

การสอบเทียบปิเปตต์ด้วยชุดสอบเทียบปิเปตต์ต้นแบบ

Calibration of volumetric pipettes using a prototype of a high accuracy pipette calibration set

5

อัจฉราวรรณ วัฒนหัตถกรรม^{1*}, วีระชัย วาริยาตร์¹, บุญธรรม ลิ้มปิยพันธ์¹

Acharawan Wattanahuttakum^{1*}, Weerachai Variyart¹, Boontham Limpiyapun¹

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปวิธีการสอบเทียบเครื่องแก้วปริมาตรจะเป็นไปตามเอกสารมาตรฐาน อย่างไรก็ตามผลการวัดอาจผิดพลาดได้เนื่องจากการปรับระดับท้องน้ำหรือส่วนโค้งล่างสุดของ meniscus ไม่อยู่บนขีดบอกปริมาตรของปิเปตต์ งานวิจัยนี้ได้นำเอาชุดสอบเทียบปริมาตรของปิเปตต์ที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านมวลและปริมาตรของกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบเครื่องแก้วชนิดปิเปตต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผิดพลาดที่มาจาก การวัดของผู้ปฏิบัติงาน (human error) ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถอ่านระดับ meniscus ได้ตรงตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิม ห้องปฏิบัติการดำเนินการทดสอบ 2 ส่วน คือ การหาเวลาการไหลของของเหลวออกจากปิเปตต์ (delivery time) และการหาค่าปริมาตรของเครื่องแก้วที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างการใช่วิธีสอบเทียบแบบเดิมและใช้ชุดต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่าเวลาการไหล (delivery time) ที่วัดด้วยวิธีการสอบเทียบแบบเดิมและการใช่วิธีสอบเทียบโดยใช้ชุดต้นแบบที่นั้นยังคงให้ค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่กำหนดไว้ และการหาค่าปริมาตรของปิเปตต์จากการใช้ชุดต้นแบบนั้นให้ผลการวัดเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งยืนยันได้จากการประเมินผลด้วยการใช้ En number ที่พบว่า En number ≤ 1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAkkS และจากห้องปฏิบัติการที่ให้ค่าอ้างอิงด้านเครื่องแก้วและได้รับการรับรองตาม ISO/IEC 17025 ของประเทศไทย

Abstract

The calibration procedure used to determine the volume of measuring laboratory glassware was generally guided in the international standard. However, a measurement error was possibly occurred if the position of the lowest point of the meniscus was not horizontally tangent to the plane of the upper edge of the graduation line. In this research, a semi-automated pipette calibration set designed and developed by Mass and Volume Laboratory under the Department of Science and Service (DSS) was used for pipette calibration. The use of this prototype device was aimed to reduce the human error from reading meniscus and improve measurement repeatability. Two experiments were investigated. One was to determine the delivery time of pipettes and the other was to measure the actual volume of pipettes at the standard reference temperature of 20°C. The results obtained from using the conventional method and the pipette calibration set were compared. For testing of the delivery time, the results from both manners were almost the same and they were within the limits specified in the international standard. For the volume determination, it was found that the use of the prototype set provided the satisfactory performance as confirmed by the En number less than or equal to 1 (En number ≤ 1). This value was calculated using the measurement values from the DSS laboratory and the reference value from laboratory accredited by DAkkS and Thailand accreditation body according to ISO/IEC 17025.

คำสำคัญ: การสอบเทียบ เครื่องแก้วปริมาตร ปิเปตต์ เมนิสคัส ระยะเวลาการไหล

Keywords: Calibration, Volumetric glassware, Pipette, Meniscus, Delivery time

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* Corresponding author Email address : acharawan@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องแก้วปริมาตรที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีหลากหลายประเภท ปีเปตต์เป็นหนึ่งในกลุ่มเครื่องแก้วปริมาตรที่สำคัญและใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบสำหรับการตรวจและวัดปริมาตรของของเหลวหรือสารเคมี ให้ได้ปริมาตรถูกต้องตามต้องการ [1-4] หากปีเปตต์ผ่านการใช้งานมาบ้างแล้ว ก็อาจทำให้ปริมาตรของ ปีเปตต์คลาดเคลื่อนไป ดังนั้น เพื่อให้ผลการวัดปริมาตรของของเหลวถูกต้องและแม่นยำจึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบและทวนสอบปริมาตรของปีเปตต์ก่อนนำมาใช้งานอีกครั้ง เพื่อยืนยันความถูกต้องของปริมาตรว่าเป็นไปตามเกณฑ์การใช้งานหรือไม่ ทำให้ผลการวิเคราะห์ทดสอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับสำหรับผู้ที่ให้นำผลการวิเคราะห์ทดสอบไปใช้ ซึ่งสอดคล้องกับการประกันคุณภาพการวิเคราะห์ทดสอบตามระบบประกันคุณภาพของ ISO 17025 [5]

ปัจจุบันการสอบเทียบปีเปตต์ต้องใช้ความชำนาญของเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างมาก เนื่องจากสาเหตุหลักของความผิดพลาดของการวัดเกิดจากการปรับระดับตำแหน่งของส่วนโค้งของผิวน้ำในหลอดแก้วที่เกิดจากแรงตึงผิวของน้ำที่กระทำกับหลอดแก้ว (meniscus) การวัดปริมาตรที่ถูกต้องนั้นต้องให้ท้องน้ำหรือส่วนโค้งล่างสุดของ meniscus อยู่บนขีดบอกปริมาตรของปีเปตต์ [6] หากผู้ปฏิบัติงานปรับระดับตำแหน่งของ meniscus สูงหรือต่ำกว่าขีดบอกปริมาตรจะส่งผลให้ปริมาตรของปีเปตต์ผิดพลาดด้วย และจากรายงานผลการเข้าร่วมกิจกรรมทดสอบความชำนาญด้านเครื่องแก้วปริมาตร จัดโดยศูนย์บริหารจัดการทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ระหว่างวันที่ 26 พฤศจิกายน 2553 – 22 มีนาคม 2554 ที่พบว่ามีจำนวนห้องปฏิบัติการมากกว่าร้อยละ 70 ที่แสดงผลการสอบเทียบไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับอันเป็นผลมาจากสาเหตุดังกล่าว

งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาชุดสอบเทียบปริมาตรของปีเปตต์ที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านมวลและปริมาตรของกรมวิทยาศาสตร์บริการ สร้างและพัฒนาขึ้นมาขึ้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือต้นแบบสำหรับการสอบเทียบเครื่องแก้วชนิดปีเปตต์ เครื่องมือดังกล่าวนี้จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถอ่านขีดปริมาตรได้ง่ายและสามารถบันทึกภาพระดับท้องน้ำ ณ ขีดบอกปริมาตรโดยระบบคอมพิวเตอร์ ทำให้ลดความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดของผู้ปฏิบัติงานที่ทำการสอบเทียบ ด้วยวิธีการแบบเดิม ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดซ้ำหลายๆ ครั้ง ทำให้เกิดความเที่ยงในการวัดมากยิ่งขึ้น และส่งผลให้การวัดด้านปริมาตรมีความถูกต้องแม่นยำ เพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการสอบเทียบ

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

2.1.1 เครื่องแก้วปริมาตรชนิดปีเปตต์ขนาด 1 มิลลิลิตร ถึง 10 มิลลิลิตร ซึ่งมีจำนวน 2 ชุดคือ

ตัวอย่างชุดที่ 1 – เครื่องแก้วปริมาตรที่มีค่าอ้างอิง

มาตรฐานตามใบรับรองผลการสอบเทียบจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจากสถาบัน Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) จากประเทศสาธารณรัฐเยอรมนี จำนวน 4 ตัวอย่าง มีขนาดความจุ 1, 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ที่ระดับชั้นความถูกต้อง class AS ซึ่งถูกผลิตตามมาตรฐาน ISO 648 : 2008 [1]

ตัวอย่างชุดที่ 2 – เครื่องแก้วปริมาตรชุดนี้ไม่มีค่าอ้างอิงมาตรฐาน แต่ได้รับการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 และเป็นห้องปฏิบัติการอ้างอิงทางด้านเครื่องแก้วปริมาตรของประเทศไทย มีขนาดความจุ 1, 5 และ 10 มิลลิลิตร โดยแต่ละขนาดความจุมีจำนวน 6 ตัวอย่าง ปีเปตต์ชุดนี้มีระดับชั้นความถูกต้อง class A ซึ่งถูกผลิตตามมาตรฐาน ASTM E969-02 : 2012 [2]

2.1.2 เครื่องชั่ง (เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น ME215S มีความสามารถในการอ่านได้ละเอียด (readability) 0.00001 กรัม ความสามารถในการชั่งในสูงสุด (capacity) 210 กรัม)

2.1.3 น้ำปราศจากไอออน (deionized water) [8]

2.1.4 ขวดชั่งสาร

2.1.5 น้ำยาล้างเครื่องแก้ว

2.1.6 กรดไนตริก

2.1.7 เครื่องวัดเวลา

2.2 ขั้นตอนการล้างทำความสะอาดเครื่องแก้ว

2.2.1 นำเครื่องแก้วมาล้างด้วยน้ำยาล้างเครื่องแก้ว (Detergent) แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด

2.2.2 ทำความสะอาดคราบสกปรกที่อยู่ในเครื่องแก้วด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (10% – 30%)

2.2.3 แช่เครื่องแก้วทิ้งไว้ โดยระยะเวลาในการแช่นั้นขึ้นอยู่กับความสกปรกของเครื่องแก้ว

2.2.4 ล้างเครื่องแก้วที่แช่กรดหรือด่างด้วยน้ำสะอาดแล้วตามด้วยน้ำกลั่น

2.2.5 ทิ้งไว้ให้แห้งในอุณหภูมิห้อง

2.3 การทดสอบ/สอบเทียบ

หลักการสอบเทียบปีเปตต์คือการชั่งน้ำหนักของน้ำที่ถูกปล่อยออกจากปีเปตต์ภายใต้สภาวะแรงเนื่องจากอัตราเร่งความโน้มถ่วงของโลก (gravimetric force) แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาค่าปริมาตรของปีเปตต์ที่อุณหภูมิมาตรฐานที่ 20 องศาเซลเซียส การสอบเทียบปีเปตต์จะตรวจสอบ 2 หัวข้อ ดังนี้

2.3.1 เวลาการไหลของของเหลวออกจากปีเปตต์ (delivery time)

เวลาการไหลของของเหลวจะเริ่มนับเวลาตั้งแต่ปล่อยของเหลวจากตำแหน่งขีดบอกปริมาตรจนกระทั่งของเหลวหยุดไหล ระยะเวลาการไหลของปีเปตต์แต่ละขนาดความจุจะถูกกำหนดไว้ในเอกสารมาตรฐาน ISO 648:2008 หรือ ASTM E969-02 [1,2]

2.3.2 ปริมาตรของปีเปตต์ที่ถูกต้อง ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 20 องศาเซลเซียส (volume at the reference temperature of 20°C)

การหาค่าปริมาตรของปิเปตต์ที่ถูกต้อง ณ อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) ที่ใช้ในการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO หรือ ASTM [6,7] โดยห้องปฏิบัติการได้ดำเนินการสอบเทียบปิเปตต์ขนาดต่าง ๆ ตามวิธีมาตรฐาน โดยวิธีการแบบปกติ (ตาม 2.3.2.1) และแบบใช้ชุดสอบเทียบปิเปตต์ (ตาม 2.3.2.2) และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิงของปิเปตต์ที่มีใบรับรองผลการสอบเทียบ

2.3.2.1 การสอบเทียบปิเปตต์แบบปกติทั่วไป มีวิธีการดังนี้ เริ่มจากดูดน้ำเข้าไปในปิเปตต์จนระดับน้ำอยู่เหนือขีดปริมาตร จากนั้นปรับระดับ meniscus ณ ขีดปริมาตร และปล่อยน้ำสู่ภาชนะรองรับแล้วนำไปชั่ง

2.3.2.2 การสอบเทียบปิเปตต์โดยใช้ชุดสอบเทียบปิเปตต์ ซึ่งชุดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมาจะทำงานด้วยหลักการที่สอดคล้องกันกับการสอบเทียบปิเปตต์แบบวิธีปกติ เพื่อให้กระบวนการสอบเทียบเป็นไปตามวิธีมาตรฐาน การออกแบบสร้างชุดสอบเทียบนี้จะต้องคำนึงถึงระบบต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการวัดค่าปริมาตร เริ่มตั้งแต่การออกแบบให้ปิเปตต์ตั้งฉากเพื่อให้ขีดปริมาตรอยู่แนวระดับขนานกับพื้นโลก ระบบการควบคุมการดูดน้ำเข้าสู่ปิเปตต์/ปล่อยน้ำออกจากปิเปตต์ การอ่านปิเปตต์ในระดับสายตาตามวิธีการที่ถูกต้อง

ด้วยแนวคิดดังกล่าว คณะนักวิจัยจึงได้สร้างชุดสอบเทียบต้นแบบระบบกึ่งอัตโนมัติ ลักษณะดังรูปที่ 1 โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถอ่านขีดปริมาตรได้อย่างชัดเจน ลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะปรับระดับ meniscus ณ ขีดบอกริมาตร ลดความคลาด

เคลื่อนของการวัด ทำให้การวัดปริมาตรมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเพื่อให้ได้ผลการวัดซ้ำ (repeatability) ที่ดี ชุดสอบเทียบปริมาตรของปิเปตต์ต้นแบบประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

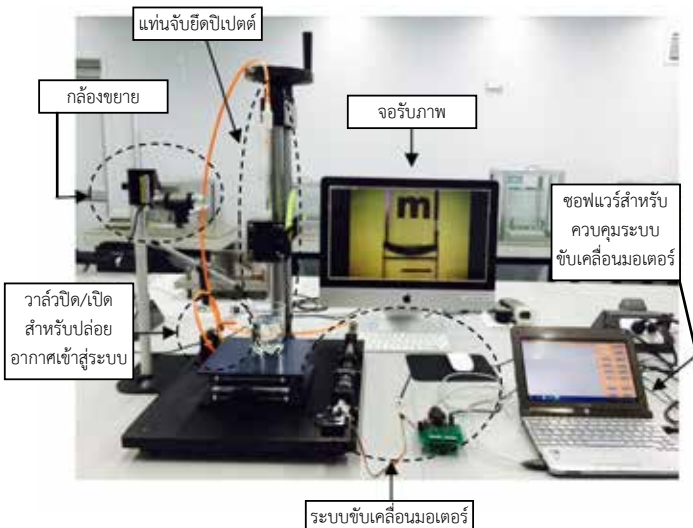
ส่วนที่ 1 แท่นจับปิเปตต์ สำหรับยึดปิเปตต์ให้ตั้งอยู่ในแนวฉาก มีอุปกรณ์สำหรับหมุนปรับปิเปตต์ขึ้น-ลง ได้ตามระดับที่ต้องการ และแท่นวางภาชนะรองรับที่สามารถปรับระดับขึ้น-ลงได้

ส่วนที่ 2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่มีแผงวงจรควบคุมมอเตอร์ ระบบมอเตอร์ที่เป็นแบบ gear box ซึ่งใช้สำหรับการดูดของเหลวเข้าปิเปตต์และปล่อยของเหลวออกเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ระดับและท่อลูกสูบที่จะทำงานเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับการดูดและปล่อยของเหลวเข้า-ออกจากปิเปตต์

ส่วนที่ 3 ซอฟต์แวร์ที่ห้องปฏิบัติการพัฒนาขึ้นมา เพื่อควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับดูดและปล่อยของเหลว โดยสามารถปรับระดับความเร็วให้เร็วขึ้น-ช้าลงได้เพื่อช่วยในการปรับระดับ meniscus

ส่วนที่ 4 กล้องขยายเพื่อรับและบันทึกภาพขณะปรับระดับ meniscus และขยายภาพ meniscus ให้เห็นชัดโดยผ่านจอร์รับภาพ ซึ่งกล้องขยายนี้จะเชื่อมต่อเข้ากับจอร์รับภาพผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณ USB และมีซอฟต์แวร์สำหรับบันทึกภาพ

ส่วนที่ 5 วาล์วสำหรับปิดหรือเปิดอากาศ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้าสู่ปิเปตต์แล้วเกิดเป็นฟองอากาศขึ้นภายในปิเปตต์ ทำให้ไม่สามารถปรับระดับของของเหลวให้ตรงกับขีดบอกริมาตร



รูปที่ 1 ชุดสอบเทียบปริมาตรของปิเปตต์

การสอบเทียบด้วยชุดต้นแบบนี้มีขั้นตอนการทำงานโดยสังเขปดังนี้

- ยึดปิเปตต์เข้ากับแท่นจับปิเปตต์ แล้วปรับขยายภาพขีดปริมาตรให้เห็นชัดเจนบนจอภาพ

- วางบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นบนฐานวางภาชนะ ปรับระดับฐานวางบีกเกอร์เพื่อให้ปลายปิเปตต์จุ่มน้ำ
- ปิดวาล์วเพื่อไม่ให้อากาศรั่วไหลเข้าไปในระบบ แล้วเข้าสู่โปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อสั่งงานให้มอเตอร์ขับเคลื่อนลูกสูบเพื่อดูดน้ำเข้าสู่ปิเปตต์
- หยุดการทำงานของมอเตอร์ เมื่อน้ำถูกดูดขึ้นไปอยู่เหนือระดับขีดบอกริมาตรประมาณ 1 เซนติเมตร
- นำบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นออกจากฐานวางภาชนะ เช็ดน้ำที่เกาะบริเวณส่วนปลายปิเปตต์ออก
- ปรับระดับปริมาตรของน้ำให้ส่วนโค้งล่างสุดของ meniscus อยู่บนเส้นขีดบอกริมาตรของปิเปตต์ตามกระบวนการสอบเทียบ จากนั้นสั่งงานผ่านซอฟต์แวร์ให้มอเตอร์ขับเคลื่อนเพื่อปล่อยของเหลวออกจากปิเปตต์ ขณะปรับตำแหน่งของ meniscus ซึ่งผู้ปฏิบัติงานสามารถมองภาพ meniscus ที่ชัดเจนผ่านกล้องขยาย ทำให้สามารถอ่านค่าได้ถูกต้อง เมื่อปรับระดับได้แล้ว สั่งมอเตอร์ให้หยุดทำงาน
- ปล่อยน้ำออกจากปิเปตต์ด้วยการเปิดวาล์วเพื่อให้อากาศเข้าไปในปิเปตต์ผลักดันน้ำให้ไหลออกตามสภาวะแรงเนื่องจากอัตราเร่งความโน้มถ่วงของโลก (gravimetric force) แล้วนำไปชั่ง (สำหรับการวัดค่าปริมาตร) หรือจับเวลาตั้งแต่เริ่มปล่อยน้ำจนน้ำหยุดไหล (สำหรับการหาค่า delivery time)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการทดสอบ

3.1.1 การหาเวลาการไหลของของเหลว (delivery time)

ผลการทดสอบหาเวลาการไหลของของเหลวของตัวอย่างชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 โดยใช้วิธีการปกติเปรียบเทียบกับการใช้ชุดสอบเทียบ ต้นแบบ แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เวลาการไหลของตัวอย่างชุดที่ 1 โดยเปรียบเทียบเวลาการไหลระหว่างการใช่วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ

ตัวอย่างชุดที่ 1	ช่วงเวลาการไหล (วินาที) อ้างอิงจาก ISO 648	เวลาการไหล (วินาที)	
		โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1 ml	7 - 11	7	7
2 ml	7 - 11	10	9
5 ml	9 - 13	11	10
10 ml	11 - 15	12	12

ตารางที่ 2 เวลาการไหลของตัวอย่างชุดที่ 2 ที่ขนาดความจุ 1 ml 5 ml และ 10 ml โดยเปรียบเทียบเวลาการไหลระหว่างการใช่วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ

ตัวอย่างชุดที่ 2	ช่วงเวลาการไหล (วินาที) อ้างอิงจาก ASTM E969-02	เวลาการไหล (วินาที)	
		โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1-PT0802	8 - 60	17	17
1-PT0803	8 - 60	14	15
1-PT0804	8 - 60	11	12
1-PT0806	8 - 60	13	12
1-PT0807	8 - 60	17	18
1-PT0809	8 - 60	16	16
5-PT0802	8 - 60	12	12
5-PT0803	8 - 60	13	12
5-PT0804	8 - 60	13	13
5-PT0806	8 - 60	14	14
5-PT0807	8 - 60	12	12
5-PT0809	8 - 60	15	15
10-PT0802	15 - 60	19	19
10-PT0803	15 - 60	20	20

10-PT0804	15 - 60	23	23
10-PT0806	15 - 60	18	18
10-PT0807	15 - 60	17	17
10-PT0809	15 - 60	15	16

3.1.2 การหาค่าปริมาตรของปิเปตต์ที่ถูกต้อง ณ อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส (volume at the reference temperature of 20°C)

ค่าปริมาตรของปิเปตต์ ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 20 องศาเซลเซียส จะคำนวณโดยใช้สมการที่ (1)

$$V_{20} = (I_L - I_E) \left[\frac{1}{(\rho_s - \rho_l)} \right] \left[1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \right] [1 - \alpha(t_r - 20)] \quad (1)$$

แทนค่า $m = I_L - I_E$ จะได้ $V_{20} = m \left[\frac{1}{(\rho_s - \rho_l)} \right] \left[1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \right] [1 - \alpha(t_r - 20)] \quad (2)$

เมื่อ V_{20} = ปริมาตรของเครื่องแก้วที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 20 °C (cm³ หรือ ml)

I_L = น้ำหนักของภาชนะที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ (g)

I_E = น้ำหนักของภาชนะเปล่า (g)

P_w = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm³)

P_A = ความหนาแน่นของอากาศขณะสอบเทียบ (g/cm³)

P_B = ความหนาแน่นของมวลมาตรฐานในเครื่องชั่ง (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8.0 g/cm³)

α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อนสำหรับวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแก้ว (cm³/°C)

T_w = อุณหภูมิของน้ำขณะสอบเทียบ (°C)

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดปริมาตรเป็นค่าความไม่แน่นอนขยายที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3)

$$U = k \times u_c \quad (3)$$

เมื่อ k = Coverage factor ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

u_c = ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

และ

$$u_c(V_{20}) = \sqrt{c_A^2 u_A^2 + c_m^2 u_{B1}^2 + c_m^2 u_{B2}^2 + c_m^2 u_{L1}^2 + c_m^2 u_{L2}^2 + c_m^2 u_{Rep1}^2 + c_m^2 u_{Rep2}^2 + c_m^2 u_{R1}^2 + c_m^2 u_{R2}^2 + c_{tw}^2 u_{tw}^2 + c_{ta}^2 u_{ta}^2 + c_P^2 u_P^2 + c_h^2 u_h^2 + c_\alpha^2 u_\alpha^2 + c_{mc}^2 u_{mc}^2}$$

- เมื่อ U_A = ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำ
 U_{B1} = ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)
 U_{B2} = ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)
 U_{L1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก linearity ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)
 U_{L2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก linearity ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)
 U_{Rep1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก reproducibility ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)
 U_{Rep2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก reproducibility ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)
 U_{R1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก readability ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)
 U_{R2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก readability ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)
 U_{tw} = ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิของน้ำ
 U_{ta} = ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิของห้อง
 U_P = ค่าความไม่แน่นอนจากความดันบรรยากาศ
 U_h = ค่าความไม่แน่นอนจากความชื้นสัมพัทธ์
 U_a = ค่าความไม่แน่นอนจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเครื่องแก้ว
 U_{mc} = ค่าความไม่แน่นอนจากการปรับปริมาตรหรือปรับระดับ meniscus ณ ซีตบอกระดับปริมาตร

และค่า c เป็น sensitivity coefficient ซึ่งคำนวณโดยใช้ partial derivatives ของสมการ (2) จะได้

$$c_m = \frac{\partial V_{20}}{\partial m}, c_{tw} = \frac{\partial V_{20}}{\partial t_w}, c_{t_a} = \frac{\partial V_{20}}{\partial t_a}, c_P = \frac{\partial V_{20}}{\partial P}, c_h = \frac{\partial V_{20}}{\partial h}, c_\alpha = \frac{\partial V_{20}}{\partial \alpha}, c_A = 1 \text{ และ } c_{mc} = 1$$

ตารางที่ 3 และ 4 แสดงค่าผลการวัดปริมาตรและค่าความไม่แน่นอนของการวัดจากการสอบเทียบ [9, 10] ของตัวอย่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 โดยใช้วิธีการสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ ซึ่งตารางที่ 3 นั้นจะเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAKKS และตารางที่ 4 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการอ้างอิงด้านเครื่องแก้วที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

3.2 วิจารณ์ผลการทดสอบ

3.2.1 การหาเวลาการไหลของของเหลว (delivery time)

ผลทดสอบในตารางที่ 1 และ 2 จากตัวอย่างทั้ง 2 ชุดจะเห็นได้ว่าการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบเพื่อทำการทดสอบหาค่า delivery time นั้นให้ผลการวัดเทียบเท่ากับการใช้วิธีแบบเดิมที่ควบคุมด้วยมือ และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าชุดสอบเทียบต้นแบบนี้มีประสิทธิภาพสูง ทำงานตามหลักวิธีการสอบเทียบ ระบบวาล์วที่ถูกออกแบบมาก็จะช่วยควบคุมการไหลเข้าและออกของอากาศภายในปิเปตต์ด้วย เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดในการหาค่า delivery time เพราะหากระบบวาล์วทำงานผิดพลาดหรือเกิดรั่วก็จะทำให้อากาศไหลเข้าปิเปตต์เกิดเป็นฟองอากาศในแท่งแก้ว หรืออาจทำให้น้ำไหลออกจากปิเปตต์ตลอดเวลาจนทำให้ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำให้หยุดนิ่ง ณ ซีตบอกระดับปริมาตรได้

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดปริมาตรเป็นค่าความไม่แน่นอนขยายที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3)

$$U = k \times u_c \quad (3)$$

เมื่อ k = Coverage factor ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

u_c = ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

และ

$$u_c(V_{20}) = \sqrt{c_A^2 u_A^2 + c_m^2 u_{B1}^2 + c_m^2 u_{B2}^2 + c_m^2 u_{L1}^2 + c_m^2 u_{L2}^2 + c_m^2 u_{Rep1}^2 + c_m^2 u_{Rep2}^2 + c_m^2 u_{R1}^2 + c_m^2 u_{R2}^2 + c_{tw}^2 u_{tw}^2 + c_p^2 u_p^2 + c_h^2 u_h^2 + c_a^2 u_a^2 + c_{mc}^2 u_{mc}^2}$$

เมื่อ U_A = ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำ

U_{B1} = ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)

U_{B2} = ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)

U_{L1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก linearity ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)

U_{L2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก linearity ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)

U_{Rep1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก reproducibility ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)

U_{Rep2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก reproducibility ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)

U_{R1} = ค่าความไม่แน่นอนจาก readability ของเครื่องชั่ง (ภาชนะเปล่า)

U_{R2} = ค่าความไม่แน่นอนจาก readability ของเครื่องชั่ง (ภาชนะที่บรรจุน้ำ)

U_{tw} = ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิของน้ำ

U_{ta} = ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิของห้อง

U_p = ค่าความไม่แน่นอนจากความดันบรรยากาศ

U_h = ค่าความไม่แน่นอนจากความชื้นสัมพัทธ์

U_a = ค่าความไม่แน่นอนจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเครื่องแก้ว

U_{mc} = ค่าความไม่แน่นอนจากการปรับปริมาตรหรือปรับระดับ meniscus ณ ขีดบอกปริมาตร

และค่า c เป็น sensitivity coefficient ซึ่งคำนวณโดยใช้ partial derivatives ของสมการ (2) จะได้

$$c_m = \frac{\partial V_{20}}{\partial m}, c_{t_w} = \frac{\partial V_{20}}{\partial t_w}, c_{t_a} = \frac{\partial V_{20}}{\partial t_a}, c_p = \frac{\partial V_{20}}{\partial P}, c_h = \frac{\partial V_{20}}{\partial h}, c_a = \frac{\partial V_{20}}{\partial \alpha}, c_A = 1 \text{ และ } c_{mc} = 1$$

ตารางที่ 3 และ 4 แสดงค่าผลการวัดปริมาตรและค่าความไม่แน่นอนของการวัดจากการสอบเทียบ [9, 10] ของตัวอย่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 โดยใช้วิธีการสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ ซึ่งตารางที่ 3 นั้นจะเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DaKKS และตารางที่ 4 เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการอ้างอิงด้านเครื่องแก้วที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

3.2 วิจัยณ์ผลการทดสอบ

3.2.1 การหาเวลาการไหลของของเหลว (delivery time)

ผลทดสอบในตารางที่ 1 และ 2 จากตัวอย่างทั้ง 2 ชุดจะเห็นได้ว่าการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบเพื่อทำการทดสอบหาค่า delivery time นั้นให้ผลการวัดเทียบเท่ากับการใช้วิธีแบบเดิมที่ควบคุมด้วยมือ และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าชุดสอบเทียบต้นแบบนี้มีประสิทธิภาพสูง ทำงานตามหลักวิธีการสอบเทียบ ระบบวาล์วที่ถูกออกแบบมาจะช่วยควบคุมการไหลเข้าและออกของอากาศภายในปิเปตต์ด้วย เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดในการหาค่า delivery time เพราะหากระบบวาล์วทำงานผิดพลาดหรือเกิดรั่วก็จะทำให้อากาศไหลเข้าปิเปตต์เกิดเป็นฟองอากาศในแท่งแก้ว หรืออาจทำให้น้ำไหลออกจากปิเปตต์ตลอดเวลาจนทำให้ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำให้หยุดนิ่ง ณ ขีดบอกระดับปริมาตรได้

ตารางที่ 3 ผลการวัดตัวอย่างชุดที่ 1 โดยใช้วิธีแบบปกติและใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAkKS

ตัวอย่างชุดที่ 1	ค่าจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAkKS		ผลการสอบเทียบโดยวิธีปกติ		ผลการสอบเทียบโดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ	
	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)
1 ml	0.9975	0.0015	0.99431	0.0032	0.99700	0.0024
2 ml	2.0025	0.0025	1.99959	0.0019	2.00088	0.0018
5 ml	4.9980	0.0021	4.99606	0.0027	4.99876	0.0025
10 ml	9.9992	0.0031	9.99489	0.0028	9.99744	0.0021

ตารางที่ 4 ผลการวัดตัวอย่างชุดที่ 2 ที่ขนาดความจุ 1 ml 5 ml และ 10 ml โดยใช้วิธีแบบปกติและใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงด้านจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

ตัวอย่างชุดที่ 2	ค่าจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองตาม ISO/IEC 17025		ผลการสอบเทียบโดยวิธีปกติ		ผลการสอบเทียบโดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ	
	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)	ปริมาตร (ml)	±ค่าความไม่แน่นอน (ml)
1-PT0802	1.0028	0.00035	1.00524	0.0014	1.00249	0.0012
1-PT0803	1.0020	0.00062	1.00512	0.0014	1.00270	0.0013
1-PT0804	1.0004	0.00073	1.00129	0.0013	1.00087	0.0013
1-PT0806	1.0063	0.0006	1.00907	0.0016	1.00655	0.0013
1-PT0807	1.0115	0.00064	1.01259	0.0013	1.01115	0.0012
1-PT0809	1.0040	0.00058	1.00548	0.0014	1.00303	0.0012
5-PT0802	4.9989	0.00087	4.99921	0.0014	4.99871	0.0012
5-PT0803	5.0071	0.00083	5.00697	0.0020	5.00659	0.0013
5-PT0804	5.0091	0.00085	5.01159	0.0015	5.00774	0.0014
5-PT0806	5.0048	0.00087	5.00330	0.0014	5.00388	0.0023
5-PT0807	5.0001	0.00088	4.99859	0.0032	4.99960	0.0017
5-PT0809	5.0021	0.00091	5.00274	0.0016	5.00258	0.0012
10-PT0802	10.0269	0.0014	10.0298	0.0024	10.02528	0.0015
10-PT0803	10.0311	0.0015	10.03460	0.0036	10.02913	0.0023
10-PT0804	10.0198	0.0015	10.02238	0.0029	10.0184	0.0016
10-PT0806	10.0188	0.0015	10.02060	0.0022	10.01783	0.0028
10-PT0807	10.0141	0.0015	10.01401	0.0048	10.01560	0.0015
10-PT0809	10.0092	0.0016	10.00334	0.0032	10.00728	0.0015

3.2.2 การหาค่าปริมาตรของปิเปตต์ที่ถูกต้อง ณ อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส (volume at the reference temperature of 20°C)

การประเมินผลการสอบเทียบปิเปตต์ระหว่างการใช้วิธีสอบเทียบแบบปกติและวิธีการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ เปรียบเทียบผลการวัดกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAkkS (ตารางที่ 3) และจากห้องปฏิบัติการที่ให้ค่าอ้างอิงด้านเครื่องแก้วและได้รับการรับรองตาม ISO/IEC 17025 (ตารางที่ 4) ห้องปฏิบัติการใช้วิธีการประเมินผลโดยเลือกใช้ En number ที่คำนวณจากผลต่างระหว่างผลการวัดของห้องปฏิบัติการกับค่าอ้างอิง ทหารด้วยรากที่สองของผลรวมกำลังสองของค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของห้องปฏิบัติการและค่าอ้างอิง ดังแสดงในสมการข้างล่างนี้

$$E_n = \frac{|x - X|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

เมื่อ x คือ ผลการวัดของห้องปฏิบัติการ

X คือ ค่าอ้างอิง (assigned value) จากห้องปฏิบัติการอ้างอิง

U_{lab} คือค่าความไม่แน่นอนของห้องปฏิบัติการที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

U_{ref} คือค่าความไม่แน่นอนของค่าอ้างอิงที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สำหรับเกณฑ์การประเมิน En number เป็นดังนี้

ถ้า $E_n \leq 1$ แสดงว่าผลการสอบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (satisfactory)

ถ้า $E_n > 1$ แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (unsatisfactory)

ผลการประเมิน En number จากตารางที่ 5 และ 6 พบว่าผลการวัดปิเปตต์ ตัวอย่างขนาด 10 มิลลิลิตร (จากตัวอย่างชุดที่ 1) และตัวอย่าง 1-PT0802, 1-PT0803, 1-PT0806, 5-PT0804, 10-PT0802, 10-PT0809 (จากตัวอย่างชุดที่ 2) ได้ค่า En number > 1 เมื่อใช้วิธีปกติสอบเทียบ ซึ่งไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (unsatisfactory) แต่เมื่อทำการสอบเทียบตัวอย่างเดียวกันโดยใช้เครื่องต้นแบบ พบว่าค่า En number ≤ 1 แสดงว่าผลการสอบเทียบเป็นที่น่าพอใจอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5 ค่า En number ของตัวอย่างชุดที่ 1 จากการสอบเทียบโดยใช้วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองจาก DAkkS

ตัวอย่างชุดที่ 1	En number	
	โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1 ml	0.90	0.18
2 ml	0.99	0.59
5 ml	0.57	0.23
10 ml	1.03*	0.47

ตารางที่ 6 ค่า En number ของตัวอย่างชุดที่ 2 ที่ขนาดความจุ 1 ml 5 ml และ 10 ml จากการสอบเทียบโดยใช้วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงด้านจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

ตัวอย่างชุดที่ 2	En number	
	โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1-PT0802	1.62*	0.23
1-PT0803	2.04*	0.49
1-PT0804	0.60	0.32
1-PT0806	1.62*	0.19
1-PT0807	0.75	0.26
1-PT0809	0.98	0.73
5-PT0802	0.19	0.12
5-PT0803	0.06	0.33
5-PT0804	1.44*	0.83
5-PT0806	0.87	0.37
5-PT0807	0.45	0.32
5-PT0809	0.35	0.32
10-PT0802	1.04*	0.79
10-PT0803	0.90	0.72
10-PT0804	0.79	0.64
10-PT0806	0.68	0.31
10-PT0807	0.02	0.71
10-PT0809	1.02*	0.88

หมายเหตุ * หมายถึง ค่า En number > 1

สาเหตุที่ทำให้ได้ค่า E_n number อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ยอมรับนั้น อาจเกิดจากความผิดพลาดจากการปรับระดับตำแหน่ง meniscus ณ ขีดบอกปริมาตร การสอบเทียบแบบเดิมนั้นอาจทำให้ ผู้ปฏิบัติงานปรับระดับท้องน้ำสูงหรือต่ำกว่าขีดบอกปริมาตร ซึ่งจะมี ผลทำให้การวัดปริมาตรของปิเปตต์ผิดพลาด แต่การใช้ชุดสอบเทียบ ต้นแบบนี้จะมีกล่องขยายช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานเห็นภาพท้องน้ำชัดเจน ยิ่งขึ้น อ่านขีดปริมาตรได้ง่าย ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดซ้ำ หลาย ๆ ครั้ง ทำให้เกิดความเที่ยงในการวัดมากยิ่งขึ้น ซึ่งยืนยันได้ จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) ของผลการ วัดในตารางที่ 7 และ 8 ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ ให้ค่าการวัดซ้ำที่ดีกว่าการสอบเทียบโดยวิธีปกติ

ตารางที่ 7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดของตัวอย่างชุดที่ 1 จากการสอบเทียบโดยใช้วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ

ตัวอย่างชุดที่ 1	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	
	โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1 ml	0.0042	0.0019
2 ml	0.0021	0.0018
5 ml	0.0032	0.0019
10 ml	0.0042	0.0016

ตารางที่ 8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดของตัวอย่างชุดที่ 2 ที่ขนาดความจุ 1 ml 5 ml และ 10 ml จากการสอบเทียบโดยใช้วิธีสอบเทียบแบบปกติและการใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ

ตัวอย่างชุดที่ 2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	
	โดยวิธีปกติ	โดยใช้ชุดสอบเทียบต้นแบบ
1-PT0802	0.0010	0.0007
1-PT0803	0.0011	0.0009
1-PT0804	0.0009	0.0007
1-PT0806	0.0014	0.0007
1-PT0807	0.0008	0.0003
1-PT0809	0.0012	0.0006
5-PT0802	0.0010	0.0004
5-PT0803	0.0024	0.0007
5-PT0804	0.0009	0.0009

5-PT0806	0.0010	0.0008
5-PT0807	0.0026	0.0014
5-PT0809	0.0012	0.0004
10-PT0802	0.0025	0.0007
10-PT0803	0.0036	0.0017
10-PT0804	0.0029	0.0010
10-PT0806	0.0022	0.0022
10-PT0807	0.0050	0.0007
10-PT0809	0.0030	0.0006

4. สรุป (Conclusion)

การสอบเทียบปิเปตต์ด้วยชุดสอบเทียบปิเปตต์ต้นแบบที่เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติแทนการใช้วิธีแบบเดิมที่ควบคุมด้วยมือนั้น มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. ระยะเวลาการไหลของของเหลว (delivery time) ยังคงมีค่าใกล้เคียงของเดิม ไม่แตกต่างกันมากนัก และอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในเอกสารมาตรฐาน
2. ผลการวัดมีความถูกต้องสูง เนื่องชุดสอบเทียบนี้จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถอ่านได้ตรงตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิม ทำให้ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ลดความผิดพลาดที่เกิดจากทักษะความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงาน (human error) ที่ไม่สามารถปรับระดับ meniscus ให้อยู่ ณ ขีดบอกปริมาตรได้
3. ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับระดับ meniscus ได้ตรงตำแหน่งขีดบอกปริมาตร โดยมองผ่านจอร์รับภาพที่ขยายภาพให้เห็นชัดเจน ช่วยป้องกันมิให้ผู้ปฏิบัติงานมีปัญหาด้านสายตาที่เกิดจากการเพ่งมองเป็นระยะเวลานาน

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารของกรมวิทยาศาสตร์บริการทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้ และช่วยผลักดันให้โครงการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ยังให้คำปรึกษาแนะนำ ให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนางานด้านการสอบเทียบให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 648 : 2008. *Laboratory glassware – Single - volume pipettes.*
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E969-02 (Reapproved 2012). *Standard specification for glass volumetric (Transfer Pipets).*

- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 835 : 2007. *Laboratory glassware - Graduated pipettes.*
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1769 – 1975. *Laboratory glassware – Pipettes - Colour coding.*
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION , INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ISO/IEC 17025 : 2005. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.*
- [6] BRITISH STANDARD EUROPEAN NORM AND INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. BS EN ISO 4787 : 2011. *Laboratory glassware - Volumetric instruments- Methods for testing of capacity and for use (ISO 4787:2010, Corrected version 2010-06-15).*
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 542-01 (Reapproved 2012). *Standard practice for calibration of laboratory volumetric apparatus.*
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3696 : 1987. *Water for analytical laboratory use-Specification and test methods.*
- [9] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Technical Report. ISO/TR 20461 : 2000. *Determination of uncertainty for volume measurements made using the gravimetric method.*
- [10] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. JCGM 100 : 2008 GUM 1995 with minor corrections. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.*

