

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 การศึกษาผลของการกระจายตัวของความดันระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเมื่อความเร็วรอบในการหมุนตัวของลูกสูบเปลี่ยนแปลงไปโดยทำการทดลองจากการคำนวณเชิงตัวเลข และกรณีการทดลองหาความเปลี่ยนแปลงของอัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบเมื่อเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าค่าการกระจายตัวของความดันเฉลี่ยจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนของลูกสูบเพิ่มมากขึ้น และในส่วนของทดลอง พบว่าอัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วในการหมุนตัวของลูกสูบด้วย

คำหลัก: เครื่องสอบเทียบความดัน, ความเร็วรอบ, การกระจายตัวของความดัน, อัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบ

Abstract

This study was aimed to investigate the effect of piston rotation on the cylinder's sink rate of the pressure balance calibrator. Using hydraulic pressure balance calibrator on the range of 0.7 to 7.0 MPa and 14 to 140 MPa, and divide two case study, First case the comparison pressure distribution between piston and cylinder had been taken in the case of "with" and "without" rotating speed of piston cylinder by numerical method, the other case the comparison piston sink rate when rotation speed decreased. From the simulation results, it was shown percentage error of pressure distribution along the length of piston cylinder. From the experimental results, it's clearly shown that the piston sink rate and increase of mass 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) ซึ่งการสอบเทียบวิธีนี้จะอาศัยการสังเกตการตกอย่างอิสระของลูกสูบของเครื่องสอบเทียบเพื่อพิจารณาในการใส่มวล (trim mass) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้อัตราการตกอย่างอิสระของเครื่องสอบเทียบทั้งสองเปลี่ยนไป

ปัจจุบันการหาพื้นที่หน้าตัดใช้งานนั้น นอกจากจะสามารถทำได้จาก การทดลองแล้ว ยังสามารถใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมา คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดใช้งานด้วย จากงานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขหาความเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดใช้งาน ที่ผ่านมานั้นจะไม่นำผลกระทบเนื่องจากความเร็วในการหมุนลูกสูบมาวิเคราะห์ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองผิดพลาดจากการทดลองจริงได้ ดังนั้นกรณีศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทาง

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

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

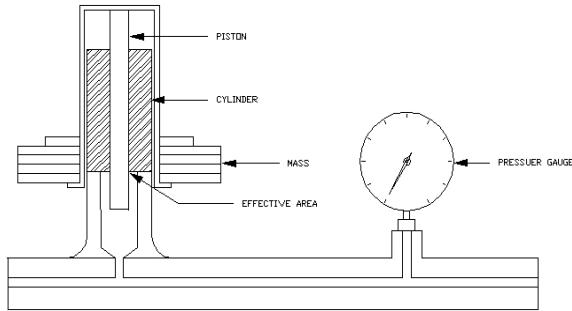
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

2.2. สมการของแรงที่มีผลต่อความดันใช้งานของเครื่องสอบเทียบ

เครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดันนั้นจะสร้างความดันจากการใส่มวลที่ปลายด้านบนของลูกสูบ โดยเมื่อค้ำหนึ่งถึงแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้เกิดแรงขึ้น นอกจากแรงที่เกิดจากก่อนมวลแล้วยังสามารถเกิดขึ้นจากแรงอุ้มอากาศที่กระทำกับมวล

แรงลอยตัวของลูกสูบในส่วนที่จมอยู่ในน้ำมันไฮดรอลิก และจากแรงตึงผิวของน้ำมันไฮดรอลิก [4]



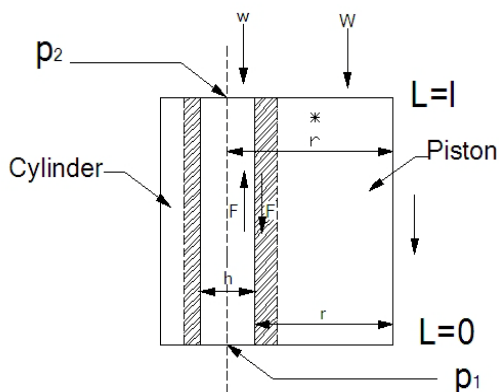
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน

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

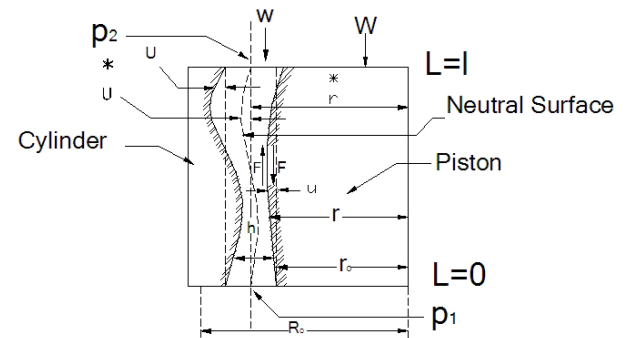


รูปที่ 2 พื้นที่กึ่งกลางระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบในทางอุดมคติ

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

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

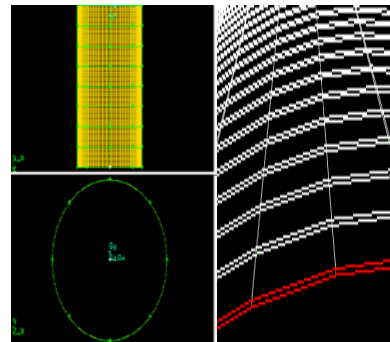
กรณีของการไหลผ่านที่แคบในระดับไมโครเมตร ค่า $h_0 \ll 1$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นและ

ความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิก ทำสามารถใช้การวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ [6]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

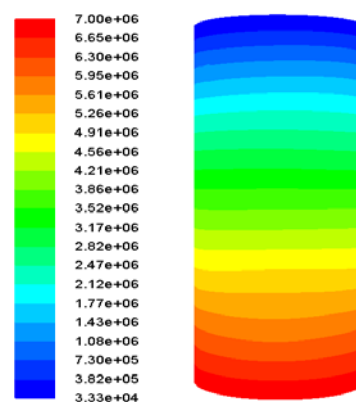
3.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสร้างแบบจำลองจากข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางจริงของลูกสูบและกระบอกสูบ ดังรูปที่ 4



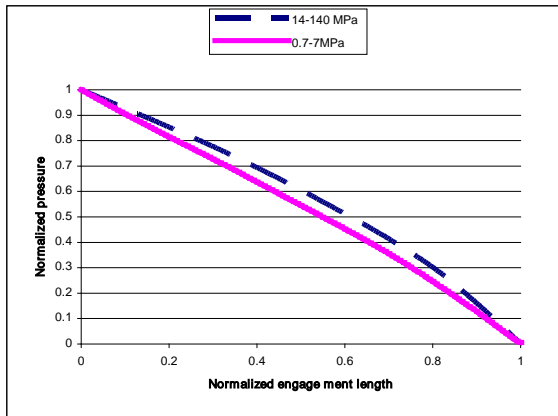
รูปที่ 4 พื้นที่การไหลของน้ำมันไฮดรอลิกของเครื่องสอบเทียบ ที่ช่วงความดัน 0.7MPa - 7MPa

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 และหมุนด้วยความเร็วรอบต่าง (หน่วย : % error)

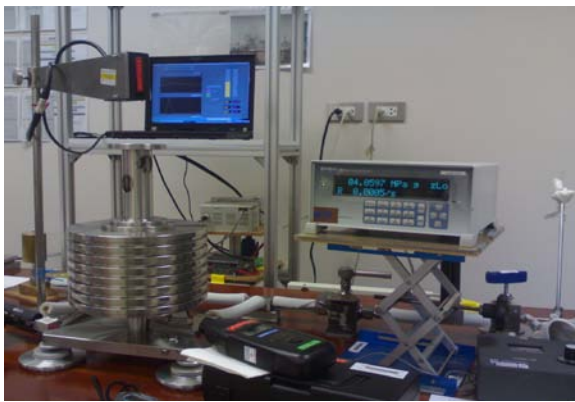
ความดัน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความเร็วรอบ		
	(15 rpm)	(30 rpm)	(45 rpm)
14	0.000363	0.000707	0.001055
28	0.000194	0.000361	0.000518
42	0.000154	0.000262	0.000372
56	0.000121	0.000203	0.000292
70	0.000112	0.000169	0.000235
84	0.000089	0.000136	0.000194
98	0.000095	0.000141	0.000184
112	0.000091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

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ของการกระจายตัวของความดัน เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ลูกสูบอยู่กับที่ และหมุนด้วยความเร็วรอบต่าง (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

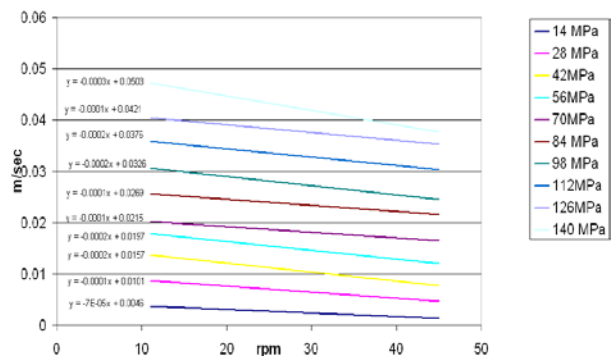
3.2 การวิเคราะห์อัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง

การทดลองจะทำได้โดยนำเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมมูลความดัน มาต่อเข้ากับเครื่องแปลงความดัน (Pressure Transmitter) ดังรูปที่ 7 โดยการทดลองจะทำการบันทึก ผลของความดันในการทดลองที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 45 rpm จนถึง 10 rpm และทำการบันทึกที่อัตราการตกอย่างอิสระของลูกสูบรวมถึงช่วงเวลาในการลดลงของความเร็วรอบในการหมุน

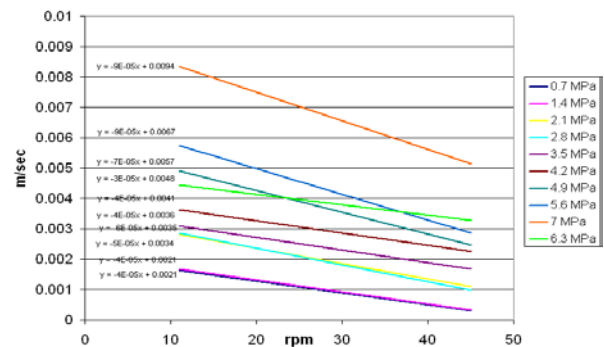


รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองของชุดความดัน 14MPa – 140MPa

ในส่วนของการทดลองนั้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของการตกอย่างอิสระจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของลูกสูบ และเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอัตราการตกอย่างอิสระส่งผลให้แรงที่ใช้พยุงให้ลูกสูบลอยตัวมีค่าลดลงทั้งนี้การสอบเทียบในปัจจุบันนั้นจะไม่มีค่าคำนึงถึงผลกระทบต่อความเร็วรอบในการหมุน ซึ่งอาจทำให้การสอบเทียบที่ต้องการค่าความแม่นยำสูงๆเกิดความผิดพลาดได้ และค่าความเร็วของการตกอย่างอิสระจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลความเร็วรอบในการหมุนตัวของลูกสูบกับอัตราการตกอย่างอิสระที่ช่วงความดัน 14 MPa - 140 MPa



รูปที่ 9 ผลความเร็วรอบในการหมุนตัวของลูกสูบกับอัตราการตกอย่างอิสระที่ช่วงความดัน 0.7 MPa - 7 MPa

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอัตราการตกของลูกสูบเมื่อความเร็วรอบลดลงและคาบเวลาในการเพิ่มขึ้นของอัตราการตกของลูกสูบ ทำให้สามารถทราบค่าความเร่งในการตกของลูกสูบ จากสมการ $v = u + at$ และสามารถหาแรงยกตัวเนื่องจากการหมุนของลูกสูบที่ จากสมการ $F = ma$ เมื่อ m คือมวลของส่วนที่หมุน ทำให้ขณะทำการสอบเทียบนั้นมวลรวมของก้อนมวลจะน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในกรณีการสอบเทียบแบบโครสโพร์ทนั้น จะให้ความสำคัญกับมวลในหน่วยมิลลิกรัม ซึ่งสามารถทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ โดยค่าเฉลี่ยของมวลที่เพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบลดลงนั้นจะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คำนวณน้ำหนักที่ลดลงในช่วงความเร็วรอบ บ
 ต่างๆ (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

จากการคำนวณทางตัวเลขค่าความ
 ผิดพลาดของการกระจายตัวของความดันเมื่อเปลี่ยน
 ความเร็วรอบในการหมุนจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย
 มากที่ซึ่ง ไม่มีนัยสำคัญพอที่จะใช้การพิจารณาในการ
 คำนวณเชิงตัวเลข และในส่วนของอัตราการอย่าง
 อิศระของลูกสูบนั้น ในกรณีของการสอบเทียบแบบ
 คลอสเฟิร์ทควรพิจารณาค่าความเร็วในการหมุนตัว
 ของเครื่องสอบเทียบและเครื่องถูกสอบเทียบให้มี
 ความเร็วรอบในการหมุนของลูกสูบใกล้เคียงกันให้
 มากที่สุด เพราะแรงยกตัวในขณะหมุนมีค่าที่สามารถ
 กระทบถึงปริมาณมวล (trim mass) ที่ใส่เพิ่มในขณะ
 สอบเทียบด้วย โดยช่วงความเร็วรอบที่ 45 และ 15
 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ใช้ในการสอบเทียบนั้น ใน
 กรณีของชุดลูกสูบ 0.7-7 MPa นั้น ค่ามวลจะมีความ
 เปลี่ยนแปลงถึง 227.51 มิลลิกรัม และ 8.12 มิลลิกรัม
 ในกรณีของชุดลูกสูบ 14-140 MPa

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้
 การสนับสนุนทางด้านข้อมูลงานวิจัย 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 20^0C
B_f	body of fluid
B_{fx}	body of fluid in x-direction
B_{fy}	body of fluid in y-direction
B_{fz}	body 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 neutral surface
r_0	radial of piston in $z=0$
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

[4] Robert, S., Sylvia, L. and Graham, A.(1982).*The Pressure BalancTheory 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 Cultivation Metrological Knowledge, Merida, Mexico.