แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 3

หัวข้อเนื้อหา

กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว
กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง
ความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบ
การคำนวณหาค่าแรงของกระบอกสูบ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อศึกษาบทที่ 3 จบแล้วนักศึกษาสามารถ

1. แบ่งชนิดของกระบอกสูบได้
2. อธิบายหลักการทำงานของกระบอกสูบได้
3. คำนวณหาค่าแรงของกระบอกสูบได้
4. รู้การนำระบบนิวแมติกส์ไปใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ได้
5. หาอัตราการใช้ลมของกระบอกสูบได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
   1.1 การบรรยาย
   1.2 การมีกิจกรรมในชั้นเรียน
   1.3 การสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน

2.1 การร่วมกิจกรรมในชั้นเรียน การถามตอบ การแสดงความคิดเห็น ความแตกต่างระหว่างการทำงานของกระบอกสูบนิวแมติกส์แบบทำงานทิศทางเดียวและสองทิศทางเพื่อนำเข้าสู่อุปกรณ์ในระบบนิวแมติกส์

2.2 ผู้เรียนศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และหนังสือที่เกี่ยวข้องแล้วสรุปเนื้อหาเพื่อนำเสนอผู้สอน

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน
2. แผ่นโปร่งใส
3. เครื่องฉายภาพสามมิติ
4. วีดิทัศน์
5. ชุดสาธิตนิวแมติกส์

การวัดผลและการประเมินผล

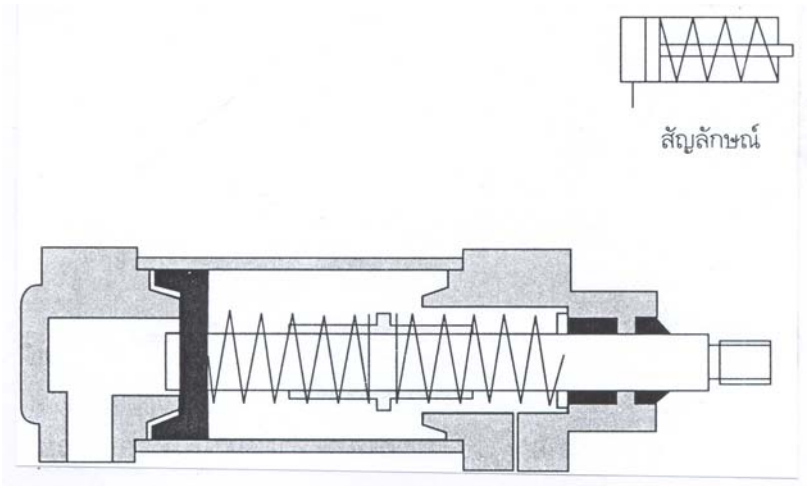
การสังเกตและบันทึกผล

1. สังเกตจากความสนใจขณะบรรยาย
2. กิจกรรมการตอบคำถาม
3. ตรวจงานจากการทำแบบฝึกหัดท้ายบท

บทที่ 3
อุปกรณ์ในระบบนิวแมติกส์

อุปกรณ์ทำงานในระบบนิวแมติกส์จะเป็นตัวทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมอัดให้เป็นพลังงานกล และมีการทำงานในแนวเส้นตรงนั้นก็คือ กระบอกสูบ จะประกอบไปด้วย ลูกสูบ ก้านสูบ ฝาครอบหัวท้าย บูชก้านสูบ และสปริงกระบอกสูบที่ใช้กันมากในระบบนิวแมติกส์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว (single acting air cylinder) และกระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง (double acting air cylinder)

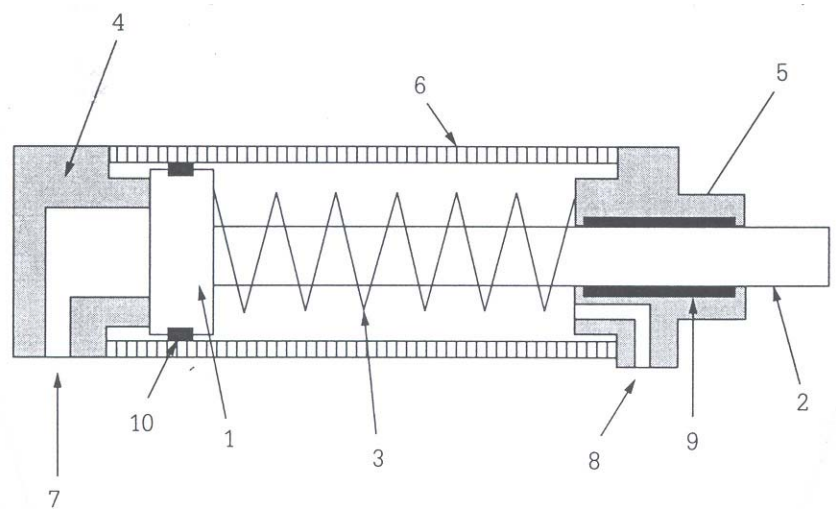
กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว



ภาพที่ 3.1 กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว
ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2546, หน้า 33)

กระบอกสูบชนิดนี้จะมีรูลมเพียงรูเดียวใช้สำหรับให้ลมอัดเข้าเพื่อดันลูกสูบให้วิ่งออก ส่วนจังหวะถอยกลับจะกลับด้วยแรงของสปริง ดังนั้นการใช้งานของกระบอกสูบชนิดนี้จึงควรใช้ในจังหวะดันออกเท่านั้น ซึ่ง ณรงค์ ตันชีวะวงศ์ (2546, หน้า 33) อธิบายว่า กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว คือ อุปกรณ์ทำงานชนิดหนึ่งที่ให้แรงในแนวเส้นตรงและทำงานทิศทางเดียว มักจะเป็นทิศทางให้ก้านสูบวิ่งออก ขณะที่ก้านสูบวิ่งออกจะดันให้สปริงภายในกระบอกสูบยุบตัว เมื่อตัดสัญญาณลมที่ป้อนเข้ากระบอกสูบให้วิ่งออก สปริงที่ยุบตัวจะคลายตัวออกมาพร้อมกับดัน

ให้ลูกสูบถอยกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิม กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียวจะมีรูต่อลมเพียงรูเดียวอยู่ทางด้านลูกสูบ ส่วนอีกรูหนึ่งอยู่ทางด้านก้านสูบจะเป็นรูระบายลมเท่านั้น ซึ่งเจาะไว้โดยที่ไม่มีเกลียวสำหรับใส่ข้อต่อลม (fitting) โครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานทิศทางเดียวดังแสดงในภาพที่ 3.2



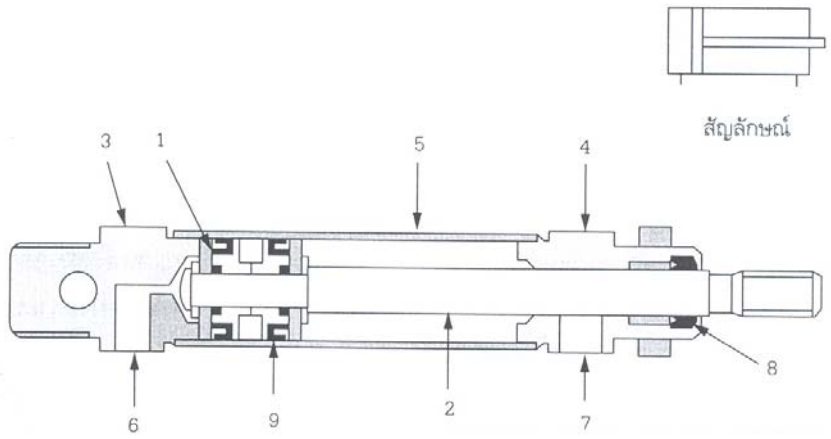
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานทิศทางเดียว
ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2546, หน้า 34)

จากภาพที่ 3.2 หมายเลข 1 ลูกสูบ (piston)
หมายเลข 2 ก้านสูบ (piston rod)
หมายเลข 3 สปริงสำหรับดันให้ลูกสูบถอบกลับ (return spring)
หมายเลข 4 ฝาครอบท้าย (base end cover)
หมายเลข 5 ฝาครอบหัว (head end cover)
หมายเลข 6 กระบอกสูบ (cylinder tube)
หมายเลข 7 รูต่อลม (pressure connection)
หมายเลข 8 รูระบายลม (vent hole)
หมายเลข 9 บูชก้านสูบ (bush and sealing element)
หมายเลข 10 ซีลลูกสูบ (piston seal)

แรงของกระบอกสูบที่เกิดจากการใส่ลมอัดเข้าไปดันลูกสูบ (ในกรณีของกระบอกสูบชนิดทำงานทิศทางเดียว) จะได้ลดลงเพราะต้องลบด้วยแรงต้านของสปริง ตัวอย่างการใช้งานของ

กระบอกสูบชนิดนี้ เช่น การจับยึดชิ้นงาน (clamping) การส่งชิ้นงาน (ejecting) การอัดชิ้นงาน (pressing) การยกชิ้นงาน (lifting) การป้อนชิ้นงาน (feeding) เป็นต้น ความเร็วของลูกสูบอยู่ในช่วง 50 - 500 มิลลิเมตร/วินาที

กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง



ภาพที่ 3.3 กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง
ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2546, หน้า 35)

กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง คือ อุปกรณ์ทำงานชนิดหนึ่งที่ให้แรงในแนวเส้นตรงทั้งจังหวะวิ่งออกและวิ่งเข้า กระบอกสูบชนิดนี้จะไม่มีสปริงอยู่ภายในกระบอกสูบ ดังนั้นการให้ลูกสูบวิ่งออกจึงต้องเอาลมอัดใส่เข้าไปทางด้านลูกสูบและการให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเดิมก็ต้องเอาลมอัดใส่เข้าไปทางด้านก้านสูบ ความเร็วของลูกสูบอยู่ในเกณฑ์ 30-1,200 มิลลิเมตร/วินาที ลักษณะงานที่ใช้มักจะเป็นงานโดยทั่ว ๆ ไป โครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทางส่วนใหญ่แล้วจะเหมือนกับกระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว คือ

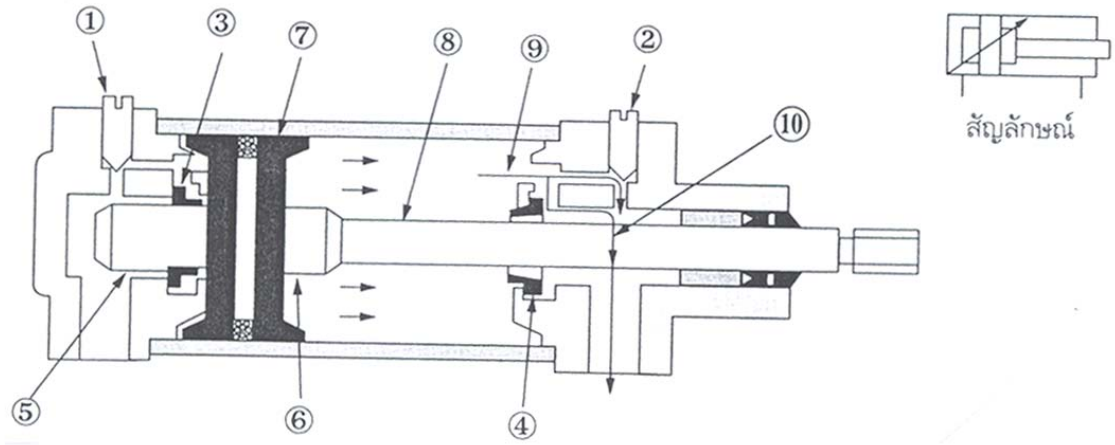
จากภาพที่ 3.3 หมายเลข 1 ลูกสูบ (piston)
หมายเลข 2 ก้านสูบ (piston rod)
หมายเลข 3 ฝาครอบท้าย (base end cover)
หมายเลข 4 ฝาครอบหัว (head end cover)
หมายเลข 5 กระบอกสูบ (cylinder tube)
หมายเลข 6 รูต่อลมด้านลูกสูบ (pressure connector, base side)
หมายเลข 7 รูต่อลมด้านก้านสูบ (pressure connector, head side)

หมายเลข 8 ซีลก้านสูบ (bush and sealing element)

หมายเลข 9 ซีลลูกสูบ (piston seal)

1. กระบอกสูบที่มีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทก

เมื่อกระบอกสูบทำงานด้วยความเร็วมาก ๆ จะทำให้ลูกสูบวิ่งกระแทกฝาครอบหัวและท้ายทำให้มีเสียงดังและชำรุดได้ง่าย วิธีการป้องกันการกระแทกทำได้โดยใช้กระบอกสูบที่มีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทกดังภาพที่ 3.4 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้



ภาพที่ 3.4 กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทางมีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทก
ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2546, หน้า 36)

เมื่อลูกสูบ (7) ถูกดันให้วิ่งออกจะทำให้ลมอัดที่อยู่ด้านก้านสูบถูกดันให้ออกจากกระบอกสูบทางหมายเลข (9) และ (10) ซึ่งขณะนี้ความเร็วของลูกสูบ (7) ก็ยังคงมีความเร็วตามปกติจนกระทั่งเดือย (6) ดันซีล (4) ให้ปิดทางออกของลมอัดหมายเลข (10) (ซึ่งเป็นทางออกตามปกติของลมในกระบอกสูบ) ทำให้ความดันลมมีทางออกเพียงทางเดียวเท่านั้นคือ ทางหมายเลข (9) แต่ทางออกหมายเลข (9) นี้จะต้องผ่านวาล์วปรับขนาดของช่องทางหมายเลข (2) ทำให้ลมอัดในกระบอกสูบวิ่งออกจากกระบอกสูบได้น้อยลง ถ้าปรับวาล์ว (2) ให้แคบลงไปอีก ความเร็วของลูกสูบก็ยิ่งลดน้อยลงไปอีก (ความเร็วของลูกสูบขึ้นอยู่กับการระบายลมอัดให้ออกมาจากกระบอกสูบได้รวดเร็วมากน้อยเพียงไร) ถ้าดูในภาพที่ 3.4 ในขณะนี้จะเป็นตำแหน่งการหดกลับของลูกสูบที่ปิดทางออกของลมอัดในทางออกปกติแต่จะเปิดทางออกของลมอัดให้ออกทางวาล์วเข็มหมายเลข (1) เท่านั้นทำให้ความเร็วของลูกสูบลดน้อยลง การกระแทกระหว่างลูกสูบกับฝาครอบทั้งด้านหัวและท้ายก็ลดน้อยตามไปด้วย

2. กระบอกสูบชนิดช่วงชักสั้น

ตารางที่ 3.1 แรงของกระบอกสูบชนิดช่วงชักสั้น

แรงในทางทฤษฎี							
กระบอกสูบทิศทางเดียว							(กิโลกรัมแรง)
	ขนาดกระบอกสูบ (มม.)	ความดันที่ใช้ (กก.แรง/ซม.^{2})			แรงสปริงเริ่มต้น	แรงสปริงสิ้นสุด	โหลดในแนวแกนของก้านสูบสูงสุด
		3	5	7			
ชนิดสปริงดันกลับ	12	1.9	4.2	6.5	1.4	0.4	0.23
	16	4.5	8.5	12.5	1.5	0.6	0.61
	20	7.8	14.1	20.3	1.6	0.6	0.67
	25	12.6	22.4	32.2	2.1	1.1	1.63
	32	21.7	37.8	53.8	2.4	1.5	1.77
	40	34.5	59.7	84.8	3.1	1.3	1.77
	50	52.9	92.1	131.4	5.5	2.5	3.1
ชนิดสปริงดันออก	12	1.4	3.2	4.8	1.1	0.3	0.23
	16	2.4	5.4	8.4	2.1	0.4	0.61
	20	4.2	8.9	13.6	2.8	0.5	0.67
	25	8.3	15.8	23.4	3.0	1.0	1.63
	32	15.0	27.1	39.2	3.0	2.0	1.77
	40	28.6	49.1	70.8	3.0	2.0	1.77
	50	40.9	73.9	106.9	8.5	2.5	3.1

กระบอกสูบสองทิศทาง				(กิโลกรัมแรง)
ขนาดกระบอกสูบ (มม.)	ทิศทางของก้านสูบ	ความดันใช้งาน (กก.แรง/ซม.^{2})		
		3	5	7
12	เข้า	2.5	4.2	5.9
	ออก	3.3	5.6	7.9
16	เข้า	4.5	7.5	10.5
	ออก	6	10	14
20	เข้า	7	11.7	16.4
	ออก	9.4	15.7	21.9
25	เข้า	11.3	18.8	26.4
	ออก	14.7	24.5	34.3
32	เข้า	18	30	42
	ออก	24	40	56
40	เข้า	31	52	73
	ออก	37	62	87
50	เข้า	49	82	115
	ออก	58	98	137
63	เข้า	84	140	196
	ออก	93	155	218

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 127)

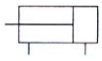
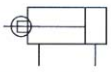
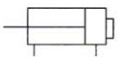
การหาค่าตามตาราง

กระบอกสูบชนิดทิศทางเดียว ชนิดสปริงดันกลับขนาดกระบอกสูบ 20 มิลลิเมตร ที่ความดันใช้งาน 5 กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร จะได้แรงของก้านสูบดันจังหวะดันออกเท่ากับ 14.1 กิโลกรัมแรงและแรงของสปริงในจังหวะเริ่มต้นเพื่อดันให้ก้านสูบหดกลับเท่ากับ 1.6 กิโลกรัมแรง และแรงของสปริงเมื่อก้านสูบหดกลับถึงตำแหน่งเดิมแล้วเท่ากับ 0.6 กิโลกรัมแรง สามารถรับโหลดที่มากระทำในแนวแกนของก้านสูบได้สูงสุด 0.67 กิโลกรัมแรง

ในกรณีกระบอกสูบทิศทางเดียวชนิดสปริงดันออกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความดันใช้งานเดียวกัน จะได้แรงของก้านสูบในจังหวะดึงกลับเท่ากลับ 8.9 กิโลกรัมแรง และได้แรงสปริงเริ่มต้น 2.8 และแรงสปริงเมื่อสิ้นสุดจังหวะแล้วเท่ากับ 0.5 กิโลกรัมแรง เป็นต้น

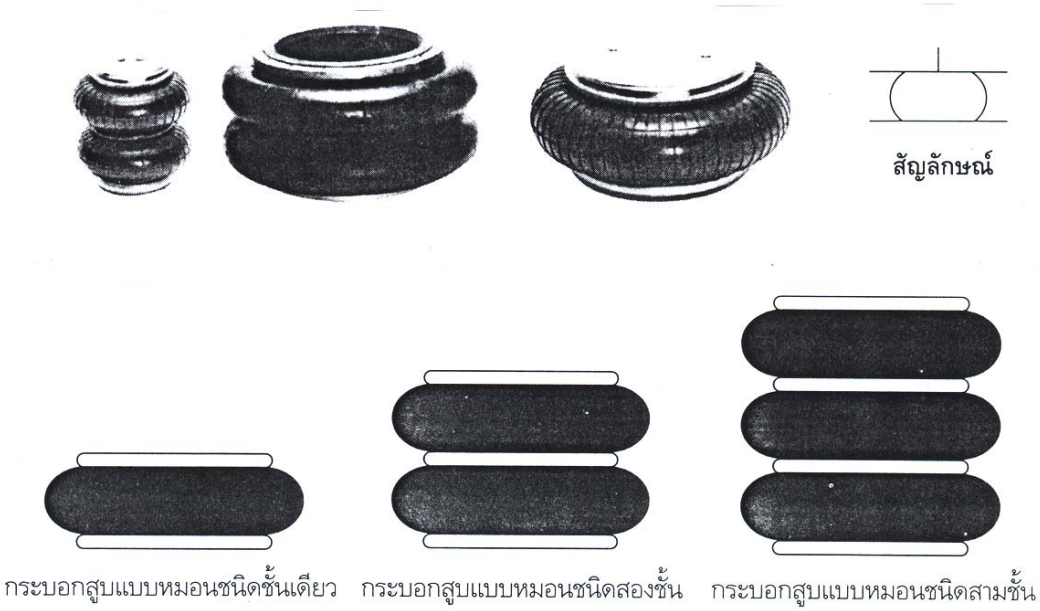
สำหรับกระบอกสูบชนิดสองทิศทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความดันใช้งาน 5 กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตรจะได้แรงของกระบอกสูบในจังหวะดันออกเท่ากับ 15.7 กิโลกรัมแรง และแรงในจังหวะหดกลับเท่ากับ 11.7 กิโลกรัมแรง เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 ขนาดช่วงชักของกระบอกสูบที่มีช่วงชักสั้น

ขนาดกระบอกสูบ (มม.)	กระบอกสูบสองทิศทาง				กระบอกสูบทิศทางเดียว	
	ชนิดก้านสูบเดียว	ชนิดก้านสูบสองข้าง	ชนิดก้านสูบหมุนไม่ได้	ชนิดยึดท้าย	ชนิดสปริงดันกลับ	ชนิดสปริงดันออก
						
	ช่วงชักมาตรฐาน (มม.)				ช่วงชักมาตรฐาน (มม.)	
12	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10	5, 10
16						
20	5, 10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	5, 10	5, 10
25						
32	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	5, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	5, 10	5, 10
40						
50	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	10, 15, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	10, 20	10, 20
63					—	—
80			—			
100						

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 128)

3. กระบอกสูบแบบหมอน



ภาพที่ 3.5 กระบอกสูบแบบหมอนแบบต่าง ๆ
ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 129)

หมอนลมเป็นอุปกรณ์งานชนิดหนึ่งในระบบนิวแมติกส์ ซึ่งทำงานในลักษณะทิศทางเดียวมีช่วงชักสั้น ๆ ตัวหมอนทำจาก fabric reinforced synthetic rubber มีหลายชนิด เช่น ชั้นเดียว สองชั้น หรือสามชั้นดังภาพที่ 3.5 ขึ้นอยู่กับช่วงชักและรุ่นที่ต้องการใช้งาน ซึ่งณรงค์ ตันชีวะวงศ์ (2547, หน้า 129) กล่าวถึงข้อดีของหมอนลมคือ ไม่มีชิ้นส่วนที่เป็นโลหะที่เคลื่อนที่จึงลดการเสียดสีของโลหะเมื่อเปรียบเทียบกับกระบอกสูบลมธรรมดาทั่ว ๆ ไป

การหดกลับของหมอนลมมักจะใช้น้ำหนักของภาระหรือตัวของหมอนลมเอง ดังนั้นอายุการใช้งานจึงมียาวนานโดยไม่ต้องบำรุงรักษามากนัก

ขนาดของหมอนลมจะมีหลายขนาดด้วยกัน เช่น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ¾ ”

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ½ ”

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6”

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8”

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10”

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12”

4. ขนาดของกระบอกสูบ

ขนาดของกระบอกสูบถูกกำหนดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ เกลียวปลายก้านสูบและช่วงชักยาวสุด (ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4)

ช่วงชักของกระบอกสูบจะสัมพันธ์กับปัญหาการโก่งของก้านสูบ ดังนั้นควรดูตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบต่าง ๆ

(หน่วย : มิลลิเมตร)

8	10	12	16
20	25	32	*40
*50	*63	*80	*100
*125	*140	*160	*180
200	250	320	400

เครื่องหมาย * แสดงค่าที่ถูกกำหนดโดย JIS B 8377

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 114)

ตารางที่ 3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ เกลียวปลายก้านสูบ ก้านสูบ ช่วงชักยาวสุด

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ	เกลียวปลายก้านสูบ	ช่วงชักยาว
40	16	M14 × 1.5	500
50	20	M18 × 1.5	600
63	20	M18 × 1.5	600
80	25	M22 × 1.5	750
100	32	M26 × 1.5	750
125	36	M30 × 1.5	1000
140	36	M30 × 1.5	1000
160	40	M36 × 1.5	1200
180	45	M40 × 1.5	1200

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 114)

ตารางที่ 3.5 การหาความยาวช่วงชักของก้านสูบ(L) ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบและภาระ

(หน่วย : มิลลิเมตร)

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (D)		40	50	63	80	100	125	140	160	180	200	224	250
เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (D)		16	20	20	25	32	36	36	40	45	50	56	63
ภาระ (กิโลกรัมแรง)	20	2950	4610	4610									
	40	2060	3220	3220									
	60	1680	2630	2630	4110								
	80	1460	2260	2260	3570								
	100	1300	2040	2040	3190	5050							
	150	1070	1670	1670	2610	4140							
	200		1450	1450	2260	3580	4540	4540					
	250			1280	2010	3130	4000	4000	5150				
	300			1180	1850	2930	3600	3600	4720	5720	7300		
	350				1770	2730	3330	3330	4400	5370	6660		
	400				1590	2520	3120	3120	4070	5000	6500	8200	
	500				1430	2270	2800	2860	3660	4500	5600	7400	9200
	600					2070	2570	2570	3340	4080	5140	6600	8300
	700					1920	2400	2400	3090	3790	4780	6050	7600
	800					1760	2250	2250	2850	3540	4480	5650	7300
	900						2120	2120	2690	3350	4220	5350	6800
	1000						2010	2010	2360	3170	4000	5100	6500
	1500						1640	1640	2120	2590	3250	4150	5200
	2000								1870	2260	2840	3610	4500
	2500									2020	2500	3190	4000
	3000										2280	2870	3650
	3500										2110	2660	3370
	4000											2480	3160
	4500												2980
	5000												2820

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (มิลลิเมตร, d = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (มิลลิเมตร), ตัวเลขในตารางคือค่าความยาวช่วงชัก (มิลลิเมตร)

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 115)

ความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบ

1. แรงของกระบอกสูบ

แรงของกระบอกสูบสามารถคำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ และความดันลมอัด ดังนี้

$$F_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \times P \times \mu_1$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \times P \times \mu_2$$

เมื่อ F_1 = แรงของกระบอกสูบในจังหวะดัน (กิโลกรัมแรง)

F_2 = แรงของกระบอกสูบในจังหวะดึง (กิโลกรัมแรง)

P = ความดันลมอัด (กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (เซนติเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (เซนติเมตร)

μ_1 = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในจังหวะดัน

μ_2 = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในจังหวะดึง

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะแปรผันตรงกับค่าตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของซีลและความต้านทานการเคลื่อนที่ของก้านสูบโดยปกติจะตั้งไว้ที่ 0.5 - 0.7

2. ปริมาณลมที่ใช้ (อัตราการใช้ลม)

อัตราการใช้ลมที่ต้องใช้ทำให้กระบอกสูบทำงาน สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของกระบอกสูบและปริมาตรของท่อ ปริมาตรของท่อจะแตกต่างกันตามวิธีการเดินท่อ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณปริมาณลมที่ใช้จากปริมาตรของกระบอกสูบดังต่อไปนี้

$$V_a = \frac{(A_1 + A_2) \times L \times (P + 1.033) \times n}{1000}$$

เมื่อ V_a = ปริมาณลมที่ใช้ (ลิตรต่อนาที คิดเทียบที่ความดันบรรยากาศ)

L = ช่วงชักของกระบอกสูบ (ซม.)

A_1 = พื้นที่ลูกสูบด้านลูกสูบ (ตร.ซม.)

A_2 = พื้นที่ลูกสูบด้านก้านสูบ (ตร.ซม.)

P = ความดันลม (kgf/cm^2)

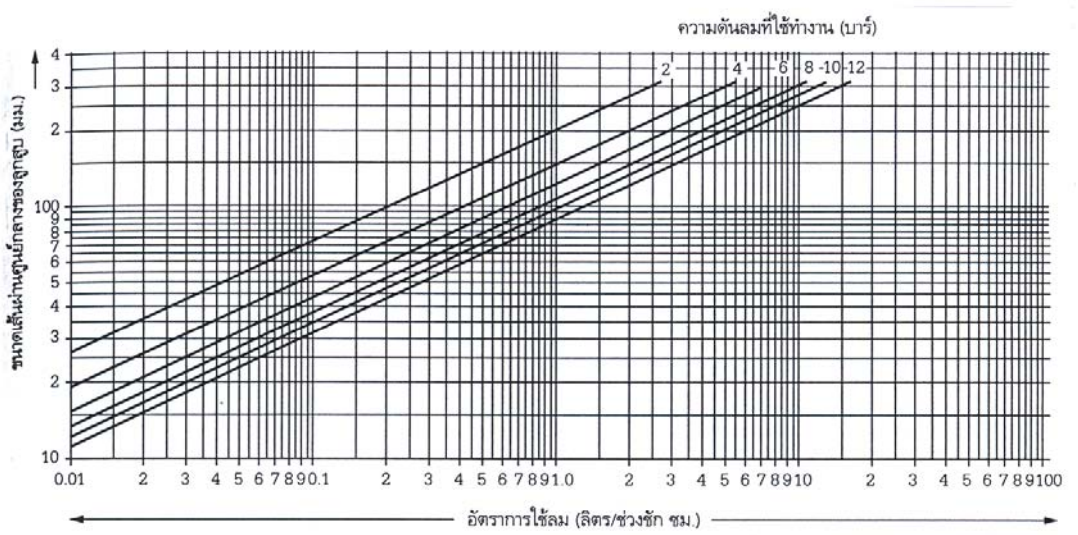
n = จำนวนครั้งที่ลูกสูบเคลื่อนที่ไป-กลับต่อนาที

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (เซนติเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (เซนติเมตร)

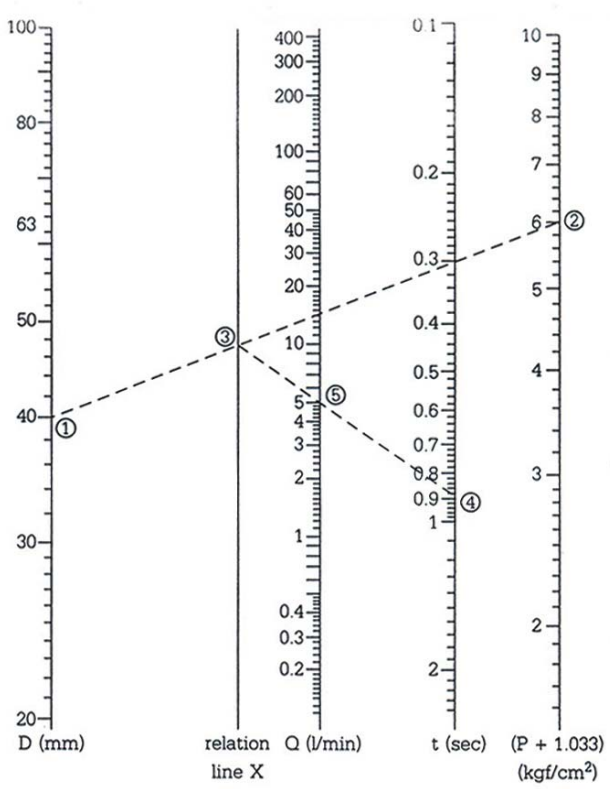


ภาพที่ 3.6 กราฟการหาอัตราการใช้ลม

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 117)

ตัวอย่างที่ 3.1 การหาอัตราการใช้ลมตามกราฟนี้คือ สมมติให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ 50 มม. เส้นผ่าน ศูนย์กลางของก้านสูบ 20 มม. ช่วงชัก 500 มม. ทำงานที่ความดัน 6 บาร์ จงหาอัตราการใช้ลม

วิธีทำ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบตามที่กำหนดให้คือ 50 มม. ลากเส้นไปตัดค่าความดันลบที่ใช้งาน 6 บาร์ จะได้อัตราการใช้ลม 0.15 ลิตร/ช่วงชัก ซม. คูณด้วยค่าช่วงชัก 50 ซม. (500 มม.) ก็จะได้ค่าอัตราการใช้ลมในจังหวะลูกสูบวิ่งออกเท่ากับ 7.5 ลิตร สำหรับอัตราการใช้ลมในจังหวะสูบถอยกลับ จะต้องเอาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบลบออกจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ (50 - 20 = 30 มม.) แล้วหาอัตราการใช้ลมอีกครั้งหนึ่ง จะได้เท่ากับ 0.0145 ลิตร/ช่วงชัก ซม. คูณด้วย 50 ซม. (500 มม.) จะได้อัตราการใช้ลมจังหวะสูบถอยเท่ากับ 0.72 ลิตร แล้วนำไปลบออกจากค่าอัตราการใช้ลมในจังหวะสูบ วิ่งออก (7.5 – 0.72 = 6.78) ก็จะได้ค่าอัตราการใช้ลมในจังหวะสูบหดเท่ากับ 6.78 ลิตร ถ้าคิดที่สูบวิ่งออกและเข้า 1 รอบ อัตราการใช้ลมเท่ากับ 14.28 ลิตร (7.5 + 6.78)



ภาพที่ 3.7 การหาอัตราการใช้ลมของกระบอกสูบขณะทำงาน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20-100 มม.) หน่วยวัดต่อช่วงชัก 10 มม. (ลิตร)

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 118)

ตัวอย่างที่ 3.2 จากภาพที่ 3.7 ให้หาอัตราการใช้ลมของกระบอกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. ทำงานที่ความเร็ว 10 มม. ต่อ 0.9 วินาที ภายใต้ความดัน 5 kgf/cm^2

วิธีทำ จุดตัด (3) ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลาง (40 มม.) กับความดันใช้งาน (5 + 1.033 kgf/cm^2) และสามารถหาจุดตัด (5) ได้โดยลากเส้นจากจุด (3) ไปจุด (4) ที่เป็นค่าของเวลาทำงาน (0.9 วินาที) สรุปว่าอัตราการใช้ลมเท่ากับ 5 ลิตร/นาที หรือคำนวณได้จากสูตร

$$Q = \frac{\pi \times 6}{4} \times D^2 \times \frac{L}{t} \times \frac{P + 1.033}{1.033} \times 10^{-5}$$

กำหนดให้

Q = อัตราการใช้ลมที่ความดันบรรยากาศ (ลิตร/นาที)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (มิลลิเมตร)

L = ความยาวช่วงชัก (มิลลิเมตร)

t = เวลา (วินาที)

P = ความดันใช้งาน (กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร)

แทนค่าในสูตร

$$Q = \frac{3.14x6}{4}\ 40 \times 40 \times \frac{10}{0.9} \times \frac{5+1.033}{1.033} \times 10^{-5}$$

$$= \frac{4.17x17,777.77x5.84}{100,000}$$

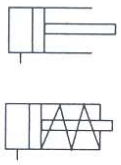
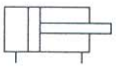
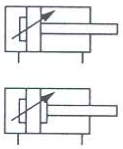
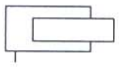
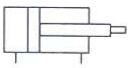
= 4.89 ลิตร/นาที หรือประมาณ 5 ลิตร/นาที มีค่าใกล้เคียงตามที่ได้จากกราฟในภาพที่ 3.7

ชนิดของกระบอกสูบ

กระบอกสูบมีมากมายหลายชนิด บางชนิดมีโครงสร้างพิเศษตามการใช้งานและวัตถุประสงค์ มีกระบอกสูบหลายชนิดถูกพัฒนาขึ้นตามความก้าวหน้าของการใช้งาน เพื่อส่งเสริมความมุ่งหมายในการควบคุมมลพิษและการประหยัดพลังงาน กระบอกสูบทำงานเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง แต่สามารถทำงานลักษณะหมุนได้เหมือนการทำงานของมอเตอร์ ลูกสูบและก้านสูบในกระบอกสูบทำงานได้โดยป้อนลมอัดเข้าไปด้านหนึ่งของกระบอกสูบ ดันให้ลูกสูบและก้านสูบเคลื่อนที่ออก ถ้าต้องการให้ก้านสูบและลูกสูบเคลื่อนที่กลับให้ป้อนลมทางด้านก้านสูบ นอกจากกระบอกสูบที่มีใช้งานกันทั่วไปแล้วยังมีกระบอกสูบอีกหลายชนิดที่แบ่งตามวิธีใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 3.6 เกี่ยวกับโครงสร้างและกระบอกสูบแบบต่าง ๆ

กระบอกสูบยังเป็นตัวทำงานด้านเครื่องกลที่อยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งสามารถถ่ายกำลังในแนวเส้นตรงได้เช่นใช้ในการจับยึด ผลัดเปลี่ยนชิ้นงานส่งต่อไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์มากมายในการใช้และกระบวนการผลิตที่ต่อเนื่อง และยังสามารถทำให้เป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติได้

ตารางที่ 3.6 กระบอกสูบชนิดต่าง ๆ

ชนิด	สัญลักษณ์	การใช้งานและลักษณะพิเศษ
กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว (single acting) ชนิดที่มีสปริงและไม่มีสปริง		ป้อนความดันลมเข้ากระบอกสูบเพียงทางเดียว และลูกสูบเคลื่อนที่กลับที่เดิมด้วยแรงภายนอก หรือแรงกระทำของสปริงที่อยู่ภายใน หรือแรงดึงดูดของโลก สปริงที่อยู่ภายในจะทำให้แรงของกระบอกสูบลดลง
กระบอกสูบชนิดทำงานสองทาง (double acting) ชนิดมีก้านสูบข้างเดียว		ป้อนความดันลมเข้าทั้งสองข้างของลูกสูบ โดยทั่วไปลูกสูบที่มีก้านสูบเพียงข้างเดียว เคลื่อนที่ไป-กลับด้วยความดันลมอัด
กระบอกสูบชนิดทำงานสองทาง (double acting) ชนิดมีก้านสูบทั้งสองข้าง		ป้อนความดันลมเข้าทั้งสองข้างของกระบอกสูบ เพื่อทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไป-กลับ พื้นที่รับความดันทั้งสองข้างเท่ากัน เพราะว่ามีก้านสูบอยู่ทั้งสองข้าง
กระบอกสูบชนิดมีตัวกันกระแทก (cylinder with cushion) ชนิดมีตัวกันกระแทกข้างเดียว และมีตัวกันกระแทกทั้งสองข้าง		ใส่เครื่องหมายกันกระแทกไว้ด้านที่ลูกสูบหยุด โดยมีการกันกระแทก เครื่องหมายลูกศรแสดงว่าปรับการกันกระแทกได้จากภายนอก
กระบอกสูบชนิดไม่มีลูกสูบ (ram cylinder)		ป้อนความดันลมเข้ากระบอกสูบเพียงทางเดียว ลูกสูบเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเดิมด้วยแรงภายนอกหรือแรงดึงดูดของโลก
กระบอกสูบชนิดมีผลต่างของลูกสูบ (differential cylinder)		อัตราส่วนของพื้นที่วงแหวน (ระหว่างกระบอกสูบและก้านสูบ) กับพื้นที่กระบอกสูบ เป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำงานของกระบอกสูบ กระบอกสูบชนิดนี้เป็นแบบทำงานสองทางโดยมีการรักษาความดันต่ำไว้ด้านก้านสูบเสมอ ความดันที่สูงกว่าจะถูกป้อนเข้าหรือระบายออกจากด้านลูกสูบเพื่อให้ลูกสูบทำงาน
กระบอกสูบชนิดแผ่นไดอะแฟรม		ใช้แผ่นไดอะแฟรมหรือแผ่นหนังเป็นส่วนรับความดัน ระยะช่วงชักไม่ยาว แต่มีลักษณะสมบัติกันลมรั่วได้ดีและมีความเสียดทานต่ำ

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2547, หน้า 120)

การคำนวณหาค่าแรงของกระบอกสูบ

แรงของกระบอกสูบคำนวณได้จากความดันลมอัด ขนาดพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ และแรงเสียดทานของกระบอกสูบโดยมีแรงของกระบอกสูบทางทฤษฎีมีค่าเป็น

$$F_{th} = A \cdot P$$

โดย F_{th} = แรงที่คำนวณได้จากทฤษฎี มีหน่วยเป็นนิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

P = ความดันลมอัด มีหน่วยเป็นบาร์

ในทางปฏิบัติ แรงที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าน้อยกว่าแรงที่คำนวณทางทฤษฎี เพราะสูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่ความดัน 4-8 บาร์ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็น 3-20 เปอร์เซ็นต์ของแรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎีและจะต้องนำค่านี้ไปคำนวณด้วย ดังนั้น

ถ้าเป็นกระบอกสูบทางเดียว

สามารถคำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง

$$F_n = A \cdot P - (F_{R+}F_F)$$

ถ้าเป็นกระบอกสูบทำงานสองทาง

สามารถคำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นจริงในขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกมีค่าเท่ากับ

$$F_n = A \cdot P - F_R$$

และแรงที่เกิดขึ้นจริงในขณะลูกสูบเคลื่อนที่กลับมีค่าเท่ากับ

$$F_n = A' \cdot P - F_R \quad \text{หรือ} \quad F_n = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot P - F_R$$

A' (พื้นที่วงแหวน) = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ - พื้นที่หน้าตัดของก้านสูบ

$$A' = A^2 - a^2$$

$$A' = \frac{\pi}{4}D^2 - \frac{\pi}{4}d^2$$

$$= \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$$

โดย F_{th} = แรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎี (theoretical piston force) มีหน่วยเป็นนิวตัน

F_n = แรงที่เกิดขึ้นจริง (effective piston force) มีหน่วยเป็นนิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

a = พื้นที่หน้าตัดก้านสูบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

A' = พื้นที่หน้าตัดวงแหวน มีหน่วยเป็นตารางเมตร

P = ความดันใช้งาน มีหน่วยเป็นบาร์หรือนิวตัน

F_R = แรงเสียดทาน (frictional force) มีหน่วยเป็นนิวตัน
(มีค่า 3-20% ของแรงที่คำนวณทางทฤษฎี)

F_F = แรงต้านเนื่องจากสปริง (force of return spring) มีหน่วยเป็นนิวตัน

D = เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรหรือเมตร

d = เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรหรือเมตร

ตัวอย่างที่ 3.3 กระบอกสูบทำงานสองทางลูกหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ 20 มิลลิเมตร แรงเสียดทาน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงทฤษฎีความดันใช้งาน 6 บาร์ จงหา

1) แรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎีของกระบอกสูบขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกและขณะเคลื่อนที่กลับ

2) แรงที่เกิดขึ้นจริงของกระบอกสูบขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกและขณะเคลื่อนที่กลับ

3) แรงที่เกิดขึ้นจริง ถ้ากระบอกสูบทางเดียวที่มีค่าแรงต้านเนื่องจากแรงของสปริงเท่ากับ 735 นิวตัน

วิธีทำ หาพื้นที่หน้าตัดลูกสูบ

เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ = 70 มิลลิเมตร = 7 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ = 20 มิลลิเมตร = 2 เซนติเมตร

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \times 7^2}{4} = 38.46 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ $= 38.46 \times 10^{-4}$ ตารางเมตร

$$A' = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{3.14}{4} \times (7^2 - 2^2) = 35.32 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดวงแหวน $= 35.32 \times 10^{-4}$ ตารางเมตร

1) หาแรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎีของกระบอกสูบทำงานสองทาง

- ขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออก

F_{th} = A . P

= (38.46×10^{-4}) ม.^{2} $\times (6 \times 10^5)$ นิวตัน/เมตร^2 [1 บาร์ = 10^5 นิวตัน/เมตร^2]

= 2,307.60 นิวตัน

- ขณะลูกสูบเคลื่อนที่กลับ

F_{th} = $A^{/}$. P

= (35.32×10^{-4}) ม.^{2} $\times$ (6×10^5) นิวตัน/เมตร^2

= 2,119.2 นิวตัน

แรงเสียดทานมีค่า 10% ของแรงทางทฤษฎี

$\therefore$ แรงเสียดทานขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออก = $2{,}307.6 \times \frac{10}{100}$ = 230.76 นิวตัน

$\therefore$ แรงเสียดทานขณะลูกสูบเคลื่อนที่กลับ = $2{,}119.2 \times \frac{10}{100}$ = 211.92 นิวตัน

2) หาแรงที่เกิดขึ้นจริงของกระบอกสูบทำงานสองทาง

- ขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออก

F_n = (A . P) - F_R

= (38.46×10^{-4}) ม.^{2} $\times (6 \times 10^5)$ นิวตัน/เมตร^2 - 230.76 นิวตัน

= 2,307.6 – 230.76

= 2,076.84 นิวตัน **ตอบ**

- ขณะลูกสูบเคลื่อนที่กลับ

F_n = ($A^{/}$. P) - F_R

= (35.32×10^{-4}) ม.^{2} $\times (6 \times 10^5)$ นิวตัน/เมตร^2 - 211.92 นิวตัน

= 2,119 – 211.92

= 1,907.28 นิวตัน **ตอบ**

3) หาแรงที่เกิดขึ้นจริงของกระบอกสูบทางเดียว

F_n = (A . P) – ($F_{R+}F_F$)

= (38.46×10^{-4}) ม.^{2} $\times (6 \times 10^5)$ นิวตัน/เมตร^2 – (230.76 นิวตัน + 735 นิวตัน)

= 2,307 – 965.76

= 1,341.84 นิวตัน **ตอบ**

นอกจากนี้สามารถที่จะหาค่าของแรงของกระบอกสูบได้จากตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การหาค่าแรงของกระบอกสูบที่คิดค่าแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงทางทฤษฎี

เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความดันใช้งาน (บาร์), แรง หน่วยเป็นกิโลกรมแรง (kgf)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
25	4	9	13	17	21	24	30	34	38	42	46	50	55	60	63
35	8	17	26	35	43	52	61	70	78	86	95	104	113	122	129
40	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180
50	17	35	53	71	88	106	124	142	159	176	194	212	230	248	264
70	34	69	104	139	173	208	243	278	310	346	381	416	451	486	519
100	70	141	212	283	353	424	495	566	636	706	777	848	919	990	1,059
140	138	277	416	555	693	832	971	1,110	1,248	1,386	1,525	1,664	1,803	1,942	2,079
200	283	566	850	1,133	1,416	1,700	1,983	2,266	2,550	2,832	3,116	3,400	3,683	3,966	4,248
250	433	866	1,300	1,733	2,166	2,600	3,033	3,466	3,800	4,332	4,766	5,200	5,633	6,066	6,498

ที่มา (ณรงค์ ตันชีวะวงศ์, 2546, หน้า 206)

ตัวอย่างที่ 3.4 กระบอกสูบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ความดันใช้งาน 6 บาร์ อ่านค่าแรงของกระบอกสูบได้เท่าไร

วิธีทำ จากตารางที่ 3.7 อ่านค่าแรงของกระบอกสูบได้ = 208 กิโลกรัมแรง

1 นิวตัน = 0.1 กิโลกรัมแรง

1 กิโลกรัมแรง = 10 นิวตัน

∴ อ่านได้ = 2,080 นิวตัน **ตอบ**

สรุป

กระบอกสูบชนิดทำงานทิศทางเดียวหรือทำงานสองทิศทางจัดเป็นอุปกรณ์ทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยน พลังงานลมให้เป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้งานเหมือนกัน คือ จะใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อนเช่นเดียวกันเพื่อให้เกิดแรงในแนวเส้นตรงทั้งการเคลื่อนที่ออกและเคลื่อนที่เข้าลักษณะการนำไปใช้งานจะเป็นงานทางด้านอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง

ขนาดของกระบอกสูบมีขนาดตั้งแต่ 12 มิลลิเมตรขึ้นไป ส่วนความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ และความดันลม นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการเสียดทานจะแปรค่าไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบจะแสดงผลได้โดยการคำนวณหาค่าแรงของ กระบอกสูบจากสูตร $F_{th} = A . P$ และ $F_n = (A . P) – (F_{R+}F_F)$

แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างกระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียวและกระบอกสูบชนิดทำงานสองทางมาให้เข้าใจ
2. จงอธิบายพร้อมให้เหตุผลถึงหลักการทำงานของกระบอกสูบที่มีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทก
3. มีอุตสาหกรรมอะไรบ้างที่นำเอาระบบนิวแมติกส์ไปใช้งาน
4. กระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียว ถ้าสปริงดันให้ลูกสูบถอยกลับมีความอ่อนไม่ได้มาตรฐาน จะเกิดอะไรขึ้นกับการทำงานของกระบอกสูบ
5. จงระบุโครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานทางเดียวมาให้เข้าใจ
6. จงระบุโครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทางมาให้เข้าใจ
7. กระบอกสูบแบบหมอนทำจากวัสดุอะไร มีข้อดีอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับกระบอกสูบทั่ว ๆ ไป
8. สมมุติให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 70 มิลลิเมตร และก้านสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ช่วงชัก 650 มิลลิเมตร ทำงานที่ความดัน 6 บาร์ จงหาอัตราการใช้ลม
9. กระบอกสูบสองทางลูกหนึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบและก้านสูบ 150 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร แรงเสียดทาน 10% ของแรงทฤษฎี ความดันใช้งาน 8 บาร์ จงหา
   9.1 แรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎีของกระบอกสูบขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกและเคลื่อนที่กลับ
   9.2 แรงที่เกิดขึ้นจริงของกระบอกสูบขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกและขณะลูกสูบเคลื่อนที่กลับ
   9.3 แรงที่เกิดขึ้นจริง ถ้าเป็นกระบอกสูบทางเดียวที่มีค่าแรงต้านเนื่องจากสปริงเท่ากับ 1,000 นิวตัน
10. กระบอกสูบทำงานสองทางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 140 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ 40 มิลลิเมตร ความดันใช้งาน 7 บาร์ แรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน 5 เปอร์เซ็นต์ของแรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎี จงหา
    10.1 แรงที่ได้จากกระบอกสูบขณะลูกสูบเคลื่อนที่ออกและลูกสูบเคลื่อนที่กลับ ทั้งแรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎีและแรงที่เกิดขึ้นจริง
    10.2 ถ้าเป็นกระบอกสูบทางเดียวและมีค่าแรงต้านเนื่องจากสปริง 1,000 นิวตัน จะมีแรงเท่าใด
    10.3 ถ้ากระบอกสูบมีภาระ (load) 480 กิโลกรัมแรง (kgf) และใช้วาล์ว 1/2 นิ้วจะมีความเร็วเท่าใด

เอกสารอ้างอิง

ฐิฑารีย์ ถมยา. (2546). **นิวแมติกส์และนิวแมติกส์ไฟฟ้าเบื่องต้น.** กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ณรงค์ ตันชีวะวงศ์. (2546). **นิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์** (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

_____. (2547). **นิวแมติกส์อุตสาหกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ประวิตร ลิมปะวัฒนะ. (2540). **นิวแมติกส์.** กรุงเทพฯ:ซีเอ็ด ยูเคชั่น.

มนูญ ชื่นชม. (2544). **นิวแมติกส์ไฟฟ้าเบื้องต้น** (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

มงคล อาทิภานุ. (2541). **นิวแมติกส์ 1.** กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.

Pneumatics in applieation : **problems - solutions – exercises.** (n.d.). Germany: n.p.