

# ผลกระทบของการหมุนและการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของ โหลดเซลล์มาตรฐานต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

## The effect of rotation and force misalignment of standard load cell on tension/compression testing machine calibration

ไกรศักดิ์ ยืนยง<sup>1</sup>, พิศิฐ หอมเชย<sup>1</sup>, วิชัย กาญจนพัฒน์<sup>1</sup>

Kraisak Yuenyoung<sup>1</sup>, Pisit Hormchoey<sup>1</sup>, Wichai Khanjanapat<sup>1</sup>

รับบทความ 30 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 26 ธันวาคม 2566 ยอมรับตีพิมพ์ 27 ธันวาคม 2566

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบของการหมุนโหลดเซลล์และการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงในระหว่างการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ในงานวิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องทดสอบขนาด 1000 kN ค่าความละเอียด 0.5 kN คลาส 0.5 ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 กรณี ได้แก่ กรณี A ไม่หมุนโหลดเซลล์มาตรฐานและไม่เยื้องศูนย์กลางแนวแรง กรณี B หมุนโหลดเซลล์มาตรฐานเป็นมุม 0 องศา, 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ และไม่เยื้องศูนย์กลางแนวแรง กรณี C ไม่หมุนโหลดเซลล์มาตรฐาน แต่เลื่อนตำแหน่งของโหลดเซลล์มาตรฐานให้เยื้องศูนย์กลางแนวแรงเป็นระยะ 10 มม. เมื่อทวนสอบผลการสอบเทียบของทั้งสามกรณีได้คลาส 0.5 เท่ากัน ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผลการสอบเทียบกรณี A และ B ได้ผลไม่แตกต่างกัน ส่วนกรณี A และ C พบค่าความผิดพลาดในการลดแรงกระทำของเครื่องทดสอบจากค่าแรงสูงสุดกลับมายังตำแหน่งเดิม (Relative error of reversibility) เพิ่มขึ้นถึง -0.45% และค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าเพิ่มขึ้นถึง  $\pm 0.53\%$  โดยพารามิเตอร์ทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสถิติ ( $E_n$  number) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.05 - 0.89 ซึ่งความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญ และถ้าหากเพิ่มแรงกระทำมากขึ้น  $E_n$  number มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด และโหลดเซลล์มีคลาสที่ดี การหมุนโหลดเซลล์ไม่ส่งผลต่อการสอบเทียบ แต่การเยื้องศูนย์กลางแนวแรงจะส่งผลต่อการสอบเทียบ

**คำสำคัญ:** เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด การสอบเทียบ โหลดเซลล์มาตรฐาน การหมุน การเยื้องศูนย์กลางแนวแรง

<sup>1</sup>กองสอบเทียบเครื่องมือวัด กรมวิทยาศาสตร์บริการ

## Abstract

The purpose of this research is to present the effects of load cell rotation and force misalignment during the calibration of a tension/compression testing machine according to ISO 7500-1:2018 (E). A 1000 kN testing machine, resolution 0.5 kN, class 0.5, was calibrated under 3 different conditions: case A, standard load cell was not rotated and force misalignment, case B, standard load cell was rotated to 0 degrees, 120 degrees, and 240 degrees, and case C, standard load cell was not rotated but force misalignment from the force center by 10 mm. When verification of results obtained from three cases was conducted the class of machine range to 0.5 class. The parameters of the test results of case A and B were not different. However, in cases A and C, the relative errors of reversibility were found to be up to -0.45%, and the uncertainty of the calibration at the 95% confidence level were different and increased up to  $\pm 0.53\%$ , with respect to the increasing magnitude of the applied force. When comparing the results using  $E_n$  number method, the values were found between 0.05 - 0.89, and the difference was not significant. When more force was applied, the  $E_n$  number increased slightly. This can be concluded that for tension/compression testing machine and standard load cell of a good class, the standard load cell rotation does not affect the calibration, but the force misalignment does.

**Keywords:** Tension/compression testing machine, Calibration, Standard load cell, Rotation, Force misalignment

---

<sup>1</sup>Measuring Instrument Calibration Division, Department of Science Service

\*Corresponding author e-mail address: kraisak@dss.go.th

## 1. บทนำ (Introduction)

### เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด เป็นเครื่องมือวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรม การวิจัย และการศึกษา วัตถุประสงค์หลักในการใช้เครื่องทดสอบดังกล่าวก็เพื่อวัดค่าความต้านแรงดึง ความต้านแรงกด และความต้านแรงดัดโค้งของวัสดุทดสอบซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการนำวัสดุไปใช้งาน ทั้งทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรม

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างภายนอกได้ 3 แบบ คือชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบเสาเดียว ชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบสองเสา และชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบสี่เสา โดยที่ในแต่ละชนิดสามารถสร้างแรงกระทำจากน้อยไปหามากตามลำดับ แต่ถ้าหากแบ่งตามชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้วัดแรงกระทำจะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ประเภทแรกคือชนิดที่มีเซนเซอร์วัดแรงกระทำจากความดัน (Pressure cell) เครื่องชนิดนี้เซนเซอร์จะวัดความดันของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเครื่องออกแรงกระทำแล้วแปลงสัญญาณกลับเป็นค่าแรงกระทำ ส่วนประเภทที่สองมีเซนเซอร์วัดแรงกระทำโดยตรงจากโหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งจะวัดแรงที่เครื่องทดสอบกระทำกับวัสดุโดยตรง โดยตำแหน่งการติดตั้งโหลดเซลล์มีทั้งแบบติดตั้งที่ปลายกระบอกไฮดรอลิกของเครื่องทดสอบซึ่งซ่อนอยู่ภายใน หรือติดตั้งที่ด้านบนของเครื่องในบริเวณคานด้านบน (Upper crosshead) หรือคานด้านล่าง (Lower crosshead) รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ชนิดสี่เสา



รูปที่ 1 องค์ประกอบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดชนิดสี่เสา

### การสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

การใช้งานเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ไม่ว่าจะเป็นประเภทใด สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ก่อนการใช้งานก็คือการสอบเทียบ เพราะการสอบเทียบทำให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดของเครื่อง (Relative error of indication) ว่ามีขนาดเท่าใด มีทิศทางเป็นอย่างไร รวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นในการพิจารณาสมบัติของเครื่องทดสอบว่าเหมาะสมกับงานที่จะทำการทดสอบหรือไม่ มาตรฐานการทดสอบมีหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 2752 เล่ม 12-2562 [1] หรือ มอก. 409-2562 [2] มีการกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดในการให้แรงกระทำของเครื่องทดสอบที่มีเช่นกัน การสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E)[3] ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบจะถูกคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 เพื่อพิจารณาความสามารถของเครื่องทดสอบต่อไป

Class of machine range	Maximum permissible value %				
	Relative error of				Relative Resolution $a$
	Indication $q$	Repeatability $b$	Reversibility $v$	Zero $f_0$	
0.5	$\pm 0.5$	0.5	$\pm 0.75$	$\pm 0.05$	0.25
1	$\pm 1.0$	1.0	$\pm 1.5$	$\pm 0.1$	0.5
2	$\pm 2.0$	2.0	$\pm 3.0$	$\pm 0.2$	1.0
3	$\pm 3.0$	3.0	$\pm 4.5$	$\pm 0.3$	1.5

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ มีดังนี้

Class of machine range หมายถึง ค่าความสามารถโดยรวมของเครื่องทดสอบโดยที่คลาส 0.5 เป็นระดับความสามารถสูงสุดของเครื่อง โดยทั่วไปงานทดสอบตาม มอก. จะใช้เครื่องทดสอบที่มีคลาสไม่เกิน 1

Relative error of indication หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการแสดงผลของเครื่องทดสอบ เมื่อเทียบกับโหลดเซลล์มาตรฐาน (ค่าแรงอ้างอิง) หากมีค่าบวกลบหมายถึงมีขนาดมากกว่าค่าแรงอ้างอิง แต่ถ้ามีค่าลบหมายถึงมีขนาดน้อยกว่าค่าแรงอ้างอิง พารามิเตอร์นี้บอกถึงความแม่นยำในการแสดงผล

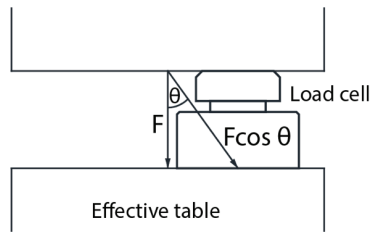
Relative error of repeatability หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการอ่านค่าเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง (การสอบเทียบรอบที่ 1 - 3) เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยเมื่อวัดจุดเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง กลุ่มข้อมูลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน มีการกระจายตัวน้อย

Relative error of reversibility หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการลดแรงกระทำของเครื่องทดสอบจากค่าแรงสูงสุดกลับมายังตำแหน่งเดิมโดยเปรียบเทียบที่จุดเดียวกันของการสอบเทียบรอบที่ 3 (เพิ่มแรงกระทำ) และรอบที่ 4 (ลดแรงกระทำ) เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยแสดงถึงความสามารถในการลดแรงกระทำจากจุดสูงสุดย้อนกลับมาที่จุดสอบเทียบเดิมแล้วได้ค่าใกล้เคียงกัน

Relative error of zero หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการแสดงค่าศูนย์เมื่อเครื่องทดสอบไม่มีแรงกระทำใด ๆ แล้วเป็นเวลา 30 วินาที

Relative resolution หมายถึง ความเหมาะสมในการแสดงผลของเครื่องทดสอบเทียบกับจุดที่ทำการสอบเทียบ หากจุดที่สอบเทียบมีค่าแรงน้อยความละเอียดในการแสดงผลของเครื่องทดสอบควรมีมาก เช่น แสดงด้วยทศนิยมหลายตำแหน่ง ต่อเมื่อจุดสอบเทียบมีค่าแรงที่มากขึ้น ความละเอียดในการแสดงผลอาจจะลดลงได้ตามลำดับ หรือคงความละเอียดในการแสดงผลไว้เช่นเดิมตลอดการสอบเทียบ เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยแสดงว่ามีความสามารถในการแสดงผลที่ละเอียดเพียงพอ สอดคล้องกับจุดที่สอบเทียบ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบ คือ การหมุนเปลี่ยนมุมของโหลดเซลล์ในระหว่างรอบการสอบเทียบเนื่องจากตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) กำหนดให้หมุนเปลี่ยนตำแหน่งมุมของโหลดเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเริ่มจาก 0 องศา 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ เพื่อให้การสอบเทียบครอบคลุมแหล่งความผิดพลาดที่อาจมีสาเหตุมาจากโหลดเซลล์ที่ใช้ อีกหนึ่งปัจจัยก็คือการจัดวางตำแหน่งของโหลดเซลล์ให้ตรงกับศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบเนื่องจากเมื่อวางโหลดเซลล์มาตรฐานเยื้องจากศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2 แรงลัพธ์ที่กระทำกับโหลดเซลล์ ( $F_{ZL}$ ) มีค่าเท่ากับ  $F_{ZL} = F \cos \theta$  โดยค่าแรง  $F_{ZL}$  จะลดลงตามขนาดของมุม  $\theta$  ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 แรงกระทำกับโหลดเซลล์มาตรฐานเมื่ออยู่ในตำแหน่งเอียงศูนย์กลางแนวแรง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบของการหมุนและการเอียงศูนย์กลางของโหลดเซลล์มาตรฐาน ต่อผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ในระหว่างการสอบเทียบโหลดเซลล์จะถูกหมุนเป็นมุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการไม่หมุน และทำการเลื่อนตำแหน่งของโหลดเซลล์ออกจากศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบเปรียบเทียบกับเมื่ออยู่ในศูนย์กลางแนวแรงพอดีเพื่อสร้างความตระหนักให้ผู้ใช้งานเครื่องทดสอบและผู้ทำการสอบเทียบ สามารถนำข้อมูลไปปรับใช้เพื่อแก้ปัญหาในการปฏิบัติงานได้ สำหรับเครื่องทดสอบที่ทำการสอบเทียบเป็นชนิดสี่เสา คลาส 0.5 มีเซนเซอร์วัดแรงกระทำแบบความดัน สามารถสร้างแรงกระทำสูงสุดได้ 1000 kN ค่าความละเอียดในการแสดงผล 0.5 kN โหลดเซลล์มาตรฐานที่นำมาใช้สอบเทียบมีขนาด 3000 kN ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 376 [4] จากหน่วยงานที่ได้การรับรอง ISO/IEC 17025 สภาพแวดล้อมในการสอบเทียบมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ก่อนเริ่มการสอบเทียบ มีการเตรียมความพร้อมของระบบด้วยการให้แรงกระทำจนถึงจุดสอบเทียบสูงสุด 3 รอบ การสอบเทียบเครื่องทดสอบ กำหนดจุดสอบเทียบ 5 จุด (300, 350, 400, 450 และ 500) kN ทำการสอบเทียบทั้งหมด 4 รอบ แบ่งเป็นทิศเพิ่มแรงกระทำ 3 รอบและลดแรงกระทำ 1 รอบ เมื่อวัดค่าแรงสูงสุดในรอบที่ 3 จึงเริ่มลดแรงกระทำลง (เริ่มการสอบเทียบรอบที่ 4) จนถึงจุดเริ่มต้นจึงสิ้นสุดการสอบเทียบ

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

### 2.1 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยมีการจัดวางเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3 มีคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 2 [5]



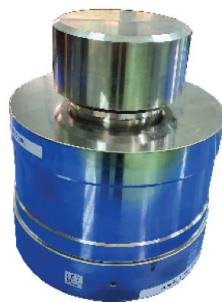
รูปที่ 3 การจัดวางเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย [5]

คุณลักษณะ (Specification)	ค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต (Manufacturer value)	หน่วย (Unit)
Maximum capacity	1000	kN
Readability	0.5	kN
Maximum plate-to-plate distance (Compression)	900	mm
Ram stroke	250	mm
Effective table area	750x750	mm
Test force measuring accuracy	$\pm 1$	% (of reading)

## 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 โหลดเซลล์มาตรฐานขนาด 3000 kN สำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ดังแสดงในรูปที่ 4 มีใบรับรองผลการสอบเทียบตาม ISO 376 จากหน่วยงานที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 และผลการทวนสอบโหลดเซลล์ตาม ISO 376 ไม่เกินคลาส 1



รูปที่ 4 โหลดเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ

2.2.2 เครื่องประมวลผลสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5 มีใบรับรองผลการสอบเทียบจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 สำหรับประมวลผลสัญญาณจากโหลดเซลล์มาตรฐานในระหว่างการสอบเทียบ



รูปที่ 5 เครื่องประมวลผลสัญญาณจากโหลดเซลล์

2.2.3 เครื่องวัดสภาวะแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ และเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบดิจิทัลที่มีความละเอียดในการแสดงผล 0.1 มม. สำหรับจัดวางตำแหน่งโหนดเซลล์มาตรฐานให้อยู่ตรงกลางแนวแรงของเครื่องทดสอบ แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องวัดสภาวะแวดล้อม และเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบดิจิทัลตามลำดับ

## 2.3 วิธีดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากนำโหนดเซลล์มาตรฐานมาติดตั้งบนเครื่องทดสอบ จัดวางโหนดเซลล์ให้อยู่ตรงกลางแนวแรงของเครื่องทดสอบโดยใช้เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ ตั้งระยะความสูงของ Effective table ให้คงที่ที่ 20 มม. โดยสังเกตจากค่าความสูงของระยะการเคลื่อนที่ที่หน้าจอแสดงผลของเครื่องทดสอบ สอบเทียบเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นในทุก ๆ รอบการสอบเทียบโดยการสอบเทียบแบ่งเป็น 3 กรณี คือ A B และ C ดังนี้

2.3.1 กรณี A สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยไม่หมุนโหนดเซลล์มาตรฐานและไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง

2.3.2 กรณี B สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยหมุนโหนดเซลล์มาตรฐานเป็นมุม 0 องศา, 120 องศา และ 240 องศาตามลำดับในแต่ละรอบของการสอบเทียบโดยไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง

2.3.3 กรณี C สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยเลื่อนตำแหน่งของโหนดเซลล์ออกจากศูนย์กลางแนวแรงเป็นระยะ 10 มม. โดยวัดจากเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์และไม่หมุนโหนดเซลล์

## 2.4 การคำนวณ

คำนวณค่าเฉลี่ยของแรงกระทำ Relative error of indication, Relative error of repeatability, Relative error of reversibility, Relative error of zero, Relative resolution ประเมินคลาสิกของเครื่องทดสอบ และคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ โดยมีสมการการคำนวณ ดังนี้

2.4.1 การคำนวณแรงเฉลี่ย

สำหรับแรงที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมี 5 ระดับ คือ 300, 350, 400, 450 และ 500 kN ทำการวัดสามรอบโดยกำหนดให้เป็น  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  ตามลำดับ และจะมีการคำนวณค่าเฉลี่ย ( $\bar{F}$ ) ตามสมการ (1)

$$\bar{F} = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} \quad (1)$$

2.4.2 การคำนวณ Relative error of indication,  $q$

การสอบเทียบในทิศเพิ่มแรงกระทำทั้ง 3 รอบ ที่แต่ละจุดการสอบเทียบสามารถคำนวณค่า Relative error of indication ในการสอบเทียบแต่ละรอบได้ตามชุดสมการ (2), (3) และ (4)

$$q_1 = \frac{(F_{i1} - F_1)}{F_1} \times 100 \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{(F_{i2} - F_2)}{F_2} \times 100 \quad (3)$$

$$q_3 = \frac{(F_{i3} - F_3)}{F_3} \times 100 \quad (4)$$

โดย  $q_1, q_2, q_3$  คือ Relative error of indication ของจุดการสอบเทียบหนึ่งจุดในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}$  คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ ในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$F_1, F_2, F_3$  คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของ Relative error of indication คำนวณได้จากสมการ (5)

$$q = \frac{(q_1 + q_2 + q_3)}{3} \quad (5)$$

#### 2.4.3 การคำนวณ Relative repeatability error, b

Relative repeatability error เป็นผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ Relative error of indication สามารถคำนวณได้ตามสมการ (6)

$$b = q_{\max} - q_{\min} \quad (6)$$

โดย  $q_{\max}$  คือ ค่าสูงสุดของ Relative error of indication ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า  $q_1, q_2$  และ  $q_3$  (%)

$q_{\min}$  คือ ค่าต่ำสุดของ Relative error of indication ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า  $q_1, q_2$  และ  $q_3$  (%)

#### 2.4.4 การคำนวณ Relative reversibility error, v

Relative reversibility error คือ ค่า Hysteresis คำนวณจากรอบสุดท้ายที่มีการเพิ่มแรงจนถึงระดับสูงสุดของการสอบเทียบแล้วถอยแรงกลับ โดยค่านี้เป็นผลต่างของค่าแรงช่วงที่เพิ่มแรงขึ้นเทียบกับค่าแรงช่วงที่ถอยแรงกลับ ณ จุดสอบเทียบเดียวกัน โดยคำนวณจากสมการที่ (7)

$$v = \frac{F - F'}{F} \times 100 \quad (7)$$

โดย  $F$  คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในช่วงที่เพิ่มแรงขึ้น

$F'$  คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในช่วงที่ถอยแรงกลับ

$\bar{F}$  คือ ค่าแรงเฉลี่ยในช่วงที่เพิ่มแรงขึ้นทั้ง 3 รอบ

#### 2.4.5 การคำนวณ Relative zero error, $f_0$

Relative zero error เป็นค่าความผิดพลาด ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำของแต่ละรอบการสอบเทียบ คำนวณจากสมการ (8)

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \times 100 \quad (8)$$

โดย  $F_{i0}$  คือ ค่าแรงของเครื่องทดสอบ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำ

$F_N$  คือ ค่าสูงสุดของพิสัยการสอบเทียบ

#### 2.4.6 การคำนวณ Relative resolution, a

Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรง (Force Indicator) คำนวณจากสมการ (9)



$$a = \frac{r}{F_i} \times 100 \quad (9)$$

โดย  $r$  คือ ความละเอียดของตัวอ่านค่าแรงของเครื่องทดสอบ

$F_i$  คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

## 2.5 การหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด

### 2.5.1 ความไม่แน่นอนของการวัดจากโหนดเซลล์มาตรฐาน

- ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากผลการสอบเทียบโหนดเซลล์มาตรฐาน ( $u_{cal}$ ) คำนวณได้จากสมการ (10)

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (10)$$

โดย  $U_{cal}$  คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานผลการสอบเทียบของโหนดเซลล์มาตรฐาน

$k$  คือ ค่า Coverage factor จากใบรายงานผลการสอบเทียบของโหนดเซลล์มาตรฐาน

- ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จาก Drift ของโหนดเซลล์มาตรฐาน ( $u_{drift}$ ) คำนวณได้จากสมการ ซึ่งใช้ในกรณีที่โหนดเซลล์ใหม่ยังไม่มีประวัติการสอบเทียบ คำนวณได้จากสมการ (11)

$$u_{drift} = \frac{U_{cal}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

หากเป็นโหนดเซลล์มาตรฐานที่มีประวัติการสอบเทียบแล้วค่า Drift คำนวณได้จากสมการ (12)

$$u_{drift} = \frac{(U_{cal} \text{ ของปีล่าสุด} - U_{cal} \text{ ของปีก่อนหน้า})}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากผลกระทบของอุณหภูมิ ( $u_{temp}$ ) ในขณะที่มีการใช้งานโหนดเซลล์มาตรฐาน คำนวณได้จากสมการ (13)

$$u_{temp} = \frac{\sqrt{u_{temp\_zero}^2 + u_{temp\_sen}^2}}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

โดย

$$u_{temp\_zero} = (20 - temp_{before\ cal.}) \times zero\ temp.\ coeff.$$

$$u_{temp\_sen} = ((temp_{on-site} - 23) + \Delta t) \times sensitivity\ temp.\ coeff.$$

และ Zero temp. coeff. คือ สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของโหนดเซลล์เมื่อยังไม่มี การรับแรง

Sensitivity temp. coeff. คือ สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของโหนดเซลล์ขณะที่มีการรับแรง

$\Delta t$  คือ ค่าความผันผวนของอุณหภูมิในระหว่างการสอบเทียบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จาก force transfer effect ( $u_{trans}$ ) คือ ค่าความต่างของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของโหนดเซลล์มาตรฐาน เมื่อนำไปใช้ภายนอกห้องปฏิบัติการสอบเทียบของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยมีค่าประมาณ 150 ppm (0.015 %) และมี Divisor เป็น  $\sqrt{3}$  คำนวณได้จากสมการ (14)

$$u_{trans} = \frac{0.015}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

### 2.5.2 ความไม่แน่นอนของการวัดจากเครื่องทดสอบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากการวัดซ้ำ ( $u_{rep}$ ) จุดเดิมหลาย ๆ ครั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการ (15)

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (15)$$

โดย  $n$  คือ จำนวนรอบการวัดซ้ำของการอ่านค่าแรงตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

$q_i$  คือ ค่า Relative indication error ครั้งที่  $i$  ของเครื่องทดสอบตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

$\bar{q}$  คือ ค่าเฉลี่ยของ Relative indication error ตามจุดสอบเทียบที่กำหนด (%)

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากความละเอียดตัวอ่านค่าแรงของเครื่องทดสอบ ( $u_{res}$ ) คำนวณได้จากสมการ (16)

$$u_{res} = \sqrt{\left[\frac{a_F}{2\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{a_z}{2\sqrt{3}}\right]^2} \quad (16)$$

โดย  $a_F$  คือ Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรงเครื่องทดสอบที่แต่ละจุดสอบเทียบขณะเพิ่มแรง (%)

$a_z$  คือ Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรงเครื่องทดสอบขณะไม่มีแรงกระทำ (%)

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากค่าแรงของเครื่องทดสอบ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำของแต่ละรอบ ( $u_{zero}$ ) คำนวณได้จากสมการ (17)

$$u_{zero} = \frac{f_0}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบโดยมีการถอยแรงในรอบสุดท้าย คำนวณได้จากค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ Reversibility ( $v$ ) หารด้วย  $\sqrt{3}$  ตามสมการที่ (18)

$$u_{rev} = \frac{v}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

### 2.5.3 การรวมค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Combined uncertainty,  $u_c$ ) คำนวณจากสมการ (19)

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (19)$$

โดย  $u_i$  คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากการวัดค่าต่าง ๆ

- ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty,  $U$ ) คำนวณจากสมการ (20)

$$U = k \times u_c \quad (20)$$

โดย  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ครอบคลุม (Coverage factor) โดยค่า  $k$  สามารถหาได้จาก ตารางการแจกแจงแบบ  $t$  ( $t$ -distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งต้องคำนวณหาค่า effective degree of freedom ( $\nu_{eff}$ ) เพื่อนำไปหาค่า  $k$  คำนวณจากสมการ (21)

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (21)$$

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ทั้งสามกรณีเป็นไปตามตารางที่ 3, 4 และ 5

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบในกรณี A

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U (±%)
		Relative error of				Relative Resolution $a$		
		Indication $q$	Repeatability $b$	Reversibility $v$	Zero $f_0$			
300.0	300.124	-0.04	0.03	-0.01	0.00	0.17	0.5	0.13
350.0	350.185	-0.05	0.04	0.05		0.14	0.5	0.14
400.0	400.296	-0.07	0.07	0.05		0.13	0.5	0.14
450.0	450.338	-0.08	0.06	0.03		0.11	0.5	0.12
500.0	500.410	-0.08	0.02	0.03		0.10	0.5	0.11

ตารางที่ 4 ผลการสอบเทียบในกรณี B

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U (±%)
		Relative error of				Relative Resolution $a$		
		Indication $q$	Repeatability $b$	Reversibility $v$	Zero $f_0$			
300.0	300.046	-0.02	0.04	0.03	0.00	0.17	0.5	0.14
350.0	350.087	-0.02	0.11	0.07		0.14	0.5	0.16
400.0	400.274	-0.07	0.03	0.03		0.13	0.5	0.12
450.0	450.239	-0.05	0.05	0.02		0.11	0.5	0.11
500.0	500.369	-0.07	0.04	0.05		0.10	0.5	0.12

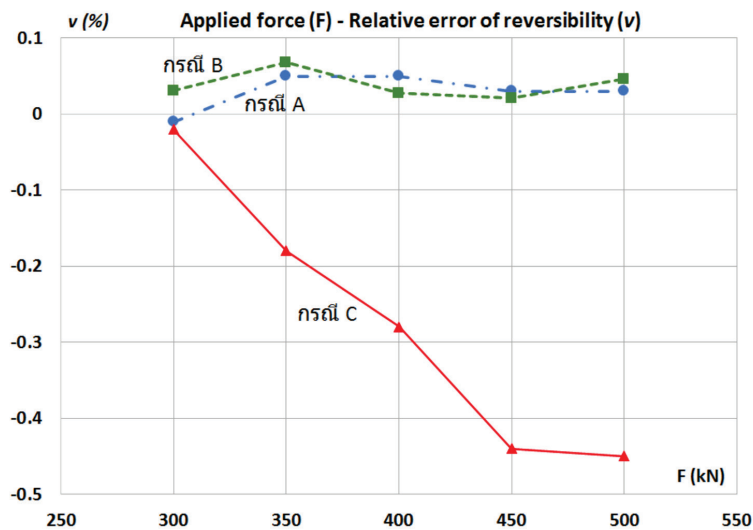
ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบในกรณี C

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U (±%)
		Relative error of				Relative Resolution $a$		
		Indication $q$	Repeatability $b$	Reversibility $v$	Zero $f_0$			
300.0	300.429	-0.14	0.09	-0.02	0.00	0.17	0.5	0.15
350.0	350.255	-0.07	0.16	-0.18		0.14	0.5	0.26
400.0	400.137	-0.03	0.07	-0.28		0.13	0.5	0.35
450.0	450.014	0.00	0.10	-0.44		0.11	0.5	0.52
500.0	499.657	0.07	0.05	-0.45		0.10	0.5	0.53

เมื่อนำผลการสอบเทียบในกรณี A B และ C มาเปรียบเทียบกับพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสามกรณีให้ผลการทวนสอบตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ได้คลาส 0.5 เท่ากัน ซึ่งถือว่าเป็นคลาสสูงสุด เมื่อพิจารณาในหัวข้อค่าเฉลี่ย Relative error of indication, Relative error of repeatability, Relative error of zero และ Relative resolution ของทั้งสามกรณีพบว่าไม่มีค่าที่แตกต่างกัน แต่ในกรณี C มีพารามิเตอร์ Relative error of reversibility และความไม่แน่นอนของการสอบเทียบมีค่าที่แตกต่างออกไป ข้อมูลผลการสอบเทียบทั้งสามกรณีที่ให้เห็นว่าการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของโหลดเซลล์มาตรฐานส่งผลต่อการสอบเทียบมากกว่าผลจากการหมุนโหลดเซลล์มาตรฐานในระหว่างการสอบเทียบ

### 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Relative error of reversibility

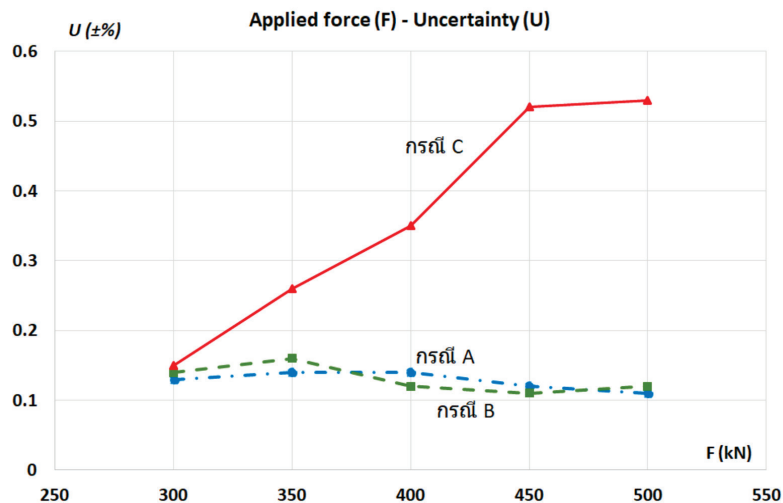
กรณี A B ไม่แตกต่างกัน แต่กรณี C มีค่าแตกต่างออกไป โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นในทิศทางลบตามขนาดแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงในช่วงปลายของแรงกระทำตามกราฟรูปที่ 7 การมีทิศทางลบหมายความว่าที่จุดวัดเดียวกันวัดค่าแรงในรอบที่ 4 ได้มากกว่ารอบที่ 3



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Relative error of reversibility กรณี A, B และ C

### 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ความเชื่อมั่น 95%

กรณี A และ B ไม่แตกต่างกัน แต่กรณี C มีค่าที่แตกต่างออกไป โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงในช่วงปลายของแรงกระทำตามกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Uncertainty กรณี A, B และ C

### 3.4 การเปรียบเทียบทางสถิติ ( $E_n$ number)

ในหัวข้อนี้จะใช้แนวทางของ ISO/IEC 17043 [6] มาเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของกรณี A และ C ในพารามิเตอร์ Relative error of reversibility ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (22) พร้อมเกณฑ์การตัดสินดังนี้

$$E_n = \frac{X_A - X_C}{\sqrt{U_A^2 + U_C^2}} \quad (22)$$

โดย  $X_A$  = Relative error of reversibility ของกรณี A

$X_C$  = Relative error of reversibility ของกรณี C

$U_A$  = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Relative error of reversibility ของกรณี A

$U_C$  = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Relative error of reversibility ของกรณี C

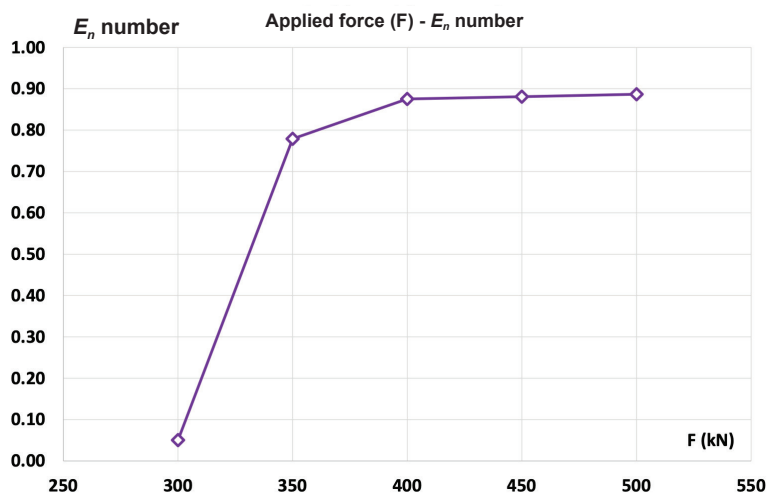
การพิจารณาค่า  $E_n$  number มีหลักเกณฑ์ดังนี้

- ถ้า  $E_n < 1$  แสดงว่าผลการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และผ่านเกณฑ์
- ถ้า  $E_n > 1$  แสดงว่าผลการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่ผ่านเกณฑ์

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ ( $E_n$  number) ของ Relative error of reversibility กรณี A และ C

Machine reading F (kN)	Relative error of reversibility $v$ (%)		Uncertainty U ( $\pm$ %)		$ E_n $	Result
	A	C	A	C		
300.0	-0.01	-0.02	0.13	0.15	0.05	Pass
350.0	0.05	-0.18	0.14	0.26	0.78	Pass
400.0	0.05	-0.28	0.14	0.35	0.88	Pass
450.0	0.03	-0.44	0.12	0.52	0.88	Pass
500.0	0.03	-0.45	0.11	0.53	0.89	Pass

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 6 พบว่า Relative error of reversibility ในกรณี A และ C ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมี  $E_n < 1$  และเมื่อนำมาเขียนกราฟกับแรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและแนวโน้มลดลงจนเกือบอยู่ในแนวระดับในช่วงปลาย



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ  $E_n$  number กรณี A - C

#### 4. สรุป (Conclusion)

4.1 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยเมื่อสอบเทียบกรณีหมุนโหลดเซลล์เป็นมุม 0 องศา 120 องศา และ 240 องศา ตามรอบการสอบเทียบ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบไม่แตกต่างจากกรณีสอบเทียบโดยไม่หมุนโหลดเซลล์ ที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีสาเหตุจากระดับผิวหน้าของ Effective table ของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยมีสมดุที่ ดี ไม่เอียงไปทางใดทางหนึ่ง การหมุนโหลดเซลล์มาตามมาตรฐานระหว่างการสอบเทียบจึงไม่ส่งผลต่อการสอบเทียบ วัตถุประสงค์ของการหมุนโหลดเซลล์ในระหว่างรอบการสอบเทียบก็เพื่อให้ครอบคลุมแหล่งความผิดพลาดที่อาจมีสาเหตุมาจากเครื่องทดสอบและตัวโหลดเซลล์เอง ดังนั้นหากโหลดเซลล์ที่นำมาสอบเทียบมีคุณสมบัติที่ดี ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 376 มีผลการทวนสอบโหลดเซลล์ไม่เกินคลาส 1 และเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด มีคลาสที่ดีจะได้ผลการสอบเทียบของทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกัน

4.2 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยเมื่อสอบเทียบกรณีเอียงศูนย์กลางแนวแรง ให้ผลการสอบเทียบในพารามิเตอร์ Relative error of reversibility และค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ความเชื่อมั่น 95% แตกต่างจากกรณีสอบเทียบโดยไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง โดยค่าทั้งสองมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นแต่ยังไม่มีนัยสำคัญ ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้นคำนวณจากแหล่งความไม่แน่นอนย่อย ๆ (Uncertainty budget) หลายแหล่ง ซึ่งหนึ่งในนั้นคือค่าความผิดพลาดของ Relative error of reversibility ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเพิ่มขึ้นเกิดจากค่า Relative error of reversibility ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากกราฟรูปที่ 9 พบว่าค่า Relative error of reversibility มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำในช่วงต้นถึงช่วงกลางซึ่งจะส่งผลให้  $E_n$  number มีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในช่วงปลายหากเพิ่มขนาดของแรงกระทำในการสอบเทียบมากขึ้นเรื่อย ๆ ค่า  $E_n$  number จะมีแนวโน้มเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย

การเอียงศูนย์กลางแนวแรงมากถึง 10 มม. น่าจะส่งผลต่อค่า Relative error of indication ตามสมการ  $F_{ZL} = F \cos \theta$  เพราะค่าแรงที่กระทำกับโหลดเซลล์ถูกแตกแรงออกมาเป็นมุม  $\theta$  แต่จากข้อมูลพบว่าได้ค่าไม่แตกต่างกันในทุก ๆ กรณีที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากการเอียงศูนย์กลางแนวแรง 10 มม. นั้นสามารถคำนวณเป็นมุมได้  $\theta \approx 1.818$  องศา ซึ่ง  $\cos \theta \approx 0.9995$  เมื่อนำมาคูณกับค่าแรงกระทำจึงได้ผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อย อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริงมักพบการเอียงศูนย์กลางแนวแรงไม่เกิน 5 มม. ระยะเอียงศูนย์กลาง 10 มม. ถือเป็นกรณีที่พบได้ยาก

การจัดวางโหลดเซลล์เพื่อทำการสอบเทียบในบางครั้งแทนวางตัวอย่างของเครื่องทดสอบไม่มีเส้นอ้างอิงสำหรับวางตัวอย่างทดสอบ ในกรณีเช่นนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้ตลับเมตรวัดระยะจากขอบของแท่นวางถึงตัวของโหลดเซลล์ให้เท่ากันทั้งสองด้านเพื่อให้อยู่ตรงศูนย์กลางแนวแรง ความผิดพลาดเล็กน้อยจากการวัดด้วยตลับเมตร 2 - 3 มม. จะไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของการแสดงผลของเครื่องทดสอบ แต่ทั้งนี้ต้องไม่ลืมพิจารณาหัวข้อ Relative error of reversibility ควบคู่ด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองสอบเทียบเครื่องมือวัด กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและคำแนะนำปรึกษาในงานวิจัยนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. มอก. 2752 เล่ม 12-2562. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2562.
- [2] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบคอนกรีต. มอก.409-2562. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2562.

- [3] International Organization for Standardization (ISO). Metallic materials-calibration and verification of static uniaxial testing machines- Part 1: Tension/compression testing machines-calibration and verification of the force-measuring system. ISO 7500-1:2018(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2018.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). Metallic materials-calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines. ISO 376:2011(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2011.
- [5] Shimadzu. Instruction manual computer-controlled, hydraulic-servo UH-I Series 2000kN-1000kN model.
- [6] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). Conformity assessment-general requirements for proficiency testing. ISO/IEC 17043:2010(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2010.