.0275333	0.06%	-0.19%
	50	50.23	34.4	1.00014740	50.222597	-0.222597	-0.44%	
50	50	50.15	34.5	1.00015075	50.142441	-0.1424410	-0.28%	-0.29%
	50	50.16	34.5	1.00015075	50.152440	-0.1524395	-0.30%	
60	50	50.20	34.6	1.00015410	50.192265	-0.192265	-0.38%	-0.40%
	50	50.22	34.8	1.00016080	50.211926	-0.211926	-0.42%	
70	50	50.22	34.8	1.00016080	50.211926	-0.211926	-0.42%	-0.45%
	50	50.25	34.9	1.00016415	50.241753	-0.241753	-0.48%	
								PASS (≤ ± 0.5%)

จากนั้นจึงนำปริมาตรที่อ่านจากมาตรวัดน้ำ (V_m) ลบด้วยปริมาตรน้ำในภาชนะที่อุณหภูมิอ้างอิง 30°C (V_{op})[2] จะได้ค่าความผิดพลาดของมาตรวัด (%Error@T_0,P_{atm}) ดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 มาตรวัดน้ำมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 0.5% [3] ดังนั้น เราจึงสามารถนำค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำที่แต่ละอัตราการไหลนี้ไปหาความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันพหุนาม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันพหุนามของอุปกรณ์มาตรวัดน้ำ

จากรูปที่ 2 แสดงฟังก์ชันพหุนามกำลังสี่ (4th Degree Polynomial Function) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) เท่ากับ 0.97181 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันพหุนามนี้มีความสมรูปกับข้อมูลมาก

เราสามารถนำฟังก์ชันพหุนามนี้ไปใช้เป็นตัวแทนของคุณลักษณะมาตรวัดน้ำได้ โดยพิจารณาอัตราการไหลระบุ (Nominal Flow Rate: Q_n) ที่ 35 ล./นาที ($Q_n = Q_{max}/2$) [9] ซึ่งในที่นี้มาตรวัดน้ำใช้งานมีค่า Q_{max}= 70 ล./นาทีเมื่อแทนค่าอัตราการไหลระบุลงในฟังก์ชันพหุนามในรูปที่ 2 จะได้ค่าความผิดพลาด (%Error) ดังสมการที่ 4

$$y = -4 \times 10^{-7}(35^4) + 7 \times 10^{-5}(35^3) - 0.0049(35^2) + 0.102(35) - 0.1971 = -0.23\% \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 จะได้ว่า ค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำ (%Meter Error) มีค่าเท่ากับ -0.23%

3.4 การเติมน้ำเข้าถังพร้อมกับการวัดระดับความสูง

ก่อนเติมน้ำเข้าถังจะต้องล้างทำความสะอาด และตรวจสอบภายในถังว่ามีสิ่งสกปรก เศษวัสดุตกค้างหรือไม่ การเติมน้ำจะใช้วิธีปั๊มน้ำด้วยมือ (Hand Pump) จากด้านล่างเข้าทางด้านบนของถัง และต้องรอคอยช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ควรเป็นช่วงระยะเวลาเท่ากันแต่ละการวัดปริมาตร) จนมั่นใจว่าระดับน้ำภายในถังนิ่งแล้วจึงทำการวัดระดับความสูงของน้ำภายในถัง

ในการเติมน้ำเข้าสู่ถัง เพื่อให้เราสามารถใช้ค่าความ

ตารางที่ 3 การตรวจแก้ค่าปริมาตรที่เติมลงไปในแต่ละครั้งด้วยตัวแปรแก้ไขค่า (K)

	Volume Step $\Delta V: (l.)$	Filled Volume V:(l.)	Correction:K $= -\frac{\%MeterError}{100} \times \Delta V$ K: (l.)	$\Delta V_{err} = \Delta V - K$ $\Delta V_{err}: (l.)$	Actual Reading of the Meter	Filled Volume (%)	Filled Hight (mm)	Difference (mm)	l./mm
	0	0	-	-	-	0	Dead Stock	Dead Stock	-
1	20	20	-	-	-	1.54	Dead Stock	Dead Stock	-
2	40	60	0.09	59.91	59.91	3.08	81	81	0.74
3	120	180	0.27	119.73	179.63	9.23	188	107	1.12
4	200	380	0.46	199.54	379.18	15.38	330	142	1.41
5	540	920	1.24	538.76	917.94	41.54	675	345	1.57
6	200	1120	0.46	199.54	1117.48	15.38	810	135	1.48
7	120	1240	0.27	119.73	1237.21	9.23	912	102	1.18
8	40	1280	0.09	39.91	1277.11	3.08	951	39	1.03
9	20	1300	0.05	19.95	1297.07	1.54	970	19	1.05

ผิดพลาดของมาตรวัดได้ตลอดช่วงการคำนวณปริมาตรให้สอดคล้องกับระดับความสูงของน้ำภายในถัง จะต้องเติมน้ำผ่านมาตรวัดด้วยอัตราการไหลระบุ (Nominal Flow Rate) ที่ 35 ล./นาที เท่ากันทุกๆครั้งที่แต่ละปริมาตรซึ่งเป็นอัตราการไหลที่มาตรวัดน้ำทำงานได้อย่างปกติทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรวัดน้ำไม่เกินไปกว่าอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด [10] หรือไม่เกินกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำจึงต้องแก้ค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด ส่วนค่า ล./มม. แสดงให้เห็นว่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในตารางที่ 3

3.5 การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

เนื่องด้วย ข้อมูลจากการสอบเทียบที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำ เป็นการนำเสนอข้อมูลเพียงบางช่วงเท่านั้น หากต้องการทราบข้อมูลที่อยู่ระหว่างช่วงจะต้องทำการประมาณค่าในช่วง ซึ่งจะทำให้ค่าที่ประมาณได้เกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องทำการลดข้อผิดพลาดจากการประมาณค่า โดยนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยแผนภาพการสอบเทียบ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Function) ความสัมพันธ์แบบพหุนาม (Polynomial Function) เป็นต้น และเพื่อให้การประมาณค่าในช่วงถูกต้องแม่นยำ จึงได้นำขั้นตอนการสร้างแผนภาพการสอบเทียบให้เหมาะสมของ Aguilar และ Villegas [6] โดยการพิจารณาจากฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำที่จะนำมาประมาณค่าในช่วง ในรูปตัวแบบคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำในถังบรรจุแนวนอน ดังนี้

ในกรณีติดตั้งถังบรรจุของเหลวในแนวนอนแล้วพบว่าถังไม่เกิดการเอียง หรือก่อนและหลังการสอบเทียบถังมีมุมเอียงเท่ากับศูนย์ จากการศึกษาของ Barderas และ Rodea [11] พบว่า พื้นที่เซกเมนต์ (Segment Area) ของของเหลวที่เติมลงไปในถังทรงกระบอกความยาว L รัศมี R ระดับความสูงของเหลว H ความยาวส่วนโค้งของเซกเมนต์ S และ θ คือมุมรองรับเซกเมนต์ แสดงได้ดังสมการที่ 5

$$Segment\ Area = \frac{1}{2}R^2(\theta - \sin\ \theta) \qquad (5)$$

เมื่อ $$\theta = \frac{S}{R} = 2cos^{-1}\left(\frac{R-H}{R}\right) \qquad (6)$$

ดังนั้น ปริมาตรของเหลว dV สามารถคำนวณได้จากพื้นที่เซกเมนต์ของของเหลวที่เติมลงไปในถังคูณด้วยความยาวของทรงกระบอก dx ดังแสดงในสมการที่ 7

$$dV = \frac{1}{2}R^2(\theta - \sin\ \theta)dx \qquad (7)$$

แต่หากติดตั้งถังบรรจุของเหลวในแนวนอนแล้วเกิดการเอียง ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบอย่างมาก และจะส่งผลให้มุมของเซกเมนต์เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของทรงกระบอก ดังนั้น ในกรณีนี้หากทำการอินทิเกรตค่าปริมาตรของเหลว dV จะได้ดังสมการที่ 8

$$V = \frac{R^2}{2}\int_0^L \theta(x) - \sin\theta(x)\, dx \qquad (8)$$

เมื่อ θ(x) = มุมของเซกเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของทรงกระบอก dx

ถ้าให้ β คือ มุมเอียงของถังทรงกระบอก และ h คือ ระดับความสูงของของเหลวฝั่งฐานถังที่สูงกว่า จะได้ว่า

$$\theta(x) = 2cos^{-1}\left(\frac{R-(xtan(\beta)+h)}{R}\right) \qquad (9)$$

แทนค่า θ(x) จากสมการที่ 9 ลงในสมการที่ 8 จะได้สมการที่ 10

$$V = R^2\int_0^L cos^{-1}u - u\sqrt{1-u^2}dx$$
$$= -\frac{R^3}{tan\beta}\int_{u_0}^{u_L} cos^{-1}u - u\sqrt{1-u^2}du \qquad (10)$$

เมื่อ $$u = \frac{R-(xtan(\beta)+h)}{R}$$

ถ้าทำการอินทิเกรตสมการที่ 10 จะได้สมการที่ 11

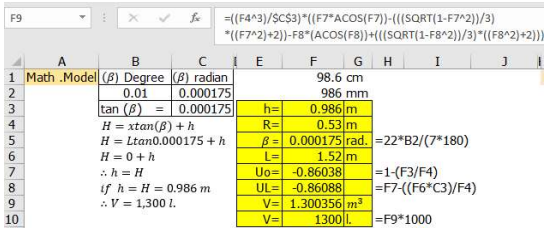
$$V = \frac{R^3}{tan\beta}\left(u_0cos^{-1}u_0 - \frac{1}{3}\sqrt{1-u_0^2}(u_0^2+2) - u_Lcos^{-1}u_L + \frac{1}{3}\sqrt{1-u_L^2}(u_L^2+2)\right) \qquad (11)$$

เมื่อ $u_0 = 1 - \frac{h}{R}$ และ $u_L = u_0 - \frac{Ltan\beta}{R}$

นำตัวแบบคณิตศาสตร์จากสมการที่ 11 มาทดลองใช้ โดยกำหนดให้ มุมเอียงของถังทรงกระบอก (β) = 0.01° จะได้ว่า h=H กำหนดให้ h=H= 0.986 m ถ้านำสมการที่ 11 ไปสร้างสูตรด้วยโปรแกรม MS Excel ในเซลล์ F9 จะได้ปริมาตรของเหลว V=1,300 ล. ดังการคำนวณในรูปที่ 3

การกำหนดให้มุมเอียงของถัง (β) = 0.01° ดังกล่าวเปรียบเสมือนการติดตั้งถังแล้วทำให้เกิดการเอียงน้อยมากหรือแทบจะไม่เกิดการเอียงเลยจึงทำให้สามารถนำสมการที่ 7 ของ Barderas และ Rodea [11] มาคำนวณหาค่าปริมาตรของเหลว (V) ได้ โดยให้ h=H= 0.986 ม. จากสมการที่ 6 จะได้ θ = 299°(5.211 rad) นำค่า θ นี้แทนค่าในสมการที่ 7 จะได้ V= 1,299.9 ล. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรที่คำนวณได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 3 ดังนั้น เราจึงสามารถนำตัวแบบคณิตศาสตร์จากสมการที่ 11 ไปคำนวณหาปริมาตรของน้ำเมื่อถังเอียงที่มุมต่างๆได้

อย่างไรก็ดี ไม่ว่าจะนำฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์แบบใดก็ตาม ไปใช้ในการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยการสร้างแผนภาพการสอบเทียบโดยอาศัยข้อมูลเพียงบางส่วนจากการสอบเทียบแบบเปียกย่อมจะทำให้การประมาณค่าในช่วงมีโอกาสผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับค่าความผิดพลาด (%Error) และความไม่แน่นอนในการวัดให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Permissible Errors: MPE) และค่าความไม่



รูปที่ 3 การคำนวณปริมาตรของเหลวเปรียบเทียบระหว่างตัวแบบคณิตศาสตร์กับสมการของ Barderas และ Rodea

แน่นอนในการวัดแบบขยาย (Expanded Uncertainty: U) ดังแสดงในสมการที่ 12 และสมการที่ 13 ตามลำดับ

$$\%Error < MPE \quad (12)$$

$$U = k\sqrt{u_{instrument}^2 + u_{adjustment\ curve}^2} \quad (13)$$

เมื่อ $u_{instrument}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือ

$u_{adjustment\ curve}$ คือ ความไม่แน่นอนในการประมาณค่าเมื่อนำฟังก์ชันมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบ

k คือ ตัวประกอบครอบคลุม

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือ ในที่นี้คือค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุปกรณ์มาตรวัดน้ำ ได้มาจากค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำ (%Meter Error) ดังแสดงในสมการที่ 4 ส่วนความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตร เมื่อนำฟังก์ชันมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบได้จากความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้าง (Standard Deviation of Residual Errors) ตลอดช่วงการคำนวณปริมาตร ดังรูปที่ 4 (ในหัวข้อผลการวิจัยและอภิปรายผล) โดยมีค่าผลต่างระหว่างปริมาตรน้ำที่เติมลงไปในแต่ละช่วง กับปริมาตรจากการประมาณค่าในช่วงด้วยฟังก์ชันต้องไม่เกินค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายดังแสดงในสมการที่ 14

$$|V_{fn} - V| \leq U \quad (14)$$

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การรายงานผลการสอบเทียบ

ก่อนที่จะเติมของเหลวได้บันทึกค่ามุมเอียงของถังน้ำมันไว้เท่ากับ 0.95° เมื่อเติมของเหลวเข้าสู่ถังบรรจุผ่านมาตรวัดน้ำด้วยอัตราการไหลคงที่ จะได้ผลดังตารางที่ 3 และหลังจากสอบเทียบแล้ว ทำการวัดค่ามุมเอียงของถังอีกครั้งพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.95° เช่นเดิม

อย่างไรก็ดี มาตรวัดจะมีค่าความผิดพลาดเนื่องจากไม่มีการชดเชยค่าอุณหภูมิ และจะต้องปรับค่าปริมาตรจากสภาวะสอบเทียบไปอยู่ที่สภาวะอ้างอิง เพื่อตรวจสอบมาตรวัดน้ำว่ามีค่าความผิดพลาดเกินกว่า ± 0.5% หรือไม่

ดังนั้น ในการรายงานผลการสอบเทียบ จึงต้องนำค่าปริมาตรที่เติมลงไปในแต่ละครั้งไปตรวจแก้ก่อนด้วยตัวแปรแก้ไขค่าความผิดพลาด (K) จึงจะได้ปริมาตรจากมาตรวัดที่แท้จริง (Actual Reading of Meter) ดังตารางที่ 3

4.2 การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ข้อมูลการสอบเทียบมิใช่ข้อมูลที่ให้ความสัมพันธ์ของปริมาตรกับระดับความสูงอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นเพียงปริมาตรที่ระดับความสูงต่างๆ เป็นช่วงๆ เพื่อที่จะลดความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วงระหว่างค่าความสูง 2 ค่า จึงได้นำตารางที่ 3 ไปทำการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ โดยให้ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 เป็นการหาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น (กรณีถังเอียง 0.95°) จะเห็นว่าเมื่อนำค่าปริมาตรที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้น (V_{fn1}) มาเปรียบเทียบกับค่าปริมาตรที่ได้จากการเติมน้ำ (V) จะพบว่ามีค่าความผิดพลาด (%Error) เกินเกณฑ์ (Fail) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) เกือบทุกช่วงการสอบเทียบ

ส่วนตารางที่ 5 เป็นการนำเสนอด้วยฟังก์ชันพหุนาม พบว่ามีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ผ่านเกณฑ์ (Pass) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้มากกว่าเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น

และถ้าหาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์(กรณีถังเอียง 0.95°) จะพบว่าเมื่อนำค่าปริมาตรที่ได้จากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ (V_{fn3}) มาเปรียบเทียบกับปริมาตรที่ได้จากการเติมน้ำ (V) จะมีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ผ่าน

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น (fn1)

	h	V	Vfn1	%Error <MPE		$\lvert V_{fn1} - V \rvert$	$u(yi)$	$U = ku(y)$	$\lvert V_{fn1} - V \rvert \leq U$
	(mm)	(l.)	(l.)	%Error	MPE=0.5%	(l.)	(l.)	(l.)	(l.)
1	81	59.91	43.29	-27.733	**FAIL**	16.61	6.85	118.88	**PASS**
2	188	179.63	196.83	9.573	**FAIL**	17.20	20.55	118.88	**PASS**
3	330	379.17	400.58	5.647	**FAIL**	21.41	43.38	118.88	**PASS**
4	675	917.93	895.62	-2.430	**FAIL**	22.31	105.01	118.88	**PASS**
5	810	1117.47	1089.34	-2.518	**FAIL**	28.13	127.84	118.88	**PASS**
6	912	1237.21	1235.70	-0.122	**PASS**	1.514	141.54	118.88	**PASS**
7	951	1277.10	1291.66	1.140	**FAIL**	14.55	146.10	118.88	**PASS**
8	970	1297.06	1318.92	1.686	**FAIL**	21.86	148.38	118.88	**PASS**
						$u(y) =$	59.44		

ตารางที่ 5 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันพหุนาม (fn2)

	h	V	Vfn2	%Error <MPE		$\lvert V_{fn2} - V \rvert$	$u(yi)$	$U = ku(y)$	$\lvert V_{fn2} - V \rvert \leq U$
	(mm)	(l.)	(l.)	%Error	MPE=0.5%	(l.)	(l.)	(l.)	(l.)
1	81	59.91	58.33	-2.639	**FAIL**	1.58	0.32	5.56	**PASS**
2	188	179.63	178.06	-0.878	**FAIL**	1.58	0.96	5.56	**PASS**
3	330	379.17	373.56	-1.481	**FAIL**	5.62	2.03	5.56	**FAIL**
4	675	917.93	919.97	0.223	**PASS**	2.04	4.91	5.56	**PASS**
5	810	1117.47	1116.99	-0.043	**PASS**	0.48	5.98	5.56	**PASS**
6	912	1237.21	1243.08	0.475	**PASS**	5.87	6.62	5.56	**FAIL**
7	951	1277.10	1284.24	0.559	**FAIL**	7.14	6.83	5.56	**FAIL**
8	970	1297.06	1302.66	0.432	**PASS**	5.60	6.94	5.56	**FAIL**
						$u(y) =$	2.78		

เกณฑ์ (Pass) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) มากกว่าเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นกับฟังก์ชันพหุนาม และเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์จะผ่านเกณฑ์ (Pass) ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายได้ทุกช่วงการสอบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 6

ทั้งนี้ ค่า u(yi) คำนวณได้จากส่วนของรากที่สองในสมการที่ 13 โดยการแทนค่า $u_{instrument}$= -0.23% ที่ได้จากสมการที่ 4 และค่า $u_{adjustment\ curve}$ ที่ได้จากความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้าง *(*Standard Deviation of Residual Error*) [6],[12]* แล้วเปลี่ยนค่า u(yi) จากหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ให้มีหน่วยเป็นลิตรโดยการคูณด้วยค่าปริมาตร (V) ที่ระดับความสูงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6 ทั้งนี้ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้างคำนวณได้จากโปรแกรม MS Excel ซึ่งในกรณีของฟังก์ชันเชิงเส้น (fn1) จะมีค่าเท่ากับ 11.44%

ตารางที่ 6 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์

	h	V	Vfn3	%Error <MPE		$\lvert V_{fn3} - V \rvert$	$u(yi)$	$U = ku(y)$	$\lvert V_{fn3} - V \rvert \leq U$
	(mm)	(l.)	(l.)	%Error	MPE=0.5%	(l.)	(l.)	(l.)	(l.)
1	81	59.91	58.89	-1.699	**FAIL**	1.02	0.24	4.08	**PASS**
2	188	179.63	177.36	-1.265	**FAIL**	2.27	0.71	4.08	**PASS**
3	330	379.17	376.20	-0.784	**FAIL**	2.97	1.49	4.08	**PASS**
4	675	917.93	921.82	0.424	**PASS**	3.89	3.61	4.08	**PASS**
5	810	1117.47	1117.78	0.028	**PASS**	0.31	4.39	4.08	**PASS**
6	912	1237.21	1241.23	0.325	**PASS**	4.02	4.86	4.08	**PASS**
7	951	1277.10	1281.13	0.315	**PASS**	4.03	5.02	4.08	**PASS**
8	970	1297.06	1297.84	0.060	**PASS**	0.78	5.10	4.08	**PASS**
						$u(y) =$	2.04		

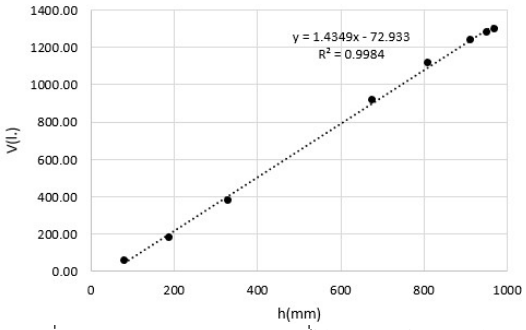
SUMMARY OUTPUT (fn1)		SUMMARY OUTPUT (fn2)		SUMMARY OUTPUT (fn3)	
Regression Statistics		*Regression Statistics*		*Regression Statistics*	
Multiple R	0.331004	Multiple R	0.921635	Multiple R	0.931972
R Square	0.109564	R Square	0.849412	R Square	0.868572
Adjusted R Square	-0.03884	Adjusted R Square	0.824314	Adjusted R Square	0.846667
Standard Error	11.43967	Standard Error	0.483066	Standard Error	0.319101
Observations	8	Observations	8	Observations	8

รูปที่ 4 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้างเมื่อนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ

ฟังก์ชันพหุนาม (fn2) เท่ากับ 0.48% และตัวแบบคณิตศาสตร์ (fn3) มีค่าเท่ากับ 0.32% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

เมื่อได้ค่า u(yi) ตลอดช่วงการสอบเทียบแล้วจึงนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty: u(y) [13] แล้วนำมาคูณด้วยตัวประกอบครอบคลุม (k) ซึ่งในที่นี้ ถ้ากำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ดังนั้น k=2 [14] จะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบขยาย U = 2u(y) ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6

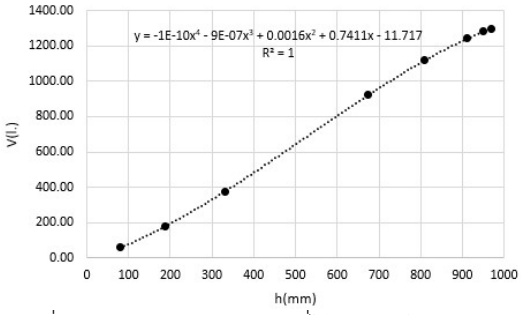
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4 ไปสร้างแผนภาพการสอบเทียบด้วยโปรแกรม MS Excel จะได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้น

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้นมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มีความสอดคล้องกับ Agboola และคณะ [5] ที่ใช้โปรแกรม MS Excel ในการสร้างแผนภาพการสอบเทียบได้ค่า R^2ใกล้เคียง 1 เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผนภาพการสอบเทียบจากฟังก์ชันเชิงเส้นสมรูปกับข้อมูลที่ได้จากการเติมน้ำ

ส่วนแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามมีค่า R^2 เท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนาม

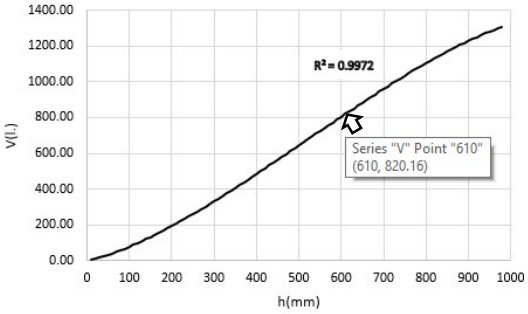
จากรูปที่ 6 แสดงแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามมีค่า R^2 เท่ากับ 1 ดังนั้น แผนภาพการสอบเทียบนี้ถือว่ามีความสมรูปกับข้อมูลการเติมน้ำเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามจากงานวิจัยนี้ จะให้ค่า R^2=1 ก็ตาม แต่ถ้าหากพิจารณาจากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันพหุนามมีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ (Fail) หรือไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) อยู่หลายช่วงการสอบเทียบ

ดังนั้น การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะสรุปว่าแผนภาพการสอบเทียบที่มีค่า R^2ใกล้เคียง 1 หรือ R^2 เท่ากับ 1 จะมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงต้องแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันหรือตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแผนภาพการสอบเทียบผ่านเกณฑ์ (Pass) หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้กับความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายอีกด้วย

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 6 ไปสร้างแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MS

Excel โดยคำนวณค่าปริมาตรที่ระดับความสูงจาก 10 มม. ไปถึง 980 มม. โดยกำหนดให้ความละเอียดของสเกลในแกนนอน (Minor Scale) เท่ากับ 10 มม. จะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าแผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์ มีลักษณะเส้นโค้งคล้ายกับแผนภาพการสอบเทียบจากฟังก์ชันพหุนามในรูปที่ 6 โดยมีค่า R^2ใกล้เคียงกับ 1 แต่แผนภาพการสอบเทียบด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์ สามารถผ่านเกณฑ์ (Pass) หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้สูงสุด (MPE) และความไม่แน่นอนแบบขยาย (U) ได้มากกว่า ดังตารางที่ 6

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันพหุนาม บริษัทฯสามารถที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) หรือใช้อ้างอิงสำหรับการสร้างสเกลวัดปริมาตรของหลอดมองระดับให้ถูกต้องแม่นยำได้

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

บริษัท พี.เค.วอเตอร์ปั๊ม ซิสเท่ม จำกัด ประสบปัญหาค่าขีดขั้นหมายมาตราหรือสเกลวัดปริมาตรถังน้ำมัน ณ ระดับต่างๆ ไม่สอดคล้องกับปริมาตรของน้ำมันที่ใส่ลงไปในถัง จึงทำให้เกิดข้อโต้เถียงกันระหว่างบริษัทฯกับลูกค้าและไม่สามารถส่งมอบให้กับลูกค้าได้ ดังนั้นบริษัทฯจึงได้ทำหนังสือขอความอนุเคราะห์ให้อาจารย์เข้าไปให้บริการทางวิชาการ เพื่อเข้ามาช่วยหาสูตรทางวิชาการที่น่าเชื่อถือได้มาอ้างอิงและจัดทำโปรแกรมในการคำนวณถังน้ำมัน

จากการสอบถามพนักงานในขั้นตอนการสอบเทียบแบบเปียกในเบื้องต้นพบว่า สาเหตุเกิดจากการขนย้ายถังบรรจุน้ำมันจากบริษัทฯ ไปติดตั้ง ณ สถานที่ตั้งของลูกค้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตำแหน่งและการเอียงของถัง ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ยังพบสาเหตุเพิ่มเติมเกี่ยวกับการติดตั้งหลอดมองระดับไว้ที่ปลายถัง ซึ่งจะทำให้ค่าความเอียงของถัง (Inclination) มีอิทธิพลต่อการอ่านค่าปริมาตรได้อีกด้วย

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่พนักงานจะต้องบันทึกค่ามุมเอียงก่อนและหลังการสอบเทียบทุกครั้ง โดยค่าที่ได้จะต้องเท่ากัน และหากพบว่ามุมเอียงก่อนและหลังการสอบเทียบมีค่าแตกต่างกัน จะต้องทำการสอบเทียบใหม่

ในการสอบเทียบได้ประยุกต์การสอบเทียบแบบเปียกจากเอกสารของสำนักงานกลางชั่งตวงวัด มีขั้นตอนดังนี้ 1) การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ 2) การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้ง 3) การเตรียมแบบมาตราและอุปกรณ์ 4) การเติมน้ำเข้าถังพร้อมกับการวัดระดับความสูงของน้ำและ 5) การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

ในการกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ จะเริ่มจากการกำหนดค่าขั้นหมายมาตราหรือค่าความละเอียดของสเกลวัดปริมาตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการกำหนดปริมาตรต่ำสุดของการเติมของเหลวในแต่ละครั้ง (Minimum Filling Step Volume) [3] ได้ ส่วนการกำหนดปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมน้ำแต่ละครั้ง (Maximum Filling Step Volume) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Verch และ Bonke และกราฟค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้ของปริมาตรที่เติมแต่ละครั้งสัมพัทธ์ [3]

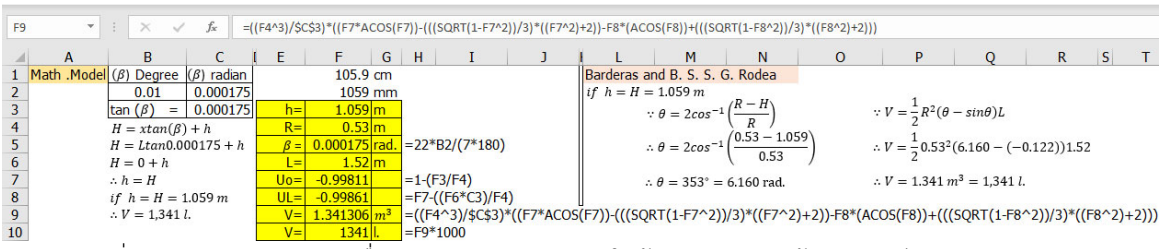
ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้งได้อ้างอิงตารางของ PTB Testing Instructions [3] ซึ่งคล้ายกับการเติมของเหลวตามจุดเชบีเชฟ (Chebyshev Nodes) คือเติมของเหลวในปริมาณน้อยๆบริเวณใกล้ก้นถัง และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นบริเวณกึ่งกลางถัง และเติมของเหลวในปริมาณน้อยลงอีกครั้งเมื่อระดับน้ำใกล้เต็มถังบรรจุ ด้วยวิธีการเติมของเหลวเช่นนี้ นอกจากจะช่วยลดความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วงแล้ว ยังช่วยลดเวลา

ในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้มาก สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะเก็บข้อมูลเพื่อทำการสอบเทียบเพียง 9 คู่ น้อยกว่า Aguilar และ Villegas [6] ที่เก็บข้อมูลเพื่อทำการสอบเทียบ 21 คู่ โดยมีข้อมูลอยู่ 11 คู่ที่นำมาใช้กำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชบีเชฟ

จากนั้นจึงนำข้อมูลการสอบเทียบมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบ โดยการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ และตัวแบบคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ว่าฟังก์ชันนั้นมีความสมรูปกับข้อมูลหรือไม่ และยังต้องพิจารณาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดว่าอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) หรือไม่อีกด้วย

ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเกิดการเอียงของถัง แผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแบบคณิตศาสตร์สามารถสร้างแผนภาพการสอบเทียบที่สมรูปกับข้อมูลการเติมน้ำ อีกทั้งยังผ่านเกณฑ์หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันพหุนาม

ข้อเสนอแนะในการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์คือ 1) บริษัทฯสามารถนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยแผนภาพสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์โดยมีค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่สามารถตกลงกันได้ระหว่างบริษัทฯกับลูกค้า ทั้งนี้เนื่องจากลูกค้าให้ข้อมูลว่า ระดับน้ำมันที่ต้องสำรองในถังกรณีฉุกเฉินไม่ควรน้อยกว่าครึ่งถังหรือไม่น้อยกว่าระดับความสูง 675 มม. ดังนั้น แม้ว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ในตารางที่ 6 จะมีอยู่บางช่วงที่ไม่สามารถผ่านเกณฑ์ (Fail) เงื่อนไขความผิดพลาด (%Error) ที่ระดับต่ำกว่า 675 มม. แต่ก็เป็นเงื่อนไขที่พอจะยอมรับได้ 2) บริษัทฯสามารถนำแผนภาพการสอบเทียบนี้ไปใช้ในการอ้างอิงสำหรับการสร้างสเกลวัดปริมาตรให้กับลูกค้าได้ แต่ต้องให้ข้อมูลกับลูกค้าว่า สเกลวัดปริมาตรจะมีความถูกต้องแม่นยำเมื่อระดับความสูงของของเหลวมีค่าไม่น้อยกว่า 675 มม. หากระดับของเหลวมีค่าต่ำกว่าครึ่งถังจะทำให้สเกลวัดปริมาตรอ่านค่าผิดพลาดได้มากถึง 2% 3) หากต้องการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยใช้แผนภาพการสอบเทียบจากโปรแกรม MS Excel จะสามารถทำได้โดยการเลื่อนเมาส์ไปยังระดับความสูงที่ต้องการทราบค่าปริมาตรที่สอดคล้องกัน เช่น ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรที่ระดับความสูง 610 mm ให้เลื่อนเมาส์ไปยังเส้นโค้งใกล้ค่าระดับความสูง 610 mm โปรแกรม MS Excel จะบอกค่าปริมาตรที่สอดคล้อง ซึ่งในที่นี้จะอ่านค่าได้เท่ากับ 820.16 ลิตร เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 7 4) หากต้องการความถูกต้องแม่นยำในการสอบเทียบมากขึ้น ควรเลือกใช้ถังตวงแบบมาตรา (Prover Tank) ซึ่งเป็นแบบมาตราอ้างอิง (Reference Standards) ที่มีลำดับความสำคัญของแบบมาตรา (Standard) ที่สูงกว่าอุปกรณ์มาตรวัดน้ำซึ่งเป็นแบบมาตราใช้งาน(Working Standards) ที่มีลำดับความสำคัญในระดับต่ำที่สุด มาแทนวิธีการชั่งน้ำหนักทางอ้อมด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ การที่บริษัทฯ เลือกใช้วิธีการชั่งน้ำหนักทางอ้อมเนื่องจาก ลูกค้ามิได้มีวัตถุประสงค์ในการนำถังบรรจุน้ำมันไปซื้อขายน้ำมันเพื่อคิดภาษีอากร เพียงแต่ต้องการนำมาใช้ในการสำรองน้ำมันสำหรับระบบปั๊มดับเพลิงกรณีฉุกเฉินเท่านั้น 5) พนักงานสามารถลดเวลาในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้โดยอ้างอิงตาราง PTB Testing Instructions [3] มาปรับใช้ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำลงในถังบรรจุ ซึ่งสอดคล้องกับ Aguilar และ Villegas [6] ที่ได้ประยุกต์ใช้เชบีเชฟโหนด (Chebyshev Node) มากำหนดจำนวนครั้งในการเติมน้ำ 6) บริษัทฯอาจยกเลิกขั้นตอนการสอบเทียบที่บริษัทฯ ให้เหลือแต่ขั้นตอนติดตั้งให้ลูกค้าเพียงแห่งเดียว เพื่อตัดปัญหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและการเอียงของถัง 7) เพื่อป้องกันการเติมน้ำมันล้นถัง บริษัทจะต้องแจ้งให้ลูกค้าทราบว่า ไม่ควรเติมน้ำมันลงในถังเกินกว่าปริมาตรสูงสุดใช้งาน 1,300 ลิตร แม้ว่าถังจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 ม. ความยาว 1.52 ม. จะสามารถเติมได้ถึงระดับความสูงที่ใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุ ซึ่งหากเทียบเป็นปริมาตรจะได้เท่ากับ 1,341 ลิตร รายละเอียดการคำนวณปริมาตรดังกล่าวโดยใช้ตัวแบบ



รูปที่ 8 การคำนวณปริมาตรเมื่อระดับความสูงของเหลวใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุ

คณิตศาสตร์และสมการของ Barderas และ Rodea [11] ด้วยโปรแกรม MS Excel สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณขนิษฐา กินวารี กรรมการผู้จัดการบริษัท พีเค วอเตอร์ปั๊มชิสเท่ม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์สถานที่และบุคลากร และขอขอบคุณ คุณปิยะ แซ่แต้ วิศวกรบริษัทฯ ที่ช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Knyva, M. Knyva and J. Rainys, “New Approach to Calibration of Vertical Fuel Tanks,” *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 8, pp. 37-40, 2013.

[2] J. Suttanarak and S. Shusuwan, *Calculation of Volumetric Calibration Results (Revised Edition).* Nonthaburi, Central Bureau of Weights & Measures, 2015, pp. 347-416.

[3] V. Visutthatham and S. Shusuwan, *Fixed Storage Tank in the form of Horizontal Cylinder*. Nonthaburi, Central Bureau of Weights & Measures, 2002.

[4] National Institute of Metrology (Thailand), *JCGM 200:2008 (En/Th) International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).* Pathum Thani: National Institute of Metrology (Thailand), 2008.

[5] O. O. Agboola, P. P. Ikubanni, R. A. Ibikunle, A. A. Adediran and B. T. Ogunsemi, “Generation of Calibration Charts for Horizontal Petroleum Storage Tanks Using Microsoft Excel,” *MAPAN32*, pp. 321–327, 2017.

[6] J. J. Aguilar-Mamani and Z. Villegas, “Model of Optimization of Error and Uncertainty in Generation of Calibration Charts for Horizontal Storage Tank,” *in Phys.: Conf. ser*, Bristol, 2021, pp. 1-8.

[7] Department of Petroleum Resources (DPR), *Procedure Guide for the Determination of the Quantity and Quality of Petroleum and Petroleum Products at Custody Transfer Point*. Victoria Island, Lagos: Department of Petroleum Resources, 2019.

[8] Play Solution Technology (2021, June 10). Why Calibration - Why is Calibration Important? [Online]. Available: https: //www.playsotec.com

[9] Beta Valve Systems Ltd. (2011, June 13). Water Meter Data Sheets Explained - ISO 4064 [Online]. Available: https://www.betavalve.com

[10] Central Bureau of Weights and Measures (2021, June 10). The water volume meter of

the accuracy class (CLASS) B compared to the accuracy class according to the new Ministry's notification [Online]. Available: http://www.cbwmthai.org

[11] A. V. Barderas and B. S. S. G. Rodea, "How to Calculate the Volumes of Partially Full Tanks," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 53, no. 4, pp. 1-7, 2016.

[12] V. Barwick, *Preparation of Calibration Curve: A Guide for Best Practice*. Department of Trade and Industry as part of the National Measurement System Valid Analytical Measurement (VAM) Program, 2003.

[13] EA Laboratory Committee, "Calculation of the Standard Uncertainty of the Output Estimate," in *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, EA European Accreditation, 2013, pp. 8-11.

[14] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG1), "G.6 Summary and conclusions," in *JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Bureau international des poids et mesures (BIPM), 2008, pp. 88-89.