

ผลกระทบของความเร็วในการหมุนของลูกสูบ ที่มีต่ออัตราการตกอย่างอิสระ

ของลูกสูบในเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน

Effect of Piston Rotation on Sink Rate of the Pressure Balance Calibrator

พิชญ์สิทธิ์ วิเศษชาติ¹, สิริวิชญ์ เตชะเจษฎารังษี^{1,2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

²ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

*ติดต่อ: โทรศัพท์: (043) 202 845, โทรสาร: (043) 202 849,

E-mail : sirtae@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการหมุนของลูกสูบในเครื่องสอบเทียบแบบสมดุลความดัน (Pressure Balance Calibrator) กับอัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบ (Sink Rate) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการศึกษาเครื่องสอบเทียบแบบสมดุลความดันใน 2 ช่วงความดันคือ ช่วง 0.7-7 MPa กับช่วง 14-140 MPa และได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็นสองกรณีคือ การศึกษาผลของการกระจายของความดันระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบเปลี่ยนแปลงไปโดยการคำนวณเชิงตัวเลข และกรณีศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบเมื่อเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบเปลี่ยนไป ซึ่งผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าการใช้ความดันเฉลี่ยที่เท่ากันตลอดช่วงความยาวลูกสูบและกระบอกสูบจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนของลูกสูบเพิ่มมากขึ้น และจากการทดลอง พบว่าอัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วในการหมุนตัวของลูกสูบด้วย

คำหลัก: เครื่องสอบเทียบความดัน, ความเร็วรอบ, การกระจายตัวของความดัน, อัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบ

Abstract

This study was to investigate the effect of piston rotation on the sink rate of the hydraulic pressure balance calibrator over the range of 0.7 to 7.0 MPa and 14 to 140 MPa. The comparisons of pressure distribution between piston and cylinder had been taken in the case of “with” and “without” rotating speed of piston cylinder using numerical method. The study of the piston sink rate when varied rotation speeds had also performed. The results were shown that there would be an error when using the assumption of the mean values of pressure distribution over the whole length of cylinder. From the experimental results, it's clearly shown that the piston sink rate increased when piston rotation speed decreased.

Keywords: pressure calibrator, rotation speed, pressure distribution, sink rate

1. บทนำ

หนึ่งในวิธีการสอบเทียบเครื่องมือสาขาความดันนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือมาตรฐานที่เรียกว่า เครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน (Pressure Balance Calibrator) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ประกอบจากลูกสูบและกระบอกสูบโดยมีหลักการพื้นฐานในการสร้างความดันมาตรฐานจากการสร้างแรง ที่กระทำกับส่วนปลายด้านบนของลูกสูบด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานต่อพื้นที่ส่วนปลายด้านล่างของลูกสูบและกระบอกสูบที่เรียกว่าพื้นที่หน้าตัดใช้งาน (Effective Area) จากการศึกษาพบว่าที่ความดันในการสอบเทียบสอบเทียบสูงๆนั้น ค่าพื้นที่หน้าตัดใช้งานจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการยุบตัวของวัสดุที่ใช้ทำลูกสูบและกระบอกสูบ และในปัจจุบันการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดันนั้นจะทำการหมุนลูกสูบ ที่ความเร็วรอบประมาณ 30 รอบต่อนาทีเพื่อเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ซึ่งการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดันด้วยเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดันจะมีวิธีการที่เรียกว่าคอสโฟรท์ (cross-float) ซึ่งการสอบเทียบวิธีนี้จะอาศัยการสังเกตการตกลอยอย่างอิสระของลูกสูบของเครื่องสอบเทียบเพื่อพิจารณาในการใส่มวล (trim mass) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้อัตราการตกลอยอย่างอิสระของเครื่องสอบเทียบทั้งสองเปลี่ยนไป

ปัจจุบันการหาพื้นที่หน้าตัดใช้งานนั้น นอกจากจะสามารถหาได้จาก การทดลองแล้ว ยังสามารถใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมา คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดใช้งานด้วย จากงานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขหาความเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดใช้งาน ที่ผ่านมานั้นจะไม่นำผลกระทบเนื่องจากความเร็วในการหมุนลูกสูบมาวิเคราะห์ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองผิดพลาดจากการทดลองจริงได้ ดังนั้นกรณีศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วในการหมุนของลูกสูบในเครื่องสอบเทียบแบบสมดุลความดัน (Pressure Balance Calibrator) ที่มีต่ออัตราการตกลอยอย่างอิสระของลูกสูบ (Sink Rate) และการกระจายตัวของความดันระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

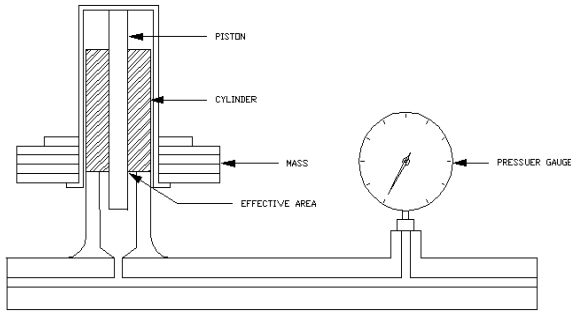
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยการศึกษาการผิดรูปของลูกสูบและกระบอกสูบรวมถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของเครื่องสอบเทียบแบบสมดุลความดันโดยการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลองจริงนั้น พบว่ามีค่าความแตกต่างกัน ทั้งนี้ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากผลกระทบต่างๆเช่น ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าสถิต ความแตกต่างของตำแหน่งของลูกสูบและกระบอกสูบ และผลกระทบจากความเร็วในการหมุนของลูกสูบ [1] แต่ในกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันได้มีการศึกษาหาผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ [2] ในปัจจุบันได้มีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาเพื่อคำนวณเปรียบเทียบความแตกต่างจากผลการทดลองจริงพบว่า ที่สภาวะตั้งต้นที่เท่ากันนั้นผลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง [3]

2.2. สมการของแรงที่มีผลต่อความดันใช้งานของเครื่องสอบเทียบ

เครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดันนั้นจะสร้างความดันจากการใส่มวลที่ปลายด้านบนของลูกสูบ โดยเมื่อค้ำหนึ่งถึงแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้เกิดแรงขึ้น นอกจากแรงที่เกิดจากก่อนมวลแล้วยังสามารถเกิดขึ้นจากแรงอุ้มอากาศที่กระทำกับมวล

แรงลอยตัวของลูกสูบในส่วนที่จมอยู่ในน้ำมันไฮดรอลิก และจากแรงตึงผิวของน้ำมันไฮดรอลิก [4]



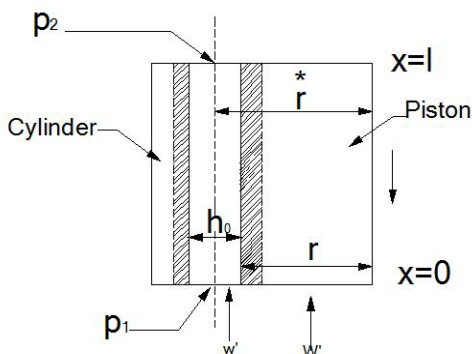
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการผลรวมแรงได้ดังนี้

$$\sum F = \sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) + v(\rho - \rho_a)g + \sigma 2\pi r^* \quad (1)$$

2.3 สมการของพื้นที่หน้าตัดใช้งานของเครื่องสอบเทียบแบบสมดุลความดัน

พื้นที่หน้าตัดใช้งานของเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน จะใช้จุดกึ่งกลางระหว่างลูกสูบและ กระบอกสูบมาวิเคราะห์โดยในทางอุดมคติสามารถดูได้จากรูปที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาพื้นผิวของลูกสูบและกระบอกสูบมีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาว

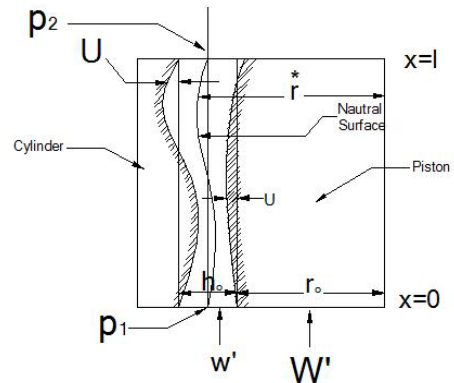


รูปที่ 2 พื้นที่กึ่งกลางระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบในทางอุดมคติ

โดยสามารถเขียนสมการสำหรับพื้นที่หน้าตัดใช้งานได้เป็น

$$A = \frac{W' - w'}{p_1 - p_2} = \pi r^{*2} \quad (2)$$

แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้นพื้นผิวของลูกสูบและกระบอกสูบไม่มีความสม่ำเสมอตลอดความยาว ดังรูปที่ 3 จึงควรที่นำค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิววัสดุมาพิจารณา เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดใช้งาน



รูปที่ 3 พื้นที่กึ่งกลางระหว่างลูกสูบ และกระบอกสูบในการใช้งานจริง

โดยสามารถเขียนสมการสำหรับพื้นที่หน้าตัดใช้งานได้เป็น

$$A = \pi r_0^2 \left[1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{(p_1 - p_2)r_0} \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dx} (u + U) dx\right] \quad (3)$$

โดยทั่วไปนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้วัสดุที่ใช้ทำลูกสูบและกระบอกสูบ ซึ่งทำจากโลหะมีการหดตัวหรือขยายตัวซึ่งเราสามารถพิจารณาพื้นที่หน้าตัดใช้งานได้จากสมการ

$$A_t = A_{20} [1 + \beta(t - 20)] \quad (4)$$

นอกจากผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดใช้งานแล้วยังมีผลกระทบจากความดันใช้งานเครื่องสอบเทียบที่กระทำกับพื้นผิวของลูกสูบและกระบอกสูบซึ่งการผิดรูปของพื้นผิวจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นโดยสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$A_p = A_{20}[1 + \lambda P] \quad (5)$$

โดยสามารถเขียนสมการที่คิดผลกระทบของอุณหภูมิและการผิดรูปเชิงยืดหยุ่นได้ในรูปของ

$$A_{p,t} = A_{20}[1 + \beta(t - 20)][1 + \lambda P] \quad (6)$$

2.4. สมการทั่วไปของการไหล

ในการวิเคราะห์การไหลแบบสามมิติของของไหลที่ไม่อัดตัวและอุณหภูมิภายในไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการการไหลแบบไม่อัดตัว [5] ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{Du}{DT} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + B_{fx} \quad (8.1)$$

$$\rho \frac{Dv}{DT} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + B_{fy} \quad (8.2)$$

$$\rho \frac{Dw}{DT} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + B_{fz} \quad (8.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \right) u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + B_f \quad (9)$$

2.5 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลในทรงกระบอกบาง

การกำหนดลักษณะการไหลของของไหลโดยจะพิจารณาจากค่าเรย์โนลด์์ ซึ่งในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์์มีค่าน้อยกว่า 2000 จะพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบ จากสมการ

$$Re = \frac{\rho \frac{V}{h_0}}{\mu \frac{V}{h_0^2}} = \frac{\rho V h_0}{\mu} \quad (10)$$

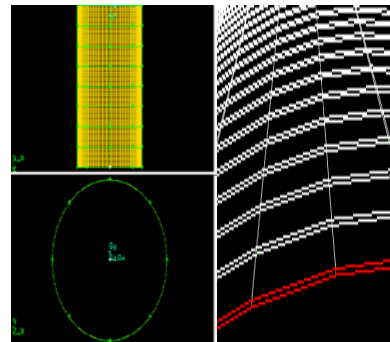
กรณีของการไหลผ่านที่แคบในระดับไมโครเมตร ค่า $h_0 \ll 1$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นและ

ความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก ทำสามารถใช้การวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ [6]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

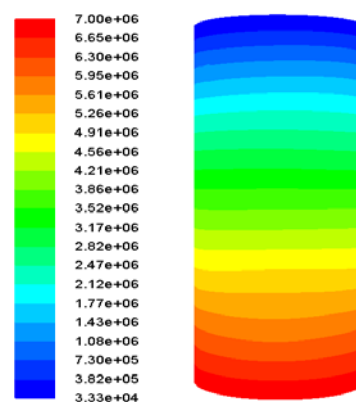
3.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสร้างแบบจำลองจากข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางจริงของลูกสูบและกระบอกสูบ ดังรูปที่ 4



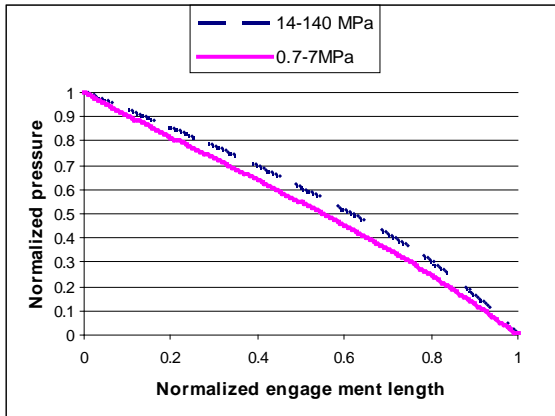
รูปที่ 4 พื้นที่การไหลของน้ำมันไฮดรอลิกของเครื่องสอบเทียบ ที่ช่วงความดัน 0.7MPa - 7MPa

หลังจากสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะนำแบบจำลองที่ได้ไป วิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม Fluent โดย ทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวของความดันที่พื้นผิวของลูกสูบและกระบอกสูบในกรณีที่ลูกสูบหมุนด้วยความเร็ว ต่าง ๆ กัน โดยจะเทียบค่ากับกรณี ที่ลูกสูบไม่มีการหมุนตัว



รูปที่ 5 การกระจายตัวของความดันระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าค่าการกระจายตัวของความดันจะมีค่ามากที่สุดบริเวณพื้นที่หน้าตัดใช้งานของเครื่องสอบเทียบและจะลดลงตามความสูงของลูกสูบ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยแสดงรูปแบบการกระจายตัวของความดันดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกระจายตัวของความดันระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ช่วงความดัน 0.7-7 MPa และช่วงความดัน 14-140 MPa ที่ความเร็วรอบ 30 rpm

จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้น ใช้ข้อมูลของลูกสูบจริงในการสร้าง จะพบได้ว่าค่าการกระจายตัวของความดัน จะได้รับอิทธิพลจากความไม่สม่ำเสมอของลูกสูบด้วย และ จากการผลการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งทำการเปรียบเทียบ ความแตกต่างของการกระจายตัวของความดัน บริเวณช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบกรณีที่ลูกสูบหยุดอยู่กับที่และกรณีที่ลูกสูบหมุนด้วยความเร็ว 15 30 45 rpm โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากอุณหภูมิ จะพบว่าค่าความผิดพลาดของการกระจายตัวของความดันเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนของลูกสูบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ของการกระจายตัวของความดัน เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ลูกสูบอยู่กับที่ และหมุนด้วยความเร็วรอบต่างของช่วงความดัน 14-140 MPa (หน่วย: % error)

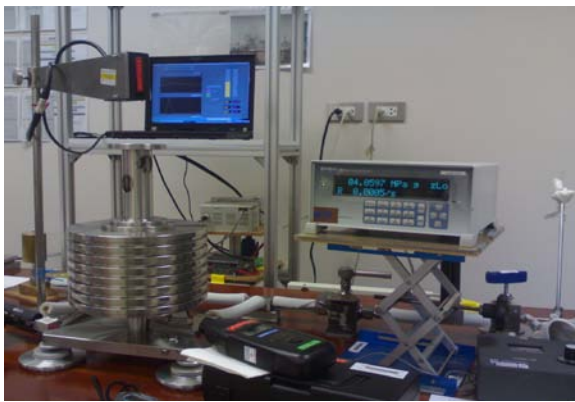
ความดัน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความเร็วรอบ		
	(15 rpm)	(30 rpm)	(45 rpm)
14	0.000363	0.000707	0.001055
28	0.000194	0.000361	0.000518
42	0.000154	0.000262	0.000372
56	0.000121	0.000203	0.000292
70	0.000112	0.000169	0.000235
84	0.000089	0.000136	0.000194
98	0.000095	0.000141	0.000184
112	0.000091	0.000125	0.000164
126	0.000092	0.000120	0.000147
140	0.000083	0.000106	0.000140

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ของการกระจายตัวของความดัน เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ลูกสูบอยู่กับที่ และหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆ ของช่วงความดัน 0.7-7 MPa (หน่วย: % error)

ความดัน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความเร็วรอบ		
	(15 rpm)	(30 rpm)	(45 rpm)
0.7	0.000464	0.000946	0.001430
1.4	0.000220	0.000456	0.000721
2.1	0.000157	0.000281	0.000434
2.8	0.000032	0.000125	0.000245
3.5	0.000035	0.000072	0.000163
4.2	0.000086	0.000159	0.000231
4.9	0.000067	0.000123	0.000207
5.6	0.000070	0.000137	0.000182
6.3	0.000129	0.000177	0.000232
7	0.000085	0.000091	0.000149

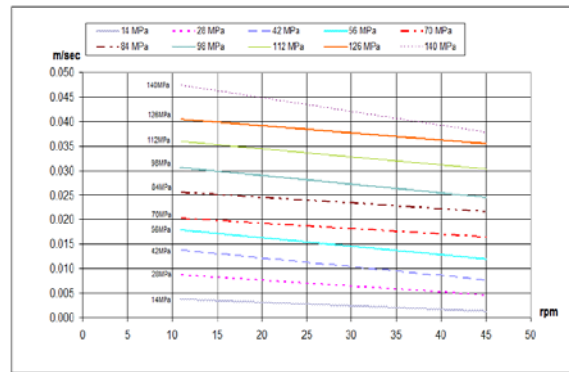
3.2 การวิเคราะห์อัตราการตกอย่างอิสระของ ลูกสูบเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง

การทดลองจะทำโดยนำเครื่องสอบเทียบ ความดันแบบสมมูลความดัน มาต่อเข้ากับเครื่องแปลง ความดัน (Pressure Transmitter) ดังรูปที่ 7 โดยการ ทดลองจะทำการบันทึก ผลของความดันในการทดลอง ที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 45 rpm จนถึง 10 rpm และทำ การบันทึกที่อัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบรวมถึง ช่วงเวลาในการลดลงของความเร็วรอบในการหมุน

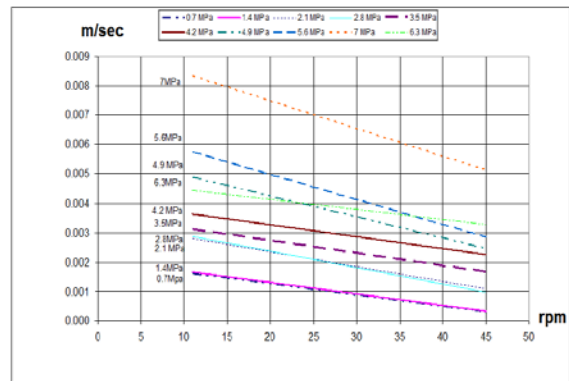


รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองของชุด ความดัน 14MPa - 140MPa

ในส่วนของการทดลองนั้นพบว่าการ เปลี่ยนแปลงของการตกอย่างอิสระจะมีความสัมพันธ์ กับค่าความเร็วรอบของลูกสูบ โดยเมื่อความเร็วในการ หมุนของลูกสูบลดลง จะทำให้อัตราการตกอย่างอิสระ ของลูกสูบเพิ่มมากขึ้น เสมือน แรงที่ใช้พยุงให้ลูกสูบ ลอยตัวในขณะที่ทดลอง มีค่าลดลง แต่การสอบเทียบใน ปัจจุบันนั้นจะไม่มีค่าคำนึงถึงผลกระทบต่อความเร็ว รอบในการหมุน ซึ่งอาจทำให้การสอบเทียบที่ต้องการ ค่าความแม่นยำสูงๆเกิดความผิดพลาดได้ และค่า ความเร็วของการตกอย่างอิสระจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความดันใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 8 และ รูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลความเร็วรอบในการหมุนตัวของลูกสูบกับ อัตราการตกอย่างอิสระที่ช่วงความดัน 14 MPa -140 MPa



รูปที่ 9 ผลความเร็วรอบในการหมุนตัวของลูกสูบกับ อัตราการตกอย่างอิสระที่ช่วงความดัน 0.7 MPa - 7 MPa

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอัตราการตกของ ลูกสูบเมื่อความเร็วรอบลดลงและช่วงเวลาในการ เพิ่มขึ้นของอัตราการตกของลูกสูบ ทำให้สามารถ ทราบค่าความเร่งในการตกของลูกสูบ จากสมการ $v = u + at$ และ สามารถหาแรงยกตัวเนื่องจากการหมุน ของลูกสูบได้ จากสมการ $F = ma$ เมื่อ m คือมวลของ ส่วนที่หมุน ทำให้ขณะทำการสอบเทียบนั้นมวลรวม ของก้อนมวลจะน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในกรณีการ สอบเทียบแบบโครสโพร์ทนั้น จะให้ความสำคัญกับ มวลในหน่วยมิลลิกรัม ซึ่งสามารถทำให้เกิดความ ผิดพลาดขึ้นได้ โดยค่าเฉลี่ยของที่มวลลดลงที่

ความเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบต่างๆจะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักที่ลดลงในช่วงความเร็วรอบ บต่างๆ (หน่วย: มิลลิกรัม)

ความเร็วรอบ (rpm)	มวลในช่วงความดันความ	
	0.7-7 MPa	14-140 MPa
45	307.25	12.77
40	269.33	11.41
35	231.41	10.06
30	193.49	8.71
25	155.58	7.35
20	117.66	6.00
15	79.74	4.65

4. สรุปผลการทดลอง

จากการคำนวณทางตัวเลขค่าความผิดพลาดของการกระจายตัวของความดันเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุนจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากที่ซึ่ง ไม่มีนัยสำคัญพอที่จะใช้การพิจารณาในการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดใช้งาน และในส่วนของอัตราการย่อยอิสระของลูกสูบนั้น ในกรณีของการสอบเทียบแบบคลอสโฟร์ทควรพิจารณาค่าความเร็วในการหมุนตัวของเครื่องสอบเทียบและเครื่องถูกสอบเทียบให้มีความเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบใกล้เคียงกันให้มากที่สุด เพราะแรงยกตัวในขณะหมุนนั้น สามารถกระทบถึงปริมาณมวล (trim mass) ที่ใส่เพิ่มในขณะสอบเทียบได้ โดยช่วงความเร็วรอบที่ 45 และ 15 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ใช้ในการสอบเทียบนั้น ในกรณีของชุดลูกสูบ 0.7-7 MPa นั้น ค่ามวลจะมีความเปลี่ยนแปลงถึง 227.51 มิลลิกรัม และ 8.12 มิลลิกรัม ในกรณีของชุดลูกสูบ 14-140 MPa

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้อุเคราะห์ทางด้านข้อมูลงานวิจัย รวมถึงอุปกรณ์

และสถานที่ในการทดลอง

7 รายการสัญลักษณ์

Variable Constant

A	effective area
A_p	effective area in term of pressure
A_t	effective area in term of temperature
$A_{p,t}$	effective area in term of pressure and temperature
A_{20}	effective area in $20^0 C$
B_f	body force of fluid
B_{fx}	body force of fluid in x-direction
B_{fy}	body force of fluid in y-direction
B_{fz}	body force of fluid in z-direction
F	force in z-axial
g	gravitation acceleration
h_0	gap between piston and cylinder
m	loading mass in z-axial
P	working pressure
p	pressure in fluid element
p_1	pressure to the base of the piston
p_2	ambient pressure
r	radial of piston
r^*	radial of neutral surface
r_0	radial of piston in $x=0$
Re	Reynolds number
T	time
t	temperature of piston and cylinder
U	radial increment of cylinder
u	radial increment of piston
u	velocity of fluid in x-direction
V	fluid velocity
v	velocity of fluid in y-direction
w	velocity of fluid in w-direction
W'	force acting with piston
w'	force acting with fluid between gap
x	unit vector in x-direction

y unit vector in y-direction

z unit vector in z-direction

$\frac{D}{DT}$ substantive derivative

Greek Symbol

β thermal expansion of the effective area

ρ hydraulic oil density

ρ_a air density

ρ_{mi} loading mass density

σ surface tension of the hydraulic oil

V volume of item submerged in the pressure fluids

λ pressure distortion coefficient

τ viscous stress

μ dynamic viscosity

Cultivation Metrological Knowledge, Merida, Mexico.

[4] Robert, S., Sylvia, L. and Graham, A.(1982).*The Pressure Balance Theory and Practice*, National Physical Laboratory, London.

[5] Versteeg, H.K., Malalasekera, W.(1995).*An Introduction To Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, Longman Scientific & Technical ,New York.

[6] Anders, C., Henrik, H. and Daniel, N. (2004). Simulation Fabrication and Characterization of Magnetophoretic Microfluid System, Institute of Micro and Nanotechnology Technical University of Denmark. Denmark, available online at [http:// www2.mic.dtu.dk](http://www2.mic.dtu.dk)

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Caravaggio, M., Molinar Min Beciet, G., De Maria, P., Buonanno, G. and Giovinco, G.(2007). Fem Analysis for an Industrial Pressure Balance from 3 MPa to 120 MPa in Liquid Medium, paper present in International Conference Cultivating metrological knowledge, Merida, Mexico.

[2] Patipat, W. (2008).A Comparison of the Pressure Distortion Coefficient of Piston & Cylinder Unit of Pressure Balance between Numerical Method and Experimental Result to be Used as the Primary Standard in Thailand , symetrology-334-414,National Institute of Metrology, Pathumthani, Thailand, available online at <http://www.nimt.or.th>

[3] Buonanno, G., Man, J., Moliner Min Beciet , G. (2007). Characterization of the Imgc-dh 100l Pressure Balance using Finite element Analysis, 2007, paper present in International Conference