

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอก
สูบของเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิง
ตัวเลขเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย

ปริญญานิพนธ์
ของ
ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ตุลาคม 2550

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอก
สูบของเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิง
ตัวเลขเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย

ปริญญานิพนธ์
ของ
ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ตุลาคม 2550
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอก
สูบของเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิง
ตัวเลขเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย

บทคัดย่อ
ของ
ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ตุลาคม 2550

A COMPARISON OF THE PRESSURE DISTORTION COEFFICIENT OF THE
PISTON AND CYLINDER UNIT OF PRESSURE BALANCE BETWEEN
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHOD TO BE USED AS THE PRIMARY
STANDARD IN THAILAND

AN ABSTRACT
BY
PADIPAT WONGTHEP

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University
October 2007

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบของ
เครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้เป็น
มาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย
ของ
ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)
วันที่ เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ชาญ ถนังงาน)

.....กรรมการ
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....กรรมการ
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

.....กรรมการ
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีวัชร วีระแก้ว)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนม รุ่ง กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ เรืออากาศเอก ธวัช ช่างปั้น ผู้ช่วยหัวหน้าฝ่ายมาตริวิทยาเชิงกล คุณอนุสรณ์ ทนหมื่นไวย หัวหน้าห้องปฏิบัติการความยาว สถาบันมาตริวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้เครื่องมือ ให้คำปรึกษาและแนะนำ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ ดร.วลาดีเมียร์ ซาบูก้า หัวหน้ากลุ่มห้องปฏิบัติการความดัน สถาบันมาตริวิทยาแห่งประเทศไทยสหพันธ์รัฐเยอรมนี ที่ให้ข้อเสนอแนะ ซึ่งเป็นประโยชน์มากต่อปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณ สาธิต นิลใย และคุณ ทวีศักดิ์ ศรีช่วย บริษัทแอฟริแคท สำหรับให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม SolidWork 2004 และ COSMOSWork 2004

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชาญ ถนัดงาน ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีวัชร วีระเกล้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ประธานและกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ในการลำดับ การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และ ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมชั้นเรียน โครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มศว. และ รร. จปร.สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่น 3 ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนส่งกำลังใจให้กันเสมอ

ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
	ขอบเขตของการวิจัย.....	6
	นิยามศัพท์เฉพาะ.....	6
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
	หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเพรสเซอร์บาลานซ์.....	8
	ทฤษฎีของพื้นที่หน้าตัดของเพรสเซอร์บาลานซ์.....	14
	รูปแบบการไหลของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ.....	22
	การหาค่าการเปลี่ยนแปลงของการยืดหยุ่น.....	27
	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
	วิธีการดำเนินการวิจัยโดยการทดลอง.....	40
	วิธีการดำเนินการวิจัยโดยวิธีเชิงตัวเลข.....	48
4	ผลการวิจัย.....	57
	ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของ ชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ระหว่างการ ทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa.....	57
	ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและ กระบอกสูบ ที่เกิดจากอุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C และวัสดุ ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าไร้สนิมกับ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข ณ ความดันช่วง ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa.....	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	81
สรุปผล	81
อภิปรายผล	82
ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก ใบรับรองผลการสอบเทียบเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์	
มาตรฐาน	89
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณและตารางผลการทดลองและวิธี	
เชิงตัวเลข	94
ภาคผนวก ค ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอก	
สูบทดลอง	110
ภาคผนวก ง สมบัติของน้ำมันและวัสดุ	116
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	
วิศวกรรมลันนา ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 8-9 สิงหาคม 2550 จ.เชียงใหม่จัดโดย	
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (สาขาภาคเหนือ)	122
ภาคผนวก ฉ คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย	131
ประวัติย่อผู้วิจัย	135

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงความหนาแน่นและมวลของแผ่นน้ำหนัก ลูกสูบ และตุ้มน้ำหนักขนาดเล็ก.....	43
2	ตัวแปรต่างๆ ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน.....	44
3	ความหนาแน่นและมวลของแผ่นน้ำหนักและลูกสูบของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน.....	44
4	รูปแบบของวัสดุที่ใช้ในการสร้างลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในแต่ละช่วงความดัน.....	55
5	คุณสมบัติของเอลิเมนต์สำหรับกระบอกสูบในช่วงความดันต่างๆ.....	55
6	คุณสมบัติของเอลิเมนต์สำหรับลูกสูบในช่วงความดันต่างๆ.....	56
7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการทดลอง.....	59
8	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากวิธีเชิงตัวเลข.....	61
9	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข.....	66
10	แสดงผลเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข.....	67
11	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข.....	69
12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข.....	71
13	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข.....	73

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
14	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C จากวิธีเชิงตัวเลข.....	75
15	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C จากวิธีเชิงตัวเลข.....	77
16	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C จากวิธีเชิงตัวเลข.....	79
17	แสดงตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองที่ความดันประมาณ 2.1 MPa.....	95
18	แสดงการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบสำหรับวิธีเชิงตัวเลข.....	98
19	แสดงผลการทดลองของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C.....	101
20	แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 1.75 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C.....	102
21	แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 3.5 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C.....	104
22	แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 7 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C.....	106
23	แสดงผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของลูกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa.....	108
24	แสดงผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa.....	109
25	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 0°.....	111
26	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 45°.....	111
27	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 90°.....	112

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
28	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 135°	112
29	เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 0°	113
30	เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 45°	113
31	เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 90°	114
32	เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 135°	114
33	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และรัศมี (R) เฉลี่ยของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa	115
34	เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และรัศมี (r) เฉลี่ยของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa	115
35	แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C	117
36	แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C	117
37	แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C	118
38	แสดงสมบัติของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์	120
39	แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	120
40	แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและทั้งสแตนคาร์ไบด์	121

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงรูปแบบการยอมรับด้านการวัด.....	2
2 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบ.....	4
3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเพรสเซอร์บาลานซ์.....	5
4 แสดงรูปร่างของลูกสูบแบบต่างๆ.....	10
5 แสดงโครงสร้างแบบต่างๆของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ.....	12
6 แสดงรูปแบบของชุดลูกสูบและกระบอกสูบอย่างง่าย.....	15
7 แสดงรูปแบบของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบอย่างง่าย.....	15
8 แสดงรูปแบบทั่วไปของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ.....	18
9 แสดงปริมาตรควบคุมสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow).....	23
10 แสดงส่วนประกอบของความเค้นในพิกัดทรงกระบอก.....	28
11 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	33
12 แสดงเอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่เหลี่ยม.....	34
13 แสดงเอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่เหลี่ยม.....	35
14 แสดงเอลิเมนต์ทรงตันลำดับที่สองทรงสี่เหลี่ยม.....	35
15 ผลขั้นตอนการทดลอง.....	40
16 แสดงฐานติดตั้งชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ.....	41
17 แสดงชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง.....	41
18 แสดงชุดเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน.....	42
19 แสดงชุดลูกสูบและกระบอกสูบสำหรับเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน.....	42
20 การทำความสะอาดชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง.....	42
21 แสดงการประกอบชุดลูกสูบและกระบอกสูบเข้ากับฐาน.....	45
22 แสดงการติดตั้งชุดเพรสเซอร์บาลานซ์ของทั้งสองชุด.....	45
23 รูปแบบการติดตั้งและการใช้เลเซอร์.....	46
24 ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข.....	48
25 แสดงชุดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบทดลอง.....	49
26 แสดงชุดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง.....	49
27 แสดงการทำเครื่องหมายของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง.....	50
28 แสดงชุดของการติดตั้งโหนดเซลล์สำหรับการวัดแรง.....	50
29 แสดงการวางลูกสูบทดลองเข้ากับฐานรองในขณะวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ.....	51
30 แสดงขั้นตอนการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ.....	51
31 แสดงการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง.....	52

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
32 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 0.7-7 MPa	52
33 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 7-70 MPa	53
34 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 14-140 MPa	53
35 แสดงการสร้างโมเดลของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง	54
36 แสดงเงื่อนไขบังคับ (ก) และการป้องกันความดัน (ข)	56
37 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	56
38 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 0.7-7 MPa จากการทดลอง	58
39 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 7-70 MPa จากการทดลอง	58
40 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 14-140 MPa จากการทดลอง	59
41 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 0.7-7 จากวิธีเชิงตัวเลข	60
42 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 7-70 MPa จากวิธีเชิงตัวเลข	60
43 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วง ความดัน 14-140 MPa จากวิธีเชิงตัวเลข	61
44 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C	62
45 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C	62
46 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C	63
47 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C	63
48 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C	64
49 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตน คาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C	64

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
65 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa	76
66 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa	76
67 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 14-140 MPa	77
68 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa	78
69 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa	78
70 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ อ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa	79
71 ผลของความดันที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ	82
72 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ	83
73 ผลของวัสดุต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ	83
74 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18794 ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ มาตรฐานในช่วงความดัน 0.5-50 MPa จากบริษัท DH-budenberg ประเทศฝรั่งเศส	90
75 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18792 ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ มาตรฐานในช่วงความดัน 1-10 MPa จากบริษัท DH-budenberg ประเทศฝรั่งเศส	91
76 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข F120458/1 ของเครื่องเพรสเซอร์ บาลานซ์มาตรฐาน ในช่วงความดัน 50-500 MPa จากสถาบัน มาตรวิทยาแห่งประเทศฝรั่งเศส	92
77 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข MP-06-0034 ของแผ่นน้ำหนักเครื่อง เพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย	93
78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ความดันต่างๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง	119
79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ความดันต่างๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง	119
80 แสดงกำหนดการประชุมวิชาการวิศวกรรมล้านนา	123

ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ. (2550). การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบของเครื่องมีอัตราความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย. ปรินญา นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว, พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลข และศึกษาผลกระทบของวัสดุและอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ โดยอุณหภูมิอ้างอิง และวัสดุชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้คือ 15°C , 20°C และ 25°C วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ สำหรับวิธีเชิงตัวเลข ตามลำดับ ที่ช่วงความดัน 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa และใช้โปรแกรม COSMOSWork 2004 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ระหว่างการทดลองและวิธีเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่าง 5.23%, 5.73% และ 3.49% ที่ช่วงความดัน 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa ตามลำดับ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยกว่าวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ และวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหมาะสำหรับการทำชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่ช่วงความดัน 0.7-7 MPa และ 7-140 MPa ตามลำดับ

Padipat Wongthep. (2007). *A Comparison of the Pressure Distortion Coefficient of the Piston and Cylinder Unit of Pressure Balance between Experimental and Numerical Method to be Used as the Primary Standard in Thailand*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst.Prof. Vichit Buakaew, Lt. Col. Asst.Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung.

The purpose of this research is to compare the pressure distortion coefficient of the piston and cylinder units that being determined from experimentation and numerical method. And also to study the effect from materials and temperatures over the piston and cylinder which may be influence to the value of pressure distortion coefficient. The referent temperatures and materials of piston and cylinder units that used in this research were 15°C, 20°C and 25°C and tungsten carbide for experimentation and numerical method, stainless steel and stainless steel-tungsten carbide for numerical method respectively. The apparatus used in this research were the piston and cylinder units in hydraulic pressure range 0.7-7 MPa, 7-70 MPa and 14-140 MPa. The COSMOSWork 2004 was used for finite element analysis.

From this research found that the pressure distortion coefficient occurred on the piston and cylinder units made by tungsten carbide obtained from experimentation agree with result from numerical analysis within 5.23%, 5.73% and 3.49% in the pressure range 0.7-7 MPa, 7-70 MPa and 14-140 MPa respectively at referent temperature 20°C. The effect from temperature to the piston and cylinder units is small compare to the material that make a piston and cylinder units. In the pressure range 0.7-7 MPa, stainless steel and tungsten carbide can be used to make a piston and cylinder unit. However tungsten carbide is a appropriate material for making a piston and cylinder unit.

บทที่ 1

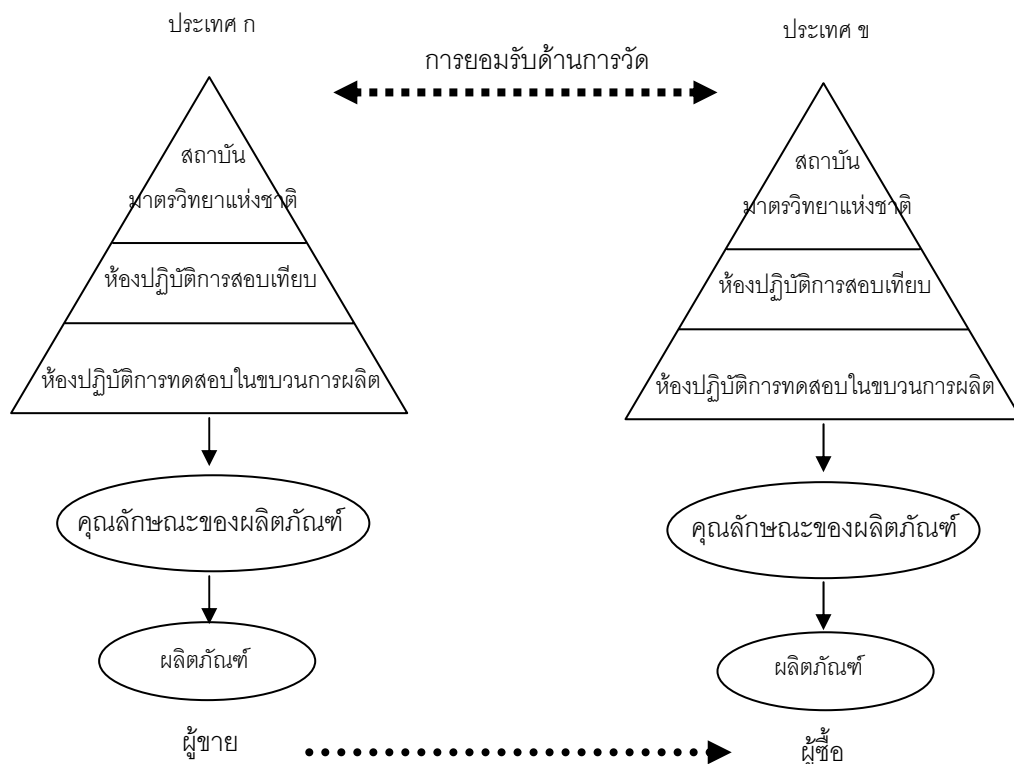
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาด้านมาตรวิทยาของโลกในปัจจุบันได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็วในมิติของการเพิ่มความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความต้องการของโลกทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และการค้าระหว่างประเทศที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลุ่มประเทศที่มีความสามารถทางด้านการวัดต่ำกว่าจะเป็นฝ่ายเสียเปรียบต่อกลุ่มประเทศที่มีขีดความสามารถในทางการวัดสูงโดยอาจถูกนำไปใช้เป็นมาตรการกีดกันทางการค้า ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประเทศต่างๆในโลกหันมาปรับเอาระบบควบคุมคุณภาพต่างๆ เช่น ISO 9000 และ ISO 14000 มาใช้ในระบบการผลิตและการบริการเพื่อเป็นมาตรการในการสนับสนุนผลิตผลทางการผลิตและบริการของประเทศนั้นๆ

ความจริงแล้วความต้องการด้านมาตรวิทยาได้มีมานานแล้วจากผู้ที่เกี่ยวข้องด้านการค้าและเศรษฐกิจ ตั้งแต่กลางคริสต์ศตวรรษที่ 19 ได้มีการลงนามใน “Convention du Metre” ที่กรุงปารีสโดยกลุ่มประเทศในแถบยุโรปจำนวน 17 ประเทศ และต่อมาได้กลายเป็นพื้นฐานของระบบหน่วยวัดสากล (International system of units: SI) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน

เนื่องจากในปัจจุบันโลกเข้าสู่ยุคโลกาภิวัตน์การติดต่อทางธุรกิจและการค้าระหว่างประเทศ นำมาสู่ความมั่งคั่งของประเทศ ซึ่งประเทศที่มีความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจมักเป็นประเทศที่มีความเข้มแข็งทางด้านความสามารถในการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเป็นเครื่องมือหลักในการสนับสนุน บุกเบิกหรือแม้แต่กีดกันทางการค้าของตน อย่างไรก็ตามเมื่อมีการค้าขายระหว่างกันอย่างกว้างขวางเกิดขึ้นในโลก ความถูกต้องของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ก็ยิ่งต้องถูกเน้นมากขึ้นด้วย ปัญหาที่ตามมาคือการวัดและทดสอบคุณสมบัติหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ซื้อขายกัน ซึ่งจะถูกกระทำโดยผู้ซื้อและผู้ขาย หากเกิดการได้เปรียบหรือเสียเปรียบกันขึ้นเนื่องจากผลการตรวจสอบของผู้ขายและผู้ซื้อไม่สอดคล้องกัน การโต้แย้งก็เกิดขึ้นซึ่งอาจรุนแรงถึงขั้นผลิตภัณฑ์ที่จะซื้อขายกันถูกส่งกลับเนื่องจากมีคุณสมบัติหรือคุณลักษณะไม่เป็นไปตามที่ตกลงกันไว้จึงเกิดการสูญเสียอย่างมหาศาล ดังนั้นแต่ละประเทศจึงพยายามก่อตั้งหน่วยงานขึ้นมารับผิดชอบในการพัฒนาระบบการวัดของประเทศอื่นได้แก่สถาบันมาตรวิทยาของแต่ละประเทศ (National Metrology Institute: NMI)



ภาพประกอบ 1 แสดงรูปแบบการยอมรับด้านการวัด

ดังนั้นสถาบันมาตรวิทยาของแต่ละประเทศจึงเป็นตัวกลางระหว่างระบบการวัดภายในประเทศของตนเองกับระบบการวัดระหว่างประเทศ ซึ่งผู้ทำหน้าที่เป็นแกนกลางหรือตัวแทนคือ The International Bureau of Weights and Measures (BIPM) โดยจะทำหน้าที่หลักในการเชื่อมโยงระบบการวัดระหว่างประเทศของแต่ละประเทศให้สอดคล้องกันทั้งนี้เพื่อให้ระบบการวัดในแต่ละประเทศสอดคล้องกันมากที่สุด การดำเนินการดังกล่าวคือการแบ่งกลุ่มประเทศต่างๆ ทั่วโลกออกเป็นกลุ่มๆ โดยให้แต่ละกลุ่มมีสมาชิกอยู่ในภูมิภาคเดียวกัน เช่น เยอรมัน อังกฤษ ฝรั่งเศส อิตาลี อยู่ในกลุ่ม EUROMET หรือ ไทย ญี่ปุ่น จีน ไต้หวัน มาเลเซีย สิงคโปร์ ออสเตรเลีย อินเดีย อยู่ในกลุ่ม APMP เป็นต้น หลังจากนั้นคณะกรรมการของ BIPM ก็จะจัดให้มีการวัดเปรียบเทียบผลระหว่างกันโดยตัวแทนของกลุ่มต่างๆ (ซึ่งมักดำเนินการโดยสถาบันมาตรวิทยาที่มีความเข้มแข็งทางด้านวิชาการและสามารถสถาปนามาตรฐานปฐมภูมิได้และเป็นที่ยอมรับในความสามารถในโลกแล้ว) โดยการวัดเปรียบเทียบผลนี้จะดำเนินการในทุกหน่วยวัดรวมถึงหน่วยวัดของความดันด้วย ปัญหาที่เกิดขึ้นในโลกปัจจุบันคือสถาบันมาตรวิทยาที่มีความสามารถสูงจะสามารถสถาปนามาตรฐานปฐมภูมิขึ้นเอง ซึ่งจากความสามารถดังกล่าวจะช่วยให้ได้รับการยอมรับในสังคมมาตรวิทยาระหว่างประเทศ แต่ประเทศที่ไม่มีขีดความสามารถถึงขั้นนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีส่งมาตรฐานอ้างอิงของตนเองไปรับการสอบเทียบจากมาตรฐานปฐมภูมิของประเทศอื่นดังนั้นการยอมรับในสังคมโลกจึงลดลง

สำหรับมาตรวิทยาในประเทศไทยนั้น มีการพัฒนามาเป็นลำดับคือ

1.พระราชบัญญัติชั่งตวงวัด พ.ศ. 2466 โดยสำนักงานชั่งตวงวัดกระทรวงพาณิชย์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2542)

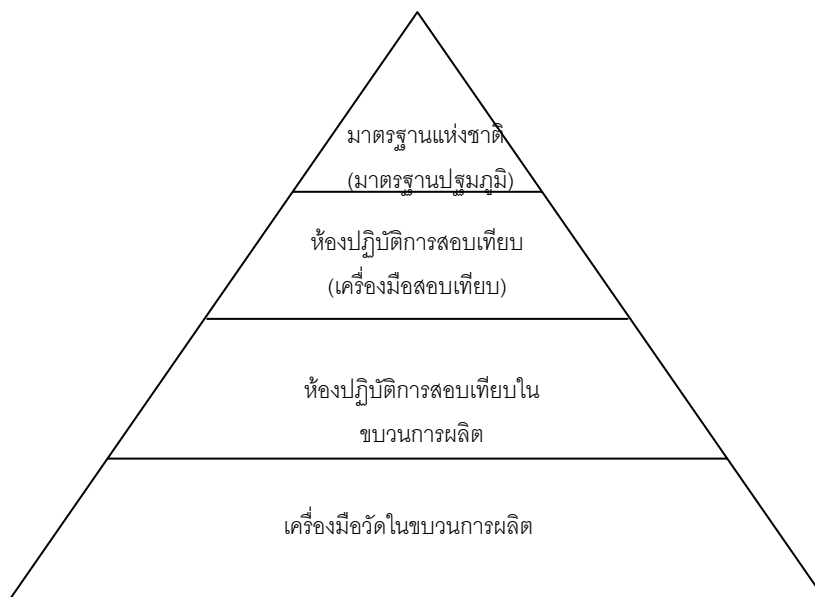
2.ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา (พ.ศ. 2504) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.กองชั่งเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องวัด (พ.ศ. 2508) กรมสื่อสารทหารอากาศ กองทัพอากาศ

4.โครงการมาตรวิทยาและการรับรองห้องปฏิบัติการ (พ.ศ. 2509) กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

12 กันยายน พ.ศ. 2540 พระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ.2540 ได้รับการประกาศในราชกิจจานุเบกษา และสำหรับมาตรวิทยาแห่งชาติได้ถูกก่อตั้งขึ้นเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ.2541 โดยมีฐานะเป็นนิติบุคคลอยู่ภายใต้กำกับของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (ในขณะนั้น) โดยมีหน้าที่หลักตามมาตรา 13 วงเล็บ 2 คือ “พัฒนาระบบมาตรวิทยา จัดหาและเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติ วัสดุอ้างอิงมาตรฐานของประเทศทุกสาขา เพื่อให้สอดคล้องกับระบบมาตรวิทยาสากล รวมถึงการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดไปสู่มาตรฐานแห่งชาติ” ซึ่งสถาบันได้ดำเนินการพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดในสาขาการวัดต่างๆ มาอย่างต่อเนื่อง ภายใต้การสนับสนุนทางด้านวิชาการจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของมิตรประเทศอันได้แก่ ออสเตรเลีย จีน ญี่ปุ่น และเยอรมัน ซึ่งสาขาความดันก็เป็นสาขาการวัดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน หากการก่อตั้งสถาบันเพิ่งได้ดำเนินการเป็นระยะเวลาอันไม่นานนัก มาตรฐานการวัดความดันในช่วง 0.7-140 MPa ที่สถาบันได้รักษาและใช้ถ่ายทอดให้กับภาคอุตสาหกรรมในประเทศ จึงเป็นเพียงเครื่องมือมาตรฐานอ้างอิงที่ส่งไปรับการสอบเทียบมาจากมาตรฐานปฐมภูมิของต่างประเทศ ดังนั้นทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก และยังทำให้การยอมรับระบบมาตรวิทยาในประเทศลดลง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องพยายามสถาปนามาตรฐานปฐมภูมิด้านความดันในช่วงดังกล่าวขึ้น

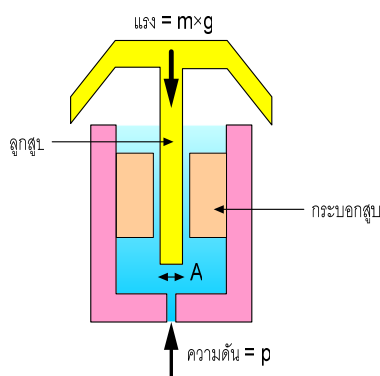
ในการวัดความดันโดยทั่วไปหากต้องการให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำตามต้องการ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานด้านความดันที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า ซึ่งเครื่องมือมาตรฐานดังกล่าวนั้นจะต้องได้รับการสอบเทียบมาจากเครื่องมือมาตรฐานด้านความดันที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าขึ้นไปอีก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตามภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบ

ขั้นตอนดังกล่าวจำเป็นต้องสิ้นสุดที่เครื่องมือประเภทหนึ่งที่ไม่ต้องการการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานด้านความดันอื่นๆอีก เครื่องมือประเภทนี้เรียกว่าเครื่องมือมาตรฐานปรมาณู

ในอดีตจนถึงปัจจุบันเครื่องมือมาตรฐานปรมาณูด้านความดันจะใช้ลำปรอท (mercury manometer) เป็นหลัก เนื่องจากความหนาแน่นของปรอทมีความเสถียรสูงและมีความหนาแน่นถึง $13,595.08 \text{ kg m}^{-3}$ ที่ 0°C แต่อย่างไรก็ตามลำปรอทสามารถใช้งานได้ผลดีเฉพาะความดันในช่วงต่ำเท่านั้น (ประมาณไม่เกิน 200 kPa) เนื่องจากข้อจำกัดในปัญหาความสูงของปรอทจึงไม่สามารถสร้างลำปรอทให้ครอบคลุมความดันสูงๆ ได้ ดังนั้น การถ่ายทอดค่าจากมาตรฐานปรมาณูที่ค่าความดันต่ำไปยังความดันที่สูงกว่าจึงเป็นสาเหตุให้มีค่าความไม่แน่นอนสูงเกิดขึ้นในระบบการวัด แต่ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความดันในระดับมาตรฐานปรมาณูขึ้นใหม่โดยใช้เพรสเชอร์บาลานซ์ (pressure balance) แทน ซึ่งใช้สมการของความดันเป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้าง ตามภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเพรสเซอร์บาลานซ์

หลักการทำงานพื้นฐานของเพรสเซอร์บาลานซ์ คือ ความดันจะกระทำที่ผิวด้านล่างของลูกสูบที่ซึ่งไม่มีแรงเสียดทานในกระบอกสูบที่อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงโดยมีของไหลไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเพื่อป้องกันการสัมผัสของส่วนประกอบทั้งสองในระหว่างการทำงาน และมีแรงที่เกิดจากน้ำหนักที่กระทำจากด้านบนของลูกสูบ

เมื่อความดันที่กระทำที่ผิวด้านล่างของลูกสูบมีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงเป็นผลทำให้พื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเปลี่ยนแปลงตามความดันไปด้วย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 1

$$A_p = A_0(1 + \lambda P) \quad (1)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) มีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดที่ความดันศูนย์เกจ (A_0) กับพื้นที่หน้าตัด (A_p) ที่เปลี่ยนแปลงตามความดันและเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่จะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดความดันในช่วงการวัดสูงๆ เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันโดยวิธีทดลอง ซึ่งเป็นปัญหาของการใช้เพรสเซอร์บาลานซ์เพื่อเป็นมาตรฐานปฐมภูมิด้านความดัน ดังนั้นการทดลองพร้อมกับวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันจึงเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลข

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของวัสดุและอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ช่วงความดันสำหรับการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ

1.3.1.1 ช่วงความดัน 0.7-7 MPa

1.3.1.2 ช่วงความดัน 7-70 MPa

1.3.1.3 ช่วงความดัน 14-140 MPa

1.3.2 สภาพแวดล้อมในการทดลองสำหรับการวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานสากลคือ อุณหภูมิ $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, ความชื้น $(55 \pm 10)\%$ และความดันบรรยากาศ $(1,010 \pm 10)$ mbar

1.3.3 อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับการวิจัยนี้คือ 15°C , 20°C และ 25°C

1.3.4 ของไหลที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้คือ diethyl-hexyl-sebacate (DHS)

1.3.5 วัสดุของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ สำหรับการทดลอง และทังสเตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมกับทังสเตนคาร์ไบด์ สำหรับวิธีเชิงตัวเลข

1.3.6 การไหลของของไหลสำหรับวิธีเชิงตัวเลขในการวิจัยนี้เป็นการไหลในแนวแกน 1 มิติ และเป็นการไหลแบบราบเรียบ

1.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในวิธีเชิงตัวเลขได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป COSMOSWork 2004

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.4.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่หน้าตัดเดิมเมื่อถูกความดันกระทำ

1.4.2 เพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน หมายถึง เครื่องมือวัดความดันอ้างอิงที่ได้รับการสอบเทียบมาจากมาตรฐานแห่งชาติประเทศฝรั่งเศส

1.4.3 เพรสเซอร์บาลานซ์ทดลอง หมายถึง เครื่องมือวัดความดันสำหรับที่ใช้ในการวิจัยเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้มาใช้เป็นแนวทางเพื่อสถาปนามาตรฐานปฏิกิริยาเคมีด้านความดันของประเทศไทยต่อไป

1.5.2 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันเมื่อความดันที่พิจารณาสูงขึ้น (ประมาณ 10,000 bar)

1.5.3 ข้อมูลในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้สามารถนำไปเผยแพร่ต่อผู้ทำงานเกี่ยวข้องหรือผู้ทำงานด้านนี้และสาธารณชน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ เป็นเครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเนื่องจากการสร้างเครื่องมือดังกล่าวได้สร้างมาจากหลักพื้นฐานทางทฤษฎีการคำนวณของความดันนั้นคือแรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในห้องปฏิบัติการสอบเทียบต่างๆ ในหลายๆ ประเทศ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความถูกต้องสูงจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงผลกระทบและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการคำนวณค่าความดัน ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน การคำนวณ ผลกระทบต่างๆ ต่อการใช้งานและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเพรสเซอร์บาลานซ์

เพรสเซอร์บาลานซ์ ใช้งานอย่างกว้างขวางในการวัดความดัน เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความแข็งแรง ทนทาน ง่ายต่อการใช้งานและสามารถวัดความดันได้ในทุกช่วงความดัน โดยมีส่วนประกอบพื้นฐานคือ ลูกสูบที่ติดตั้งในตำแหน่งตั้งตรงอยู่ในกระบอกสูบ และมีของไหลอยู่ภายใต้ลูกสูบ

โดยปกติลูกสูบจะเป็นตัวรองรับน้ำหนักที่วางอยู่ด้านบน และความดันที่วัดจะป้อนไปที่ผิวด้านล่างของลูกสูบซึ่งความดันนี้จะกระทำกับพื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ โดยความดันที่กระทำกับหน้าตัดนี้จะมีทิศทางกระทำขึ้น และจะสมดุลกับแรงที่เกิดจากอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกกระทำกับแผ่นน้ำหนักที่วางอยู่บนลูกสูบรวมถึงน้ำหนักของลูกสูบด้วย ดังนั้นความดันที่ป้อนเข้าที่ผิวด้านล่างของลูกสูบ จะคำนวณโดยคำจำกัดความที่ว่าความดันคือ แรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดตามสมการที่ 2

$$P = \frac{F}{A_p} = \frac{mg}{A_p} \quad (2)$$

เมื่อ P คือ ความดัน ณ ตำแหน่งผิวด้านล่างของลูกสูบ (Pa)

A_p คือ พื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบภายใต้ความดัน (m^2)

m คือ มวลของลูกสูบและแผ่นน้ำหนัก (kg)

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m s^{-2})

ความดัน (P) คือความดันที่แตกต่างระหว่างความดันภายในที่ผิวด้านล่างของลูกสูบและความดันอ้างอิงที่กระทำอยู่ด้านบนของลูกสูบและแผ่นน้ำหนัก โดยถ้าต้องการวัดความดันสมบูรณ์ ความดันอ้างอิงคือความดันสุญญากาศ และถ้าต้องการวัดความดันเกจ ความดันอ้างอิงคือ ความดันของบรรยากาศนั่นเอง

2.1.1 การคำนวณค่าความดัน

สมการที่ 2 ยังไม่ถือว่าเป็นสมการที่เป็นมาตรฐานหรือถูกต้องที่สุด เนื่องจากยังไม่รวมผลกระทบอื่น ๆ ของสภาวะแวดล้อมของบรรยากาศ และสภาวะการใช้งาน ซึ่งอาจมีผลกระทบกับแรงและพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดดังนี้

2.1.1.1 มวลและผลกระทบของแรงพยุงอากาศ

มวล (m) ทั้งหมดในสมการที่ 2 คือผลรวมของน้ำหนักของลูกสูบและน้ำหนักของแผ่นน้ำหนักที่วางบนลูกสูบ ซึ่งอาจจะเขียนสัญลักษณ์เป็น Σm_i โดยที่แผ่นน้ำหนักปกติจะมีลักษณะคล้ายจานและจะระบุตัวเลขของแต่ละแผ่นไว้ ถ้าเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ๆ แผ่นน้ำหนักเหล่านี้จะมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

ในการวัดความดันเกจทุกส่วนที่รวมกันอยู่ใน Σm_i จะพิจารณาให้อยู่ในอากาศ ดังนั้นปริมาตรของอากาศแทนด้วยปริมาตรของแผ่นน้ำหนักทั้งหมด และเมื่อปริมาตรของอากาศแทนที่ทำให้เกิดแรงซึ่งเรียกว่าแรงพยุงอากาศ ดังสมการที่ 3

$$F_{b1} = \rho_a g \sum_i \frac{m_i}{\rho_{mi}} \quad (3)$$

เมื่อ F_{b1} คือ แรงพยุงอากาศ ณ เวลาที่วัดความดัน (N)

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ ณ เวลาที่วัดความดัน (kg m^{-3})

ρ_{mi} คือ ความหนาแน่นของแผ่นน้ำหนักแต่ละแผ่น (kg m^{-3})

ดังนั้นแรง (F) ที่เกิดจากมวลทั้งหมดโดยมีทิศทางกระทำลง แสดงดังสมการที่ 4

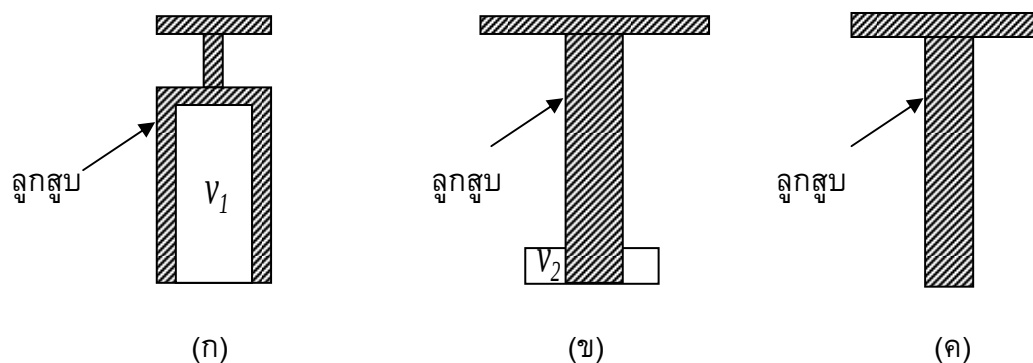
$$F = \sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) \quad (4)$$

โดยเทอมของ $(1 - \rho_a/\rho_{mi})$ เรียกว่า ค่าชดเชยของแรงอุ้มอากาศ

2.1.1.2 ผลกระทบของแรงอุ้มของของไหล

การออกแบบลูกสูบบางครั้งลักษณะของรูปร่างของลูกสูบจะไม่ปกติโดยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน อย่างเช่นลูกสูบบางแบบอาจมีรูอยู่ภายใน ดังภาพประกอบ 4(ก) เพื่อลดน้ำหนักให้น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงยังมีน้ำหนักของลูกสูบน้อยเท่าไรก็สามารถวัดความดันได้ต่ำเท่านั้น หรือ

บางลูกสูบอาจมีส่วนปลายยื่นออกมา ดังภาพประกอบ 4(ข) โดยที่มีรูปร่างแตกต่างไปจากลักษณะทั่วไปของลูกสูบปกติ ดังภาพประกอบ 4(ค)



ภาพประกอบ 4 แสดงรูปร่างของลูกสูบแบบต่างๆ

ปริมาตรของของไหล (V_1) จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงที่มีทิศทางกระทำลง โดยมีน้ำหนักเหมือนกับของไหล ดังสมการที่ 5

$$F_{c1} = (\rho_f - \rho_a) g v_1 \quad (5)$$

เมื่อ F_{c1} คือ แรงที่เกิดจากปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางกระทำลง (N)

สำหรับ (V_2) จะเป็นสาเหตุของแรงที่มีทิศทางกระทำขึ้น คือ

$$F_{c2} = (\rho_f - \rho_a) g v_2 \quad (6)$$

เมื่อ F_{c2} คือ แรงที่เกิดจากปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางกระทำขึ้น (N)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg m^{-3})

2.1.1.3 ผลกระทบของแรงตึงผิว

แรงตึงผิวเกิดขึ้นจากของไหลที่เป็นของเหลวกระทำตลอดเส้นรอบวงของลูกสูบ เมื่อลูกสูบจมอยู่ในของเหลวตามสมการที่ 7

$$F_{c3} = \pi D \sigma \quad (7)$$

เมื่อ F_{c3} คือ แรงที่เกิดจากแรงตึงผิวของของไหล (N)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ (m)

σ คือ แรงตึงผิวของของไหล (N m^{-1})

ดังนั้นแรงที่กระทำลงทั้งหมดที่กระทำบนลูกสูบแสดงโดยสมการที่ 8

$$F = \sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) + (F_{c1} - F_{c2}) + F_{c3} \quad (8)$$

2.1.1.4 พื้นที่หน้าตัดและผลกระทบต่าง ๆ

(ก) พื้นที่หน้าตัด ณ ความดันและอุณหภูมิอ้างอิง

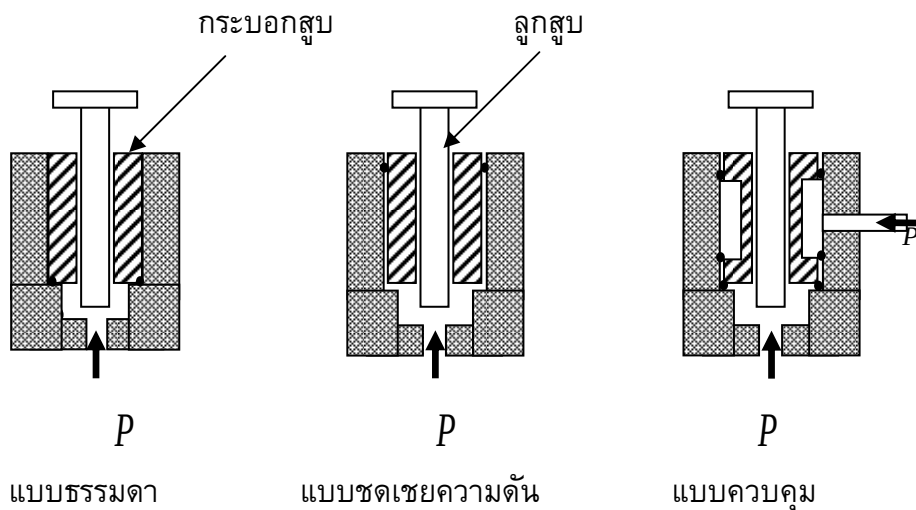
พื้นที่หน้าตัดโดยทั่วไปเข้าใจว่าเป็นพื้นที่เฉพาะของลูกสูบหรือกระบอกสูบเพียงอย่างเดียว แต่ความจริงพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวเป็นพื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่ประกอบเข้าด้วยกัน

พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบส่วนมากมักบอกในรูปของพื้นที่หน้าตัด ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 20 °C และที่ความดันบรรยากาศเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยพื้นที่หน้าตัดภายใต้การอ้างอิงเหล่านี้จะมีสัญลักษณ์ คือ $A_{0,20}$ ซึ่งพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวปกติหาค่าจากการเปรียบเทียบกับความดันมาตรฐาน (เป็นวิธีการสอบเทียบโดยทั่วไปสำหรับเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์) และสามารถหาค่า $A_{0,20}$ โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบแต่เครื่องมือวัดเหล่านั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำสูงๆ ส่วนมากวิธีการหลังนี้มักจะใช้ในการหาค่าพื้นที่หน้าตัดเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิด้านความดัน

(ข) การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากความดันและโครงสร้าง

ความดันที่ป้อนเข้าที่ผิวด้านล่างของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ จะทำให้พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นผลจากความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้สร้างชุดของลูกสูบและกระบอกสูบ การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดเกิดจากค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) และอัตราส่วนของปัวซองต์ (Poisson's ratio, ν) ของวัสดุที่ใช้สร้างลูกสูบและกระบอกสูบ และการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตามโครงสร้างการออกแบบของลูกสูบและกระบอกสูบได้ด้วยเหมือนกัน สำหรับลูกสูบและกระบอกสูบที่มีโครงสร้างเป็นแบบธรรมดา (simple type) การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่ม ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเมื่อมีความดันเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการออกแบบเพื่อลดปัญหาของการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดจากโครงสร้างแบบธรรมดาให้น้อยลง จะเรียกว่าแบบชดเชยความดัน (re-entrant type) โดยมีความดันที่เกิดจากของไหลกระทำที่ผิวด้านนอกของกระบอกสูบด้วย โดยมีความดันเท่ากับผิวด้านล่างของลูกสูบ ซึ่งความดันส่วนนี้ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบเข้าไปชิดกับลูกสูบเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น สำหรับโครงสร้างที่ดีที่สุดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบคือแบบควบคุมการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด (control clearance type) โดยมีการทำงานคือป้อนความดันจากแหล่งความดันอื่นให้กระทำกับผิวด้านนอกของกระบอกสูบ เพื่อ

ควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งการออกแบบนี้ทำให้การวัดความดันถูกต้องที่สุดเนื่องจากจะลดปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดให้น้อยที่สุด



ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างแบบต่างๆของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

ผลของการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดเรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความดันโดยปกติการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดขึ้นอยู่กับความดันที่ป้อนเข้าที่ผิวด้านล่างของลูกสูบและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน ซึ่งอยู่ในรูปแบบดังสมการที่ 9

$$A_p = A_{0,20}(1 + \lambda P) \quad (9)$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) โดยทั่วไปหาค่าจากการทดลองโดยเปรียบเทียบกับค่าความดันมาตรฐาน แต่ก็ยังมีการใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์และวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่า โดยใช้พื้นฐานทฤษฎีของการยืดหยุ่นและสมมุติฐานของรูปแบบความดันที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ แต่อย่างไรก็ตาม รูปแบบเหล่านี้จะมีขอบเขตของการสมมุติฐานอยู่บางอย่าง

(ค) การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิอ้างอิง (20°C) การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้สร้างลูกสูบและกระบอกสูบ สำหรับสมการในการคำนวณพื้นที่หน้าตัด ณ อุณหภูมิต่างๆ และความดันอ้างอิงที่บรรยากาศ คือ

$$A_{0,t} = A_{0,20} [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20)] \quad (10)$$

เมื่อ $A_{0,t}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิงใด ๆ (m^2)

$A_{0,20}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง $20^\circ C$ (m^2)

α_p คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของลูกสูบ ($^{\circ}C^{-1}$)

α_c คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของกระบอกสูบ ($^{\circ}C^{-1}$)

t คือ อุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในระหว่างการใช้งาน ($^{\circ}C$)

ค่าของ α_p และ α_c ได้มาจากสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ยกตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของทั้งสเตนคาร์ไบต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม คือ $4.5 \times 10^{-6} ^{\circ}C^{-1}$ และ $11 \times 10^{-6} ^{\circ}C^{-1}$ ตามลำดับ

(ง) พื้นที่หน้าตัดที่ชดเชยค่าต่าง ๆ ของความดันและอุณหภูมิ

เมื่อทำการชดเชยผลกระทบของความดันและอุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ดังนั้นจะได้สมการที่ 11

$$A_{p,t} = A_{0,20} (1 + \lambda P) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20)] \quad (11)$$

เมื่อ $A_{p,t}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันและอุณหภูมิใด ๆ (m^2)

(จ) สมการการคำนวณค่าความดันของเพรสเซอร์บาลานซ์

เมื่อทำการชดเชยค่าต่าง ๆ จากสมการที่ 8 และ 11 ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของการคำนวณค่าความดันจากการใช้เครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ ที่ใช้น้ำมันเป็นของไหลสำหรับการวัดความดันเกจ คือ

$$P = \frac{\sum_i m_i g (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}) + (v_1 - v_2) (\rho_f - \rho_a) g + \pi D \sigma}{A_{0,20} (1 + \lambda P') [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20)]} \quad (12)$$

เมื่อ P คือ ความดันเกจ ณ ผิวด้านล่างของลูกสูบ (Pa)

P' คือ ความดันเกจ ณ ผิวด้านล่างของลูกสูบโดยประมาณ (Pa) คำนวณได้จากสมการที่ 13

$$P' = \frac{\sum_i m_i g (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}})}{A_{0,20}} \quad (13)$$

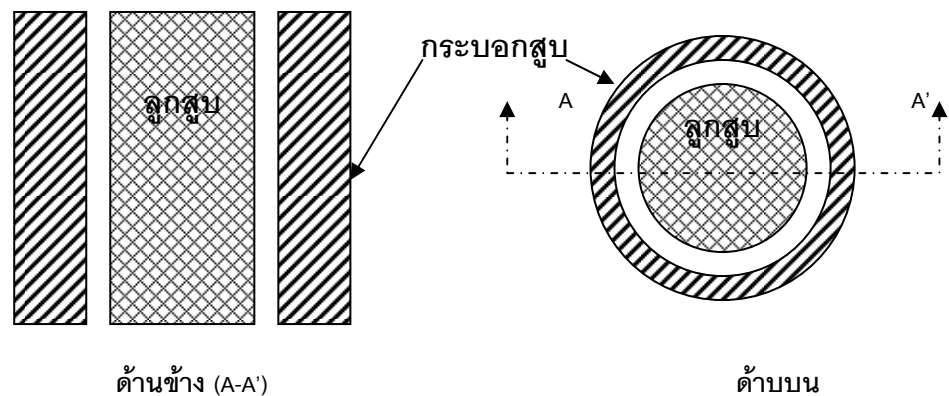
2.2 ทฤษฎีของพื้นที่หน้าตัดของเพรสเซอร์บาลานซ์

เป็นที่ทราบดีแล้วว่าพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณหาความดันไม่ใช่เฉพาะพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบหรือกระบอกสูบเพียงอย่างเดียวหนึ่ง เพื่อที่ให้เข้าใจมากยิ่งขึ้นว่าทำไมพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้ในการคำนวณหาความดันมาตรฐานจึงเป็นพื้นที่ระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ และรูปแบบโดยทั่วไปของการหาค่าพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบภายใต้ความดันตามหลักทฤษฎีหาค่าได้อย่างไร

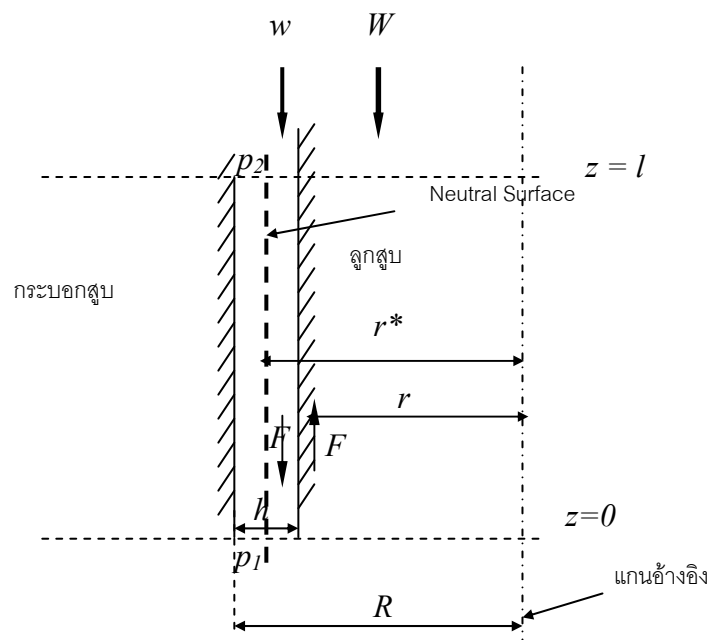
รูปแบบทฤษฎีของการประกอบเข้าด้วยกันของลูกสูบและกระบอกสูบในเพรสเซอร์บาลานซ์นั้นเป็นไปตามกฎของของไหล และนอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์บางท่านยังพบจากประสบการณ์ว่า อาจเป็นการยากที่ผู้ใช้งานบางคนจะสามารถมองเห็นสิ่งที่มีความสำคัญของลักษณะการทำงานตามปกติของเพรสเซอร์บาลานซ์ตัวอย่างเช่น การเกิดการรั่วซึมของของไหลตามช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ดังนั้นน่าจะเป็นการดีที่จะเริ่มต้นโดยการทำความเข้าใจให้ชัดเจนเกี่ยวกับลักษณะพื้นฐาน โดยการใช้รูปแบบที่ง่าย ๆ ก่อน โดยวัตถุประสงค์แรกนี้ เราพิจารณาสถานะสมดุลที่ว่า สภาวะสมดุลของลูกสูบคือการที่ลูกสูบลอยตัวโดยปราศจากการเหนี่ยวรั้งจากสิ่งอื่นใด และลอยตัวในตำแหน่งที่คงที่ โดยมีหน่วยของความดัน และ แรง คือ $ML^{-1}T^{-2}$ และ MLT^{-2} ตามลำดับ จึงเป็นที่ชัดเจนว่าการพิจารณาที่มาของความดันที่ต้องการวัดนั้น มีแหล่งกำเนิดมาจากความสมดุลกับแรง และแรงหารด้วยปริมาตรที่มีมิติเป็น L^3 ซึ่งนั่นคือพื้นที่ ปริมาตรนี้จึงเรียกว่า “effective area” ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ แต่ไม่ได้หมายความว่าปริมาณเดียวกันกับพื้นที่หน้าตัดเฉพาะของลูกสูบ หรือค่าที่แท้จริงใดๆ ในชุดของลูกสูบและกระบอกสูบดังกล่าว

2.2.1 รูปแบบของพื้นที่หน้าตัดในอุดมคติ

รูปแบบตามอุดมคติจะพิจารณาว่าชุดลูกสูบและกระบอกสูบประกอบขึ้นด้วยผิวทรงกลมที่ตรงและเรียบตลอดความยาว (l) ของแต่ละชิ้นส่วน และมีพื้นที่หน้าตัดที่กลมอย่างสมบูรณ์ โดยมีขนาดความยาวของรัศมีลูกสูบ (r) และขนาดความยาวของรัศมีกระบอกสูบ (R) คงที่ โดยแกนต่างๆ จะสอดคล้องกันและตั้งฉากกับพื้นโลกโดยสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 6 และ 7



ภาพประกอบ 6 แสดงรูปแบบของชุดลูกสูบและกระบอกสูบอย่างง่าย



ภาพประกอบ 7 แสดงรูปแบบของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบอย่างง่าย

เมื่อความดันของของไหล (p_1) ที่ต้องการวัด ป้อนมายังผิวด้านล่างสุดของลูกสูบ ที่ระดับ $z = 0$ ในขณะที่ด้านบนสุดของลูกสูบ ที่ระดับ $z = l$ อยู่ในความดันบรรยากาศ (p_2) สำหรับขั้นตอนการวัดความดันดังกล่าว ประกอบด้วย การสมดุลของแรงที่กระทำขึ้น โดยเกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันที่ปลายล่างสุด (p_1) กับความดันที่ด้านบนของลูกสูบ (p_2) หรือ $(p_1 - p_2)$ กับแรงที่กระทำลงที่เกิดจากอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกกระทำกับมวลของลูกสูบ และมวลของแผ่นน้ำหนักที่วางซ้อนอยู่บนลูกสูบ สำหรับทฤษฎีเบื้องต้นสามารถอธิบายได้จากการสมดุลของแรงซึ่งเกิดจาก

แรงที่กระทำขึ้น ($W'+w'$) = แรงที่กระทำลง ($W+W$)

เมื่อ W' คือ แรงที่กระทำขึ้นที่กระทำกับลูกสูบ
 w' คือ แรงที่กระทำขึ้นที่กระทำกับแท่งของของไหล
 W คือ แรงที่กระทำลงที่เกิดจากมวลของแผ่นน้ำหนักและมวลของลูกสูบ
 W คือ แรงที่กระทำลงที่เกิดจากมวลของแท่งของของไหลในรูปหน้าตัดด้วย
 แหวนระหว่างผิวของลูกสูบและแนวเส้น “neutral surface”
 โดยแรงรวมที่กระทำขึ้นที่กระทำกับลูกสูบ (W') ได้มาจาก

$$W' = F_1 + F_2 \quad (14a)$$

เมื่อ F_1 คือ แรงที่เกิดจากความดันจริงที่กระทำบนผิวด้านบนและด้านล่างของ
 ลูกสูบโดยมีค่าเท่ากับ $\pi r^2 (p_1 - p_2)$
 F_2 คือ แรงเสียดทานที่เกิดบนผิวของลูกสูบในแนวตั้ง โดยเกิดจากของ
 ไหลดันให้เคลื่อนตัวขึ้นสู่ด้านบนภายใต้ผลของความดันที่กระจายอยู่
 ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ
 ดังนั้นแรงรวมทั้งหมดที่กระทำกับลูกสูบในทิศทางกระทำขึ้นคือ

$$W' = \pi r^2 (p_1 - p_2) + F_2 \quad (14b)$$

จากกฎพื้นฐานของการไหล เป็นที่ทราบดีว่าความเร็วของของไหลในช่องว่างระหว่าง
 ลูกสูบและกระบอกสูบลูกสูบมีค่าเป็นศูนย์ในแต่ละด้านของผิวโดยมีรูปร่างเป็นรูปพาราโบลาระหว่างผิวทั้งสองข้าง
 ดังนั้นที่ประมาณกึ่งกลางระหว่างผิวทั้งสองข้างจะมีความเร็วมากที่สุดและที่ตำแหน่งรัศมีนี้
 เองแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลมีค่าเป็นศูนย์ และเรียกรัศมีนี้ว่า “neutral surface” (r^*) ซึ่ง
 แสดงได้ตามเส้นประในภาพประกอบ 7 สำหรับการสมดุลของแรงที่กระทำบนแท่งของของไหลบน
 หน้าตัดรูปวงแหวนประกอบไปด้วยผิวของลูกสูบไปจนถึงเส้น “neutral surface” และเมื่อให้ (w')
 คือแรงที่เกิดจากของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดรูปวงแหวน ดังนั้นแรงรวมที่กระทำขึ้น ได้มาจากสมการ
 ที่ 15a

$$w' = f_1 + f_2 \quad (15a)$$

เมื่อ f_1 คือ แรงที่เกิดจากความดันจริงที่กระทำทั้งด้านบนและด้านล่างของของ
 ไหลโดยมีค่าเท่ากับ $\pi (r^{*2} - r^2) (p_1 - p_2)$

f_2 คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของไหลโดยมีค่าเท่ากับ F_2 แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

แรงรวมทั้งหมดที่กระทำกับแท่งของของไหลรูปวงแหวนคือ

$$w' = \pi(r^{*2} - r^2)(p_1 - p_2) - F_2 \quad (15b)$$

ดังนั้นแรงรวมทั้งหมดที่กระทำขึ้นคือ

$$W' + w' = \pi r^2(p_1 - p_2) + F_2 + \pi(r^{*2} - r^2)(p_1 - p_2) - F_2 \quad (16a)$$

$$W' + w' = \pi r^{*2}(p_1 - p_2) \quad (16b)$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ซึ่งแทนด้วย A_p คืออัตราส่วนระหว่างแรงต่อความดัน ดังสมการที่ 17

$$A_p = \pi r^{*2} = \frac{W' + w'}{(p_1 - p_2)} \quad (17)$$

จากผลดังกล่าวหมายความว่าพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบมีพื้นที่รวมไปจนถึงเส้น “neutral surface” ซึ่งไม่เพียงแต่เฉพาะพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบหรือกระบอกสูบเท่านั้น และจากชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นรูปแบบอย่างง่ายและเป็นเฉพาะในทางอุดมคติเท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากในการวิเคราะห์ห้อย่างเช่น ผิวด้านข้างของลูกสูบและกระบอกสูบถูกสมมุติให้มีลักษณะตรงตลอดช่วงความยาว

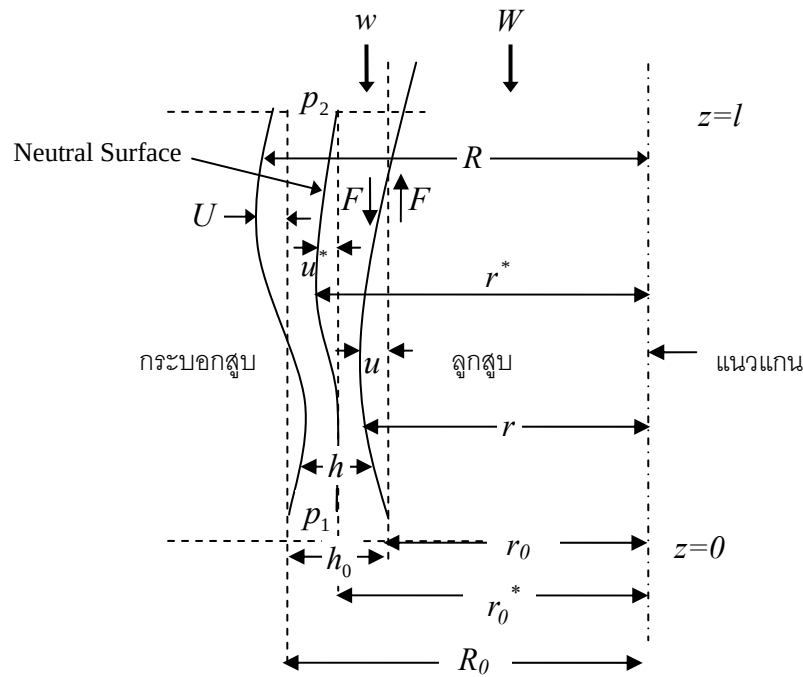
2.2.2 รูปแบบของพื้นที่หน้าตัดโดยทั่ว ๆ ไป

การสร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ โดยทั่วไปผิวด้านข้างจะมีลักษณะไม่ตรงตลอดช่วงความยาวดังภาพประกอบ 8 ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา โดยรัศมีของทั้งลูกสูบและกระบอกสูบไม่เท่ากันตลอดช่วงความยาวแต่ก็ยังคงมีลักษณะเป็นรูปวงกลมตลอดช่วงความยาว จากภาพประกอบดังกล่าว แสดงเป็นส่วนหน้าตัดด้านข้างหนึ่งข้างที่ตั้งตรงตลอดแนวแกน Z และเมื่อ u และ U คือการกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของ r และ R ของลูกสูบและกระบอกสูบ ตามลำดับ และตัวห้อย 0 คือค่าที่ตำแหน่งอ้างอิง ($z=0$) ดังนั้นแรงรวมต่างๆที่กระทำประกอบด้วยดังนี้

แรงรวมที่กระทำขึ้นที่กระทำกับลูกสูบ (W') ได้มาจาก

$$W' = F_1 + F_2 + F_3 \quad (18a)$$

เมื่อ F_1 คือ แรงที่เกิดจากความดันจริงที่กระทำบนผิวด้านบนและด้านล่างของลูกสูบโดยมีค่าเท่ากับ $\pi r_0^2 p_1 - \pi (r_0 + u_2)^2 p_2$



ภาพประกอบ 8 แสดงรูปแบบทั่วไปของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

เมื่อ r_0 คือ รัศมีของลูกสูบที่ตำแหน่งล่างสุด ($z=0$)

p_1 คือ ความดันที่ต้องการวัดที่ตำแหน่งล่างสุดของลูกสูบ ($z=0$)

p_2 คือ ความดันที่ตำแหน่งบนสุดของลูกสูบ ($z=l$) (ความดันเกจ

$p_2 = p_{atm}$ และความดันสัมบูรณ์ $p_2 = 0$)

u_2 คือ การกระจัดของรัศมีของลูกสูบที่ตำแหน่งบนสุด ($z=l$)

F_2 คือ แรงเสียดทานที่เกิดอยู่ที่ผิวของลูกสูบในแนวตั้ง เกิดขึ้นโดยของไหลดันให้เคลื่อนตัวขึ้นสู่ด้านบนภายใต้ผลของความดันที่กระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

F_3 คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและ
กระบอกสูบที่กระทำกับด้านข้างของลูกสูบที่มีลักษณะไม่ตรงโดยมีค่า
เท่ากับ $2\pi \int_0^l rp \frac{du}{dz} dz$

แรงรวมทั้งหมดที่กระทำกับลูกสูบในทิศทางกระทำขึ้นคือ

$$W' = \pi r_0^2 p_1 - \pi (r_0 + u_2)^2 p_2 + 2\pi \int_0^l rp \frac{du}{dz} dz \quad (18b)$$

$$W' = \pi r_0^2 (p_1 - p_2) - \pi (2r_0 u_2 + u_2^2) p_2 + 2\pi \int_0^l rp \frac{du}{dz} dz \quad (19)$$

ดังนั้นจะได้

$$W' = \pi r_0^2 (p_1 - p_2) + 2\pi \int_0^l r (p - p_2) \frac{du}{dz} dz \quad (20)$$

สำหรับแรงรวมที่กระทำขึ้นที่กระทำกับของไหลที่อยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและ
กระบอกสูบ (w') ได้มาจาก

$$w' = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (21a)$$

- เมื่อ f_1 คือ แรงที่เกิดจากความดันจริงที่กระทำทั้งบนและล่างของของไหลโดย
มีค่าเท่ากับ $\pi (r_0^{*2} - r_0^2) p_1 - \pi [(r_0^* + u_2^*)^2 - (r_0 + u_2)^2] p_2$
- f_2 คือ แรงเสียดทานที่เกิดอยู่ในของไหลโดยมีค่าเท่ากับ F_2 แต่มีทิศทาง
ตรงกันข้าม
- f_3 คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและ
กระบอกสูบที่กระทำกับด้านข้างของลูกสูบที่มีลักษณะไม่ตรงโดยมีค่า
เท่ากับ F_3 แต่มีทิศทางตรงกันข้าม
- f_4 คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและ
กระบอกสูบที่กระทำกับ “neutral surface” ที่มีลักษณะไม่ตรงโดยมีค่า
เท่ากับ $2\pi \int_0^l r^* p \frac{du^*}{dz} dz$

ดังนั้นแรงรวมทั้งหมดที่กระทำกับแท่งของของไหลคือ

$$w' = \pi(r_0^{*2} - r_0^2)p_1 - \pi[(r_0^* + u_2^*)^2 - (r_0 + u_2)^2]p_2 - F_2 - F_3 + 2\pi \int_0^l r^* p \frac{du^*}{dz} dz \quad (21b)$$

$$w' = \pi(r_0^{*2} - r_0^2)p_1 - \pi[r_0^* + 2r_0^*u_2^* + u_2^{*2} - r_0^2 - 2r_0u_2 - u_2^2]p_2 - F_2 - F_3 + 2\pi \int_0^l r^* p \frac{du^*}{dz} dz \quad (21c)$$

$$w' = \pi(r_0^{*2} - r_0^2)(p_1 - p_2) + \pi(2r_0u_2 + u_2^2)p_2 - \pi(2r_0^*u_2^* + u_2^{*2})p_2 - F_2 - F_3 + 2\pi \int_0^l r^* p \frac{du^*}{dz} dz \quad (21d)$$

เมื่อ $\pi(2r_0u_2 + u_2^2)p_2 = 2\pi p_2 \int_0^l r \frac{du}{dz} dz$

และ $\pi(2r_0^*u_2^* + u_2^{*2})p_2 = 2\pi p_2 \int_0^l r^* \frac{du^*}{dz} dz$

ดังนั้นจะได้

$$w' = \pi(r_0^{*2} - r_0^2)(p_1 - p_2) + 2\pi p_2 \int_0^l r \frac{du}{dz} dz - 2\pi p_2 \int_0^l r^* \frac{du^*}{dz} dz - F_2 - F_3 + 2\pi \int_0^l r^* p \frac{du^*}{dz} dz \quad (22)$$

และแรงรวมทั้งหมดที่กระทำขึ้นคือ

$$W' + w' = \pi r_0^{*2}(p_1 - p_2) + 2\pi \int_0^l r^*(p - p_2) \frac{du^*}{dz} dz \quad (23)$$

จากพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ซึ่งแทนด้วย A_p สามารถหาได้จาก

$$A_p = \frac{W' + w'}{(p_1 - p_2)}$$

$$\text{ดังนั้น } A_p = \pi r_0^{*2} + \frac{2\pi}{(p_1 - p_2)} \int_0^l r^* (p - p_2) \frac{du^*}{dz} dz \quad (24)$$

จากการประมาณค่าของเส้น “neutral surface” $r_0^* = r_0 + \frac{h_0}{2}$ และ $r^* = r + \frac{h}{2}$

$$\text{และ } r_0^{*2} = r_0^2 + 2r_0 \frac{h_0}{2} + \left(\frac{h_0}{2}\right)^2; \quad \left(\frac{h_0}{2}\right)^2 \rightarrow 0$$

$$\text{ดังนั้น } r_0^{*2} = r_0^2 \left(1 + \frac{h_0}{r_0}\right)$$

$$\text{จาก } r = r_0 + u \text{ และ } r^* = r + \frac{h}{2} = r_0^* + u^*$$

$$\text{ดังนั้น } u^* = r - r_0^* + \frac{h}{2}$$

$$\text{และจาก } h = R - r = R_0 + U - r_0 - u$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{du^*}{dz} = \frac{d}{dz} \left(r - r_0^* + \frac{R_0 + U - r_0 - u}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{d}{dz} (u + U)$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \int_0^l r^* (p - p_2) \frac{du^*}{dz} dz &= \int_0^l \left(r + \frac{(R_0 + U - r_0 - u)}{2} \right) (p - p_2) \frac{1}{2} \frac{d}{dz} (u + U) dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left\{ \left(\frac{r_0 + R_0}{2} \right) + \left(\frac{u + U}{2} \right) \right\} (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz \\ &= \frac{1}{4} (2r_0 + h_0) \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz + \frac{1}{4} \int_0^l (u + U) (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz \end{aligned}$$

≈ 0

เนื่องจากเทอมที่ 2 ของสมการดังกล่าวมีค่าน้อยมากจึงให้มีค่าเท่ากับ 0

$$\begin{aligned}
&= \frac{r_0}{2} \left(1 + \frac{h_0}{2r_0} \right) \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz \\
&= \frac{r_0}{2} \left\{ \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz + \frac{h_0}{2r_0} \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz \right\} \approx 0
\end{aligned}$$

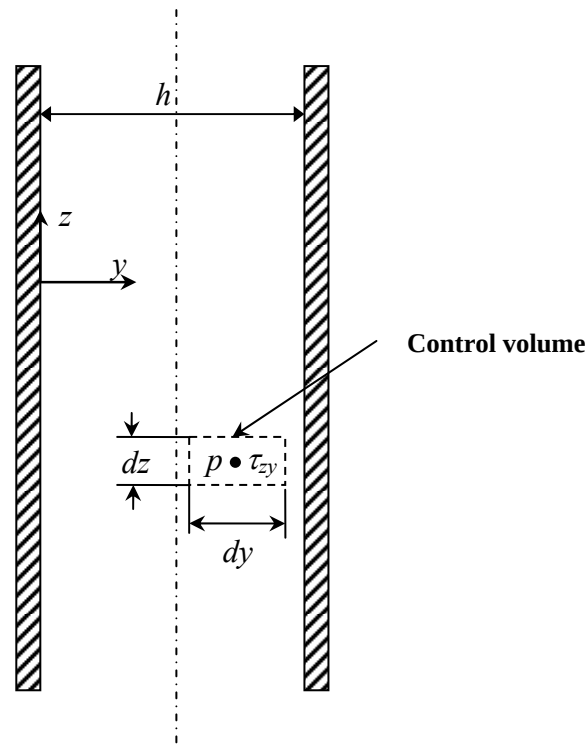
เนื่องจากเทอมที่ 2 ของสมการดังกล่าวมีค่าน้อยมากจึงให้มิต่ำเท่ากับ 0 ดังนั้นจากสมการที่ 24 จะได้

$$A_p = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{l}{r_0(p_1 - p_2)} \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz} (u + U) dz \right\} \quad (25)$$

2.3 รูปแบบการไหลของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ

ของไหลในระบบน้ำมันความดันสูงปกติมักเกิดการรั่วผ่านช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ สำหรับทุกๆ ช่องว่างเล็กๆ (ปกติประมาณ 0.005 mm) นี้ พื้นที่การไหลอาจออกแบบเหมือนกับการไหลที่ไหลผ่านแผ่นที่วางแบบขนานกันโดยมีความกว้างไม่สิ้นสุด (infinite parallel plates) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของของไหลที่ไหลออก

สำหรับปัญหาของการไหลนี้จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) ที่ไหลผ่านแผ่นที่วางแบบขนานกันโดยมีความกว้างไม่สิ้นสุด (infinite parallel plates) ในแนวแกน X โดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นสองแผ่นนี้คือ h ซึ่งแสดงตามภาพประกอบ 9 โดยแผ่นนี้มีขนาดตามแนวแกน X ไม่มีที่สิ้นสุด ดังนั้นการไหลนี้จะสมมติให้เป็นสภาวะคงที่ (steady state)



ภาพประกอบ 9 แสดงปริมาตรควบคุมสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

จากสนามการไหลนี้ทำให้ทราบค่าความเร็วในแกน Z โดยมีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวของแผ่นด้านซ้ายและด้านขวาซึ่งเป็นผลของเงื่อนไขของการไม่เคลื่อนที่ ที่ผนังของแผ่น (no slip condition) ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$\begin{aligned} \text{ที่ } y = 0 \quad u &= 0 \\ \text{ที่ } y = h \quad u &= 0 \end{aligned}$$

เมื่อความเร็วของของไหลไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Z (fully developed flow) ได้ ดังนั้นความเร็วจะขึ้นอยู่กับแกน y เท่านั้น ดังนั้น $u = u(y)$

สำหรับการวิเคราะห์นี้ได้เลือกพิจารณาส่วนเล็กๆ ของปริมาตรที่ควบคุม โดยมีขนาด $dV = dx \, dy \, dz$ และส่วนประกอบในแนวแกน Z ของสมการโมเมนตัม คือ

$$F_z = F_{s_z} + F_{B_z} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} u \rho \, dV + \int_{CS} u \rho \vec{V} \, d\vec{A} \quad (26)$$

สมมุติฐาน (1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar) และสถานะคงที่ (steady state) ทำให้เทอมที่ 1 ของสมการด้านขวามีค่าเท่ากับ 0

(2) รูปแบบการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง (fully developed flow)

(3) ไม่คิดแรงที่เกิดจากอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ทำให้เทอมที่ 2

ของสมการด้านซ้ายมีค่าเท่ากับ 0

เมื่อรูปแบบของการไหลไม่เปลี่ยนแปลง จะทำให้โมเมนต์ที่ผ่านผิวที่ควบคุมมีค่าเท่ากับ ศูนย์ (โมเมนต์ที่ไหลผ่านผิวที่ควบคุมทางด้านล่างจะเท่ากับทางด้านบนแต่เครื่องหมายต่างกัน ดังนั้นก็จะมีโมเมนต์เหลืออยู่ที่ผิวของปริมาตรที่ควบคุม) เพราะฉะนั้นจึงไม่มีแรงในแนวแกน Z และสมการของโมเมนต์มีค่าเท่ากับ

$$F_{S_z} = 0 \quad (27)$$

ดังนั้นผลรวมของแรงที่กระทำบนปริมาตรที่ควบคุมในทิศทาง Z ก็คือแรงที่เกิดจากความดันที่กระทำที่ผิวทางด้านล่างและบนและแรงเฉือนที่กระทำที่ด้านซ้ายและด้านขวาของผิวเท่านั้น

ถ้าความดันที่จุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์คือ (p) ดังนั้นแรงที่เกิดจากความดันบนผิวด้านล่างคือ

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dy \, dx \quad (28)$$

และแรงที่เกิดจากความดันบนผิวด้านบนคือ

$$-\left(p + \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dy \, dx \quad (29)$$

ถ้าความเค้นเฉือนที่ศูนย์กลางของเอลิเมนต์คือ τ_{yz} ดังนั้นแรงที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนผิวด้านซ้ายคือ

$$-\left(\tau_{yz} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dz \, dx \quad (30)$$

และแรงที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนผิวด้านขวาคือ

$$\left(\tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dz \, dx \quad (31)$$

ดังนั้นผลรวมของแรงตามสมการที่ 27 คือ

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} = 0 \quad (32a)$$

$$\frac{d\tau_{yz}}{dy} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (32b)$$

สมการที่ 32b จะใช้ได้ทุกๆตำแหน่งของ z และ y ดังนั้น

$$\frac{d\tau_{yz}}{dy} = \frac{\partial p}{\partial z} = \text{const} \quad (32c)$$

อินทิเกรตสมการที่ 32c จะได้

$$\tau_{yz} = \frac{\partial p}{\partial z} y + c_1 \quad (33)$$

เมื่อความเค้นเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับแกน y และของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน

$$\tau_{yz} = \mu \frac{du}{dy} \quad (34)$$

แทนสมการที่ 34 ใน 33 จะได้

$$\mu \frac{du}{dy} = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) y + c_1 \quad (35)$$

อินทิเกรตสมการที่ 35

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) y^2 + \frac{c_1}{\mu} y + c_2 \quad (36)$$

สำหรับการหาค่าคงที่ c_1 และ c_2 นั้นจะใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ $y = 0, u = 0$ ดังนั้น $c_2 = 0$ และ $y = h, u = 0$ ดังนั้นสมการที่ 36 กลายเป็น

$$0 = \frac{I}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) h^2 + \frac{c_l}{\mu} h \quad (37a)$$

จากสมการที่ 37a จะได้

$$c_l = -\frac{I}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) h \quad (37b)$$

แทนค่าสมการที่ 37b ในสมการที่ 36

$$u = \frac{I}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) y^2 - \frac{I}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) hy \quad (38a)$$

$$u = \frac{h^2}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \left[\left(\frac{y}{h} \right)^2 - \left(\frac{y}{h} \right) \right] \quad (38b)$$

การหาอัตราการไหลเชิงมวลหาได้จากสมการที่ 39 คือ

$$Q = \int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (39)$$

และถ้าความกว้างในแนวแกน X คือ l ดังนั้น

$$Q = \int_0^h \rho u l dy \quad (40a)$$

$$Q = \int_0^h \frac{\rho l}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) (y^2 - hy) dy \quad (40b)$$

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลต่อความกว้าง l ในแนวแกน Z แสดงโดย

$$\frac{Q}{l} = -\frac{\rho}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) h^3 \quad (41)$$

สำหรับอัตราการไหลเชิงมวลของการไหลที่ไหลผ่านช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่มีขนาดช่องว่างไม่เท่ากันตลอดตามแนวแกน Z ที่แสดงโดยภาพประกอบ 8 จะเป็น

ฟังก์ชันของแนวแกน Z และความกว้างของแผ่น (l) โดยความกว้างมีค่าประมาณเส้นรอบวงของลูกสูบ จากสมการที่ 41 จะได้

$$\frac{Q}{2\pi r_0} = -\frac{\rho}{12\mu} \left(\frac{dp}{dz} \right) h^3(z) \quad (42a)$$

$$Q = -\frac{\pi r_0 \rho}{6\mu} \left(\frac{dp}{dz} \right) h^3(z) \quad (42b)$$

เมื่อความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ) ของของไหลไม่อิสระจากความดันและช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบก็ขึ้นอยู่กับความดันด้วยเหมือนกัน ดังนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ 42b จะได้

$$\frac{6Q}{\pi r_0} \int_0^z \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z)h_p^3(z)} dz = -\int_0^z \frac{dp}{dz} dz = p_1 - p \quad (43a)$$

$$\frac{6Q}{\pi r_0} \int_0^l \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z)h_p^3(z)} dz = -\int_0^l \frac{dp}{dz} dz = p_1 - p_2 \quad (43b)$$

หารสมการที่ 43a ด้วย 43b จะได้

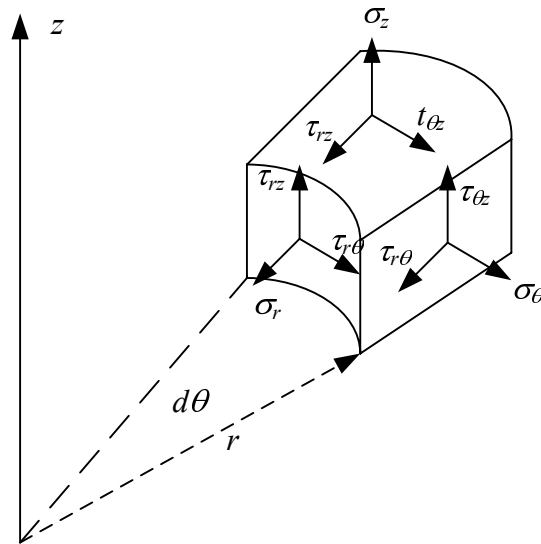
$$p = p_1 - (p_1 - p_2) \frac{\int_0^z \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z)h_p^3(z)} dz}{\int_0^l \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z)h_p^3(z)} dz} \quad (44)$$

2.4 การหาค่าการเปลี่ยนแปลงของการยืดหยุ่น

เมื่อความดัน (p) ที่กระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกเพิ่มมากขึ้นจะเป็นผลให้ขนาดของช่องว่างดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความดันกระทำกับผิวด้านข้างของลูกสูบและกระบอกสูบทำให้รัศมีของชิ้นส่วนทั้งสองเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะใช้ทฤษฎีของกลศาสตร์ของแข็ง นั่นก็คือสมการการสมดุลของสภาวะความเค้น (equilibrium of the stress state) และเงื่อนไขของการสอดคล้องกันของสภาวะความเครียด (compatibility of the strain) ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยในการหาค่าความดันที่กระจายอยู่ในช่องว่างระหว่าง

ลูกสูบและกระบอกสูบตามสมการที่ 44 โดยมีสมมุติฐานที่วัสดุที่ใช้สร้างต้องเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ไอโซโทรปิก (isotropic) และ สมดุลในแนวแกน (axially-symmetric)

ในกรณีของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาความเค้นในพิกัดของทรงกระบอกคือ แนวรัศมี (r) แนวเส้นรอบวง (θ) และแนวแกน (z) ดังภาพประกอบ 10 คือ



ภาพประกอบ 10 แสดงส่วนประกอบของความเค้นในพิกัดทรงกระบอก

ดังนั้นสมการการสมดุลของสภาวะความเค้นในแต่ละพิกัดแสดงโดย

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (45a)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (45b)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (45c)$$

เมื่อ σ และ τ คือความเค้นหลักและความเค้นเฉือนตามลำดับ

จากสมมุติฐานกรณีดังกล่าวการเปลี่ยนแปลงขนาดจะค่อนข้างเล็กและความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเครียดคือ

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (46a)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta}; \gamma_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}; \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \quad (46b)$$

เมื่อ ε , u และ γ คือความเครียด การกระจัดและความเครียดเฉือน ตามลำดับ

จากสมมติฐานวัสดุเป็นแบบไอโซทรอปิกทำให้ลักษณะการขยายตัวเป็นเชิงเส้นกับค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) และค่าอัตราส่วนของปัวซองต์ (Poisson's ratio, ν) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดคือ

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)]; \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)]; \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)]; \quad (47a)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\tau_{\theta z}}{G}; \gamma_{rz} = \frac{\tau_{rz}}{G}; \gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G} \quad (47b)$$

สำหรับลักษณะของรูปทรงของสมมุติฐานของการสมดุกรอบแกนจะทำให้ทุกปริมาณอิสระจากเส้นรอบวงดังนั้น สมการที่ 45 และ 46 กลายเป็น

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (48a)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (48b)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (48c)$$

และ

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (49a)$$

$$\gamma_{\theta z} = 0; \gamma_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}; \gamma_{r\theta} = 0 \quad (49b)$$

จากสมการที่ 49 และ 47 จะทำให้ $\tau_{\theta z} = \tau_{r\theta} = 0$ ดังนั้นสมการที่ 48 กลายเป็น

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (50)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (51)$$

และจากสมการที่ 49a จะได้

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r}(r\varepsilon_\theta) = \varepsilon_\theta + r \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} \quad (52)$$

และเมื่อ

$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial r} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial r \partial z} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial r} = \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial z} - r \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial z^2} \quad (53)$$

เมื่อสมการที่ 52 และ 53 คือสมการของการสอดคล้องกันของสภาวะความเครียด ดังนั้นสมการที่ 47a และ 47b จะได้

$$\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} \right) \quad (54a)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial z^2} = \frac{1}{E} \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial z^2} - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} \right) \quad (54b)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial r} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} \right) \quad (54c)$$

$$\frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial z} = \frac{1}{G} \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial z} = \frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad (54d)$$

$$\varepsilon_r - \varepsilon_\theta = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (54e)$$

จากสมการที่ 52 สามารถเขียนได้ใหม่ตามสมการที่ 55 คือ

$$\varepsilon_r - \varepsilon_\theta - r \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} = 0 \quad (55)$$

แทนสมการที่ 54e ใน 55 จะได้

$$\frac{1+\nu}{E}(\sigma_r - \sigma_\theta) - r \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} = 0 \quad (56)$$

แทนสมการที่ 54a ใน 56 จะได้

$$\frac{1+\nu}{E}(\sigma_r - \sigma_\theta) - \frac{r}{E} \left[\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} - \nu \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} \right) \right] = 0 \quad (57)$$

แทนสมการที่ 54 ใน 53 ดังนั้นจะได้

$$\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} \right) - \frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{r}{E} \left[\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial z^2} - \nu \left(\frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} \right) \right] = 0 \quad (58)$$

สมการที่ 50 และ 51 แสดงสภาวะความสมดุลของความเค้น และสมการที่ 57 และ 58 จะแสดงเงื่อนไขของการสอดคล้องกันของสภาวะความเครียด ดังนั้นจากสมการดังกล่าวแสดงถึงระบบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ซึ่งอยู่ในรูปแบบเชิงเส้นที่มีความเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันความเค้นที่ไม่ทราบค่าคือ $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$ และ τ_{rz}

ผลเฉลยของระบบสมการเชิงอนุพันธ์จะได้มาจากวิธีเชิงตัวเลขโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจะได้ค่าความเค้นของระบบทั้ง 4 ค่า จากนั้นสามารถหาค่าความเครียด ($\varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_r$ และ γ_{rz}) การกระจัด u และ U ได้และความกว้างของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ($h_p(z)$) ได้จากสมการ

$$h_p(z) = R_p(z) - r_p(z) \quad (59)$$

เมื่อ $R_p(z)$ คือ รัศมีที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบอกสูบ

$r_p(z)$ คือ รัศมีที่เปลี่ยนแปลงไปของลูกสูบ

โดยที่

$$R_p(z) = R(z) - U \quad (60)$$

$$r_p(z) = r(z) - u \quad (61)$$

เมื่อ $R(z)$ คือ รัศมีของกระบอกสูบที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบตลอดแนวแกน Z

$r(z)$ คือ รัศมีของลูกสูบที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบตลอดแนวแกน Z

u คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของลูกสูบที่ได้มาจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

U คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบอกสูบที่ได้มาจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ดังนั้นสมการที่ 44 จะหาค่าโดยใช้ค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ($h_p(z)$) และสมการที่ 45 กลายเป็น

$$A_p = \pi r_0^2 \left\{ l + \frac{h_p(0)}{r_p(0)} + \frac{l}{r_p(0)(p_1 - p_2)} \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz}(u + U) dz \right\} \quad (62)$$

2.5 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นวิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในงานทางวิศวกรรมเนื่องจากเป็นวิธีการคำนวณที่ให้ความแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นวิธีที่ประมวลผลการคำนวณที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเกินกว่าจะคำนวณด้วยมือได้ โดยคนเป็นผู้กำหนดขั้นตอนและสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ตัวแปรความร้อน ตัวแปรความดัน เป็นต้น

2.5.1 พื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ (Basic of finite element)

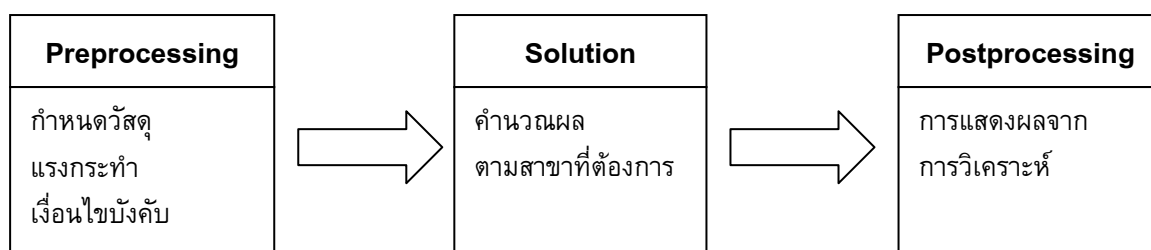
การใช้ COSMOSWork เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรง ความแข็งเกร็งของชิ้นงาน การวิเคราะห์ความถี่ ผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้พื้นฐานในสิ่งต่อไปนี้ก่อนคือ ประสบการณ์การออกแบบชิ้นงาน และเคยใช้โปรแกรม SolidWorks ในส่วนของการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ โปรแกรม SolidWork และ COSMOSWork จะเชื่อมโยงข้อมูลด้วยกัน โดยผู้ออกแบบจะต้องสร้างชิ้นงานจาก SolidWork แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย COSMOSWork

โปรแกรม COSMOSWork เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลข เทคนิคการคำนวณนี้เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือเรียกย่อๆว่า FEM โดยโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับมานานจากกลุ่มวิศวกรผู้ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล แต่อย่างไรก็ตาม COSMOSWork แบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามขีดความสามารถในการใช้งาน และมีลักษณะของ

งานว่าเป็นงานลักษณะใด ได้แก่ งานวิเคราะห์แบบสถิต งานวิเคราะห์ไดนามิกส์ และงานวิเคราะห์ความร้อน เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกใช้งานจะต้องให้เหมาะสมกับลักษณะของการวิเคราะห์

ผู้ออกแบบจะรู้จักวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในนามของเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลข การแก้สมการจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เขียนจากสมการในสาขาต่างๆ ได้แก่ การออกแบบเครื่องจักร วิศวกรรมระบบเสียง สนามแม่เหล็กไฟฟ้า กลศาสตร์ของแข็งและกลศาสตร์ของไหล เป็นต้น วิธีเชิงตัวเลขนอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วยังมีวิธีการคำนวณอื่นอีกได้แก่ วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) และ Finite volumes method อย่างไรก็ตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการวิเคราะห์รูปร่างชิ้นงานตรงตามแนวความคิดในการออกแบบ และช่วยให้เกิดความเชื่อมั่นด้วยการจำลองสถานการณ์ได้มากที่สุด

กระบวนการในการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างชิ้นงาน แล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็กๆ (meshing) โดยมีรูปทรงง่ายๆ (สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม) เราเรียกว่า เอลิเมนต์ และชิ้นส่วนเล็กๆนี้จะต่อเชื่อมโยงกันทั้งชิ้น การทำงานด้วยการแบ่งเอลิเมนต์นั้น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแก้สมการด้วยการประมาณค่าในแต่ละเอลิเมนต์ จนกว่าจะครบทุกชิ้น แต่ถ้าเป็นงานประกอบจะแยกคำนวณในแต่ละชิ้นส่วน แล้วนำมาประมวลผลรวมกัน ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งจะมีด้วยกันทั้งหมด 3 ขั้นตอนดังนี้คือ (ก) ขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ (Preprocessing) โดยข้อมูลมาตรฐานจะมีทั้งสมบัติของวัสดุ (material properties) แรงกระทำ (load) และเงื่อนไขบังคับ (restraints) เป็นต้น (ข) ขั้นตอนของการคำนวณหาผลเฉลย (Solution) และ (ค) ขั้นตอนของการแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟ (Post-processor)



ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.5.2 เอลิเมนต์ (Element)

เมื่อผู้ออกแบบทราบถึงความความหมายของการสร้างเอลิเมนต์แล้ว ก็จะต้องรู้วิธีการเลือกชนิดของเอลิเมนต์ เพราะชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกมาจะส่งผลต่อความถูกต้องในการคำนวณ และส่งผลต่อความแม่นยำในการจำลองสถานการณ์ต่างๆ COSMOSWork จะใช้เอลิเมนต์ในลำดับหนึ่งแบบเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (First order solid tetrahedral solid) สำหรับชิ้นงานทรงตัน และใช้เอ

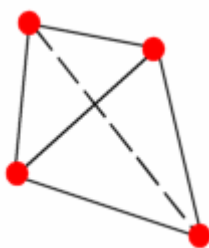
ลิเมนต์ลำดับหนึ่งแบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (First order triangular shell element) สำหรับชิ้นงานผิวบาง เอลิเมนต์แบบอื่นๆ ในลำดับสอง ได้แก่ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Second order solid tetrahedral elements) และใช้เอลิเมนต์แบบพื้นผิวสามเหลี่ยม (Second order triangular shell element) สำหรับชิ้นงานทรงตันและงานผิวบาง ตามลำดับ ซึ่งเอลิเมนต์แบบนี้จะไม่สามารถกำหนดสร้างแบบอัตโนมัติได้ ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดเอง

ชนิดของเอลิเมนต์ใน COSMOSWork จะมีอยู่ 4 แบบ คือ เอลิเมนต์ทรงตันลำดับที่หนึ่งจะเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า และเอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า ส่วนเอลิเมนต์พื้นผิวลำดับที่หนึ่งจะเป็นเอลิเมนต์แบบพื้นผิวสามเหลี่ยมและเอลิเมนต์แบบพื้นผิวลำดับที่สอง โดย COSMOSWork จะอ้างอิงการใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าและเอลิเมนต์พื้นผิวสามเหลี่ยมในลำดับที่หนึ่งพร้อมเลือกเอลิเมนต์ให้ความละเอียดต่ำ (draft quality) และจะอ้างอิงเอลิเมนต์ลำดับสองของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า และเอลิเมนต์ลำดับที่สองของพื้นผิวสามเหลี่ยมพร้อมเลือกเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดสูง (high quality) สำหรับในการวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับเฉพาะเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าเท่านั้น เนื่องจากชิ้นงานเป็นทรงตัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.2.1 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า (First order solid tetrahedral element)

เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า สร้างจากเส้นตรง (linear) โดยความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดบนพื้นผิวและขอบชิ้นงาน การเขียนความสัมพันธ์ของระยะการยึดหดตัวจะใช้หลักวิชา Mechanics of materials โดยพิจารณาจากสมการความเครียด และส่งแรงไปยังเอลิเมนต์รอบข้างไปเรื่อยๆ จนครบทุกชิ้นส่วน

ในแต่ละเอลิเมนต์จะมีทั้งหมด 4 โหนด กระจายอยู่ตามมุมของเอลิเมนต์ ในแต่ละโหนดจะมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 3 หมายถึงแต่ละโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง ดังภาพประกอบ 12

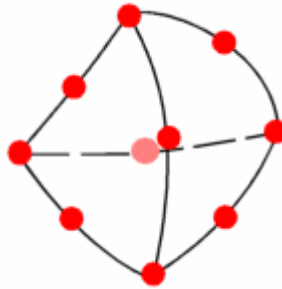


ภาพประกอบ 12 แสดงเอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่เหลี่ยม

ขอบของเอลิเมนต์จะตรงและแบนราบ จึงเห็นได้ว่าเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขอบตรงและพื้นผิวแบนราบ แต่ชิ้นงานมีหน้าตัดกลมหรือมีพื้นผิวโค้ง จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากการสร้างโมเดลเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดไม่เท่าของจริง

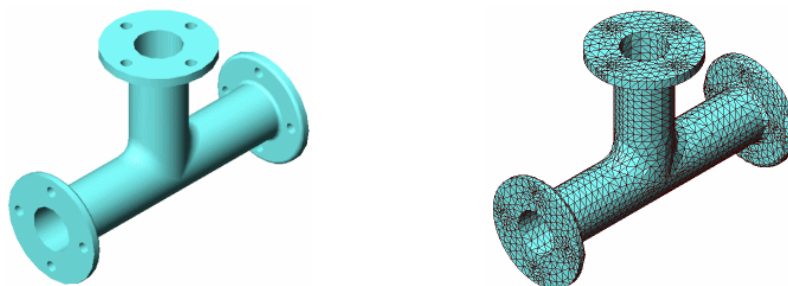
2.5.2.2 เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า (Second order solid tetrahedral element)

เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า สร้างจากเส้นโค้งพาราโบลา การกำหนดความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดในแต่ละเอลิเมนต์จะมี 10 โหนด (4 มุม และมีโหนดกึ่งกลาง 6 โหนด) และแต่ละโหนดจะมีระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 3 ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงเอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่เหลี่ยม

อย่างไรก็ตามการแบ่งชิ้นส่วนย่อยนี้ก็เพื่อให้รูปร่างชิ้นส่วนย่อยใกล้เคียงชิ้นงานจริงให้มากที่สุดแต่ก็อาจจะทำให้การประมวลผลใช้เวลานานขึ้น เพราะจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดจะมากตามไปด้วย เพื่อให้การวิจัยในครั้งนี้ได้ผลลัพธ์เข้าใกล้ความจริงมากที่สุดจึงได้เลือกเอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงตามภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงเอลิเมนต์ทรงตันลำดับที่สองทรงสี่เหลี่ยม

2.5.3 ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations)

การวิเคราะห์ปัญหาของแข็งนั้น จะใช้ทฤษฎีของความสมดุลของการยืดหยุ่นเพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบ ดังนั้นในสมมุติฐานของการสมดุลรอบแกนของภาระและรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบ และสภาวะของการสมดุลของความยืดหยุ่นในพิกัดทรงกระบอก ทำให้การหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวประกอบด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย 4 สมการที่ซึ่งเป็นเชิงเส้นกับตัวแปรความเค้นที่ไม่ทราบค่า 4 ตัว $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$ และ τ_{rz}

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (62)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (63)$$

$$\frac{1+\nu}{E}(\sigma_r - \sigma_\theta) - \frac{r}{E} \left[\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} - \nu \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} \right) \right] = 0 \quad (64)$$

$$\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} - \frac{\nu}{E} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} \right) - \frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{r}{E} \left[\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial z^2} - \nu \left(\frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2} \right) \right] = 0 \quad (65)$$

การแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวข้างต้น มีความซับซ้อนและยุ่งยากเนื่องจากเป็นระบบสมการที่สัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาในการแก้ปัญหานี้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โมรีนา และคณะ (G. Molinar and others, Comparison of methods for calculating distortion in pressure balances up to 400 MPa, Metrologia, 1998) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของเครื่อง เพรสเซอร์บาลานซ์ ในช่วงความดัน 200-400 MPa จากเครื่องมือมาตรฐานที่รักษาไว้โดยห้องทดลองของแต่ละประเทศคือ เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี และอังกฤษ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิของแต่ละประเทศ การวิเคราะห์ได้ใช้เทคนิคของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่แตกต่างกัน ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันได้จากการไหลของของไหลซึ่งใช้น้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20°C ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบจากนั้นก็สามารรถคำนวณหาระตมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ในแต่ละช่วงความยาวของลูกสูบและกระบอกสูบซึ่งจากการเปรียบเทียบในแต่ละประเทศจะมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก

วลาดีเมียร์ ซาบูก้า และคณะ (Wladimir Sabuga and others, The effect of PCU Geometry on the Pressure Distortion Coefficient of Pressure Balance, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, IMEKO, 2003) ได้ศึกษาผลกระทบของรูปร่างทางกายภาพของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 1 GPa เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ หลักการศึกษาเริ่มจากการใช้พื้นฐานจากปัญหาของการไหลจากนั้นใช้ปัญหาโครงสร้างมาวิเคราะห์ สำหรับการไหลได้พิจารณาการไหลในแนวแกน 1 มิติ ตลอดช่วงของชุดลูกสูบและกระบอกสูบหลังจากนั้นก็ใช้ปัญหาโครงสร้าง ในการหาระยะห่างที่เปลี่ยนไปของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ จากการทดลองสรุปได้ว่าค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของลูกสูบและกระบอกสูบ ในเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ ไม่ได้ แต่ขึ้นอยู่กับสมบัติของการยืดหยุ่นของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของระยะห่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบอีกด้วย สำหรับของไหลจะใช้น้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20°C

โบโนรา และคณะ (N. Bonora and others, The Piston Distortion Coefficient of Clearance Controlled Pressure Balance Evaluated by Using An Analytical Method, Universita di Cassino, School of Engineering, via Di Biasio, France, IMEKO, 2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ เครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ที่ใช้ในความดันตั้งแต่ 0.2-1 GPa ซึ่งใช้หลักการของสมการการสมดุลของการยืดหยุ่น และการเคลื่อนที่ของของไหลระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ จากนั้นได้นำหลักการทั้ง 2 วิธี คือ ปัญหาทางกล และปัญหาการไหลของของไหลมาดัดแปลง ให้เข้ากับผลเฉลยทางตัวเลข เพื่อช่วยแก้ปัญหา โดยใช้ทฤษฎีของ Lamé' equation ซึ่งจะสมมติให้พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบเท่ากันตลอดช่วงความยาวและวัสดุของชุดลูกสูบและกระบอกสูบเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และสรุปได้ว่าผลจากการใช้วิธีทฤษฎีอย่างง่าย ๆ ร่วมกับ Lamé' equation ก็ได้ผลลัพธ์ ที่ใกล้เคียงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ซาบูกา และคณะ (W. Sabuga, and others, Calculation of the Distortion Coefficient and Associated Uncertainty of a PTB 1 GPa Pressure Balance Using Finite Element Analysis, EUROMET Project 463, 1998) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ ที่ช่วงความดัน 1 GPa โดยใช้ของไหลเป็นน้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20°C พร้อมทั้ง ประเมินค่าความไม่แน่นอนด้วยหลักการในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันคือ อาศัยหลักการของของไหล ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบไปตามแนวแกน 1 มิติ และสมมติให้การไหลเป็นแบบราบเรียบหลังจากนั้นใช้การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาในเวลาเดียวกัน การวิเคราะห์ ได้สมมติให้ช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเป็นเส้นตรงตลอดแนวแกนเปรียบเทียบกับระยะห่างของช่องว่างจริงที่ได้จากการวัดค่าโดยตรง

เอสหวาด และคณะ (TJ Esward and others, Piston-cylinder pressure balance design with a negligible distortion coefficient, National Physical Laboratory, United Kingdom, Measurement Science And Technology, 2003) ได้นำเทคนิคของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด สำหรับการออกแบบชุดลูกสูบและกระบอกสูบแบบควบคุมระยะห่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ (Controlled-Clearance) ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ ซึ่งใช้น้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20°C เป็นของไหล ในช่วงความดัน 250 MPa พร้อมกับใช้ลักษณะทางกายภาพและสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันโดยให้หลักการของของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเพื่อคำนวณความดันที่กระจายอยู่ในช่องว่างของลูกสูบและกระบอกสูบ จากนั้นแปลงความดันให้

เป็นแรงที่กระทำกับลูกสูบและกระบอกสูบ หลังจากนั้นก็จะได้ระยะห่างของลูกสูบและกระบอกสูบที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ซามาน (N.D. Samaan and F. Abdullah, Computer-aided Modelling of Pressure Balances, School of Electronic Engineering, University of South Australia, Australia, Metrologia, 1998) ได้ทำการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ ในช่วงความดันใช้งาน 320 MPa โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้น้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) กับ mineral oil เป็นของไหล โดยใช้หลักการของความดันที่กระทำกระจายตลอดช่วงความยาวของลูกสูบและกระบอกสูบเป็นพื้นฐานเบื้องต้น เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันโดยคิดผลกระทบของความหนืดของแต่ละของไหลเข้าไปด้วย สำหรับการคำนวณผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของลูกสูบและกระบอกสูบและสมบัติของของไหล

คุบาตะ และคณะ (T. Kobata and others, Comparison of working pressure standards in the range up to 200 MPa, National Metrology Institute of Japan, AIST, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 2001) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าพื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่อุณหภูมิ 20°C โดยใช้ น้ำมัน Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ตั้งแต่ความดัน 40-200 MPa ซึ่งทำด้วยกันทั้งหมด 3 ประเทศที่เกี่ยวข้องกับการวัดความดัน หลักการคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดจะอาศัยหลักการสมดุลของระบบเหมือนกันโดยการสังเกตตำแหน่งของลูกสูบเทียบกับเวลาเปลี่ยนแปลงโดยการวัดตำแหน่งจะใช้ เซนเซอร์แบบไม่สัมผัส เมื่อระบบเกิดการสมดุลจะทำให้อีกระบบหนึ่งเกิดการสมดุลด้วยซึ่งจะสามารถคำนวณความดันของทั้งสองระบบที่ต่อถึงกันได้ ดังนั้นก็สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดได้ด้วยจากความดันที่ได้

เช็นเจ ยาเดฟ (Sanjay Yadav, Calibration Procedures for the Pressure measuring Instrument Using Simple and Reentrant Type Dead Weight Testers as Pressure Standard, Pressure and Vacuum Standard, National Physical Laboratory, New Delhi, 2001) ได้ทำการเขียนขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันระหว่าง 0.07-500 MPa ที่ใช้เป็นเครื่องมือในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศอินเดีย ขั้นตอนการสอบเทียบจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของ ISO 17025, OIML และ EA ซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ ที่ใช้น้ำมันเป็นของไหลตัวกลาง ขั้นตอนการสอบเทียบอาศัยการสมดุลของแรงของทั้ง 2 ระบบที่ต่อถึงกัน ซึ่งแรงดันเครื่องมือมาตรฐานได้มาจากน้ำหนักที่ได้จากการชั่งซึ่งวางไว้บนลูกสูบที่เคลื่อนที่อยู่ในกระบอกสูบกับอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลก็สามารถหาความดันในระบบได้และก็สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดได้ สำหรับการหาการสมดุลของระบบจะใช้เซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

วลาดีเมียร์ ซาบูกา และคณะ (Wladimir Sabuga and others, Effective area of the DH Instruments piston-cylinder, piston P0107 and cylinder C0107, calculated from the dimensional measurement data, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1999.) ได้ทำการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้แก๊สเป็นของไหล ซึ่งการคำนวณจะใช้ข้อมูลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกลมและความตรงของทั้งลูกสูบและกระบอกสูบโดยหลักการคำนวณที่แตกต่างกันไป 5 วิธี เริ่มต้นจากวิธีที่ง่าย ๆ คือสมมติให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดช่วงความยาวของทั้งลูกสูบและกระบอกสูบและใช้รูปแบบสมการของ แดสสัน ซึ่งผลการคำนวณสามารถได้ค่าความไม่แน่นอนที่ดีมาก สำหรับการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบจะวัดเป็นแนวเส้นทแยงในระนาบซึ่งกระทำทุก ๆ 45 องศา ตลอดทั้งเส้นรอบรูป

โมรีนา และคณะ (G.F. Molinar and others, Elastic Distortions in Piston-Cylinder Units at Pressure up to 0.5 GPa, Metrologia 1992.) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุที่แตกต่างกัน ในความดัน 0.5 GPa ซึ่งวิธีการหาค่าได้มาจากการใช้เทคนิคการทดลองโดยใช้สเตรนเกจ (strain gauge) ติดอยู่บริเวณรอบ ๆ กระบอกสูบหลังจากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ของ Chebyshev's polynomials เข้ามาช่วยแก้ปัญหาสถานะความสมดุลของความเค้นและความสอดคล้องกันของสถานะความเครียด สำหรับความดันที่กระจายอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างลูกสูบก็จะใช้สมการของ Navier-stokes โดยใช้น้ำมันที่แตกต่างกันคือ spinEsso 10 และ Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20 °C

จากการวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ทำให้ผู้ทำการวิจัยในครั้งนี้ได้มองเห็นปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งน่าจะนำมาทำการวิจัยต่อ คือส่วนใหญ่ศึกษาเฉพาะของไหลที่เป็น Diethyl-Hexyl-Sebacate (DHS) ที่ 20 °C ในช่วงการวัดที่ค่อนข้างสูงคือประมาณ 200 MPa ขึ้นไป แต่การใช้งานจริงอุณหภูมิจริงของของไหลอยู่ในช่วง 15 °C ถึง 25 °C ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จะพิจารณาที่อุณหภูมิจริง 15 °C, 20 °C และ 25 °C ที่ช่วงของความดันประมาณ 0.7-140 MPa เพื่อให้สอดคล้องกับเครื่องมือที่ใช้ในประเทศ

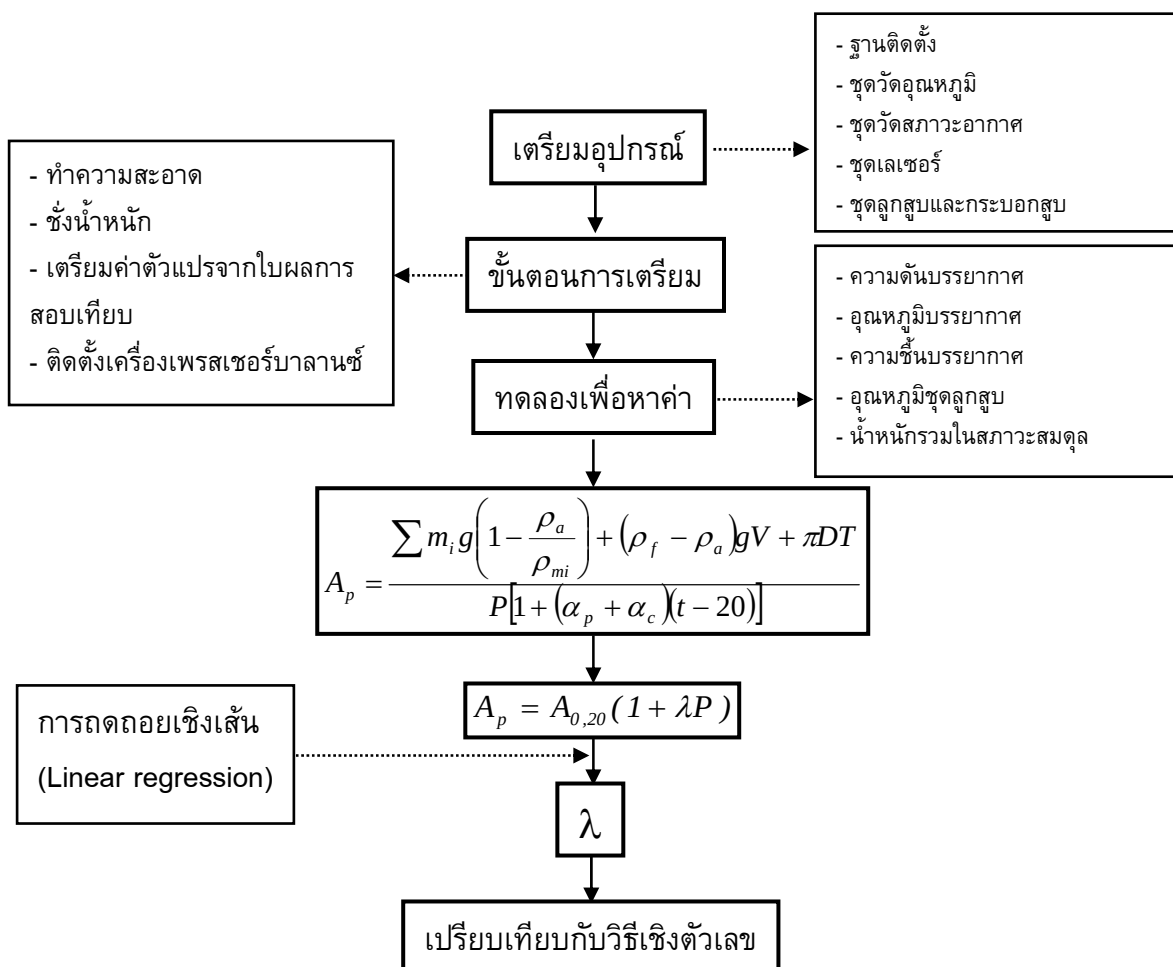
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทั้งการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข โดยในส่วนของทดลองกระทำโดยการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานโดยใช้วิธีการสมดุลแรงซึ่งการสมดุลของแรงนี้จะใช้หลักการของอัตราการใช้ของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ และในส่วนวิธีเชิงตัวเลขได้ใช้โปรแกรม SolidWork 2004 และ COSMOSWorks 2004 ในการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์โครงสร้างของชุดลูกสูบและกระบอกสูบตามลำดับ ซึ่งทั้งสองวิธีมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยการทดลอง

3.1.1 ขั้นตอนการทดลอง



ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการทดลอง

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 ฐานติดตั้งชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง แผ่นน้ำหนัก ชุดวัดอุณหภูมิของลูกสูบและกระบอกสูบ ชุดวัดสภาวะอากาศ และเลเซอร์ ตามภาพประกอบ 16



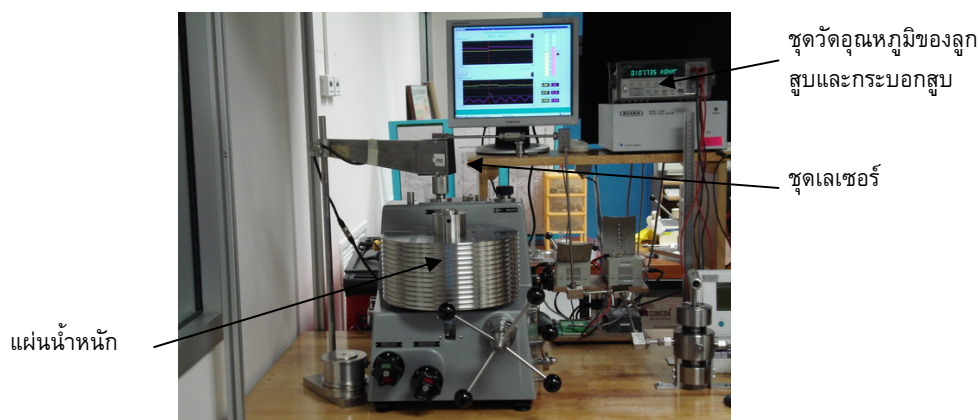
ภาพประกอบ 16 แสดงฐานติดตั้งชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ

3.1.2.2 ชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง ในช่วงความดันแก๊สตั้งแต่ 0.7-140 MPa ตามภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

3.1.2.3 ชุดเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐานเพื่อใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงในการทดลอง ตามภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงชุดเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน

3.1.2.4 ชุดลูกสูบและกระบอกสูบสำหรับเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน ในช่วงความดันแกว 5-500 MPa ตามภาพประกอบ 19

3.1.2.5 คอมพิวเตอร์สำหรับอ่านค่าอัตราการตกของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ



ภาพประกอบ 19 แสดงชุดลูกสูบและกระบอกสูบสำหรับเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียม

3.1.3.1 ทำความสะอาดชุดลูกสูบและกระบอกสูบและแผ่นน้ำหนักของทั้งชุดมาตรฐาน และชุดทดลอง ตามภาพประกอบ 20 และเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 4 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 20 การทำความสะอาดชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

จากนั้นนำลูกสูบและแผ่นน้ำหนักดังกล่าวมาชั่งเพื่อให้ทราบค่ามวลของลูกสูบในแต่ละชุด และแผ่นน้ำหนักทั้งหมดโดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง ซึ่งแสดงค่ามวลตามตาราง 1

ตาราง 1 แสดงความหนาแน่นและมวลของแผ่นน้ำหนัก ลูกสูบ และตุ้มน้ำหนักขนาดเล็ก

แผ่นน้ำหนัก หมายเลข	ความหนาแน่น (kg m ⁻³)	มวล (g)	แผ่นน้ำหนักหมายเลข	ความหนาแน่น (kg m ⁻³)	มวล (g)
1	7800	700.0127	18	7800	5000.0711
2	7800	5000.0752	19	7800	5000.0721
3	7800	5000.0622	20	7800	5000.0701
4	7800	5000.0282	21	7800	3000.0397
5	7800	5000.0702	22	7800	2000.0185
6	7800	5000.0782	23	7800	1000.0214
7	7800	5000.0681	24	7800	500.0043
8	7800	5000.0612	25	7800	300.0013
9	7800	5000.0602	26	7800	200.0019
10	7800	5000.0721	P10	7800	43.36117
11	7800	5000.0581	P100	7800	116.3001
12	7800	5000.0541	P200	7800	120.6076
13	7800	5000.0441	Table	5400	175.0017
14	7800	5000.0491	ลูกสูบ (0.7-7) MPa	14800	81.46407
15	7800	5000.0621	ลูกสูบ (7-70) MPa	14800	8.629891
16	7800	5000.0501	ลูกสูบ (14-140) MPa	14800	4.334629
17	7800	5000.0521	ตุ้มน้ำหนักขนาดเล็ก	7800	0.001-100

หาค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้ได้มาจากผลการสอบเทียบจาก

(ก) บริษัท DH-Budenberg ประเทศฝรั่งเศส ตามใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18790 สำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบหมายเลข 9195

(ข) บริษัท DH-Budenberg ประเทศฝรั่งเศส ตามใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18792 สำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบหมายเลข 9194

(ค) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประเทศฝรั่งเศส ตามใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข F120458/1 สำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบหมายเลข 9193

(ง) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประเทศไทย ตามใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข MP-06-0034 สำหรับมวลของแผ่นน้ำหนักและลูกสูบ โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงดังภาพประกอบ 74 ถึง 77 (ภาคผนวก ก)

ตาราง 2 ตัวแปรต่างๆ ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน

ชุดลูกสูบและ กระบอกสูบหมายเลข	ช่วงความดัน MPa	$A_{0,20}$ mm^2	λ Pa^{-1}	$\alpha_p + \alpha_c$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
9195	2.5 - 50	19.61062	7.0×10^{-13}	9.0×10^{-6}
9194	5 - 100	9.805872	9.9×10^{-13}	9.0×10^{-6}
9193	50 - 500	1.961812	8.0×10^{-13}	14.5×10^{-6}

ตาราง 3 ความหนาแน่นและมวลของแผ่นน้ำหนักและลูกสูบของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน

แผ่นน้ำหนัก หมายเลข	ความหนาแน่น (kg m^{-3})	มวล (g)	แผ่นน้ำหนัก หมายเลข	ความหนาแน่น (kg m^{-3})	มวล (g)
5 kg-1	7920	4999.950	5 kg -16	7920	4999.990
5 kg-2	7920	4999.964	5 kg -17	7920	4999.973
5 kg -3	7920	4999.985	5 kg -18	7920	5000.001
5 kg -4	7920	5000.000	4 kg	7920	4.000006
5 kg -5	7920	5000.001	2 kg -1	7920	2.000008
5 kg -6	7920	5000.001	2 kg -2	7920	2.000007
5 kg -7	7920	5000.007	1 kg	7920	1.000003
5 kg -8	7920	4999.992	500 g	7920	0.5000017
5 kg -9	7920	5000.012	200 g -1	7920	0.1999998
5 kg -10	7920	4999.977	200 g -2	7920	0.2000007
5 kg -11	7920	4999.973	100 g	7920	0.09999926
5 kg -12	7920	4999.980	bell	7920	0.8000072
5 kg -13	7920	4999.984	ลูกสูบ-9193	7920	0.1999993
5 kg -14	7920	4999.985	ลูกสูบ-9194	7920	0.2000008
5 kg -15	7920	4999.987	ลูกสูบ-9195	7920	0.2000011

3.1.3.2 ประกอบชุดลูกสูบและกระบอกสูบของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลองเข้ากับฐานตามภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงการประกอบชุดลูกสูบและกระบอกสูบเข้ากับฐาน

3.1.3.3 ประกอบชุดลูกสูบและกระบอกสูบมาตรฐาน

3.1.3.4 ติดตั้งชุดเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน กับชุดเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลองตามภาพประกอบ 22

3.1.3.5 วัดความแตกต่างของจุดอ้างอิงระหว่างเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน กับชุดเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลอง

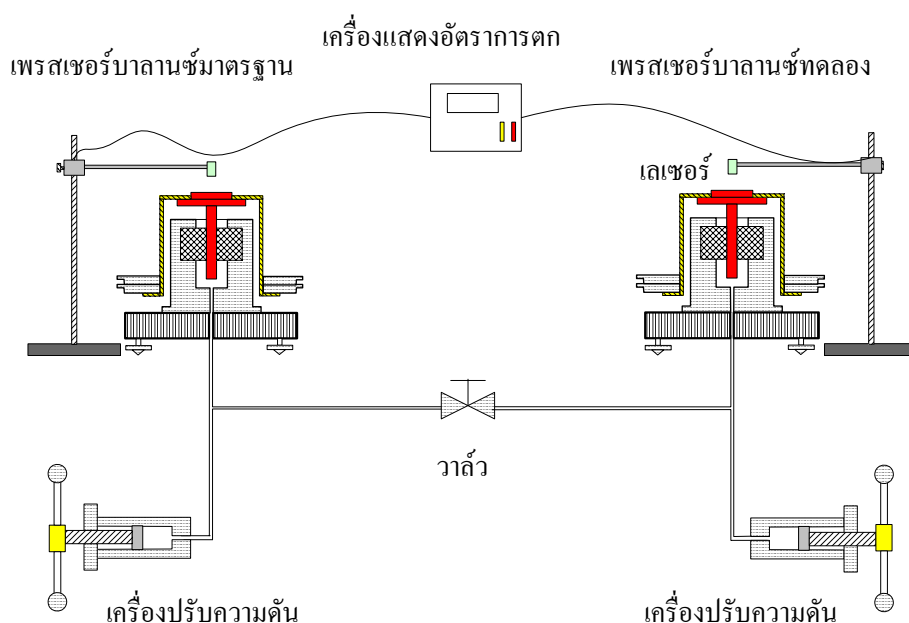


ภาพประกอบ 22 แสดงการติดตั้งชุดเพรสเซอร์บาลานซ์ของทั้งสองชุด

3.1.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การทดลองนี้ มีจุดประสงค์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันโดยการหาค่าตัวแปรดังกล่าวจะใช้วิธีที่เรียกว่า cross – float ซึ่งวิธีนี้ได้นำเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลองต่อเข้ากับเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน โดยทั้ง 2 ระบบกันด้วยวาล์วชนิดที่ไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตร (constant volume valve) เมื่อเปิดวาล์ว ระบบความดันของเครื่องมือทั้งสองต่อถึงกัน จากนั้นเพิ่มหรือลดน้ำหนักของด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้ระบบทั้งสองเกิดสภาวะสมดุล ซึ่งเมื่อทั้งสองข้างสมดุลแล้ว จะสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันได้จากค่าความดันมาตรฐานที่เกิดจากแรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดที่ทราบค่า ณ ขณะที่ทำการทดลองของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน โดยแรงดังกล่าวเกิดจากมวลของแผ่นน้ำหนักรวมกับมวลของลูกสูบและอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก และแรงที่กระทำลงบนเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลอง ซึ่งได้มาจากค่ามวลของแผ่นน้ำหนัก มวลของลูกสูบและมวลของแผ่นน้ำหนักที่ใช้ในการหาการสมดุลและอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

สำหรับวิธีการ cross – float ที่ใช้ในการหาสภาวะสมดุลของเพรสเซอร์บาลานซ์ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ก็คือ วิธีหาอัตราการตก ซึ่งเป็นวิธีที่หาค่าตัวแปรได้อย่างแม่นยำ โดยวิธีการนี้ได้ใช้เลเซอร์เข้ามาช่วยในการหาสภาวะสมดุล ตามภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 รูปแบบการติดตั้งและการใช้เลเซอร์

เมื่อวาล์วที่ใช้กันระบบทั้งสองปิด เพรสเซอร์บาลานซ์ทั้ง 2 ข้างวางโดยใช้แผ่นน้ำหนักในความดันที่ต้องการโดยประมาณ จากนั้นเพิ่มความดันเข้าไปในแต่ละด้าน จนลูกสูบทั้งสองข้างลอยจนถึงระดับอ้างอิงของแต่ละเครื่อง จากนั้นหมุนลูกสูบเพื่อลดแรงเสียดทาน และเพรสเซอร์บา

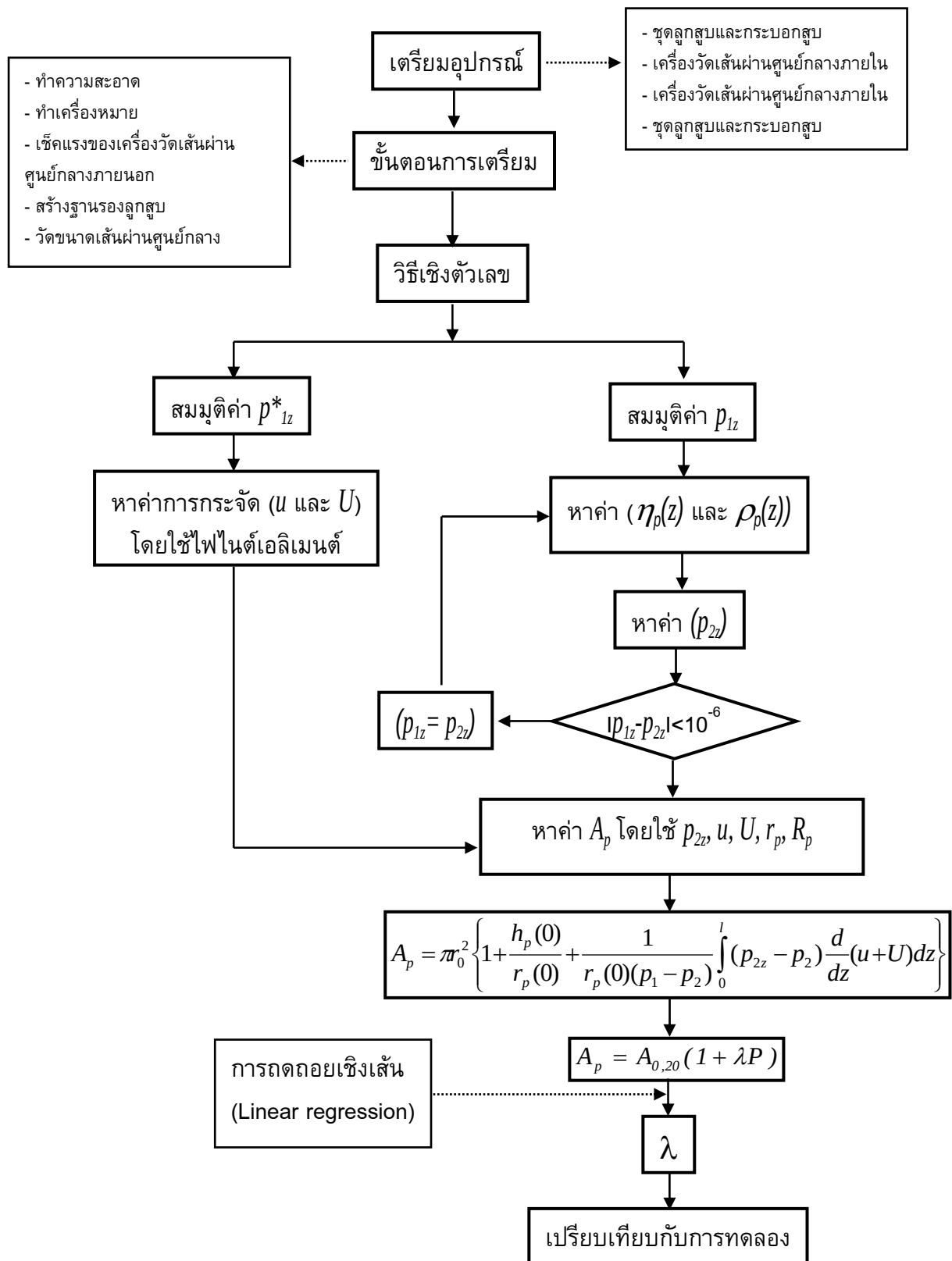
ลานซ์ของแต่ละชุดจะตกด้วยอัตราการตกของตนเอง ซึ่งเกิดจากการลดลงของปริมาตรภายในของของไหลในแต่ละระบบ ซึ่งปริมาตรที่ลดลงของของไหลเกิดจากการไหลของของไหลที่ไหลออกทางด้านบนผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบเนื่องจากความดันในระบบสูงกว่าความดันภายนอกและเรียกอัตราการตกนี้ว่าอัตราการตกตามธรรมชาติ (natural fall rate) ซึ่งสามารถทราบค่าอัตราการตกนี้ได้ โดยใช้เลเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ จากนั้นเปิดวาล์ว เพื่อให้ระบบทั้งสองด้านต่อถึงกันและวัดอัตราการตกอีกครั้งหนึ่ง เมื่ออัตราการตกด้านใดด้านหนึ่งเพิ่มขึ้น แสดงว่าความดันด้านนั้นสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง หรือแรงที่กระทำลงของอีกด้านหนึ่งมีค่าน้อย จากนั้นเพิ่มแรงโดยการใส่ตัมน้ำหนักขนาดเล็กเพิ่มเข้าไปที่ด้านที่มีอัตราการตกลดลง จนกระทั่งอัตราการตกกลับมาเท่ากับอัตราการตกธรรมชาติเหมือนกับตอนที่ปิดวาล์ว และทำการปิดวาล์วเพื่อเช็คอัตราการตกของแต่ละข้างอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้แน่ใจว่าอัตราการตกธรรมชาติเหมือนกับค่าเริ่มต้น ถ้าอัตราการตกธรรมชาติไม่เหมือนเดิมให้ทำการเปิดวาล์วแล้วทำการสมดุลอีกครั้ง หรือถ้าเหมือนเดิมให้ทำการบันทึกค่า หมายเลขของแผ่นน้ำหนัก มวลของตัมน้ำหนักขนาดเล็กที่ใช้สำหรับการหาการสมดุล ความดันบรรยากาศ ความชื้นของบรรยากาศ อุณหภูมิของบรรยากาศ และอุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้งสอง จากนั้นนำค่าต่างๆ ที่ได้ทำการคำนวณเพื่อหาค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ณ ความดันนั้น ๆ ด้วยสมการที่ 12 และสมการที่ 9

จากสมการดังกล่าวจะสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) ในแต่ละความดันต่างๆ ได้และจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 9 ดังนั้นสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัด ($A_{0,20}$) ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิงใดๆ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบได้โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (ภาคผนวก ข) จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับกระบวนการในการหาค่าพื้นที่หน้าตัดในแต่ละความดัน ที่ได้กล่าวมาแล้ว ต้องทำ ณ ความดันต่าง ๆ ตลอดช่วงการวัด คือประมาณ 10 % ถึง 100 % ของช่วงการวัดของเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลองโดยจะทำทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งรวมทั้งหมดประมาณ 50 จุดต่อ 1 ชุดของลูกสูบและกระบอกสูบ

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยวิธีเชิงตัวเลข

3.2.1 ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข



ภาพประกอบ 24 ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข

3.2.2 อุปกรณ์

3.2.2.1 ชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง ในช่วงความดันตั้งแต่ 0.7-140 MPa ตามภาพประกอบ 17

3.2.2.2 เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบทดลอง ภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แสดงชุดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบทดลอง

3.2.2.3 เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง ภาพประกอบ 26

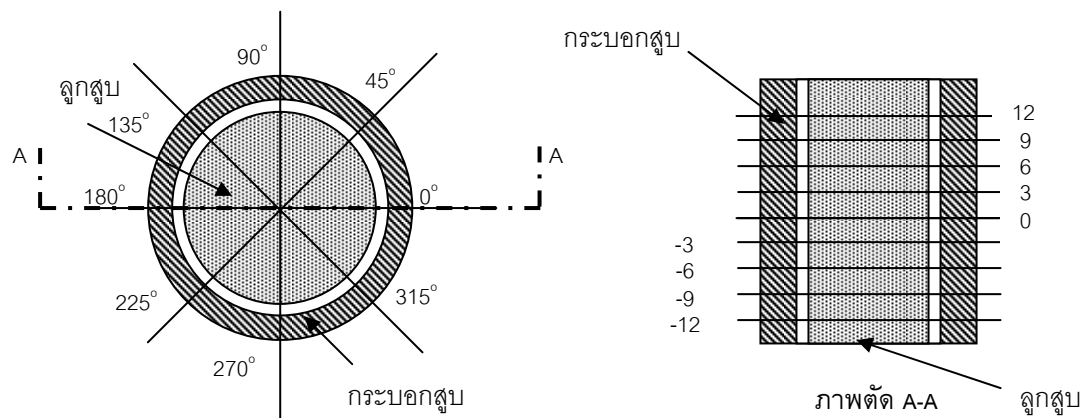


ภาพประกอบ 26 แสดงชุดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียม

3.2.3.1 ทำความสะอาดชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง และเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 4 ชั่วโมง

3.2.3.2 ทำเครื่องหมายทั้งลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง ตามภาพประกอบ 27



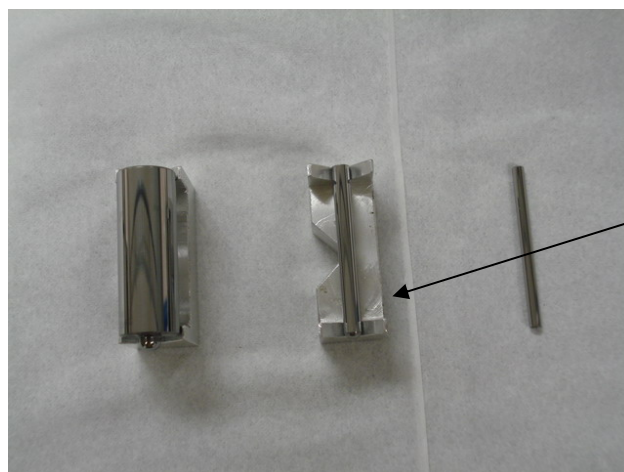
ภาพประกอบ 27 แสดงการทำเครื่องหมายของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

3.2.3.3 วัดแรงของเครื่องมือวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกโดยใช้โพลดเซลล์เพื่อให้แน่ใจว่าแรงที่กระทำที่ผิวด้านข้างไม่ทำให้ขนาดของลูกสูบเปลี่ยนแปลงคือแรงต้องไม่เกิน 1 N ตามภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แสดงชุดของการติดตั้งโพลดเซลล์สำหรับการวัดแรง

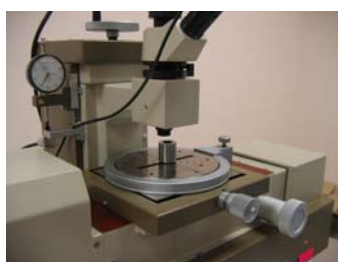
3.2.3.4 ทำฐานรองลูกสูบในแต่ละชั้นเพื่อช่วยในการวางลูกสูบทดลองขณะทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกตามภาพประกอบ 29



ฐานสำหรับ
วางลูกสูบทดลอง

ภาพประกอบ 29 แสดงการวางลูกสูบทดลองเข้ากับฐานรองในขณะที่วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ

3.2.3.5 ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกสูบทดลอง ตามภาพประกอบ 30 ซึ่งจะทำการวัดทุก ๆ องศาที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ตามภาพประกอบ 23 คือ $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ และ 135° ตลอดแนวความยาวตั้งแต่ -12 ถึง 12 mm โดยจะทำการวัดจุดละ 4 ครั้ง ซึ่งเมื่อรวมทั้งหมดแล้วได้ทำการวัด 144 ครั้งต่อ 1 กระบอกสูบ (ตาราง 25 ถึง 28 ภาคผนวก ค)



ภาพประกอบ 30 แสดงขั้นตอนการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ

3.2.3.6 ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง ตามภาพประกอบ 31 ซึ่งจะทำให้การวัดทุก ๆ องศาที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ตามภาพประกอบ 23 คือ 0° , 45° , 90° และ 135° และทำการวัดทั้งความยาวตั้งแต่ -12 ถึง 12 mm โดยทำการวัดจุดละ 4 ครั้ง ซึ่งเมื่อรวมทั้งหมดแล้วได้ทำการวัด 144 ครั้งต่อ 1 ลูกสูบ (ตาราง 29 ถึง 32 ภาคผนวก ค)



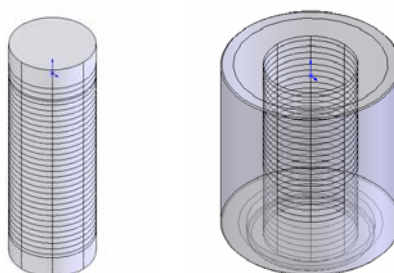
ภาพประกอบ 31 แสดงการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบทดลอง

3.2.3.7 หาค่าสมบัติของน้ำมัน diethyl-hexyl-sebacate (DHS) ในแต่ละช่วงความดันที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C , 20°C และ 25°C (ตามตาราง 35 ถึง 37 และภาพประกอบ 78 และ 79 ภาคผนวก ง)

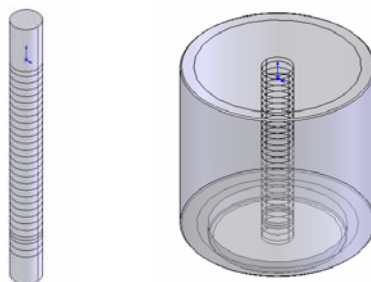
3.2.3.8 หาสสมบัติของวัสดุของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ (ตามตาราง 38 ถึง 40 (ภาคผนวก ง))

3.2.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยวิธีเชิงตัวเลข

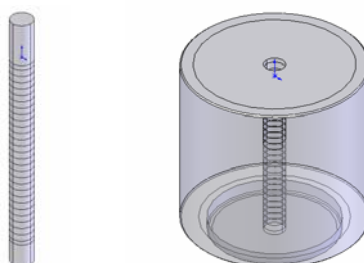
3.2.4.1 นำข้อมูลค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบ มาสร้างเป็นรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในโปรแกรม SolidWork 2004 ตามภาพประกอบ 32 ถึง 34



ภาพประกอบ 32 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 0.7-7 MPa



ภาพประกอบ 33 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 7-70 MPa



ภาพประกอบ 34 แสดงรูปร่างของลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในช่วงความดัน 14-140 MPa

3.2.4.2 ทำการวิเคราะห์โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้คือ

ส่วนที่ 1

(ก) สมมติค่าความดัน (p_{1z}^*) ตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

(ข) หาค่าการกระจัด u และ U ของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง ตามลำดับ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม COSMOSWork 2004

ส่วนที่ 2

(ค) สมมติค่าความดัน (p_{1z}) ตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

(ง) หาค่าความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมัน โดยใช้ค่าความดัน (p_{1z}) ในอุณหภูมิต่างๆที่จะวิเคราะห์

(จ) หาค่าความดัน (p_{2z}) ตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลองโดยใช้สมการที่ 44

(ฉ) เปรียบเทียบค่าความดัน (p_{1z}) ที่สมมุติกับความดัน (p_{2z}) ที่ได้จากการคำนวณในข้อ (จ) โดยให้มีความแตกต่างน้อยที่สุดตามที่ได้กำหนดไว้ ถ้าไม่ได้ให้ใช้ค่าความดัน (p_{2z}) กลับเข้าไปแทนค่าในข้อ (ง) จนกระทั่งได้ค่าตามที่ต้องการ หรือถ้าความแตกต่างมีค่าน้อยตามที่ต้องการให้ทำขั้นตอนต่อไป

(ช) คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) จากสมการที่ 62 และสมการที่ 9 โดยใช้ค่า (p_{2z}), u , U , r_p และ R_p จากการคำนวณข้างต้น และจากการวัดขนาดของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

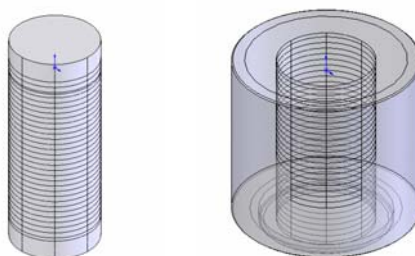
(ซ) เปรียบเทียบค่าระหว่างความดัน (p^*_{1z}) ที่สมมุติในส่วนที่ 1 กับความดัน (p_{2z}) ที่ได้จากการคำนวณในข้อ (จ) ในส่วนที่ 2 โดยให้มีความแตกต่างน้อยที่สุดตามที่ได้กำหนดไว้ ถ้าไม่ได้ให้ใช้ (p_{2z}) กลับเข้าไปแทนค่าในข้อ (ก) แล้วทำขั้นตอน (ข) จนถึง (ซ) อีกครั้งจนกระทั่งได้ค่าตามที่ต้องการ

จากสมการที่ 62 และสมการที่ 9 สามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) ในแต่ละความดันต่างๆ ได้ และจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่อธิบายจากสมการที่ 9 ดังนั้นสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัด ($A_{0,20}$) ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิงใดๆ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบได้โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (ภาคผนวก ข) จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ที่ได้จากการทดลอง

ทำขั้นตอนดังกล่าวโดยเพิ่มความดันให้เท่ากับช่วงการวัดของแต่ละชุดของลูกสูบและกระบอกสูบและพิจารณาอุณหภูมิอ้างอิงของของไหลและของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ 15 °C, 20 °C และ 25 °C พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

3.2.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(ก) สร้างโมเดล



ภาพประกอบ 35 แสดงการสร้างโมเดลของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

(ข) กำหนดสมบัติของวัสดุ โดยการวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 รูปแบบ ตาม

ตาราง 4

ตาราง 4 รูปแบบของวัสดุที่ใช้ในการสร้างลูกสูบและกระบอกสูบทดลองในแต่ละช่วงความดัน

ช่วงความดัน MPa	ส่วนประกอบ	วัสดุ
0.7-7	ลูกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิม
	กระบอกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งสแตนคาร์ไบด์
7-70	ลูกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิม
	กระบอกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งสแตนคาร์ไบด์
14-140	ลูกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิม
	กระบอกสูบ	ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งสแตนคาร์ไบด์

(ค) กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ และขนาดของเอลิเมนต์ โดยมีคุณสมบัติดังตาราง

5 และ 6

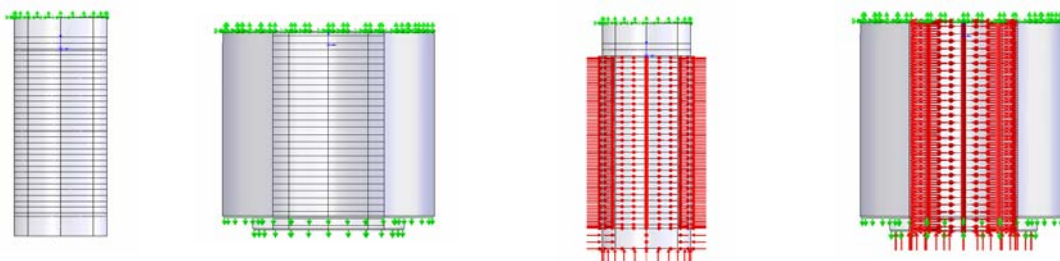
ตาราง 5 คุณสมบัติของเอลิเมนต์สำหรับกระบอกสูบในช่วงความดันต่างๆ

พารามิเตอร์	0.7-7 MPa	7-70 MPa	14-140 MPa
Element size:	1.07904 mm	1.19422 mm	1.20045 mm
Tolerance:	0.0539519 mm	0.0597109 mm	0.0600224 mm
Mesh quality:	High	High	High
Total nodes:	78272	92205	83391
Total elements:	52824	64764	58567

ตาราง 6 คุณสมบัติของเอลิเมนต์สำหรับลูกสูบในช่วงความดันต่างๆ

พารามิเตอร์	0.7-7 MPa	7-70 MPa	14-140 MPa
Element size:	0.873117 mm	0.407502 mm	0.323403 mm
Tolerance:	0.0436559 mm	0.0203751 mm	0.0161701 mm
Mesh quality:	High	High	High
Total nodes:	155972	74948	92111
Total elements:	111945	51579	63334

(ง) กำหนดเงื่อนไขบังคับและการป้อนความดัน

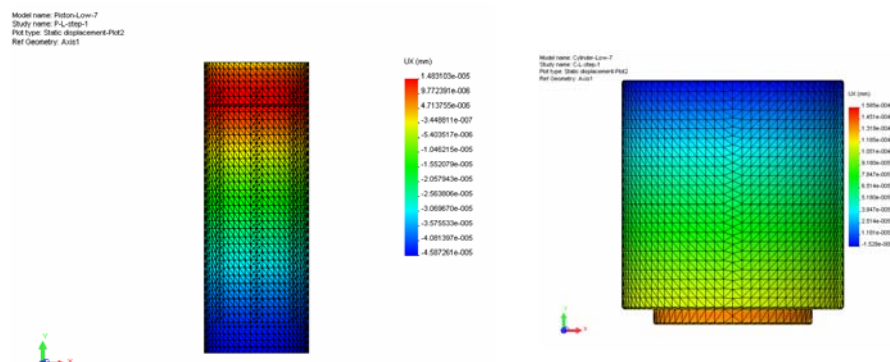


(ก) เงื่อนไขบังคับ

(ข) การป้อนความดัน

ภาพประกอบ 36 แสดงเงื่อนไขบังคับ (ก) และการป้อนความดัน (ข)

(จ) วิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม COSMOSWorks 2004



ภาพประกอบ 37 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

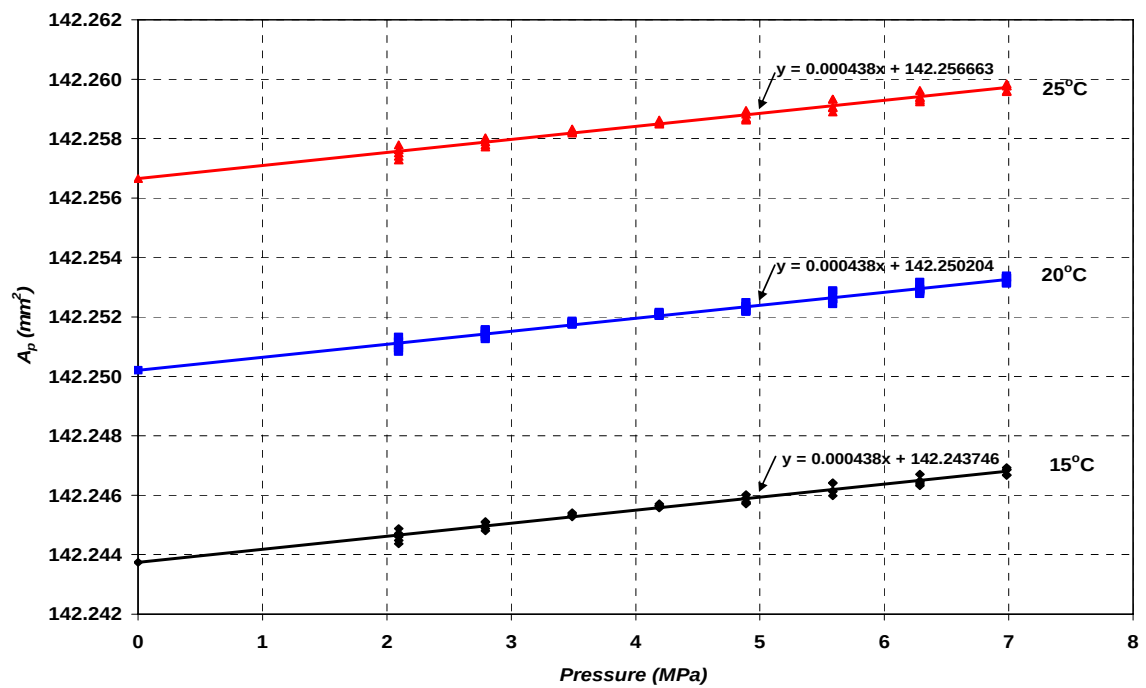
ผลการวิจัยเรื่อง การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบของเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย ผลการวิจัยมีดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

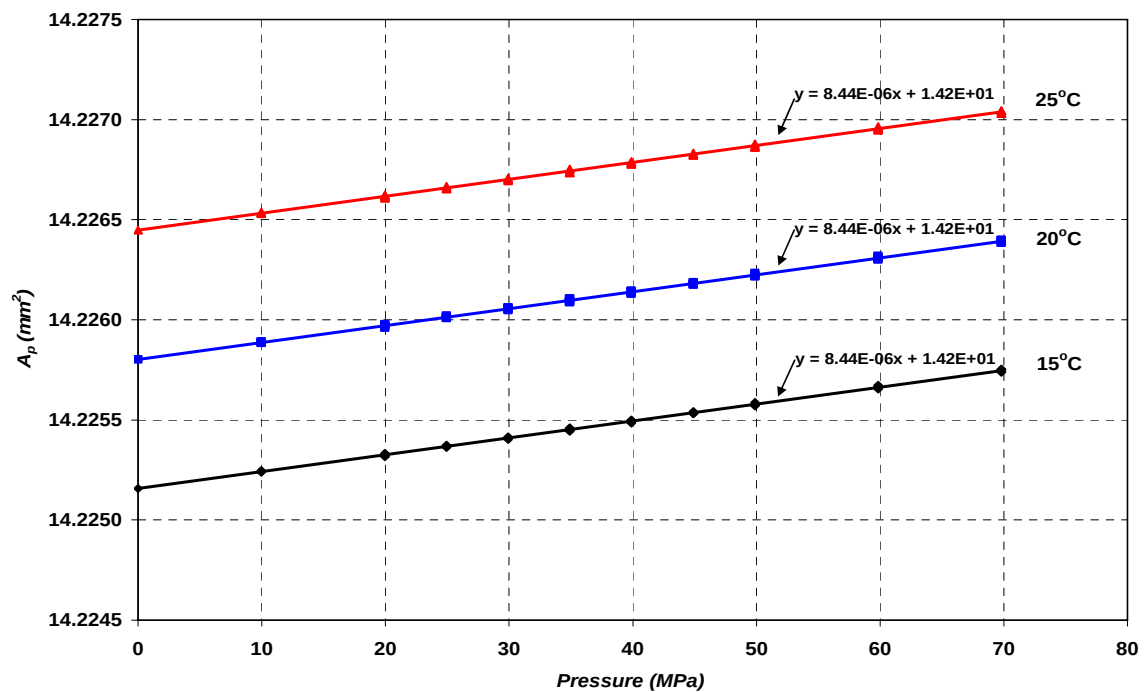
4.2 ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่เกิดจากอุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C และวัสดุที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

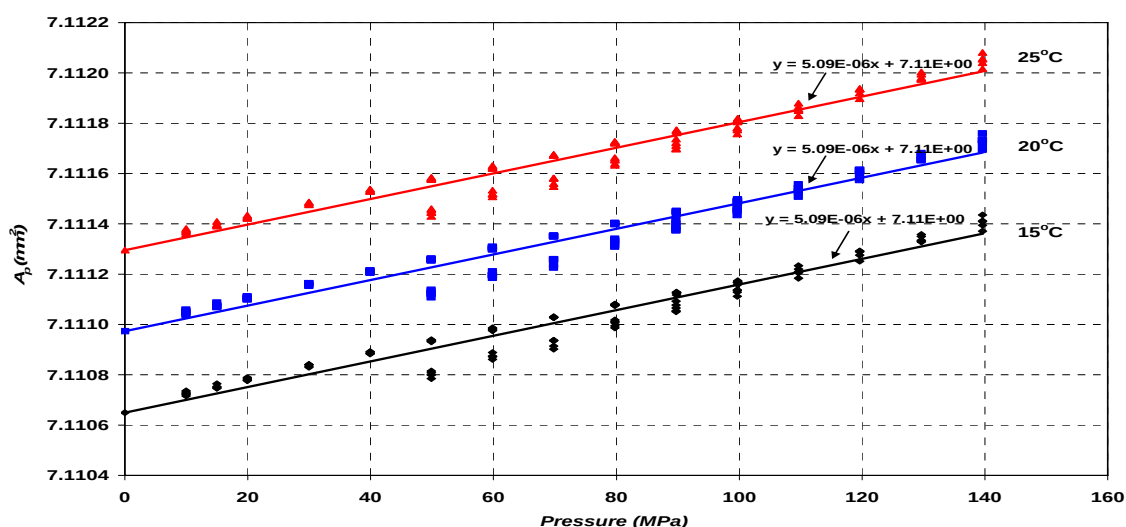
4.1.1 ผลการวิจัยจากการทดลอง



ภาพประกอบ 38 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa จากการทดลอง



ภาพประกอบ 39 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa จากการทดลอง



ภาพประกอบ 40 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa จากการทดลอง

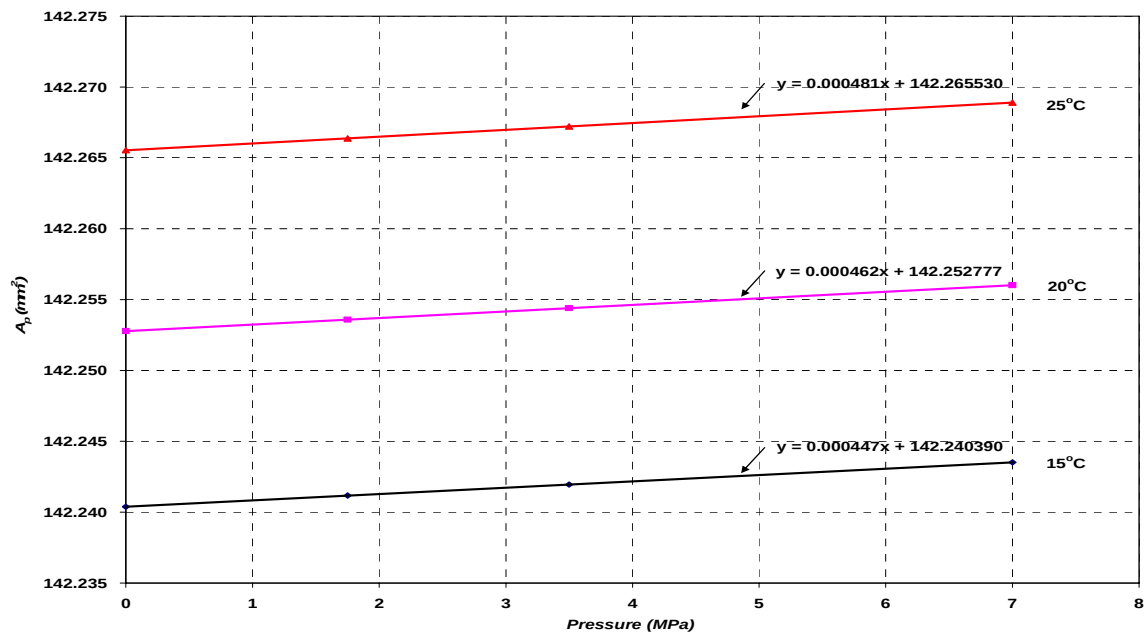
จากภาพประกอบ 38 ถึง 40 พบว่าชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดขึ้นอยู่กับความดันที่กระทำโดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง คือเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้นและเมื่อความดันน้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดลดลงเช่นกัน ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบตามสมการที่ 9 โดยแสดงตามตาราง 7

ตาราง 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการทดลอง

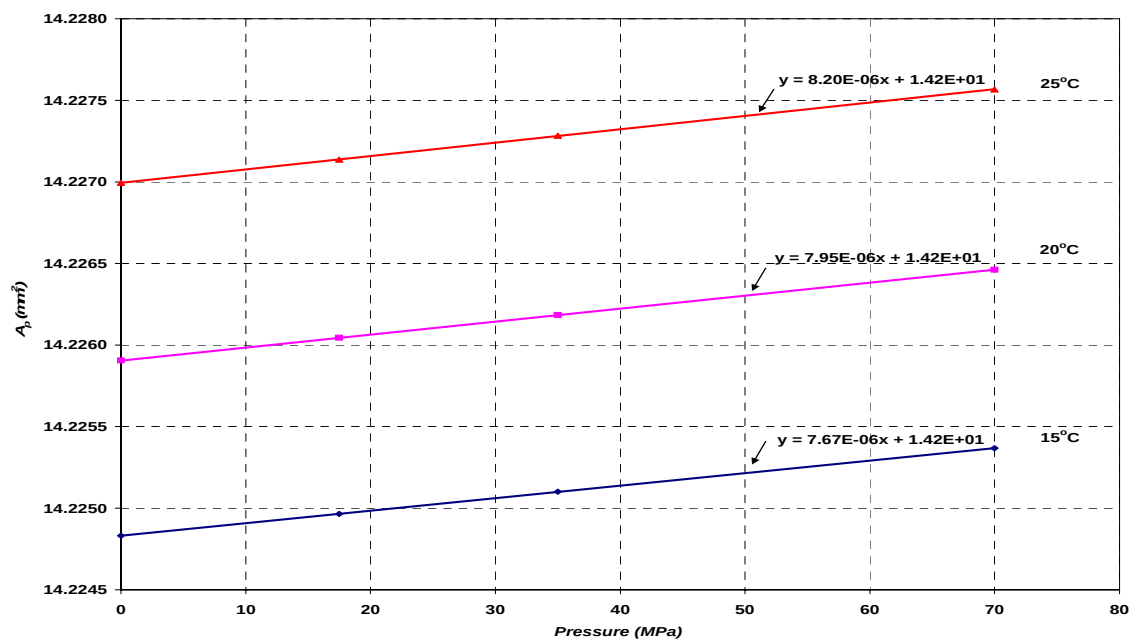
ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	15°C	20°C	25°C
0.7-7	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$
14-140	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$

จากตาราง 7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงความดัน และที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละช่วงความดัน

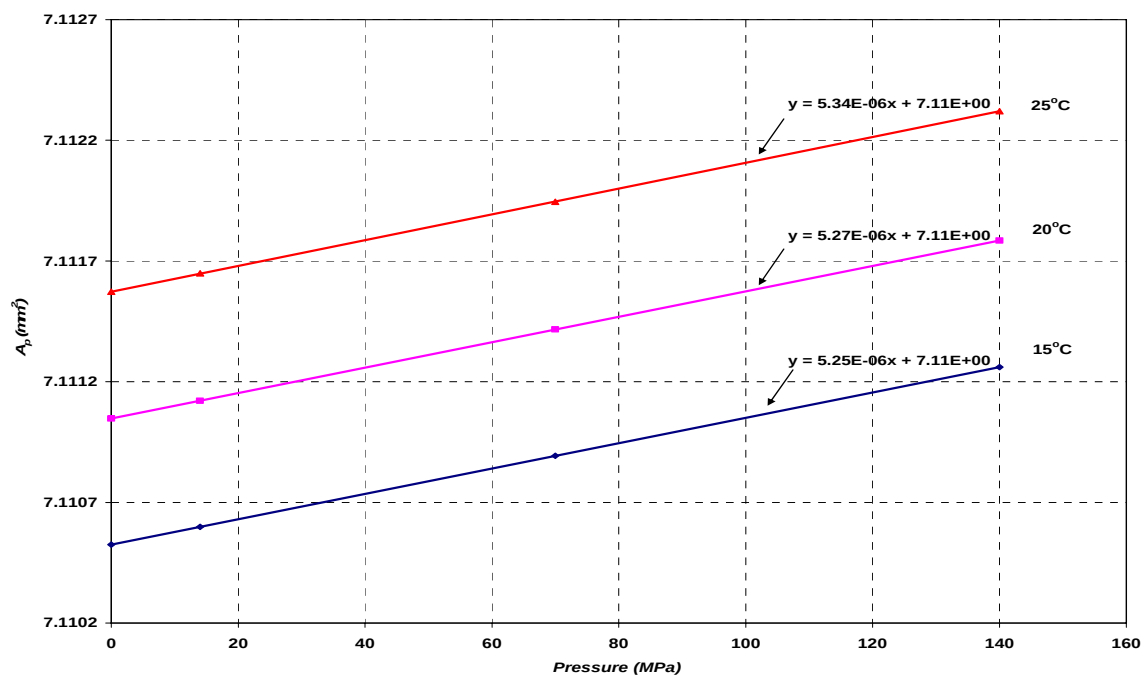
4.1.2 ผลการวิจัยจากวิธีเชิงตัวเลข



ภาพประกอบ 41 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa จากวิธีเชิงตัวเลข



ภาพประกอบ 42 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa จากวิธีเชิงตัวเลข



ภาพประกอบ 43 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสเตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa จากวิธีเชิงตัวเลข

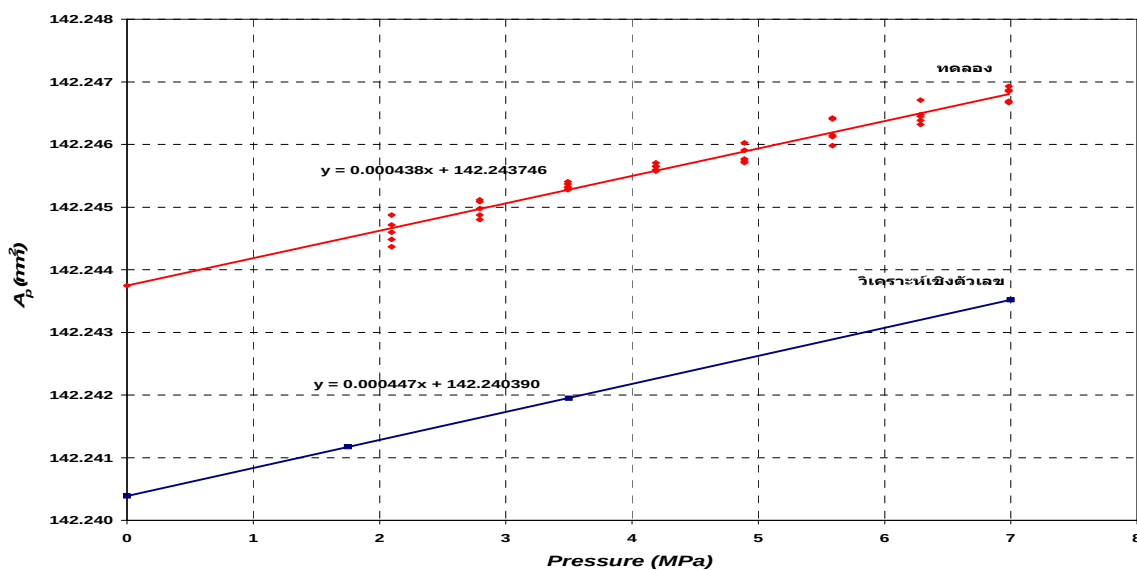
จากภาพประกอบ 41 ถึง 43 พบว่าชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดขึ้นอยู่กับความดันที่กระจายตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของลูกสูบและกระบอกสูบ โดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง คือเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้นและเมื่อความดันน้อยลงทำให้พื้นที่หน้าตัดลดลง ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบตามสมการที่ 9 โดยแสดงตามตาราง 8

ตาราง 8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสเตนคาร์ไบต์จากวิธีเชิงตัวเลข

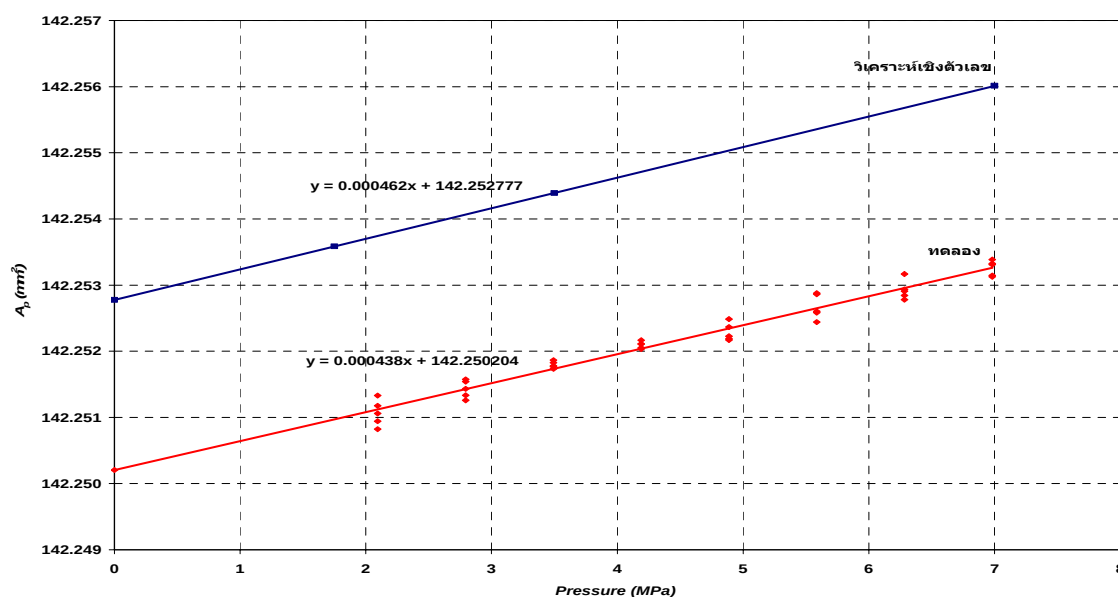
ความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	15°C	20°C	25°C
0.7-7	$3.14 \cdot 10^{-6}$	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$3.38 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.39 \cdot 10^{-7}$	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$5.76 \cdot 10^{-7}$
14-140	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$7.50 \cdot 10^{-7}$

จากตาราง 8 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงความดัน โดยมีค่ามากที่สุด ณ อุณหภูมิ 25°C และมีค่าน้อยที่สุด ณ อุณหภูมิ 15°C ในแต่ละช่วงความดัน

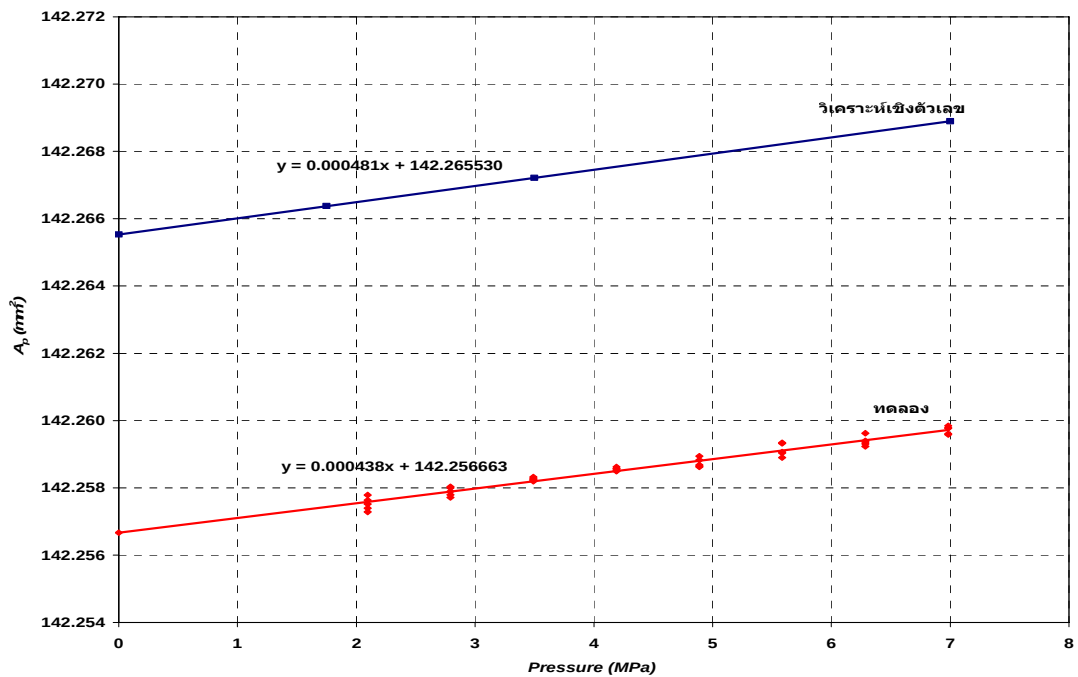
4.1.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลข ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C



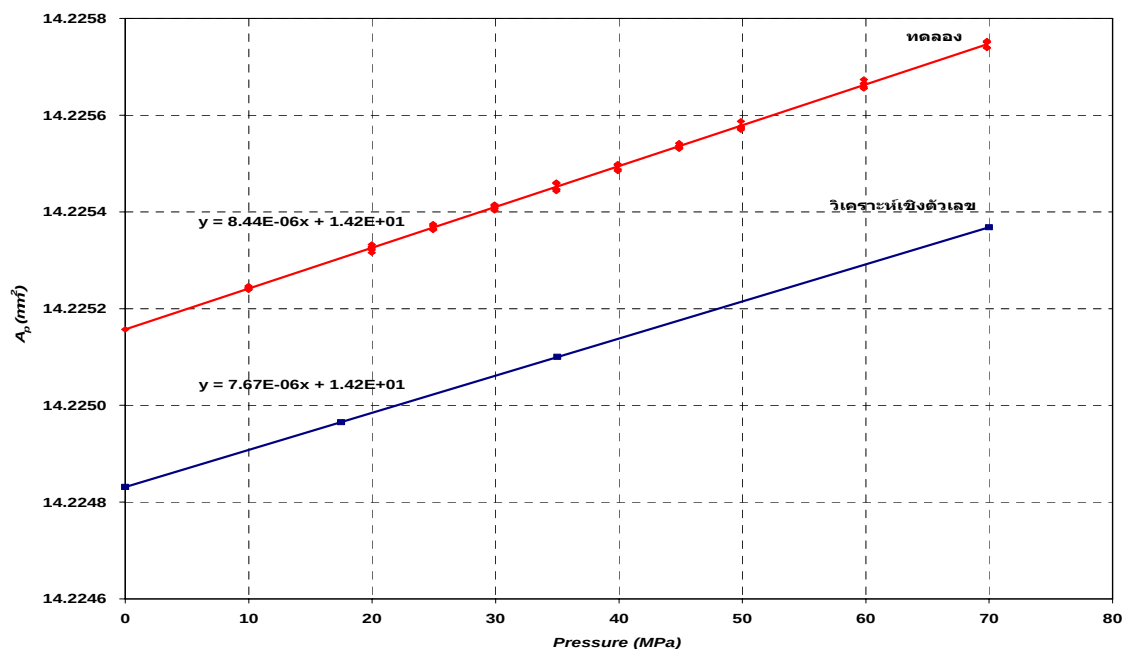
ภาพประกอบ 44 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C



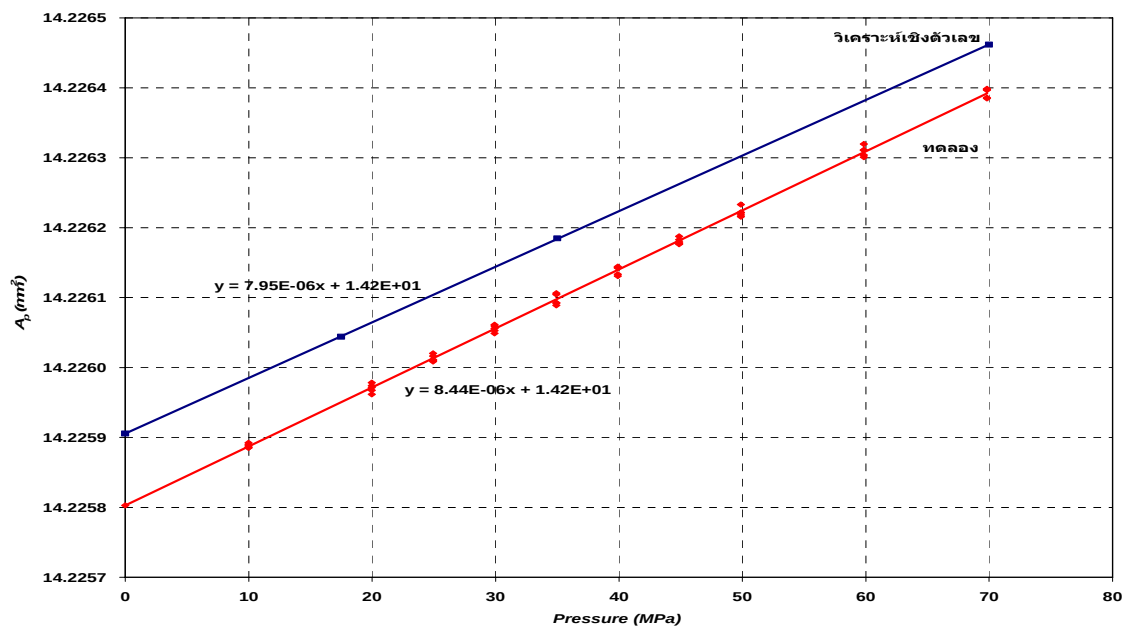
ภาพประกอบ 45 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C



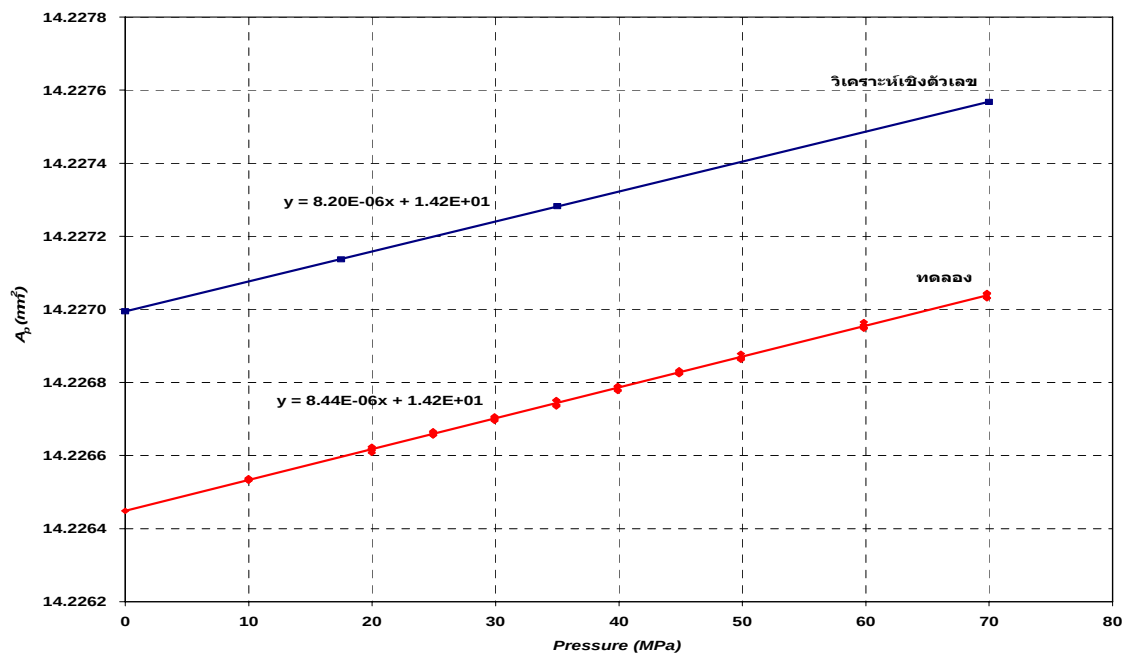
ภาพประกอบ 46 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C



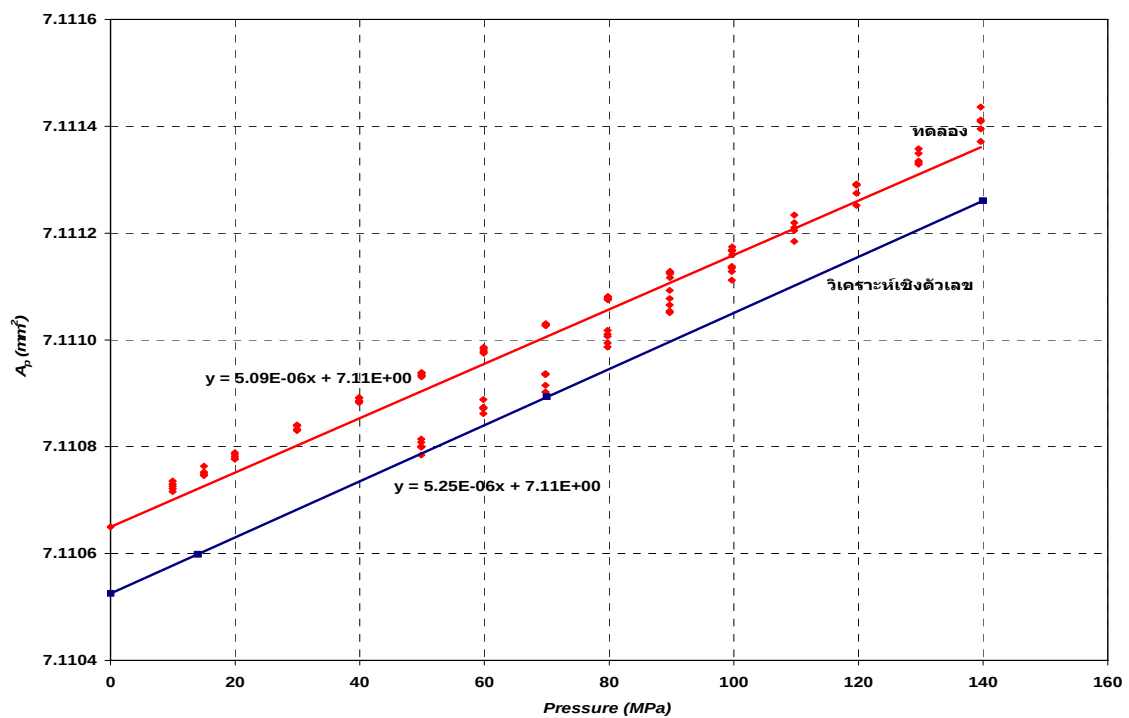
ภาพประกอบ 47 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C



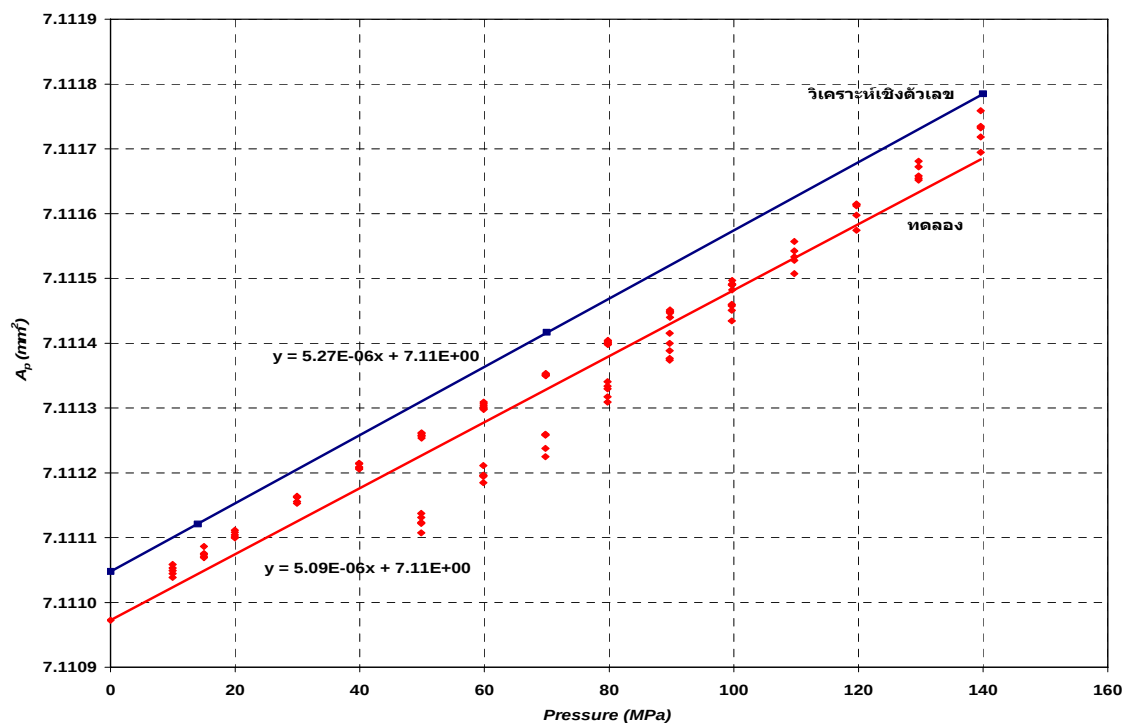
ภาพประกอบ 48 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C



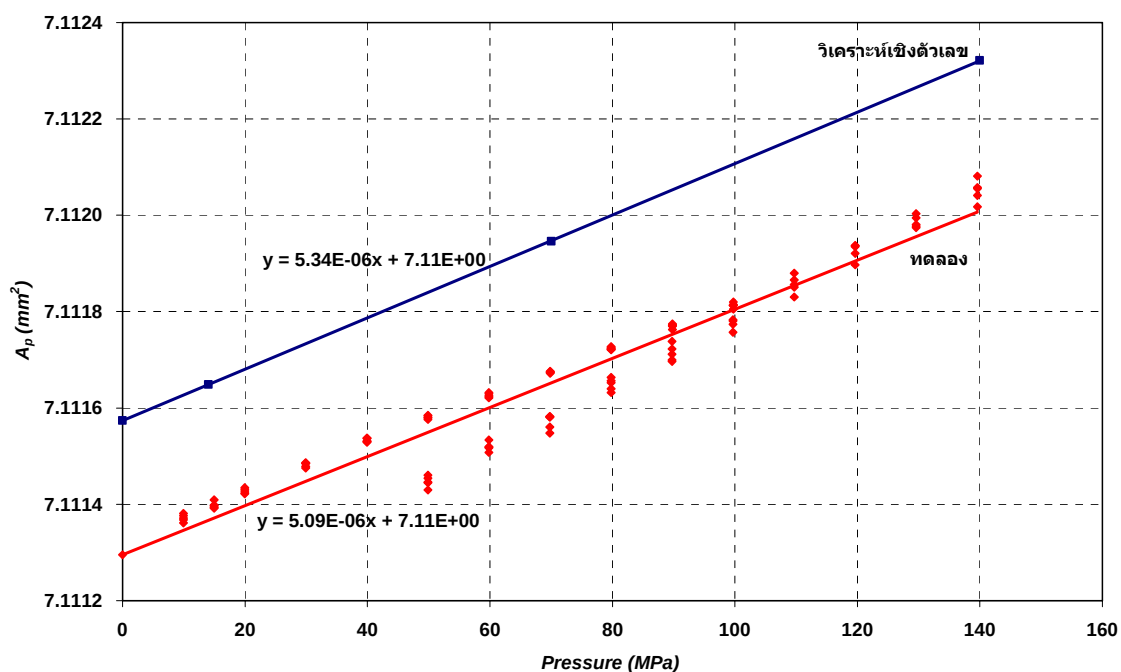
ภาพประกอบ 49 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C



ภาพประกอบ 50 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C



ภาพประกอบ 51 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C



ภาพประกอบ 52 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C

จากภาพประกอบ 44 ถึง 52 พบว่าชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันไป โดยความแตกต่างสามารถสรุปได้จากตาราง 9 ดังนี้คือ

ตาราง 9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบต์จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ)						
ความดัน (MPa)	(MPa ⁻¹)					
	15°C		20°C		25°C	
	ทดลอง	FEM	ทดลอง	FEM	ทดลอง	FEM
0.7-7	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.14 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.38 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.39 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.76 \cdot 10^{-7}$
14-140	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.50 \cdot 10^{-7}$

ตาราง 10 แสดงผลเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

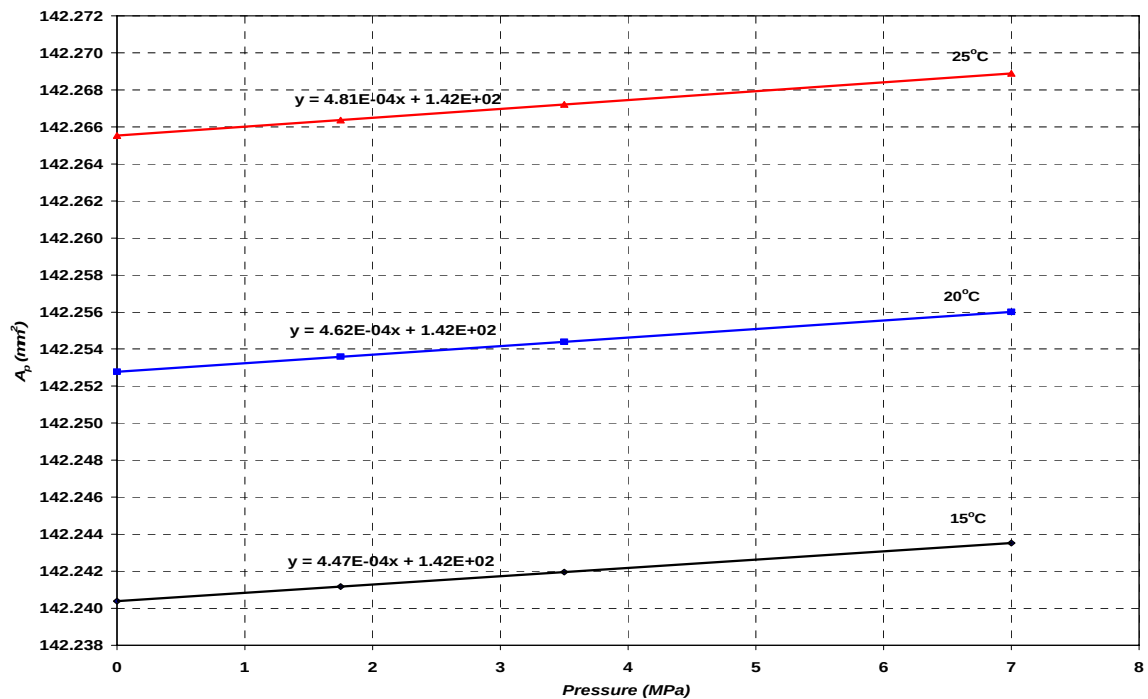
ความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ)					
	15°C		20°C		25°C	
	ผลต่าง		ผลต่าง		ผลต่าง	
	MPa ⁻¹	%	MPa ⁻¹	%	MPa ⁻¹	%
0.7-7	$0.06 \cdot 10^{-6}$	1.95	$0.17 \cdot 10^{-6}$	5.52	$0.30 \cdot 10^{-6}$	9.74
7-70	$-0.54 \cdot 10^{-7}$	9.10	$-0.34 \cdot 10^{-7}$	5.73	$-0.17 \cdot 10^{-7}$	2.87
14-140	$0.23 \cdot 10^{-7}$	3.21	$0.25 \cdot 10^{-7}$	3.49	$0.34 \cdot 10^{-7}$	4.75

จากตารางที่ 10 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความดัน และจากวิธีเชิงตัวเลขพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงความดัน สำหรับความแตกต่างระหว่างการทดลองและวิธีเชิงตัวเลขพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันพบว่าในช่วงความดัน 0.7-7 MPa มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 9.74% และน้อยสุดที่อุณหภูมิ 15°C เท่ากับ 1.95% สำหรับในช่วงความดัน 7-70 MPa พบว่ามีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 15°C เท่ากับ 9.10% และน้อยสุดที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 2.87% และในช่วงความดัน 14-140 MPa พบว่ามีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 4.75% และมีค่าน้อยสุดที่อุณหภูมิ 15°C เท่ากับ 3.21%

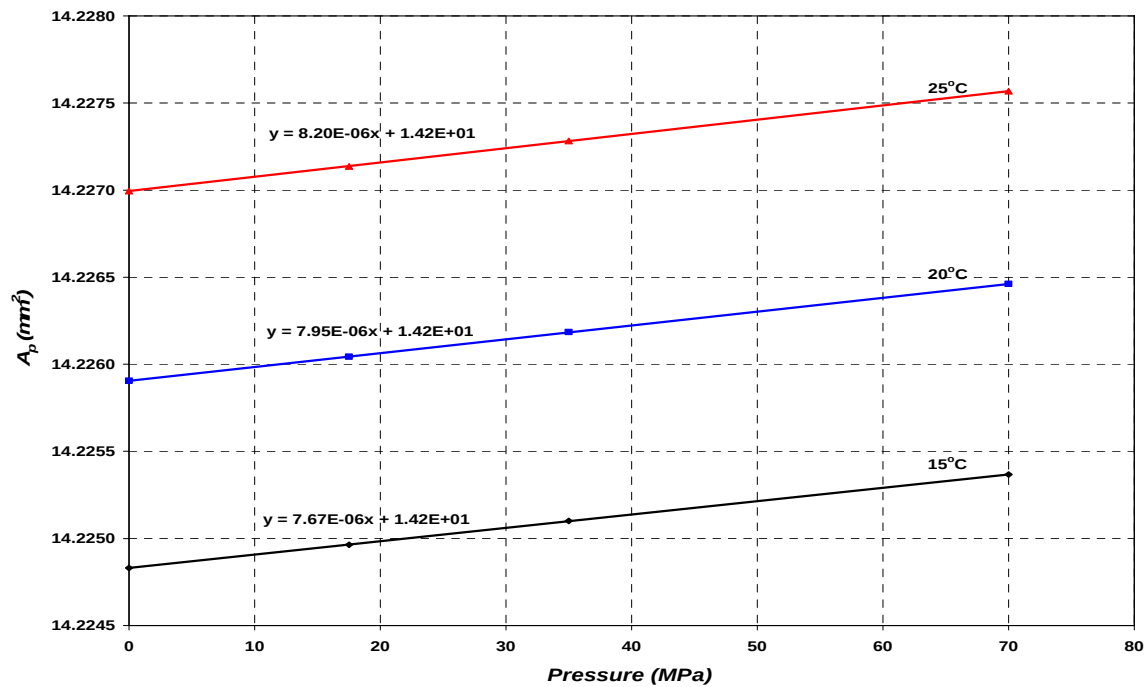
สำหรับอุณหภูมิที่ 20°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงทั่วไป พบว่าความแตกต่างระหว่างการทดลองและวิธีเชิงตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันในช่วงความดัน 0.7-7 MPa เท่ากับ 5.52% ช่วงความดัน 7-70 MPa เท่ากับ 5.73% และช่วงความดัน 14-140 MPa เท่ากับ 3.49%

4.2 ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่เกิดจากอุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C และวัสดุที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข ณ ความดันช่วง ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

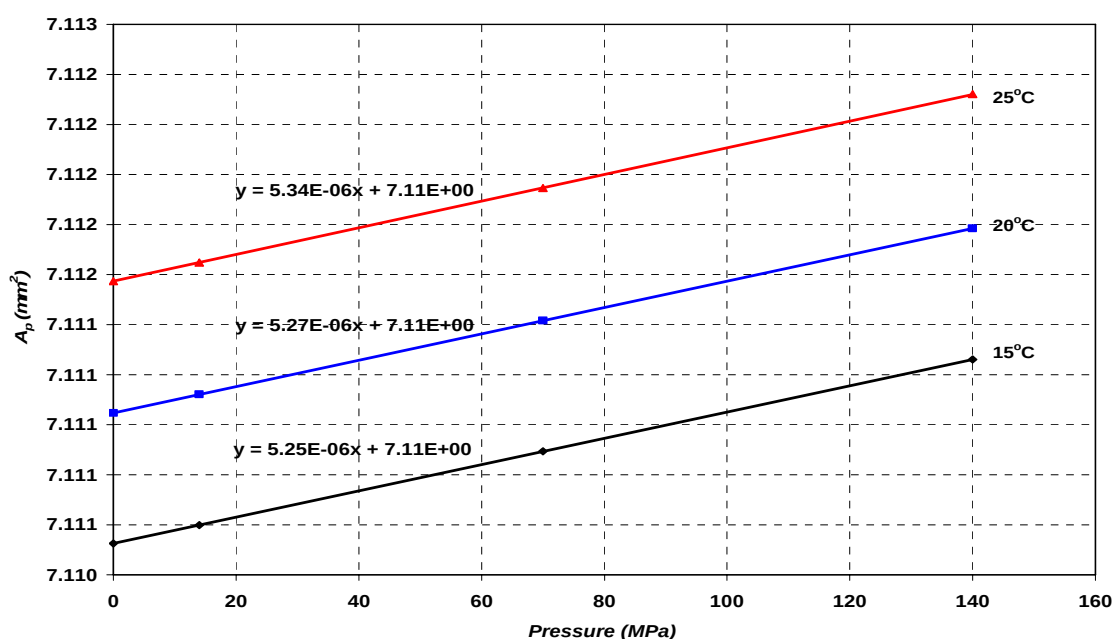
4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิอ้างอิง ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ ความดันช่วงต่าง ๆ



ภาพประกอบ 53 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 54 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 55 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ

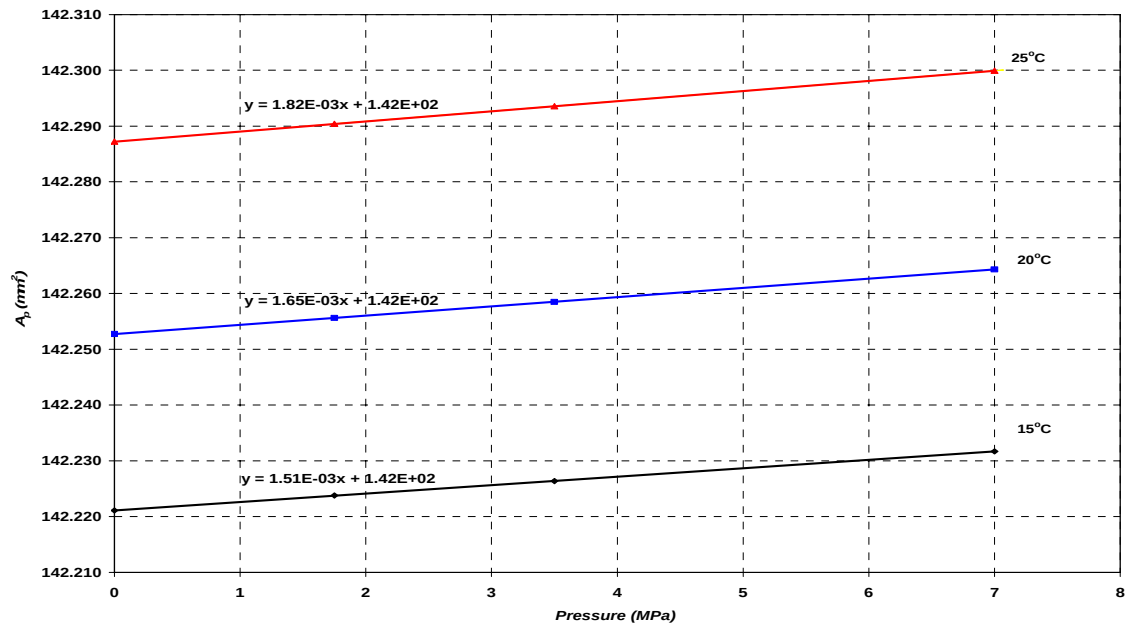
จากภาพประกอบ 53 ถึง 55 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสรุปได้ตามตาราง 11

ตาราง 11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข

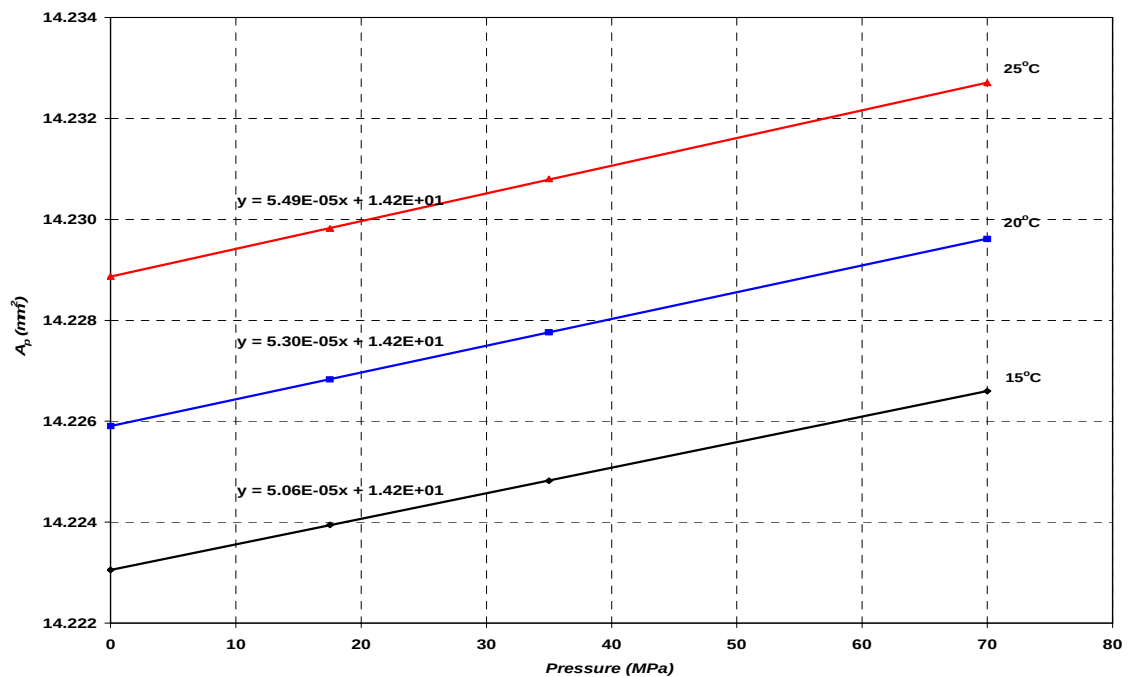
ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	15°C	20°C	25°C
0.7-7	$3.14 \cdot 10^{-6}$	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$3.38 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.39 \cdot 10^{-7}$	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$5.76 \cdot 10^{-7}$
14-140	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$7.50 \cdot 10^{-7}$

จากตาราง 11 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น โดยมีค่ามากที่สุด ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C และค่าน้อยที่สุด ณ อุณหภูมิ 15°C ในแต่ละช่วงความดัน

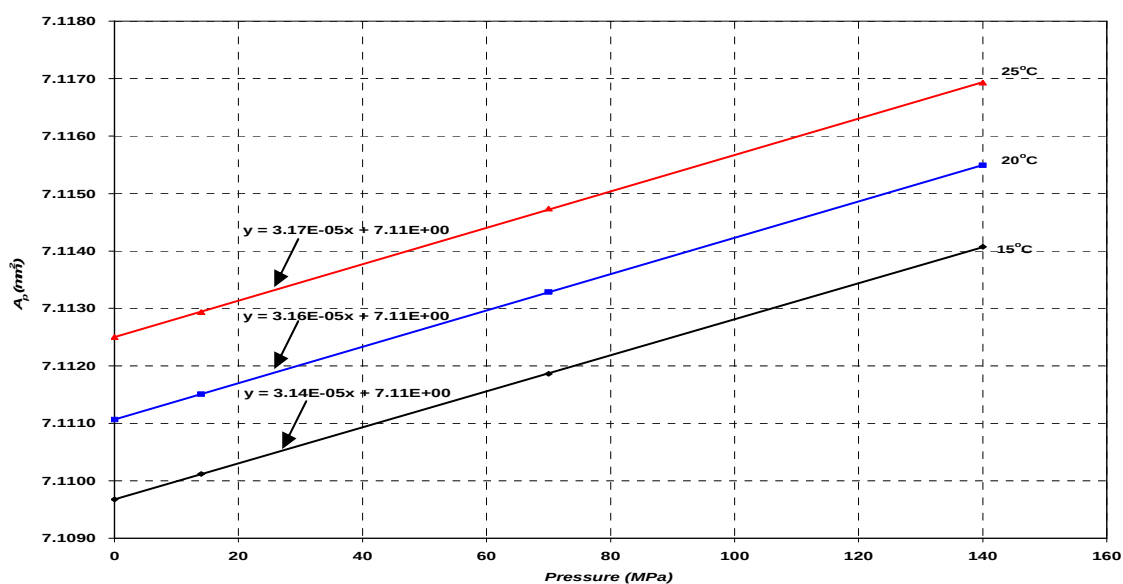
4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิอ้างอิง ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม ณ ความดันช่วงต่างๆ



ภาพประกอบ 56 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 57 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม ในช่วงความดัน 7-70 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 58 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม ในช่วงความดัน 14-140 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ

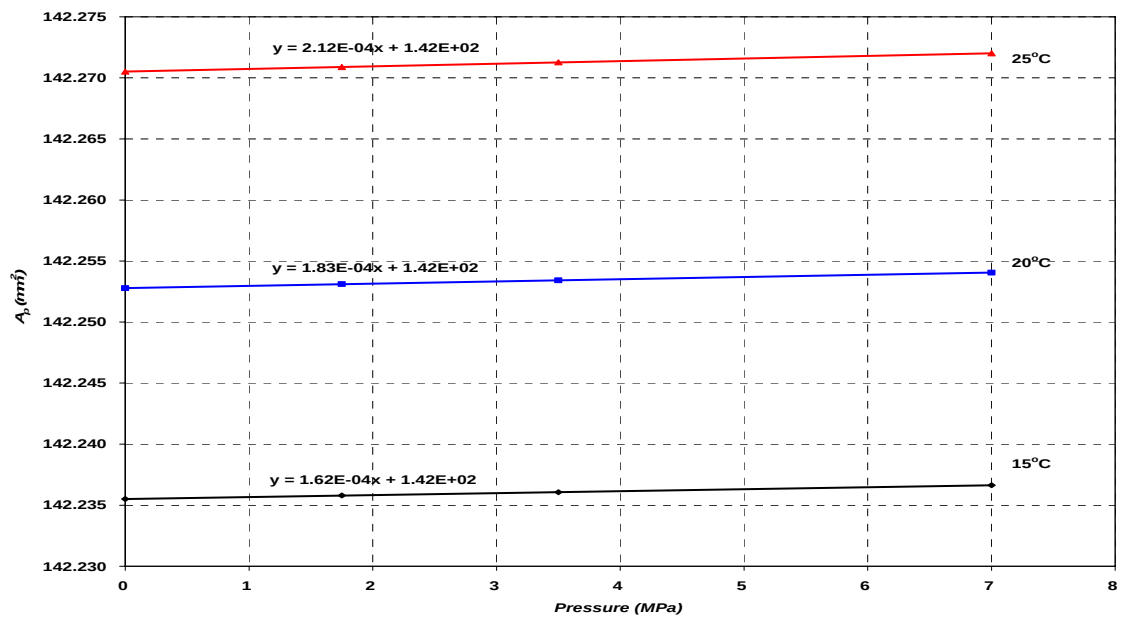
จากภาพประกอบ 56 ถึง 58 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อความดันมากขึ้น ในแต่ละช่วงความดัน โดยสามารถสรุปได้ตามตาราง 12

ตาราง 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข

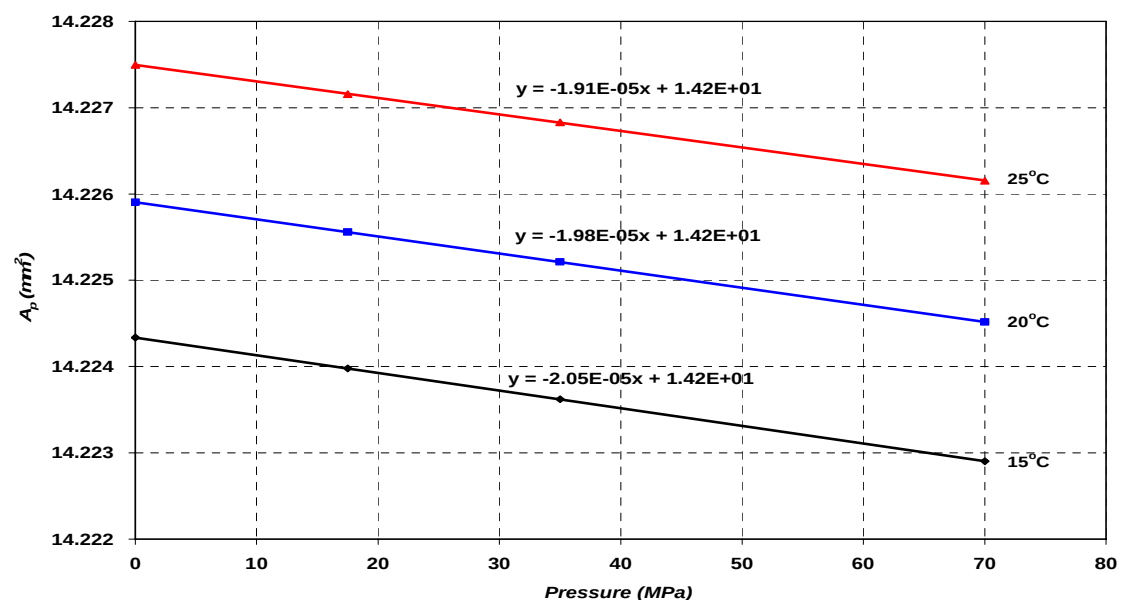
ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	15°C	20°C	25°C
0.7-7	$1.06 \cdot 10^{-5}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$
7-70	$3.56 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$3.86 \cdot 10^{-6}$
14-140	$4.41 \cdot 10^{-6}$	$4.45 \cdot 10^{-6}$	$4.45 \cdot 10^{-6}$

จากตาราง 12 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นแต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันในแต่ละช่วงความดัน โดยมีค่ามากที่สุด ณ อุณหภูมิ 25°C และมีค่าน้อยที่สุด ณ อุณหภูมิ 15°C ในแต่ละช่วงความดัน

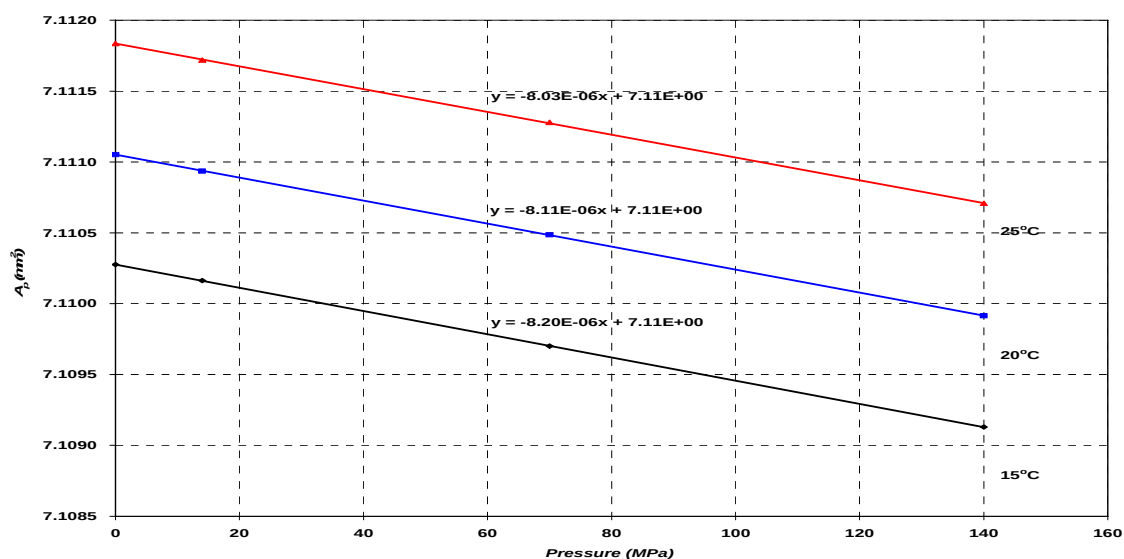
4.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิอ้างอิง ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ณ ความดันช่วงต่าง ๆ



ภาพประกอบ 59 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 60 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-70 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ



ภาพประกอบ 61 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมและ
ทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 14-140 MPa ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ

จากภาพประกอบ 59 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อความดันมากขึ้น ภาพประกอบ 60 ถึง 61 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบมีค่าไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อความดันมากขึ้น โดยสามารถสรุปได้ตามตาราง 13

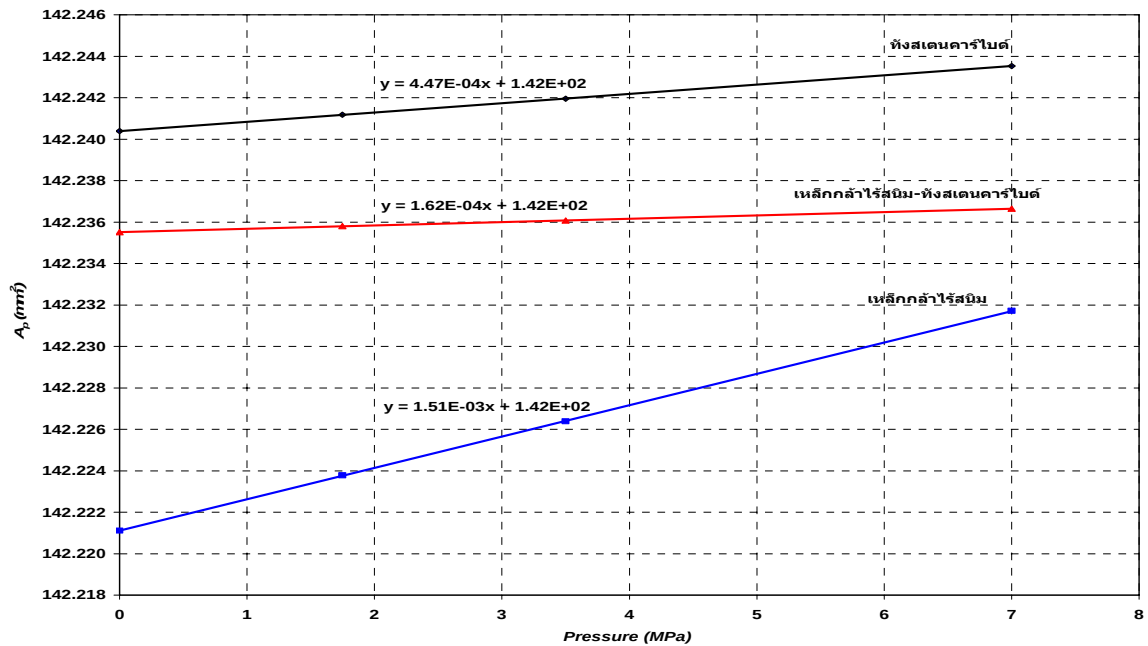
ตาราง 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด
ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิอ้างอิงต่างๆ จากวิธีเชิงตัวเลข

ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	15°C	20°C	25°C
0.7-7	$1.14 \cdot 10^{-6}$	$1.29 \cdot 10^{-6}$	$1.49 \cdot 10^{-6}$
7-70	$-1.44 \cdot 10^{-6}$	$-1.39 \cdot 10^{-6}$	$-1.34 \cdot 10^{-6}$
14-140	$-1.15 \cdot 10^{-6}$	$-1.14 \cdot 10^{-6}$	$-1.13 \cdot 10^{-6}$

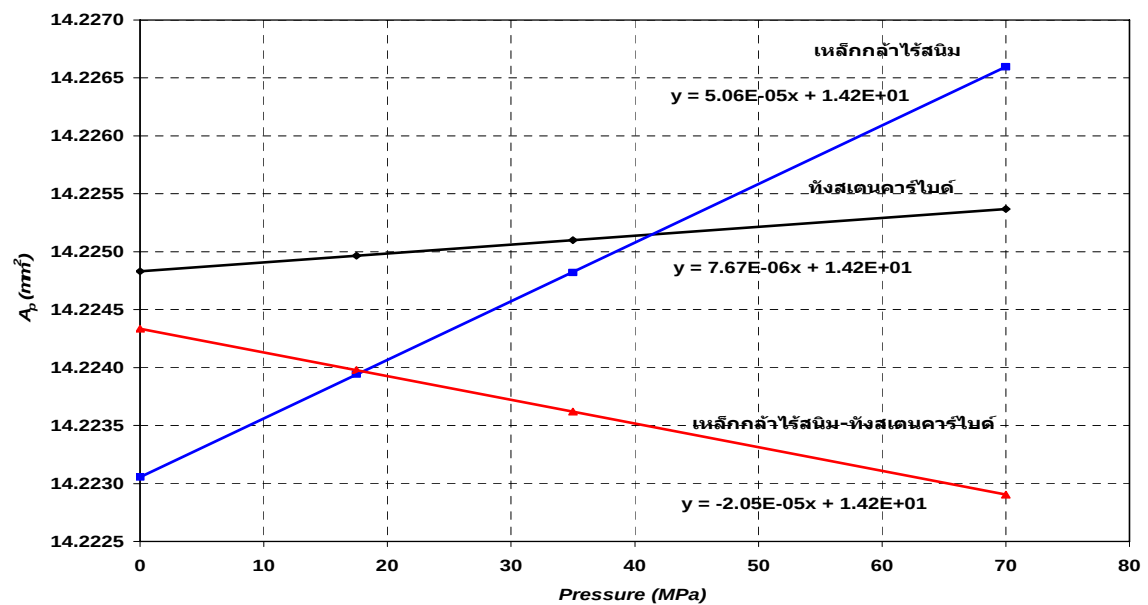
จากตาราง 13 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นในช่วงความดัน 0.7-7 MPa และมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นในช่วงความดัน 7-140 MPa

4.2.4 ผลกระทบของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C

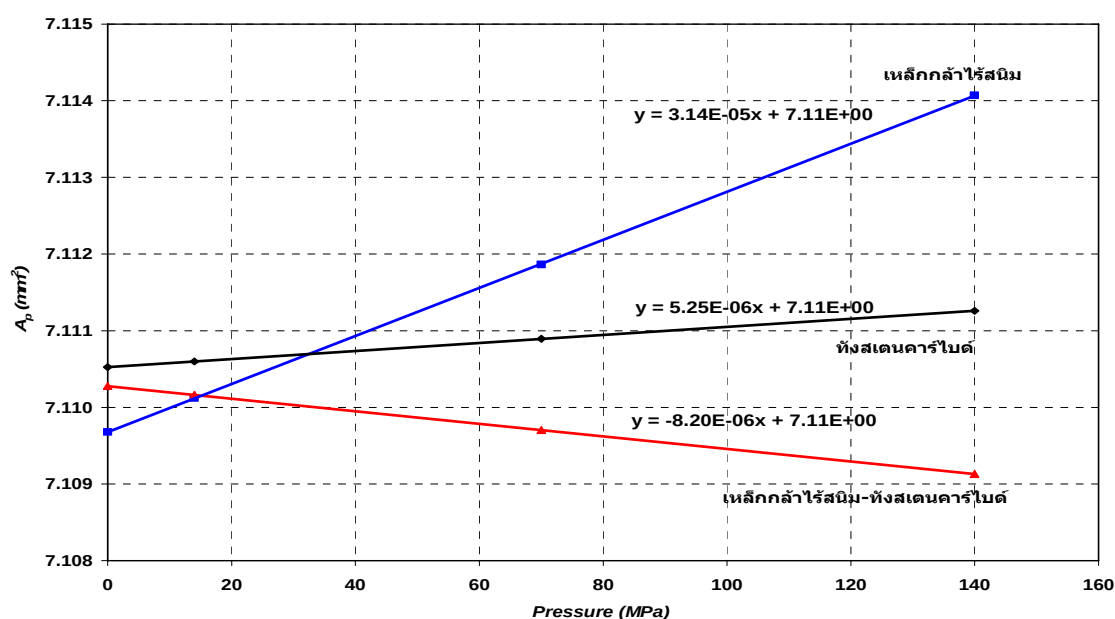
ณ ความดันช่วงต่าง ๆ



ภาพประกอบ 62 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa



ภาพประกอบ 63 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa



ภาพประกอบ 64 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C ในช่วงความดัน 14-140 MPa

จากภาพประกอบ 62 ถึง 64 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน ทุกๆ อุณหภูมิ และอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับความดันด้วยเช่นกัน โดยสามารถสรุปได้ตามตาราง 14

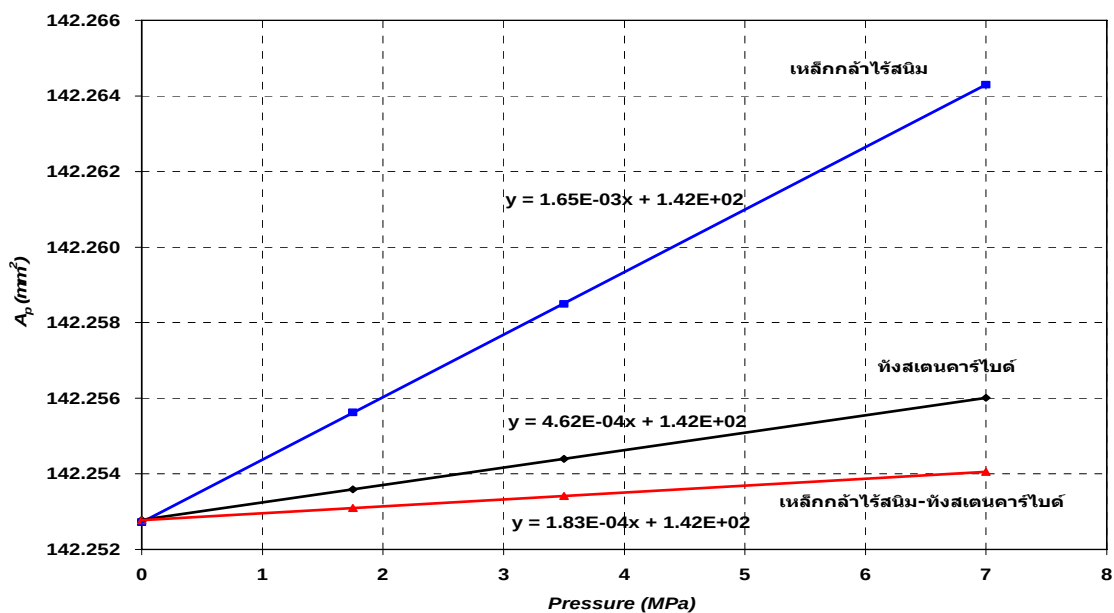
ตาราง 14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C จากวิธีเชิงตัวเลข

ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	ทังสเตนคาร์ไบด์- ทังสเตนคาร์ไบด์	เหล็กกล้าไร้สนิม -เหล็กกล้าไร้สนิม	เหล็กกล้าไร้สนิม - ทังสเตนคาร์ไบด์
0.7-7	$3.14 \cdot 10^{-6}$	$1.06 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.39 \cdot 10^{-7}$	$3.56 \cdot 10^{-6}$	$-1.44 \cdot 10^{-6}$
14-140	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$4.41 \cdot 10^{-6}$	$-1.15 \cdot 10^{-6}$

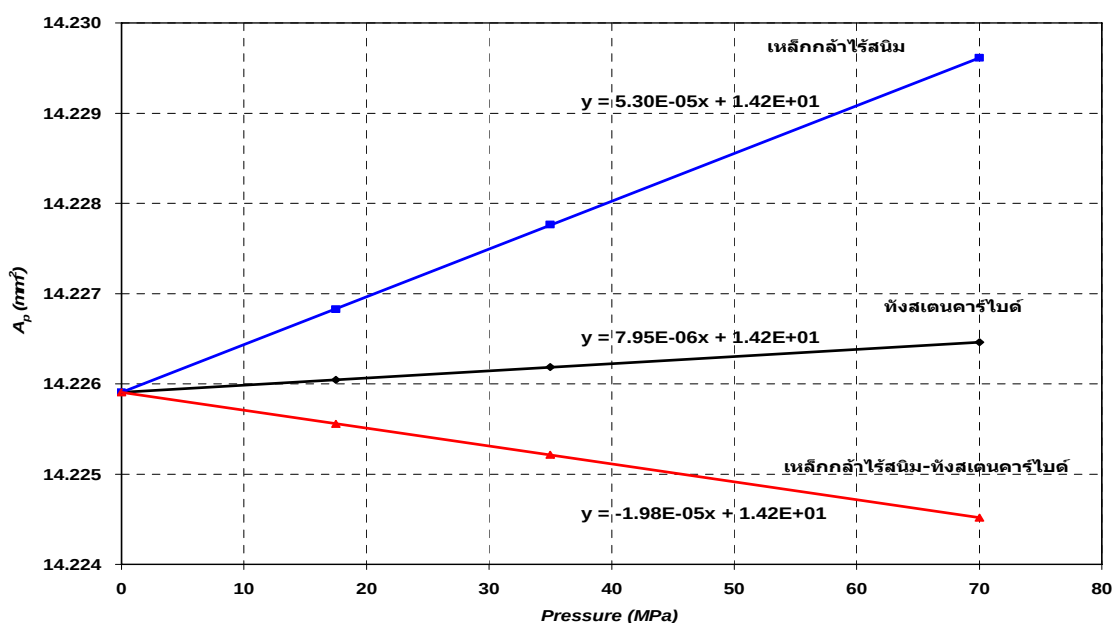
จากตาราง 14 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีค่ามากที่สุดในทุกช่วงความดัน ในช่วงความดัน 7-140 MPa ของวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa มีค่าน้อยที่สุด

4.2.5 ผลกระทบของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

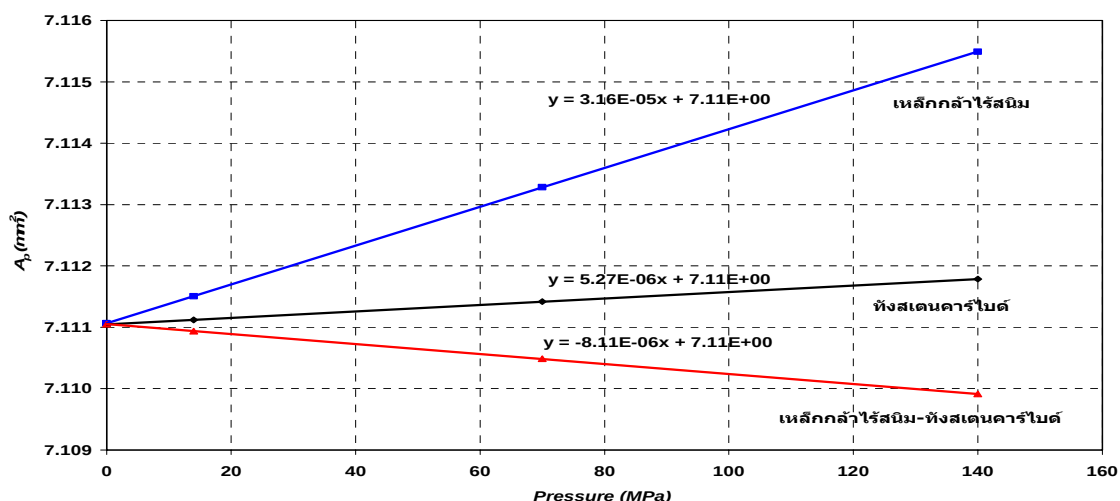
ณ ความดันช่วงต่าง ๆ



ภาพประกอบ 65 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa



ภาพประกอบ 66 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa



ภาพประกอบ 67 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ในช่วงความดัน 14-140 MPa

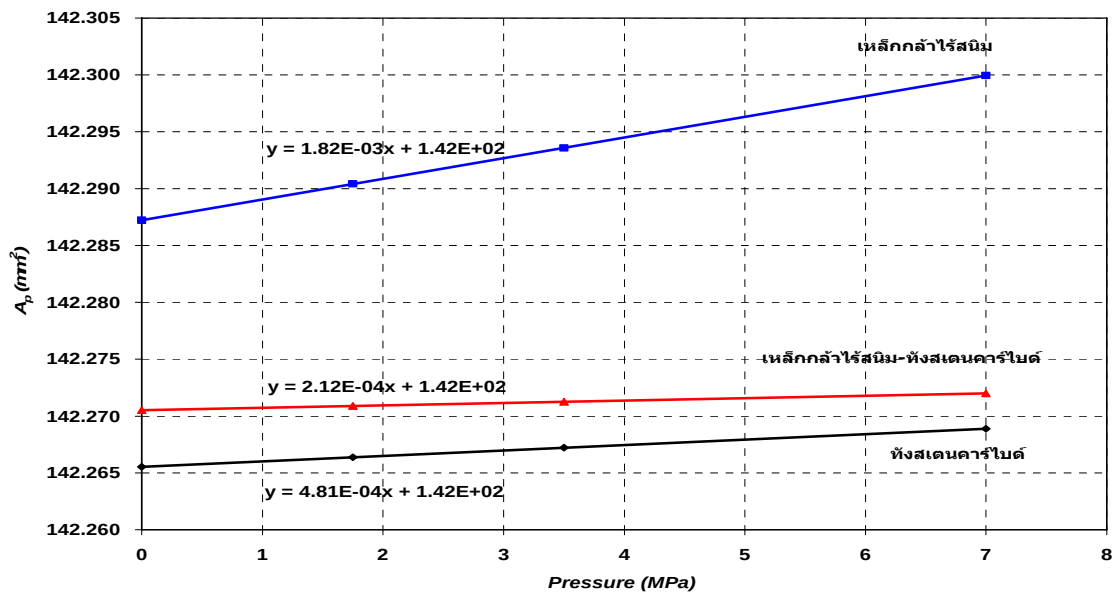
จากภาพประกอบ 65 ถึง 67 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน ทุกๆ อุณหภูมิ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับความดันด้วยเช่นกัน โดยที่วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่ามากที่สุด และทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุด และสามารถสรุปได้ตามตาราง 15

ตาราง 15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C จากวิธีเชิงตัวเลข

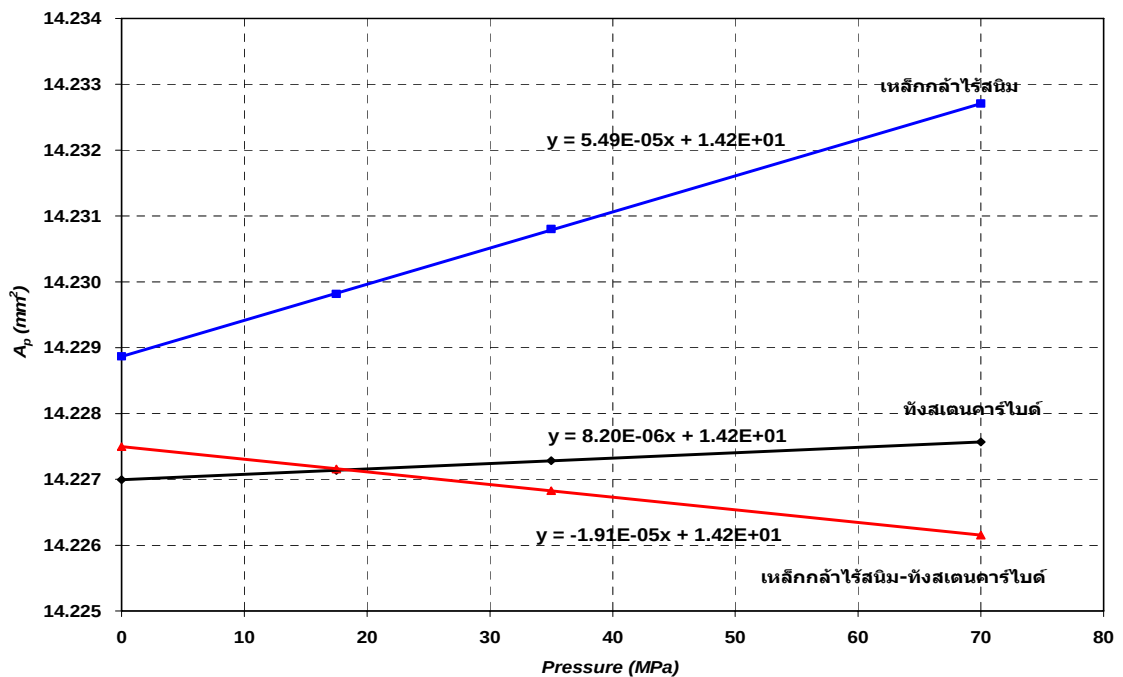
ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	ทังสเตนคาร์ไบด์- ทังสเตนคาร์ไบด์	เหล็กกล้าไร้สนิม -เหล็กกล้าไร้สนิม	เหล็กกล้าไร้สนิม - ทังสเตนคาร์ไบด์
0.7-7	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$-1.39 \cdot 10^{-6}$
14-140	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$4.45 \cdot 10^{-6}$	$-1.14 \cdot 10^{-6}$

จากตาราง 15 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีค่ามากที่สุดในทุกช่วงความดัน ช่วงความดัน 7-140 MPa ของวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดัน 7-140 MPa มีเครื่องหมายเป็นลบคือเมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบลดลง

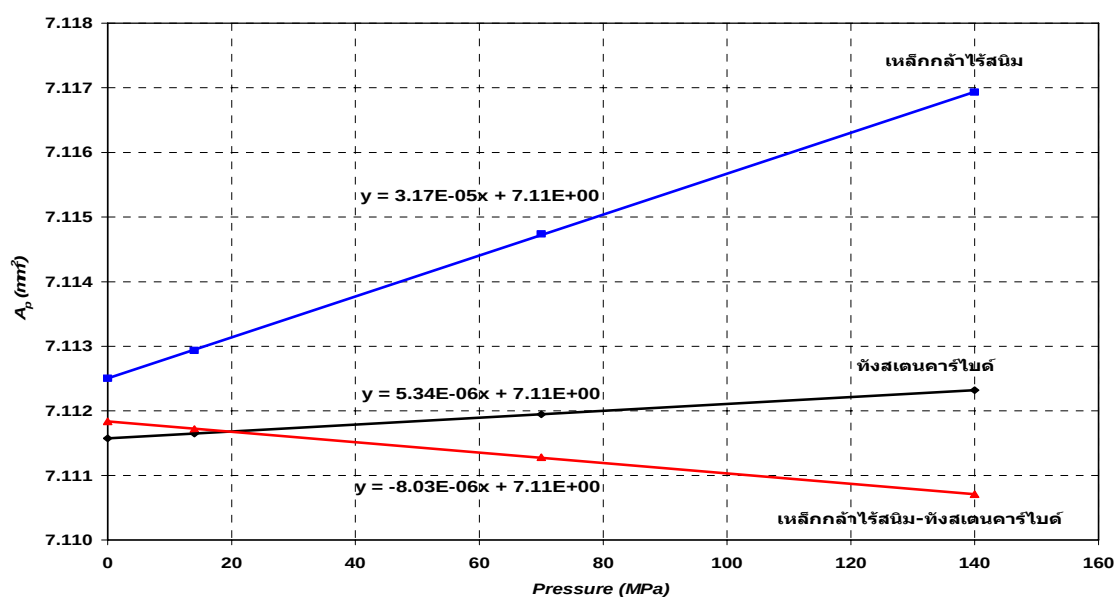
4.2.6 ผลกระทบของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่อุณหภูมิ อ้างอิง 25°C ณ ความดันช่วงต่าง ๆ



ภาพประกอบ 68 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ
อ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa



ภาพประกอบ 69 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิ
อ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 7-70 MPa



ภาพประกอบ 70 พื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C ในช่วงความดัน 14-140 MPa

จากภาพประกอบ 68 ถึง 70 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุต่างกัันมีค่าไม่เท่ากัน ทุกๆ อุณหภูมิ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับความดันด้วยเช่นกัน โดยที่วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่ามากที่สุด และทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุด และสามารถสรุปได้ตามตาราง 16

ตาราง 16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C จากวิธีเชิงตัวเลข

ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) (MPa ⁻¹)		
	ทังสเตนคาร์ไบด์-ทังสเตนคาร์ไบด์	เหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าไร้สนิม	เหล็กกล้าไร้สนิม-ทังสเตนคาร์ไบด์
0.7-7	$3.38 \cdot 10^{-6}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$	$1.49 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.76 \cdot 10^{-7}$	$3.86 \cdot 10^{-6}$	$-1.34 \cdot 10^{-6}$
14-140	$7.50 \cdot 10^{-7}$	$4.45 \cdot 10^{-6}$	$-1.13 \cdot 10^{-6}$

จากตาราง 16 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับทังสเตนคาร์ไบด์ มีค่าน้อยที่สุดในช่วงความดัน 0.7-7 MPa และทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุดในช่วงความดันตั้งแต่ 7-140 MPa และพบว่าค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่ามากที่สุดในทุกช่วงความดัน สำหรับความดัน 7-140 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทำจากวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิมกับ ทังสเตนคาร์ไบด์ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีเครื่องหมายเป็นลบคือเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบลดลง

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลข และศึกษาผลกระทบของวัสดุและอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ โดยอุณหภูมิอ้างอิง และวัสดุชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้คือ 15°C, 20°C และ 25 °C วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ สำหรับวิธีเชิงตัวเลข ตามลำดับ ที่ช่วงความดัน 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa และใช้โปรแกรม COSMOSWork 2004 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิจัยนี้ใช้ของเหลวเป็นน้ำมันไฮโดรลิก (diethyl-hexyl-sebacate (DHS)) โดยใช้พื้นฐานของการไหลในแนวแกน 1 มิติและเป็นการไหลแบบราบเรียบสำหรับวิธีเชิงตัวเลข และสภาวะแวดล้อมในการทดลอง คือ อุณหภูมิ (20±1) °C, ความชื้น (55±10) % และความดันบรรยากาศ (1,010 ±10) mbar ตามมาตรฐานสากล เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยจะติดตั้งกับเครื่อง Ruska 2485 จากประเทศสหรัฐอเมริกา

5.1 สรุปผล

5.1.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขที่อุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C ณ ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

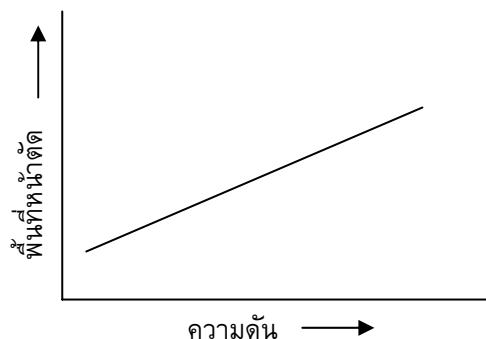
ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความดัน และจากวิธีเชิงตัวเลขพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มในแต่ละช่วงความดัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขมีแนวโน้มสอดคล้องกันมาก โดยมีความแตกต่างสูงสุดสำหรับทุกๆ อุณหภูมิคือ 9.74%, 9.10% และ 4.75% ของช่วงความดัน 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa ตามลำดับ

5.1.2 ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ที่เกิดจากอุณหภูมิอ้างอิง 15°C, 20°C และ 25°C และวัสดุที่สร้างจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข ณ ความดันช่วง ความดันช่วง 0.7-7 MPa, 7-70 MPa และ 14-140 MPa

ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน โดยมีค่าความแตกต่างมากที่สุดสำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเท่ากับ 29% และความแตกต่างน้อยที่สุดสำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 7.64% ในช่วงอุณหภูมิ 15°C ถึง 25°C และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ โดยมีความมากที่สุดสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ในทุกช่วงความดัน และมีค่าน้อยที่สุดสำหรับวัสดุที่เป็นทังสเตนคาร์ไบด์ ในช่วงความดันที่มากกว่า 7 MPa ขึ้นไป สำหรับชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับทังสเตนคาร์ไบด์ในช่วงความดันต่ำกว่า 7 MPa ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีค่าน้อยที่สุด

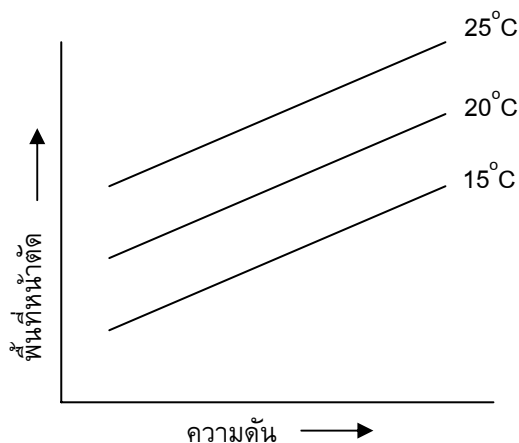
5.2 อภิปรายผล

การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของความดันกับพื้นที่หน้าตัด จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข เห็นได้ว่าชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุดที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดขึ้นอยู่กับความดันที่กระทำ คือเมื่อความดันที่กระทำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้นและเมื่อความดันที่กระทำน้อยลง จะเป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นลักษณะทั่วๆ ไปของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา (simple type) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากความดันที่กระจายตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของลูกสูบและกระบอกสูบ ตลอดช่วงความยาวที่ใช้งานของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทั้ง 3 ชุด ดังนั้นเมื่อความดันที่กระทำที่ปลายด้านล่างของลูกสูบและกระบอกสูบเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ความดันที่กระจายตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของลูกสูบและกระบอกสูบเพิ่มมากขึ้นไปด้วย เมื่อความดันมากจะทำให้ลูกสูบหดตัวมากและกระบอกสูบขยายตัวมากขึ้นไปด้วย ดังภาพประกอบ 71



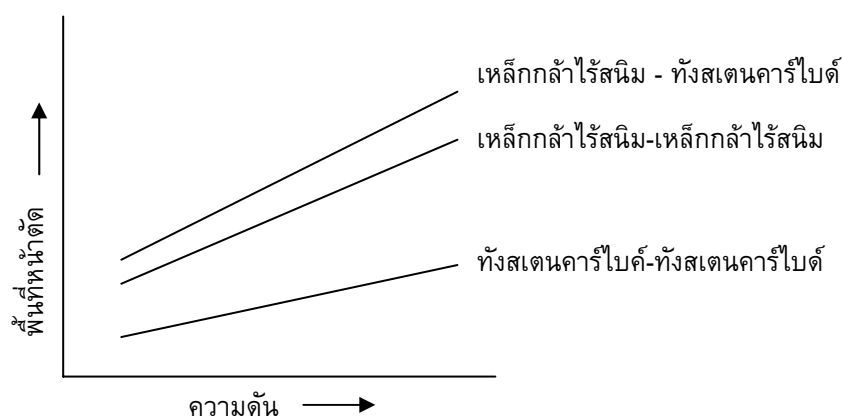
ภาพประกอบ 71 ผลของความดันที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้จะเท่ากันตลอดทั้งลูกสูบและกระบอกสูบ จึงเป็นผลให้สมบัติต่างๆ ที่มีผลกระทบบกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของลูกสูบและกระบอกสูบเปลี่ยนแปลงเท่ากันตลอดตามไปด้วย ดังภาพประกอบ 72



ภาพประกอบ 72 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

วัสดุมีความสำคัญอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบเนื่องจากในแต่ละวัสดุมีสมบัติทางกลต่างกันอย่างเช่น ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus, E) และค่าอัตราส่วนของปัวซองต์ (Poisson's ratio, ν) ซึ่งทั้งสองค่ามีผลต่อการบิดเบี้ยวของลูกสูบและกระบอกสูบ ดังภาพประกอบ 73



ภาพประกอบ 73 ผลของวัสดุต่อพื้นที่หน้าตัดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.3.1.1 เงื่อนไขขอบเขตของการติดตั้งกระบอกสูบมีความสำคัญมากและจะต้องให้มีความสอดคล้องกันมากที่สุดระหว่างการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

5.3.1.2 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบมีผลกระทบต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันสำหรับวิธีเชิงตัวเลข ดังนั้นจะต้องทราบค่าดังกล่าวอย่างถูกต้อง

5.3.1.3 จำนวนเอลิเมนต์มีผลกับความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน

5.3.1.4 ช่วงความดันต่ำกว่า 7 MPa เป็นช่วงความดันที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยที่สุดสำหรับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์

5.3.1.5 ช่วงความดันตั้งแต่ 7 MPa เป็นช่วงความดันที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยที่สุดสำหรับวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัย

การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ มีพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลหลายอย่าง และการวิเคราะห์ต้องมีความถูกต้องและตรงกับเงื่อนไขจริงของการใช้งาน จึงขอเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป ดังนี้

5.3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรวิเคราะห์ทั้งปัญหาการไหลและปัญหาทางโครงสร้าง

5.3.2.2 ควรใช้ของไหลประเภทอื่นนอกเหนือจากที่ใช้ในการวิจัย

5.3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรมีการเปรียบเทียบโปรแกรมที่นอกเหนือจากโปรแกรม COSMOSWork 2004 เช่น โปรแกรม ANSYS เป็นต้น

5.3.2.4 ควรสร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa และวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ในช่วงความดัน 7-140 MPa

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- Robert S., Dadson, Sylvia L. Lewis, Graham N. Peggs., (1982). *The Pressure Balance Theory and Practice*, LONDON.
- John KL Man., (2003). *Pressure Measurement*, National Measurement Laboratory, Australia.
- European cooperation for Accreditation of Laboratories, (1997). *Calibration of Pressure Balance*, EA-4/17.
- G.F. Molinar, R. Maghenzani, P. C. Cresto and L. Bianchi, (1992). *Elastic Distortions in Piston-Cylinder Units at Pressure up to 0.5 GPa*, Metrologia 1992.
- G. Molinar, W. Sabuga, G. Robinson and J. C. Legras, (1998). *Comparison of methods for calculating distortion in pressure balances up to 400 MPa*, Metrologia.
- Wladimir Sabuga, Otto Jusko, (2003). *The effect of PCU Geometry on the Pressure Distortion Coefficient of Pressure Balance*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, IMEKO.
- N. Bonora, G. Buonanno, M. Dell' Isola, G Givinco, (2003). *The Piston Distortion Coefficient of Clearance Controlled Pressure Balance Evaluated by Using An Analytical Method*, Universita di Cassino, School of Engineering, via Di Biasio, France, IMEKO.
- W.Sabuga, M.Bergoglio, G.Buonanno, J.C.Legras, L.Yagmur, (1998). *Calculation of the Distortion Coefficient and Associated Uncertainty of a PTB 1 GPa Pressure Balance Using Finite Element Analysis*, EUROMET Project 463.
- TJ Esward, R C Preston and P N Gelat, (2003). *Piston-cylinder pressure balance design with a negligible distortion coefficient*, National Physical Laboratory, United Kingdom, Measurement Science And Technology.
- N.D. Samaan and F. Abdullah, (1998). *Computer-aided Modelling of Pressure Balances*, School of Electronic Engineering, University of South Australia, Australia, Metrologia.
- A Report of ASME, (1953). *VISCOSITY AND DENSITY OF OVER 40 LUBRICATING FLUIDS OF KNOWN COMPOSITION AT PRESSURE TO 150000 PSI AND TEMPERATURE TO 425 F*, The American Society of Mechanical Engineers.
- Wladimir Sabuga, Otto Jusko, (1999). *Effective area of the DH Instruments piston-cylinder, piston P0107 and cylinder C0107, calculated from the dimensional measurement data*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

GF. Molinar, (1998). *Density and dynamic viscosity versus pressure, up to 1 GPa, for the Di(2)-ethyl-hexyl-sebacate fluid at 20°C*, CNR-Instituto di Metriologia “ G. Colonnetti”, Italy.

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก ใบรับรองผลการสอบเทียบเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน
- ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณและตารางผลการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข
- ภาคผนวก ค ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง
- ภาคผนวก ง สมบัติของน้ำมันและวัสดุ
- ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมล้านนา ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 8-9 สิงหาคม 2550 จ.เชียงใหม่จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (สาขาภาคเหนือ)
- ภาคผนวก ฉ คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

ภาคผนวก ก

ใบรับรองผลการสอบเทียบเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน

93303 Aubervilliers Cedex
FRANCE
Tel : 33 (0)1 48 39 83 00
Fax : 33 (0)1 48 33 65 90
www.dh-budenberg.com

ACCREDITATION N° 2-1033
ACCREDITATION N° 2-1033

Commande n° 050543
Purchase order

CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE

CALIBRATION CERTIFICATE

N° 18794

DELIVRE A : NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY
ISSUED FOR (THAILAND)
BANGKOK - THAILAND

INSTRUMENT ETALONNE
CALIBRATED INSTRUMENT

Désignation : Ensemble piston-cylindre pour BALANCE MANOMETRIQUE
K_n théorique = 5 bar/kg, Classe S2
Designation Piston-cylinder for PRESSURE BALANCE
theoretical K_n = 5.00 bar/kg, S2 class

Constructeur : DH-Budenberg SA
Manufacturer

Type : Huile
Type Oil

N° de série : 9195
Serial number

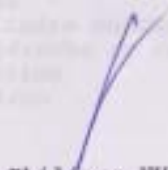
N° d'identification :
Identification number

Ce certificat comprend 12 pages
This certificate includes 12 pages

Date d'émission : 14/12/2005
Date of issue

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE
THE HEAD OF THE LABORATORY





Philippe HUGOT



LA REPRODUCTION DE CE CERTIFICAT N'EST AUTORISÉE QUE
SOUS LA FORME DE FAC-SIMILE PHOTOGRAPHIQUE INTÉGRAL

ภาพประกอบ 74 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18794 ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์
มาตรฐาน ในช่วงความดัน 0.5-50 MPa จากบริษัท DH-budenberg ประเทศฝรั่งเศส

33000 AUBERGERIES CEDEX
 FRANCE
 Tél : 33 (0)1 48 39 83 00
 Fax : 33 (0)1 48 33 65 90
 www.dh-budenberg.com

ACCREDITATION N° 2-1033
 ACCREDITATION N° 2-1033

Commande n° 050543
 Purchase order

CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE
 CALIBRATION CERTIFICATE
 N° 18792

DELIVRE A : NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY
ISSUED FOR (THAILAND)
 BANGKOK - THAILAND

INSTRUMENT ETALONNE
 CALIBRATED INSTRUMENT

Désignation : Ensemble piston-cylindre pour BALANCE MANOMETRIQUE
 K_n théorique = 10 bar/kg, Classe S2
Designation Piston-cylinder for PRESSURE BALANCE
 theoretical K_n = 10.00 bar/kg, S2 class

Constructeur : DH-Budenberg SA
 Manufacturer

Type : Huile
 Type Oil
N° de série : 9194
 Serial number
N° d'identification :
 Identification number

Ce certificat comprend 12 pages
 This certificate includes 12 pages
 Date d'émission : 16/12/2005
 Date of issue

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE
 THE HEAD OF THE LABORATORY



 Philippe HUGOT



LA REPRODUCTION DE CE CERTIFICAT N'EST AUTORISÉE QUE
 SOUS LA FORME DE FAC-SIMILE PHOTOGRAPHIQUE INTÉGRAL

ภาพประกอบ 75 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข 18792 ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์
 มาตรฐาน ในช่วงความดัน 1-10 MPa จากบริษัท DH-budenberg ประเทศฝรั่งเศส

un progrès, une passion le partage

LABORATOIRES DE PARIS
1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris Cedex 15
Tél. : 01 40 43 37 00 - Fax : 01 40 43 37 37

Commande : 250681 du 09/12/2005
Purchase Order

CERTIFICAT D'ETALONNAGE
CALIBRATION CERTIFICATE

N° F120458 / 1

DELIVRE A : **NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY**
ISSUED FOR **BANGKOK**
THAILAND

INSTRUMENT ETALONNE
CALIBRATED INSTRUMENT

Désignation : **ENSEMBLE PISTON-CYLINDRE**
Designation : **PISTON-CYLINDER ASSEMBLY**

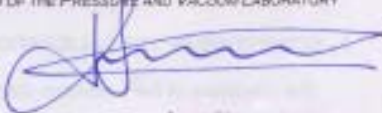
Constructeur : **DESGRANGES ET HUOT**
Manufacturer :

Type : **50 bar/kg**
Type :

N° de série : **9193/9193**
Serial number :
N° d'identification :
Identification number :
Date d'émission : **21 décembre 2005**
Date of issue :

Ce certificat comprend 17 pages
This certificate includes pages

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE PRESSION-VIDE
THE HEAD OF THE PRESSURE AND VACUUM LABORATORY


Jean-Claude LEGRAS


COFRAC
Accréditation
N° 3-37
Presse disponible
on www.cofrac.fr

La reproduction de ce certificat n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral
This certificate may not be reproduced other than in full by photographic process

333HP0502-01_Bal section rév. B

Laboratoire national de métrologie et d'essais
Établissement public à caractère industriel et commercial • Siège social : 1, rue Gaston Boissier 75724 Paris Cedex 15 • Tél. : 01 40 43 37 00
Fax : 01 40 43 37 37 • E-mail : info@lne.fr • Internet : www.lne.fr • Siret : 313 320 244 00012 • NAF : 743 B • TVA : FR 92 313 320 244
Banque Paribas Citibank IBAN : FR76 3058 8600 0149 7267 4010 170 BIC : BARCFRPP

ภาพประกอบ 76 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข F120458/1 ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์
มาตรฐาน ในช่วงความดัน 50-500 MPa จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศฝรั่งเศส



National Institute of Metrology (Thailand)
Ministry of Science and Technology

Certificate of Calibration

Certificate No. : MP-06-034

Issued by : Pressure Laboratory, Mechanical Metrology Department

Page 1 of 4 Pages

Object : Mass Set for Pressure Balance

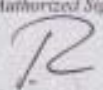
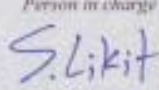
Manufacturer : DH-Budenberg

Type : -

Serial No. : 4289 (Mass set)
4290 (Bell)
9193, 9194, 9195 (Piston)

Customer : Pressure Laboratory
National Institute of Metrology (Thailand)
3/5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%.

Reference	Date	Authorized Signatory	Person in charge
CSR No. 1-06-168	11.08.2006	 (Tawat Changpan)	 (Likit Sainoo)

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the Director of National Institute of Metrology (Thailand).

National Institute of Metrology (Thailand), 3/5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand
Telephone (66) 2577-5100, Fax (66) 2577-3658

ภาพประกอบ 77 ใบรับรองผลการสอบเทียบหมายเลข MP-06-0034 ของแผ่นน้ำหนักเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณและตารางผลการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

(ก) ตัวอย่างการคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ที่ความดันประมาณ 2.1 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้ในการทดลอง ในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ณ อุณหภูมิ 20°C

ตาราง 17 แสดงตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองที่ความดันประมาณ 2.1 MPa

Nominal pressure MPa	P_{atm} mbar	t_{atm} °C	H %	t_{std} °C	t_{unc} °C	Trim mass g	Plate No.
2.1	1006.5	19.7	57.5	20.3	19.8	166.050	2-1, 1, 0.2-1

1. คำนวณค่าความดัน (P) ของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน จากสมการที่ 12

$$P = \frac{\sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) + (v_1 - v_2)(\rho_f - \rho_a)g + \pi D \sigma}{A_{0,20}(1 + \lambda P') [1 + \alpha_p + \alpha_c](t - 20)}$$

1.1 มวลของแผ่นน้ำหนัก (2-1, 1 และ 0.2-1) ลูกสูบ (9195) และ bell หาค่าได้จากตารางที่ 3 ดังนี้

$$\begin{aligned}\sum m_i &= 2.000008 + 1.000003 + 0.1999998 + 0.1999993 + 0.8000072 \\ &= 4.200019 \text{ kg}\end{aligned}$$

1.2 อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) ที่สถาบันมาตรวิทยา (ปทุมธานี)

$$g = 9.78312 \text{ m s}^{-2}$$

1.3 ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a) หาค่าได้จากสมการ ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}\rho_a &= \frac{(0.34848 \times P_{atm} - 0.009024 \times H \times e^{(0.0612 \times t_{atm})})}{(273.15 + t_{atm})} \\ &= \frac{(0.34848 \times 1006.5 - 0.009024 \times 57.5 \times e^{(0.0612 \times 19.7)})}{(273.15 + 19.7)} \\ &= 1.19178 \text{ kg m}^{-3}\end{aligned}$$

1.4 ความหนาแน่น (ρ_{mi}) ของแผ่นน้ำหนัก ลูกสูบ และ bell ได้มาจากตารางที่ 3 คือ

$$\rho_{mi} = 7920 \text{ kg m}^{-3}$$

1.5 แรงที่เกิดจากปริมาตรของของไหล (v_1 และ v_2) ที่กระทำกับลูกสูบแบบธรรมดา คือ

$$v_1 = v_2 = 0 \text{ ดังนั้นในสมการ } (v_1 - v_2) \times g \times (\rho_f \rho_d) = 0$$

1.6 แรงดึงผิวที่กระทำกับเส้นรอบวงของลูกสูบ หาค่าได้จากสมการที่ 7 คือ

$$F_{c3} = \pi D \sigma$$

เมื่อ D = เส้นรอบวงของลูกสูบเท่ากับ $\sqrt{\left(\frac{4 \times A_{0.20}}{\pi}\right)}$; $A_{0.20}$ ได้มาจากตาราง 2

ดังนั้น

$$\pi D \sigma = \pi \times \sqrt{\left(\frac{4 \times 1.961062 \times 10^{-5}}{\pi}\right)} \times 0.031 = 0.000487 \text{ N}$$

1.7 พื้นที่หน้าตัด ($A_{0.20}$) ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 20°C ได้จากตาราง 2

$$A_{0.20} = 1.961062 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

1.8 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบมาตรฐาน ได้จากตารางที่ 2

$$\lambda = 7.0 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$$

1.9 ความดันประมาณ (P') หาค่าจากสมการที่ 13 คือ

$$P' = \frac{\sum m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right)}{A_{0.20}}$$

$$P' = \frac{4.200019 \times 9.78312 \times \left(1 - \frac{1.19178}{7920}\right)}{1.961062 \times 10^{-5}}$$

$$P' = 2.094942 \text{ MPa}$$

1.10 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของลูกสูบ (α_p) และกระบอกสูบ (α_c) หาได้จากตารางที่ 2 คือ

$$\alpha_p + \alpha_c = 9.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

1.11 อุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบของเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน ได้มาจากตาราง 17 คือ

$$t_{std} = 20.30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

แทนค่าจาก 1.1 ถึง 1.10 ในสมการที่ 12 จะได้

$$P = 2.094963 \text{ MPa}$$

2. คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลองจากความสัมพันธ์ของความดันจากเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐานเท่ากับความดันจากเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลอง และความดันจากเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ทดลองหาได้จากสมการที่ 12 ดังนั้น

$$A_p = \frac{\sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) + (v_1 - v_2)(\rho_f - \rho_a)g + \pi D \sigma}{P[1 + \alpha_p + \alpha_c](t - 20)}$$

คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) ตลอดช่วงความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่พิจารณา ดังนั้นได้ผลการทดลองตามตาราง 26

3. คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัด ($A_{0,20}$) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) โดยใช้สมการที่ 9 คือ

$$A_p = A_{0,20}(1 + \lambda P)$$

จากการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ระหว่างพื้นที่หน้าตัด (A_p) กับความดัน (P) ดังนั้นทำให้สามารถหาค่าได้ดังนี้คือ

$$A_{0,20} = 142.2502 \text{ mm}^2$$

$$\lambda = 3.08 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$$

(ข) ตัวอย่างการคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) ที่ความดัน 7 MPa ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้ในวิธีเชิงตัวเลขในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ณ อุณหภูมิ 20°C

ตาราง 18 แสดงการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบสำหรับวิธีเชิงตัวเลข

Position (Z)	r	R	l
mm	mm	mm	mm
21.6	6.727818	6.730053	28.3
0	6.727828	6.730227	

1. คำนวณค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) ของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง จากสมการที่ 62 คือ

$$A_p = \pi r_0^2 \left\{ 1 + \frac{h_p(0)}{r_p(0)} + \frac{l}{r_p(0)(p_1 - p_2)} \int_0^l (p - p_2) \frac{d}{dz}(u + U) dz \right\}$$

1.1 รัศมีของลูกสูบที่ตำแหน่งล่างสุด ($Z=0$) ที่พิจารณา คือ

$$r_0 = 6.727872 \text{ mm}$$

1.2 ช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบที่ตำแหน่ง $Z = 0$ หาได้จากสมการที่ 59 คือ

$$h_p(0) = R_p(0) - r_p(0)$$

เมื่อ $R_p(0) = R_0 - U$ และ $r_p(0) = r_0 - u$

เมื่อ U คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบอกสูบซึ่งหาค่าจากผลของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.0000464 mm

และ u คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของลูกสูบซึ่งหาค่าจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ -0.000003 mm

ดังนั้น

$$R_p(0) = 6.730227 - 0.0000464 = 6.7301806 \text{ mm}$$

$$r_p(0) = 6.727828 - (-0.000003) = 6.727830 \text{ mm}$$

เพราะฉะนั้น

$$h_p(0) = 6.7301806 - 6.727830 = 0.0023496 \text{ mm}$$

1.3 ความดันที่ต้องการวัด (p_1) และความดันอ้างอิง (p_2) คือ

$$p_1 = 7 \text{ MPa} \text{ และ } p_2 = 0 \text{ MPa}$$

ดังนั้น

$$p_1 - p_2 = 7 \text{ MPa}$$

1.4 ความดันที่กระจายตัว (p) ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ หาค่าได้จากสมการ 44 คือ

$$p = p_1 - (p_1 - p_2) \frac{\int_0^z \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z) h_p^3(z)} dz}{\int_0^l \frac{\mu_p(z)}{\rho_p(z) h_p^3(z)} dz}$$

1.4.1 คำนวณค่าความหนืด (ρ_p) ที่ตำแหน่ง $Z = 21.6$ ตามสมการในภาพประกอบ 78

$$\rho_p(21.6) = -2.07533 \times 10^{-4} p^2 + 2.48874 \times 10^{-1} p + 916.064$$

1.4.2 คำนวณค่าความหนืด (μ_p) ที่ตำแหน่ง $Z = 21.6$ ตามสมการในภาพประกอบ 79

$$\mu_p(21.6) = -6.05385 \times 10^{-11} p^4 + 3.07066 \times 10^{-8} p^3 - 1.36022 \times 10^{-6} p^2 + 2.57742 \times 10^{-4} p + 2.2224 \times 10^{-2}$$

จากสมการในข้อ 1.4.1 และ 1.4.2 เห็นได้ว่าความหนาแน่นและความหนืดมีความสัมพันธ์กับความดันที่กระจายตัวในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ดังนั้นต้องทำการลองผิดลองถูกจนกระทั่งความดันสุดท้ายที่ได้กับความดันที่ใช้หาค่าความหนาแน่นและความหนืดมีความสอดคล้องกัน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม VBA ใน Microsoft Excel ดังนั้นได้

$$p = 2.2336431 \text{ MPa}$$

หาค่าต่างๆ จากข้อ 1.1-1.4 ตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่พิจารณาซึ่งจะได้ค่าตามตารางที่ 21 และแทนค่าในสมการ 62 ดังนั้นจะได้ค่าพื้นที่หน้าตัด (A_p) คือ

$$A_p = 142.2560 \text{ mm}^2$$

คำนวณค่าตามข้อ 1 และ 2 ตลอดช่วงความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ซึ่งในการวิจัยนี้กระทำทั้งหมด 3 จุดของความดัน ตามตัวอย่างในตาราง 20 ถึง 22

3. คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัด ($A_{0,20}$) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) โดยใช้สมการที่ 9 คือ

$$A_p = A_{0,20} (1 + \lambda P)$$

จากการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ระหว่างพื้นที่หน้าตัด (A_p) กับความดัน (P) ดังนั้นทำให้สามารถหาค่าได้ดังนี้คือ

$$A_{0,20} = 142.2528 \text{ mm}^2$$

$$\lambda = 3.25 \times 10^{-6} \text{ MP}$$

ตาราง 19 แสดงผลการทดลองของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่ อุณหภูมิ
อ้างอิง 20°C

Pressure STD. kPa	Mass UUC g	P _{atm} bar	t _{room} °C	H %	ρ _a kg m ⁻³	ρ _r kg m ⁻³	F _b m N	Force m N	t _{UUC} °C	Eff. Force m N	A _p mm ²
2094.9633	30461.605	1.007	19.7	57.5	1.19178	916.3479	0.29304	298009.67	19.80	298009.959	142.250941
2094.9633	30461.680	1.007	19.7	57.5	1.19178	916.3479	0.29304	298010.40	19.77	298010.693	142.251330
2094.9633	30461.655	1.007	19.7	57.5	1.19178	916.3479	0.29304	298010.15	19.80	298010.448	142.251174
2094.9633	30461.630	1.007	19.7	57.5	1.19178	916.3479	0.29304	298009.91	19.80	298010.203	142.251057
2094.9633	30461.580	1.007	19.7	57.5	1.19178	916.3479	0.29304	298009.42	19.80	298009.714	142.250824
2793.2673	40615.406	1.007	19.6	57.5	1.19270	916.5302	0.29304	397345.56	19.80	397345.855	142.251543
2793.2691	40615.339	1.010	19.6	57.5	1.19579	916.6136	0.29304	397344.91	19.77	397345.208	142.251257
2793.2699	40615.381	1.007	19.6	57.5	1.19270	916.6064	0.29304	397345.32	19.79	397345.610	142.251333
2793.2688	40615.412	1.006	19.6	59.5	1.19154	916.5632	0.29304	397345.62	19.73	397345.914	142.251575
2793.2690	40615.395	1.008	19.4	59.5	1.19469	916.5992	0.29304	397345.46	19.79	397345.753	142.251433
3491.5756	50769.209	1.008	19.7	57.5	1.19309	916.7124	0.29304	496681.49	19.80	496681.779	142.251735
3491.5775	50769.240	1.010	19.5	58.5	1.19614	916.7864	0.29304	496681.78	19.78	496682.074	142.251768
3491.5793	50769.283	1.007	19.5	59.0	1.19335	916.8008	0.29304	496682.20	19.74	496682.496	142.251865
3491.5774	50769.247	1.007	19.8	59.0	1.19118	916.7360	0.29304	496681.85	19.75	496682.145	142.251828
3491.5746	50769.234	1.010	19.4	59.0	1.19701	916.7288	0.29304	496681.73	19.85	496682.018	142.251780
4189.8816	60923.085	1.008	19.7	57.5	1.19404	916.9035	0.29304	596018.12	19.80	596018.409	142.252109
4189.8842	60923.095	1.010	19.4	57.5	1.19668	916.9807	0.29304	596018.21	19.79	596018.501	142.252054
4189.8816	60923.085	1.008	19.7	57.5	1.19404	916.9035	0.29304	596018.12	19.80	596018.409	142.252109
4189.8840	60923.118	1.006	19.9	59.0	1.18990	916.9087	0.29304	596018.43	19.75	596018.726	142.252165
4189.8796	60923.063	1.010	19.4	59.5	1.19696	916.8943	0.29304	596017.89	19.87	596018.186	142.252034
4888.1868	71076.944	1.009	19.8	57.5	1.19407	917.0834	0.29304	695354.58	19.80	695354.873	142.252365
4888.1896	71076.891	1.010	19.4	57.5	1.19716	917.1604	0.29304	695354.06	19.79	695354.353	142.252190
4888.1911	71076.883	1.007	19.6	59.0	1.19255	917.1388	0.29304	695353.98	19.76	695354.275	142.252169
4888.1890	71077.004	1.006	19.8	59.5	1.19030	917.0812	0.29304	695355.16	19.75	695355.454	142.252485
4888.1846	71076.919	1.010	19.6	57.0	1.19680	917.0740	0.29304	695354.34	19.92	695354.629	142.252226
5586.4560	81230.305	1.010	19.8	57.5	1.19538	917.2483	0.29304	794686.17	19.80	794686.464	142.252603
5586.4616	81230.287	1.010	19.4	57.5	1.19716	917.3470	0.29304	794685.99	19.79	794686.283	142.252440
5586.4622	81230.340	1.007	19.6	59.5	1.19202	917.3038	0.29304	794686.51	19.74	794686.807	142.252583
5586.4608	81230.488	1.005	19.8	59.5	1.18982	917.2606	0.29304	794687.96	19.74	794688.254	142.252879
5586.4559	81230.541	1.010	19.5	57.5	1.19671	917.2606	0.29304	794688.48	19.92	794688.774	142.252864
6284.7617	91384.273	1.010	19.9	58.5	1.19483	917.4407	0.29304	894023.70	19.80	894023.993	142.252906
6284.7683	91384.330	1.010	19.6	56.5	1.19637	917.5407	0.29304	894024.26	19.80	894024.550	142.252845
6284.7670	91384.335	1.006	19.6	58.5	1.19164	917.4759	0.29304	894024.31	19.76	894024.603	142.252935
6284.7644	91384.431	1.006	19.9	59.0	1.18990	917.4255	0.29304	894025.24	19.74	894025.537	142.253168
6284.7598	91384.270	1.010	19.5	57.5	1.19719	917.4399	0.29304	894023.67	19.93	894023.967	142.252778
6983.0661	101538.34	1.010	19.9	58.5	1.19483	917.6292	0.29304	993362.28	19.80	993362.577	142.253326
6983.0743	101538.33	1.010	19.7	56.5	1.19593	917.7342	0.29304	993362.14	19.81	993362.437	142.253126
6983.0705	101538.36	1.005	19.8	59.0	1.18987	917.6292	0.29304	993362.43	19.76	993362.720	142.253309
6983.0687	101538.39	1.006	20.0	58.5	1.18951	917.6046	0.29304	993362.72	19.76	993363.010	142.253388
6983.0655	101538.35	1.010	19.8	56.5	1.19596	917.6334	0.29304	993362.38	19.96	993362.678	142.253146

$$A_0 = 142.2502 \text{ mm}^2$$

$$\lambda = 3.08 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$$

ตาราง 20 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 1.75 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

position	r	R	u	U	p_{z1}	h_p	density	viscosity
mm	mm	mm	mm	mm	MPa	mm	kg/m ³	Pa s
28.3	6.727874	6.730007	0.0000036	-0.0000002	0.0000000	0.002129	916.064	0.02222
27.6	6.727874	6.730007	0.0000033	0.0000010	0.0577830	0.002131	916.078	0.02224
26.6	6.727874	6.730007	0.0000028	0.0000028	0.1401729	0.002133	916.099	0.02226
25.6	6.727874	6.730007	0.0000022	0.0000046	0.2223675	0.002135	916.119	0.02228
24.6	6.727862	6.730009	0.0000015	0.0000062	0.3035137	0.002153	916.140	0.02230
23.6	6.727848	6.730018	0.0000008	0.0000079	0.3824117	0.002177	916.159	0.02232
22.6	6.727833	6.730033	0.0000001	0.0000095	0.4584083	0.002208	916.178	0.02234
21.6	6.727818	6.730053	-0.0000005	0.0000111	0.5309545	0.002247	916.196	0.02236
20.6	6.727801	6.730079	-0.0000011	0.0000126	0.5996160	0.002292	916.213	0.02238
19.6	6.727783	6.730112	-0.0000017	0.0000140	0.6640776	0.002345	916.229	0.02239
18.6	6.727779	6.730143	-0.0000023	0.0000155	0.7249487	0.002382	916.244	0.02241
17.6	6.727776	6.730168	-0.0000028	0.0000169	0.7833411	0.002412	916.259	0.02243
16.6	6.727775	6.730187	-0.0000033	0.0000183	0.8399557	0.002433	916.273	0.02244
15.6	6.727776	6.730198	-0.0000038	0.0000196	0.8954157	0.002446	916.287	0.02245
14.6	6.727777	6.730203	-0.0000043	0.0000210	0.9502953	0.002451	916.300	0.02247
13.6	6.727781	6.730201	-0.0000047	0.0000224	1.0051444	0.002448	916.314	0.02248
12.6	6.727784	6.730207	-0.0000052	0.0000238	1.0599749	0.002452	916.328	0.02250
11.6	6.727787	6.730211	-0.0000057	0.0000253	1.1145980	0.002455	916.341	0.02251
10.6	6.727791	6.730213	-0.0000062	0.0000268	1.1691536	0.002455	916.355	0.02252
9.6	6.727795	6.730214	-0.0000066	0.0000282	1.2237819	0.002454	916.368	0.02254
8.6	6.727799	6.730213	-0.0000071	0.0000298	1.2786235	0.002450	916.382	0.02255
7.6	6.727804	6.730210	-0.0000076	0.0000313	1.3338213	0.002444	916.396	0.02257
6.6	6.727808	6.730221	-0.0000081	0.0000328	1.3889089	0.002454	916.409	0.02258
5.6	6.727811	6.730229	-0.0000086	0.0000343	1.4434728	0.002461	916.423	0.02259
4.6	6.727815	6.730234	-0.0000090	0.0000358	1.4977616	0.002464	916.436	0.02261
3.6	6.727819	6.730235	-0.0000095	0.0000372	1.5520214	0.002463	916.450	0.02262
2.6	6.727823	6.730233	-0.0000100	0.0000385	1.6064987	0.002458	916.463	0.02263
1.6	6.727828	6.730227	-0.0000104	0.0000394	1.6614612	0.002449	916.477	0.02265
0.6	6.727828	6.730227	-0.0000108	0.0000385	1.7167701	0.002449	916.491	0.02266
0	6.727828	6.730227	-0.0000110	0.0000374	1.7500000	0.002448	916.499	0.02267

ตาราง 20 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 1.75 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C (ต่อ)

Integral	p_{z1}	p_z (FEA)	r_p	R_p	dr_p	dR_p	$dr_p + dR_p$	Integral
	MPa		mm	mm				
1.76E+03	0.00000	0.0000000	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.51E+03	0.05778	0.0577830	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.50E+03	0.14017	0.1401729	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.47E+03	0.22237	0.2223675	6.72788	6.73001	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
2.40E+03	0.30351	0.3035137	6.72786	6.73002	-0.00001	0.00001	-0.00001	0.00000
2.31E+03	0.38241	0.3824117	6.72785	6.73003	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00000
2.21E+03	0.45841	0.4584083	6.72783	6.73004	-0.00002	0.00002	0.00000	0.00000
2.09E+03	0.53095	0.5309545	6.72782	6.73006	-0.00002	0.00003	0.00001	0.00001
1.96E+03	0.59962	0.5996160	6.72780	6.73009	-0.00002	0.00003	0.00001	0.00001
1.85E+03	0.66408	0.6640776	6.72778	6.73013	-0.00001	0.00003	0.00002	0.00002
1.78E+03	0.72495	0.7249487	6.72778	6.73016	0.00000	0.00003	0.00003	0.00002
1.72E+03	0.78334	0.7833411	6.72777	6.73019	0.00000	0.00002	0.00002	0.00001
1.69E+03	0.83995	0.8399557	6.72777	6.73020	0.00000	0.00002	0.00002	0.00001
1.67E+03	0.89541	0.8954157	6.72777	6.73022	0.00000	0.00001	0.00001	0.00001
1.67E+03	0.95029	0.9502953	6.72777	6.73022	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
1.67E+03	1.00514	1.0051444	6.72778	6.73022	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.66E+03	1.05997	1.0599749	6.72778	6.73023	0.00000	0.00001	0.00001	0.00001
1.66E+03	1.11460	1.1145980	6.72778	6.73024	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.66E+03	1.16915	1.1691536	6.72778	6.73024	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.67E+03	1.22378	1.2237819	6.72779	6.73024	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.68E+03	1.27862	1.2786235	6.72779	6.73024	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
1.68E+03	1.33382	1.3338213	6.72780	6.73024	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.66E+03	1.38891	1.3889089	6.72780	6.73025	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.65E+03	1.44347	1.4434728	6.72780	6.73026	0.00000	0.00001	0.00001	0.00001
1.65E+03	1.49776	1.4977616	6.72781	6.73027	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.66E+03	1.55202	1.5520214	6.72781	6.73027	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.67E+03	1.60650	1.6064987	6.72781	6.73027	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.68E+03	1.66146	1.6614612	6.72782	6.73027	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.01E+03	1.71677	1.7167701	6.72782	6.73027	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	1.75000	1.7500000	6.72782	6.73026	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

$$A_p = 142.2536 \text{ mm}^2$$

ตาราง 21 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 3.5 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

position	r	R	u	U	p_{z1}	h_p	density	viscosity
mm	mm	mm	mm	mm	MPa	mm	kg/m ³	Pa s
28.3	6.727874	6.730007	0.0000071	-0.0000004	0.0000000	0.002125	916.064	0.02222
27.6	6.727874	6.730007	0.0000066	0.0000021	0.1183705	0.002128	916.093	0.02225
26.6	6.727874	6.730007	0.0000055	0.0000057	0.2868171	0.002133	916.135	0.02230
25.6	6.727874	6.730007	0.0000042	0.0000093	0.4544527	0.002138	916.177	0.02234
24.6	6.727862	6.730009	0.0000029	0.0000127	0.6195444	0.002158	916.218	0.02238
23.6	6.727848	6.730018	0.0000015	0.0000161	0.7796818	0.002184	916.258	0.02242
22.6	6.727833	6.730033	0.0000001	0.0000193	0.9335863	0.002218	916.296	0.02246
21.6	6.727818	6.730053	-0.0000012	0.0000225	1.0802006	0.002259	916.333	0.02250
20.6	6.727801	6.730079	-0.0000024	0.0000255	1.2187074	0.002307	916.367	0.02254
19.6	6.727783	6.730112	-0.0000036	0.0000285	1.3485298	0.002361	916.399	0.02257
18.6	6.727779	6.730143	-0.0000047	0.0000314	1.4709343	0.002401	916.430	0.02260
17.6	6.727776	6.730168	-0.0000057	0.0000342	1.5881774	0.002432	916.459	0.02263
16.6	6.727775	6.730187	-0.0000067	0.0000370	1.7016820	0.002455	916.487	0.02266
15.6	6.727776	6.730198	-0.0000077	0.0000397	1.8127030	0.002470	916.514	0.02269
14.6	6.727777	6.730203	-0.0000087	0.0000425	1.9223884	0.002477	916.542	0.02271
13.6	6.727781	6.730201	-0.0000097	0.0000453	2.0318292	0.002476	916.569	0.02274
12.6	6.727784	6.730207	-0.0000106	0.0000481	2.1410503	0.002482	916.596	0.02277
11.6	6.727787	6.730211	-0.0000116	0.0000510	2.2496780	0.002487	916.623	0.02280
10.6	6.727791	6.730213	-0.0000125	0.0000539	2.3579860	0.002489	916.650	0.02282
9.6	6.727795	6.730214	-0.0000135	0.0000569	2.4662454	0.002489	916.677	0.02285
8.6	6.727799	6.730213	-0.0000144	0.0000599	2.5747271	0.002487	916.703	0.02288
7.6	6.727804	6.730210	-0.0000154	0.0000629	2.6837062	0.002484	916.730	0.02291
6.6	6.727808	6.730221	-0.0000163	0.0000659	2.7922775	0.002496	916.757	0.02293
5.6	6.727811	6.730229	-0.0000172	0.0000689	2.8996429	0.002504	916.784	0.02296
4.6	6.727815	6.730234	-0.0000182	0.0000718	3.0062896	0.002509	916.810	0.02299
3.6	6.727819	6.730235	-0.0000191	0.0000746	3.1126988	0.002510	916.837	0.02301
2.6	6.727823	6.730233	-0.0000200	0.0000773	3.2193543	0.002507	916.863	0.02304
1.6	6.727828	6.730227	-0.0000208	0.0000789	3.3268107	0.002499	916.890	0.02307
0.6	6.727828	6.730227	-0.0000216	0.0000772	3.4349462	0.002498	916.916	0.02309
0	6.727828	6.730227	-0.0000219	0.0000749	3.5000000	0.002496	916.933	0.02311

ตาราง 21 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 3.5 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C (ต่อ)

Integral	p_{z1}	p_z (FEA)	r_p	R_p	dr_p	dR_p	$dr_p + dR_p$	Integral
	MPa		mm	mm				
1.77E+03	0.00000	0.0000000	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.51E+03	0.11837	0.1183705	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.50E+03	0.28682	0.2868172	6.72788	6.73001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.46E+03	0.45445	0.4544529	6.72788	6.73002	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
2.39E+03	0.61954	0.6195445	6.72786	6.73002	-0.00001	0.00001	-0.00001	0.00000
2.30E+03	0.77968	0.7796819	6.72785	6.73003	-0.00002	0.00001	0.00000	0.00000
2.19E+03	0.93359	0.9335864	6.72783	6.73005	-0.00002	0.00002	0.00000	0.00001
2.07E+03	1.08020	1.0802008	6.72782	6.73008	-0.00002	0.00003	0.00001	0.00001
1.94E+03	1.21871	1.2187084	6.72780	6.73010	-0.00002	0.00003	0.00001	0.00002
1.83E+03	1.34853	1.3485317	6.72778	6.73014	-0.00001	0.00003	0.00002	0.00004
1.75E+03	1.47093	1.4709364	6.72777	6.73017	0.00000	0.00003	0.00003	0.00004
1.69E+03	1.58818	1.5881795	6.72777	6.73020	0.00000	0.00002	0.00002	0.00003
1.66E+03	1.70168	1.7016841	6.72777	6.73022	0.00000	0.00002	0.00002	0.00002
1.64E+03	1.81270	1.8127050	6.72777	6.73024	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.63E+03	1.92239	1.9223904	6.72777	6.73025	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.63E+03	2.03183	2.0318311	6.72777	6.73025	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002
1.62E+03	2.14105	2.1410522	6.72777	6.73026	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.62E+03	2.24968	2.2496800	6.72778	6.73026	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.62E+03	2.35799	2.3579879	6.72778	6.73027	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002
1.62E+03	2.46625	2.4662474	6.72778	6.73027	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.63E+03	2.57473	2.5747291	6.72778	6.73027	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002
1.62E+03	2.68371	2.6837082	6.72779	6.73027	0.00000	0.00001	0.00001	0.00004
1.60E+03	2.79228	2.7922796	6.72779	6.73029	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004
1.59E+03	2.89964	2.8996445	6.72779	6.73030	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003
1.59E+03	3.00629	3.0062899	6.72780	6.73031	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002
1.59E+03	3.11270	3.1126986	6.72780	6.73031	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
1.60E+03	3.21935	3.2193541	6.72780	6.73031	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.61E+03	3.32681	3.3268106	6.72781	6.73031	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00001
9.71E+02	3.43495	3.4349462	6.72781	6.73030	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00001
0.00000	3.50000	3.5000000	6.72781	6.73030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

$$A_p = 142.2544 \text{ mm}^2$$

ตาราง 22 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 7 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

position	r	R	u	U	p_{z1}	h_p	density	viscosity
mm	mm	mm	mm	mm	MPa	mm	kg/m ³	Pa s
28.3	6.727874	6.730007	0.0000142	-0.0000008	0.0000000	0.002118	916.064	0.02222
27.6	6.727874	6.730007	0.0000131	0.0000044	0.2483030	0.002124	916.126	0.02229
26.6	6.727874	6.730007	0.0000108	0.0000119	0.6001939	0.002134	916.213	0.02238
25.6	6.727874	6.730007	0.0000081	0.0000192	0.9485945	0.002144	916.300	0.02247
24.6	6.727862	6.730009	0.0000053	0.0000264	1.2899508	0.002169	916.385	0.02255
23.6	6.727848	6.730018	0.0000025	0.0000332	1.6194333	0.002201	916.466	0.02264
22.6	6.727833	6.730033	-0.0000003	0.0000399	1.9346356	0.002239	916.545	0.02272
21.6	6.727818	6.730053	-0.0000030	0.0000464	2.2336431	0.002285	916.619	0.02279
20.6	6.727801	6.730079	-0.0000055	0.0000526	2.5150514	0.002337	916.689	0.02286
19.6	6.727783	6.730112	-0.0000079	0.0000586	2.7779468	0.002396	916.754	0.02293
18.6	6.727779	6.730143	-0.0000101	0.0000645	3.0250626	0.002439	916.815	0.02299
17.6	6.727776	6.730168	-0.0000122	0.0000702	3.2610482	0.002474	916.873	0.02305
16.6	6.727775	6.730187	-0.0000142	0.0000757	3.4888339	0.002501	916.930	0.02311
15.6	6.727776	6.730198	-0.0000162	0.0000813	3.7109714	0.002520	916.985	0.02316
14.6	6.727777	6.730203	-0.0000181	0.0000868	3.9297586	0.002531	917.039	0.02322
13.6	6.727781	6.730201	-0.0000200	0.0000923	4.1473480	0.002533	917.093	0.02327
12.6	6.727784	6.730207	-0.0000219	0.0000979	4.3638022	0.002543	917.146	0.02333
11.6	6.727787	6.730211	-0.0000238	0.0001036	4.5783983	0.002551	917.199	0.02338
10.6	6.727791	6.730213	-0.0000257	0.0001094	4.7916601	0.002558	917.252	0.02343
9.6	6.727795	6.730214	-0.0000275	0.0001152	5.0041105	0.002562	917.304	0.02348
8.6	6.727799	6.730213	-0.0000294	0.0001211	5.2162662	0.002564	917.357	0.02354
7.6	6.727804	6.730210	-0.0000312	0.0001271	5.4286287	0.002564	917.409	0.02359
6.6	6.727808	6.730221	-0.0000331	0.0001330	5.6394948	0.002579	917.461	0.02364
5.6	6.727811	6.730229	-0.0000349	0.0001388	5.8473938	0.002592	917.512	0.02369
4.6	6.727815	6.730234	-0.0000367	0.0001446	6.0532616	0.002600	917.563	0.02374
3.6	6.727819	6.730235	-0.0000384	0.0001501	6.2580233	0.002604	917.613	0.02379
2.6	6.727823	6.730233	-0.0000401	0.0001553	6.4626249	0.002605	917.664	0.02384
1.6	6.727828	6.730227	-0.0000418	0.0001583	6.6682444	0.002599	917.714	0.02389
0.6	6.727828	6.730227	-0.0000432	0.0001548	6.8751863	0.002597	917.765	0.02394
0	6.727828	6.730227	-0.0000439	0.0001500	7.0000000	0.002593	917.796	0.02397

ตาราง 22 แสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขที่ความดัน (p_1) 7 MPa ของชุดลูกสูบและ
กระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C (ต่อ)

Integral	p_{z1} MPa	p_z (FEA)	r_p mm	R_p mm	dr_p	dR_p	$dr_p + dR_p$	Integral
1.78E+03	0.00000	0.0000000	6.72789	6.73001	0.00000	0.00001	0.00001	0.00000
2.53E+03	0.24830	0.2483030	6.72789	6.73001	0.00000	0.00001	0.00001	0.00000
2.50E+03	0.60019	0.6001939	6.72788	6.73002	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000
2.45E+03	0.94859	0.9485945	6.72788	6.73003	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00000
2.37E+03	1.28995	1.2899508	6.72787	6.73004	-0.00002	0.00001	0.00000	0.00000
2.26E+03	1.61943	1.6194333	6.72785	6.73005	-0.00002	0.00002	0.00000	0.00001
2.15E+03	1.93464	1.9346356	6.72783	6.73007	-0.00002	0.00002	0.00001	0.00002
2.02E+03	2.23364	2.2336431	6.72781	6.73010	-0.00002	0.00003	0.00001	0.00003
1.89E+03	2.51505	2.5150514	6.72780	6.73013	-0.00002	0.00004	0.00002	0.00005
1.77E+03	2.77795	2.7779468	6.72777	6.73017	-0.00001	0.00004	0.00002	0.00008
1.69E+03	3.02506	3.0250626	6.72777	6.73021	-0.00001	0.00003	0.00003	0.00008
1.64E+03	3.26105	3.2610482	6.72776	6.73024	0.00000	0.00003	0.00002	0.00007
1.59E+03	3.48883	3.4888339	6.72776	6.73026	0.00000	0.00002	0.00002	0.00006
1.57E+03	3.71097	3.7109714	6.72776	6.73028	0.00000	0.00001	0.00001	0.00004
1.56E+03	3.92976	3.9297586	6.72776	6.73029	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003
1.55E+03	4.14735	4.1473480	6.72776	6.73029	0.00000	0.00001	0.00001	0.00004
1.54E+03	4.36380	4.3638022	6.72776	6.73030	0.00000	0.00001	0.00001	0.00005
1.53E+03	4.57840	4.5783983	6.72776	6.73031	0.00000	0.00001	0.00001	0.00005
1.53E+03	4.79166	4.7916601	6.72776	6.73032	0.00000	0.00001	0.00001	0.00004
1.52E+03	5.00411	5.0041105	6.72777	6.73033	0.00000	0.00001	0.00001	0.00004
1.52E+03	5.21627	5.2162662	6.72777	6.73033	0.00000	0.00000	0.00001	0.00005
1.51E+03	5.42863	5.4286287	6.72777	6.73034	0.00000	0.00001	0.00001	0.00008
1.49E+03	5.63949	5.6394948	6.72777	6.73035	0.00000	0.00002	0.00002	0.00009
1.48E+03	5.84739	5.8473938	6.72778	6.73037	0.00000	0.00001	0.00001	0.00007
1.47E+03	6.05326	6.0532616	6.72778	6.73038	0.00000	0.00001	0.00001	0.00005
1.47E+03	6.25802	6.2580233	6.72778	6.73038	0.00000	0.00000	0.00001	0.00003
1.48E+03	6.46262	6.4626249	6.72778	6.73039	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.49E+03	6.66824	6.6682444	6.72779	6.73039	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00003
8.96E+02	6.87519	6.8751863	6.72778	6.73038	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00003
0.00000	7.00000	7.0000000	6.72778	6.73038	0.00000	-0.00001	-0.00001	0.00000

$$A_p = 142.2560 \text{ mm}^2$$

จากตารางที่ 20-22 จะได้

$$A_0 = 142.2528 \text{ mm}^2$$

$$\lambda = 3.25 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$$

ตาราง 23 แสดงผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของลูกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa

Date: 09:16				
Friday				
August 10				
2007				
Model name: Piston-Low-7-st-st-15				
Study name: P-L-step-1				
Plot type: Static displacement-Plot2				
Ref Geometry: Axis1				
Node	UX (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
418	-3.15E-04	-6.7279	-0.3	-3.79E-15
417	-3.20E-04	-6.7279	-1	-4.24E-15
2179	-3.27E-04	-6.7278	-2	-4.84E-15
2177	-3.34E-04	-6.7278	-3	-5.17E-15
2098	-3.40E-04	-6.7278	-4	-5.07E-15
1963	-3.46E-04	-6.7278	-5	-4.72E-15
1961	-3.52E-04	-6.7278	-6	-4.40E-15
1882	-3.58E-04	-6.7278	-7	-4.28E-15
1747	-3.64E-04	-6.7278	-8	-4.15E-15
1745	-3.70E-04	-6.7278	-9	-3.71E-15
1666	-3.76E-04	-6.7278	-10	-2.79E-15
1531	-3.82E-04	-6.7278	-11	-1.76E-15
1529	-3.88E-04	-6.7278	-12	-1.17E-15
1450	-3.94E-04	-6.7278	-13	-1.35E-15
1315	-4.00E-04	-6.7278	-14	-1.87E-15
1313	-4.06E-04	-6.7278	-15	-2.11E-15
1234	-4.11E-04	-6.7278	-16	-1.65E-15
1099	-4.17E-04	-6.7278	-17	-7.65E-16
1097	-4.22E-04	-6.7278	-18	5.89E-17
1018	-4.28E-04	-6.7278	-19	4.26E-16
883	-4.33E-04	-6.7278	-20	2.30E-16
881	-4.38E-04	-6.7278	-21	-5.64E-16
802	-4.43E-04	-6.7278	-22	-1.92E-15
667	-4.48E-04	-6.7278	-23	-3.53E-15
665	-4.53E-04	-6.7278	-24	-5.03E-15
531	-4.58E-04	-6.7278	-25	-6.10E-15
529	-4.63E-04	-6.7278	-26	-6.73E-15
3	-4.67E-04	-6.7278	-27	-6.99E-15
1	-4.71E-04	-6.7278	-28	-6.94E-15
137	-4.74E-04	-6.7278	-28.6	-6.79E-15

ตาราง 24 แสดงผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบอกสูบในช่วงความดัน 0.7-7 MPa

Date: 09:24				
Friday				
August 10				
2007				
Model name: Cylinder-Low-7-st-st-15				
Study name: C-L-step-1				
Plot type: Static displacement-Plot2				
Ref Geometry: Axis1				
Node	UX (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
2336	1.19E-04	6.73	2	1.03E-10
2331	1.11E-04	6.73	1.3	-4.62E-09
2326	9.16E-05	6.73	0.3	4.81E-10
2321	5.26E-05	6.73	-0.7	-7.24E-10
2316	6.23E-07	6.73	-1.7	-5.10E-10
2311	-5.47E-05	6.73	-2.7	6.07E-11
2306	-1.06E-04	6.73	-3.7	6.12E-10
2301	-1.50E-04	6.7301	-4.7	6.71E-10
2296	-1.85E-04	6.7301	-5.7	3.12E-10
2291	-2.11E-04	6.7301	-6.7	-3.02E-12
2286	-2.29E-04	6.7302	-7.7	-1.56E-10
2281	-2.39E-04	6.7302	-8.7	-8.21E-11
2276	-2.42E-04	6.7302	-9.7	4.67E-11
2271	-2.39E-04	6.7302	-10.7	-1.19E-07
2266	-2.31E-04	6.7302	-11.7	8.57E-09
2261	-2.19E-04	6.7302	-12.7	-2.61E-11
2256	-2.04E-04	6.7302	-13.7	-1.65E-07
2251	-1.86E-04	6.7302	-14.7	-1.45E-07
2246	-1.66E-04	6.7302	-15.7	4.65E-08
2241	-1.45E-04	6.7302	-16.7	-8.08E-12
2236	-1.24E-04	6.7302	-17.7	-1.99E-08
2231	-1.03E-04	6.7302	-18.7	-1.80E-07
2226	-8.33E-05	6.7302	-19.7	2.62E-07
2221	-6.51E-05	6.7302	-20.7	-1.39E-07
2216	-5.01E-05	6.7302	-21.7	1.40E-08
2211	-4.25E-05	6.7302	-22.7	-1.85E-11
2206	-5.11E-05	6.7302	-23.7	-2.71E-11
2201	-9.65E-05	6.7302	-24.7	-3.05E-11
2192	-2.04E-04	6.7302	-25.7	-1.46E-11
2191	-2.88E-04	6.7302	-26.3	2.96E-11

ภาคผนวก ค

ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและกระบอกสูบทดลอง

ตาราง 25 เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่งที่ 0°

ตำแหน่ง	0°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.46013	13.46010	13.46008	13.46009	13.46010
9	13.46010	13.46009	13.46012	13.46012	13.46011
6	13.46035	13.46034	13.46040	13.46038	13.46037
3	13.46053	13.46059	13.46055	13.46050	13.46054
0	13.46068	13.46062	13.46066	13.46062	13.46065
-3	13.46055	13.46050	13.46055	13.46060	13.46055
-6	13.46068	13.46063	13.46062	13.46062	13.46064
-9	13.46061	13.46056	13.46057	13.46056	13.46058
-12	13.46062	13.46063	13.46061	13.46059	13.46061

ตาราง 26 เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่งที่ 45°

ตำแหน่ง	45°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.46000	13.45994	13.46000	13.45994	13.45997
9	13.46010	13.46005	13.46009	13.46008	13.46008
6	13.46032	13.46030	13.46027	13.46026	13.46029
3	13.46033	13.46025	13.46028	13.46028	13.46029
0	13.46027	13.46020	13.46027	13.46024	13.46025
-3	13.46043	13.46044	13.46043	13.46044	13.46044
-6	13.46042	13.46045	13.46050	13.46050	13.46047
-9	13.46048	13.46052	13.46055	13.46056	13.46053
-12	13.46043	13.46046	13.46044	13.46047	13.46045

ตาราง 27 เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่งที่ 90°

ตำแหน่ง	90°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45990	13.45992	13.45996	13.45997	13.45994
9	13.46009	13.46010	13.46005	13.46010	13.46009
6	13.46023	13.46015	13.46018	13.46017	13.46018
3	13.46037	13.46042	13.46036	13.46037	13.46038
0	13.46041	13.46035	13.46035	13.46043	13.46039
-3	13.46040	13.46036	13.46038	13.46041	13.46039
-6	13.46020	13.46020	13.46021	13.46018	13.46020
-9	13.46041	13.46045	13.46038	13.46038	13.46041
-12	13.46043	13.46041	13.46041	13.46044	13.46042

ตาราง 28 เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่งที่ 135°

ตำแหน่ง	135°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45979	13.45982	13.45978	13.46080	13.46005
9	13.45996	13.46000	13.46001	13.45998	13.45999
6	13.46008	13.46004	13.46006	13.46005	13.46006
3	13.46030	13.46032	13.46023	13.46029	13.46029
0	13.46036	13.46034	13.46035	13.46029	13.46034
-3	13.46030	13.46036	13.46031	13.46036	13.46033
-6	13.46039	13.46034	13.46038	13.46039	13.46038
-9	13.46034	13.46039	13.46036	13.46036	13.46036
-12	13.46033	13.46036	13.46032	13.46031	13.46033

จากข้อมูลในตาราง 25-28 นำไปหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และรัศมี (R) ของกระบอกสูบได้ตามตาราง 33

ตาราง 29 เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 0°

ตำแหน่ง mm	0°				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45563	13.45562	13.45564	13.45564	13.45563
9	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
6	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552
3	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552
0	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552
-3	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552	13.45552
-6	13.45556	13.45556	13.45556	13.45555	13.45556
-9	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
-12	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556

ตาราง 30 เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 45°

ตำแหน่ง mm	45°				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45584	13.45584	13.45584	13.45584	13.45584
9	13.45580	13.45575	13.45572	13.45572	13.45575
6	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
3	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
0	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
-3	13.45556	13.45556	13.45558	13.45556	13.45557
-6	13.45560	13.45560	13.45560	13.45559	13.45560
-9	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560
-12	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560

ตาราง 31 เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 90°

ตำแหน่ง	90°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45576	13.45576	13.45576	13.45576	13.45576
9	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568
6	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560
3	13.45557	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
0	13.45556	13.45558	13.45556	13.45556	13.45557
-3	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560
-6	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560
-9	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564
-12	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564

ตาราง 32 เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa ในแต่ละตำแหน่ง ที่ 135°

ตำแหน่ง	135°				
mm	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
12	13.45576	13.45576	13.45576	13.45576	13.45576
9	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568
6	13.45556	13.45557	13.45560	13.45560	13.45558
3	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556	13.45556
0	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560	13.45560
-3	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564	13.45564
-6	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568	13.45568
-9	13.45572	13.45572	13.45572	13.45572	13.45572
-12	13.45580	13.45584	13.45584	13.45580	13.45582

จากข้อมูลในตาราง 29-32 นำไปหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และรัศมี (r) ของลูกสูบได้ตามตาราง 34

ตาราง 33 เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และรัศมี (R) เฉลี่ยของกระบอกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa

ตำแหน่ง	ตำแหน่งองศา				ค่าเฉลี่ย	
	0°	45°	90°	135°	D	R
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
12	13.46010	13.45997	13.45994	13.46005	13.46002	6.730008
9	13.46011	13.46008	13.46009	13.45999	13.46007	6.730034
6	13.46037	13.46029	13.46018	13.46006	13.46023	6.730113
3	13.46054	13.46029	13.46038	13.46029	13.46038	6.730188
0	13.46065	13.46025	13.46039	13.46034	13.46041	6.730204
-3	13.46055	13.46044	13.46039	13.46033	13.46043	6.730214
-6	13.46064	13.46047	13.46020	13.46038	13.46042	6.730211
-9	13.46058	13.46053	13.46041	13.46036	13.46047	6.730235
-12	13.46061	13.46045	13.46042	13.46033	13.46045	6.730226

ตาราง 34 เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และรัศมีเฉลี่ย (r) ของลูกสูบในช่วงความดัน (0.7-7) MPa

ตำแหน่ง	ตำแหน่งองศา				ค่าเฉลี่ย	
	0°	45°	90°	135°	d	r
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
12	13.45563	13.45584	13.45576	13.45576	13.45575	6.727874
9	13.45556	13.45575	13.45568	13.45568	13.45567	6.727834
6	13.45552	13.45556	13.45560	13.45558	13.45557	6.727783
3	13.45552	13.45556	13.45556	13.45556	13.45555	6.727775
0	13.45552	13.45556	13.45557	13.45560	13.45556	6.727781
-3	13.45552	13.45557	13.45560	13.45564	13.45558	6.727791
-6	13.45556	13.45560	13.45560	13.45568	13.45561	6.727805
-9	13.45556	13.45560	13.45564	13.45572	13.45563	6.727815
-12	13.45556	13.45560	13.45564	13.45582	13.45566	6.727828

ภาคผนวก ง
สมบัติของน้ำมันและวัสดุ

ตาราง 35 แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 15°C

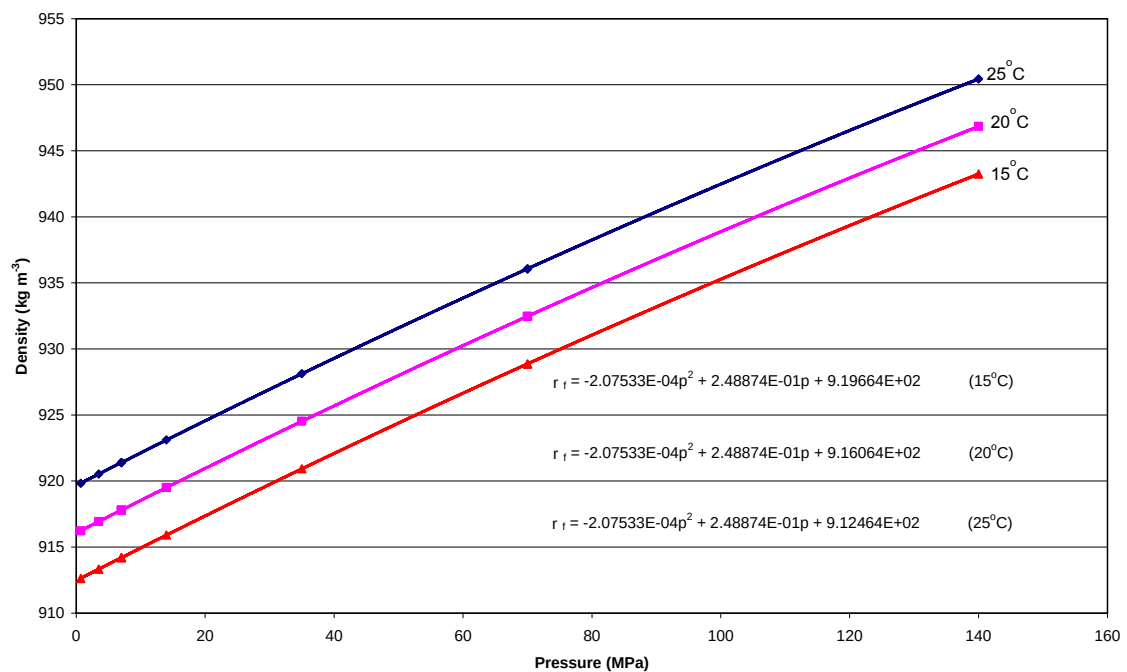
ช่วงความดัน MPa	ความหนาแน่น (ρ) kg m ⁻³	ความหนืดไดนามิกส์ (μ) Pa.s
0.7	919.8304	0.02727
3.5	920.5290	0.02809
7	921.3968	0.02912
7	921.3968	0.02912
35	928.1334	0.03738
70	936.0625	0.05220
14	923.1152	0.03119
70	936.0625	0.05220
140	950.4411	0.11775

ตาราง 36 แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C

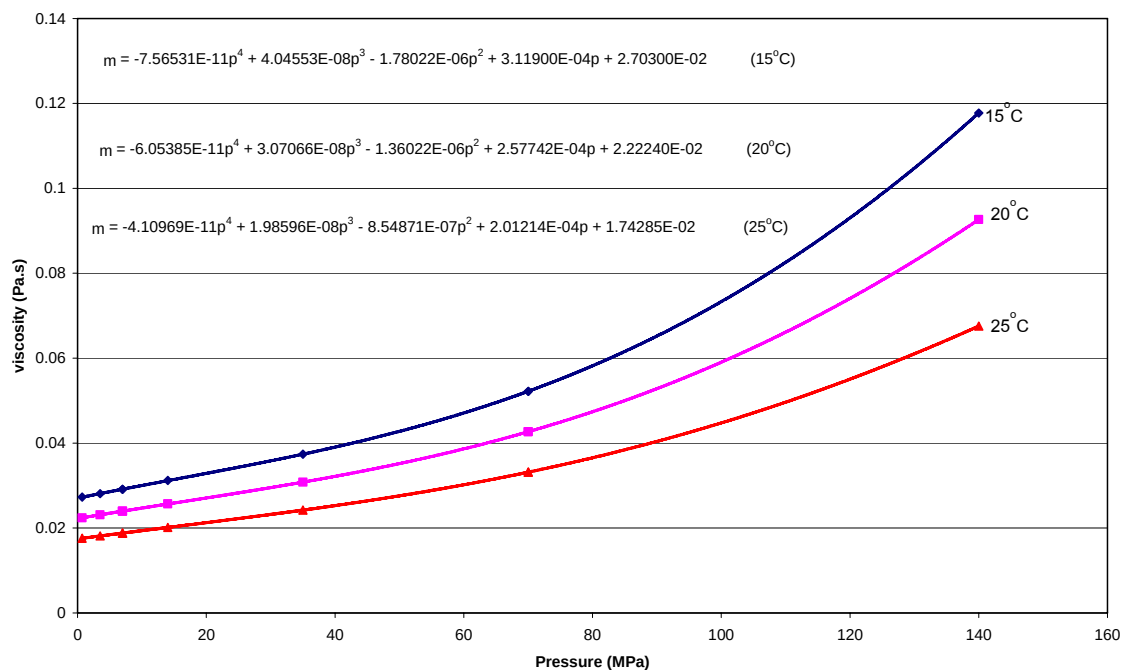
ช่วงความดัน MPa	ความหนาแน่น (ρ) kg m ⁻³	ความหนืดไดนามิกส์ (μ) Pa.s
0.7	916.2304	0.02242
3.5	916.9290	0.02310
7	917.7968	0.02396
7	917.7968	0.02396
35	924.5334	0.03080
70	932.4625	0.04268
14	919.5152	0.02567
70	932.4625	0.04268
140	946.8411	0.09265

ตาราง 37 แสดงสมบัติของน้ำมันในแต่ละช่วงความดัน ณ อุณหภูมิอ้างอิง 25°C

ช่วงความดัน MPa	ความหนาแน่น (ρ) kg m ⁻³	ความหนืดไดนามิกส์ (μ) Pa.s
0.7	912.6304	0.01758
3.5	913.3290	0.01812
7	914.1968	0.01879
7	914.1968	0.01879
35	920.9334	0.02421
70	928.8625	0.03315
14	915.9152	0.02015
70	928.8625	0.03315
140	943.2411	0.06755



ภาพประกอบ 78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ความดันต่างๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง



ภาพประกอบ 79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ความดันต่างๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง

ตาราง 38 แสดงสมบัติของวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์

ช่วงความดัน MPa	ชิ้นส่วน	วัสดุ	E (GPa)	ν
0.7-7	ลูกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
7-70	ลูกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
14-140	ลูกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209

ตาราง 39 แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

ช่วงความดัน MPa	ชิ้นส่วน	วัสดุ	E (GPa)	ν
0.7-7	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
7-70	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
14-140	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300

ตาราง 40 แสดงสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมและทังสเตนคาร์ไบด์

ช่วงความดัน MPa	ชิ้นส่วน	วัสดุ	E (GPa)	ν
0.7-7	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
7-70	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209
14-140	ลูกสูบ	เหล็กกล้าไร้สนิม	203	0.300
	กระบอกสูบ	ทังสเตนคาร์ไบด์	611	0.209

ภาคผนวก จ

**บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมล้านนา ครั้งที่ 1
ระหว่างวันที่ 8-9 สิงหาคม 2550 จ.เชียงใหม่ จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์ (สาขาภาคเหนือ)**



ภาพประกอบ 80 แสดงกำหนดการประชุมวิชาการวิศวกรรมล้านนา

การประชุมวิชาการวิศวกรรมลำนาคครั้งที่ 1
8-9 สิงหาคม 2550 จังหวัดเชียงใหม่

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบของเครื่องมือวัดความดันประเภท Pressure balance ระหว่างวิธีเชิงตัวเลขกับผลการทดลองเพื่อที่จะใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศไทย

A Comparison of the Pressure Distortion Coefficient of the Piston & Cylinder Unit of Pressure Balance between Numerical Method and Experimental Result to be Used as the Primary Standard in Thailand

ปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ¹, วิชิต บัวแก้ว², พ.ท. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง³ และ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน⁴

บทคัดย่อ

เพรสเซอร์บาลานซ์ (pressure balance) เป็นเครื่องมือวัดความดันที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งใช้หลักการวัดปริมาณของแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือชุดลูกสูบและกระบอกสูบ สามารถใช้วัดความดันได้สูงประมาณ 1 GPa แต่การวัดความดันในช่วงตั้งแต่ 1 MPa ขึ้นไป จะมีตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันซึ่งเกิดจากการบิดเบี้ยวของรูปร่างในช่วงสภาพยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบ ผลของตัวแปรดังกล่าวทำให้การวัดค่าความดันไม่ถูกต้อง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของรูปร่างของชุดลูกสูบและกระบอกสูบระหว่างการทดลองกับวิธีเชิงตัวเลข และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน โดยใช้ชุดลูกสูบและกระบอกสูบความดันช่วงตั้งแต่ 0.7 MPa ถึง 140 MPa ซึ่งถูกใช้เป็นมาตรฐานแห่งชาติ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ศึกษาที่อุณหภูมิ 15°C, 20°C และ 25°C ตามลำดับ และวัสดุลูกสูบและกระบอกสูบทำจากทั้งสเตนคาร์ไบต์, เหล็กกล้าไร้สนิม และ เหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสเตนคาร์ไบต์

ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่สร้างด้วยวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบต์ ที่ได้จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกัน และวัสดุที่ใช้สร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน

คำสำคัญ: เพรสเซอร์บาลานซ์; สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน; สเตนคาร์ไบต์; เหล็กกล้าไร้สนิม; เครื่องมือวัด; วิธีเชิงตัวเลข

Abstract

Pressure balance is a high accuracy instrument which being used to measure the pressure quantity. Its operation is based on the measurement of force acting on the cross-section area. The main component consists of a vertical piston mounting in a cylinder. It can be used to measure the pressure up to 1 GPa. However the measurement of pressure above 1 MPa using piston and cylinder assembly (PCA) will be influenced by pressure distortion coefficient of both piston and cylinder. Then the measurement result of the applied pressure will be uncorrected.

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กทม.

Therefore the purpose of this research is to compare the pressure distortion coefficient of the piston and cylinder shapes that can be determined from experimentation and numerical method. And also to study the effect from changing of temperature over the piston and cylinder which may be influence to the value of pressure distortion coefficient. The apparatus used in this research were 3 PCA that have been used as the national standard in hydraulic pressure range 0.7 MPa to 140 MPa at National Institute of Metrology (Thailand). The temperatures that used in this research were 15°C, 20°C and 25°C. The study also included the result of pressure distortion coefficient which effected on the piston and cylinder shape that made by tungsten carbide, stainless steel and stainless steel-tungsten carbide

From this research found that the pressure distortion coefficient occurred on the PCA made by tungsten carbide obtained from numerical analysis agree with the result from experimentation. The difference in pressure distortion coefficient obtained from the PCA made by different material was also found

Key word: pressure balance; pressure distortion coefficient; tungsten carbide; stainless steel; instrument; numerical method

คำนำ

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (λ) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับเครื่องมือวัดความดันประเภทเพรสเซอร์บาลานซ์ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานในสภาวะความดันสูงๆ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับการออกแบบลูกสูบและกระบอกสูบ วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันสามารถจำแนกได้คือ การทดลองจริงและการใช้ทฤษฎีตามหลักวิชาการ สำหรับวิธีการทดลองนั้นเป็นวิธีที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางอย่างเช่น เทคนิคที่ถูกเรียกว่า cross-floating [2-3] และวิธีการตามหลักวิชาการจะใช้วิธีเชิงตัวเลขของระบบสมการเชิงอนุพันธ์โดยที่สมการดังกล่าวจะประกอบไปด้วยระบบของสมการสภาพยืดหยุ่นของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ [4] เนื่องจากสาเหตุของความซับซ้อนของรูปร่างและเงื่อนไขของโครงสร้างชุดลูกสูบและกระบอกสูบนั่นจึงเป็นสาเหตุที่ต้องใช้วิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยการวิเคราะห์นี้จะเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องสูงและง่ายสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเชิงกล

การศึกษาสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันจากการสำรวจเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5-11] พบว่า การศึกษาส่วนใหญ่จะใช้หลักการที่ใกล้เคียงกันคือจะเริ่มต้นด้วยการหาความดันของของไหล ณ อุณหภูมิ 20° C ที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ และการวิเคราะห์โครงสร้างควบคู่กันไป และจากการสำรวจเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง ให้ผู้ทำการวิจัยได้มองเห็นปัญหาที่น่าจะนำมาทำการวิจัยต่อ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะศึกษาเฉพาะของไหลที่เป็น diethyl-hexyl-sebacate (DHS) ที่ 20° C และความดันที่กระทำมีค่าค่อนข้างสูงคือประมาณ 200 MPa ขึ้นไป ซึ่งเป็นอุณหภูมิและความดันที่ค่อนข้างจำกัดสำหรับการใช้งานจริง

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันทั้งการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันพร้อมทั้งผลกระทบของวัสดุที่ใช้สร้างลูกสูบและกระบอกสูบ

อุปกรณ์และวิธีการ

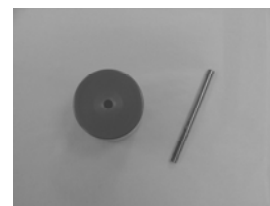
- 1 ชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ใช้ น้ำมัน ช่วงความดัน 0.7-140 MPa
- 2 ฐานติดตั้งชุดลูกสูบและกระบอกสูบ
- 3 เครื่อง IDM-100 และ เครื่อง universal length measuring machine สำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ
- 4 เพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน
- 5 ชุดวัดอุณหภูมิและสภาวะของอากาศ
- 6 ชุดเลเซอร์วัดอัตราการตก



ก) ช่วงความดัน 0.7-7 MPa



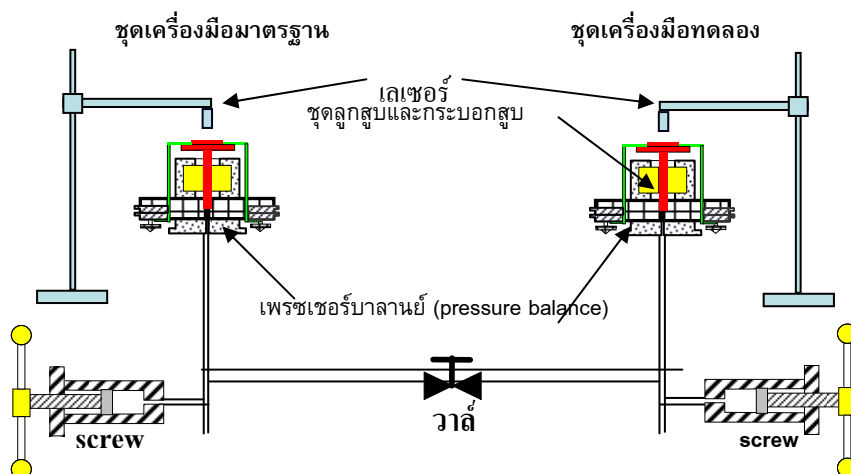
ข) ช่วงความดัน 7-70 MPa



ค) ช่วงความดัน 14-140 MPa

รูปที่ 1 ชุดลูกสูบและกระบอกสูบทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทั้งการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข โดยการทดลองได้เปรียบเทียบค่าจากเครื่องมือมาตรฐาน และวิธีเชิงตัวเลขใช้โปรแกรม SolidWork 2004 และ COSMOSWorks 2004



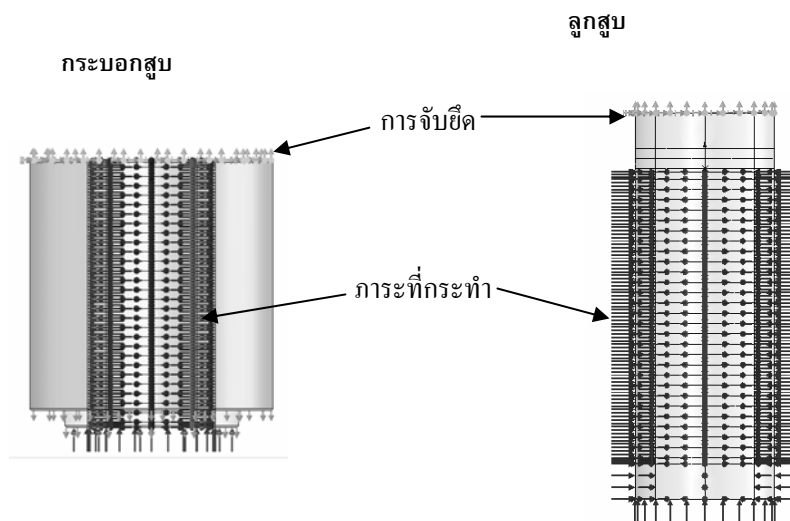
รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์สำหรับการทดลอง

1. การทดลอง

การทดลองเริ่มจากนำเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์ที่ต้องการทดลองต่อเข้ากับเครื่องเพรสเซอร์บาลานซ์มาตรฐาน โดยทั้ง 2 ระบบกันด้วยวาล์วชนิดที่ไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตร (Constant Volume Valve) เมื่อเปิดวาล์ว ระบบความดันของเครื่องมือทั้งสองจะต่อถึงกัน จากนั้นเพิ่มหรือลดน้ำหนักของด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้ระบบทั้งสองเกิดสภาวะสมดุล ซึ่งเมื่อทั้งสองข้างสมดุลแล้ว ก็นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันได้ สำหรับวิธีการหาสภาวะสมดุลอาศัยอัตราการตกของลูกสูบโดยใช้เลเซอร์เข้ามาช่วยในการหาสภาวะสมดุล

2. วิธีเชิงตัวเลข

วิธีเชิงตัวเลขแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือปัญหาทางด้านโครงสร้างและปัญหาทางด้านการไหลของของไหล โดยการวิเคราะห์การไหลจะพิจารณาจากการไหลของของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบในแนวแกน 1 มิติ โดยเป็นการไหลแบบราบเรียบซึ่งรูปแบบการไหลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ โดยรูปร่างจะถูกหาค่าจากการวิเคราะห์โครงสร้าง และในเวลาเดียวกันการกระจายตัวของความดันในช่องว่างที่ถูกหามาจากปัญหาของการไหลจะถูกใช้เป็นภาระทางกลในปัญหาของโครงสร้างที่หาคำตอบโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลของการแก้ปัญหาของทั้งสองส่วนจะกระทำจนกว่าตัวแปรที่ต้องการสอดคล้องกันที่สุดในที่สุด สำหรับการวิเคราะห์นี้จะเลือกใช้จำนวนซึ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดที่สุดโดยเป็นแบบ tetrahedron ความสอดคล้องของความดันที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบระหว่างการวิเคราะห์ทางด้านการไหลของของไหลกับการวิเคราะห์โครงสร้างต่างกันไม่เกิน 10^{-5} ของความดันที่ใช้ในการวิเคราะห์ รูปแบบของชุดลูกสูบและกระบอกสูบแสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงลักษณะของการที่กระทำและการจับยึดของชุดลูกสูบและกระบอกสูบจากวิธีเชิงตัวเลข

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการทดลอง

1.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในแต่ละช่วงความดันที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในแต่ละช่วงความดันที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข

ความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (MPa^{-1})								
	15°C			20°C			25°C		
	ทดลอง	FEM	ผลต่าง	ทดลอง	FEM	ผลต่าง	ทดลอง	FEM	ผลต่าง
0.7-7	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.14 \cdot 10^{-6}$	$0.06 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$0.17 \cdot 10^{-6}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$3.38 \cdot 10^{-6}$	$0.30 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.39 \cdot 10^{-7}$	$-0.54 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$-0.34 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$5.76 \cdot 10^{-7}$	$-0.17 \cdot 10^{-7}$
14-140	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.38 \cdot 10^{-7}$	$0.22 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$0.25 \cdot 10^{-7}$	$7.16 \cdot 10^{-7}$	$7.50 \cdot 10^{-7}$	$0.34 \cdot 10^{-7}$

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความดัน และจากวิธีเชิงตัวเลขพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงความดัน สำหรับความแตกต่างระหว่างการทดลองและวิธีเชิงตัวเลขพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันแทบไม่แตกต่างกัน

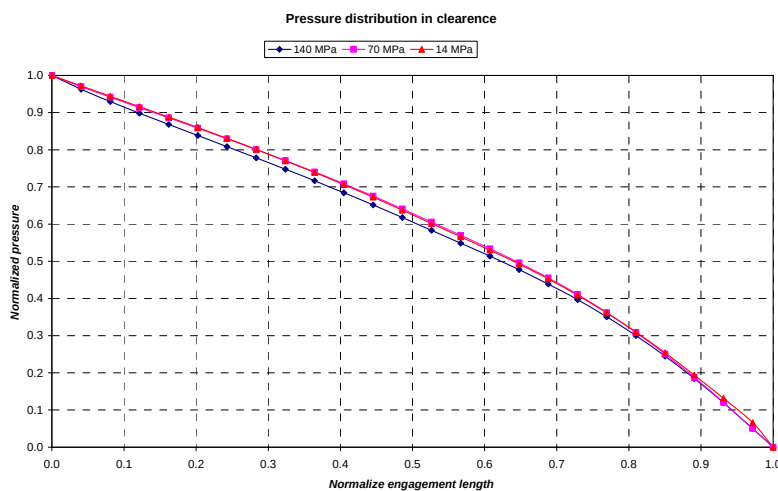
1.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุ ทั้งสแตนคาร์ไบด์, เหล็กกล้าไร้สนิม และ เหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบทำจากวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีค่าน้อยที่สุดในช่วงความดัน 0.7 MPa ถึง 7 MPa และทั้งสแตนคาร์ไบด์มีค่าน้อยที่สุดในช่วงความดันตั้งแต่ 7 MPa ถึง 140 MPa และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่ามากที่สุดในทุกช่วงความดัน

จากรูปที่ 4 พบว่าการกระจายตัวของความดันมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบและอัตราการกระจายตัวไม่เท่ากันในแต่ละความดัน โดยที่ความดัน 70 MPa มีอัตราการกระจายตัวมากที่สุด และที่ความดัน 140 MPa มีอัตราการกระจายตัวน้อยที่สุด

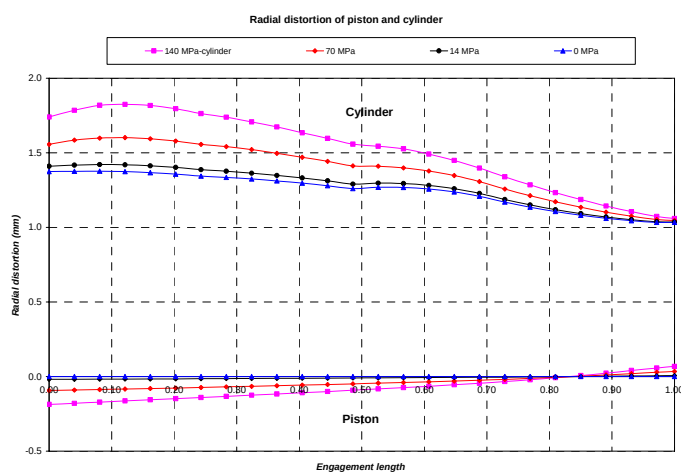
ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบที่ทำจากวัสดุ ทั้งสแตนคาร์ไบด์, เหล็กกล้าไร้สนิม และ เหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวิธีเชิงตัวเลข

ช่วงความดัน (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน (MPa^{-1})		
	ทั้งสแตนคาร์ไบด์- ทั้งสแตนคาร์ไบด์	เหล็กกล้าไร้สนิม -เหล็กกล้าไร้สนิม	เหล็กกล้าไร้สนิม - ทั้งสแตนคาร์ไบด์
0.7-7	$3.25 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-6}$
7-70	$5.59 \cdot 10^{-7}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$-1.39 \cdot 10^{-6}$
14-140	$7.41 \cdot 10^{-7}$	$4.45 \cdot 10^{-6}$	$-1.14 \cdot 10^{-6}$



รูปที่ 4 การกระจายตัวของความดันในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบจากวิธีเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของลูกสูบและกระบอกสูบขึ้นอยู่กับความดันและอัตราการเปลี่ยนแปลงจะไม่เท่ากันในแต่ละความดันตลอดช่วงความยาวของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ โดยที่ความดัน 14 MPa มีการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีน้อยที่สุด และที่ความดัน 140 MPa มีการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีมากที่สุด



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงขนาดของลูกสูบและกระบอกสูบจากวิธีเชิงตัวเลข

2. วิจารณ์

จากผลการวิจัยตามตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าช่วงความดันของลูกสูบและกระบอกสูบมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันเนื่องจากเมื่อความดันมีค่ามากขึ้นก็จะเป็นผลทำให้เกิดการที่กระทำกับผิวภายในของกระบอกสูบและผิวภายนอกของลูกสูบมากตามขึ้นไปด้วย ดังนั้นเมื่อการที่กระทำมากก็จะเป็นสาเหตุทำให้การบิดเบี้ยวของลูกสูบและกระบอกสูบด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบก็ขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีของลูกสูบและกระบอกสูบด้วย สำหรับอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากผลการทดลองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิจะมีค่าเท่ากันตลอดทั้งวัสดุ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละอุณหภูมิก็เนื่องมาจากผลกระทบของความหนาแน่นของของไหลและความหนืดมีผลกระทบกับความดันที่กระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ แต่ความไม่เท่ากันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้ก็ยังถือว่ามีความน้อยมาก

จากผลการวิจัยตามตารางที่ 2 วัสดุมีความสำคัญมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันเนื่องจากในแต่ละวัสดุจะมีค่ายังดโมดูลัส (Young's modulus, E) และค่าปัวซองเรโซว์ (Poisson's ratio, V) ซึ่งค่าทั้งสองจะมีต่อการบิดเบี้ยวของลูกสูบและกระบอกสูบแต่อย่างไรก็ตามผลกระทบก็ขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีของลูกสูบและกระบอกสูบด้วย

สรุป

1. การทดลองกับวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหานี้ในแต่ละช่วงความดันมีความสอดคล้องกัน จึงทำให้มั่นใจได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าความดันได้อย่างถูกต้อง

2. ช่วงความดันมีผลกระทบต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันคือเมื่อความดันสูงก็จะเป็นสาเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

3. อุณหภูมิในช่วง 15°C 20°C และ 25°C ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดันของชุดลูกสูบและกระบอกสูบ

4. วัสดุมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความดัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณ ร.อ. ธวัช ช่างปั้นหัวหน้าห้องปฏิบัติการความดันและสุญญากาศ คุณ อนุสรณ์ ทนหมื่นไวย หัวหน้าห้องปฏิบัติการความยาวและมิติ Dr. Wladimir Sabuka หัวหน้าห้องปฏิบัติการความดัน PTB เจ้าหน้าที่ทุกคนของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ คุณสาริต นิลไย และคุณ ทวีศักดิ์ บริษัทแอฟริแคท

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert S., 1982, Dadson, Sylvia L. Lewis, Graham N. Peggs., **The Pressure Balance Theory and Practice**, LONDON.
- [2] John KL Man., 2003, **Pressure Measurement**, National Measurement Laboratory, Australia.
- [3] European cooperation for Accreditation of Laboratories, 1997, **Calibration of Pressure Balance**, EA-4/17.
- [4] G.F. Molinar, R. Maghenzani, P. C. Cresto and L. Bianchi, 1992, **Elastic Distortions in Piston-Cylinder Units at Pressure up to 0.5 GPa**, Metrologia 1992.
- [5] G. Molinar, W. Sabuga, G. Robinson and J. C. Legras, 1998 **Comparison of methods for calculating distortion in pressure balances up to 400 MPa**, Metrologia.
- [6] Wladimir Sabuga, Otto Jusko, 2003, **The effect of PCU Geometry on the Pressure Distortion Coefficient of Pressure Balance**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, IMEKO.
- [7] N. Bonora, G. Buonanno, M. Dell' Isola, G. Givinto, 2003, **The Piston Distortion Coefficient of Clearance Controlled Pressure Balance Evaluated by Using An Analytical Method**, Università di Cassino, School of Engineering, via Di Biasio, France, IMEKO.
- [8] W. Sabuga, M. Bergoglio, G. Buonanno, J. C. Legras, L. Yagmur, 1998, **Calculation of the Distortion Coefficient and Associated Uncertainty of a PTB 1 GPa Pressure Balance Using Finite Element Analysis**, EUROMET Project 463.

- [9] T J Esward, R C Preston and P N Gelat, 2003, **Piston-cylinder pressure balance design with a negligible distortion coefficient**, National Physical Laboratory, United Kingdom, Measurement Science And Technology.
- [10] N.D. Samaan and F. Abdullah, 1998, **Computer-aided Modelling of Pressure Balances**, School of Electronic Engineering, University of South Australia, Australia, Metrologia.
- [11] Wladimir Sabuga, Otto Jusko, 1999, **Effective area of the DH Instruments piston-cylinder, piston P0107 and cylinder C0107, calculated from the dimensional measurement data**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

ภาคผนวก จ
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

A_p	คือ พื้นที่หน้าตัดระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบภายใต้ความดัน	m^2
$A_{p,t}$	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันและอุณหภูมิใดๆ	m^2
$A_{0,t}$	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิใดๆ	m^2
$A_{0,20}$	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 20 °C	m^2
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ	m
d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ	m
F_{b1}	คือ แรงพยุงอากาศ ณ เวลาที่วัดความดัน	N
F_{c1}	คือ แรงที่เกิดจากปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางการทำลง	N
F_{c2}	คือ แรงที่เกิดจากปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางการทำขึ้น	N
F_{c3}	คือ แรงที่เกิดจากแรงตึงผิวของของไหล	N
F_1	คือ แรงที่เกิดจากความดันที่กระทำบนผิวด้านบนและด้านล่างของลูกสูบ	N
F_2	คือ แรงเสียดทานที่เกิดบนผิวของลูกสูบในแนวตั้ง	N
F_3	คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ	N
f_1	คือ แรงที่เกิดจากความดันจริงที่กระทำทั้งด้านบนและด้านล่างของของไหล	N
f_2	คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในของไหล	N
f_3	คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ	N
f_4	คือ แรงที่เกิดจากความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ ที่กระทำกับ “neutral surface”	N
g	คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก	$m\ s^{-2}$
h	คือ ช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ	m
m	คือ มวลของลูกสูบและแผ่นน้ำหนัก	kg
P	คือ ความดันเกจ ณ ตำแหน่งผิวด้านล่างของลูกสูบ	Pa
p_1	คือ ความดันที่ต้องการวัดที่ตำแหน่งล่างสุดของลูกสูบ	Pa
p_2	คือ ความดันที่ตำแหน่งบนสุดของลูกสูบ	Pa

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย (ต่อ)

Q	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล	kg s^{-1}
R	คือ รัศมีของกระบอกสูบที่ยังไม่เปลี่ยนแปลง	m
R_p	คือ รัศมีที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบอกสูบ	m
r	คือ รัศมีของลูกสูบที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง	m
r_p	คือ รัศมีที่เปลี่ยนแปลงไปของลูกสูบ	m
r_0	คือ รัศมีของลูกสูบที่ตำแหน่งล่างสุด	m
t	คือ อุณหภูมิของชุดลูกสูบและกระบอกสูบในระหว่างการใช้งาน	$^{\circ}\text{C}$
U	คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบอกสูบ	m
u	คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปของลูกสูบ	m
u_2	คือ การกระจัดของรัศมีของลูกสูบที่ตำแหน่งบนสุด	m
V_1	คือ ปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางการทำงาน	m^3
V_2	คือ ปริมาตรของของไหลที่มีทิศทางการทำขึ้น	m^3
W	คือ แรงที่กระทำลงที่เกิดจากมวลของแผ่นน้ำหนักและมวลของลูกสูบ	N
W'	คือ แรงที่กระทำขึ้นที่กระทำกับลูกสูบ	N
W	คือ แรงที่กระทำลงที่เกิดจากมวลของแท่งของของไหลในรูปหน้าตัดวงแหวนระหว่างผิวของลูกสูบและแนวเส้น “neutral surface”	N
w'	คือ แรงที่กระทำขึ้นที่กระทำกับแท่งของของไหล	N
ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ ณ เวลาที่วัดความดัน	kg m^{-3}
ρ_{mi}	คือ ความหนาแน่นของแผ่นน้ำหนักแต่ละแผ่น	kg m^{-3}
σ	คือ แรงตึงผิวของของไหล	N m^{-1}
α_p	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของลูกสูบ	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
α_c	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของกระบอกสูบ	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
μ	คือ ความหนืดของของไหล	Pa s
ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล	kg m^{-3}
σ_z	คือ ความเค้นในแนวแกน	N m^{-2}
σ_{θ}	คือ ความเค้นในแนวเส้นรอบวง	N m^{-2}

คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย (ต่อ)

σ_r	คือ ความเค้นในแนวรัศมี	N m^{-2}
τ_{rz}	คือ ความเค้นในระนาบ r และ z	N m^{-2}
ε_z	คือ ความเครียดในแนวแกน	-
ε_θ	คือ ความเครียดในแนวเส้นรอบวง	-
ε_r	คือ ความเครียดในแนวรัศมี	-
γ_{rz}	คือ ความเครียดเฉือนในระนาบ r และ z	-

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายปฏิพัทธ์ วงศ์เทพ
วันเดือนปีเกิด	24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	น่าน
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	29/63 ม.10 ต.บึงคอไห อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2532	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการ
พ.ศ. 2535	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคน่าน
พ.ศ. 2538	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต ภาคพายัพ
พ.ศ. 2541	อุดมศึกษา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550	บัณฑิตศึกษา (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ